

32/uu6(552) 2^e ex

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Classificatie van riviertrajecten en kansrijkdom voor ecotopen

Een voorbeeldstudie vanuit historisch-geomorfologisch en rivierkundig
perspectief

G.J. Maas¹
H.P. Wolfert¹
M.M. Schoor²
H. Middelkoop²

- 1 DLO-Staring Centrum (SC-DLO)
- 2 Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA)

Rapport 552



Wolfert

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1997

26 JAN 1998

Usn guldig 22 *

REFERAAT

Maas G.J., H.P. Wolfert, M.M. Schoor, H. Middelkoop, 1997. *Classificatie van riviertrajecten en kansrijkdom voor ecotopen; een voorbeeldstudie vanuit historisch-geomorfologisch en rivierkundig perspectief*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 552 157 blz.; 38 fig.; 35 tab.; 75 ref.; 3 aanh.; 4 kaarten.

Voorbeeldstudie naar een classificatie van riviertrajecten, gericht op een groter inzicht in de kansrijkdom van rivierecotopen. Voor een zwak meanderend Waaltraject en een sterk meanderend IJsseltraject zijn ecotopen en fysiotopen uit het einde van de 18e eeuw in kaart gebracht (1 : 25 000) en de bijbehorende rivierkundige parameters berekend. De verschillen tussen de trajecten hangen samen met verschillen in geomorfologische processen en de ligging in de Rijn-Maasdelta. De historische en huidige situaties zijn geclassificeerd met de parameters breedte-diepteverhouding, stream power en Shields parameter. De kansen voor ontwikkeling van ecotopen in uiterwaarden worden uitgewerkt in staalkaarten met voorbeeldschetsen.

trefwoorden: classificatie, ecotoop, geomorfologie, rivierkunde, Waal, IJssel

ISSN 0927-4499

©1997 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: (0317) 474200; fax: (0317) 424812; e-mail: postkamer@sc.dlo.nl

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

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Project 7571

[rap552.evr / 09-97]

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	13
1.1 Aanleiding	13
1.2 Probleemstelling	13
1.3 Doel	14
1.4 Opzet voorbeeldstudie	14
1.5 Indeling rapport	16
2 Landschap en ontwikkeling	17
2.1 Betekenis en werkwijze	17
2.2 Verhang	18
2.3 Geologische ondergrond	19
2.4 Water- en sedimentafvoer	22
3 Fysiotopen en ecotopen	25
3.1 Betekenis	25
3.2 Werkwijze	25
3.2.1 Historische kaarten	25
3.2.2 Kartering van fysiotopen en ecotopen	30
3.3 Indeling en beschrijving	31
3.3.1 Fysiotopen	31
3.3.2 Ecotopen	37
3.3.3 Relatie ecotopen-fysiotopen-vegetatiestructuur	41
3.4 Patroonkenmerken Waal	41
3.4.1 Fysiotopen	41
3.4.2 Ecotopen	45
3.5 Patroonkenmerken IJssel	47
3.5.1 Fysiotopen	47
3.5.2 Ecotopen	49
4 Rivierkundige parameters	53
4.1 Betekenis en werkwijze	53
4.1.1 Algemeen	53
4.1.2 Bepaling van de geulvullende waterstand en afvoer	54
4.1.3 Verwerking historische profielen	57
4.1.4 Modelberekeningen met SOBEK	62
4.2 Basisparameters	66
4.2.1 Waterstand	66
4.2.2 Verhang	69
4.2.3 Afvoer	69
4.2.4 Stroomsnelheden	70
4.2.5 Breedte-diepteverhouding	73
4.2.6 Korrelgrootte	74

4.3 Afgeleide parameters	77
4.3.1 Stream power	77
4.3.2 Shields parameter	79
4.3.3 Interactie parameter	80
5 Fluviatiele processen	83
5.1 Betekenis	83
5.2 Waal	83
5.3 IJssel	92
5.4 Verschillen tussen het Waal- en het IJsseltraject	100
5.4.1 Fysische verklaring voor verschillen in morfologie	100
5.4.2 Fysiotopen en ecotopen: referentie en streefbeeld	103
5.4.3 Positie van de trajecten in het riviersysteem	107
6 Classificatie en kansrijkdom	109
6.1 Classificatie riviertrajecten	109
6.2 Kansrijkdom ecotopen	114
7 Conclusies en aanbevelingen	127
7.1 Riviertrajecten en ecotopen	127
7.2 Aanbevelingen voor het natuurbeleid	127
7.3 Aanbevelingen voor onderzoek	128
Literatuur	129
<i>Aanhangsels</i>	
1 Beschikbare historische kaarten	135
2 Historische dwarsprofielen van de Waal en de IJssel	145
3 Achtergrondinformatie t.b.v. SOBEK-berekeningen	155
<i>Kaarten/bijlagen</i>	
1 De Waal van Nijmegen tot Tiel; Fysiotopen anno 1780 en 1830	
2 De Waal van Nijmegen tot Tiel; Ecotopen anno 1780 en 1830	
3 De IJssel van Westervoort tot Zutphen; Fysiotopen anno 1840	
4 De IJssel van Westervoort tot Zutphen; Ecotopen anno 1750 en 1840	

Woord vooraf

Bij de afdeling Rivieren van het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) en de afdeling Landschapontwikkeling van DLO-Staring Centrum (SC-DLO) wordt onderzoek gedaan dat gericht is op het toekomstige beleid voor natuurontwikkeling langs de Nederlandse rivieren. Daarbij wordt gewerkt vanuit verschillende disciplines waarbij de nadruk bij RIZA ligt op de huidige rivierkundige processen in relatie tot het multifunctioneel rivierbeheer en bij SC-DLO op de vertaling van historisch gegroeide landschapspatronen naar toekomstige kwaliteiten van het landelijk gebied. In het in dit rapport beschreven onderzoek is getracht door nauwe samenwerking beide benaderingen bijeen te brengen, om zo een reëel beeld te kunnen geven van de mogelijkheden die het riviersysteem van de Rijn in zich heeft.

Het onderzoek is verricht door G.J. Maas en H.P. Wolfert van SC-DLO en door M.M. Schoor en H. Middelkoop van RIZA. Bijdragen zijn geleverd door J. Onderstal (SC-DLO) voor de verwerking van het kaartmateriaal met behulp van ARC/INFO, door A.F. Wolters en W. van de Langemheen (RIZA) voor het doen van modelberekeningen met SOBEK en door J.J.P. Lambeek en E. Mosselman van het Waterloopkundig Laboratorium (WL) voor de vergelijking met buitenlandse rivieren, de berekening van theoretische grenzen in de classificatie en een bijdrage aan de beschrijving van fysische processen. Een deel van de inzet van SC-DLO en die van het WL zijn gefinancierd door RIZA.

Gedurende het onderzoek zijn waardevolle adviezen gegeven door E.H. van Velzen (RIZA), N. Struiksma en E. Mosselman (beide WL).

Samenvatting

Voor de formulering van beleid voor het integraal waterbeheer voor de grote rivieren is het gewenst een goed inzicht te krijgen in de realiseerbaarheid van rivierecotopen. Er is echter nog weinig kennis over de fysische realiseerbaarheid van ecotopen en de daarbij behorende abiotische fysiotopten.

In dit onderzoek is daarom nagegaan of een classificatie van Nederlandse rivieren op basis van hun geomorfologische, rivierkundige en landschapsecologische kenmerken de inzichten in de kansrijkdom voor ecotopen vergroot.

Daartoe zijn als voorbeeld een zwak meanderend traject van de Waal (tussen Nijmegen en Tiel) en een sterk meanderend traject van de IJssel (tussen Westervoort en Zutphen) bestudeerd.

Riviertypen

Door middel van literatuurstudie en kaartanalyse is nagegaan of er een relatie is tussen de verschillende riviertypen in Nederland en de ruimtelijke en historische veranderingen in het verhang, de geologische ondergrond, en de water- en sedimentafvoer.

De twee trajecten kunnen beschouwd worden als typische onderdelen van de Rijn-Maasdelta. Het IJsseltraject staat model voor rivieren in het bovenste deel van de depositiezone. Dit type rivieren is sterk meanderend hetgeen waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de zandige ondergrond. De zwak meanderende Waal is typisch voor het middelste deel van de depositiezone waar rivieren geheel in jonge fluviaatiele sedimenten stromen.

Ecotopen en fysiotopten

Op basis van historisch kaartmateriaal zijn de ecotopen en fysiotopten van beide trajecten gekarteerd op schaal 1 : 25 000. Voor de Waal zijn de situaties anno 1780 en 1830 in kaart gebracht, voor de IJssel die van 1750 (alleen van ecotopen) en van 1840.

De kaarten van ecotopen en fysiotopten zijn weergegeven in bijlagen 1 t/m 4. Elk traject wordt gekenmerkt door een karakteristiek patroon van ecotopen en fysiotopten. Verhoudingsgewijs nemen bij de Waal de ecotopen zomerbed, grind- en zandbank en nevengeul een grotere oppervlakte in. Ook is er meer open water in de strangen en moerassen. De IJssel herbergt daarentegen een aantal voor dat traject unieke fysiotopten, zoals de kronkelwaardruggen en -geulen en beekstrangen.

De verdeling van ecotopen en fysiotopten langs de Waal correspondeert met de toenmalige processen: de verdeling bleef tussen 1780 en 1830 niet constant, maar veranderde geleidelijk onder invloed van wijzigende afvoeren en de eerste rivierverbeteringswerken. De ecotopen en fysiotopten langs de IJssel daarentegen waren voor

een groot deel al ontstaan in een periode voordat het Pannerdens kanaal gegraven werd, en hebben daarom geen relatie met de 19e eeuwse geomorfologische processen.

Rivierkundige parameters

Voor de twee trajecten zijn de belangrijkste rivierkundige parameters berekend voor de historische situatie rond 1800 en de voor de huidige situatie. De basisparameters afvoer, verhang, breedte, diepte en korrelgrootte zijn afgeleid uit literatuur en kaarten. Stroomsnelheden en de waterverdeling over het zomerbed en de uiterwaard zijn berekend met het model SOBEK. Om uitspraken te kunnen doen over de interacties tussen water en sediment zijn aanvullend berekend: de breedte-diepteverhouding, de stream power (het stroomvermogen), de Shields parameter en de interactieparameter.

Een overzicht van uitkomsten wordt gegeven in tabel 5.3 Ook voor wat betreft de rivierkundige parameters waren de beide trajecten zeer verschillend in de historische situatie: breedte, afvoer, stream power, Shields parameter, interactieparameter en de stroomsnelheid hadden beduidend grotere waarden bij de Waal; korrelgrootte en de afvoer door de uiterwaard waren groter bij de IJssel. Door de rivierverbeteringswerken zijn beide rivieren meer op elkaar gaan lijken; in verband met de afname van de breedte zijn de stream power en de Shields parameter toegenomen en is de interactieparameter afgenomen. Er is tevens minder variatie in stroomsnelheden.

Geomorfologische processen

Op basis van deze resultaten zijn vervolgens de geomorfologische processen beschreven die vroeger en nu voorkomen bij de Waal en de IJssel: migratie van de bedding, afkalving van oevers, vorming van op- en aanwassen, oeverwalvorming, opslibbing van de uiterwaard en verlanding van strangen. De processen, met name die in het zomerbed, blijken goed aan te sluiten bij een rivierkundige verklaring voor het ontstaan van banken. In de Waal anno 1800 was naast de vorming van plaatsvaste banken ook de vorming van vrije banken (alternerende banken en eilanden) mogelijk. De IJssel daarentegen kende slechts plaatsvaste banken in meanderbochten. Welke van de genoemde processen voorkomt hangt sterk samen met de breedte-diepteverhouding van de rivieren.

Alle historische kenmerken en processen wijzen op een grotere dynamiek van de Waal, hetgeen ook blijkt uit een berekening van de migratie van het zomerbed omstreeks 1800. Deze bedroeg bij de Waal gemiddeld 0,21 ha/km/jr en bij de IJssel 0,04 ha/km/jr. Ook nu nog biedt de Waal meer perspectieven voor de ontwikkeling van dynamische fysiotopen, zij het dat niet alle processen kunnen terugkeren in hun vroegere vorm. Banken, bijvoorbeeld, komen door de veranderde en vastgelegde breedte-diepteverhouding in de huidige rivieren niet meer boven gemiddeld waterpeil uit.

Classificatie

De verkregen inzichten zijn tenslotte vertaald in een voorstel voor de classificatie van riviertrajecten. Daarin is de ecologische toestand van de trajecten van de Waal en de IJssel afgezet tegen rivierkundige parameters die òn nauw samenhangen met de geconstateerde verschillen in dynamiek van de geomorfologische processen òn beïnvloed kunnen worden door rivierkundige maatregelen. Gekozen is voor de breedte-diepte-verhouding en de stream power of de Shields parameter.

Op basis van deze classificatie is voor een aantal ecotopen aangegeven in welk van de twee riviertrajecten kansen liggen voor de ontwikkeling daarvan. Dit binnen de randvoorwaarden van scheepvaart en veiligheid. Specifiek kansrijk voor de Waal zijn: ondiep laagwaterbed, stroomdalgrasland op oeverwal/rivierduin, dynamische ruigte langs aangekoppelde strang en zachthoutoibos. Langs de IJssel daarentegen hebben nevengeul, hardhoutoibos op (oude) oeverwal, moerassen in geïsoleerde strangen, beekstrangen en bloemrijke akkers meer kansen.

Deze kansen zijn uitgewerkt in vuistregels voor de planning van ecotopen in uiterwaarden waarin naast de randvoorwaarden en kansen voor ontwikkeling van ecotopen ook de meest kansrijke of interessante locatie binnen een uiterwaard en relevante maatregelen of vormgeving worden besproken.

Conclusies en aanbevelingen

Uit het onderzoek blijkt dat het goed mogelijk is om op basis van historische gegevens ecotopen en fysiotopen te karteren en rivierkundige parameters te berekenen. Er kan dus een redelijk betrouwbare reconstructie gemaakt worden van de toestand van de riviertrajecten vòòr de rivierverbeteringswerken en van de belangrijkste geomorfologische processen die daarin werkzaam waren.

De relaties tussen geomorfologische, rivierkundige en ecologische kenmerken blijken verwerkt te kunnen worden in een classificatie die bruikbaar is voor het doen van uitspraken over de kansrijkdom van ecotopen. Aangezien nog slechts twee riviertrajecten zijn bestudeerd dient de classificatie nog verder getoetst te worden aan meer en anderssoortige (ook buitenlandse) riviertrajecten, om geldig te kunnen zijn voor geheel Nederland.

De huidige streefbeelden voor natuurontwikkeling sluiten niet optimaal aan bij de historische situatie van de onderzochte trajecten. Kansen voor de ontwikkeling van ecotopen kunnen beter benut worden door streefbeelden beter te laten aansluiten op de verschillen in het (historische) karakter en functioneren van riviertrajecten. Kennis hierover kan inzichtelijk gemaakt worden door de kansrijkdom van ecotopen weer te geven op een kaart van alle riviertrajecten.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Bij de formulering van beleid voor het integraal waterbeheer voor de grote rivieren worden streefbeelden en doeltypen voor natuur vaak uitgedrukt in termen van ecotopen. Voorbeelden van rivierecotopen zijn een zandige nevengeul, een afgesloten strang, een rietmoeras en een oeverwal met rivierduinvorming. Ecotopen zijn in het landschap herkenbare en ruimtelijk te begrenzen ecologische eenheden. Een ecotoop onderscheidt zich van andere ecotopen door kenmerken van zowel abiotische, biotische als antropogene aard. Bij een uniform beheer en ontwikkelingsstadium van de vegetatie wordt de begrenzing van een ecotoop bepaald door een abiotische eenheid van gelijke omvang, die fysiotoop genoemd wordt (Rademakers en Wolfert, 1994; Wolfert, 1996).

Om streefbeelden voor natuur realistisch te kunnen uitwerken en resultaten van monitoringprogramma's op de juiste wijze te kunnen beoordelen, is het gewenst een goed inzicht te krijgen in de realiseerbaarheid van ecotopen. Duidelijk dient te zijn welke ecotopen kunnen voorkomen onder welke omstandigheden en op welke plaats in het riviersysteem. Over de relaties tussen fysiotoop, beheer en vegetatieontwikkeling is al redelijk veel bekend. Kennis over de fysische realiseerbaarheid van fysiotoopen ontbreekt echter grotendeels.

1.2 Probleemstelling

Dat niet alle fysiotoopen overal even kansrijk zijn blijkt uit het feit dat er langs de rivieren diverse trajecten onderscheiden kunnen worden met elk verschillende patronen van ecotopen en fysiotoopen (Wolfert, 1992; Grontmij, 1994; Rademakers et al., 1996). Deze zijn deels in het verleden ontstaan, maar ook in de actuele situatie zijn er ruimtelijke verschillen in rivierkundige processen waargenomen, bijvoorbeeld in de hoeveelheid afgezet oeversediment bij hoge afvoeren (Sorber, 1997).

Om voldoende inzicht te krijgen in de geografische spreiding van de kansrijkdom van diverse fysiotoopen in het rivierengebied, is het dan ook noodzakelijk de fysisch geografische verschillen binnen de Nederlandse rivieren te onderkennen en te beschrijven. Hierbij is een classificatie van riviertrajecten van grote betekenis. Een dergelijke indeling geeft namelijk de mogelijkheid verbanden te leggen op een hoger niveau dan dat van de individuele uiterwaard.

Naast deze ruimtelijke verschillen zijn er veranderingen in de tijd. Vooral door de rivierverbetering ten behoeve van de veilige afvoer van water en de scheepvaart aan het einde van de 19^e eeuw, zijn de vorm van het zomer- en winterbed en daarmee het karakter van de waterstroming ingrijpend veranderd. Dit heeft de fysische

processen in de rivier duidelijk beïnvloed, met bijvoorbeeld als gevolg dat enkele historische fysiotopen zijn verdwenen.

Om uitspraken te kunnen doen over de kansrijkdom van rivierecotopen is dan ook niet voldoende om alleen verbanden te leggen tussen de geomorfologische gesteldheid, de rivierkundige processen die hebben geleid tot het ontstaan daarvan en de daarbij passende ecologische referenties. Er moet ook aangegeven worden welke de huidige rivierkundige processen zijn, welke historische veranderingen onomkeerbaar zijn en welke processen beïnvloed kunnen worden door inrichtingsmaatregelen.

Omdat nog niet geheel duidelijk was hoe de disciplines geomorfologie, rivierkunde en landschapsecologie in samenwerking een goed bruikbare classificatie van riviertrajecten op kunnen stellen en of deze te koppelen is aan de mogelijkheden voor ecologisch herstel, is eerst deze voorbeeldstudie uitgevoerd.

1.3 Doel

Doel van de voorbeeldstudie classificatie riviertrajecten is zicht te krijgen op een methode voor classificatie van riviertrajecten, die bruikbaar is voor het doen van uitspraken over de kansrijkdom voor rivierecotopen. Uit het onderzoek moest blijken of een classificatie van Nederlandse rivieren op grond van de geomorfologie, rivierkunde en landschapsecologie de inzichten in de differentiatie binnen de Nederlandse rivieren vergroot en of daaraan de kansrijkdom voor rivierecotopen gekoppeld kan worden.

1.4 Opzet voorbeeldstudie

Aangezien het hier gaat om een voorbeeldstudie zijn niet alle riviertrajecten bestudeerd. Op basis van eerdere studies (Wolfert, 1992; Rademakers et al., 1996) zijn er twee geselecteerd die door hun duidelijke verschillen geschikt leken om de mogelijkheden van een classificatie te verkennen (fig. 1.1):

- het zwak meanderende traject van de Waal tussen Nijmegen en Tiel (km 884,5-916,3);
- het sterk meanderende traject van de IJssel tussen Westervoort en Zutphen (km 880,3-928,1).



Fig. 1.1 De ligging van de twee onderzochte trajecten in het Nederlandse rivierengebied

Om zowel de verschillen in kenmerken als mogelijke oorzaken van deze verschillen te kunnen achterhalen, zijn van deze trajecten drie verschillende aspecten bestudeerd:

- de ligging van de trajecten in het landschap van de Rijn-Maasdelta en de grootschalige holocene ontwikkeling van de delta in relatie tot een globale indeling in riviertypen;
- de patroonkenmerken van de trajecten op het niveau van ecotopen en fysiotopen en hun historische, huidige en toekomstige ontwikkeling en de daaraan ten grondslag liggende geomorfologische processen;
- de op diverse punten gemeten rivierkundige kenmerken van de trajecten en de berekening van parameters die gerelateerd zijn aan het rivierkundige gedrag, alsmede de ontwikkelingen daarin.

Op basis van de waargenomen kenmerken is vervolgens nagegaan welke fluviatiele processen een rol spelen en in hoeverre de beide trajecten daarin van elkaar verschillen. Het verkregen inzicht in de verschillen, oorzakelijke verbanden en werking van de processen is tenslotte gebruikt om een aanzet voor een classificatie van riviertrajecten op te stellen, en de vertaling daarvan naar kansrijkdom voor ecotopen te toetsen.

1.5 Indeling rapport

Na deze inleiding worden in dit rapport de resultaten van de analyses van de drie bovengenoemde aspecten gepresenteerd in de hoofdstukken 2, 3 en 4. Op basis van deze gegevens worden de fluviale processen van de twee trajecten met elkaar vergeleken in hoofdstuk 5. Een aanzet voor een systeem van classificatie en indrukken van de kansrijkdom van ecotopen worden gepresenteerd in hoofdstuk 6. Het rapport sluit af met enkele conclusies over de perspectieven voor gebruik van een classificatie van riviertrajecten, en aanbevelingen voor het toekomstig rivierbeheer en verder onderzoek in hoofdstuk 7.

2 Landschap en ontwikkeling

2.1 Betekenis en werkwijze

In het algemeen bepalen de afvoer en het verhang van een rivier het vermogen om materiaal op te nemen en te transporteren, terwijl de weerstand daartegen bepaald wordt door de eigenschappen van de geologische ondergrond. Binnen stroomgebieden veranderen deze variabelen in stroomafwaartse richting: de afvoer neemt toe, het verhang wordt kleiner en ook de korrelgrootte van de afzettingen neemt af. Daardoor veranderen de dynamiek van de rivier en de geomorfologische gesteldheid van de rivierdalbodem of de uiterwaarden van karakter. Deze gradiënt is soms geleidelijk maar vaak sprongsgewijs, waardoor in een riviersysteem diverse zones en trajecten onderscheiden kunnen worden.

In riviersystemen kunnen drie stroomgebiedszones onderscheiden worden (Schumm, 1977). Deze geomorfologische driedeling hangt samen met verschillen in hoogteligging en drainagepatroon, veroorzaakt door tektonische bewegingen in de ondergrond en de reactie van geomorfologische processen daarop:

- een hooggelegen erosiezone waar het regenwater zich verzamelt en waar door erosie van de aardkorst voornamelijk afbraak van de aardkorst plaatsvindt;
- een transportzone waar het water en de erosieproducten grind, zand, leem en klei voornamelijk doorgevoerd worden;
- een laaggelegen depositiezone waar de erosieproducten worden afgezet en het aangevoerde water over een breed gebied verdeeld.

Binnen deze zones zijn veelal weer diverse riviertrajecten te onderscheiden, met elk een eigen dynamiek en geomorfologische gesteldheid. Klassieke voorbeelden zijn vlechtende en meanderende rivieren, maar er bestaan ook vele varianten daartussenin. Verschillen tussen riviertrajecten hangen samen met geleidelijke of abrupte veranderingen in de geologische ondergrond en het landschap, of met plotselinge veranderingen in de afvoer van water of sediment bij de monding van zijrivieren of splitsingspunten. Ook ingrepen door de mens kunnen leiden tot verschillende riviertrajecten.

Voor de onderzochte trajecten is daarom nagegaan in hoeverre zij verschillen met betrekking tot de landschappelijke ligging en de daarmee samenhangende geologische gesteldheid. De resultaten worden in dit hoofdstuk beschreven. De nadruk ligt daarbij op de grootschalige veranderingen in het riviersysteem met betrekking tot: het verhang van het landschap, de geologische ondergrond en veranderingen in afvoer van water en sediment, in relatie tot de sinuositeit van het rivierpatroon en enkele grootschalige geomorfologische processen. De analyse berust vooral op literatuurstudie en analyse van overzichtskaarten van de geologische, geomorfologische en bodemkundige gesteldheid.

2.2 Verhang

De Waal en de IJssel zijn gelegen in de depositiezone, de delta, van de Rijn. Deze zone heeft zich hier gedurende het Holoceen gevormd. Onder invloed van de stijgende zeespiegel is in deze periode een dik pakket fluviatile sedimenten (de Betuwe Formatie) afgezet, naar het westen overgaand in (peri)mariene afzettingen (de Westland Formatie). Daardoor is de terrassenkruising, die de overgang van transportzone naar depositiezone markeert, geleidelijk in stroomopwaartse richting verschoven (fig. 2.1). Ook in stroomopwaartse richting verschoven is de grens tussen het hellende bovenste deel van de delta (het rivierengebied) en het vrijwel vlakgelegen onderste deel (het zeekleigebied) (Weerts en Berendsen, 1995).

In de periode voor de grote rivierverbeteringswerken viel de laatstgenoemde grens samen met een ruimtelijke overgang van riviertypen: de meanderende rivieren van het rivierengebied maakten hier plaats voor een riviertype met een vrij rechte loop en stabiele eilanden daarin en met ongerijpte kleien in de overstromingsvlakte. (Wolfert, 1992). Uit gemeten hoogwaterstanden blijkt duidelijk dat dit type onder

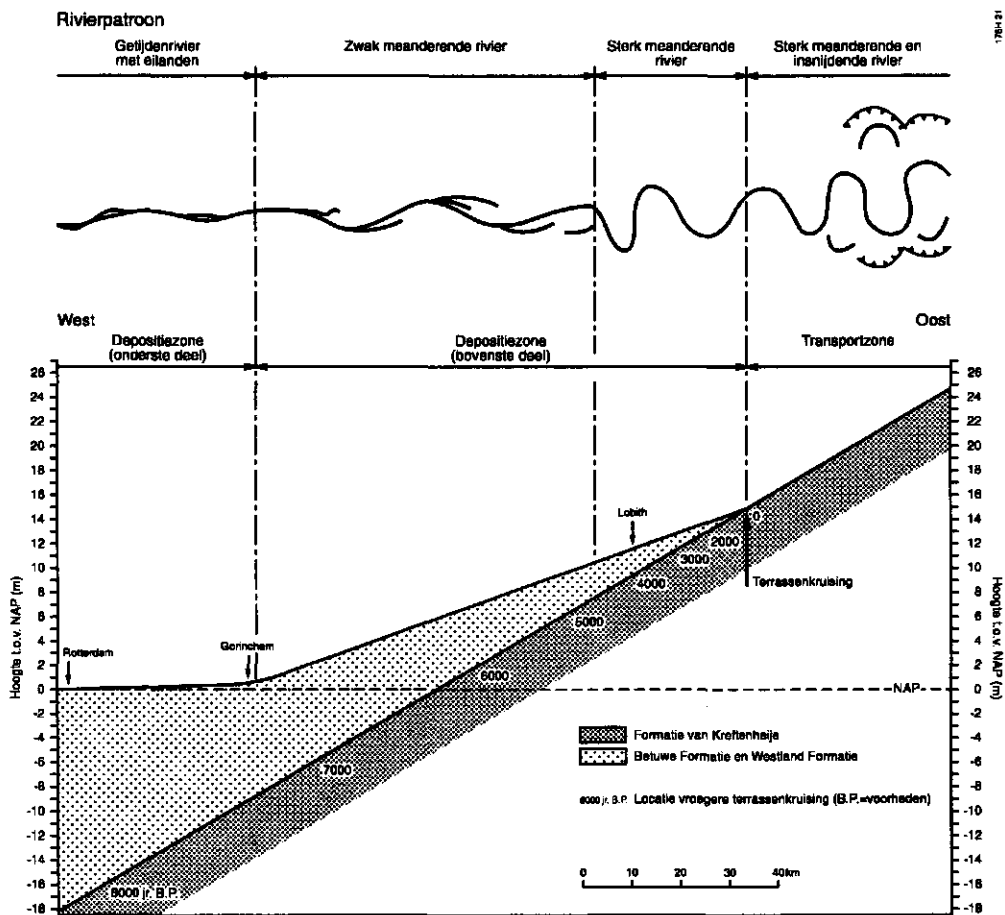


Fig. 2.1 Het verband tussen zeespiegelstijging, afzettingmilieu, geologische ondergrond en riviertypen in de Rijn-Maasdelta (deels naar: Törnqvist, 1993)

invloed stond van getijdenwerking en stormvloeden. Deze overgang hing dus nauw samen met het afzettingmilieu en het daarbij behorende verhang.

Binnen het bovenste deel van de delta is ook een ruimtelijke overgang van riviertypen herkenbaar. Zowel de Waal als de IJssel beginnen bij het splitsingspunt met een grote sinuositeit, die vervolgens vrij plotseling afneemt. Zowel het zomerbed als de dijken vertonen deze verandering hetgeen aangeeft dat die van nature optrad. De oorzaak lag echter niet bij een verandering van het verhang: de toppen van de holocene oeverwallen aan weerszijden van de Waal vertonen een rechte verhanglijn met een gemiddeld verhang van ca. 0,00012. Langs de IJssel is het verhang aanvankelijk klein (ca. 0,00008), om daarna toe te nemen tot ca. 0,00018 tussen Deventer en Zwolle. In de richting van de IJsseldelta neemt het verhang dan weer af. Er is bij de IJssel echter geen directe ruimtelijke samenhang tussen deze veranderingen en een verandering van riviertypen.

De beschreven opeenvolging van een sterk meanderend rivertraject via een zwak meanderend riviertraject naar een smallere en rechttere getijdenrivier komt ook voor bij de Overijsselse Vecht (Wolfert et al., 1996).

2.3 Geologische ondergrond

De holocene rivierafzettingen (de Betuwe Formatie) zijn afgezet op oudere, pleistocene, fluviaatiele afzettingen (de Formatie van Kreftenheije) die een ander karakter hebben. Zij zijn gevormd in een periode met een veel kouder klimaat, bestaan daarom uit grindhoudende grove zanden en zijn afgezet door brede vlechtende rivieren. De afzettingen hebben veel minder ruimtelijke variatie in samenstelling dan die uit het Holoceen. Het holocene rivierenlandschap kenmerkt zich door het voorkomen van diverse zandige stroomgordels, opgebouwd door veel smallere rivieren die telkens hun loop verlegden, en door daartussen gelegen kommen met zware komkleien.

De dikte van de Betuwe Formatie neemt stroomafwaarts toe (zie fig 2.1). Langs de IJssel is de dikte bovenstrooms gering (ca. 1-2 m), neemt dan toe tot 3 à 4 m tussen Voorst en Wijhe, om vervolgens weer af te nemen tot 1 à 2 m bij Zwolle (Schelling, 1951; Hamming et al., 1965; Van de Meene, 1977; Stichting voor Bodemkartering, 1979). Als gevolg hiervan is er langs de Rijntakken een geleidelijke verandering van substraat waarneembaar. Dicht bij de terrassenkruising stromen de rivieren nog voornamelijk in Kreftenheije afzettingen, die daar bedekt zijn met een dun pakket holocene komklei. In stroomafwaartse richting wordt het holocene pakket steeds dikker, terwijl ook de samenstelling daarvan verandert (fig. 2.1). Aanvankelijk overheersen de zandige afzettingen uit brede stroomgordels, later overheersen uitgestrekte veen- en kleilagen de smalle stroomgordels van anastomoserende riviertakken.

Het onderzochte sterk meanderende traject van de IJssel is voornamelijk gelegen in pleistocene rivierafzettingen bedekt door een relatief dunne laag komklei. In stroomafwaartse richting gaat de IJssel over in zwak meanderend traject. Bij het onderzochte traject van de Waal daarentegen is het holocene pakket al dikker, en wisselen zandige beddingafzettingen uit stroomgordels af met zware komkleien. Daar is juist in stroomopwaartse richting een sterker meanderend traject aanwezig. De dikte van het holocene pakket lijkt dus van invloed op het patroon van de rivier: een dik dek van komklei levert waarschijnlijk veel weerstand tegen zijdelingse verplaatsing van de rivier; bij ondiepe rivieren wordt ondergraving van onderliggende zandige lagen tegengegaan wanneer de klei dikker is dan ca. 2 à 3 m. Sterke meandering is waarschijnlijker bij een dunner pakket, terwijl bij dikkere kleiafzettingen een zwak meanderende loop ontstaat.

Deze constatering sluit aan bij eerdere waarnemingen waarbij de aard van de geologische ondergrond van invloed bleek op het gedrag van de rivier: de omslag van meanderende naar anastomoserende rivieren wordt voor een deel toegerekend aan de dikte van het fluviatiele kleipakket (Törnqvist, 1993). Op plaatsen waar de grote rivieren oudere stroomgordels kruisen is de sinuositeit van de rivier plaatselijk veelal groter (Berendsen, 1982).

Bovendien zijn er zowel langs de Waal als langs de IJssel langs de zwak meanderende trajecten oudere lopen gelegen met kenmerken die typisch zijn voor een sterk meanderend systeem. Bij de IJssel gaat het om een uitgestrekte zone, die gezien de ligging van de dijk al verlaten was voor de bedijking (fig. 2.2). De overgang van sterk naar zwak meanderend kan eveneens verklaard worden door het geleidelijk dikker worden van de holocene afzettingen.

Bij deze hypothese wordt wel verondersteld dat de riviertypen al voor de bedijking zijn ontstaan. Aanwijzing hiervoor is dat de sinuositeit van de dijken veelal sterk lijkt op die van de naastgelegen riviertrajecten. Aangezien de dijken vermoedelijk het eerst zijn aangelegd in de lagere, nattere delen van het riviersysteem en zij daar de zijdelingse verplaatsing van de rivierloop nog verder tegengehouden hebben, heeft de aanleg van dijken de verschillen tussen sterk en zwak meanderende rivieren vermoedelijk nog versterkt.



Fig. 2.2 De verandering van sterke naar zwakke meandering langs de IJssel ten zuiden van Deventer, zoals weerspiegeld in de patronen van oude rivierlopen en strangen (naar: Stichting voor Bodemkartering, 1979)

2.4 Water- en sedimentafvoer

De stroomgordels van de Waal en de IJssel zijn nog vrij jong (Törnqvist, 1993). Het benedenstroomse deel van de Waal heeft vanaf ca. 400 AD geleidelijk de afvoer overgenomen van de Linge die bij Tiel is afgedamd in 1304. De IJssel functioneert sinds ca. 250 AD; langs de IJssel blijkt zelfs alle komklei jonger te zijn (Spek et al., 1996). De historische ontwikkelingen zullen dus van grote invloed zijn geweest op de huidige patronen van fysiotopen en ecotopen. Enkele grootschalige ontwikkelingen in de afvoer van water en sediment kunnen daarbij van invloed zijn geweest op het rivierpatroon.

In verband met de zeespiegelstijging verplaatsten de mondingen van de Waal en de IJssel zich ook in de historische tijd aanvankelijk nog in stroomopwaartse richting. Plotselinge landinwaartse verplaatsingen van de monding van een rivier kunnen terugschrijdende erosie met zich meebrengen. Bij de IJssel speelde de uitbreiding van het Almere tot Zuiderzee een grote rol: sinds ca. 1000 AD mondde de IJssel uit in de Zuiderzee hetgeen bij Kampen inderdaad insnijding en grotere stroomsnelheden met zich meebracht (Dirkx et al., 1996). Bij de Waal was de St. Elizabethsvloed in 1421, waarbij de Biesbosch ontstond, van betekenis. Er wordt wel verondersteld dat deze gebeurtenis invloed heeft gehad op het gedrag van het splitsingspunt bij Pannerden en aldaar verzanding van de IJssel heeft veroorzaakt. Of dat ook mogelijk is wordt door anderen betwijfeld: op basis van berekeningen van de rivierspecifieke morfologische tijdschaal voor aggradatie en degradatie van de Waal lijkt de afstand tot het splitsingspunt te groot om binnen ca. 300 jaar effect gehad te hebben (Ploeger, 1992).

De rivieren werden gedurende de 12e tot de 14e eeuw bedijkt. Tegelijkertijd vonden grootschalige ontginningen in het achterland plaats. Dit moet grote verandering in de water- en sedimenthuishouding met zich meegebracht hebben. De bedijking veroorzaakte een snellere aggradatie in het buitendijkse gebied. Mogelijk heeft de bedijking de zijdelingse migratie van het zomerbed belemmerd, en hebben de rivieren tijdens grote afvoeren een ander stromingspatroon gekregen. Dat de bedijking juist in de lager gelegen trajecten plaatsvond, kan dus een extra stimulans geweest zijn voor een minder sterk meanderend gedrag.

Ontginning van het achterland zal een grotere afvoer van water en sediment met zich mee hebben gebracht, met name tijdens en net na de ontginning, doordat een deel van de voormalige grondwaterberging werd afgevoerd, en er veel bodemerosie plaatsvond. Vanaf ca. 1200 AD heeft de IJssel een begin gemaakt met de vorming van de IJsseldelta. Deze is al vanaf 1364 ontgonnen (Dirkx et al., 1996), waaruit blijkt dat de delta in ca. 150 jaar min of meer de huidige vorm heeft gekregen. De depositie in de IJsseltakken is sindsdien minder intensief verder gegaan zoals onder ander blijkt uit meldingen van verzanding in 1480 en 1614. Bij de Waal vond een sterke uitbreiding van de delta van de Biesbosch plaats gedurende de 16^e tot halverwege de 19^e eeuw (Zonneveld, 1960).

Ook de natuurlijke tendens tot stroomgordelverlegging is na de bedijking aanvankelijk nog aanwezig geweest. In de 17e eeuw werd bij het splitsingspunt verzanding van

het instroompunt van de Rijn gemeld als gevolg van een veranderende transportcapaciteit; in 1696 voerde de Neder-Rijn (samen met de IJssel) nog slechts 1/24 deel van de Boven-Rijnafvoer af (Ploeger, 1992). Als oplossing is in 1707 is het Pannerdensch kanaal geopend en werd in 1775 de Pleij bij Arnhem doorgegraven. De afvoer van de Waal nam hierdoor sterk af en die van de IJssel toe. In 1792 werden waarden gemeten van respectievelijk 68,9% en ca. 7% van de Boven-Rijn afvoer (zie par. 4.1.2). De IJssel heeft pas later de bij de nagestreefde verdeling behorende afvoer van 1/9 deel van die van de Boven-Rijn bereikt.

Vanaf de 19e eeuw zijn de rivieren genormaliseerd, voor een betere afvoer van water, ijs en sediment, met het oog op de scheepvaart en veiligheid voor overstromingen. De breedte van het zomerbed is teruggebracht, kribben zijn aangelegd en oevers verstevigd. Deze ontwikkeling heeft insnijding van het zomerbed veroorzaakt, een tendens die sinds de 20e eeuw nog versterkt wordt door het baggeren van zand uit het zomerbed. De verticale erosie is het sterkst bij de Bovenrijn, neemt dan in stroomafwaartse richting geleidelijk af om vervolgens tussen Tiel en Fort St. Andries over te gaan in depositie (Taal, 1994). Door de rivierkundige maatregelen is de grens tussen transport- en depositiezone dus opgeschoven in stroomafwaartse richting.

Aangenomen wordt dat de insnijding van de rivieren zal verdergaan (Taal, 1994). Voor de langere termijn moet rekening gehouden worden met een verandering van klimaat (Silva en Kok, 1996) waardoor de maatgevende afvoer zal toenemen, en daarmee de sedimentverplaatsing.

3 Fysiotopen en ecotopen

3.1 Betekenis

Riviertrajecten onderscheiden zich van elkaar door een verschillende geomorfologische gesteldheid. Kenmerk van een riviertraject is veelal het voorkomen van een bepaald, zich steeds herhalend patroon van terreinvormen die ten opzichte van elkaar een specifieke ligging hebben. Patroon en ligging weerspiegelen de processen van hun vorming en daarmee van de dynamiek in het betreffende riviertraject. Het reliëf is daarnaast van grote invloed op de overstromingsfrequentie en -duur.

Om de kenmerken van een riviertraject te kunnen beschrijven kunnen dus geomorfologische eenheden gebruikt worden. Bovendien hebben geomorfologische eenheden een direct verband met de voor rivierecotopen relevante variabelen morfodynamiek en hydrodynamiek. De morfodynamiek is direct gekoppeld aan de genese van terreinvormen, waarbij over het algemeen de mate van dynamiek afneemt met toenemende afstand tot het zomerbed. De hydrodynamiek is direct gerelateerd aan de hoogte van de terreinvormen: hier nemen de overstromingsfrequentie en -duur met de afstand tot het zomerbed juist toe, omdat de laagste delen van de uiterwaard meestal het verst van het zomerbed verwijderd liggen.

Om aan te sluiten op andere beleidsstudies wordt hier niet gewerkt met een classificatie van terreinvormen, maar met een indeling volgens het Rivier-Ecotopen-Stelsel (Rademakers & Wolfert, 1994) Daarin worden ecotopen en fysiotopen onderscheiden (zie voor een omschrijving par. 1.1).

In dit hoofdstuk wordt het onderzoek naar de toestand, ontwikkeling en dynamiek van fysiotopen en ecotopen in de riviertrajecten van de Waal (km 884,5-916,3) en IJssel (km 880,3-928,1) beschreven. Na deze inleiding volgt allereerst een beschrijving van de werkwijze. Hierin ligt de nadruk op het gebruik van het historisch kaartmateriaal en de beschrijving van de fysiotopen en ecotopen. Vervolgens worden per rivier de historische situatie en de veranderingen in de tijd in beeld gebracht.

3.2 Werkwijze

3.2.1 Historische kaarten

De laatste jaren is veel historisch kartografisch onderzoek gedaan naar de toestand van de grote rivieren en uiterwaarden in het verleden (Middelkoop et al., 1992, 1993, 1994; Overmars, 1992, 1993, 1995 Schoor, 1994; Hesselink & Berendsen, 1996) Hierdoor is veel historisch kaartmateriaal van met name de Waal, Nederrijn en Maas

in archieven achterhaald en gedocumenteerd. De IJssel is nog maar beperkt historisch geografisch onderzocht.

De studies die tot op heden zijn uitgevoerd richtten zich op de ontwikkelingen in de tijd in één bepaalde uiterwaard of op de ontwikkelingen in het zomerbed alleen. In deze studie willen we de historische ontwikkeling van twee grotere riviertrajecten in hun geheel analyseren. Daarvoor is idealiter voor beide trajecten op minimaal twee gelijke tijdstippen trajectdekkend historisch kaartmateriaal nodig. Voor één tijdstip, de 19^e eeuwse situatie leverde dit geen problemen op. De eerste rivierkaart van Goudriaan (1831), schaal 1 : 10 000 beschrijft op systematische wijze en geometrisch juist de grote rivieren van Nederland. Voor oudere gegevens bleek het nodig vooraf inzicht te verschaffen in het beschikbare kaartmateriaal. In de eerste fase van deze studie is daarom een inventarisatie gemaakt van de beschikbare en bruikbare historische kaarten van beide riviertrajecten. Daarbij is gebruik gemaakt van de literatuurverwijzingen in voorgaande onderzoeksrapporten, niet gepubliceerde gegevensbestanden van historische kaarten (Middelkoop, Schoor), literatuur (Donkersloot-De Vrij, 1981; Koeman, 1985; Scholten, 1989) en is het Rijksarchief in Gelderland (RAG) bezocht.

De bruikbaarheid van historische kaarten voor dit type onderzoek is sterk afhankelijk van de geometrische kwaliteit en de kwaliteit van de informatie op de kaart. Daarvoor is het van belang te weten:

- door wie en wanneer is de kaart gemaakt;
- met welk doel is de kaart gemaakt;
- de wijze waarop de kaart is gemaakt.

Het meest geschikt zijn de rivierkaarten, pre-kadastralekaarten van uiterwaarden en militaire kaarten van (water)linies die door veldverkenning door een 'geadmitteerde'; landmeter zijn gemaakt. Op deze kaarten zijn de rivier en de uiterwaarden (buitenlanden) het onderwerp waaraan bij de kartering bijzondere aandacht is besteed. Voor kaartvergelijking is de kwaliteit van de geometrie van 16^e en 17^e eeuwse kaarten vaak nog onvoldoende. Vanaf de 18^e eeuw neemt, onder invloed van nieuwe landmeetmethoden, de kwaliteit van de geometrie van kaarten enorm toe. Doordat bepaalde elementen in het landschap (bv. dijken, perceelsgrenzen) onveranderd zijn gebleven kunnen deze kaarten aangepast worden aan het bestaande geometrisch stelsel en wordt kaartvergelijking mogelijk.

Minder geschikt zijn overzichtskaarten van bijvoorbeeld de staatkundige situatie en samengestelde kaarten. Vaak zijn deze kaarten gemaakt door kaarttekenaars die bestaand kaartmateriaal uit verschillende perioden kopieerden. Om tot een uniform produkt te komen werden in sommige gevallen details toegevoegd of weggelaten.

Uit de inventarisatie (zie aanhangsel 1) en beoordeling van de bruikbaarheid van de historische kaarten kwam de periode 1720-1780 als meest geschikte 2^e tijdstip voor vergelijking naar voren. De voordelen van deze periode zijn:

- de kwaliteit van de beschikbare kaarten van beide riviertrajecten is hoog
- van de Waal zijn van het gehele traject kaarten beschikbaar

De nadelen van deze periode zijn:

- van het IJsseltraject is maar 50% beschikbaar

- de kaarten van de IJssel stammen voornamelijk uit 1723-1760; die van de Waal uit 1776-1778, waardoor de periode van vergelijking niet helemaal overeenkomt.

18^e eeuwse kaarten van de Waal

Rivierkaarten

- Kaart der rivier de Waal van de mond van het Pannerdensche kanaal tot de paal van 't Ambt Nederbetuwe in 't jaar 1777 Beijerinck, F., 1777 (RAG Rijkswaterstaat nr. 33).

Op deze rivierkaart van de Waal van Pannerden tot Winssen ligt het accent op informatie over bedding, zandbanken en rijswaarden. Voor het gedeelte Pannerden-Nijmegen is ook het bodemgebruik in de uiterwaarden nauwkerig weergegeven. De geometrie van de kaart is goed.

Verpondingskaarten (pre-kadestrale kaarten)

- Metinge der buitenlanden in den Ampte van Nederbetuwe. Atlas met 6 kaarten, blad 1: Hien-Wely-Doodeweerd, blad 2: Doodeweerd-Ochten, blad 3: IJzendoorn Echteld Beijerinck, M. en W., 1778 (RAG. AK18).

De verpondingskaarten van de noordelijke Waaluitwaarden van Dodewaard tot Tiel zijn gemaakt om belasting te heffen op buitendijks gelegen gronden. De hoogte van de grondbelasting was zowel afhankelijk van de oppervlakte van de percelen als van de aard en kwaliteit van het grondgebruik. De verpondingskaarten zijn daarom geometrisch zeer goed en ook het grondgebruik (vegetatiestructuur) is op een deel van de kaarten zeer gedetailleerd weergegeven (zie fig 3.1). Daarnaast bestaan er registers waarin informatie (eigenaar, oppervlakte, grondgebruik, bijzonderheden etc.) over de op de kaart afgebeelde percelen is opgenomen. Ook afwijkende vegetaties in delen van percelen zijn aangegeven. 'Slegt wijland nog onland', geeft aan dat er naast grasland ook nog een moerassige laagte in het perceel ligt. Deze afwijking is op de kaart terug te vinden door een kleine wijziging in de arcering.

- Kaart van de Buijten Landen onder Deest, Afferden en Winssen. Hendrikman, H.G. en P. Prilleritz, 1776, 1778 (RAG Verpondingskaarten nr 195).
- Kaart van de Buijten Landen onder Leeuwen en Druten. Hendrikman, H.G. en P. Prilleritz, 1776, 1778 (RAG Verpondingskaarten nr 171).
- Kaart van de Buijten Landen onder Dreumel. Hendrikman, H.G. en P. Prilleritz, 1776, 1778 (RAG Verpondingskaarten nr 174).

Deze drie verpondingskaarten van de zuidelijk Waaluitwaarden van Winssen tot Dreumel zijn in dezelfde periode en met hetzelfde doel als de noordelijke Waaluitwaarden in kaart gebracht. De kaarten van Hendrikman en Prilleritz zijn geometrisch van dezelfde kwaliteit als de kaarten van Beijerinck maar qua vegetatiestructuur minder gedetailleerd. Zijn op de kaarten van Beijerinck met name in en langs de strangen veel verschillende structuurtypen gekarteerd, op de kaarten van Hendrikman en Prilleritz is in de uiterwaarden alleen onderscheid gemaakt tussen water en weiland. De rijswaarden, zandbanken en begrenzing van het zomerbed van de rivier zijn wel nauwkeurig gekarteerd. Van deze kaarten zijn tijdens dit onderzoek geen registers gevonden.

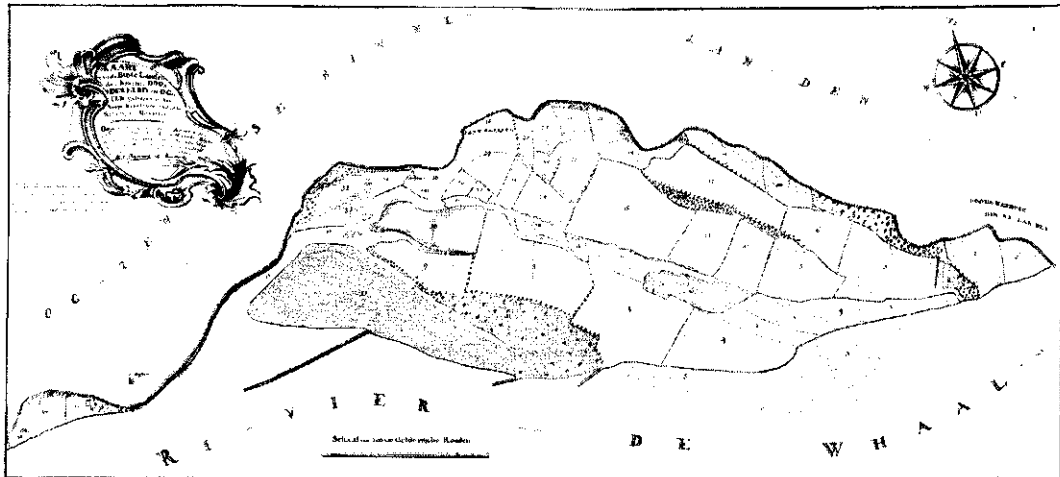


Fig. 3.1 Verpondingskaart van de uiterwaarden bij Ochten (Beijerinck, 1778)

18^e eeuwse kaarten van de IJssel

Rivierkaarten

- Kaart van de rivier de IJssel.. den Emptepol.. gelegen in de heerlijkheit Westervoort, en verder beneden waart langs een gedeelte der buijtenlanden gehorende de repectieve geërfdens der heerlijkheit Lathum. Beijerinck, M., 1771. (RAG Gerlderse Rekenkamer k77).
- Kaart vertonende den loop van de rivier de IJssel, langs domain goederen deser provincie met desselfs zuydoever en een gedeelte van de bandijk onder de baronie van Bahr en Lathum. Beijerinck, M., 1776 (RAG Gelderse rekenkamer k81).
- Plan van den Rivier den IJssel tegen en beneden de Bahrsche Rhijsweerd onder de baronie van Bahr en Lathum. Beijerinck, M., 1776. (R.A.G Gelderse Rekenkamer k83)

Deze rivierkaarten zijn door Beijerinck gemaakt om een nauwkeurig beeld te geven van de erosie van de zuidoever van IJssel bij Lathum en Bahr. Voor de kaart is waarschijnlijk veel veldwerk vericht getuige de systematische dieptemetingen van het zomerbed. De geometrie van deze kaarten is goed. De dieptemetingen worden uitgewerkt in hoofdstuk 4.

Militaire kaarten

- Caart van de Rievier den IJssel van boven de Brummer schans tot beneden Zutphen. Leenen, W., 1740 (ARA.Osk.Y14).
- Kaart van de Suyde weart gelegen tusschen de Groenestraat, en de Rivier de IJssel, en de Laak aan de suyd oost zijde van het dorp Reede. Leenen, W., 1753 (RAG Gelderse Rekenkamer k214).
- Caart figuratief van de situatie van de rivier den IJssel [ter hoogte van de Suydeweart] met de daarin geleezene Cribben en ander rhijswerken. Leenen, W., 1759-1760 (RAG Gelderse Rekenkamer k80).

— De kaart van de stad Zutphen en haare environs. Hottinger, J.H., G.F. Smedeken en J.L. Bercken 1779 (ARA Geniearchief OSPV Z3).

Onder invloed van de toenemende oorlogsdreiging in de dertiger jaren van de 18^e eeuw werden onderzoeken gedaan naar een mogelijke IJsselinundatie. De kaarten van Leenen zijn met dit doel gemaakt. Zij geven een gedetailleerde weergave van de rivier en de uiterwaarden. Strangen, zandbanken en rijswaarden staan nauwkeurig op kaart. Helaas is het binnendijkse gebied niet juist weergegeven en is de geometrie van de kaarten niet helemaal goed, waardoor de inpassing in de huidige topografie wordt bemoeilijkt. Dit in tegenstelling tot de kaart van Hottinger et al. waarop de inundaties in december 1779 zijn weergegeven, die geometrisch wel correct is en waarop ook de percelering en het bodemgebruik van het binnendijkse gebied juist is weergegeven. De beperkingen van deze kaart zijn het ontbreken van informatie over zandbanken in het zomerbed en het feit dat de kaart slechts een klein deel van het riviertraject omvat.

Verpondingskaarten (pre-kadestrale kaarten)

— Heuvel, van den I. (1723) Den Fraterweerd (RAG Algemene kaartenverzameling nr 913)

Deze kaart van de Fraterwaard ten noorden van Doesburg is zoals de meeste verpondingskaarten van een goede kwaliteit. De geometrie is erg goed en ook de informatie over het grondgebruik is gedetailleerd.

Stads en landgoedplattegronden

— Heijs, van H. (1778). Het havesaet en adelijk huijs Bingerden (RAG Algemene kaartenverzameling nr 127 . Uit: Petersen, 1974)

Op de kaart van het Huis Bingerden (zuidwestelijk van Doesburg) is een klein deel van de IJsseluiterwaarden behorende bij het landgoed weergegeven. De geometrie van de kaart is redelijk goed zodat ter plekke de zuidoever van de IJssel en '4 morgen rijswaard' konden worden gelokaliseerd.

Kaartbronnen 19^e eeuw

De 19^e eeuwse situatie van fysiotopen en ecotopen is afgeleid van de eerste systematische rivierkaart van B.H. Goudriaan, schaal 1 : 10.000. Voor de verschillende riviertakken zijn verschillende series kaarten gemaakt. Voor de Waalwaterwaarden is gebruik gemaakt van de bladen 3 t/m 7 van de 'Kaart van de rivieren De Boven Rijn, De Waal, De Merwede, De Oude en een gedeelte van de Nieuwe Maas van Lobith tot Brielle' uit 1831.

Van de Kartering van de IJssel zijn de bladen 1 t/m 6 van de IJsselkaarten gebruikt. Het veldwerk voor deze kaarten is uitgevoerd in de periode 1840-1843.

Kaartbronnen 20^e eeuw

Voor de huidige karakterisering van de fysiotopen en ecotopen zijn de gegevens van de projecten Rhine-Econet (Reijnen, 1995) en Integrale verkenning Rijntakken (IVR)(Silva et al., 1996) gebruikt . In het project Rhine-Econet zijn alleen de fysiotopen van de Waal gekarteerd op schaal 1 : 50 000. In de Integrale verkenning Rijntakken zijn voor de Waal en de IJssel de ecotopen afgeleid uit de vegetatiestructuur (luchtfoto's) in combinatie met de gegevens van 2-dimensionale modellen over overstromingsduur en stroomsnelheid (IVR, 1996).

3.2.2 Kartering van fysiotopen en ecotopen

De basis voor de kartering van de fysiotopen en ecotopen in zowel de 18^e als 19^e eeuwse toestand was een 'uitgeklede' digitale versie van de Rivierkaart 1831/1843 (Goudriaan), van het RIZA. Dit bestand met informatie over de dijken, oevers van het zomerbed, oeververdediging en zandbanken is op transparant, maatvast papier op schaal 1 : 10 000 (IJssel) en 1 : 25 000 (Waal) afgedrukt. De reproducties van de 18^e eeuwse kaarten uit de archieven (met sterk uiteenlopende kaartschalen) zijn fotografisch aan deze schalen aangepast.

Van de Waal zijn allereerst de fysiotopen zoals ze uit de historische kaarten uit 1776-1778 kunnen worden afgeleid met de hand op een maatvaste afdruk van het basisbestand ingetekend. De historische informatie is aangevuld met actuelere data zoals (RAF) luchtfoto's, bodem- en geomorfologische kaarten, voor die delen van de uiterwaarden die sinds de 18e eeuw niet meer van vorm veranderd zijn. Vervolgens is de kaart gedigitaliseerd met behulp van Arc-info, een software pakket voor het opslaan, bewerken en presenteren van geografische gegevens. (ESRI, 1989)

Uit de fysiotopen en de vegetatiestructuur zijn de ecotopen in 1776-1778 afgeleid, vastgelegd op een maatvaste kopie van de fysiotopenkaart 1776-1778 en gedigitaliseerd. Op vergelijkbare wijze zijn de fysiotopen en ecotopen 1831 gekarteerd. De ontwikkelingen van 1776-1831-1990 zijn gekwantificeerd door middel van een Arc-info overlayprocedure.

Van de IJssel zijn eerst de fysiotopen en ecotopen anno 1843 gekarteerd. Ook hierbij is gebruik gemaakt van actuelere bronnen zoals luchtfoto's (genomen vlak na hoog water), vooral om het patroon van kronkelwaardgeulen en verlande strangen exacter in beeld te brengen. Deze kaarten zijn eveneens gedigitaliseerd met Arc-info. De gedetailleerde weergave van de patronen in de uiterwaarden van de IJssel bood vervolgens de mogelijkheid om de geometrisch minder betrouwbare 18^e eeuwse kaarten van de IJssel te plaatsen in het 19^e eeuwse beeld. Dit was mogelijk omdat de rivier de IJssel in deze periode geen sterke verleggingen van het zomerbed (meer) kende. Op een maatvaste afdruk van de ecotopenkaart zijn de delen van de uiterwaard aangegeven die in of sinds de 18^e eeuw zijn gevormd. Deze veranderingen zijn gedigitaliseerd en vergeleken met de situatie van 1831.

Aanvullend is een militaire topografische kaart gedigitaliseerd van een deel van de IJssel van Westervoort tot Doesburg, die gemaakt is rond 1670 door I. van Geelkerken, (zie figuur 3.2). Deze kaart bevat gedetailleerde informatie over zandbanken, kronkelwaardbanken en rijswaarden. De geometrie van de kaart is niet toerijkend om het patroon van de bedding met de 18^e eeuwse situatie te vergelijken, maar de oppervlakte van herkenbare fysiotopen en ecotopen geeft wel inzicht in de toestand en dynamiek van de IJssel in de 17^e eeuw.

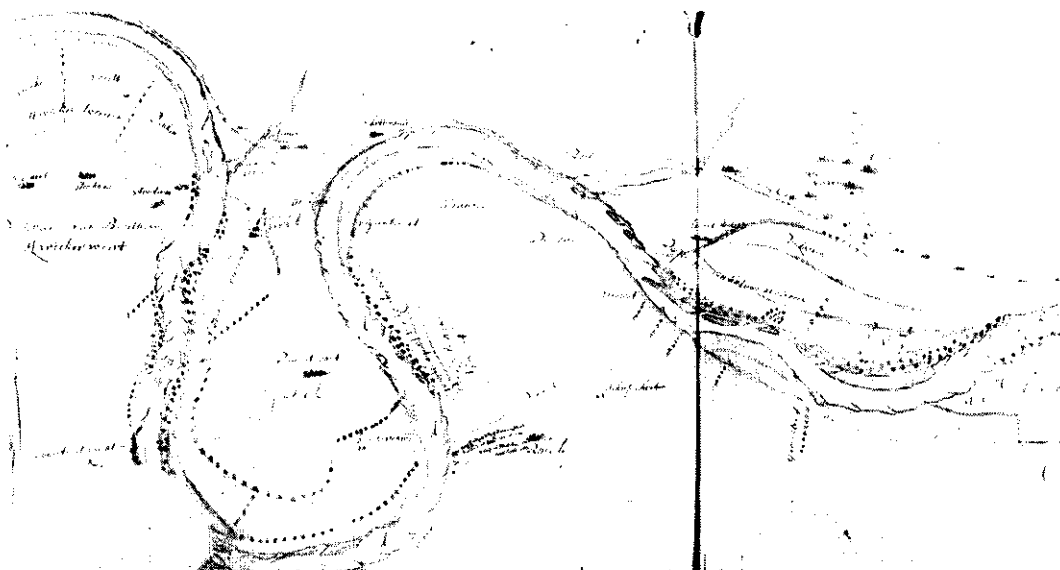


Fig. 3.2 Een fragment uit de kaart van de rivier de IJssel tussen Arnhem en Deventer, gemaakt door I. van Geelkercken omstreeks 1670 (ARA aanwinst XXI nr. 12)

3.3 Indeling en beschrijving

3.3.1 Fysiotopen

Uitgangspunt voor de hier gebruikte classificatie van fysiotopen is de fysiotopenindeling van de projecten Rhine-Econet (Reijnen et al., 1995) en De Gelderse Poort (Harms et al., 1994). De beschrijving van de fysiotopen is echter aangepast aan de historische situatie, dat wil zeggen dat er geen door de mens kunstmatig gecreëerde terreinomstandigheden onderdeel uit kunnen maken van een fysiotop. Bijvoorbeeld het in de oorspronkelijke indeling onderscheiden fysiotop 'geïsoleerde strang/kleiput' is in deze studie voor de historische situatie beperkt tot 'geïsoleerde strang'. Bij de fysiotopen met de toevoeging '(kade)' is onderscheid gemaakt tussen delen die wel en delen die niet worden beschermd door een zomerkade. De volgorde van beschrijven weerspiegelt globaal de ligging van de fysiotopen, vanaf de bedding tot de winterdijk te beginnen bij de bedding zelf.

Laagwaterbedding

Tot de laagwaterbedding behoren alle permanent stromende diepe en ondiepe delen van het zomerbed van de rivier. Andere fysiotopen in het zomerbed zijn grindbanken, zandbanken, kronkelwaardbanken en nevengeulen. Het patroon van de bedding kan variëren van vrijwel recht, tot sterk meanderend. De laagwaterbedding is het deel van de rivier waar zowel bij hoge als bij lage afvoeren de hoogste stroomsnelheden voorkomen. Door de stroming treden zand en grindtransport op en wordt slib in suspensie meegevoerd. Het getransporteerde materiaal is afkomstig van bedding- en/of oevererosie. Zandige oevers zijn makkelijk erodeerbaar waardoor beddingen zich snel

kunnen verleggen. Bestaan de oevers uit klei of veen dan verleggen rivierbeddingen zich minder snel.

Wijze van karteren: De oeverlijn vormt de begrenzing van het fysiotoop.

Grindbank, zandbank en kronkelwaardbank

Grind- en zandbanken zijn periodiek droogvallende platen in het zomerbed van de rivier die bestaan uit grind en (grof) zand. Grind- en zandbanken komen voor als eiland (middelzand of opwas) en als plaat (aanwas) tegen de oever (in de binnenbocht) van de bedding. De factoren die het voorkomen en de positie van banken bepalen zijn: de sinuositeit en de breedte-diepteverhouding van de bedding, de stroomsnelheid en de aard van het bedding- en oevermateriaal. Grindbanken kunnen alleen gevormd worden bij hoge stroomsnelheden en de aanwezigheid van grindrijk substraat in de bedding van de rivier. Zandbanken kunnen ten opzichte van grindbanken onder minder dynamische omstandigheden worden gevormd.

Een bijzonder type bank is de kronkelwaardbank. Kronkelwaardbanken zijn lange, smalle, sikkelvormige ruggen (meestal van zand) in de binnenbocht van een meanderende rivier die bij hoge afvoeren in het zomerbed worden gevormd. Deze vorming gaat min of meer gelijk op met oevererosie in de buitenbocht. Na elke vorming van een nieuwe kronkelwaardbank is de bedding van de rivier circa de breedte van de kronkelwaardbank naar buiten toe opgeschoven. In de binnenbocht ontstaat zo een patroon van naast elkaar liggende smalle ruggen en geulen dat een kronkelwaard wordt genoemd. Kronkelwaardbanken onderscheiden zich van zandbanken door hun specifieke ligging en vorm en grotere mate van stabiliteit. Bij een actief meanderende rivier is een eenmaal gevormde kronkelwaardbank een stabiel fysiotoop. Andere zandbanken en platen in het zomerbed zijn, zo blijkt ook uit deze studie, veel dynamischer. Treedt er in de buitenbocht geen oevererosie (meer) op doordat de oever bijvoorbeeld met kribben is vastgelegd, dan kunnen, afhankelijk van de hoeveelheid zand en stroomsterkte in de bedding, met een hoge afvoer wel kronkelwaardbanken worden gevormd. Bij gemiddelde afvoeren worden deze echter weer snel geërodeerd, zodat netto geen nieuw fysiotoop ontstaat.

Wijze van karteren: Voor alle fysiotoopen in het zomerbed geldt dat de weergave op historische kaarten sterk afhankelijk is van het op dat moment heersende rivierpeil. Zowel om praktische redenen van toegankelijkheid van de uiterwaarden als het specifieke doel om juist zand, en grindbanken in kaart te brengen is het aannemelijk dat de historische kaarten bij gemiddelde tot lage rivierstanden zijn opgenomen. Om militair strategische redenen wilde men op de hoogte blijven waar linies kwetsbaar waren door doorwaadbare plaatsen in de rivier. In verband met de regeling van het eigendomsrecht en de waardebeoordeling was men juist geïnteresseerd in de nauwkeurige ligging en oppervlakte van 'nieuw land' in de rivier. In de signatuur van kaartvlakken is echter op historische kaarten geen onderscheid gemaakt tussen zandbanken en grindbanken. Incidenteel zijn op 17^e en 18^e eeuwse kaarten specifieke aanwijzingen gegeven over landgebruik of de materiaal langs de oever van de rivier. Het karteren van grindbanken was dus deels afhankelijk van een min of meer toevallige aanduiding van 'grind'. Daar waar verpondingskaarten zijn gebruikt ligt dat anders. In de bij deze kaarten behorende registers is van eilanden en banken in de rivier steeds

aangegeven of er sprake is van zand of grind. De rivierkaart van 1830/43 maakt geen onderscheid tussen zand en grind. Daarom zijn in de 19^e eeuwse situatie alle platen als zandbanken gekarteerd. Kronkelwaardbanken zijn alleen daar gekarteerd waar sprake was van meandering en een stelselmatige uitbreiding van een rivierbocht in een bepaalde richting. De smalle zandruggen op historische kaarten in deze bochten zijn als kronkelwaardbanken op de kaart gezet.

Nevengeul

Een nevengeul is een nagenoeg permanent meestromende geul. Nevengeulen komen in verschillende hoedanigheden voor:

- door de vorming van één groot eiland of middelzand, of een reeks van kleinere eilanden wordt de laagwaterbedding over een korte afstand gesplitst in een laagwaterbedding en nevengeul;
- geulensystemen in zand-en grindbanken;
- geulen in uiterwaarden (systemen van strangen) met zowel een bovenstroomse als benedenstroomse open verbinding met de laagwaterbedding.

De eerste twee typen zijn nevengeulen met de dynamiek van het zomerbed. Ligging, vorm en oppervlakte van deze nevengeulen is sterk afhankelijk van het zand- en grindtransport en het stromingspatroon bij hoge afvoeren. Nevengeulen in het zomerbed hebben een bedding van zand en grind.

Nevengeulen van het laatste type liggen als strangen in de uiterwaard, maar onderscheiden zich van strangen door een bovenstroomse open verbinding met de laagwaterbedding. Ze vormen geen onderdeel van het zomerbed en zijn dus ook minder dynamisch. Op historische kaarten blijven ze door de jaren heen herkenbaar doordat ze nauwelijks van morfologie en positie veranderen. Door de permanente stroming blijft het beddingsubstraat zandig en zijn de kleiige oevers steil.

Wijze van karteren: Nevengeulen zijn niet als kaarteenheden op historische kaarten onderscheiden. Zij zijn de resultante van het karteren van de eilanden en zand-en grindbanken in het zomerbed of de beoordeling van een al dan niet bovenstroomse verbinding met laagwaterbedding bij het derde type. In verband met de eigendomsbepaling van zandplaten zijn nevengeulen op historische kaarten goed in beeld gebracht. Een belangrijke bepaling in de regeling van het eigendom hield namelijk in dat een middelzand, (een zandplaat zonder verbinding met het vaste oever) een opwas, toekwam aan de landsheer, terwijl een zandplaat tegen de vaste oever, een aanwas, toekwam aan de eigenaar van de aangrenzende uiterwaard (Dirkx, 1997).

Oeverwal (kade)

Oeverwallen zijn de hoogste fluviatiele terreinvormen in de uiterwaarden. Het zijn lage ruggen direkt langs de huidige of een voormalige zomerbedding. Oeverwallen ontstaan op die plaatsen langs de rivier waar het water bij hoge afvoeren met grote stroomsnelheden het zomerbed verlaat. Fijnzandig beddingmateriaal wordt hierdoor op de oever afgezet. Door vaker op dezelfde plaats buiten zijn oevers te treden bouwt de rivier langzaam een oeverwal op. Naarmate de oeverwal hoger wordt neemt de dynamiek van het water af en wordt fijner materiaal afzet. Oeverwallen hebben daardoor ook een aflopende profielopbouw; van beneden naar boven van leemarm matigfijn zand naar lutumhoudend fijn zand. Oeverwallen beschermd door een

zomerkade worden zelden overstroomt. In veel gevallen is de zomerkade ook aangelegd juist op de rand van de oeverwal. Door de aanwezigheid van de kade is de afzetting van zand op de oeverwal gestopt.

Wijze van karteren: Historische kaarten geven maar weinig directe informatie over het voorkomen van oeverwallen. De enige concrete aanwijzing bevindt zich in de registers van de verpondingskaarten van de noordelijke uiterwaarden van de Waal. Hierin wordt van één perceel opgemerkt: 'Hoog en sandig wijland, legt aan de rivier en is met pakwerk gedekt....' De ligging van dit perceel is kenmerkend voor de plaats van een oeverwal. De informatie in deze registers is zo gedetailleerd dat we aan nemen dat het niet verder voorkomen van deze aanduiding betekent dat oeverwallen in dat deel van de uiterwaarden niet meer voorkwamen. Voor het overige bevatten historische kaarten slechts indirecte aanwijzingen, zoals de ligging van een zomerkade of bouwland langs de zomerbedding. De belangrijkste bronnen voor de reconstructie van oeverwallen zijn de bodemkaart Van Nederland 1 : 50.000 en de hoogtegegevens (1:10.000 puntenkaart, gridbestand RWS). Kenmerkende bodemtypen voor oeverwallen zijn kalkhoudende ooivaaggronden (Rd10A en Rd90A) en kalkhoudende vlakvaaggronden. (Zn30A). Indien een uiterwaard sinds de 18^e eeuw morfologisch niet of slechts weinig is veranderd, kunnen oeverwallen op basis van de bodemgegevens gecombineerd met de hoogtegegevens met redelijke zekerheid worden gekarteerd. Van uiterwaarden die geheel of grotendeels zijn afgegraven en waarvan alleen een historische kaart de oorspronkelijke situatie weergeeft, is niet met zekerheid te zeggen of oeverwallen al dan niet hebben bestaan.

Uiterwaardwielving (kade)

Uiterwaardwielvingen zijn complexen van zandige en/of grindrijke aan- en opwassen, die door sedimentatie van slib bedekt zijn geraakt met een tot 3 m dikke kleilaag met een welvend oppervlak. De individuele aan- en opwassen zijn ovaal tot lancetvormig (zie bijlage 1) en zijn geheel of gedeeltelijk van elkaar gescheiden door strangen. Uiterwaardenwielvingen zijn begroeid en veranderen weinig. Deze stabiliteit wordt onder andere bepaald door: de positie van de uiterwaardwielving ten opzichte van de bedding, wel of geen oeververdediging, het type begroeiingen en de aanwezigheid van een zomerkade. Een zomerkade zorgt voor lagere stroomsnelheden en een lagere overstromingsfrequentie van de bekaade uiterwaard.

Wijze van karteren: Uiterwaardwielvingen bevinden zich wat betreft hun hoogteligging tussen de strangen en de oeverwallen in. Deze positie is vergelijkbaar met de hoogteligging van kronkelwaardruggen. Het onderscheid uiterwaardwielving-kronkelwaardrug is hoofdzakelijk gemaakt op grond van het patroon van het reliëf. Uiterwaardwielvingen missen de typische sikkelvorm van kronkelwaardruggen. De afstand van strang tot strang is groter (ovaal) en de hoogteverschillen worden geleidelijker overbrugd. Het onderscheid met grind- en zandplaten is de aanwezigheid van begroeiing. Bekaade uiterwaardwielvingen zijn omsloten door een zomerkade. Soms ontbreekt een deel van de kade, omdat de kade daar aansluit op een hooggelegen terrein in de uiterwaard (bv. oeverwal).

Kronkelwaardruggen (kade)

Kronkelwaardruggen zijn parallel aan elkaar liggende (sikkelvormige) begroeide kronkelwaardbanken, die zijn gevormd in de binnenbocht van een migrerende meander (zie bijlage 3). Kronkelwaardruggen zijn over grote lengte van elkaar gescheiden door kronkelwaardgeulen. Bovenstrooms vloeien de ruggen samen en worden ze bedekt door oeverwalafzettingen. Kronkelwaardruggen onderscheiden zich van kronkelwaardbanken doordat ze met vegetatie zijn begroeid. Kronkelwaardruggen zijn opgebouwd uit beddingsedimenten, zanden die naar boventoe afnemen in zandgrofheid (fining upwards). Ze kunnen bedekt zijn met een dunne laag klei. Een kronkelwaardrug beschermd door een zomerkade wordt minder frequent overstroomd dan zijn niet bekade equivalent. Ook de stroomsnelheid tijdens hoog water is er geringer. Na een hoogwater komen grote hoeveelheden water binnen de zomerkade nagenoeg tot stilstand. Hierdoor sedimenteert ondanks de geringere overstromingsfrequentie er in een bekade kronkelwaard meer slib. In een niet bekade kronkelwaard worden veel meer zandige oeverwalsedimenten afgezet.

Wijze van karteren: kronkelwaardruggen en -geulen zijn gekarteerd op grond van het specifieke reliëfpatroon van afwisselend sikkelvormige ruggen en geulen. Dit patroon is vooral herkenbaar op luchtfoto's van de situatie net na een hoogwater. Het hoogteverschil van ca. twee meter tussen de ruggen en geulen wordt in korte relatief steile hellingen overbrugd. De kronkelwaardgeulen die nog geïnundeerd zijn tekenen op de luchtfoto scherp af tegen de kronkelwaardruggen die al watervrij zijn.

Kronkelwaardgeulen (kade)

Kronkelwaardgeulen zijn smalle laagten tussen kronkelwaardruggen. In tegenstelling tot nevengeulen en strangen zijn het geen echte restgeulen. Na de vorming van elke nieuwe kronkelwaardbank blijft er een laagte achter tussen de kronkelwaardbank en de vaste oever. Deze laagte is niet diep en valt bij een gemiddeld en laag waterpeil direct droog. Alleen bij een plotselinge grote zijdelingse migratie van een meanderbocht kunnen diepere kronkelwaardgeulen achterblijven. Het hoogteverschil tussen de rug en de geul is in het IJsseldal maximaal ca. 2 meter. Benedenstrooms komen de geulen samen. Doordat kronkelwaardgeulen bovenstrooms van de rivier zijn gescheiden door een kronkelwaardrug en /of oeverwal is bij hoog water de stroming in de geul gering. Deze neemt nog verder af bij de aanwezigheid van zomerkaden. Ook de frequentie van overstroming is in de bekade situatie lager. Na een hoog water kunnen kronkelwaardgeulen lang geïnundeerd blijven omdat een open verbinding met het zomerbed ontbreekt. Zomerkaden kunnen de inundatieduur nog verlengen. Door de kade blijft er na een hoogwater meer water in de kronkelwaard achter dat alleen via uitlaatwerken de kronkelwaard weer kan verlaten. Kronkelwaardgeulen zijn deels opgevuld met klei en soms wat organisch materiaal (afvoerloze laagte). In de kronkelwaardgeulen wordt meer klei afgezet dan op de kronkelwaardruggen.

Wijze van karteren: zie kronkelwaardruggen.

Aangekoppelde strang

Een aangekoppelde strang is een door sedimentatie van zand bovenstrooms afgesloten nevengeul, die benedenstrooms permanent in open verbinding staat met de rivier.

De stromingsdynamiek is door de eenzijdige aankoppeling veel geringer dan in een nevengeul. Periodiek treden in de strang bij hoge waterstanden grote stroomsnelheden op, waardoor verlandingsprocessen in hun ontwikkeling worden teruggezet. Aangekoppelde strangen zijn daardoor op lange termijn bezien vrij stabiele fysiotopen. De onderwaterbodem van de strang bestaat uit (slib op) zand.

Wijze van karteren: De oeverlijn van de strang vormt de begrenzing het fysiotop.

Afgesloten strang

Afgesloten strangen zijn geheel of gedeeltelijk verlande strangen die zowel boven- als benedenstrooms zijn afgesloten van de rivier. Slechts periodiek bij hoog water zijn ze met de rivier verbonden en stromen ze mee. Door hun geringere diepte treden geen grote stroomsnelheden op. De benedenstroomse afsluiting is meestal het gevolg van menselijk ingrijpen. Afgesloten strangen verlanden langzaam doordat er na hoog water meer slib in achterblijft dan in aangekoppelde strangen. De bodem van de strang bestaat uit een basis van zand waarop een laag slib met weinig organische materiaal is afgezet.

Wijze van karteren: Voor de kartering van het verlande deel van dit fysiotop is vooral gebruik gemaakt van historische sloten en verkavelingspatronen, toponymen (terreinnamen) en kaartsignaturen die duiden op natte terreinomstandigheden, aanduidingen van lage percelen in de registers van verpondingskaarten en historische en recente luchtfoto's van na-hoogwatersituaties.

Geïsoleerde strang

Geïsoleerde strangen zijn voormalige nevengeulen van de rivier in een bekade uiterwaard. Geïsoleerde strangen liggen ver van de laagwaterbedding, vaak langs de winterdijk. Benedenstrooms zijn deze strangen geheel van de laagwaterbedding afgesloten of is er een gecontroleerde verbinding door middel van een in- en uitlaatwerk. Geïsoleerde strangen zijn geheel of gedeeltelijk verland. Bij een hoge winterafvoer wordt via zo'n inlaatwerk het water de bekade uiterwaard binnengelaten en later weer afgevoerd. De stromingsdynamiek in geïsoleerde strangen is zeer gering. Daardoor komen na afsluiting verlandingsprocessen snel op gang. Naast slib accumuleert organisch materiaal op de bodem van geïsoleerde strangen. Onder invloed van grondwaterstromen kunnen in geïsoleerde strangen kwelsituaties voorkomen.

Wijze van karteren: zie afgesloten strang.

Beekstrang

Een beekstrang is een strang waar een beek in uitmondt. Beekstrangen liggen vaak relatief ver van de laagwaterbedding verwijderd. Door hun waterafvoerende functie zijn ze niet geheel verland en kunnen daardoor over grote afstand parallel met de laagwaterbedding lopen. Beekstrangen staan benedenstrooms in open verbinding met de laagwaterbedding of worden gereguleerd door middel van een in- en uitlaatwerk.

Wijze van karteren: zie afgesloten strang, met bijzondere aandacht voor binnendijkse beeklopen.

Kolk /wiel (kade)

Diep open water tegen de winterdijk, resultaat van een dijkdoorbraak. Dijkdoorbraken ontstaan vaak op plaatsen waar oude stroomruggen de winterdijk kruisen. Door de waterdruk bij hoog water komt een kwelstroom door het zand van de stroomrug op gang. Deze kwelstroom ondermijnt de dijk zodat deze wegvloeit. Het gevolg is een diep gat. Dijkdoorbraken komen door de tijd heen dan ook vaak op dezelfde plek voor. Treedt er geen doorbraak op dan is er in de kolk bij hoog water, door de relatief grote afstand tot de rivier, weinig stromingsdynamiek. Hierdoor komt er veel slib tot bezinking hetgeen leidt tot een kleiige bodem. Een kolk in een bekade uiterwaard wordt evenals alle andere fysiotoopen achter een zomerkade minder frequent overstroomd en ook de dynamiek is geringer. Hierdoor treden vergelijkbare processen op als in geïsoleerde strangen. Door de diepte van de kolken verloopt het verlandingsproces echter veel trager en blijft open water langer in stand.

Wijze van karteren: Oeverlijn is fysiotoopgrens

Afgegraven uiterwaarden

Afgegraven uiterwaarden zijn uiterwaarden waar ten behoeve van de baksteenindustrie klei is afgegraven en het oorspronkelijke fysiotoop verloren is gegaan.

Wijze van karteren: Steenfabrieken en percelen met een afwijkende kavelvorm zijn indicatief voor het voorkomen van afgegraven uiterwaarden.

3.3.2 Ecotopen

Voor de classificatie van de historische ecotopen is zoveel mogelijk aansluiting gezocht bij de ecotopenindeling van het project Integrale verkenning Rijntakken (IVR). In deze paragraaf wordt volstaan met een korte beschrijving van de ecotopen en de wijze waarop de historische gegevens naar deze ecotopen zijn vertaald. De omschrijving van de ecotopen zoals ze in dit onderzoek zijn gehanteerd kan nauwer of ruimer zijn dan de oorspronkelijke IVR ecotopen. Dit wordt veroorzaakt door:

- de beperkingen die het gebruik van historische kaarten met zich meebrengt. Historische kaarten bevatten in veel gevallen alleen informatie over de vegetatiestructuur. In de IVR-definitie van bijvoorbeeld hardhoutoibos zijn ook de elzenrijke bossen in moerassige laagten inbegrepen. Op historische kaarten kunnen moerassige elzenbossen echter niet onderscheiden worden van wilgenbossen. Daarom is er in dit onderzoek voor gekozen het ecotoop hardhoutoibos te reserveren voor alle droge groeiplaatsen (bv. oeverwallen, kronkelwaardruggen) en bos op vochtige en natte groeiplaatsen als zachthoutoibos aan te merken;
- de geografische beperkingen van het onderzoeksgebied. Vanwege het ontbreken van getijdewerking in de onderzochte trajecten komen slikkige oevers niet voor. Dit deel-ecotoop is om die reden in dit onderzoek buiten de definitie van het ecotoop natuurlijke rivieroevers gehouden.

Laagwaterbedding: alle permanent stromende diepe en ondiepe delen van het zomerbed. Het ecotoop laagwaterbedding is gelijk aan het fysiotoop laagwaterbedding.

Natuurlijke rivieroever: grindplaten, zandplaten en kronkelwaardbanken, afslagoevers en natuurlijke steiloevers. Afslagoevers en natuurlijke steiloevers zijn in dit onderzoek niet meegenomen, omdat historische kaarten hier beperkt informatie over geven.

Harde rivieroever: kib, strekdam, stenen oever of kade. Kunstwerken zijn in dit onderzoek niet kwantitatief geanalyseerd.

Rivierduin: Oeverwal met dynamische grazige en/of ruigtkruidenbegroeiing waarop rivierduinvorming plaatsvindt. In de onderzochte riviertrajecten komen in de historische situatie geen rivierduinen voor. Op een kaart van de Pley (Klinkenberg, 1770) net bovenstrooms het IJsseltraject worden 'zandheuvels' aangegeven in vorm van een paraboolduin. Dit zou kunnen duiden op het voorkomen van rivierduinen.

Natuurlijk hardhoutooibos: dynamisch hardhoutooibos en doornstruweel van oeverwallen; echt hardhoutooibos en doornstruweel van uiterwaarden en kronkelwaardruggen. Historische kaarten maken geen onderscheid tussen hardhout- en zachthoutooibos. Uit een combinatie van de ligging t.o.v. het zomerbed en het fysiotoop is een bos als zachthout- of hardhoutooibos aangemerkt. Hardhoutooibossen liggen op oeverwallen langs de bedding of op kronkelwaardruggen en hoge uiterwaarden op enige afstand van de bedding. Overigens geldt dit niet voor alle bossen op oeverwallen. Smalle zones bos op de overgang van bedding naar oeverwal zijn als zachthoutooibos gekarteerd.

Natuurlijk zachthoutooibos: Zachthout(pionier)ooibos en -struweel van oeverwallen, uiterwaarden, en (verlandende) strangen. Bossen in uiterwaarden en kronkelwaarden direct grenzend aan de bedding en bossen in strangen zijn gekarteerd als natuurlijk zachthoutooibos. Zuiver natuurlijk zijn deze ooibossen niet. Aanwassen, opwassen en kronkelwaardbanken werden 'bepoot met willigen' om het nieuwe land vast te leggen en slib in te vangen voor een kleidek (rijswaarden). Op het moment dat de rijswaard voldoende was opgeslibd werd het wilgenbos omgezet in grasland.

Productiebos: Intensief beïnvloed en geëxploiteerd opgaand productiebos of griend. In de historische situatie bestaat het productiebos vooral uit grienden en boomgaarden. Grienden zijn vooral gelegen in laaggelegen, jonge delen van de uiterwaarden en in de strangen. Boomgaarden komen zowel voor op oeverwallen, uiterwaarden en kronkelwaarden als op de overgang van winterdijk naar geïsoleerde strang. Het huidige productiebos bestaat voornamelijk uit opstanden van populier en wilg

Dynamische ruigte: dynamische ruigtkruidenvegetaties en rietlanden in onbekade uiterwaarden en langs dynamische strangen. Dynamische ruigte is in dit onderzoek beperkt tot natte c.q. vochtige dynamische ruigte. Dit type ecotoop komt voor langs aangekoppelde en afgesloten strangen in onbekade uiterwaarden, in kronkelwaardgeulen en lage delen van recent aan- of opgewassen uiterwaarden. Naast wilgenbos of -struweel bevonden zich op de rijswaarden ook zones met rietvegetaties, zogenaamde 'rietbanen'. Waarschijnlijk werden deze rietbanen

geëxploiteerd. In de registers van de verpondingskaarten is naast de oppervlakte ook de kwaliteit van de rietbaan vermeld.

Moeras: structuurrijke moerasvegetaties en rietlanden in verlande geïsoleerde strangen; op bijzondere locaties onder invloed van toestromend grondwater tevens kwelmoerassen. Uit de signatuur op historische kaarten en eventuele omschrijving in registers valt niet af te leiden of het dynamisch ruigte, of moerassig 'onland' betreft. Het onderscheid tussen dynamische ruigte en moeras is daarom gemaakt op grond van het fysiotoop. Moerassige situaties in geïsoleerde strangen of in beekstrangen zijn gekarteerd als moeras.

Stroomdalgrasland: droge, schrale stroomdalgraslanden van mineraalrijke, droge hoge oeverwallen. Voor stroomdalgraslanden geldt eveneens dat de specifieke soortensamenstelling die deze vegetatie onderscheid van uiterwaardgraslanden niet uit historische kaarten valt af te leiden. Daarom is voor een praktische oplossing gekozen en zijn in de historische situatie alle graslanden op het fysiotoop oeverwal gekarteerd als stroomdalgrasland.

Natuurlijk uiterwaardgrasland: hooilanden en weilanden met een (in agrarisch opzicht) tamelijk extensief beheer op lage oeverwallen, uiterwaardwelvingen en in geheel dichtgeslibde of verlande strangen; op bijzondere locaties onder invloed van toestromend grondwater tevens kwelgraslanden. In de historische situatie zijn alle niet-stroomdalgraslanden als uiterwaardgrasland gekarteerd. Op basis van de fysiotoopen kan onderscheid gemaakt worden tussen nat/vochtig en droog uiterwaardgrasland.

Productiegrasland: geëxploiteerde productiegraslanden op oeverwallen, uiterwaardwelvingen en geheel dichtgeslibde of verlande strangen. Het ecotoop productiegrasland is het gevolg van een intensieve agrarische bedrijfsvoering en komt daarom in de historische situatie niet voor.

Nevengeul: permanent of nagenoeg permanent meestromende dynamische, zandige of kleiige nevengeulen. Ecotoop nevengeul is gelijk aan het fysiotoop nevengeul.

Dynamische strang: alle oppervlakten water in een permanent aangekoppelde strang of afgesloten strang in een onbekade uiterwaard.

Geïsoleerde strang: alle oppervlakten water in een van de rivier geïsoleerde strang in een bekade uiterwaard; lokaal gevoed door grondwater of beekwater (beekstrang). Ook beekstrangen in onbekade uiterwaarden zijn in verband met hun waterkwaliteit en door hun geïsoleerde ligging tot dit ecotoop gerekend.

Plas : diepe kolk

Akker: Bouwland en braakliggend terrein op oeverwallen, in uiterwaarden en soms in verlande geulen.

Tabel 3.1 Ecotopenmatrix

Fysiotoepen	(Vegetatie) Structuur historische kaarten															
	water oever	afbraak plaat	grind- plaat	zand- plaat	rijfs- waard	wilgen- griend	riet- baan	onland	laagte zonder wilgen	hoog zandig weiland	(best) weiland	slegt laag weiland	aanwin- nende strang (in rijswaard)	strang, laagland in met riet en biezen	bouw land	huis, schuur, hof, steen- bakkerij
Laagwaterbedding	1															
Grindbank		2			5		7									
Zandbank			2		5		7									
Kronkelwaardbank		2	2		5											
Nevengeul	12															
Oeverwal						6		9		9/10				16	17	
Uiterwaardwielving							8			10	10			16	17	
Kronkelwaardrug					5					10				16	17	
Kronkelwaardgeul	13				5		7			10		8/10		17		
Aangekoppelde strang	13				5		7				7/13					
Afgesloten strang	13				5	6	7				7/13					
Geïsoleerde strang	14				6		8				8/10		8/14			
Beekstrang	14				6		8				8/10		8/14			
Kolk	15															
Oeverwal (kade)								9		9/10				16	17	
Uiterwaardwielving (kade)							8			10	10			16	17	
Kronkelwaardrug (kade)					6					10				17		
Kronkelwaardgeul (kade)	14				6					10		8/10				
Kolk	15															

Ecotopen

- 1 =Laagwaterbedding
- 2 =Natuurlijke rivieroever
- 3 =Rivierduin
- 4 =Natuurlijk hardhoutoebos
- 5 =Natuurlijk zachthoutoebos
- 6 =Productiebos

- 7 =Dynamische ruigte
- 8 =Moeras
- 9 =Stroomdalgrasland
- 10 =Natuurlijk uiterwaardgrasland
- 11 =Productie grasland
- 12 =Nevengeul

- 13 =Dynamische strang
- 14 =Geïsoleerde strang
- 15 =Plas
- 16 =Akker
- 17 =Bebouwd terrein

Bebouwd terrein: Bebouwde en/of verharde terreinen zoals boerderijerven en steenfabrieken, op oeverwallen en uiterwaardwelingen

3.3.3 Relatie ecotopen-fysiotopen-vegetatiestructuur

Een ecotoop is gedefinieerd als een ruimtelijk te begrenzen relatief homogene eenheid, waarvan de samenstelling en ontwikkeling worden bepaald door de abiotische, biotische en antropogene condities ter plekke. De abiotische condities of standplaatsfactoren zijn de fysiotopen. De biotische en antropogene condities komen tot uiting in een bepaalde (vegetatie)structuur. Uit de combinatie van fysiotopen en (vegetatie)structuur kunnen de ecotopen worden bepaald. Voor de kartering van de historische ecotopen waren geen afzonderlijke fysiotop- en structuurgegevens beschikbaar. Toch is (zie 3.2.2 en 3.3) een vergelijkbare werkwijze gevolgd door de historische kaarten met behulp van actuele gegevens eerst te vertalen in een fysiotopenkaart. Vervolgens is dezelfde historische kaart als vegetatiestructuurkaart gecombineerd met deze fysiotopenkaart en zijn de ecotopen bepaald. In tabel 3.1 is in een ecotopenmatrix van de verpondingskaarten van de Waal de relatie tussen de ecotopen, fysiotopen en vegetatiestructuur weergegeven. Deze matrix heeft ook als leidraad gediend voor de interpretatie van minder gedetailleerde kaarten.

3.4 Patroonkenmerken Waal

3.4.1 Fysiotopen

In tabel 3.2 zijn de oppervlakten van de eenheden van de fysiotopenkaarten van de Waal (zie bijlage 1) op de verschillende tijdstippen weergegeven. De totale oppervlakte per tijdstip is steeds verschillend doordat de bandijken in de loop van de tijd zijn verplaatst. Van de in het totaal 21 onderscheiden fysiotopen komen er in de uiterwaarden van de Waal 15 voor. De fysiotopen kronkelwaardbank, bekade en onbekade kronkelwaardruggen en -geulen, kenmerkend voor een sterk meanderende riviertype, ontbreken langs de Waal, evenals het fysiotop beekstrang.

De meest prominente fysiotopen in alle drie de perioden zijn de laagwaterbedding, de uiterwaardwelingen en de strangen. De oppervlakteverhouding tussen deze drie groepen fysiotopen blijft door de tijd heen in grote lijnen vrij constant. Ondanks dat deze hoofdopbouw van de uiterwaarden onveranderd lijkt, zijn er van 1780 tot 1990 in de oppervlakteverhouding tussen de individuele fysiotopen grote verschuivingen geweest. De opvallende ontwikkelingen zijn:

- een sterke toename in 1830 van laagwaterbedding en nevengeul en tegelijkertijd een afname van de oppervlakte grind- en zandbank. De oorzaak van deze afname kan liggen in het feit dat de rivierkaart van 1830 bij een gemiddelde waterstand is gekarteerd en de kaart van 1780 waarschijnlijk bij een lage(re) waterstand. Een andere mogelijke verklaring is een waargenomen trendmatige verhoging van de waterstanden op Waal bij Nijmegen vanaf ca. 1805 (zie 4.2.1) Verhoging van de stromingsdynamiek leidt in eerste instantie tot veranderingen in de

Tabel 3.2 Oppervlakte van de fysiotopen van de Waal in 1780, 1830 en 1990

Fysiotopen	Oppervlakte (ha)			Oppervlakte (%)		
	1780	1830	1990	1780	1830	1990
Laagwaterbedding	1357	1534	1354	29,18	32,5	29,90
Grindbank	24	0	0	0,52	0,00	0,00
Zandbank	173	60	0	3,72	1,28	0,00
Nevengeul	46	166	0	0,99	3,53	0,00
Oeverwal	53	69	214	1,12	1,47	4,73
Uiterwaardweiving	2126	875	678	45,75	18,58	14,97
Aangekoppelde strang	165	63	44	3,55	1,34	0,97
Afgesloten strang	285	102	77	6,13	2,16	1,70
Kolk/plas	8	12	431	0,17	0,25	9,52
Oeverwal (kade)	5	0	4	0,10	0,00	0,09
Uiterwaard (kade)	367	1440	1278	7,89	30,59	28,22
Geïsoleerde strang (kade)	40	356	278	0,86	7,55	6,14
Kolk/plas(kade)	1	32	40	0,02	0,68	0,88
Bebouwing/hoogwatervrij	0	0	130	0,00	0,00	2,87
Totaal	4650	4709	4528	100,00	100,00	100,00

fysiotopensamenstelling van het zomerbed. Door de uitvoering van de riviernormalisatie vanaf de 19^e eeuw zijn de fysiotopen grind-, zandbank en nevengeul in 1990 geheel verdwenen.

- een afname van 60% van onbekade uiterwaarden in 1830 ten opzichte 1780 ten gunste van uiterwaard achter een zomerkade. Het gevolg van deze grootschalige aanleg van zomerkaden was dat slechts een beperkt deel van de uiterwaarden nog maar frequent meestroomde en er dus ook vaker hogere waterpeilen in het zomerbed voorkwamen. Dit leidde tot een verhoging van de stromingsdynamiek in het zomerbed. Deze ontwikkeling sluit aan bij de hiervoor geconstateerde vergroting van de oppervlakte laagwaterbedding tussen 1780 en 1830.
- een sterke toename van de oppervlakte geïsoleerde strang in 1830 en een evenredige afname van de oppervlakte aangekoppelde en afgesloten strang in deze periode. Door de aanleg van zomerkaden werden veel aangekoppelde strangen benedenstrooms afgesloten van de laagwaterbedding en kwamen reeds afgesloten strangen geheel binnen een kade te liggen.
- een verdrievoudiging van de oppervlakte oeverwal in 1990. Een verklaring hiervoor wordt beschreven in paragraaf 5.2.
- een toename van de oppervlakte kolk in 1830. Met name in de smalle rechttere delen van het Waaltraject bij Oosterhout en Weurt en tussen Wamel en Dreumel braken tussen 1780 en 1830 de dijken door. Rampjaren in deze perioden zijn: 1781, 1784, 1799, 1805 en 1809. In de meeste gevallen waren het plekken waar voorheen de dijk al was doorgebroken en kolken waren gevormd. Door de nieuwe doorbraken werden de kolken aanzienlijk vergroot. Nagenoeg alle doorbraken vonden plaats in de maanden januari en februari. en werden veroorzaakt door ijssdammen benedenstrooms in de rivier (Driessen, 1994). De sterke toename van oppervlakte kolk/plas van 1830 tot 1990 is geheel veroorzaakt door recente zand- en grindwinning waardoor grote plassen zijn ontstaan.

- een toename van de oppervlakte bebouwing en afgegraven uiterwaard in 1990. De bebouwing is op de historische fysiotoopenkaarten niet gekarteerd. Uit de ecotoopenkaart blijkt dat de oppervlakte 6-8 ha besloeg. Met de ontwikkeling van de baksteenindustrie in de 19^e eeuw onstonden echter grote opgehoogde fabrieksterreinen met eigen abiotische omstandigheden, die op de kaart van 1990 als een zelfstandig fysiotoop is weergegeven. Voor de winning van klei werden grote delen van de uiterwaarden afgegraven. De 1830 kaart geeft hierover nog geen aanwijzingen, hoewel er zeker op kleine schaal klei zal zijn gewonnen. In 1990 bestaat ca. 75% van de ecotoopen uiterwaard en bekade uiterwaard uit afgegraven en gehercultiveerd terrein als gevolg van kleiwinning.

Stabiliteit en dynamiek fysiotoopen

De resultaten van de overlayprocedure van de fysiotoopenkaarten van 1780 en 1830 zijn weergegeven in tabel 3.3

De zwart omrande getallen geven de stabiliteit van een fysiotoop weer. Het is het oppervlaktepercentage van het fysiotoop dat in de periode 1780-1830 niet is veranderd. De overige cijfers geven aan welk percentage van het fysiotoop van 1780 tot 1830 is overgegaan in een ander fysiotoop. De cijfers tegen een grijze achtergrond geven hiervan de maximale waarde weer.

Voorbeeld: De oppervlakte van het fysiotoop zandbank in 1780 was 173 ha. In 1830 is 11% van deze oppervlakte nog steeds een zandbank. Het merendeel van het fysiotoop zandbank is echter overgegaan in een ander fysiotoop: laagwaterbedding 43%, nevengeul 23% en uiterwaardwieling 20%

Belangrijk is dat deze tabel op hoofdlijnen wordt beoordeeld. Dit als gevolg van de werkwijze waarbij twee kaarten deels onafhankelijk van elkaar zijn getekend en gedigitaliseerd kunnen lijnen die in principe op dezelfde plaats moeten liggen iets ten opzichte van elkaar zijn verschoven. Hierdoor kan het lijken of een deel van een fysiotoop is veranderd in een ander fysiotoop terwijl dit niet het geval was. Hierdoor hebben met name de lage waarden in de tabel een geringere betrouwbaarheid.

De laagwaterbedding blijkt een van de meest stabiele fysiotoopen. Ruim tachtig procent van de laagwaterbedding ligt na 50 jaar nog op dezelfde plaats. Interactie vindt vooral plaats met de andere fysiotoopen van het zomerbed, de uiterwaarden en de oeverwallen. De zomerbed fysiotoopen grindbank, zandbank en nevengeul zijn zeer instabiel. Het merendeel van deze fysiotoopen is in 1830 weer opgenomen in de laagwaterbedding en slechts een beperkt deel is toegevoegd aan de uiterwaard. Locaties met grind- en zandbanken in het laagwaterbed van 1780 vormen dus maar in beperkte mate de plaatsen waar land uit de laagwaterbedding werd gewonnen. Relatief meer uiterwaard wordt gevormd vanuit de laagwaterbedding (8% van de laagwaterbedding = 108 ha). Hoewel het fysiotoop oeverwal redelijk stabiel is verdwijnt er toch 35% (ca. 18 ha) in de laagwaterbedding. Vanuit de laagwaterbedding wordt in deze periode ca 14 ha nieuwe oeverwal gevormd.

Tabel 3.3 Stablieit en dynamiek van de fysiotopten van de Waal van 1780-1830 in % tov de oppervlakte in 1780

Fysiotopten	Waal 1830										
	Totaal (ha)	L. bed- ding	Zandbank	Nevengeul	Oeverwal	Uiterwaard- wielving	Aangekoppelde strang	Afgesloten strang	Geïsoleerde strang	Kolk (kade)	Binnendijks
Laagwaterbedding	1.358	83	2	5	1	8	1				
Grindbank	24	80	15	4		2					
Zandbank	173	43	11	23	1	20	1				
Nevengeul	46	47	6	29		8	3	6			
Oeverwal	53	35			55	5					
Uiterwaardwielving	2.126	11		2	1	24	1	2			
Aangekoppelde strang	165	3		2		8	17	27	35	1	1
Afgesloten strang	286	3		4		4	6	7	1	1	5
Geïsoleerde strang	40			5		5	10	80	1	1	4
Kolk	8							17	5	22	54
Oeverwal (kade)	5	13			85	10					3
Uiterwaardwielving (kade)	367	6		1		41		1	3	1	45
Kolk (kade)	1										14
	252	1		12	2	1	1	4	3	18	6

Tabel 3.4 Stablieit en dynamiek van de fysiotopten van de Waal van 1830-1990 in % tov de oppervlakte in 1830

Fysiotopten	Waal 1990										
	Totaal (ha)	L. bed- ding	Zandbank	Oeverwal	Uiterwaard- wielving	Aangekoppelde strang	Afgesloten strang	Geïsoleerde strang	Oeverwal (kade)	Uiterwaard- wielving (kade)	Binnendijks
Laagwaterbedding	1.534	71	8	13		2		5			1
Zandbank	60	72	5	17			7				1
Nevengeul	166	40	7	27		2	22				1
Oeverwal	69	13	8	6		1					1
Uiterwaardwielving	875	13	5	28		3	4	14	6	4	7
Aangekoppelde strang	62	1		23		4	17	9	3	2	25
Afgesloten strang	102	7	3	17		16	8	29	3	6	6
Geïsoleerde strang	355	1	1	6		13	6	44	29	1	12
Kolk	11			8			27	32	44	3	5
Uiterwaardwielving (kade)	1.440	2	1	8		8	26	9	63	1	4
Kolk (kade)	32		6			33	51	5	5	5	6

De veranderingen als gevolg van de aanleg van zomerkaden zijn ook terug te vinden in tabel 3.3. Aangekoppelde- en afgesloten strangen hebben lage waarden voor stabiliteit en gaan voor het grootste deel over in geïsoleerde strangen. Het fysiotoop geïsoleerde strang is daarentegen vrij stabiel hetgeen overeenkomt met het feit dat ook in bekade uiterwaarden de morfologie van strangen lange tijd herkenbaar intact blijft.

De stabiliteit van de fysiotoopen van 1830-1990 is weergegeven in tabel 3.4. De resultaten bevestigen de bevindingen uit de periode 1780-1830. Daarnaast zien we in tabel 3.4 de trend dat als gevolg van klei- en zandwinning veel ecotopen voor een groter of kleiner deel veranderen in gehercultiveerde (bekade) uiterwaard of plas.

3.4.2 Ecotopen

In tabel 3.5 zijn de oppervlakten van de eenheden van de ecotopenkaarten (zie bijlage 2) op de verschillende tijdstippen weergegeven.

Tabel 3.5 Oppervlakte van de ecotopen van de Waal in 1780, 1830 en 1990

Ecotopen	Oppervlakte (ha)			Oppervlakte (%)		
	1780	1830	1990	1780	1830	1990
Laagwaterbedding	1357	1533	1150	29,18	32,56	24,66
Natuurlijke rivieroever	194	59	196	4,17	1,25	4,19
Rivierduin	0	0	16	0,00	0,00	0,34
Natuurlijk hardhoutoobos	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Natuurlijk zachthoutoobos	395	362	55	8,50	7,69	1,17
Productiebos	102	26	13	2,19	0,56	0,28
Dynamische ruigte	201	24	40	4,32	0,51	0,86
Mocras	18	46	6	0,39	0,97	0,12
Stroomdalgrasland	42	61	0	0,90	1,29	0,00
Natuurlijk uiterwaardgrasland	2088	2233	0	44,90	47,43	0,00
Productie grasland	0	0	2242	0,00	0,00	48,07
Nevengeul	46	167	0	0,99	3,55	0,00
Dynamische strang	153	66	218	3,29	1,40	4,67
Geïsoleerde strang	4	61	6	0,09	1,30	0,12
Plas	9	44	442	0,19	,94	9,48
Bouwland	36	19	83	0,77	0,40	1,78
Bebouwing	6	8	197	0,13	0,18	4,23
Totaal	4651	4709	4664	100,00	100,00	100,00

Doordat de ecotopenkaart is samengesteld uit de fysiotoopenkaart en de vegetatiestructuur, herkennen we in deze tabel een aantal van dezelfde trends als in de eerder besproken fysiotoopenverdeling. Opvallend in deze tabel zijn:

- de afname van de natuurlijke rivieroever in de periode 1780-1830 en het herstel tot de oorspronkelijke oppervlakte in 1990. De totale oppervlakte van het ecotoop natuurlijke rivier oever is in 1990 weliswaar weer op het niveau van 1780, de ligging en vorm van het ecotoop zijn sterk gewijzigd. In de historische situatie bestond het ecotoop natuurlijke rivieroever uit zand- en grindbanken in de binnenbocht van de

zomerbedding. In de huidige situatie zijn het voornamelijk zandstranden in de kribvakken, langs het gehele riviertraject. De Ewijkse plaat vormt hierop een uitzondering.

- Rivierduinen komen in het onderzochte traject van de Waal in de historische situatie niet voor. Op de IVR ecotopenkaart van de huidige situatie worden rivierduinen/oeverwalruigten aangegeven bij Druten en Wamel. De vorming van rivierduinen past in het beeld van de toename van de oppervlakte en de verandering van de vormingscondities van oeverwallen langs de Waal (zie par 5.2)
- Natuurlijk hardhoutooibos komt in de onderzochte perioden in Waaltraject niet voor.
- De oppervlakte natuurlijk zachthoutooibos is in 1780 en 1830 van dezelfde orde van grootte. De lichte achteruitgang hangt samen met de relatieve afname van de aangroei in deze periode. Minder jonge aan- en opwassen werden bepoet met wilgen terwijl de omzetting van bos in grasland met dezelfde snelheid doorging. In 1990 is de oppervlakte zachthoutooibos ten opzichte van 1830 met 85% afgenomen. De belangrijkste reden hiervoor is dat het proces van de vorming van aan-en opwassen door de riviernormalisatie is gestopt terwijl het proces van omvorming van oobos naar grasland gewoon is doorgegaan. Een bijkomende reden is dat uit veiligheidsoverwegingen de oppervlakte bos in de uiterwaarden nu laag wordt gehouden. Bij hoogwater dient de afvoercapaciteit van de uiterwaarden optimaal te zijn. De ligging van het huidige zachthoutooibos is niet vergelijkbaar met de historische situatie. De grootste oppervlakte zachthoutooibos bevindt zich anno 1990 in geïsoleerde strangen en kleiputten achter zomerkaden, delen van de uiterwaarden met een lage morfodynamiek. In de historische situatie waren vooral de lage, onbekade uiterwaardwelingen begroeid met zachthoutooibos; delen van de uiterwaard met een hoge morfodynamiek.
- De sterke achteruitgang van van het ecotoop dynamische ruigte in de periode 1780-1830 kan deels verklaard worden uit het proces van dichtslibbing van strangen, waardoor de agrarische gebruiksmogelijkheden van deze strangen toenamen en ook deze lage delen als grasland in gebruik genomen konden worden. Voor het overige is het aandeel dynamische ruigte in 1830 vermoedelijk onderschat. Op de 1830 rivierkaarten, worden twee vegetatie-signaturen aangegeven voor jonge aan- en opwassen, maar ontbreekt de beschrijving. Middelkoop (1997) interpreteert deze eenheden als wilgenbos en wilgenstruweel met riet. In deze studie zijn beide eenheden ingedeeld bij zachthoutooibos. De werkelijke oppervlakte dynamische ruigte in 1830 is daarom waarschijnlijk wat groter ten koste van het ecotoop zachthoutooibos.
- De toename van de oppervlakte dynamische strang en de afname van de oppervlakte geïsoleerde strang in 1990 lijkt in tegenspraak met de ontwikkeling zoals die bij de fysiotopen is beschreven. De oorzaak ligt in het feit dat bij de IVR ecotopenkarteringen de gemodelleerde stroomsnelheid in het winterbed bij een hoge afvoer bepalend is geweest voor de onderscheiding van het ecotoop. In deze studie is de aanwezigheid van een zomerkade bepalend geweest voor de inschatting van de dynamiek in een strang.

Stabiliteit en dynamiek ecotopen

Tabel 3.6 geeft een overzicht van de resultaten van de overlayprocedure van ecotopen van 1780 en 1830. Voor de lage waarden in deze tabel geldt hetzelfde voorbehoud als bij de tabel van de fysiotopten (3.3).

De meest stabiele ecotopen zijn de laagwaterbedding, het stroomdalgrasland en uiterwaardgrasland. De cijfers in de tabel geven aan dat de meeste ecotopen van 1780 tot 1830 voor zover ze overgegaan zijn in een ander ecotoop dit natuurlijk uiterwaardgrasland betreft. Uitzonderingen hierop vormen het ecotoop laagwaterbedding waar duidelijk de tussenstap via natuurlijk zachthoutoibos is waar te nemen, en de ecotopen natuurlijke rivieroever, stroomdalgrasland, natuurlijk uiterwaardgrasland en nevengeul waarvan de stabiliteit hoofdzakelijk wordt bepaald door de mate van erosie door de rivier.

Evenals in de periode 1780-1830 de meeste ecotopen veranderden in natuurlijk uiterwaardgrasland, zijn in de daarop volgende periode de meeste ecotopen overgegaan in productiegrasland of, als gevolg van zand- en kleiwinning in plassen (zie tabel 3.7). De natuurlijke rivieroever (zandplaten in het zomerbed) zijn tussen 1830 en 1990 nagenoeg geheel verdwenen en aan de laagwaterbedding toegevoegd. De meest stabiele ecotopen in deze periode waren de laagwaterbedding, de dynamische strangen en de kolken.

3.5 Patroonkenmerken IJssel

3.5.1 Fysiotopten

In tabel 3.8 is de verdeling van de fysiotopten van de IJssel in 1840 weergegeven (zie bijlage 3). Van de huidige en de 18^e eeuwse situatie zijn alleen ecotoopgegevens beschikbaar. Van de 21 potentiële fysiotopten ontbreken in het IJsseltraject de fysiotopten grindbank en nevengeul. Kenmerkende fysiotopten voor de IJssel in 1840 zijn de laagwaterbedding, kronkelwaardruggen en -geulen, afgesloten en geïsoleerde strangen, oeverwallen en beekstrangen.

Het ontbreken van nevengeulen en de geringe oppervlakte van de fysiotopten zandbank en kronkelwaardbank illustreren de zeer beperkte interactie tussen de laagwaterbedding en de overige fysiotopten. Het proces van kronkelwaardvorming is tot en met 1840 wel doorgegaan, getuige de aanwezigheid van kronkelwaardbanken in de binnenbocht van de Valewaard en de Fraterwaard (zie bijlage 3).

Tabel 3.8 De oppervlakte van de fysiotopten van de IJssel in 1840

Fysiotopten	Oppervlakte	
	ha	%
Laagwaterbedding	526	10,37
Zandbank	6	0,11
Kronkelwaardbank	7	0,14
Oeverwal	30	0,59
Uiterwaardwieling	1287	25,38
Kronkelwaardrug	414	8,17
Kronkelwaardgeul	130	2,57
Aangekoppelde strang	9	0,17
Afgesloten strang	164	3,24
Geïsoleerde strang	163	3,22
Beekstrang	81	1,60
Kolk	2	0,03
Oeverwal (kade)	483	9,53
Uiterwaardwieling (kade)	1145	22,58
Kronkelwaardrug (kade)	485	9,56
Kronkelwaardgeul (kade)	93	1,83
Kolk (kade)	1	0,03
Afgegraven oeverwal	44	0,87
Totaal	5070	100,00

3.5.2 Ecotopten

In tabel 3.9 zijn de ecotopten in 1840 en 1990 van het IJsseltraject weergegeven. De 1840 situatie is het enige complete historische ecotoptenbeeld van de IJssel. De belangrijkste ecotopten in 1840 zijn de laagwaterbedding, natuurlijk zachthoutoobos, stroomdalgrasland, natuurlijk uiterwaardgrasland, geïsoleerde strang en bouwland.

De verdeling van de ecotopten in 1750 (zie bijlage 4) en de ontwikkelingen 1750-1840 zijn weergegeven in tabel 3.10. De gegevens van 1750 zijn gebaseerd op ca. 55% van het traject; het gedeelte van de IJssel waarvan 18^e eeuwse kaarten aanwezig waren. Om een vergelijking te kunnen maken met de situatie van 1840 zijn de ontbrekende delen van het traject als onveranderd beschouwd. Tussen 1750 en 1840 zijn er een aantal veranderingen in samenstelling en oppervlakte van de ecotopten opgetreden:

- nevengeulen waren in 1750 aanwezig en ontbraken in 1840.
- afname van de oppervlakte natuurlijke rivieroever
- afname van de oppervlakte natuurlijk zachthoutoobos
- afname van de oppervlakte dynamische strang

In 1750 waren drie nevengeulen aanwezig. Twee nevengeulen lagen in de zomerbedding, waarvan één in de buitenbocht en één in de binnenbocht. De andere nevengeul was een lange strang met een bovenstroomse opening door de uiterwaard

Tabel 3.9 De oppervlakte van de ecotopen van de IJssel in 1840 en 1990

Ecotopen	Oppervlakte (ha)		Oppervlakte (%)	
	1840	1990	1840	1990
Laagwaterbedding	524	458	10,39	10,04
Natuurlijke rivieroever	12	10	0,24	0,23
Rivierduin	0	0	0,00	0,00
Natuurlijk hardhoutoobos	5	0	0,10	0,00
Natuurlijk zachthoutoobos	111	27	2,20	0,60
Productiebos	39	62	0,77	1,36
Dynamische ruigte	4	15	0,08	0,33
Moeras	10	8	0,20	0,17
Stroomdalgrasland	133	14	2,64	0,30
Natuurlijk uiterwaardgrasland	3388	9	67,18	0,20
Productiegrasland	0	2926	0,00	64,07
Nevengeul	0	0	0,00	0,00
Dynamische strang	28	120	0,56	2,62
Geïsoleerde strang	71	44	1,41	0,97
Plas	2	374	0,04	8,19
Akker	716	390	14,20	8,55
Bebouwd terrein	20	109	0,40	2,38
Totaal	5043	4567	100,00	100,00

De afname van de ecotopen natuurlijke rivieroever en zachthoutoobos hangt samen met de afname van de dynamiek van het zomerbed. Dit proces wordt beschreven in paragraaf 5.3. De trend wordt nog duidelijker als we de gegevens van de ecotopen laagwaterbedding, natuurlijke rivieroever en zachthoutoobos van een kaart uit 1650 erbij betrekken (zie fig 3.2). De kaart laat een groot aantal aan- en opwassen in een brede bedding zien. De opwassen uit een eerdere fase zijn begroeid met zachthoutoobos. De grote oppervlakte natuurlijke rivieroever in 1650 vormt de verklaring voor de relatief grote oppervlakte zachthoutoobos in 1750 en 1840. De zandbanken die in 1650 zijn gevormd, zijn in de daaropvolgende jaren bepoet met wilgen. Zij vormen de gebieden die op kaarten van honderd jaar later als zachthoutoobos zijn terug te vinden. Met de afname van het ecotoop natuurlijke rivieroever neemt uiteindelijk ook de oppervlakte zachthoutoobos af.

De afname van het ecotoop dynamische strang wordt niet zoals bij de Waal veroorzaakt door de aanleg van zomerkaden. Strangen die in 1750 nog grotendeels uit water bestaan zijn op de 1840 als grasland aangegeven. Opslibbing en verlanding lijkt de meest voor de hand liggende proces. De betrouwbaarheid van de 1840 kaart moet echter op sommige punten worden betwijfeld omdat tussen 1840 en 1990 een omgekeerd proces lijkt te hebben plaatsgevonden, hetgeen zeer onwaarschijnlijk is.

Stabiliteit en dynamiek ecotopen

De veranderingen in de ecotopen tussen 1750 en 1840 zijn weergegeven in tabel 3.11. In de tabel is voor beide perioden de oppervlakte van de ecotopen voor het gehele traject is weergegeven. Van ca. 45% van de oppervlakte was in 1750 geen geschikt kaartmateriaal aanwezig en is de analyse als onveranderd beschouwd (zie bijlage 4).

Tabel 3.10 De oppervlakte van de ecotopen van de IJssel in 1750 en 1840

Ecotopen	Oppervlakte (ha)		Oppervlakte (%)	
	1750	1840	1750	1840
Laagwaterbedding	526	525	10,42	10,36
Natuurlijke rivieroever	20	13	0,40	0,25
Rivierduin	0	0	0,00	0,00
Natuurlijk hardhoutooibos	5	5	0,10	0,10
Natuurlijk zachthoutooibos	165	112	3,27	2,20
Productiebos	36	39	0,71	0,76
Dynamische ruigte	2	5	0,04	0,10
Moeras	10	10	0,20	0,21
Stroomdalgrasland	153	146	3,03	2,88
Natuurlijk uiterwaardgrasland	3183	3374	63,05	66,53
Productie grasland	0	0	0,00	0,00
Nevengeul	8	0	0,16	0,00
Dynamische strang	121	28	2,40	0,56
Geïsoleerde strang	72	73	1,43	1,45
Plas	3	3	0,06	0,06
Bouwland	718	716	14,22	14,12
Bebouwing	18	21	0,36	0,42
Overig	8	0	0,16	0,00
Totaal	5048	5071	100,00	100,00

Dit betekent dat ook in deze tabel de ontwikkelingen 1750-1840 een onderschatting zijn van de werkelijke veranderingen. Omdat bij de IJssel is teruggedeneerd vanuit de 1840 situatie is de tabel anders van opzet dan tabel 3.10. De ontwikkelingen 1750-1840 kunnen worden achterhaald door de tabel vertikaal te lezen. De waarden in de tabel zijn in hectaren. Bijvoorbeeld: in de periode 1750-1840 is (op 55% van het bestudeerde traject) 43 ha. natuurlijk grasland gevormd vanuit de laagwaterbedding.

De meest dynamische ecotopen langs de IJssel zijn de laagwaterbedding, natuurlijke rivieroever, natuurlijk zachthoutooibos en dynamische strangen. Van het aandeel van deze ecotopen dat in de beschreven periode is veranderd gaat het grootste deel over in het ecotoop uiterwaardgrasland. De vorming van zachthoutooibos vanuit de laagwaterbedding is nagenoeg in evenwicht met oppervlakte bos die door de rivier wordt geërodeerd. De oppervlakte bouwland is vrij stabiel. Omvorming van bouwland in grasland is in evenwicht met de omvorming van grasland in bouwland.

De ontwikkelingen van 1840 tot 1990 (zie tabel 3.12) zijn voor alle ecotopen gelijk: omgevormd in productiegrasland.

Tabel 3.11 Stabiliteit en dynamiek van de ecotopen van de IJssel van 1750-1840

Ecotopen	IJssel 1750																		
	Totaal (ha)	L. bedding	Natuurlijke rivieroever	Hardhoutoobos	Zachthoutoobos	Productiebos	Dynamische ruigte	Moeras	Stroomdalgrasland	Nat. uiterwaardgrasland	Nevengeul	Dynamische strang	Geïsoleerde strang	Plas	Akker	Bebouwde terrein	Overige erosie	Erosie (sedimentatie)	Binnendijks
Laagwaterbedding	525	454	3	16					26	1	2						11		13
Natuurlijke rivieroever	13	4	6																3
Hardhoutoobos	5		5																
Zachthoutoobos	112	23	3	75					8		2				1				1
Productiebos	39				36														
Dynamische ruigte	5	1				2				1	2								
Moeras	10						10												
Stroomdalgrasland	146							134	1		1				10				
Nat. uiterwaardgrasland	3.374	43	8	71				3.115	1	3	80	13		31					11
Dynamische strang	28										27								
Geïsoleerde strang	73								2	3	7	59							
Plas	3												3						
Akker	716			2				36	22		1			675					
Bebouwde terrein	21							1								18			
Binnendijks	5.070	525	20	5	163	36	2	10	152	8	121	72	3	718	18				11

Tabel 3.12 Stabiliteit en dynamiek van de ecotopen van de IJssel van 1840-1990

Ecotopen	IJssel 1990															
	Oppervlakte (ha)	L. bedding	Natuurlijke rivieroever	Zachthoutoobos	Productiebos	Dynamische ruigte	Moeras	Stroomdalgrasland	Nat. uiterwaardgrasland	Productiegrasland	Dynamische strang	Geïsoleerde strang	Plas	Bouwland	Bebouwde terrein	Binnendijks
Laagwaterbedding	524	64								17	4	2	9			1
Natuurlijke rivieroever	12	39								41	8					11
Hardhoutoobos	5									82						17
Zachthoutoobos	111	19	1	1		1		2		51	3	1	10	2	4	5
Productiebos	39				4					63			7	9	5	11
Dynamische ruigte	4			19						93						
Moeras	10									37			28			35
Stroomdalgrasland	133	3	1	1						52	2		20	15	6	1
Nat. uiterwaardgrasland	3.388	2		1	1					66	2	1	8	6	2	11
Dynamische strang	28		4							54	32	3	3			3
Geïsoleerde strang	71			1	4					55	26	1	1	2		11
Plas	2									61		30				
Bouwland	716	1								58			2	22	1	14
Bebouwde terrein	20									62				13	14	13

4 Rivierkundige parameters

4.1 Betekenis en werkwijze

4.1.1 Algemeen

Om een indruk te krijgen van de rivierkundige processen die in het verleden gespeeld hebben in de bestudeerde trajecten van Waal en IJssel, worden de belangrijkste hydrologische en morfologische parameters, zoals die golden rond 1800, geschat uit literatuur en kaarten. Ook voor de huidige situatie zijn deze parameters berekend en vervolgens zijn inschattingen gedaan voor mogelijke toekomstige veranderingen hierin. Omdat het bruikbare historische kaartmateriaal schaars was, hebben de rivierkundige parameters betrekking op een deel van de in voorgaande hoofdstukken bestudeerde trajecten: de Waal tussen Oosterhout en Dodewaard en de IJssel tussen Westervoort en Doesburg.

De belangrijkste rivierkundige basisparameters zijn afvoer, verhang, breedte, diepte, en korrelgrootte. Deze kan men echter niet zomaar voor twee verschillende rivieren of verschillende tijdstippen met elkaar vergelijken, omdat het belangrijkste sturende proces de stroming van het water is. Parameters daarvoor zijn de stroomsnelheid en het stromingspatroon. Daarom zijn gemiddelde stroomsnelheden berekend met behulp van een 1 dimensionaal model voor de waterbeweging (SOBEK). Deze uitkomsten zeggen echter niets over het stromingspatroon en het samenspel tussen stroming en sediment, dat bepaalt of en waar er op een bepaald moment erosie, transport of sedimentatie plaatsvindt. Parameters die hier wel iets over zeggen zijn de breedte/diepteverhouding, het stroomvermogen (stream power), de Shields parameter en de interactieparameter.

De breedte/diepteverhouding weerspiegelt de interactie tussen de geologische ondergrond (sedimenteigenschappen van de oever en bedding) en de stroming. Het stroomvermogen is afgeleid van verhang en afvoer en zegt iets over de kracht van het stromende water. De Shields parameter is afgeleid van breedte, diepte, verhang en korrelgrootte van de bedding en zegt iets over de het gedrag van het sediment onder de heersende stromingsomstandigheden. De interactieparameter zegt iets over de vorming van pointbars, alternerende banken en eilanden in een rivier.

Hieronder wordt eerst beschreven hoe de rivierkundige basisparameters (afvoer, verhang, breedte, diepte en korrelgrootte in het zomerbed) zijn geschat uit literatuur en kaarten. Ook wordt aangegeven hoe de stroomsnelheden bij geulvullende en hoge afvoer, alsmede de waterverdeling over zomerbed en uiterwaard bij hoge afvoer zijn berekend met behulp van SOBEK.

Waterstanden zijn dagelijks gemeten vanaf 1770 en voor de peilschaal Nijmegen als databestand beschikbaar. Overzichten van gemiddelde en extreme waterstanden en verhang staan vermeld in de Registers der Peilingen (van de Kun, 1854; Fijnje, 1850; Fijnje en Lebret, 1852). Lely (1890) geeft onder andere overzichten van afvoermetingen

uit de negentiende eeuw, extreem lage en hoge waterstanden, hoogteligging van het nulpunt van de peilschalen en afstanden tussen peilschalen.

In 4.1.2 staat beschreven hoe de historische geulvullende afvoeren van Waal en IJssel zijn afgeleid uit historische oeverhoogten van Waal en IJssel, 19e eeuwse afvoermetingen bij Lobith en de historische afvoerverdeling over de splitsingspunten.

Belangrijkste bron voor de historische morfologische situatie zijn de peilingen van het zomerbed die op een aantal kaarten uit het eind van de 18e eeuw weergegeven zijn (Beijerinck, 1771; 1776a; 1776b; 1801). Deze peilingen zijn opgetekend ten opzichte van een bepaalde waterstand aan de dichtstbijzijnde peilschaal. Om Waal en IJssel met elkaar vergelijkbaar te maken en om vergelijking met huidige en toekomstige situatie mogelijk te maken, zijn deze omgezet naar diepten ten opzichte van de geulvullende (bankfull) waterstand. De geulvullende waterstand is afgeleid van de historische oeverhoogte. Deze staat voor het eerst vermeld op de eerste herziening van de historische rivierkaarten uit ca. 1875. Hoe dit precies gegaan is, is beschreven in 4.1.2 en 4.1.3.

Voor de huidige situatie is gebruik gemaakt van recente rivierkaarten, het tienjarig overzicht 1981-1990 (Rijkswaterstaat, 1994) en het jaarboek 1994 (Rijkswaterstaat 1995).

4.1.2 Bepaling van de geulvullende waterstand en afvoer

De afvoer is gekarakteriseerd met de geulvullende afvoer (bankfull afvoer, Q_{bf}), omdat deze morfologisch het meeste effect heeft en algemeen gebruikt wordt bij karakterisering en vergelijking van rivieren. Het is de afvoer die optreedt bij de waterstand waarbij de uiterwaarden net niet onder water staan en het zomerbed geheel gevuld is. De geulvullende waterstand is hoger dan de gemiddelde winterstand, maar lager dan de gemiddelde hoogste stand, waarbij de uiterwaarden onder water staan. De diepte van de geul is berekend ten opzichte van deze geulvullende waterstand. De geulvullende waterstand en afvoer zijn herleid uit de oeverhoogte op een bepaalde plaats in de onderzochte trajecten. Deze oeverhoogte is met behulp van gegevens over verhang en afstand omgerekend naar een geulvullende waterstand aan de peilschaal waarnaar de dieptepeilingen op de historische kaarten verwijzen. Voor de historische situatie is deze waterstand is ook omgerekend naar de geulvullende waterstand bij Lobith, waar via een historische Q-h relatie (Lely, 1890) de geulvullende afvoer van de Boven-Rijn is herleid. Met behulp van de historische waterverdeling op de splitsingspunten (Lely, 1890) is vervolgens de historische geulvullende afvoer van Waal en IJssel geschat. Voor de huidige situatie is hetzelfde gedaan, alleen is de afvoer direct afgeleid uit de waterstand bij de Pannerdense kop, respectievelijk IJsselkop.

De geulvullende afvoer wordt gebruikt bij de berekening van de stream power en de stroomsnelheden in het zomerbed.

Geulvullende waterstand

Voor de historische situatie is uitgegaan van de oudste rivierkaarten waarop hoogten van oevers en uiterwaarden ten opzichte van A.P. staan vermeld: 1873 voor de Waal en 1888 voor de IJssel. Om de geulvullende waterhoogte te schatten is de hoogte van een recent ontstane (is lage) oever in 1873 respectievelijk 1888 afgelezen uit deze kaart (zie figuur 4.1 en 4.2). Deze oever was al wel begroeid met wilgen en maakt deel uit

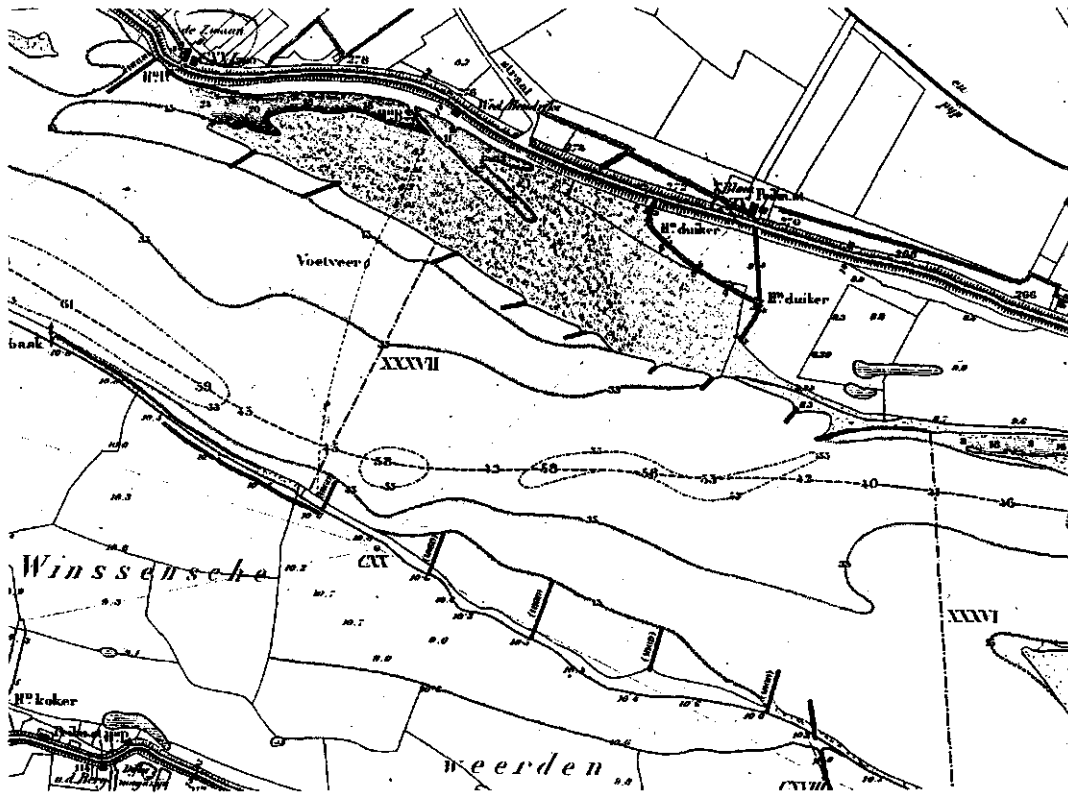


Fig. 4.1 Fragment van de rivierkaart Waal, blad4, Herveld, 1873

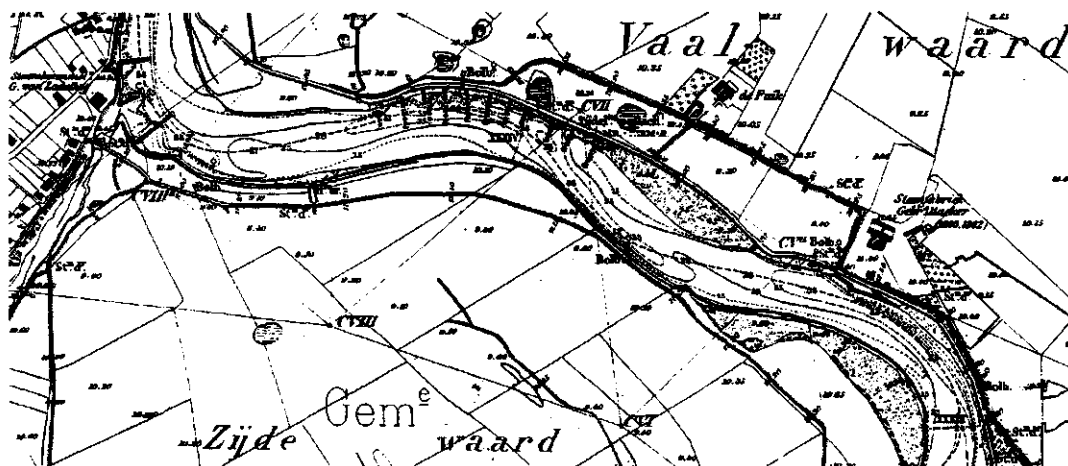


Fig. 4.2 Fragment van de rivierkaart Geldersche IJssel, blad 2, Rheden, 1888

Tabel 4.1 Berekening van geulvullende waterstand

	lage oever van [m]	van	tot	afstand [km]	verhang [cm/km]	verval [m]	h-Bf [m]	
Waal 1800	8,20	km 37,1	Nijmegen	11,15	12,9	1,44	9,64	
			Nijmegen	Lobith	21,70	13,5	2,93	12,56
Waal heden	8,50	89,6	Pannerdense kop	25,20	11,0	2,77	11,27	
IJssel 1800	9,30	km 33,5	Doesburg	11,0	12,8	1,41	7,89	
			Doesburg	Westervoort	22,55	12,8	2,89	10,78
			Westervoort	Pannerden	9,44	9,3	0,88	11,66
			Pannerden	Lobith	8,81	13,4	1,18	12,84
			Westervoort	Arnhem	3,60	9,3	0,33	10,44
IJssel heden	8,75	891,0	IJsselkop	16,50	12	1,98	10,73	

van de uiterwaard; het is duidelijk geen zandbank meer. Doordat ze laag gelegen is, stroomt het water de uiterwaard in via deze oever. Deze hoogte is aangenomen als geulvullende waterstand ter plaatse en met behulp van het historisch verhang (Fijnje, 1850; Fijnje en Lebret, 1852; van der Kun, 1854; zie ook 4.2.2) omgerekend naar de referentie peilschaal op de kaarten van Beijerinck (1771, Doesburg; 1776, Arnhem; 1801, Nijmegen) en Lobith (zie tabel 4.1).

Voor de huidige situatie is hetzelfde gedaan, gebruikt makende van de rivierkaarten uit de jaren tachtig en het huidige verhang (zie tabel 4.1).

Historische afvoermetingen

De eerste afvoermetingen zijn gedaan door Brunings in 1790-1792, door Kraaijenhoff in 1812-1813, door Beijerink in 1810 en 1819 en door Ferrand tussen 1835 en 1846 (Lely, 1890, p. 230-232). De metingen van Ferrand beslaan het grootste bereik aan waterstanden en zijn daarmee het betrouwbaarste bij het omrekenen van geulvullende waterstand naar afvoer. Ze bestaan uit 30 metingen bij Lobith, Pannerden en Westervoort (zie figuur 4.3).

Waterverdeling splitsingspunten

De waterverdeling op de splitsingspunten bij een waterstand van ongeveer 1 m boven Middelbare Rivierstand (is ongeveer bankfull) is als eerste gemeten door Brunings in 1792 (Lely, 1890, p. 245-246). De Waal-afvoer is dan 68,7% van de Boven-Rijn afvoer. Ondanks de aanleg van het Pannerdens Kanaal en de werkzaamheden aan de IJsselkop stroomde er in 1792 relatief weinig water door de IJssel. De waterverdeling op de splitsingspunten bij een waterstand van ongeveer 1 m + mR. (Lely, 1890), geven een IJssel afvoer van ongeveer 7% van de Boven-Rijn afvoer. (zie tabel 4.2)

De nagestreefde waterverdeling is al sinds het begin van de 18e eeuw: Waal:Neder-Rijn:IJssel= 6:2:1. Hierbij moet er dus 11% van de Boven-Rijnafvoer door de IJssel gaan. Bij lagere waterstanden ging er in verhouding meer water door de Waal en door de Neder-Rijn. De afvoer door de IJssel was dan slechts 5% van de Boven-Rijn afvoer. Bij hoge afvoeren gaat tegenwoordig ca. 14% van de Boven-Rijn afvoer door de IJssel. Bij lagere waterstanden treedt het stuwprogramma in werking en is de afvoer door de IJssel ca. 20% van de Boven-Rijn afvoer.

Q-h relatie Boven-Rijn 1835 - 1846
(bron: J.H. Ferrand in Lely, 1890)

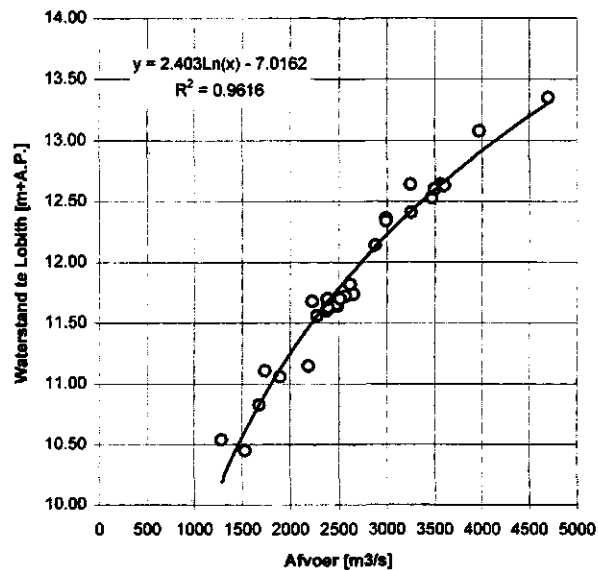


Fig. 4.3 Q-h relatie Boven-Rijn 1835-1846 (naar J.H. Ferrand in Lely, 1890)

Tabel 4.2 Waterverdeling (%) over de splitsingspunten door de eeuwen heen bij 1m+M.R.; M.R. 1994 : 1956 m³/s = 9,40 m+NAP bij Lobith; (Bron: Lely, 1890; Jaarboek 1994)

Rivier	Jaar		
	1792	1847-1860	1994
Boven -Rijn	100	100	100
Waal	68,7	69,6	67,2
Pannerdens kanaal	31,3	30,4	32,8
Neder-Rijn	24,3	19,2	18,5
IJssel	7,0	11,2	14,3

4.1.3 Verwerking historische profielen

Profielen Waal

Voor het maken van dwarsprofielen door het zomerbed van de Waal is gebruik gemaakt van een kopie van de kaart van Beijerinck uit 1801 (RAG RWS 38; zie figuur 4.4). Het betreft een traject van ongeveer 8 kilometer lengte in de omgeving van Ewijk. De schaalstok heeft als eenheid de Rijnlandse roede (= 3,767 m). De kaartschaal van de kopie was 1:62781. De ligging exacte ligging van de raaien is bepaald met behulp van de rivierkaart van 1873. De Peilschaal Nijmegen ligt op deze kaart op km 25,95. De raaien liggen 4 tot 12 km stroomafwaarts van Nijmegen.

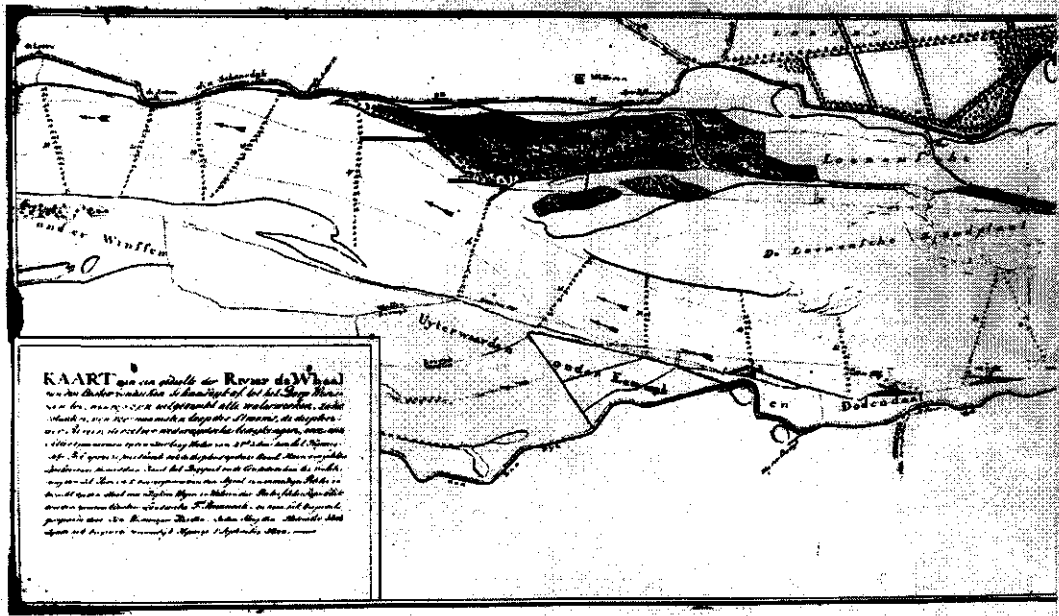


Fig. 4.4 Kaart van de rivier de Waal uit 1801

Op de kaart staan 21 profielen ingetekend, waarvan 17 dwarsprofielen. Alleen de dwarsprofielen zijn gebruikt. Een aantal profielen lag niet loodrecht op de as van de rivier. Hierbij is de breedte gecorrigeerd. De waterdiepte op de kaart is aangegeven in voet ten opzichte van de toen heersende waterstand, deze bedroeg 4 voet 3 duim t.o.v. Nijmeegs Peil. Het nulpunt van de peilschaal Nijmegen is gelegen 6,22 m t.o.v. A.P. (Lely, 1890; pag. 222). 1 Gelderse voet komt overeen met 27,1 cm en was onderverdeeld in 10 duim (Verhoeff, 1982) De waterstand bij Nijmegen tijdens de kartering was derhalve 7,38 m t.o.v. A.P. Dit is 17 cm lager dan de gemiddeld laagste waterstand in de periode 1770-1801.

In de uitgewerkte profielen is de geuldiepte omgerekend naar meters t.o.v. de geulvullende rivierstand (zie figuur 4.5). Tevens zijn de lage waterstand (L.W.) en de Middelbare Rivierstand (M.R.) aangegeven (zie aanhangsel 2). Middelbare Rivierstand is de gemiddelde waterstand in de 6 zomermaanden (mei t/m oktober). De breedte van het zomerbed bij laag water is kleiner dan bij geulvullende waterstand. De oeverhelling in een natuurlijke rivier varieert tussen de 1 (steilrand) en de 1:30 (flauwe oever). Bij een helling van 1:15 en ruim 2 meter waterstandsverschil tussen de waterstand op het moment van de peiling en de geulvullende waterstand, is de rivier bij geulvullende waterstand aan beide zijden ruim 30 meter breder dan bij kartering. Daarom is aangenomen dat de geulvullende breedte van het zomerbed 60 meter groter is dan op de kaart is aangegeven.

De Loenense zandplaat ligt in het zomerbed, maar is niet gepeild, omdat hij op het moment van de peiling droog gevallen was. Uit de profielen van de IJssel (Beijerinck 1776a, 1776b; zie aanhangsel 2) blijkt dat zandplaten nabij de oever op een hoogte midden tussen L.W. en M.R. liggen. Aangenomen is dat dit ook voor de Waal geldt.

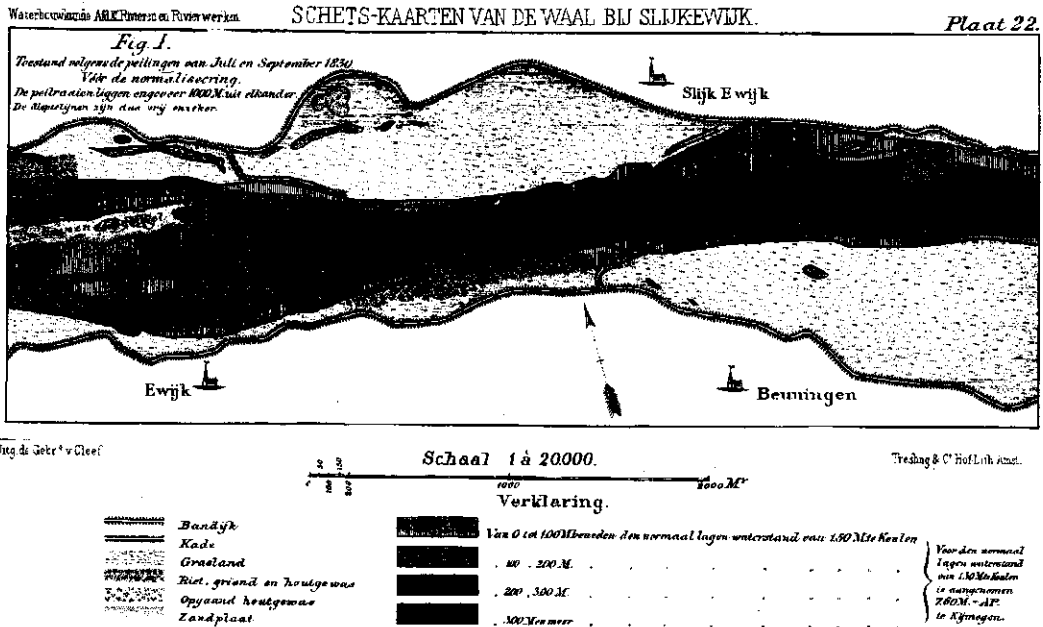


Fig. 4.6 Schetskaart van de Waal bij Slijk-Ewijk, 1830 (uit: Henket, 1890)

Tabel 4.3 Waterstanden behorende bij de Waal-peiling van Beijerinck (1801)

waterstanden te Nijmegen (1772-1801)	m. t.o.v. A.P.	m. t.o.v. kartering (7,38 A.P.)	m. t.o.v. Bankfull
Bankfull	9,64	2,26	0
M.R.	8,84	1,46	-0,80
L.W.	7,55	0,17	-2,09
tijdens kartering	7,38	0	-2,26
zandplaten	8,20	0,82	-1,44

De Loenense zandplaat ligt dan in 1792-1801 op een niveau van 8,20 m A.P. te Nijmegen. Op het moment van kartering is dat 82 cm boven de heersende waterstand.

Metingen uit 1830 geven aan dat de Loenensche Wel boven de 7,60 A.P. te Nijmegen ligt (zie figuur 4.6). Dit komt overeen met de schatting.

Profielen IJssel

Van de IJssel zijn 4 kaarten met dieptegegevens beschikbaar: één kaart uit 1681 van de meander om de Vaalwaard (De Rooy, 1681, OSK Y27) en drie kaarten van Beijerinck, één uit 1771 van de IJssel tussen de huidige A12 en Lathum (Beijerinck, 1771, RK 77), en twee uit 1776 van de (thans afgedenen) meander tussen Rheden en Giesbeek. Beijerinck 1776b is een detail van Beijerinck 1776a (zie figuur 4.7).

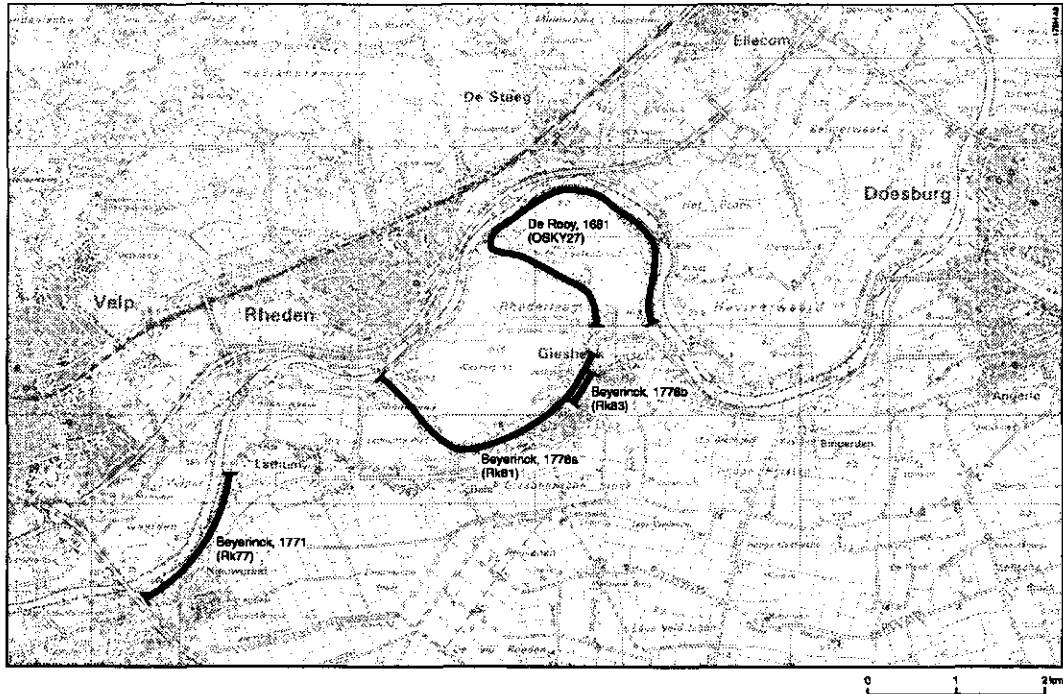


Fig. 4.7 Ligging van de IJsselkaarten van De Rooy (1681) en Beijerinck (1771, 1776a, 1776b)

De kaart van De Rooy uit 1681 is niet bruikbaar, omdat de waterstand waarbij de kaart gemaakt is, niet meer te achterhalen is. In 1681 waren er nog geen peilschalen, de waterstand waarbij gepeild is wordt op de kaart als volgt gemeld:

Ten tijde dezer peijling was het waeter op den ijssel 13 vore 7 duijm beneeds den onderkant van den dorpel aends deneir vant huijs van Tisch Limpers Herbergier vant Westervoorts veer, ends aends Schenkenschans etc.

In het register der peilschalen, hakkelbouten enz. (Fijnje en Lebret, 1852) is de hoogte van de dorpel van het veerhuis te Westervoort niet opgenomen, zodat de waterstand tijdens kartering niet meer te herleiden is tot waterstand t.o.v. A.P. Het veerhuis is bij de aanleg van de brug bij Westervoort afgebroken.

De kaart bij Lathum (Beijerinck, 1771) bevat 16 dwarsprofielen, waarvan de helft (raai 1 en raai 10 t/m 16) een bekribd deel van de IJssel beschrijven en de andere helft (raai 2 t/m 9) een niet bekribd deel. De waterstand is gerelateerd aan de stand bij Doesburg. In het niet bekribde deel ligt aan de rechter oever een zandbank.

Op de twee kaarten bij Giesbeek (Beijerinck 1776a, 1776b) staan vier respectievelijk drie dwarsprofielen. Op beide kaarten is de waterstand ten opzichte van de peilschaal Arnhem gegeven.

De kaartschaal van Beijerinck, 1776a en 1776b is gegeven in Rijnlandse roeden (3,767 m). Omgerekend is de schaal van de foto 1:11959 respectievelijk 1:3477.

De schaal op de kaart van Beijerinck 1771 is gegeven in Geldersche roeden (3,81 m)

De kaartschaal van de foto is 1:8530.

Een overzicht van de gegevens per kaart wordt gegeven in tabel 4.4.

Tabel 4.4 Waterstanden behorende bij de IJssel-peilingen van Beijerinck (1771, 1776a, 1776b)

kaart	waterstand [voet a/d peils- chaal]	nulpunt peilschaal [m. AP]	water- stand kaart [m. AP]	M.R. [m. AP]	L.W. [m. AP]	Bankfull (Bf) [m. AP]	kaart tov Bf [m.]	M.R. tov Bf [m.]	L.W. tov Bf [m.]
<i>i.o.v. de peilschaal te Doesburg (1772-1781)</i>									
1771 (RK77)	4 ^{7/12}	5,27	6,71	6,43	5,39	7,89	-1,18	-1,46	-2,50
<i>i.o.v. de peilschaal te Arnhem (1772-1781)</i>									
1776a (RK 6 ^{8/12} 81)		6,91	9,00	9,26	8,02	10,44	-1,44	-1,18	-2,42
1776b (RK 6 83)		6,91	8,79	9,26	8,02	10,44	-1,65	-1,18	-2,42

4.1.4 Modelberekeningen met SOBEK

Om een inschatting te maken van de gemiddelde stroomsnelheden bij geulvullende afvoer en bij hoge afvoer (in zomerbed en uiterwaard) en van de afvoerverdeling tussen zomerbed en uiterwaard bij hoog water, zijn enkele berekeningen met het SOBEK model uitgevoerd. Het SOBEK model is een 1-dimensionaal hydrodynamisch model, waarin de rivier op eenvoudige wijze is geschematiseerd. In de modelschematisatie wordt de rivier onderverdeeld in dwarsdoorsneden die op een onderlinge afstand van ongeveer 500 m liggen. Elke dwarsdoorsnede is in drie segmenten onderverdeeld: het zomerbed, het kribvak en de uiterwaard. In doorsnede wordt binnen de uiterwaard onderscheid gemaakt tussen een bergend oppervlak (achter een zomerkade, waar het water stilstaat) en stroomvoerend oppervlak (daar waar het water boven de zomerkade stroomt). Het model maakt geen onderscheid tussen kribvakken en uiterwaarden van linker- of rechteroever. Een schematisch dwarsprofiel voor SOBEK is weergegeven in figuur 4.8. Voor elk van deze segmenten in de dwarsdoorsnede berekent het SOBEK model de afvoer, waterhoogte, en stroomvoerend oppervlak. Hieruit kunnen gemiddelde stroomsnelheden afgeleid worden. Het model kan zowel voor een stationaire situatie (constante afvoer) als voor een dynamische situatie (veranderende afvoer) toegepast worden. Voor deze studie zijn twee stationaire situaties doorgerekend: een geulvullende afvoer en een hoge afvoer. Benadrukt dient te worden dat het model gemiddelde waarden oplevert voor zeer sterk geschematiseerde riviersegmenten. Het model is daarom vooral bedoeld om over trajecten van enkele km's lengte een indruk te krijgen over verschillen in stroomsnelheid en afvoerverdeling over zomerbed en uiterwaard.

Voor de schematisatie zijn, om de ongeveer 500 meter, de breedte en de gemiddelde diepte van het zomerbed gebruikt, evenals de breedte en de gemiddelde uiterwaardhoogte. Het percentage bos is aangegeven zodat het model de ruwheid van het winterbed kan bepalen. De modelberekeningen zijn uitgevoerd voor de historische, huidige en toekomstige situatie. Historische profielen vormen de basis van de schematisatie van de historische situatie. Voor de historische situatie is het SOBEK model tevens gebruikt om de geschatte geulvullende afvoer te controleren.

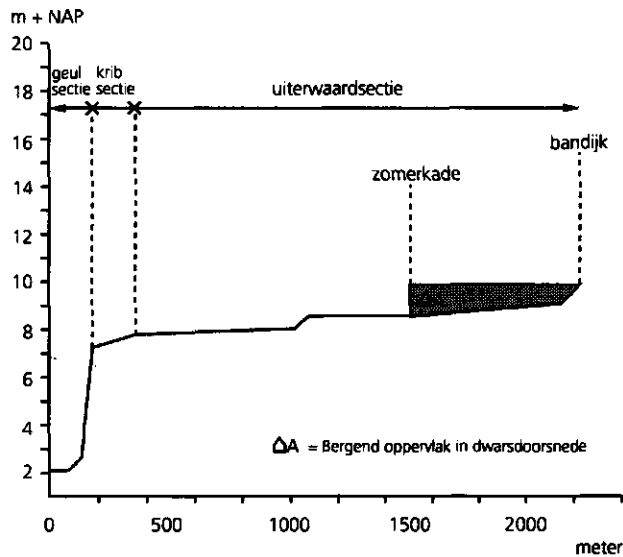
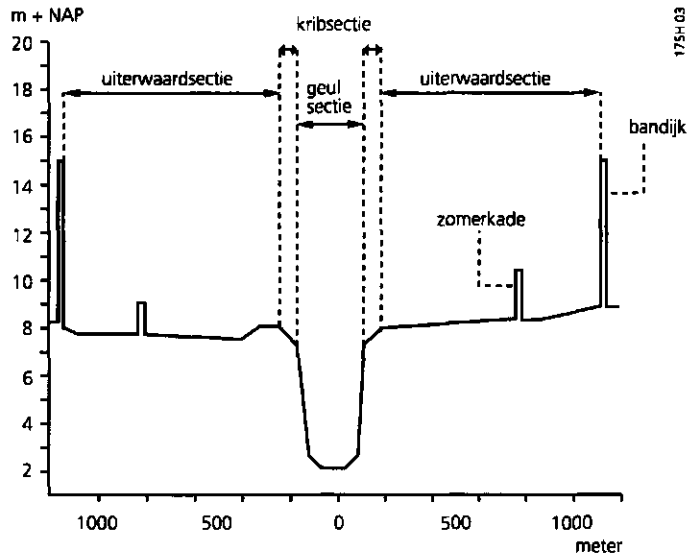


Fig. 4.8 Schematisch SOBEK dwarsprofiel (uit: Zeeman, 1994)

De huidige en toekomstige situatie zijn met het SOBEK model binnen het IVR instrumentarium berekend. Als toekomst scenario is het natuurstreefbeeld van IVR aangehouden. Dit houdt in (Douben et al. 1996):

- het verwijderen van zomerkades en hoogwatervrije terreinen (m.u.v. bovenstroomse kade IJssel);
- het verlagen van het uiterwaardoppervlak met 1 m;
- het graven van een nevengeul (km 892 t/m 894 Waal; km 896 t/m 899 IJssel);
- verandering van de ruwheid door het planten van 20% bos, parallel aan de rivier.

Figuur 4.9 geeft de SOBEK-vakgrenzen voor de IJssel aan en de plaats van de nevengeul en het gehandhaafde deel van zomerkade in het toekomstscenario.

Uit de berekeningen volgen gemiddelde stroomsnelheden bij geulvullende afvoer en bij hoge afvoer (in zomerbed en uiterwaard), alsmede de afvoerverdeling tussen zomerbed en uiterwaard bij hoog water.

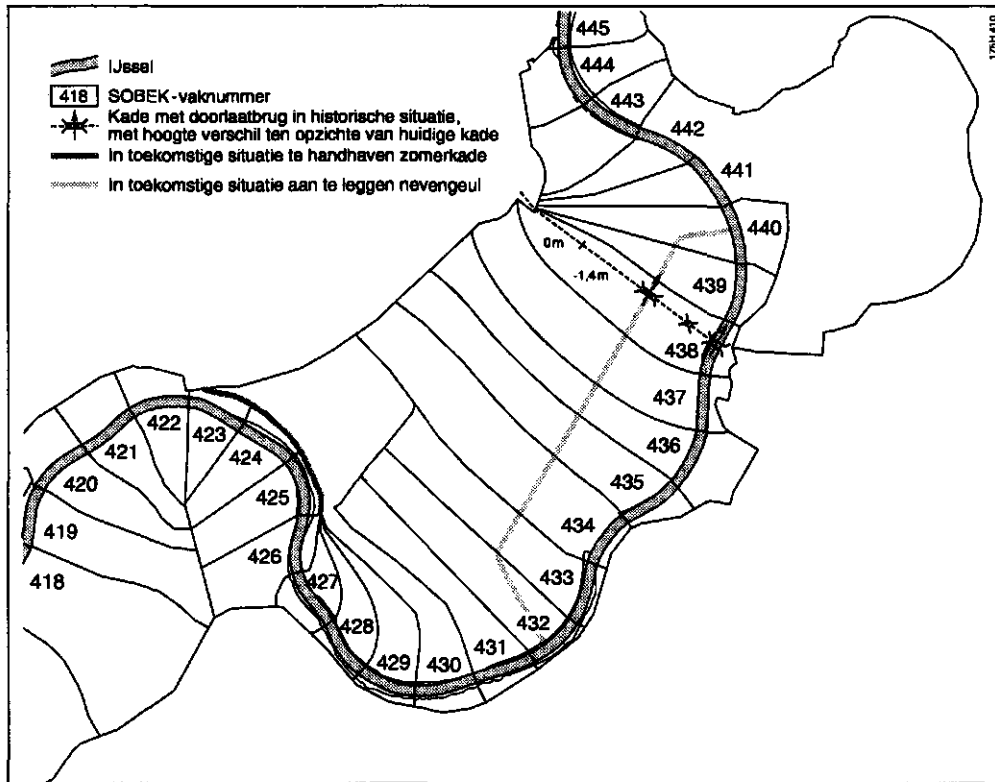


Fig. 4.9 SOBEK vakgrenzen voor de IJssel

De gevolgde werkwijze voor de historische situatie is hieronder uitgewerkt:

Sobek historische situatie - Waal

Voor berekeningen aan de historische situatie van de Waal zijn 17 historische diepteprofielen (Beijerinck 1801, zie aanhangsel 2) geschematiseerd tot 17 SOBEK profielen met een gemiddelde zomer- en winterbedhoogte en -breedte (zie aanhangsel 3). De in de kaarten aangegeven waterdiepten zijn hiervoor met behulp van het verhang en het nulniveau van de Peilschaal te Nijmegen omgerekend naar bodemhoogten t.o.v. A.P. (zie figuur 4.5) De gemiddelde winterbedhoogte is afgeleid uit de rivierkaart van 1873. De gemiddelde winterbedhoogte is, per profiel, gelijk gesteld aan de gemiddelde waarde van ca. 10 hoogtepunten in de uiterwaarden aan beide zijden van de rivier. Hoogtepunten op kaden zijn niet meegenomen, hoogtepunten in strangen zijn meegenomen in evenredig aandeel. De Chézy-waarde is gelijk gesteld aan de huidige ($C=45$). Het percentage bos is per profiel uit de kaart van Beijerinck afgeleid, en varieerde van 0 tot 50%. Het onderzochte riviertraject beslaat een lengte van ongeveer 7 km (zie figuur 4.4). De profielen liggen, net als op de oorspronkelijke kaart, 200 tot 600 m uit elkaar. Om randeffecten te voorkomen is het traject bovenstrooms en benedenstrooms verlengd met 10 km. Hiertoe zijn de dwarsprofielen in de verlengde delen gelijk gesteld aan de profielen aan de uiteinden van de schematisatie.

Voor de historische en ook voor de huidige en toekomstige situatie zijn geulvullende afvoeren van $2350 \text{ m}^3/\text{s}$ en hoge afvoeren van $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ in de Waal doorgerekend. Met

de door het model gegenereerde waterhoogten is een verhang berekend dat gebruikt is ter controle van het model. Dit mocht namelijk niet te veel afwijken van het geschatte gemiddelde verhang. Ook is gecontroleerd of de geulvullende afvoer goed geschat is. Een te hoge inschatting leidt ertoe dat een gedeelte van de afvoer door de uiterwaard gaat.

Sobek historische situatie - IJssel

In het meanderende traject tussen Westervoort en Doesburg treden, bij toenemende hoge waterstanden, grote verschillen op in het twee-dimensionale stroombeeld. Bij hoog water verandert de stroomdraad doordat het water een kortere route door de kronkelwaard neemt. Dit maakt het inschatten van de waterbeweging met een 1D model als SOBEK onnauwkeurig (Zeeman, 1994). Voor de historische situatie van de IJssel waren slechts 7 bruikbare dwarsprofielen uit het meanderende deel nabij Giesbeek beschikbaar (afkomstig van de kaarten Beijerinck 1776a en Beijerinck 1776b). De profielen nabij Lathum (Beijerinck 1771) zijn ongeschikt doordat de IJssel daar een enigszins ander karakter heeft (slingerend in plaats van meanderend) en er in 1771 bovendien al met de systematische aanleg van kribben was begonnen. De profielen nabij Giesbeek bevinden zich echter in een thans afgesneden meander, waardoor vergelijking tussen de waterbeweging in verschillende tijden niet meer mogelijk is.

Om deze reden zijn op grond van de beschikbare profielen afhankelijk van hun ligging, standaardprofielen gedefinieerd voor verschillende typen riviersegment. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen profielen in een scherpe bocht, flauwe bocht en recht segment. Met deze standaardprofielen zijn de diepten in een gelijkvormige bocht in de IJssel op het traject tussen kasteel Middachten en Doesburg geschat. Op deze wijze is voor een riviertraject van 6 km (12 SOBEK vakken) een dwarsprofiel opgesteld. (zie figuur 4.10) Onderlinge diepteverschillen die op de rivierkaart van 1870 voor dit traject zijn aangegeven bleken redelijk in overeenstemming met de verschillen die op grond van de standaardprofielen geschat waren. De schematisatie van de profielen in SOBEK is uitgevoerd met behulp van het IVR instrumentarium. Hiertoe zijn ten opzichte van de huidige situatie de kribben verwijderd; het stroomafwaartse deel van de zomerkade is verwijderd en het zomerbed is ondieper gemaakt. Om de waarde te schatten waarmee het zomerbed verondiept moest worden, is het verschil tussen de gemiddelde zomerbedhoogte in 1776 en in de huidige SOBEK schematisatie berekend (zie aanhangsel 3). Zo is, afhankelijk van profiel en ligging, het zomerbed tussen de 0 en 2,80 m ondieper gemaakt. In overeenstemming met de rivierkaart van 1875 is de Doesburgse dijk met 1,4 m verlaagd ten opzichte van de huidige schematisatie. De Ellekomse overlaat bestond al en is onveranderd gelaten. Net als bij de Waal is om randeffecten te voorkomen het model aan beide zijden verlengd. Deze verlengingen zijn met het gemiddelde verschil tussen historische en huidige diepte (1,58 m) verondiept.

Voor de historische IJssel is een geulvullende afvoer van 260 m³/s en een hoge afvoer van 1050 m³/s doorgerekend; voor de huidige en toekomstige situatie een geulvullende afvoer van 530 m³/s en een hoge afvoer van 1050 m³/s.

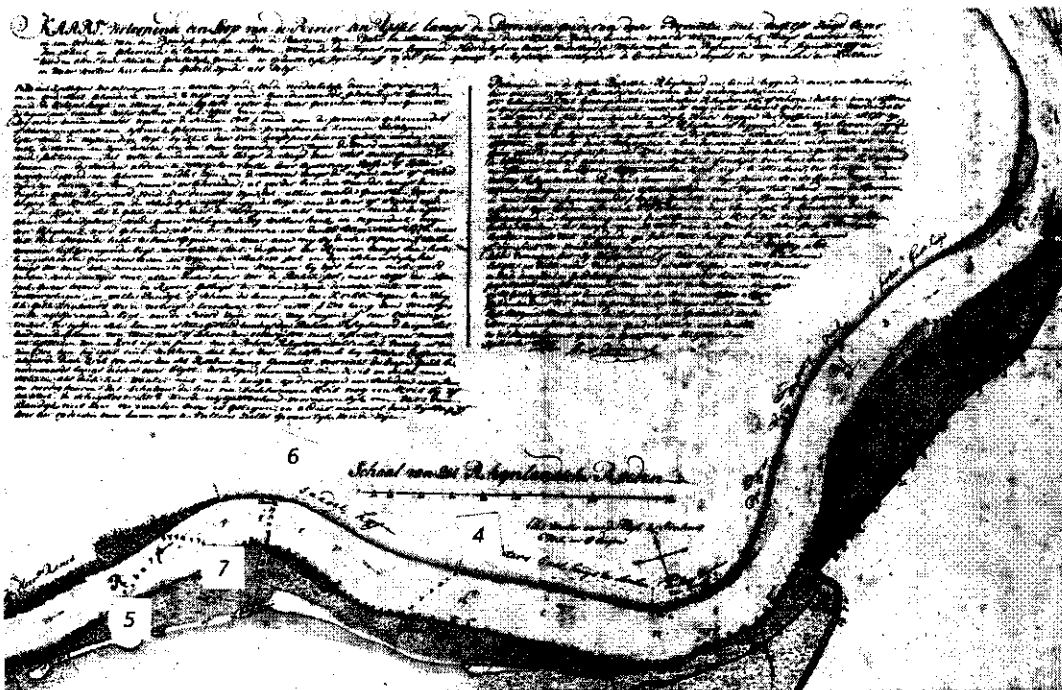
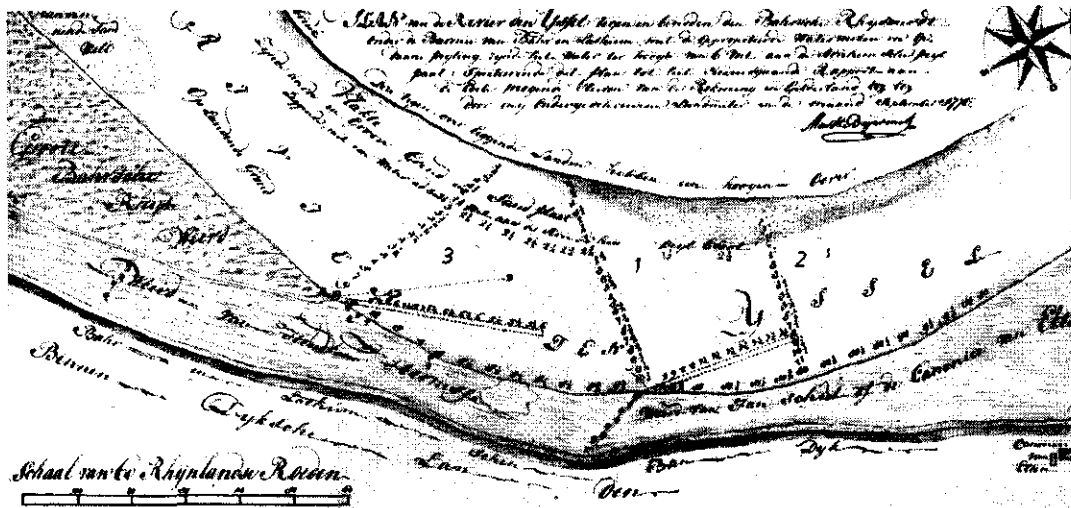


Fig. 4.10 Ligging van de historische profielen van Beijerinck (1776a en 1776b) en de SOBEK profielen voor de historische situatie. (zie Aanhangsel 2)

4.2 Basisparameters

4.2.1 Waterstand

Waterstanden fluctueren op kleine en grote tijdschaal met de afvoer en op grote tijdschaal ook met de beddinghoogte. Veranderingen in de waterstand op grote tijdschaal zijn geanalyseerd met behulp van de reeks dagelijkse waterstanden vanaf 1770 bij Nijmegen (Van der Beek, 1990, zie figuur 4.11).

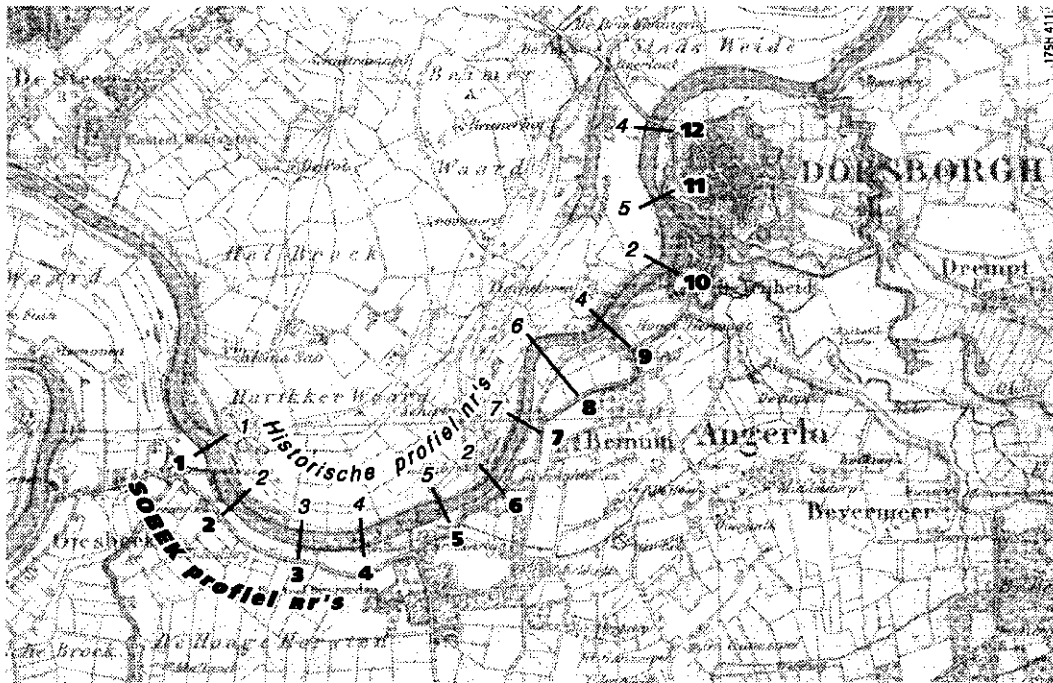


Fig. 4.10 (vervolg)

Voorwaarde voor bruikbaarheid van deze reeks is dat de peilschaal niet van plaats is veranderd. De oude peilschaal bij Nijmegen is in 1853 vervangen door een peilschaal met het nulpunt op A.P. Beide waren gemetseld in de kademuur nabij het bruggehoofd (Van der Kun, 1849). Op 28 april 1966 is op dezelfde plaats een peilschrijver geplaatst (Rijkswaterstaat, 1989). Op 12 september 1980 is de peilschrijver verplaatst naar Nijmegen haven, 750 m stroomafwaarts gelegen. De waterstanden zijn gemiddeld 13 cm lager dan bij de oude opstelling. Vanaf die datum tot het eind van 1980, zijn de waterstanden van het peilmeetstation bijgegist. Vanaf 1-1-1981 worden de standen bij Nijmegen-haven gebruikt (Rijkswaterstaat, 1994). Deze worden in figuur 4.11 niet meegenomen.

In de periode voor de riviernormalisatie van 1850 werden de (extreme) maximale waterstanden bij Nijmegen dikwijls veroorzaakt door opstuwning voor een ijssdam stroomafwaarts in de Waal en ze zijn daarmee niet automatisch gekoppeld aan hoge afvoeren. De 19^e eeuwse maxima zijn als gevolg van het voorkomen van ijssdammen duidelijk hoger dan die in de 20^e eeuw. Deze extreem hoge waterstanden gingen dikwijls gepaard met dijkdoorbraken. Ook de extreme minima uit het verleden kunnen verband houden met een ijssdam, maar dan stroomopwaarts in de Waal (bijvoorbeeld in 1794; Lely, 1890, pag. 214).

In figuur 4.11 is tussen omstreeks 1805 en 1850 een lichte trendmatige verhoging van zowel gemiddeld hoogste, gemiddeld laagste, als gemiddelde waterstanden zichtbaar. De verhoging van de maximale waterstanden is in ieder geval deels veroorzaakt door ijssdammen. Aanleg van zomerkades tussen 1770 (het begin van de dagelijkse waarnemingen van de waterstand) en 1830 zal geleid hebben tot verhoging van de lagere hoogwaters; de waterstand werd opgestuwd tussen de zomerkades. Dit kan invloed gehad

jaarlijks gemiddelde, gemiddeld hoogste en gemiddeld laagste waterstand te Nijmegen alsmede de lopend gemiddelde waarden

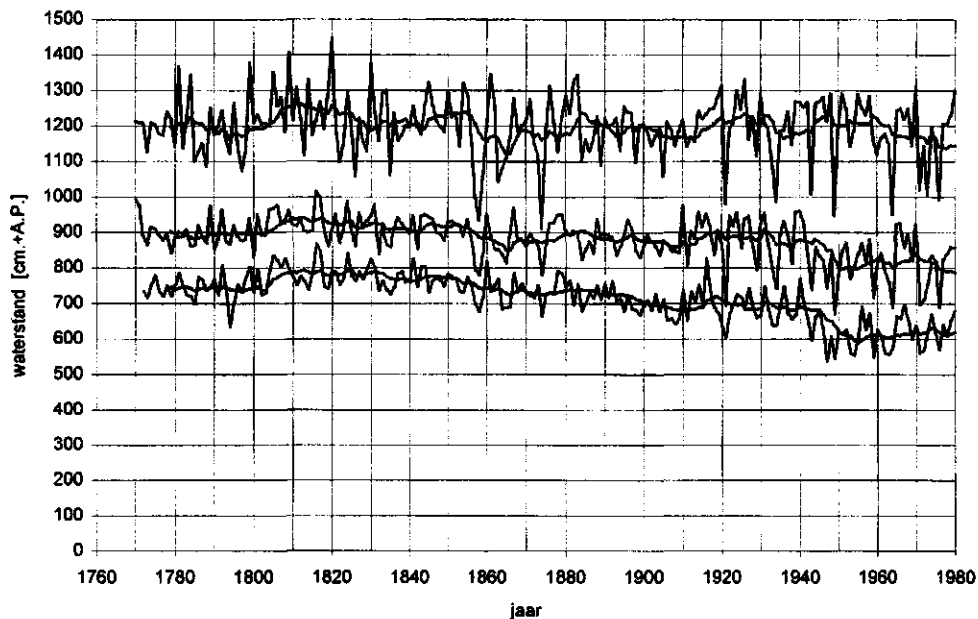


Fig. 4.11 Verloop van de gemiddelde, gemiddeld laagste en gemiddeld hoogste waterstand bij Nijmegen in de periode 1770-1980. Als trendlijnen zijn opgenomen de lopend gemiddelde waarden met een venster van 10 jaar. (naar Van der Beek, 1990)

hebben op de gemiddelde en gemiddeld hoogste waterstanden. De trendmatige verhoging van de minimale waterstanden geeft aan dat er misschien sprake is geweest van hogere afvoeren dan in de periode 1770-1805. Op de historische kaarten is een sterke erosie van de Waal uiterwaarden zichtbaar tussen 1776 en 1830. Het is mogelijk dat deze verband houdt met de verhoging van de waterstanden vanaf 1805.

Omstreeks 1850 wordt een daling van de waterstanden ingezet. Deze is het sterkst voor de minimale waterstanden. Dit geeft aan dat ze gecombineerd gaan met een bodemdaling die een gevolg is van de normalisatie werkzaamheden, die gepaard gingen met forse baggerwerkzaamheden en als gevolg hadden dat de rivier zich ging insnijden. Een afvoer verandering ligt niet voor de hand. Gemiddelde en minimale waterstanden vertonen een zeer forse trendbreuk (circa 80 cm daling) rond 1945, waarna ze stabiliseren.

De grondwaterstand in de uiterwaard volgt over het algemeen de waterstand in de rivier. De verlaging van waterstanden rond 1945 heeft tot gevolg gehad dat de grondwaterstanden in de uiterwaarden van de Waal thans lager liggen dan rond 1800. Voor de IJssel zijn geen gegevens beschikbaar.

4.2.2 Verhang

Als rivierkundige parameter wordt in dit rapport onder verhang het waterspiegel verhang verstaan. Dit is de helling die de waterspiegel maakt, meestal berekend als gemiddelde tussen twee opeenvolgende peilschalen. Dit verhang is niet constant, maar afhankelijk van de afvoer. Daarom wordt meestal onderscheid gemaakt in het verhang bij lage, gemiddelde en hoge waterstanden. Bij hoge waterstanden is het verhang groter. Er wordt geen onderscheid naar stijgende en dalende afvoer gemaakt.

Voor het verhang bij geulvullende waterstand wordt het gemiddelde tussen het verhang bij gemiddeld hoogste standen en bij Middelbare Rivierstand aangenomen. Tabel 4.5 geeft een overzicht van het verhang rond 1800 en het huidige verhang. Hieruit blijkt dat het verhang van Waal en IJssel ongeveer 10% is afgenomen. Dit hangt waarschijnlijk samen met een afname van het bodemverhang doordat de insnijding van Waal en IJssel bovenstrooms in het traject groter is geweest dan benedenstrooms. Dit geldt voor de IJssel, waar de bodemligging bij de IJsselkop is tussen 1938 en 1988 ca 1 meter verlaagd, terwijl deze bij Doesburg minder dan 0,2 m is verlaagd (Ponte, 1995). Dit geldt eveneens voor de Waal, hoewel het verschil in insnijding daar minder is dan bij de IJssel; ca 80 cm bij Nijmegen en ca 60 cm bij Tiel (Taal, 1994)

Tabel 4.5 Berekening van het historische en huidige verhang van de Waal en de IJssel

	Waal 1811-1820	Waal 1994	IJssel 1811-1820	IJssel 1994
Peilschaal 1	Nijmegen	Nijmegen	Westervoort	IJsselkop
Peilschaal 2	Tiel	Tiel	Doesburg	Doesburg
Afstand tussen de peilschalen [km]	30,61	29,95	22,55	20,145
Verval (bij M.R. of norm. midden) [m]	3,74	3,39	2,91	2,22
Verval (bij gem. hoogste of norm. hoogste) [m]	4,17	3,17	2,85	2,66
Verhang (bij M.R. of norm. midden) [cm/km]	12,2	10,6	12,9	11,0
Verhang (bij gem. hoogste of norm. hoogste) [cm/km]	13,6	11,6	12,6	13,2
Verhang (bij geulvullende waterstand) [cm/km]	12,9	11,0	12,8	12,1

4.2.3 Afvoer

Uit de historische afvoermetingen (zie 4.1.2) blijkt dat de historische geulvullende Waal waterstand werd bereikt bij een Boven-Rijn afvoer van ca 3500 m³/s; de historische geulvullende IJssel waterstand bij ca. 3900 m³/s. Dit betekent dat de uiterwaarden in het traject langs de Waal eerder overstromd worden dan in het traject uit de IJssel. Dit is thans ook nog het geval (zie tabel 4.6).

Tabel 4.6 Overzicht van historische en huidige geulvullende afvoer van Waal en IJssel

	Q _{Boven-Rijn}	Q _{ak}
Waal, historisch	3500	2350
Waal, heden	3500	2350
IJssel, historisch	3900	270
IJssel, heden	4100	580

Een Boven-Rijn afvoer van 3900 m³/s kwam in 1792 overeen met een geulvullende IJssel afvoer van 270 m³/s. De huidige geulvullende afvoer door de IJssel is bijna twee maal zo hoog (580 m³/s). Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de afvoerverdeling veranderd is ten gunste van de IJssel (zie 4.1.2). Ook de relatief hogere oevers dragen bij aan een hogere geulvullende afvoer.

4.2.4 Stroomsnelheden

De resultaten van de SOBEK berekeningen zijn weergegeven in figuur 4.12 en 4.13 en tabel 4.7.

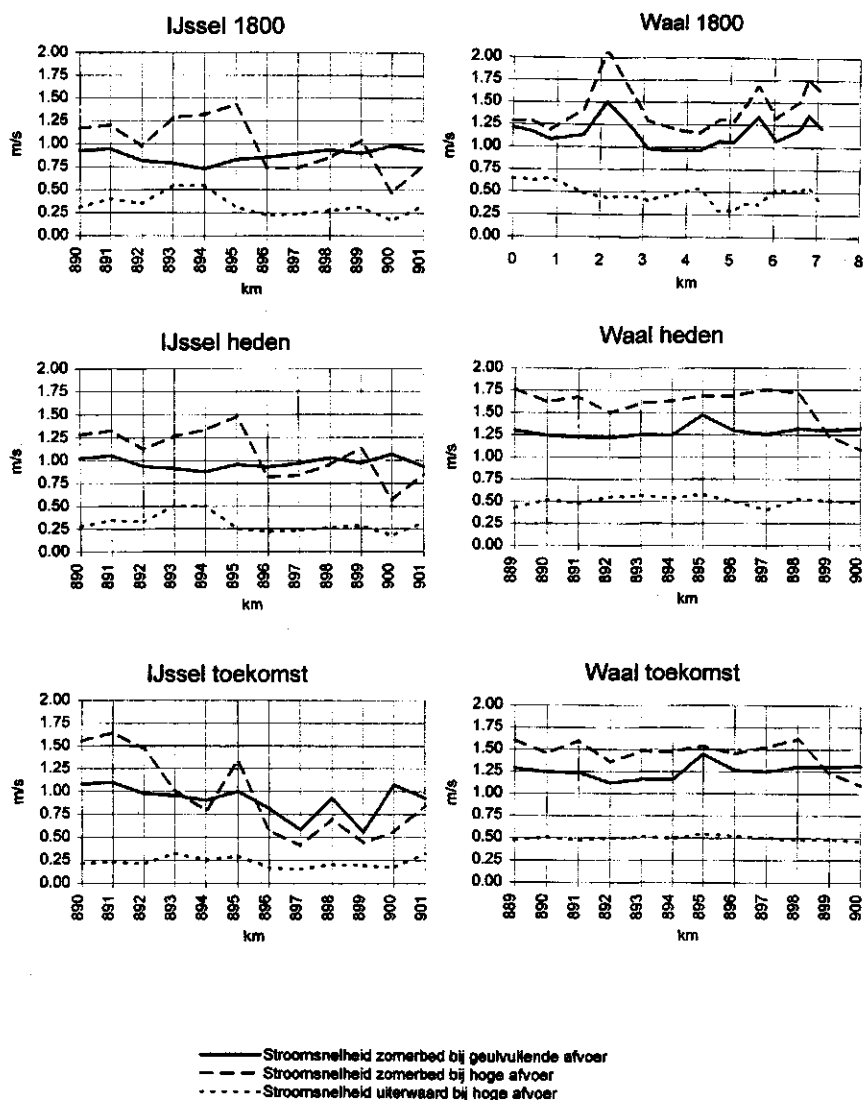


Fig. 4.12 Verloop van de stroomsnelheid bij geulvullende en hoge afvoer in de Waal en de IJssel

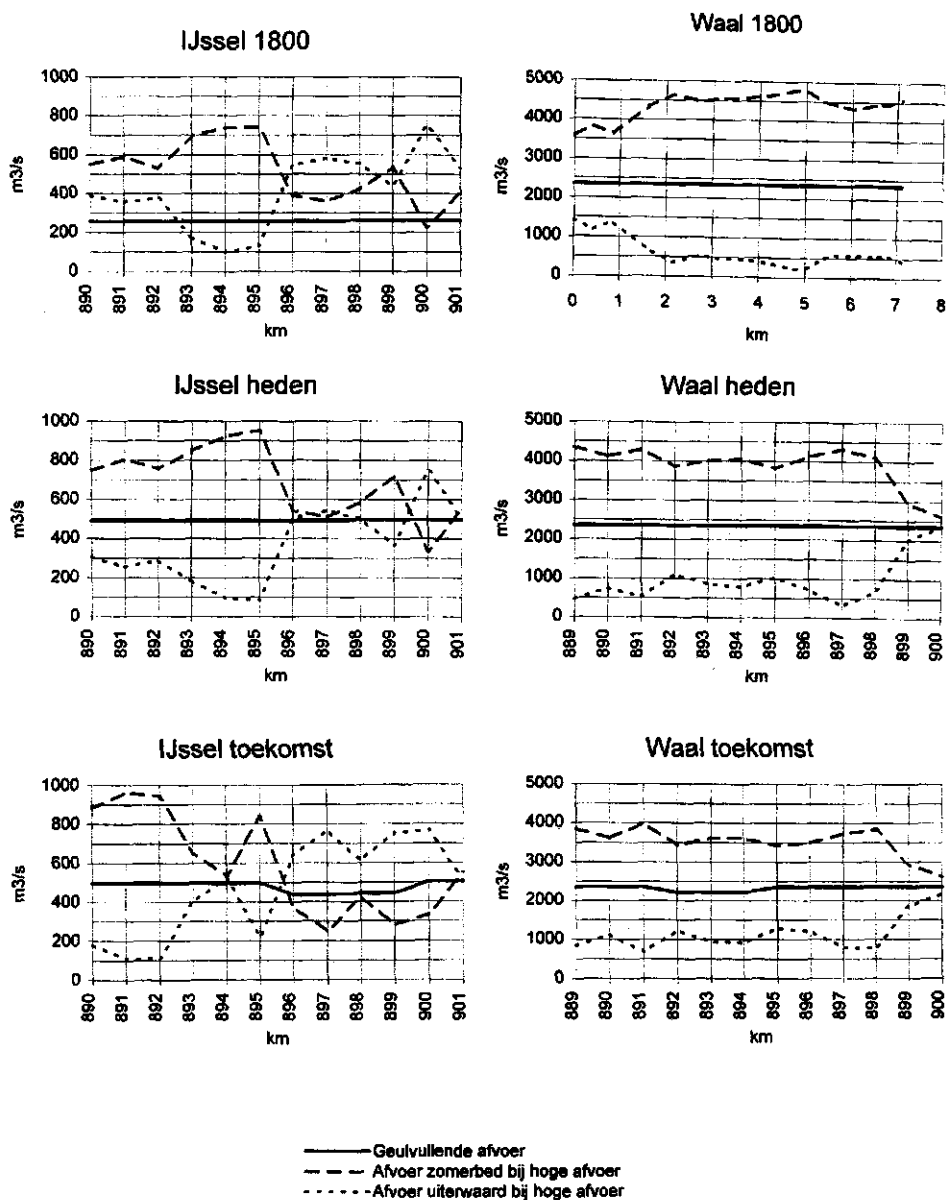


Fig. 4.13 Verloop van de afvoer in zomerbed en uiterwaard bij geulvullende en hoge afvoer in de Waal en de IJssel

Waal

In de historische situatie zijn de variaties in stroomsnelheden bij geulvullende afvoer veel groter dan tegenwoordig en bij het toekomstscenario. De hoogste stroomsnelheid treedt op bij de vernauwing stroomopwaarts van de plaat bij Ewijk, de laagste stroomsnelheid in het traject ongeveer één kilometer stroomafwaarts van de zandplaat. De zandplaat dankt zijn ligging aan deze sterke afname van de stroomsnelheid.

Bij geulvullende afvoer is de stroomsnelheid van de Waal tegenwoordig hoger dan rond 1800. Bij hoge afvoer gaat een groter aandeel over de uiterwaard dan in het verleden.

Tabel 4.7 Gemiddelde stroomsnelheid en standaard deviatie (SD) in de Waal en IJssel; resultaten SOBEK-berekeningen

	Geulvullende afvoer		Hoge afvoer				
	zomerbed		zomerbed		uiterwaard		
	v_{gem}	SD	v_{gem}	SD	v_{gem}	SD	% Q
Waal, 1800	1,16	0,15	1,44	0,24	0,47	0,11	12
Waal, heden	1,29	0,07	1,58	0,21	0,51	0,05	18
Waal, toekomst	1,26	0,09	1,45	0,16	0,50	0,02	23
IJssel, 1800	0,88	0,07	1,00	0,29	0,33	0,12	43
IJssel, heden	0,97	0,06	1,08	0,27	0,31	0,10	34
IJssel, toekomst	0,91	0,18	0,95	0,45	0,23	0,06	44

Bij een ongewijzigde geulvullende afvoer worden bij het toekomstscenario enkele tientallen m^3/s door de nevengeul in de uiterwaard afgevoerd. Daardoor is de stroomsnelheid in het zomerbed iets lager geworden. Ditzelfde doet zich voor bij hoge afvoer.

In vergelijking met de historische situatie wordt bij het toekomstscenario veel meer water over de uiterwaard afgevoerd, omdat de uiterwaarden lager zijn dan in de historische situatie. De stroomsnelheden fluctueren in lengterichting veel minder dan in de historische situatie, zowel in het zomerbed als over de uiterwaard.

IJssel

In de historische situatie wordt bij een hoge IJsselafvoer ($960 \text{ m}^3/\text{s}$) in het bovenstroomse deel van het onderzochte traject, waar zich een zomerkade langs het zomerbed bevindt, ongeveer slechts 57% van het water door het zomerbed afgevoerd. De gemiddelde stroomsnelheid in het zomerbed is hier in de orde van 1,2 - 1,4 m/s. In het middelste deel is geen zomerkade aanwezig en is het meestromende oppervlak door de uiterwaarden ruim 2000 m^2 . Hier daalt de afvoer door het zomerbed tot ongeveer 40% van de totale afvoer. De afvoer over de uiterwaarden bedraagt hier maximaal $580 \text{ m}^3/\text{s}$. In dit brede deel is de stroomsnelheid in het zomerbed gedaald tot onder 0,8 m/s. Net als bij de Waal zijn de variaties in stroomsnelheid in de lengterichting groot.

Tegenwoordig is de IJssel smaller en dieper dan rond 1800. De geulvullende afvoer is bijna verdubbeld. Door dit laatste is de gemiddelde stroomsnelheid bij geulvullende afvoer in het zomerbed ongeveer 10% hoger dan rond 1800 en schommelt rond 1 m/s. Bij hoge afvoer wordt in het bovenstroomse deel ongeveer 80% van het water door het zomerbed afgevoerd, wat aanzienlijk meer is dan rond 1800. De stroomsnelheid in het zomerbed bedraagt dan ongeveer 1,3 m/s, iets meer dan in 1800. Ook in het centrale deel zonder zomerkade voert het zomerbed bij hoge afvoer tegenwoordig naar verhouding meer water af dan rond 1800, ruwweg de helft van het totaal. Gemiddelde stroomsnelheden in de uiterwaard zijn vrijwel hetzelfde als in 1800; in het zomerbed ligt deze nu iets hoger dan rond 1800.

In het toekomstscenario stroomt bij een geulvullende afvoer ongeveer 30% van de afvoer door de nevengeul in het centrale deel van het traject. Als gevolg hiervan neemt de stroomsnelheid in het zomerbed ter plekke af tot 0,6 m/s. Bij hoge afvoer verandert

in het bovenstroomse deel weinig ten opzichte van de huidige situatie omdat de zomerkade blijft staan. In het centrale deel met het verlaagde uiterwaardoppervlak en de nevengeul wordt de afvoer door het zomerbed minder dan 50% van de totale afvoer. Gemiddelde stroomsnelheden in het zomerbed zijn dan laag: in de orde van 0,5 m/s, in de uiterwaard 0,2 m/s.

Een belangrijk verschil tussen de historische situatie en de toekomstige situatie met het natuurstreefbeeld is dat het zomerbed smal en diep blijft, dus met een kleine breedte-diepteverhouding. Bij de IJssel lijkt in het toekomstscenario de stroomsnelheid bij hoge afvoer in het centrale deel zover af te nemen, dat hier een sterke sedimentatie te verwachten is. Dit maakt het toekomstscenario weinig realistisch.

4.2.5 Breedte-diepteverhouding

Betekenis

De verhouding tussen de breedte en de diepte (B/d) van een rivier is een belangrijk morfologisch kenmerk van een rivier. Deze kan beschouwd worden als resultante van de erosieve kracht van een rivier en de weerstandskracht van het oever- en beddingmateriaal. Verschillen tussen rivierpatronen (meanderend, anastomoserend, verwilderd) komen sterk tot uitdrukking in de Breedte-diepteverhouding. Voor de historische en de huidige situatie is van beide trajecten de gemiddelde breedte-diepteverhouding van het zomerbed bepaald. De breedte van het zomerbed kon in alle gevallen op eenvoudige wijze uit de kaarten worden afgeleid. Voor de gemiddelde diepte voor de huidige situatie is gebruik gemaakt van de huidige SOBEK-schematisatie (zie tabel 4.8). Voor de historische situatie is de diepte gereconstrueerd op grond van de diepteprofielen (zie 4.1.3).

Tabel 4.8 bepaling van de diepte van de huidige Waal en IJssel

	Waal 1994	IJssel 1994
Diepte bij $Q_{Lobith}=1100$ ^{*)}	3,58	3,07
Waterhoogte bij $Q_{Lobith}=1100$ ^{**)}	7,48	6,89
Q_{Lobith} =geulvullend	3500	4100
Waterhoogte bij Q_{Lobith} =geulvullend ^{**)}	11,26	10,67
Waterhoogte verschil tussen Q_{Lobith} =geulvullend-1100	3,78	3,78
Waterdiepte bij $Q_{geulvullend}$	7,36	6,85

^{*)} bron: Douben (1995)

^{**)} bron: Rijkswaterstaat (1995)

Veranderingen in de tijd

Tabel 4.9 geeft een overzicht van de gemiddelde breedte/diepteverhouding van Waalafzetting en IJssel rond 1800 en nu. Voor de huidige breedte is de normaalbreedte (de breedte tussen de kribkoppen) aangehouden. Voor de historische situatie is bij de Waal onderscheid gemaakt tussen de profielen met en zonder zandplaat. Voor de IJssel is het bekribde traject onderscheiden van het traject zonder kribben. In aanhangsel 2 zijn de profielen en de gemiddelde breedte en diepte per profiel weergegeven.

Tabel 4.9 Breedte-diepteverhouding van Waal en IJssel in 1880 en heden

	Breedte B [m]	Diepte d [m tov Bf]	B/d [-]	Natte doorsnede A=B*d [m ²]	Hydraulische straal R=A/2d+B [m]
Waal 1800 gemiddeld	557	4,01	151	2159	3,96
met zandplaat	707	2,99	242	2090	2,96
zonder zandplaat	495	4,44	113	2188	4,36
Waal 1995	260	7,36	35	1914	6,97
IJssel 1800 gemiddeld	114	3,19	37	362	3,02
zonder kribben	129	3,14	43	402	2,99
met kribben	87	3,29	27	286	3,05
IJssel 1995	80	6,85	12	548	5,85

Uit tabel 4.9 blijkt door versmalling en verdieping de breedte-diepteverhouding van Waal en IJssel in vergelijking met historische situatie met ongeveer 70% is afgenomen. De afname is bijzonder groot op plaatsen in de Waal waar vroeger zandplaten in het zomerbed lagen. Hier was de Waal dan ook erg breed en ondiep.

Bij de IJssel begint de bekribde situatie al wat op de huidige te lijken. Door verdieping nam B/d nog verder af. Doordat de IJssel zoveel smaller is dan de Waal, is de verhouding tussen breedte en diepte er veel kleiner. De B/d verhouding van de huidige Waal is vergelijkbaar met die van de historische IJssel.

In een toekomst situatie zal de breedte-diepteverhouding van beide rivieren niet veel veranderen. Verdieping van de vaargeul zal tot nog kleinere waarden leiden en alleen inkorten of verwijderen van kribben zal de breedte-diepteverhouding verhogen. Maatregelen in de uiterwaard of aan de oevers hebben ten hoogste een indirecte invloed op de breedte/diepteverhouding; wanneer zij effect hebben op de diepte van het zomerbed.

4.2.6 Korrelgrootte

Situatie omstreeks 1800

Voor het inschatten van rivierkundige parameters van de proefgebieden IJssel en Waal voor de periode rond 1800 zijn korrelgroottegegevens nodig van het materiaal waaruit de rivierbedding bestaat. Omdat hiervan geen historische gegevens beschikbaar zijn, is getracht een indruk van deze korrelgroottes te krijgen uit boorgegevens van Middelkoop (mond. mededeling), aangevuld met enkele studentenboringen uit het archief van Berendsen (Vakgroep Fysische Geografie, Universiteit Utrecht).

De schatting van de korrelgroottes van het voormalige zomerbed zijn gebaseerd op korrelgroottegegevens (D50) van beddingafzettingen op de bodem van dichtgeslibde restgeulen en strangen, die rond 1800 nog deel uitmaakten van het zomerbed. Waar dit niet mogelijk was is gebruik gemaakt van korrelgroottegegevens van monsters die zo diep mogelijk uit kronkelwaard/zandruggen genomen zijn. Korrelgroottes uit zandruggen, gelegen tussen strangen zijn in het algemeen fijner dan die onderin het diepere zomerbed, als gevolg van het 'fining-upward' sorteringsmechanisme bij afzetting

van de zandbanken en kronkelwaarden. De monsters uit de restgeulen betreffen helaas alleen de bovenzijde van de zandafzettingen. Mogelijk betreft het hier zand dat is afgezet toen de geul zijn functie al aan het verliezen was. In deze laatste fase waren de afvoer en de stroomsnelheden in de geul mogelijk al aan het afnemen, waardoor het zand dat over de bodem aangevoerd kon worden fijner was dan tijdens de bloeifase van de bedding. Dit betekent dat de korrelgroottes uit deze bovenste geulafzettingen een onderschatting opleveren voor de korrelgroottes tijdens volledige activiteit van de geul.

Waal

Schattingen van de mediane korrelgroottes van het beddingzand van de Waal rond 1800 zijn gebaseerd op korrelgroottegegevens uit de top van de zandige opvullingen van strangen langs de Waal. De groftste zandafzettingen aangetroffen bij boringen in een strang in de uiterwaard bij Oosterhout liggen tussen 600 en 850 μm . Boorgegevens van de Winssense Waard laten zien dat korrelgroottes van het beddingmateriaal in strangen dicht langs het huidige zomerbed sterk variëren. Het fijnste zand is rond 150 μm , dit moet echter als geulopvulling beschouwd worden. De mediane grootte van het grofste materiaal ligt rond 850-1000 μm . Het zand in de zandruggen dicht langs de huidige bedding kan lokaal een mediane waarde rond 850 μm hebben. Bij Slijk Ewijk is net ten noorden van de steenfabriek zand met een mediane korrelgrootte van 850-1000 μm aangetroffen. Het bovenste deel van de beddingafzettingen langs het huidige zomerbed ter hoogte van het Zwarte Gat zijn tussen 420 en 600 μm ; dit is naar verwachting fijner dan onderin de bedding. Beddingzand onder in de strang die midden in de uiterwaard is gelegen heeft een korrelgrootte tussen 300 en 420 μm . Onderin een strang net ten westen van de brug bij Slijk-Ewijk is grof bedding zand met een mediane korrelgrootte van 1000-1400 μm aangetroffen. Deze strang maakte rond 1800 echter al geen deel meer uit van het zomerbed.

In het algemeen lijken de beddingafzettingen rond 1800 van de Waal dus grover dan die van de IJssel. Als gemiddelde schatting voor de Waal kan minimaal 850-1000 μm aangehouden worden.

IJssel

De afzettingen langs het traject bij Giesbeek zijn sterk vergraven, waardoor hier vrijwel geen gegevens beschikbaar zijn. De mediane korrelgrootte van het sediment langs de huidige bedding ligt in de klasse 420-600 μm . In de uiterwaard bij Bronkhorst hebben de korrelgroottes in zandruggen in het algemeen een mediane waarde tussen 300 en 420 μm , de korrelgrootte onderin de bedding zal aanzienlijk grover zijn. Van de restgeul van de IJssel voor Doesburg ('Lamme IJssel') waren enkele boorgegevens beschikbaar. De mediaanwaarde van het beddingzand onder de kleiige restgeulopvulling varieert van 210-300 μm tot 300-420 μm . Deze korrelgroottes zijn naar verwachting een onderschatting van de korrelgroottes in de bedding rond 1800: de geul was al afgesloten voordat het Pannerdensch Kanaal en de Pleij geopend waren, dus functioneerde alleen in de periode met minimaal debiet van de IJssel. Bovendien is aannemelijk dat deze bovenste zandafzettingen in de geul afgezet zijn toen de geul niet meer volledig functioneerde.

Uit deze waarnemingen kan de voorlopige en voorzichtige conclusie getrokken worden dat het beddingzand in de bovenloop van de IJssel in de periode rond 1800 een mediane waarde van minstens 420-600 μm had.

Situatie na 1960

Ten Brinke (1997, pp. 99) geeft voor het onderzochte traject van de Waal (km 889-901) in 1995 een mediane korreldiameter (D50) van tussen de 700 μm en de 1600 μm , met een gemiddelde van 900 μm .

Het huidige beddingmateriaal van de IJssel tussen De Steeg en Doesburg (km 890-903) bestaat volgens ten Brinke (1997, pp. 127) uit zeer grof grindhoudend zand met een mediane korreldiameter van 1,8 mm. Tussen Westervoort en de Steeg is het beddingmateriaal nog grover; de D50 is daar gemiddeld 5 mm. Tussen Doesburg en Zutphen is de korrelgrootte wat fijner (gemiddelde D50: 1,1 mm). Daarna wordt de IJssel snel fijzandiger, tot 200 μm bij Kampen. De grove beddingafzettingen zijn van dezelfde oorsprong dan de beddingafzettingen verder stroomafwaarts of dan die van de Waal. De rivierbedding snijdt in alle gevallen de formatie van Kreftenheije aan, pleistocene rivierafzettingen van vlechtende rivieren (Van de Meene, 1977; Verbraek, 1984). Hierin kunnen wel meer of minder grindhoudende gedeelten voorkomen.

Tussen 1966 en 1995 is het beddingmateriaal van de Waal verfijnd van gemiddeld 1,5 mm tot 0,9 mm. (zie tabel 4.10). Ook de IJssel vertoont in die periode een verfijning; van gemiddeld 3,5 mm in 1966 tot 1,8 mm in 1995. De vergroving van de bedding van de IJssel in 1984, die ten Brinke (1997) vanaf km 910 aantreft, is tussen km 890 en 903 niet zichtbaar. Een mogelijke verklaring voor de verfijning van de Waal- en IJsselbedding is de afname van de insnijdingssnelheid tussen 1966 en 1994. Snelle insnijding, die niet of niet alleen het gevolg is van baggeren, gaat gepaard met hoge schuifspanningen aan de bodem. Hierbij vindt selectieve erosie van fijne fractie plaats en dus een vergroving van de bodem. Bij geringere insnijding en een afname van bodemschuifspanningen kan weer meer fijner materiaal aan de oppervlakte blijven liggen.

Tabel 4.10 gemiddelde D50 [mm] in zomerbed van Waal en IJssel tussen 1966 en 1995

jaar	Waal	IJssel
1966	1,5	3,5
1976	1,2	3,1
1984	1,2	2,1
1995	0,9	1,8

De waargenomen verfijning tussen 1966 en 1995 hoeft niet te betekenen dat de rivierbedding ook in de periode daarvoor (tot 1800) ook zo grof was als in 1966. De insnijding van de rivieren is door de normalisatie (na 1850) in gang gezet. Het is waarschijnlijker dat de fijnere fracties voor de normalisatie meer in het beddingzand aanwezig waren. De voor 1800 geschatte korreldiameters van de IJssel (minimaal 400-600 μm) en de Waal (minimaal 850-1000 μm) blijven erg onzeker, doordat ze afgeleid zijn van sedimenten die waarschijnlijk in verzandende fase zijn afgezet. Uit de ontwikkelingen na 1960 weten we dat de mate van insnijding van invloed is op de korrelgrootte van het beddingmateriaal.

Gezien alle onzekerheden gaan we voor verleden, heden en toekomst uit van het huidige bedding materiaal; D50 Waal 0,9 mm en D50 IJssel 1,8 mm. Wel worden gevoeligheidsanalyses gedaan voor variatie van afgeleide parameters bij variatie in de korrelgrootte.

4.3 Afgeleide parameters

4.3.1 Stream power

Definitie en betekenis

De stream power ('stroomvermogen') is een variabele die als maat gebruikt wordt voor het vermogen van de rivier om sediment op te nemen en te transporteren, wat resulteert in morfologische veranderingen. De stream power (Ω) is de afname van de potentiële energie van een rivier per eenheid van lengte (Richards, 1982). De specifieke stream power (ω) wordt verkregen door de stream power door de breedte van de rivier te delen. Dit geeft het energieverlies van de rivier per oppervlakte in doorsnede. Onder constante dichtheid van water en zwaartekrachtversnelling is de stream power afhankelijk van de overheersende (of geulvullende) afvoer en het verhang. Voor berekening van het verhang is het wellicht beter het dalverhang te nemen, omdat het geulverhang mede bepaald wordt door de sinusiteit, en daarom geen onafhankelijke variabele is. In de praktijk is het echter zeer moeilijk het dalverhang te berekenen. Nanson & Croke (1992) delen rivieren ruwweg in drie energieklassen in: laag energetisch met $\omega < 10 \text{ W/m}^2$, midden met ω tussen 10 en 300 W/m^2 en hoog energetische rivieren met $\omega > 300 \text{ W/m}^2$, globaal overeenkomend met respectievelijk de depositiezone, de transportzone en de erosiezone (zie par 2.1).

Tabel 4.11 Definitie van het begrip stream power (naar Richards, 1982)

Variabele	Symbool	Definitie	Eenheid
Potentiele stream power per eenheid van dallengte	Ω_p	$= \rho g Q i_v$	[W/m]
Stream power per eenheid van geullengte	Ω	$= \rho g Q i$	[W/m]
Specifieke stream power per eenheid van bedding oppervlak	ω	$= \Omega/B$	[W/m ²]
Stream power per eenheid van watermassa	ω'	$= \Omega/Bd$	[W/m ³]

met: ρ = dichtheid van water
 g = zwaartekrachtversnelling
 Q = geulvullende afvoer
 i_v = dalverhang
 i = verhang
 B = gemiddelde breedte
 d = gemiddelde diepte

De streampower is ook een maat voor de stroomsnelheid. De stroomsnelheid u kan men uitdrukken als:

$$u = Q/Bd$$

De Chézy vergelijking luidt:

$$u = C \sqrt{di} \text{ ofwel}$$

$$v^2 = C^2 \cdot di$$

waarin C de Chézy-coëfficiënt is.

Een relatie tussen de stroomsnelheid v en de streampower ω wordt verkregen door combinatie van beide uitdrukkingen:

$$v^3 = (Q/Bd)(C^2 \cdot di) \text{ ofwel:}$$

$$v = \sqrt[3]{\frac{Q}{Bd} C^2 di} = \sqrt[3]{\frac{\rho g Qi}{\rho g B} C^2} = \sqrt[3]{\frac{\omega C^2}{\rho g}}$$

Hieruit blijkt dat de stroomsnelheid recht evenredig is met de derde machtwortel uit de streampower. De streampower is dus een geschikte karakterisering van de stromingsomstandigheden (bij geulvullende afvoer).

Veranderingen in de tijd

In tabel 4.12 zijn de waarden van de variabelen waaruit de stream power berekend wordt gegeven voor de Waal en de IJssel rond 1800 en in de huidige situatie. Deze waarden zijn berekend bij geulvullende afvoer. Als gevolg van de veel grotere afvoer is de stream power van de Waal veel groter dan die van de IJssel.

Tabel 4.12 Berekening vande stream power voor de historische en huidige Waal en IJssel.

	Waal 1800	Waal nu	IJssel 1800	IJssel nu
ρ	1000	1000	1000	1000
g	9,8	9,8	9,8	9,8
Q	2350	2350	260	500
i -spiegel	$12,9 \cdot 10^{-5}$	$11,0 \cdot 10^{-5}$	$12,8 \cdot 10^{-5}$	$12,1 \cdot 10^{-5}$
B	557	260	114	80
ω	5,3	9,7	2,8	7,4

Bij beide rivieren is de specifieke stream power tussen 1800 en 1995 toegenomen. Dit betekent dat het vermogen van de rivieren om bedding en oevers te eroderen en sediment te transporteren is toegenomen. De toename van de specifieke stream power is bij de Waal voornamelijk het gevolg van de bedding versmalling als gevolg van de normalisatiewerken. Bij de IJssel is daarbij ook de geulvullende afvoer nog bijna verdubbeld (zie 4.2.3).

In alle gevallen behoren de rivieren op grond van hun specifieke stream power volgens de indeling van Nanson & Croke (1992) tot de laag-energetische rivieren. Ze liggen dan ook in de depositiezone.

Volgens het natuurstreefbeeld zal in een toekomstige situatie de geulvullende afvoer in het zomerbed van de rivieren iets kunnen afnemen. Dit komt omdat een (klein) deel van de afvoer via nevengeulen verloopt. Bovendien kan verlaging van de uiterwaarden ertoe leiden dat het geulvullende stadium van het zomerbed al bij een lagere afvoer dan tegenwoordig wordt bereikt. Een afname van de geulvullende afvoer betekent een afname van de stream power.

4.3.2 Shields parameter

Definitie en betekenis

De Shields parameter is een maat voor het sedimenttransporterend gedrag van een rivier. De Shields parameter is gebaseerd op zowel vermogen van de rivier als eigenschappen van het beddingsediment. Indien de Shields parameter bij twee rivieren gelijk is, zal bij gelijke afvoeromstandigheden het sedimenttransport gelijk zijn.

De Shields parameter is gedefinieerd als:

$$\theta = u^2/C^2\Delta D_{50}$$

met u = gemiddelde stroomsnelheid

C = Chézy coëfficiënt

Δ = relatieve sedimentdichtheid = $(\rho_s - \rho)/\rho = 1,65$

D_{50} = mediane korreldiameter van de bedding [m]

De Chezy-vergelijking luidt:

$$u = C \sqrt{Ri} \text{ ofwel}$$

$$u^2/C^2 = Ri$$

met R = hydraulische straal [m] = natte doorsnede (Bd) / natte omtrek ($2d+B$)

B = breedte

d = gemiddelde diepte

i = verhang [-]

Substitutie geeft:

$$\theta = Ri/\Delta D_{50}$$

Bij relatief brede rivieren kan de hydraulische straal (R) benaderd worden door de waterdiepte (d). Dit blijkt alleen bij de historische Waal goed te gaan.

Veranderingen in de tijd

In tabel 4.13 is de Shields parameter van Waal en IJssel voor verleden en heden weergegeven. Tevens wordt aangegeven hoe de Shields parameter varieert bij andere waarden voor de D50 in het verleden.

Tabel 4.13 berekening van de Shields parameter voor historische en huidige Waal en IJssel

	Waal 1800	Waal 1800, grover zand	Waal 1800, fijner zand	Waal nu	IJssel 1800	IJssel 1800, fijner zand	IJssel nu
Hydraulische straal R (m)	3,96	3,96	3,96	6,97	3,02	3,02	5,85
Verhang i ($\cdot 10^{-3}$)	12,9	12,9	12,9	11,0	12,8	12,8	12,1
Korrelgrootte D_{50} ($\cdot 10^{-3}$ m)	0,9	1,4	0,6	0,9	1,8	0,6	1,8
Shields parameter θ	0,34	0,22	0,52	0,51	0,14	0,41	0,28

De Shields parameter van de huidige IJssel is ongeveer twee keer zo klein als die van de huidige Waal. In de historische situatie was het verschil tussen Waal en IJssel groter. Voor beide riviertrajecten geldt dat doortoename van de hydraulische straal, de Shields parameter toe neemt in de tijd. De afname van het verhang is gering en heeft daardoor weinig invloed. Bij gelijke afvoeromstandigheden is het sedimenttransporterend vermogen van de Waal circa 50% toegenomen en bij de IJssel verdubbeld.

Dit alles bij de aangenomen gelijke korrelgrootte van de bedding. Indien de bedding rond 1800 fijner was dan nu, was de Shields parameter toen groter dan nu. Daarbij gaat het, met name bij de IJssel, al snel om een factor twee.

Bij verdergaande verdieping van de vaargeul in de toekomst, neemt de hydraulische straal toe en zal de Shields parameter toenemen. Vergroving van de bedding zal leiden tot afname van Shields en verfijning tot toename.

4.3.3 Interactie parameter

Definitie en betekenis

Op grond van vergelijkingen voor lineaire stromingscondities, en algemene vergelijkingen voor sedimenttransport zijn door de Vriend & Struiksmas (1983) en Struiksmas et al. (1985) zogenaamde naijlingslengtes voor waterbeweging λ_w en sedimenttransport λ_s gedefinieerd. Deze zijn een maat voor de snelheid waarmee waterbeweging en sedimenttransport kunnen reageren op afvoerfluctuaties.

λ_w wordt bepaald door de hydraulische weerstand van de bedding (Chézy C) en de waterdiepte (d):

$$\lambda_w = (C^2/2g) \cdot d$$

λ_s wordt bepaald door de breedte (B), diepte (d) en Shields parameter (θ):

$$\lambda_s = \pi^2 \cdot (B/d)^2 \cdot f(\theta) \cdot d$$

$f(\theta)$, die eerder gedefinieerd was als $0,85 \sqrt{\theta}$, is door Talmon et al. (1995) op grond van nader onderzoek gedefinieerd als:

$$f(\theta) = 9 (D_{50}/d)^{0.3} \sqrt{\theta}$$

De verhouding λ_s/λ_w is de interactieparameter IP. Deze is een maat voor de demping van het morfologische systeem. Bij kleine waarden ($0.2 \leq IP \leq 5$) zal de rivier meanderen. Bij toenemende waarden wordt het systeem morfologisch minder stabiel en zullen grotere point bars, zandbanken en eilanden ontstaan. Practische berekeningen met de interactieparameter zijn in een verkennende studie eerder toegepast op de Grensmaas (Struiksma & Klaassen, 1988).

Veranderingen in de tijd

Tabel 4.14 geeft de berekening van de interactieparameter (IP) voor Waal en IJssel in 1800 en nu. Opvallend is de zeer grote waarde van IP voor de Waal in 1800. (IP=9,5). Dit geeft aan dat de morfologische stabiliteit van het Waalsysteem zeer gering was. Dit komt overeen met het beeld dat uit de kaarten geschetst wordt: veel zandbanken op wisselende plaatsen, een bedding die relatief snel van plaats veranderde.

Tabel 4.14 Berekening van de interactieparameter λ_s/λ_w voor de historische en huidige Waal en IJssel

	Waal 1800	Waal 1800, 1800 fijner zand	Waal 1800 B/d plaat	Waal nu	IJssel 1800	IJssel 1800 fijner zand	IJssel 1800 geen kribben	IJssel nu
d (m)	4,01	4,01	2,99	7,36	3,19	3,19	3,14	6,85
B (m)	557	557	707	260	114	114	129	80
B/d	151	151	24	35	37	37	43	12
R (m)	3,96	3,96	2,96	6,97	3,02	3,02	2,99	5,85
C (m ³ /s)	45	45	45	45	45	45	45	45
i (*10 ⁻⁵)	12,9	12,9	12,9	11,0	12,8	12,8	12,8	12,1
D_{50} (*10 ⁻³ m)	0,9	0,6	0,9	0,9	1,8	0,06	1,8	1,8
λ_s	3929	4261	7089	402	159	198	207	38
λ_w	415	415	309	760	330	330	324	708
$IP=\lambda_s/\lambda_w$	9,5	10,3	23,0	0,53	0,48	0,60	0,64	0,05

De interactieparameter is zeer gevoelig voor variaties in de breedte-diepteverhouding. In het gebied van de Ewijkse plaat rond 1800 ($B/d=242$) is IP gemiddeld 23 in delen zonder zandbanken ($B/d=113$) gemiddeld 5,4. Variaties in korrel diameter hebben een veel geringere invloed op IP.

In de tijd hebben er grote verschuivingen in de waarde van IP plaatsgevonden. Bij de Waal zakt de interactieparameter van gemiddeld 9,5 rond 1800 naar 0,53 heden, voornamelijk veroorzaakt door de afname van de breedte/diepte-verhouding als gevolg van de normalisatie. Als er fijner zand in de bedding van de Waal verondersteld wordt (600 μm i.p.v. 1800 μm) is de interactieparameter als gevolg van hogere waarden van de Shields parameter 0,6. De interactieparameter van de IJssel was in 1800 lang niet zo hoog als die van de Waal; 0,48. Deze waarden passen bij een meanderende rivier. Ook bij de IJssel zakt de waarde van de interactieparameter in de loop van de tijd. Thans is deze nog maar zeer gering: 0,05.

Voor zowel het verleden als het heden geldt dat de interactieparameter van de Waal hoger is dan die van de IJssel. De huidige waarde van de interactieparameter van de Waal is vergelijkbaar met die van de IJssel in de historische situatie.

5 Fluviale processen

5.1 Betekenis

Fluviale processen liggen ten grondslag aan de kenmerken van riviertrajecten: het stromende water kan beddingmateriaal opnemen, transporteren en weer afzetten. Door deze processen kan het riviersysteem zich aanpassen aan in de ruimte en tijd wisselende omstandigheden, zodat de afvoer van water en sediment op een zo efficiënt mogelijke wijze kan plaatsvinden. De werking van deze processen leidt tot een bepaald riviertype, een bepaalde verdeling van fysiotopen en ecotopen en bepaalde rivierkundige parameters. Omgekeerd is het voor de verklaring van de historische en huidige kenmerken en voor een indicatie van de toekomstige kansen van belang een beeld te hebben van welke processen kunnen bijdragen aan het ontstaan van gewenste kenmerken.

In dit hoofdstuk worden deze processen besproken op basis van de informatie uit de voorgaande hoofdstukken, waarna een vergelijking gemaakt wordt van de twee onderzochte trajecten van de Waal en de IJssel. Gaande van het laagwaterbed naar de dijk worden eerst voor de Waal en dan voor de IJssel achtereenvolgens besproken: migratie van de bedding, oevererosie, op- en aanwassen, oeverwalvorming, opslibbing van de uiterwaard en verlanding van strangen.

5.2 Waal

Migratie van de bedding

Door de historische beddingen over elkaar heen te projecteren ontstaat een beeld van de migratie van de bedding (fig. 5.1). De sinusoïde die de rivierloop in 1830 beschrijft is stroomafwaarts verschoven ten opzichte van 1780; gemiddeld bedroeg de stroomafwaartse verplaatsing 205 m (gemiddelde maximale erosie gemeten haaks op de rivier aan 8 buitenbochten tussen Ewijk en Wamel) hetgeen overeenkomt met een migratiesnelheid van 4,1 m/jr. Aan beide oevers wisselen erosie en aangroei zich regelmatig en tegengesteld aan elkaar af. Uit dit regelmatige patroon blijkt dat de migratie van de bedding in de 18^e eeuw grotendeels nog een autonoom proces was: de mogelijkheden tot sturing waren blijkbaar te gering.

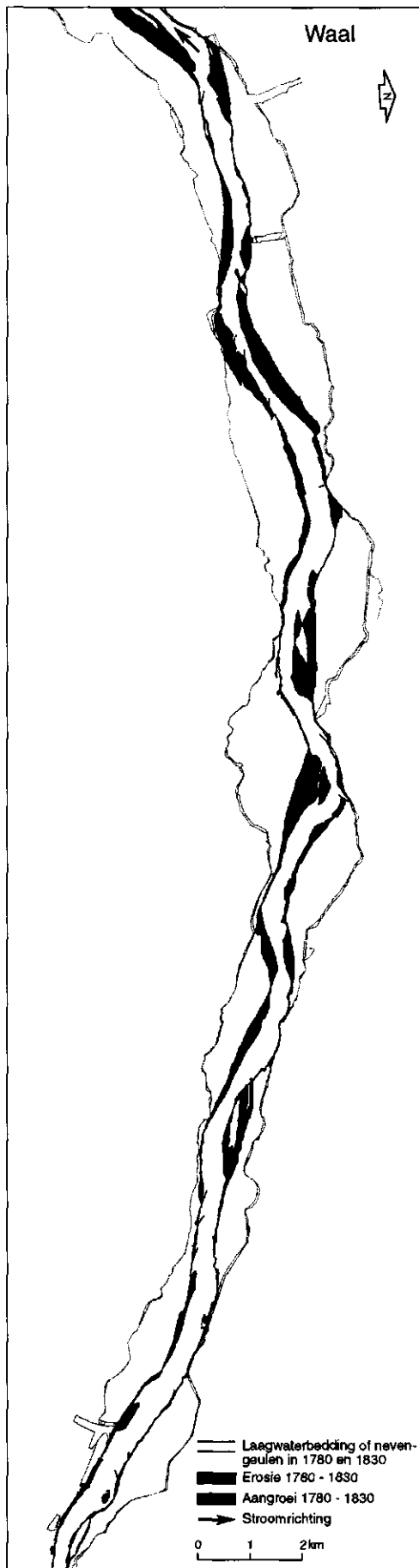


Fig. 5.1 Migratie van het laagwaterbed van de Waal tussen 1780 en 1830

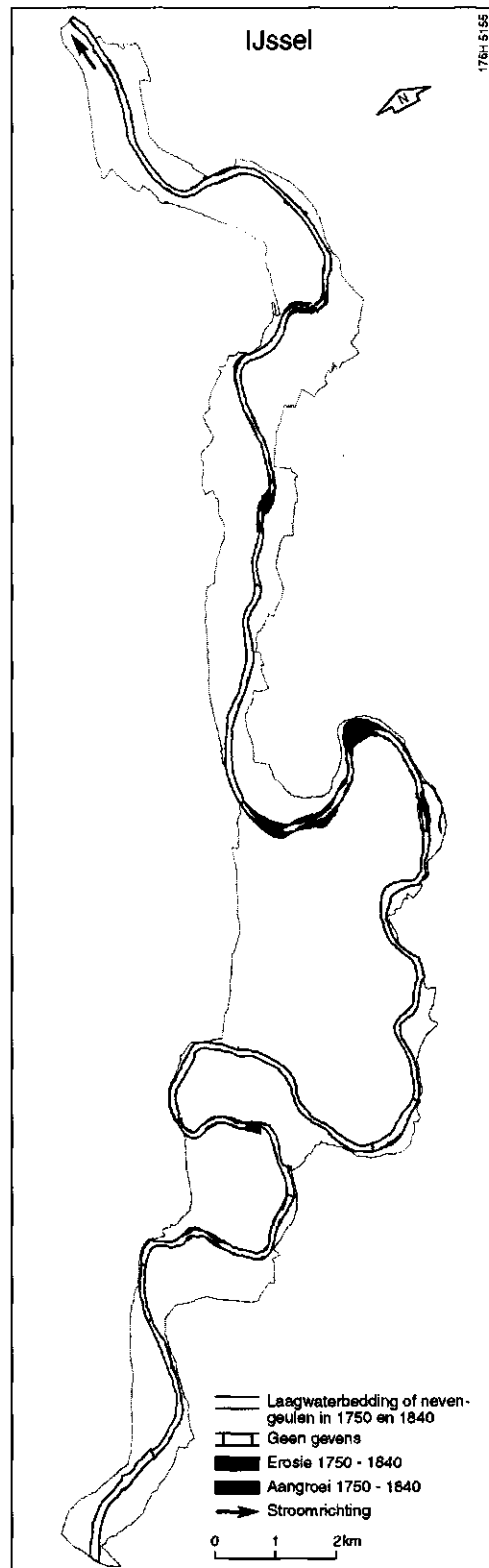


Fig. 5.5 Migratie van het laagwaterbed van de IJssel tussen 1750 en 1840

In tabel 5.1 zijn de erosie en aangroei van de oevers in cijfers uitgedrukt. De waarden zijn bepaald door de oppervlakte van alle ecotopen (exclusief de laagwaterbedding en de nevengeulen) die in de periode 1780-1830 en 1830-1990 in de bedding zijn verdwenen (erosie) of vanuit de bedding zijn gevormd (aangroei) te sommeren.

Tabel 5.1 Erosie en aangroei van oevers langs de Waal in de perioden 1780-1830 en 1830-1990 (km 884,5-916,3)

Periode	Aangroei (ha)			Erosie (ha)			Netto (ha)		
	totaal	gem/jr	gem/km/jr	totaal	gem/jr	gem/km/jr	totaal	gem/jr	gem/km/jr
1780-1830	181	3,48	0,11	478	9,19	0,29	-297	-5,71	-0,18
1830-1990	708	4,43	0,14	158	0,99	0,03	550	3,44	0,11

De gemeten verschillen zijn mogelijk deels te wijten aan verschillende waterstanden ten tijde van de karteringen, met name die bij de begrenzing tussen laagwaterbed en zandbanken. Toch is het aannemelijk dat er in de periode van 1780 tot 1830 meer erosie dan aangroei was. Dit is namelijk in overeenstemming met de uitbreiding van het laagwaterbed ten koste van vrij grote delen van de uiterwaard, onder andere tegenover Tiel. Ten opzichte van 1780 is de oppervlakte van de laagwaterbedding in 1830 met 13% toegenomen. Het kan zijn dat dit samenhangt met de al eerder genoemde verhoging van de waterstanden vanaf 1805 (par. 4.2.1). Een andere oorzaak is wellicht te vinden in het toegenomen aandeel van bekade uiterwaarden. Uit fig. 5.1 blijkt dat een verbreding van de bedding over het gehele traject heeft plaatsgevonden.

In de periode 1830-1990 is langs de Waal netto 550 ha nieuwe uiterwaard gevormd. Ten opzichte van de situatie van 1830 is de oppervlakte van de laagwaterbedding tot 1990 met 25% afgenomen. Tevens zijn alle nevengeulen verdwenen. Deze veranderingen zijn het gevolg van de verschillende riviernormalisaties die sinds de eerste helft van de 19^e eeuw zijn uitgevoerd. De laagwaterbedding is door de stelselmatige aanleg van kribben versmald en verdiept en de sinusuositeit van de loop in het traject is teruggebracht tot bijna één.

Oevererosie

In de periode voor de aanleg van kribben was erosie van oevers een veel voorkomend verschijnsel. Het terugschrijden van de grens tussen het laagwaterbed en de uiterwaard werd veroorzaakt door twee verschillende processen: zijdelingse erosie en verticale erosie. De zijdelingse erosie kwam vooral voor bij het benedenstroomse deel van buitenbochten, waar het aanstromende water als het ware door de oever van een rechte lijn werd afgebogen (fig. 5.1). Uit de profielen uit 1800 blijkt dat juist hier het laagwaterbed dicht bij de oever een grote diepte kon ontwikkelen als gevolg van de spiraalstroming in bochten. Er wordt dan ook verondersteld dat deze erosie vooral plaatsvond door ondergraving van oevers door snel stromend water gedurende hoge waterstanden, gevolgd door afkalving van met water verzadigde oevers direct daarna.

Met pakwerk en lange kribben in de rivier werden de schaaldijken bij onder andere Dodewaard, Ochten, Druten en Leeuwen beschermd en slaagde men erin de dijken op hun plaats te houden. De aanleg van kribben en het vastleggen van aan- en opwassen met wilgenpootgoed had eveneens invloed op de richting van de waterstroming. Het

valt daarom niet uit te sluiten dat deze maatregelen de oevererosie aan de overzijde van de rivier heeft gestimuleerd.

Bij vergelijking van de kaarten van fysiotopten in 1780 en 1830 (bijlage 1) blijkt dat de totale oppervlakte aan zandbanken drastisch afgenomen is. Het verschil tussen beide kaarten is niet alleen toe te schrijven aan verschillen in waterstand ten tijde van de karteringen. Tegelijkertijd is het aantal eilanden is toegenomen. Deze eilanden zijn restanten van de zandbanken, namelijk die delen van de voormalige zandbanken die het dichtst bij de hoofdstroom gelegen waren. De lagere, naar de uiterwaard gekeerde zijde van deze zandbanken is uitgeschuurd met als resultaat een teruggeschreden oeverlijn en een nevengeul. Hier is dus niet zozeer sprake van zijdelingse erosie vanuit het laagwaterbed, maar meer verticale erosie, dat is uitslijping van een stroomvoerende geul.

Op- en aanwassen

De wijze van vorming van op- en aanwassen in de Waal is al eerder beschreven (Wolfert, 1992, Middelkoop et al., 1992, Middelkoop, 1997). Ook de vorming van eilanden en zandplaten zoals weergegeven op de rivierkaart anno 1830 is eerder bestudeerd (Hesselink en Berendsen, 1996). Op basis van deze studies en de resultaten van dit onderzoek kunnen drie typen terreinvormen worden onderscheiden die gevormd worden door afzetting van beddingmateriaal: kleine eilanden in brede riviergedeelten, grote eilanden in brede scherpe bochten en kronkelwaardbanken langs binnenbochten.

Toen er nog geen kribben waren aangelegd ontstond er door de erosie van oevers ruimte in het laagwaterbed voor de depositie van zand en soms van grind. Het meest kenmerkend voor de Waal zijn de opwassen: kleine eilanden die eerst minder en later meer boven de laagwaterlijn uitstaken. Deze eilanden werden vooral gevormd op locaties waar het laagwaterbed door eerdere erosie van oevers breder was dan gemiddeld. Uit de in 1800 gemeten profielen wordt duidelijk dat op zulke locaties het laagwaterbed een vrij symmetrische doorsnede kende met een vrij grote breedte-diepteverhouding (fig. 5.3; profiel 15). Tussen de hoofdstroming en een secundaire stromingszone bleef een zone met geringe stroming over waar afzetting van zand plaatsvond en zandbanken geleidelijk boven de laagwaterlijn uitgroeiden. Eenmaal boven het water uitgroeid raakten deze eilanden begroeid. Deze begroeiing bevorderde weer sedimentatie aan de benedenstroomse puntige staart van de opwas: hier werd dan ook vaak kaal zand en grind gekarteerd.

Eilanden in vrij rechte riviergedeelten bleven relatief klein. In scherpe bochten zoals bij Dodewaard, Ochten en Tiel ontstonden echter veel grotere eilanden. Vermoedelijk houdt dit niet alleen verband met de forse erosie van oevers op deze locaties, maar ook met het feit dat de hoofdwaterstroming zich hier na verloop van tijd meer heeft kunnen concentreren op de kortere weg langs binnenbocht, zodat er een bredere zone voor opwasvorming overbleef (fig. 5.2). Dit zijn tevens de locaties waar mogelijk het mechanisme van counter-point accretion (Page en Nanson, 1982; Middelkoop, 1997) een rol heeft kunnen spelen: daar in de scherpe bocht de stroming vrij recht op de in de buitenbocht gelegen dijk gericht was, kan dit een verstoring van de spiraalstroming veroorzaakt hebben, waarbij tegenstrooms gerichte wervelingen ontstonden, met een veel geringere stroomsnelheid en mogelijkheden voor het ontstaan van zandbanken. Na het ontstaan van het eiland ontwikkelde de geul langs de binnenbocht zich verder tot hoofdgeul. De andere geul kreeg tegelijkertijd minder water af te voeren en werd

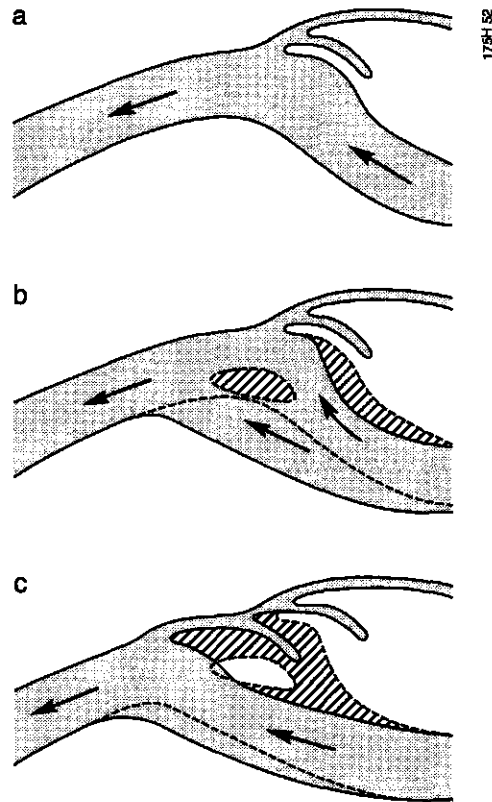


Fig. 5.2 Schematische weergave van het ontstaan van eilanden in de scherpe rivierbochten van de Waal en het verband met het patroon van strangen in de uiterwaard

kleiner, door dichtslibbing en verzanding van het meest bovenstroomse deel. Mede door de inmiddels vaak aangelegde kribben en het aangeslagen wilgenpootgoed groeide daar uiteindelijk de opwas vast aan de uiterwaard. De nevengeul werd zodoende strang in een periode van enkele decennia.

Door herhaling van dit proces konden de uiterwaarden in stroomafwaartse richting aangroeien, hetgeen geresulteerd heeft in een kenmerkend patroon van fysiotopen. De parallelle strangen illustreren de stapsgewijze verplaatsing van het laagwaterbed in benedenstroomse richting (fig. 5.2): ze zijn met de concave zijde naar de rivier gekeerd, dit in tegenstelling tot kronkelwaardgeulen bij de IJssel die juist met de convexe zijde naar de rivier gekeerd zijn. De strang tegen de winterdijk is dus samengesteld uit delen uit deze verschillende perioden en heeft dus in zijn huidige vorm nooit als nevengeul gefunctioneerd. De ovale hogere uiterwaarddelen zijn de voormalige eilanden. De kern van deze eilanden is op bodemkaarten soms nog te herkennen als een hoogegelegen zavelige ooivaaggrond temidden van lager gelegen en zwaardere poldervaaggronden.

Naast de opwassen zijn er ook typische aanwassen gevormd, door afzetting van zandbanken aan de benedenstroomse zijde van binnenbochten. Dat is tegenover de benedenstroomse zijde van buitenbochten waar juist de oevererosie plaatsvond. Deze zandbanken zijn te beschouwen als de afzettingen aan de binnenbocht van een meanderende rivier. Uit de in 1800 gemeten dwarsprofielen is duidelijk op te maken dat tegelijk met de bochten het profiel van de rivier zich telkens wijzigde, met een diepe zijde aan de buitenkant

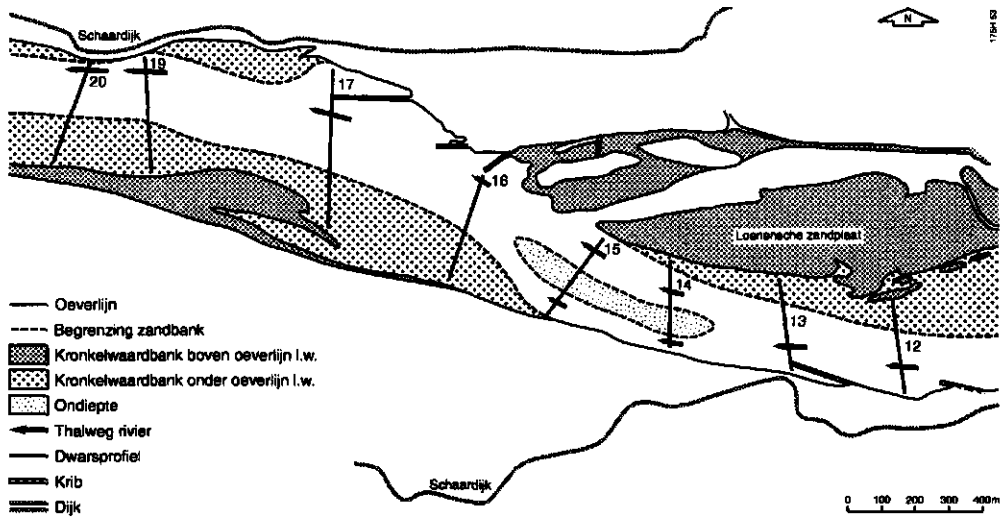


Fig. 5.3 (A)

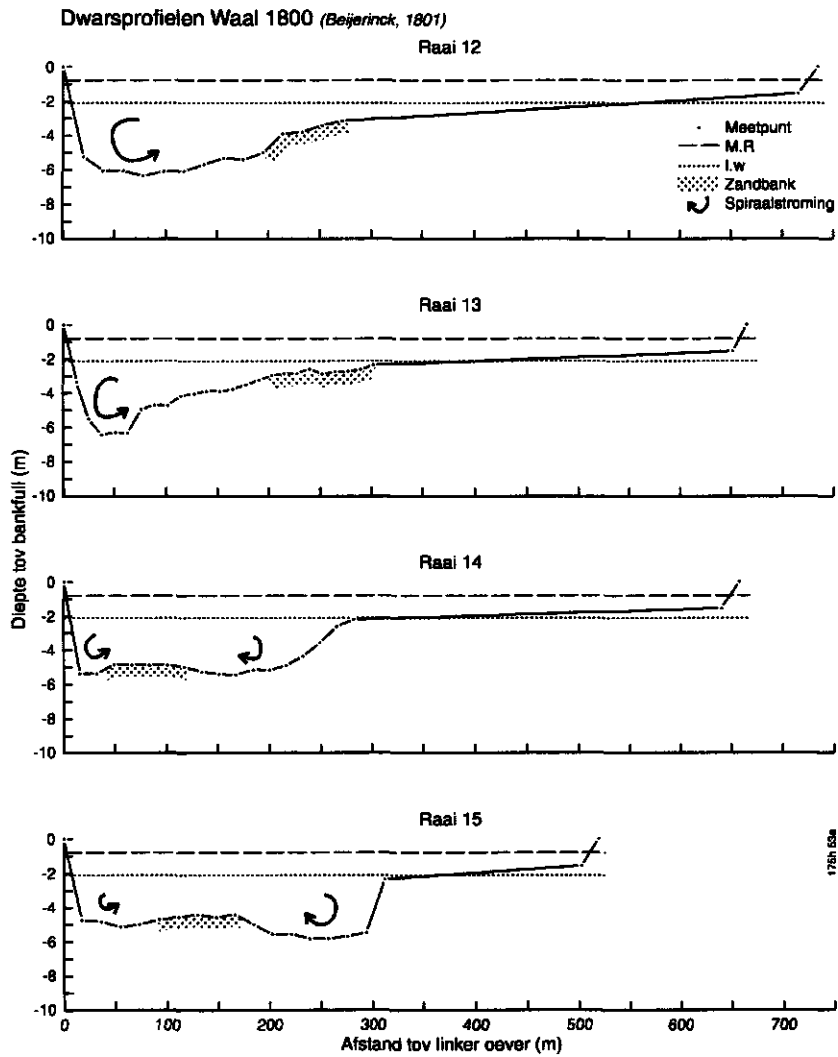


Fig. 5.3 (B)

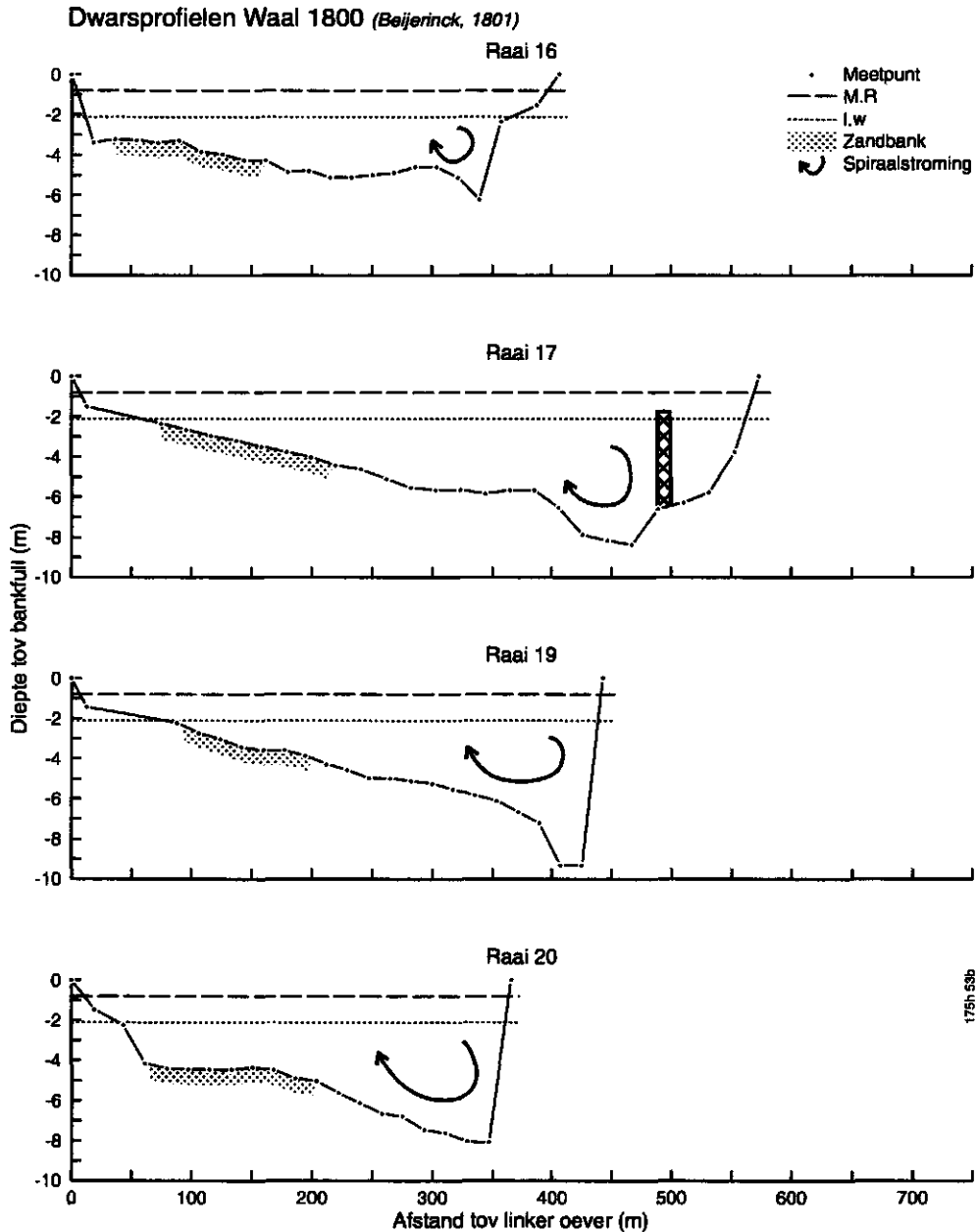


Fig. 5.3 (C) De vorming van kronkelwaardbanken onder invloed van de spiraalstroming in de Waal anno 1800 (zie ook fig 4.4)

en een ondiepe en flauw oplopende zijde aan de binnenkant. Het waren aanwassen, gevormd tegen de oever aan. Deze zandbanken zijn vooral door de werking van de spiraalstroming ontstaan. Tussen de bochten in waren twee minder diepe geulen aanwezig: de één als restant van de spiraalstroming in de stroomopwaarts gelegen bocht, de andere als het begin van die in de stroomafwaarts gelegen bocht (fig. 5.3). In principe is er hier, ondanks de geringe sinuositeit, dus sprake van een meanderende rivier met vorming van kronkelwaardbanken.

Door de normalisatie komen eilanden en platen in de bedding van de Waal niet meer voor: de waterstroom in het zomerbed is daarvoor te uniform en te sterk geworden. Bij grote afvoeren ontstaan over de gehele bedding wel grote megaribbels, met een hoogte van ca. 2 m. (Kamphuis, 1990). Na het passeren van de afvoergolf vervlakken deze weer. Lokaal doen zich wel sedimentatieverschijnselen voor. Grote verschillen in stroomsnelheid van het water in het laagwaterbed en dat in de uiterwaarden leiden bij hoge afvoeren tot erosie en aanzandingen in kribvakken. Dit doet zich met name voor op plaatsen waar het winterbed smaller of breder wordt. Aanzanding in het zomerbed vindt dan plaats waar het water het zomerbed verlaat en erosie vooral waar het weer terugstroomt in het zomerbed. In het erg rechte traject van de Waal direct na Nijmegen is deze wisselwerking beperkt; na Dodewaard wordt deze veel sterker: daar zal dus ook de morfologie van de bedding sterker variëren. Een laatste vorm van beddingafzetting doet zich voor bij het instroompunt van zandwinplassen. Wanneer deze in open verbinding staan met de rivier verzandt deze opening al snel, om vervolgens tot oeverwal uit te kunnen groeien.

Zolang de oevers van de Waal vastliggen zal er geen sprake zijn van het ontstaan van eilanden en platen. Gezien de waarde van de interactieparameter is het te verwachten dat verlaging van de oever veel sedimentatie met zich zal meebrengen op plaatsen waar deze maatregel wordt uitgevoerd. Een voorbeeld hiervoor is de Plaat bij Ewijk.

Oeverwalvorming

Uit een vergelijking van de fysiotopenkaarten blijkt dat in de Waaluitwaarden de oppervlakte met oeverwallen tussen 1780 en 1990 verdrievoudigd is. Deze toename kan niet alleen worden toegeschreven aan moeilijkheden bij het vaststellen van oeverwallen op historische kaarten (par. 3.2.1), maar hangt ook samen met de locatie waar oeverwallen worden gevormd en de migratie van de bedding van de Waal.

In de historische situatie beperkten de oeverwallen zich tot het rechte deel van de Waal tussen Nijmegen en Winssen, een onderdeel van het traject waarin de bedding zich nauwelijks heeft verlegd. Dit heeft geleid tot de volgende hypothese. In fig. 5.4 zijn schematisch de potentiële ligging van oeverwallen en de historische rivierloopverleggingen van een zwak meanderende rivier weergegeven. Doordat de loop stroomafwaarts migreert erodeert der rivier telkens die delen van de uiterwaard waar zich oeverwallen kunnen ontwikkelen. Bij een sterk meanderende rivier (zoals de IJssel; par. 5.3) verplaatst de bedding zich door erosie meer in laterale richting. Het buigpunt tussen twee meanderbochten heeft dan een veel geringere longitudinale verplaatsingssnelheid, waardoor oeverwallen langs sterk meanderende rivieren steeds verder kunnen aangroeien. Dit wordt bevestigd door de oeverwallen langs de IJssel: zij zijn gelegen bij de knikpunten van meanders en de totale oppervlakte oeverwal was in 1830 ca. negen maal groter dan die langs de Waal.

Sinds de rivierverbeteringswerken ligt de rivierloop van de Waal vast. De plaatsen waar water bij hoogwater de bedding verlaat zijn daardoor ook min of meer vast komen te liggen. In deze gewijzigde situatie kunnen zich nu in principe langs de gehele Waal oeverwallen ontwikkelen. Na grote afvoeren, zoals die van 1995 gaat het daarbij om forse hoeveelheden zand (langs de Waal totaal 217.400 m³; Sorber, 1997), met een korrelgrootte van 300-420 µm (D₅₀). In het traject Nijmegen-St. Andries is in 1995 door

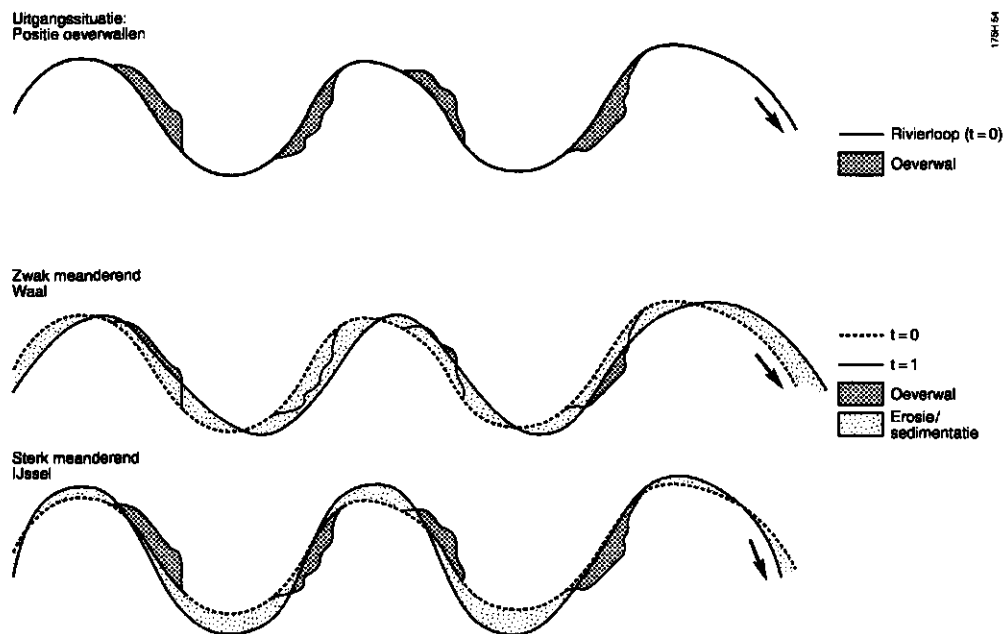


Fig. 5.4 Hypothetisch model voor (het ontbreken van) oeverwalontwikkeling bij een zwak en een sterk meanderende rivier

deze zandafzetting gemiddeld per rivierkilometer 3,3 hectare oeverwal gevormd. De afzetting van zand langs de huidige Waal vindt plaats in de binnenbochten en op plaatsen waar water van het zomerbed de uiterwaard instroomt. Dit betekent dat in de actuele situatie zowel het proces van uit treden van water uit de bedding bepalend is voor de vorming van oeverwallen, alsook aanzanding in de binnenbocht door de binnenwaarts gerichte component van de spiraalstroom. Veel zandige oeverafzettingen worden aangetroffen op locaties waar bij hoge waterstand de stroming door zandwinplassen wordt aangezogen.

Opslibbing van de uiterwaard

Naast de vorming van zandige op- en aanwassen en oeverwallen vindt er afzetting van slib plaats in de uiterwaard. Het proces van opslibben als zodanig is in deze studie niet onderzocht, maar uit de ontwikkeling van de ecotopen vanaf de 18^e eeuw kunnen we wel vaststellen dat door de aanleg van zachthoutoibos en rietbanen, aan- en opwassen een periode van snelle opslibbing hebben door gemaakt. Onderzoek van Middelkoop (1997) wijst in dezelfde richting: de gemiddelde opslibbing vanaf de vorming van de uiterwaard tot heden bedraagt 5-16 mm/jr, waarbij de opslibbingssnelheid van onbekade laaggelegen uiterwaarden door de steeds hogere ligging met een factor 3-4 afnam in de tijd tot een gemiddelde opslibbing in de laatste eeuw van 0,2 tot 10 mm/jr. Combineren we de gegevens over de kleidikte in de uiterwaarden uit het onderzoek van Middelkoop met de historische ontwikkeling van de uiterwaarden dan blijkt er geen positief verband te zijn tussen de kleidikte en de ouderdom van de uiterwaard: het kleidek van jonge uiterwaarden is minstens even dik als dat van de oudere uiterwaarden. Hieruit kunnen we concluderen dat de hoogteligging, de positie en de vegetatiestructuur van de uiterwaard samen van grotere invloed zijn op de opslibbing dan de factor tijd alleen. Een hoge snelheid van opslibben hangt vooral samen met een lage ligging; verder is de opslibbing sterker in posities dicht bij de rivier en bij een dichtere vegetatiestructuur.

Een andere belangrijke factor in de opslibbing van uiterwaarden is de aanwezigheid van een zomerkade. Door de kade wordt er geen zand meer in de uiterwaard afgezet. De uiterwaard achter de kade wordt tevens minder vaak overstroomd waardoor de opslibbing per tijdseenheid geringer is. Per hoog water blijft er in bekade uiterwaarden wel relatief veel slib achter omdat het water ter plaatse een lagere stroomsnelheid heeft. De klei in bekade uiterwaarden is zwaarder dan in onbekade uiterwaarden (Middelkoop, 1997)

Verlanding van strangen

De stroomsnelheid tijdens hoogwater bepaalt in eerste instantie of een strang dichtslibt en verder verlandt en de snelheid waarmee dit gebeurt. Strangen met een benedenstroomse open verbinding slibben niet of nauwelijks dicht. Een voorbeeld hiervan is de strang langs de winterdijk bij Dodewaard. De oudste delen zijn gevormd vòòr 1646 (Van Geelkercken, 1646) en waren in 1830, bijna driehonderd jaar later, nog niet dichtgeslibd. Vanaf het moment dat een strang benedenstrooms wordt afgesloten begint door afname van de stroomsnelheid tijdens en na hoogwater het proces van opslibbing en verlanding, waardoor de diepte steeds geringer wordt en de strang ook geschikt wordt voor niet-aquatische vegetatietypen. Ten opzichte van de hogere delen in de uiterwaard vangen bekade strangen meer slib, doordat het water zich met de gesupendeerde sedimentlast verzameld in de laagten. Moerasvegetaties en moerasbossen leveren veel organisch materiaal waardoor de strangen uiteindelijk geheel kunnen verlanden. In aangekoppelde strangen waar nog regelmatig grote stroomsnelheden voorkomen, zoals de strang achter de Plaat bij Ewijk, wordt de successie telkens teruggezet.

5.3 IJssel

Een gedetailleerde geogenetisch beschrijving voor de IJssel is nog niet eerder gemaakt. Het patroon van fysiotopen in de historische situatie geeft een beeld van een deels sterk meanderende en deels zwak meanderende rivier. Sterke meandering vindt vooral plaats in het deeltraject tussen Rheden en Dieren. De deeltrajecten Westervoort-Rheden en Dieren-Zutphen zijn hoofdzakelijk zwak meanderend.

Migratie van de bedding

Uit grote meanderbochten bij Bronkhorst blijkt dat het nu zwak meanderende traject tussen Dieren en Brummen eertijds ook sterk meanderend is geweest (zie ook par. 2.3). Ook de uiterwaarden Reuversweerd en Stokebrand ten zuiden van Zutphen zijn gevormd door een sterk meanderende rivier. Gezien het grote aantal kronkelwaardbanken en -geulen was er in de tijd van vorming van de grote meanders vermoedelijk ook sprake van een grote migratiesnelheid. Uit vergelijking van historische kaarten blijkt echter dat de sterke migratie in de 17^e eeuw niet meer voorkwam (fig. 5.5). Actieve meandering vond alleen nog plaats bij de Fraterwaard en in geringe mate bij de Valewaard. De bedding verplaatste zich in deze grotere meanderbochten op nagenoeg dezelfde wijze als in het zwak meanderende traject (fig. 5.5). Blijkbaar kreeg de meandering in de loop van de tijd een kleinere golflengte en verplaatste deze aanpassing zich in stroomopwaartse richting.

In tabel 5.2 zijn de erosie en aangroei van de oevers van het laagwaterbed tussen 1750-1840-1990 weergegeven voor de delen van de IJssel waarvan kaarten beschikbaar waren. In beide perioden is er meer aangroei dan erosie, hetgeen wijst op een verdergaande beddingversmalling.

Tabel 5.2 Erosie en aangroei van oevers langs de IJssel in de perioden 1750-1840 (km 882,6-885,1; 886,0-889,3^N; 898,2-899,4; 903,0^N-911,0; 914,5-928,1) en 1840-1990 (km 880,3-928,1)

Periode	Aangroei			Erosie			Netto (ha)		
	(ha)	(ha/jr)	(ha/km/jr)	(ha)	(ha/jr)	(ha/km/jr)	(ha)	(ha/jr)	(ha/km/jr)
1750-1840	86	1,08	0,04	72	0,90	0,03	14	0,18	0,01
1840-1990	188	1,18	0,02	115	0,72	0,01	73	0,44	0,01

In de periode tot 1775 was de IJssel een verzandende rivier. Zowel het splitsingspunt bij Schenkenschans als de IJsselkop bij de Pleij waren verzand, waardoor het grootste deel van de Rijnafvoer via de Waal verliep. De kaart van Van Geelkercken uit 1670 (zie fig 3.2) toont de vorming van (ten opzichte van de bedding) vrij grote zandbanken, waaruit we kunnen afleiden dat de bedding zich door versmalling aanpaste aan het afgenomen debiet. Op de 18^e en 19^e eeuwse kaarten is de oppervlakte van zandbanken sterk teruggelopen. De breedte van de bedding van IJssel heeft zich al grotendeels aangepast aan het teruggelopen debiet en verzandde niet verder, mede omdat men alles in het werk stelde om de rivier bevaarbaar te houden. Als in 1775 de Pleij wordt doorgegraven neemt de afvoer door de IJssel weer toe. De oevers zijn dan echter al zodanig vastgelegd en verdedigd met kribben dat dit geen effect had op de migratie van de bedding; er trad voornamelijk erosie van de bedding op. Door dit alles veranderde de rivier van een oorspronkelijk brede ondiepe in een smalle diepe rivier. Dat de bedding voor 1600 werkelijk breder was bewijst de Lamme IJssel die 1,5-2 maal zo breed is als de huidige bedding.

In de periode 1840-1990 is er nauwelijks meer sprake van een natuurlijke migratie van de bedding. De grootste verschillen in ligging van de bedding tussen de beide opnamen zijn de rivierbochtafsnijdingen bij Doesburg (1954), Rheden en De Steeg (1962-1969) waardoor de loop van het zomerbed met respectievelijk 4,6, 3,3 en 0,7 km is ingekort. Het gevolg hiervan was een groter verhang en een terugschrijdende erosie van de beddingbodem. In de huidige situatie is migratie van de bedding onmogelijk doordat de oevers zijn verstevigd met steenbestorting.

Oevererosie

In tegenstelling tot wat het patroon van de vele, grote meanders en kronkelwaarden doet veronderstellen, kwam oevererosie bij de IJssel in de periode 1750-1830 slechts hier en daar voor. Slechts in één geval is deze duidelijk gerelateerd aan een grote rivierbocht in het sterk meanderende traject: de oever van de buitenbocht bij de Fraterwaard is in de periode 1750-1840 maximaal gemiddeld 2,25 m per jaar verplaatst. In de andere gevallen doet de oevererosie zich voor bij kleinere, vaak scherpere bochten in de rivier. Deze zijn kenmerkend voor het zwak meanderende traject, maar komen ook veel voor binnen de grote meanders tussen Rheden en Dieren. Uit de historische dwarsprofielen (Aanhangsel 2) blijkt dat de rivier door de spiraalstroming juist in dergelijke bochten een grote diepte ontwikkelde in de buitenbocht, hetgeen waarschijnlijk de afkalving van de oevers in de hand heeft gewerkt.

Op de historische kaarten van de IJssel komen in alle perioden veel kribben voor. De kribben lagen zowel in de buitenbochten als aan de beide oevers van de rechte delen. De functie van de kribben was derhalve tweeledig: verdediging van de oever en aanwinnen van land. In de 17^e en 18^e eeuw was men nog niet in staat de IJsselbedding te beheersen. Een aantal buitenbochten bleef zich uitbreiden. Anderzijds wist men op belangrijke punten zoals bij Lathum en Bahr de winterdijk in stand te houden en zo uitbreiding van de Zuiderwaard te voorkomen. In de 17^e eeuw werd de hoofdstroom van de IJssel met behulp van kribben bij Doesburg verlegd om de rivier weer langs de stad te laten lopen. De oude loop verzandde en heet sindsdien de Lamme IJssel.

Voor wat betreft de erosie in deze periode is er eigenlijk geen onderscheid te maken tussen het sterk en het zwak meanderende traject. Dat niet alle meanders erosieverschijnselen vertonen zal zeker te maken hebben met de intensieve pogingen tot verdediging van oevers, maar ook met de verzanding van de rivier voor 1775. Dat heeft een ander stromingspatroon met een kleinere meandergolflengte met zich mee gebracht, waardoor binnen de grote bochten plaatselijke kleinere buitenbochten ontstonden door afkalving van oevers. Ook de erosie van de binnenbocht van de grote meander bij Wichmond is hiermee gedeeltelijk te verklaren alhoewel daar vermoedelijk ook landaanwinning op de zandbank aan de tegenoverliggende oever een rol heeft gespeeld.

Op- en aanwassen

Op basis van de kartering van fysiotopten en de historische dwarsprofielen kunnen er langs de IJssel drie typen terreinvormen onderscheiden worden die gevormd worden door afzetting van beddingmateriaal: kronkelwaardbanken, eilanden in buitenbochten en kleine opwassen langs de oever.

Op de locaties waar erosie van oevers plaatsvond, ontwikkelden zich vaak aan de andere zijde van het laagwaterbed een grind- of zandbank. Deze zandbanken waren aanwassen, die als gevolg van de spiraalstroming gevormd werden in binnenbochten. In diverse historische dwarsprofielen (Aanhangsel 2) is fraai te zien dat zich aan de binnenzijde van de bochten een geleidelijk oelopende zandbank bevond, door een scherpe knik gescheiden van het daarnaast gelegen diepere deel van het laagwaterbed. Slechts een klein deel van deze banken kwam boven de laagwaterlijn uit. De kleine breedte-diepteverhouding, het asymmetrische dwarsprofiel, de diepte aan de concave oever en de vorm van de zandbank zijn typisch voor de vorming van kronkelwaardbanken in een meanderende rivier. Naast een sterke spiraalvormige stroming is er op het hogere deel van de kronkelwaardbank een meer in de lengterichting gerichte stromingscomponent; waar beide samenkomen ontstaat de knik in het dwarsprofiel (fig. 5.6).

De grote kronkelwaarden in het sterk meanderende traject zijn door dit proces ontstaan, zij het dat zij gevormd zijn onder meer dynamische omstandigheden uit de periode van voor de 18^e eeuw (zie par. 2.3). Of er een relatie is tussen de periode van sterke uitbreiding van de kronkelwaarden en de vorming van de IJsseldelta bij Kampen of juist met periode van verzanding in de 17^e eeuw is niet bekend daar de exacte ouderdom van deze kronkelwaarden niet bekend is.

Afwijkend van dit model is de ontwikkeling van opwassen in de buitenbocht van diverse meanders, een fenomeen dat zowel bij de Zuiderwaard, de Havikerwaard, de Fraterwaard

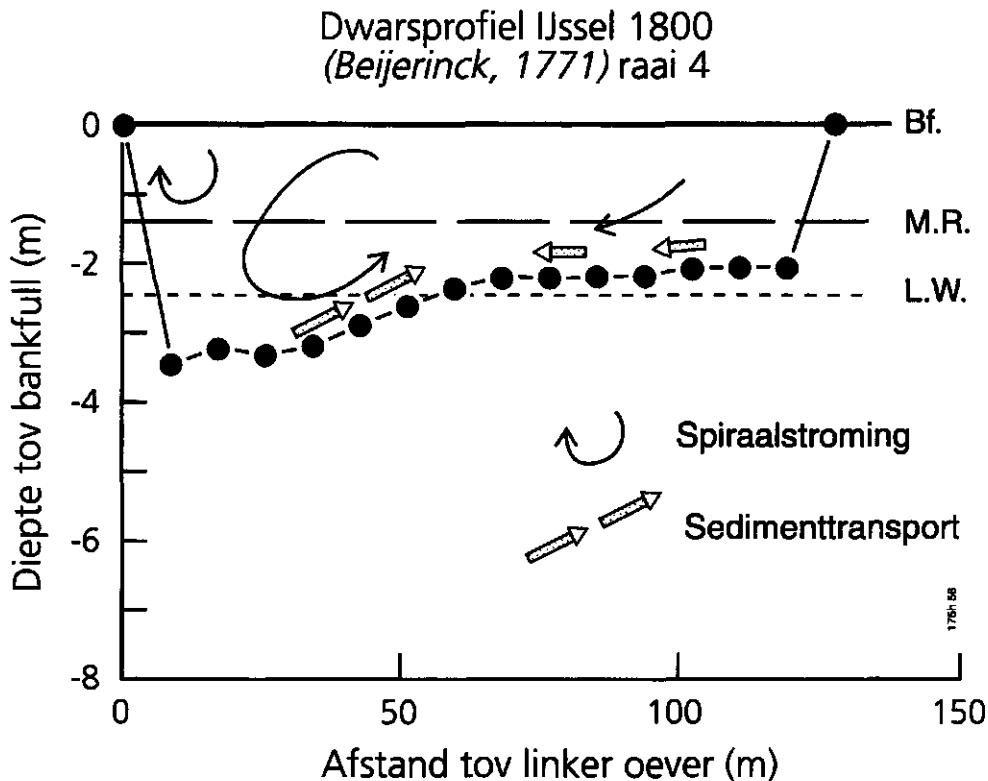


Fig. 5.6 Waterstroming in een meander en de vorming van een kronkelwaardbank in een historisch dwarsprofiel van de IJssel (Aanhangsel 2)

als de Reuversweerd bij Zutphen is aangetroffen. De ontwikkeling van 'De Grind' bij Doesburg staat model voor deze opwasvorming (fig. 5.7). Opwassen ontwikkelden zich daar, waar de hoofdgeul samenkomt met een andere rivier (Oude IJssel), een beek (Baakse Beek), een nevengeul of aangekoppelde strang (Dierensche Hank). Bij samenkomst werd het laagwaterbed van de IJssel plotseling breder waardoor er in de meander een luwte ontstond waarin een zandbank kon ontstaan. Naast de hoofdgeul van de IJssel onstond zo een nevengeul in de buitenbocht van de meander die minder snel verzandde dan nevengeulen zoals die in de Waal voorkwamen, en decennia lang als nevengeul kon functioneren. De vorming van zandbanken in de buitenbocht van meanderende rivieren wordt ook wel veroorzaakt door een afnemende afvoer. Het verzanden van de IJssel is daarom waarschijnlijk de reden geweest dat deze banken zich konden ontwikkelen. Door voortdurende aanvoer van materiaal kon in sommige gevallen een grote middelwaard gevormd worden, zoals bij Doesburg het geval was.

In de veel rechttere delen van het laagwaterbed zijn kleinere zandbanken gevormd, afwisselend aan weerszijden van de rivier. Deze zijn ontstaan toen door de afname van het debiet de stromingspatronen veranderden en ook de golflengte van de meandering en de breedte van de rivier zich daaraan aanpasten. Direct na de nieuwe zandbank, waar de rivier nog breed was, onstond de volgende zandbank. Het ontstaan van deze kleine opwassen langs de oever is dus onafhankelijk van oevererosie en direct gerelateerd aan het afnemende debiet. Kribben werden gebruikt als middel om deze opwassen aan de vaste oever te verbinden. Opwasvorming tussen kribben is in het landschap herkenbaar doordat een strang achterblijft met afwisselend diepe en ondiepe delen (zie bijlage 4; Stokebrandswaard

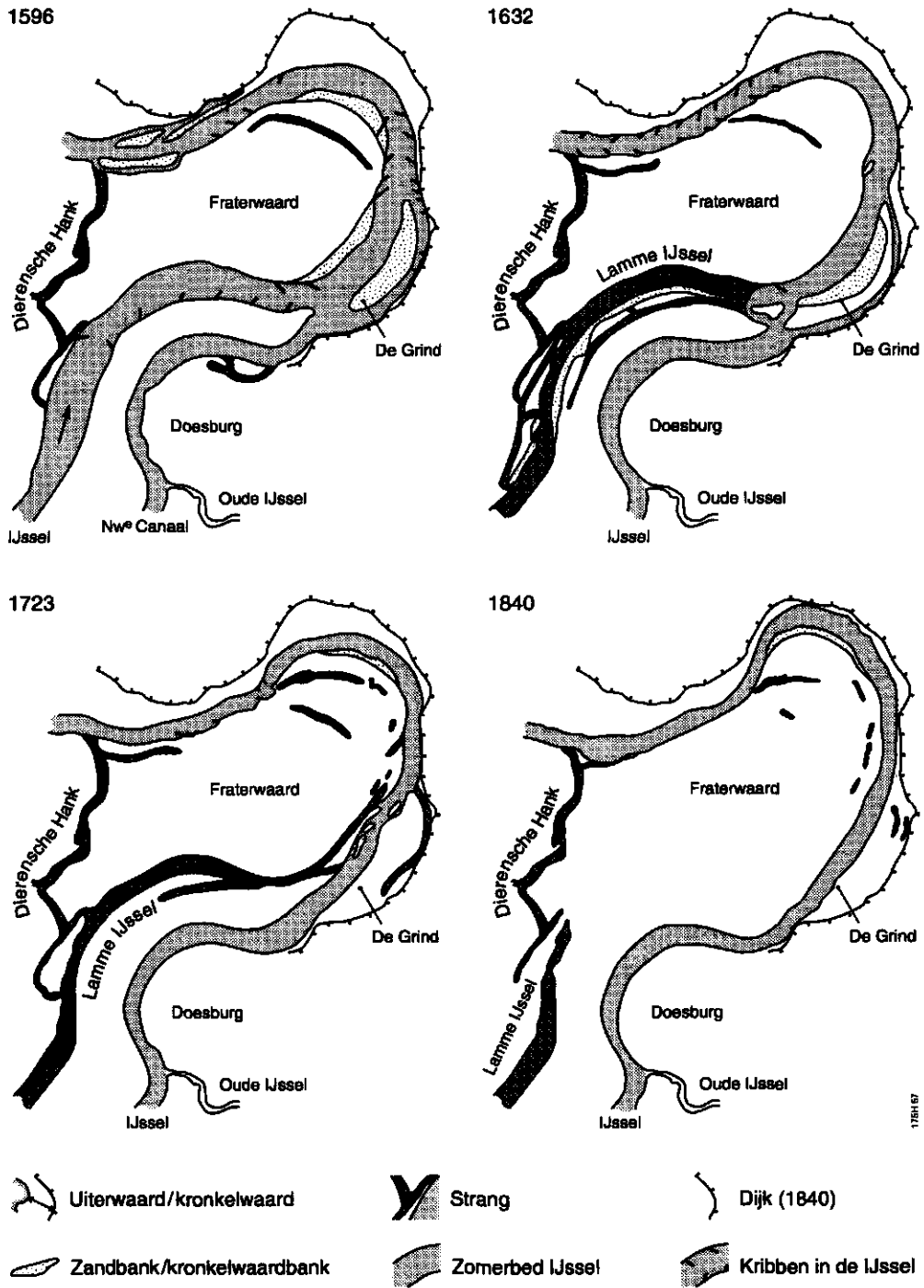


Fig. 5.7 Ontwikkeling van de 'Lamme IJssel' en 'De Grind' bij Doesburg

ten zuiden van Zutphen). Achter elke krib vormde zich een zandbank die zich niet aansloot aan de volgende krib. Voor elke krib onstond namelijk een diepere poel. Veel strangen zijn ontstaan uit een reeks van deze poelen.

Een kaart uit het begin van de 17^e eeuw van de Bronkhorsterwaarden laat drie opwassen zien die in ontwikkeling elkaar opvolgen (fig. 5.8). De meest stroomopwaarts gelegen



Fig. 5.8 ...Carthe van een middelsant gelegen omtrent Wijchmond (Anoniem, ca. 1600;RAG AKV 357)

opwas is waarschijnlijk als eerste gevormd en het hoogst opgeslibd, hetgeen valt af te leiden uit het feit dat deze al als grasland in gebruik was. De opwas is met kribben en een kade beschermd. Er resten slechts nog een aantal solitaire oude bomen; restanten van het zachtoobos. De strang achter de opwas is nog open en de bovenstroomse monding is beplant met (jonge) bomen om dichtslibbing te bespoedigen. De tweede en derde opwas zijn begroeid met bomen, waarschijnlijk wilgen. Uit de gebruikte signaturen valt af te lezen dat de kern van de middelste opwas geheel uit ouder bos bestaat terwijl de derde opwas begroeid is met zowel jongere als oudere bomen. De middelste opwas is reeds voldoende opgeslibd om als uitgangspunt voor de aanleg van kribben te fungeren. De derde opwas heeft aan de binnenzijde langs de nevengeul/strang een brede zone: waarschijnlijk laaggelegen onbegroeid of moerrassig terrein. Het grootste deel van de opslibbing van de uiterwaarden heeft plaatsgevonden in de eerste periode na de vorming van de zandige op- en aanwassen. Opslibbing werd bespoedigd door de aanleg van wilgenbos op de zandplaten. Uit de historische kaarten van de IJssel blijkt dat de wijze van landaanwinning en in cultuur brengen van verworven land vergelijkbaar is met gebruikte methoden langs de Waal.

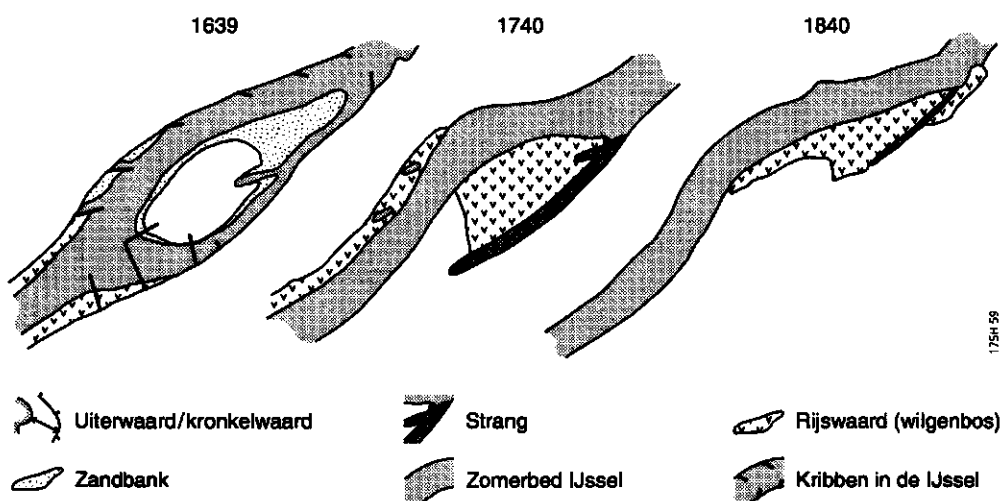


Fig. 5.9 Kleine opwassen langs de oevers van de verzandende IJssel

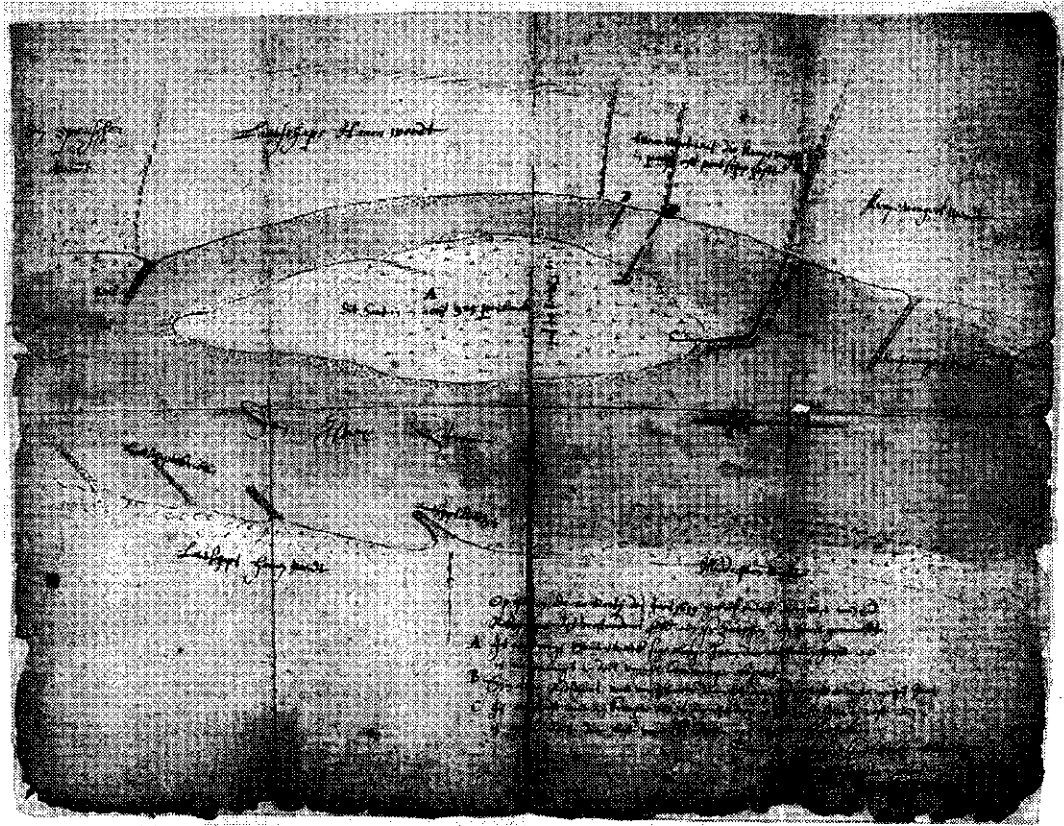


Fig. 5.10 Een zand in de IJssel tegenover 's-landschaps Hanewaard en Crayevangerswaard in de Emmer onder Steenderen (Van Geelkercken, 1639; RAG RK98)

Het patroon van strangen in de uiterwaarden van de zwak meanderende trajecten is gevormd door opwas van dergelijke kleine zandbanken, waarbij echter oevererosie nog wel een rol speelde. Het patroon van de strangen op de fysiotopenkaart van de IJssel wijst niet naar stapsgewijze stelselmatige aangroei zoals bij de uiterwaarden van de Waal, maar naar afwisselend aan weerszijden van de bedding aangroeiende zandbanken (fig. 5.9). Historische kaarten geven aan dat dit proces aan het einde van de 16^e eeuw, begin 17^e eeuw nog volop gaande was (fig. 5.10).

Oeverwalvorming

Uit de kartering van de fysiotopen blijkt dat er twee typen oeverwallen langs de IJssel voorkomen: grote overwallen in het bovenstroomse deel van de kronkelwaarden en kleine langegrekte oeverwallen direct langs het laagwaterbed. De eerstgenoemde oeverwallen liggen op de plaatsen waar het water de bedding bij hoge afvoeren verlaat. Naarmate de meanderbocht zich in het verleden verder verplaatste, breidde de oeverwal zich in benedenstroomse richting uit. De oppervlakte oeverwal in het IJsseltraject was vrij stabiel omdat er - in tegenstelling tot de Waal (zie par. 5.2)- weinig erosie optrad en oeverafzetting steeds op dezelfde locatie plaatsvond. De oeverwallen langs de IJssel zijn dan ook veel ouder dan die langs de Waal. Zij zijn van beneden naar boven toe opgebouwd uit steeds fijner wordend materiaal. Naarmate de oeverwal hoger wordt kan er minder zand uit de bedding worden afgezet. Uiteindelijk wordt op de oeverwal net als in de overige delen van de uiterwaard alleen nog klei afgezet. Daardoor was verstuing niet mogelijk waardoor ook op de historische kaarten geen actieve rivierduinen zijn waargenomen.

In de rechttere delen van de IJssel ontbreken de grote oeverwallen; mogelijk door het feit dat hier minder uitwisseling tussen zomer- en winterbed plaatsvond of doordat bij een afnemende afvoer zand vooral in de vorm van beddingsedimenten werd afgezet. Een uitzondering hierop vormt het deeltraject Westervoort-Rheden waar direct langs de oever wel smalle oeverwallen voorkomen. In dit smalle traject heeft de bedding altijd vrij vast gelegen, zodat de plaats van depositie langdurig dezelfde is geweest. Daarnaast is het aannemelijk dat na het doorgraven van de Pleij een korte periode van een verhoogd zandrtransport heeft plaatsgevonden, wat tot oeverwalvorming in het aansluitende traject heeft geleid.

Sinds de meanderbochten niet meer migreren is het proces van uitbreiding van oeverwallen gestopt. De oude oeverwallen worden alleen door slibafzetting opgehoogd waardoor de zwaarte van bovengrond toeneemt. In de huidige situatie wordt zand alleen nog in een smalle zone direct langs de oever afgezet. In vergelijking met de Waal is deze zone smal en zijn de hoeveelheden zand beperkt. Met het hoogwater van 1995/96 is langs de IJssel ca 45.700 m³ afgezet (Sorber, 1997). Dit komt voor de Gelderse IJssel overeen met gemiddeld 0,4 ha oeverwal per kilometer rivier. Evenals bij de Waal wordt langs de IJssel het zand voornamelijk in binnenbochten afgezet.

Opslibbing van de uiterwaard

De IJsseluiterwaarden slibben minder snel op dan de uiterwaarden van de Waal (Middelkoop, 1997). Daardoor is bijvoorbeeld het reliëf van de kronkelwaarden nog steeds goed zichtbaar. De geringe opslibbing wordt vooral veroorzaakt door de grote omvang van de uiterwaarden. Bij hoge afvoeren verspreid het water zich over een grote oppervlakte waardoor de opslibbing per vierkante meter gering is. De effectieve slibafzetting langs de IJssel is echter hoog, omdat bij hoogwater de stroomsnelheid in de brede uiterwaarden gering is.

Verlanding van strangen

Naast de strangen die ook langs de Waal voorkomen kunnen hier ook beekstrangen, verlaten rivierbeddingen en kronkelwaardgeulen onderscheiden worden. Of het proces van verlanding in de strangen langs de IJssel optreed is afhankelijk van het type strang.

Evenals bij de Waal neemt het aantal watervoerende strangen langs de IJssel in de loop van de tijd af. Wanneer een strang benedenstrooms wordt afgesloten van de rivier begint het proces van dichtslibbing en verlanding. Veel van de strangen in IJsseluiterwaarden zijn echter geheel verland en in gebruik als grasland. Dit in tegenstelling tot de strangen in de Waaluitwaarden. De reden hiervan is dat de meeste strangen veel ouder zijn dan de strangen langs de Waal. De kronkelwaardgeulen zijn veelal direct na hun ontstaan al drooggefallen; het zijn nooit diepe geulen geweest.

De verlaten (afgedamde) rivierbeddingen daarentegen, zoals de Lamme IJssel, zijn relatief diep en breed, waardoor zij zeer lang open blijven. Daarnaast heeft een aantal strangen langs de IJssel vanwege de ligging in kronkelwaarden een belangrijke afvoerfunctie bij hoog water en is daarom ook niet (geheel) verland. Hieronder vallen de Dierensche Hank (zie fig. 5.7) en de dynamische strangen in het smalle deel van de IJssel tussen Dieren en Brummen. Ook beekstrangen verlanden nooit geheel door de voortdurende aanvoer van water.

5.4 Verschillen tussen het Waal- en het IJsseltraject

5.4.1 Fysische verklaring voor verschillen in morfologie

De vorming van zand- of grindbanken bepaalt in belangrijke mate het morfologische karakter van een rivier. Banken zijn het resultaat van een dynamisch systeemgedrag dat zich door wiskundige vergelijkingen voor de beweging van water en zand laat beschrijven. Door wiskundige analyse van deze vergelijkingen kan men de afmetingen, de groeisnelheid en de ruimtelijke demping van de banken bij benadering bepalen.

Men maakt daarbij onderscheid tussen vrije banken die geleidelijk stroomafwaarts wandelen en gedwongen of plaatsvaste banken waarvan de vorming samenhangt met de lokale riviergeometrie.

Een analyse van vrije banken leidt tot een afbakening van twee situaties:

- A— naast plaatsvaste en alternerende vrije banken ook eilanden, waarin zich behalve langs de oevers ook banken in het midden van de rivier vormen (fig 5.11a);
- B— naast plaatsvaste banken ook alternerende banken waarin banken afwisselend links en rechts langs de oevers banken ontstaan (fig 5.11b).

Banken in het midden van de rivier duwen de stroming aan weerszijden naar buiten en kunnen zo extra oevererosie veroorzaken. De lokale verbreding die daarvan het gevolg is, versterkt de eilandvorming. Een aanvankelijk vrije bank kan zo overgaan in een gedwongen bank ter plaatse van de verwijding.

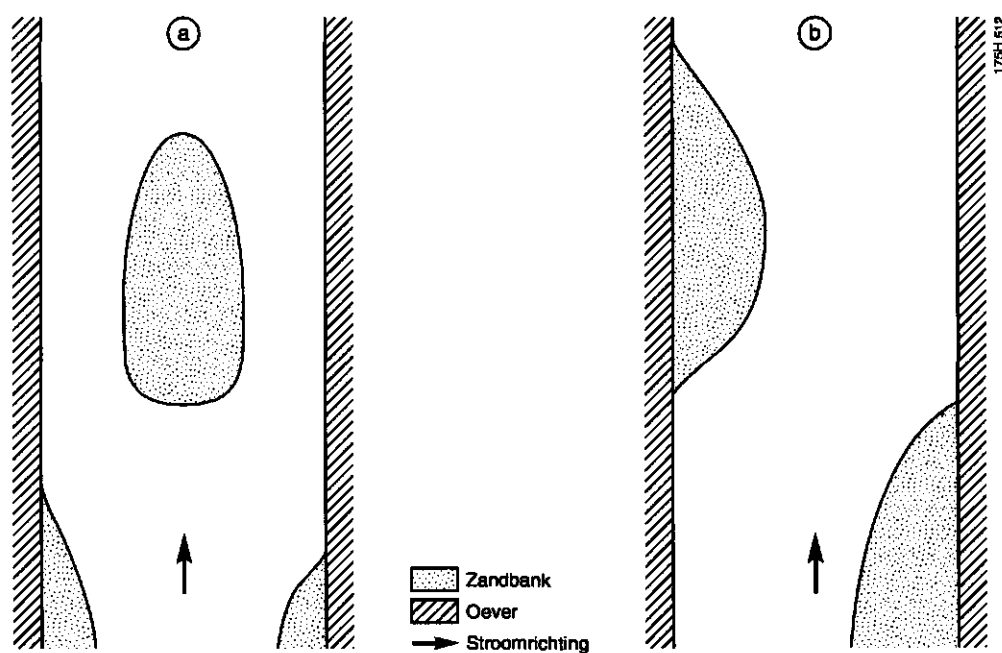


Fig. 5.11 Eilanden (a) en alternerende vrije banken (b)

Wanneer vrije banken onderdrukt worden, kan de lokale riviergeometrie nog tot de vorming van plaatsgebonden banken aanleiding geven. Kronkelwaardbanken in een rivierbocht zijn daar een voorbeeld van. Omdat de bodem een bepaalde lengte nodig

heeft om zich aan te passen, hebben kronkelwaardbanken niet meteen in het begin van de bocht al de volle hoogte en strekken ze zich ook benedenstrooms van de bocht uit, waarbij het effect van de bocht op de bodem gaande weg uitdempt. Ook hier zijn twee situaties:

- C— Onderkritisch gedempte plaatsvaste banken. Bij onderkritische demping heeft de aanpassing het karakter van een uitdovende golf. Daarbij schiet het systeem bij het bereiken van het evenwichtsbochtprofiel verder door en treden ook benedenstrooms van de bocht nog slingeringen in de bodem op; zie figuur 5.12a. Het doorschieten in de bocht leidt tot een hogere kronkelwaardbank en een diepere geul langs de oever van de buitenbocht.
- D— Overkritisch gedempte plaatsvaste banken. Bij een sterk gedempt systeem daarentegen zal de bodem in een bocht rechtstreeks in het evenwichtsbochtprofiel overgaan en stroomafwaarts daarvan ook weer rechtstreeks in een horizontaal profiel. Dit geval van overkritische demping is weergegeven in figuur 5.12b.

Uit de wiskundige analyses blijkt dat bankvorming met name afhangt van de breedte-diepte-verhouding of, als alternatief daarvoor, de interactieparameter. Bankvorming is sterker naarmate de breedte-diepte-verhouding groter is.

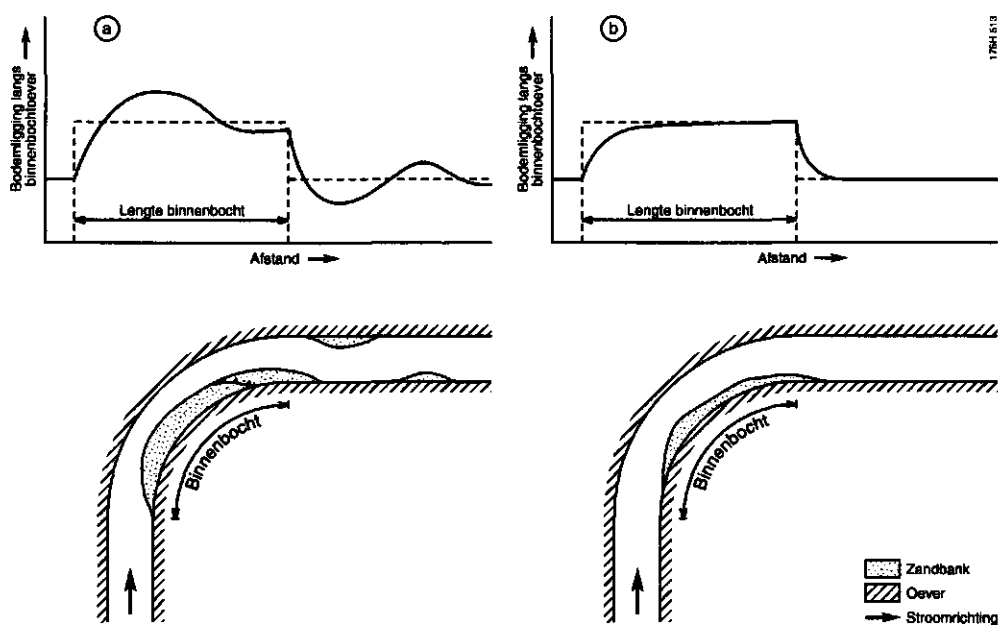


Fig. 5.12 Kronkelwaardbank met onderkritische demping (a) een kronkelwaardbank met overkritische demping (b) nu in de Waal (onder water)

Qua vorming van zand- of grindbanken en de gevonden rivierkundige parameters (tabel 5.3) zijn de historische en de huidige riviertypen van de Waal en de IJssel goed in te passen in dit rivierkundig onderscheid. Vrije banken konden anno 1800 nog in de Waal ontstaan; in de veel smallere IJssel kwamen deze vormen toen al niet voor. De banken, die in 1800 bij de IJssel voorkwamen staken voor een deel boven het gemiddelde waterpeil uit en kunnen gerekend worden tot de onderkritisch gedempte plaatsvaste banken.

Tabel 5.3 Overzicht rivierkundige parameters voor de Waal tussen Oosterhout en Dodewaard en de IJssel tussen Westervoort en Doesburg

	Waal		IJssel	
	1800	heden	1800	heden
Breedte <i>B</i>	557	260	114	80
Diepte <i>d</i>	4,01	7,36	3,19	6,85
<i>B/d</i>	151	35	37	12
Verhang <i>i</i>	12,9	11,0	12,8	12,1
<i>Q</i> bankfull	2350	2350	260	580
D50 mm	0,9	0,9	1,8	1,8
Stream power ω	5,3	9,7	2,8	7,4
Shields parameter θ	0,34	0,51	0,14	0,28
$IP=\lambda_v/\lambda_w$	9,5	0,53	0,48	0,05
v_{gem} bankfull	1,16	1,29	0,88	0,97
v_{gem} geul, hoogwater	1,44	1,58	1,00	1,08
v_{gem} uiterwaard	0,47	0,51	0,33	0,31
Hoogwater				
$Q_{uiterwaard}$ % Hoogwater	12	18	43	34

De verschillende situaties van bankvorming staan in direct verband met de geconstateerde verschillen in dynamiek. In tabel 5.4 is als maat voor de dynamiek de migratiesnelheid van het zomerbed van de Waal en de IJssel weergegeven. Deze is berekend uit het gemiddelde van de erosie en aangroei (tabel 5.1 en 5.2) in de periode 1750-1840 voor de IJssel en 1780-1830 voor de Waal (bij een rivier in evenwicht zijn erosie en aangroei min of meer aan elkaar gelijk). In vergelijking met de IJssel ging anno 1800 de vorming van vrije banken bij de Waal gepaard met een grotere beddingmigratie.

Tabel 5.4 Beddingmigratie van de IJssel en de Waal in de 2^e helft 18^e en begin 19^e eeuw

	Gem aangroei/erosie (ha/km/jr)	Opp. Bedding (ha/km)	Aangroei/erosie (% vd bedding/jr)	Bedding 1x verlegd (jr)
IJssel	0,035	10,59	0,33	303
Waal	0,205	43,77	0,47	214

Hoewel de absolute beddingmigratie van de Waal zes maal groter was als de migratie van de bedding van de IJssel is de periode die de IJssel nodig had om de bedding over een afstand gelijk aan de breedte van het laagwaterbed te verleggen, slechts anderhalf keer zo groot als die van de Waal. Het verschil in dynamiek wordt vooral toegeschreven aan de kleinere breedte-diepteverhouding bij de IJssel.

De rivierverbeteringsmaatregelen hebben als effect gehad dat het gedrag van de rivieren is veranderd. Door de interventies zijn de Waal en de IJssel meer dan vroeger op elkaar gaan lijken: de interactieparameter en de breedte-diepteverhouding voor beide rivieren zijn kleiner geworden en liggen dicht bij elkaar, terwijl het stroomvermogen van beide rivieren groter geworden is. Zelfs in de Waal komen in 1995 geen vrije alternerende banken meer voor. Opvallend is tevens de minder grote variatie in stroomsnelheden in beide rivieren. Er zijn echter ook nog duidelijke verschillen, niet alleen in de vroeger ontstane gesteldheid van de uiterwaarden, maar ook in de dynamiek van de rivier zelf. In de Waal treedt het doorschieten van de bodemligging in bochten nog op; alhoewel

de banken, net als bij de IJssel, al niet meer boven het bovengenoemde gemiddelde waterpeil uitsteken.

5.4.2 Fysiotopen en ecotopen: referentie en streefbeeld

De bovengenoemde verschillen in geomorfologische processen hebben geleid tot een verschillende fysiotoop- en ecotoopsamenstelling. De verschillen in de verdeling van de historische fysiotopen zijn weergegeven in figuur 5.13. In deze diagrammen zijn de fysiotopen, om de verschillen tussen de Waal en de IJssel beter tot uiting te laten komen, geclusterd in groepen zoals aangegeven in tabel 5.5 en vervolgens zijn twee groepen, de strangen en de uiterwaarden nader uitgewerkt.

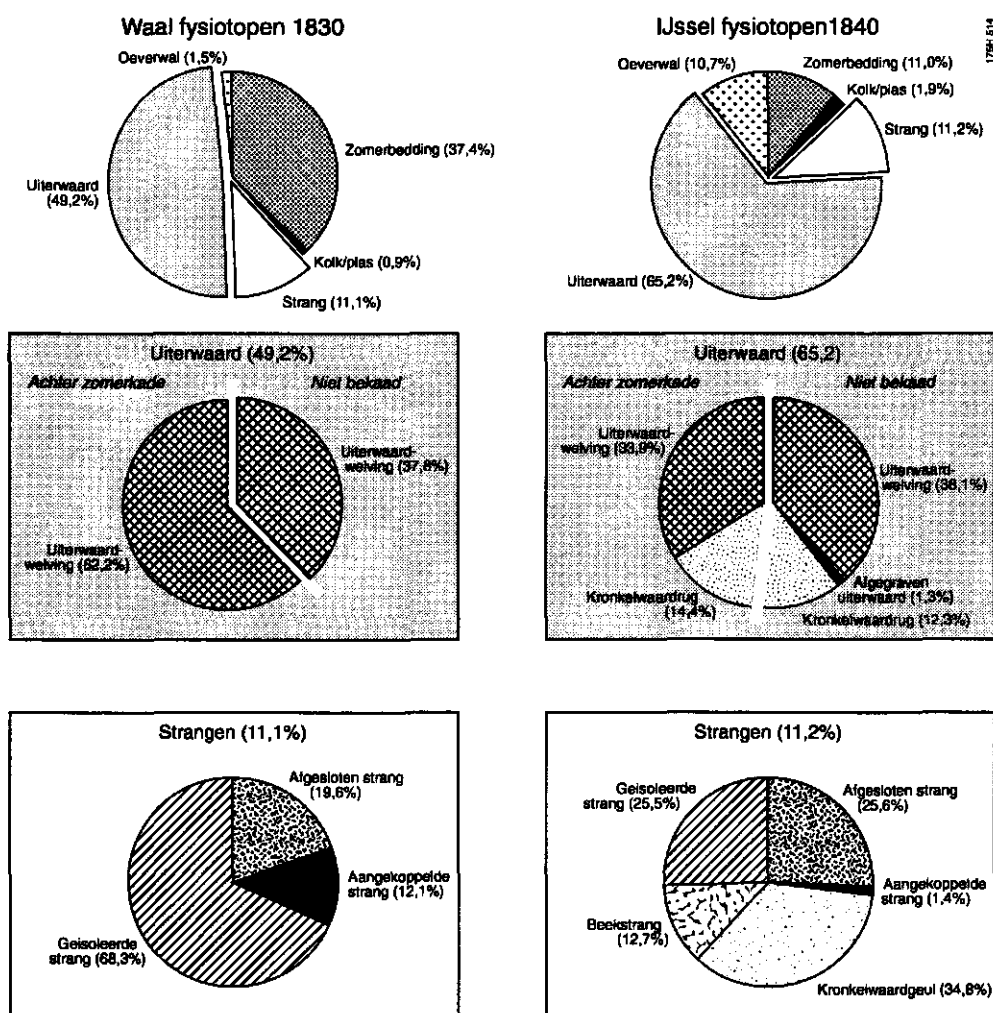


Fig. 5.13 Verdelingen van de fysiotopen van de uiterwaarden van de Waal anno 1830 en de IJssel anno 1840

Tabel 5.5 Groepering fysiotoopen

Fysiootopgroepen	Fysiotoopen
Zomerbedding	Laagwaterbedding, zandbank, grindbank, kronkelwaardbank, nevengeul
Uiterwaarden	Uiterwaardwieling (kade) kronkelwaardrug (kade)
Oeverwallen	Oeverwal (kade)
Strangen	Aangekoppelde strang, afgesloten strang, kronkelwaardgeul (kade) geïsoleerde strang
Kolk/plas	Kolk/plas (kade)

Met name het aandeel zomerbedding en oeverwal in de verdeling is verschillend. Daarnaast is het opmerkelijk dat het aandeel strangen in beide verdelingen gelijk is. Het aandeel uiterwaard achter een zomerkade is bij de Waal 10% hoger als bij de IJssel. De IJsseluiterwaarden zijn morfologisch diverser door de aanwezigheid van kronkelwaarden. In de IJsseluiterwaarden komen meer typen strangen voor: naast de strangen die ook langs de Waal voorkomen kunnen hier ook beekstrangen, verlaten rivierbeddingen en kronkelwaardgeulen onderscheiden worden. Het aandeel dynamische strangen (aangekoppelde en afgesloten strang; zie par 3.3.2) is bij beide rivieren gelijk.

De verdelingen van de ecotopen uit 1830/40 van beide rivieren zijn weergegeven in figuur 5.14. Evenals bij de fysiotoopen zijn ecotopen in de diagrammen geclusterd. Opvallende verschillen tussen de ecotopensamenstelling van de IJssel en de Waal zijn het grotere percentage 'agrarische ecotopen' (uiterwaard- en stroomdal-) grasland en bouwland in de IJsseluiterwaarden. Dit hangt direct samen met het feit dat de IJsseluiterwaarden in vergelijking met die van de Waal pas overstromen bij een hogere waterstand bij Lobith. Zomerbedding, bos en strangen/ruigte vormen samen in IJsseluiterwaarden minder dan 20% van de oppervlakte terwijl dit bij de Waal meer dan 50% is. In het Waaltraject worden in 1830 nog nevengeulen aangetroffen en komen ten opzichte van de IJssel nog veel zandbanken voor. In het IJsseltraject komen door de grotere oppervlakte (oude) oeverwal meer stroomdalgraslanden voor.

Uit de vergelijking van fysiotoopen en ecotopen blijkt dat in het Waaltraject een groter aandeel van de strangen nog uit open water, moeras of ruigte bestaat. Langs de IJssel zijn veel van de strangen begroeid met gras. Dit verschil hangt direct samen met een verschil in stroomsnelheden in de uiterwaarden, die bij de IJssel lager is dan bij de Waal, waardoor verlanding bij de IJssel sneller optreedt. De diversiteit die uit de fysiotoopenverdeling van de IJssel naar voren kwam wordt niet teruggevonden in de samenstelling van de ecotopen.

In figuur 5.15 is voor de Waal en de IJssel de ontwikkeling in de tijd van een aantal dynamische ecotopen geschetst. De morfologische activiteit van een rivier weerspiegelt zich in de verhouding tussen het laagwaterbed en de aan het laagwaterbed grenzende ecotopen nevengeul, natuurlijke rivieroever (oa. zandbanken) en zachtouthoutbos. In deze ecotopen treden door stromend water de grootste morfologische verandering op. Uitgedrukt ten opzichte van de laagwaterbedding blijkt dat beide rivieren ten aanzien van deze dynamische ecotopen een vergelijkbare ontwikkeling doormaakten en dat ook het gezamenlijke aandeel van de ecotopen nevengeul, natuurlijke rivieroever en zachtouthoutbos in verhouding tot het laagwaterbed, bij beide rivieren in dezelfde orde van grootte ligt.

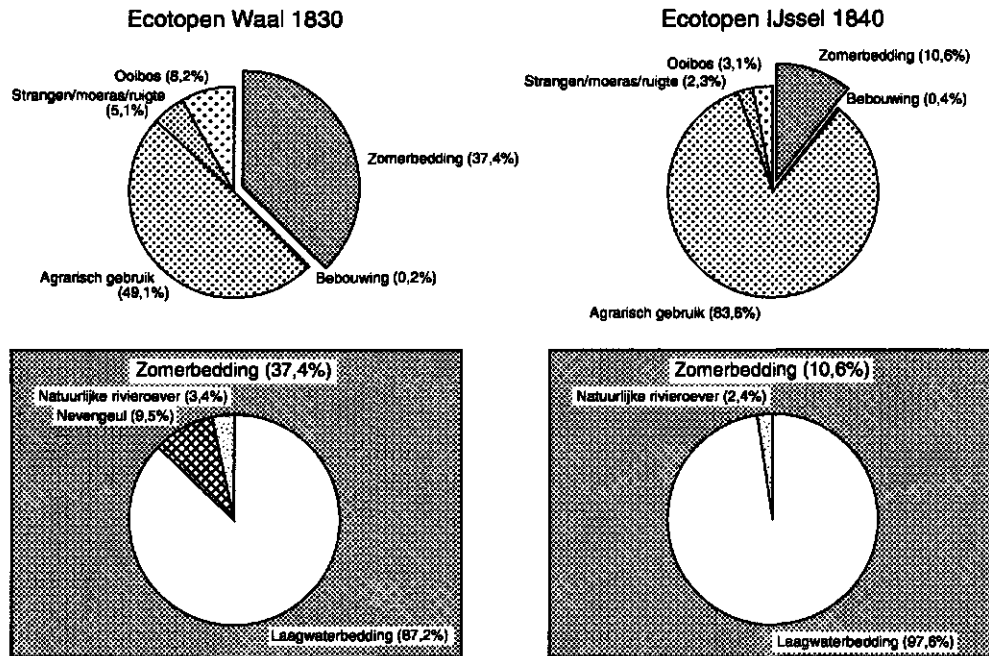


Fig. 5.14 Verdeling van de ecotopen van de uiterwaarden van de Waal anno 1830 en de IJssel anno 1840

Het meest duidelijk zijn de veranderingen te zien in de reeks diagrammen van de IJssel, waarbij de situatie van 1670 (van Geelkercken; zie fig 3.2) als uitgangspunt is gekozen. Vanaf 1670 tot 1990 was er sprake van een relatieve toename van de laagwater bedding. Relatief, omdat uit de kaartanalyse is gebleken dat absolute oppervlakte van de laagwaterbedding niet is toegenomen, maar is afgenomen. Deze toename werd in de eerste periode veroorzaakt door een sterke afname van het ecotoop natuurlijke rivieroever. In de in deze periode sterk verzandde IJssel (zie par. 2.4), was een nieuw evenwicht ontstaan tussen het beddingprofiel en de veranderde afvoer. Grote en veelvuldig in de zomerbedding aanwezige zandige aan- en opwassen begroeiën spontaan met zachthoutooibos of werden bepoet met wilgenbos (par 5.3). Dit is in deze periode terug te vinden in een toename van 10% van het aandeel zachthoutooibos. In de periode 1750-1990 blijft het aandeel natuurlijke rivieroever constant op een laag niveau van 2-4%. Het aandeel zachthoutooibos volgde vertraagd de afname van het ecotoop natuurlijke rivieroever en liep vanaf 1830 sterk terug. Onder de heersende omstandigheden werden nauwelijks aan- en opwassen gevormd en bestaande oibossen werden omgevormd tot grasland. In de ecotopenverdeling van 1990 weerspiegelt zich de actuele situatie: een genormaliseerde rivier met harde (stenen) oevers.

Afwijkend bij de Waal ten opzichte van de IJssel is de sterke toename van de oppervlakte van het ecotoop natuurlijke rivieroever in de periode 1830-1990. Deze is het gevolg van de riviernormalisatie, waarbij beide oevers van de Waal zijn vastgelegd met kribben. Tussen de kribben vormden zich zandstranden. Deze stranden zijn bij de ecotopenkartering van het IVR opgenomen als natuurlijke rivieroever. Opmerkelijk is dat deze stranden anno 1990 naar verhouding een grotere oppervlakte innemen dan de natuurlijke rivieroever (zand- en grindbanken) in 1780.

Als laatste diagrammen zijn de IVR streefbeeld en weergegeven. Het streefbeeld van de Waal sluit aan bij de historische, 18^e eeuwse referentie. Het streefbeeld van de IJssel

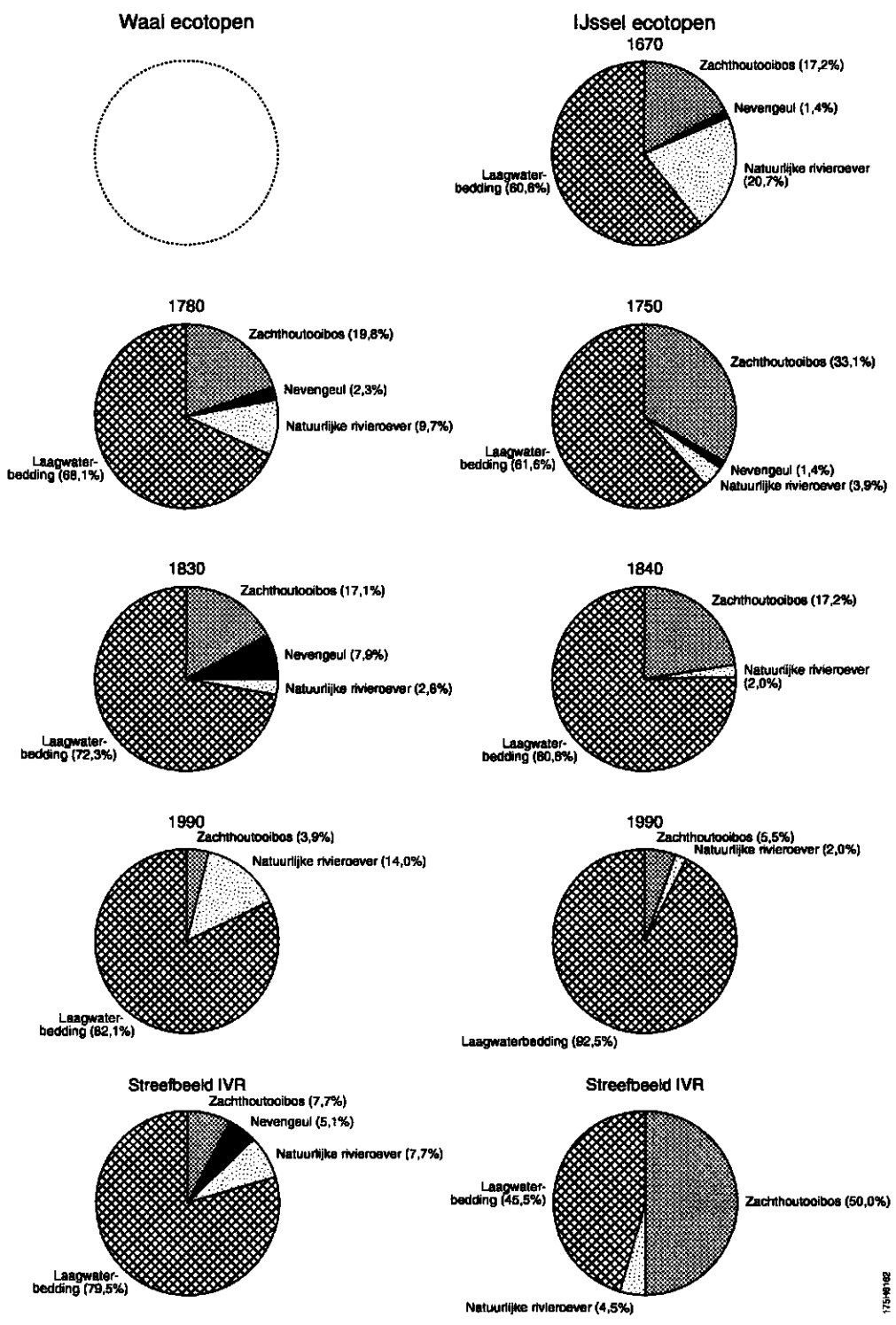


Fig. 5.15 Ontwikkelingen in de verhoudingen tussen de dynamische ecotopen van de uiterwaarden van de Waal en de IJssel tussen 1670 en het IVR streefbeeld

wijkt echter af van de historische situatie. Het zachthoutoobos is qua oppervlakte in de onderzochte periode altijd gerelateerd geweest aan de vorming van op- en aanwassen. Afname van de oppervlakte natuurlijke rivieroever leidde (met een zekere vertraging) in een afname van het zachthoutoobos. In het streefbeeld is de oppervlakte zachthoutoobos gebaseerd op de geschiktheid van de fysiotopen voor oobosontwikkeling. Hoewel een streefbeeld geen historische reconstructie is lijkt de oppervlakte zachthoutoobos in dit beeld overschat te zijn.

Ondanks dat de omstandigheden zijn gewijzigd is nieuwvorming van alle fysiotopen langs de Waal nog realistisch. De Waal heeft immers nog een relatief grote interactieparameter en een voor een deltagebied groot stroomvermogen, dat gepaard gaat met grote stroomsnelheden in het laagwaterbed. Doordat de bedding in de huidige situatie vast ligt zijn de condities voor oeverwalontwikkeling verbeterd. Afgraving van uiterwaarden grenzend aan de bedding, gecombineerd met lage, lange kribben scheppen nieuwe mogelijkheden voor vorming van zandplaten en wellicht kleine nevengeulen in de kribvakken (zie par. 6.2).

Voor de IJssel geldt dat een deel van de fysiotopen, de fysiotopen die gerelateerd zijn aan het proces van meanderen, gevormd zijn in ten opzichte van de huidige situatie sterk afwijkende morfodynamische omstandigheden. De zeer lage waarde van de interactieparameter wijst erop dat nieuwvorming door actuele processen binnen de huidige randvoorwaarden voor deze fysiotopen niet reëel is. Unieke situaties in de IJssel bieden andere mogelijkheden voor natuurontwikkeling. Hierbij kan gedacht worden aan nevengeulvorming op locaties waar bedding en zijrivier of aangekoppelde strang samenkomen (zie par. 6.2). Ook de grote actuele diversiteit aan fysiotopen biedt mogelijkheden voor het benutten van de kansen voor beekstrangen en het realiseren van een grotere variatie in dynamiek tussen de overige strangen.

5.4.3 Positie van de trajecten in het riviersysteem

Op basis van de ligging van de twee onderzochte riviertrajecten en hun ontwikkeling gedurende het Holoceen kunnen de trajecten van de IJssel en de Waal beschouwd worden als twee typische onderdelen van de gradiënt in het riviersysteem van de Rijn-Maasdelta. De overgang van het ene naar het andere type werd in deze gradiënt veroorzaakt door het samengestelde effect van meerdere factoren, waarbij soms een verschillende combinatie van factoren de doorslag gegeven kan hebben op de historische ontwikkeling. Achtereenvolgens zijn te onderscheiden:

- In het bovenste deel van de depositiezone (de Rijn-Maasdelta) was er eerst een sterk meanderende rivier met zandbanken en een gering aantal eilanden. De IJssel staat hiervoor model. Dit type rivieren stroomt in een zandige ondergrond, heeft daardoor een grote sinuositeit en een kleine breedte-diepteverhouding, en vertoont laterale migratie. Bij hoogwater wordt veel water via de brede uiterwaarden afgevoerd.
- Voor het middelste deel van de depositiezone is een zwak meanderende rivier met veel eilanden typerend. De Waal staat hiervoor model. Longitudinale migratie overheerst hier omdat de zijdelingse meandering wordt beperkt door de aanwezigheid van dikkere komkleien in de omgeving en de dijken die zijn aangelegd op korte afstand van de rivier. De sinuositeit is daardoor klein, terwijl de breedte-diepteverhouding juist groter is.

6 Classificatie en kansrijkdom

6.1 Classificatie riviertrajecten

Het doel van de classificatie van riviertrajecten is het maken van een voor de rivierbeheerder bruikbare indeling, op basis waarvan een inschatting gemaakt kan worden van de mogelijk te ontwikkelen ecotopen, en de maatregelen die daarbij van belang zijn.

Op trajectniveau onderscheiden de verschillende riviertypen zich in de eerste plaats door specifieke combinaties van fysiotopen en ecotopen. Voor een classificatie van dergelijke riviertypen zijn echter indelingskenmerken vereist. Bij voorkeur dienen deze kenmerken een causaal verband te hebben met de waargenomen verschillen. De classificatie wordt bovendien pas echt bruikbaar voor het rivierbeheer wanneer de indelingskenmerken door rivierkundige maatregelen te veranderen zijn. Deze eisen komen overeen met die voor de classificatie van rivierecotopen (Rademakers en Wolfert, 1994), maar spelen zich af op een hoger niveau.

Met name geschikt als indelingskenmerken zijn daarom de bij deze voorbeeldstudie betrokken rivierkundige parameters. Als voorwaarde aan de selectie van bruikbare parameters is gesteld dat zij bij vergelijking van de Waal en de IJssel en bij vergelijking van de historische en huidige situatie verschillende waarden hebben. Uit het overzicht (tabel 5.3) komen drie variabelen naar voren die met name voor wat betreft de morfodynamiek van het laagwaterbed onderscheidend kunnen werken:

- De breedte-diepteverhouding. Deze variabele is eerder in classificaties gebruikt (Schumm et al., 1987; zie fig. 5.16). Deze verhouding weerspiegelt de reactie van een rivier op de geologische ondergrond, en houdt verband met de sinusiteit en met de verhouding tussen bed load en suspended load. Of zich in het laagwaterbed vrije of plaatsvaste banken ontwikkelen is vooral afhankelijk van de breedte-diepteverhouding. De waarde van deze variabele is te veranderen door de breedte en/of de diepte aan te passen.
- De specific stream power. Deze variabele wordt gebruikt voor classificaties (Nanson en Croke, 1992; Van den Berg, 1995) maar ook als indicatie voor de dynamiek en het aanpassingsvermogen van een rivier (Brookes, 1988). De specific stream power is evenredig met de stroomsnelheid en zegt iets over de kracht van de waterstroming. De parameter is bovendien gerelateerd aan het verhang van het landschap. De waarde van deze variabele is te veranderen door rivierbeheersmaatregelen door veranderingen in de afvoer, breedte en in mindere mate de sinusiteit aan te brengen.
- De Shields parameter. Deze variabele is een maat voor de interacties tussen de stroming en het sediment in de rivier, en omvat de korrelgrootte van het beddingsediment. Het laatste wordt ook wel in classificaties opgenomen als belangrijke variabele (Van den Berg, 1995). Voor een historische situatie is de korrelgrootte van het beddingsediment echter vaak minder betrouwbaar in te schatten, wat deze parameter dan minder geschikt maakt.

Samen nemen deze drie variabelen de interacties tussen ondergrond, stroming en sediment in transport voor hun rekening (zie par. 4.1.1).

Alhoewel de interactieparameter ook onderscheidend is, is deze niet als variabele opgenomen. De interactieparameter wordt wel gebruikt om onderscheid te maken tussen riviertypen, waarbij zowel het voorkomen van specifieke patronen (Helmer et al., 1991) als de dynamiek van oeverwalvorming (Sorber, 1997) verklaard lijken te worden. Bij de berekening van deze parameter speelt echter de breedte-diepteverhouding (in het kwadraat) een belangrijke rol, een parameter die op zich al zeer onderscheidend werkt. De interactieparameter is bovendien niet onafhankelijk van de Shields parameter, die voor de berekening van de interactieparameter gebruikt wordt. Om deze redenen is dus in plaats van de interactieparameter voor de breedte-diepteverhouding gekozen.

Een grafische uitwerking van het voorstel voor classificatie van riviertrajecten wordt gegeven in de figuren 6.1. en 6.2. Hierin zijn de stream power en de Shields-parameter afgezet tegen de breedte-diepteverhouding. Tevens is daarin weergegeven hoe de vorming van vrije en plaatsvaste banken (zie par. 5.4.1) afhangt van de drie parameters, en zijn de historische en huidige Waal en IJssel hierin geplot. De ruimtelijke en temporele verschillen tussen de diverse trajecttypen komen in de figuren duidelijk tot hun recht (zie voor een uitleg ook par. 5.4.2). Ter vergelijking is ook de Tisza opgenomen, een rivier in Hongarije, die door Schoor (1994) bestudeerd is als mogelijke morfologische referentie voor nevengeulen langs de Rijn,

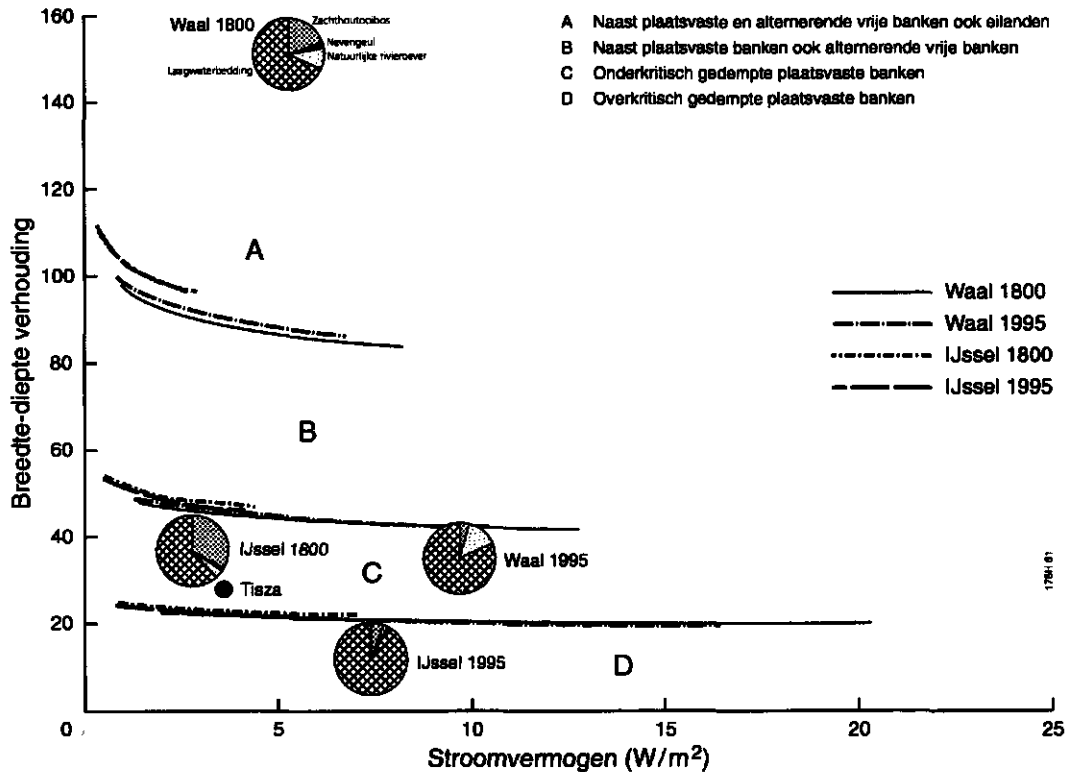


Fig. 6.1 Classificatie van riviertrajecten in relatie tot de indelingskenmerken breedte-diepteverhouding en stroomvermogen

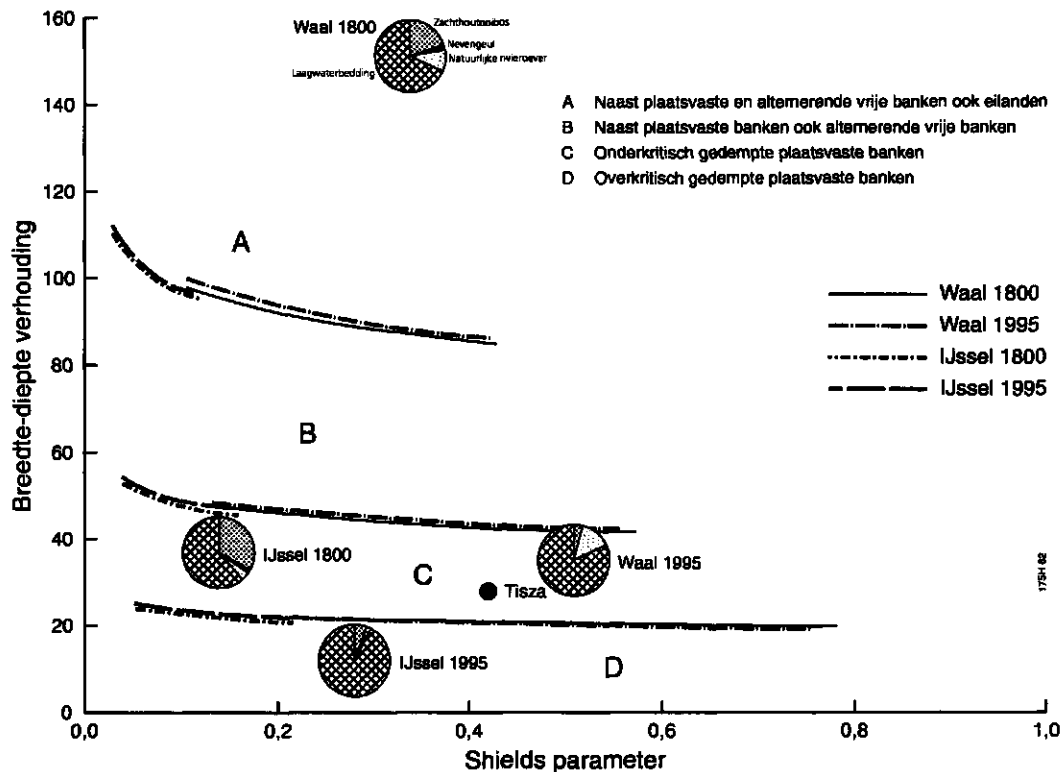


Fig. 6.2 Classificatie van riviertrajecten in relatie tot de indelingskenmerken breedte-diepte verhouding en Shields parameter

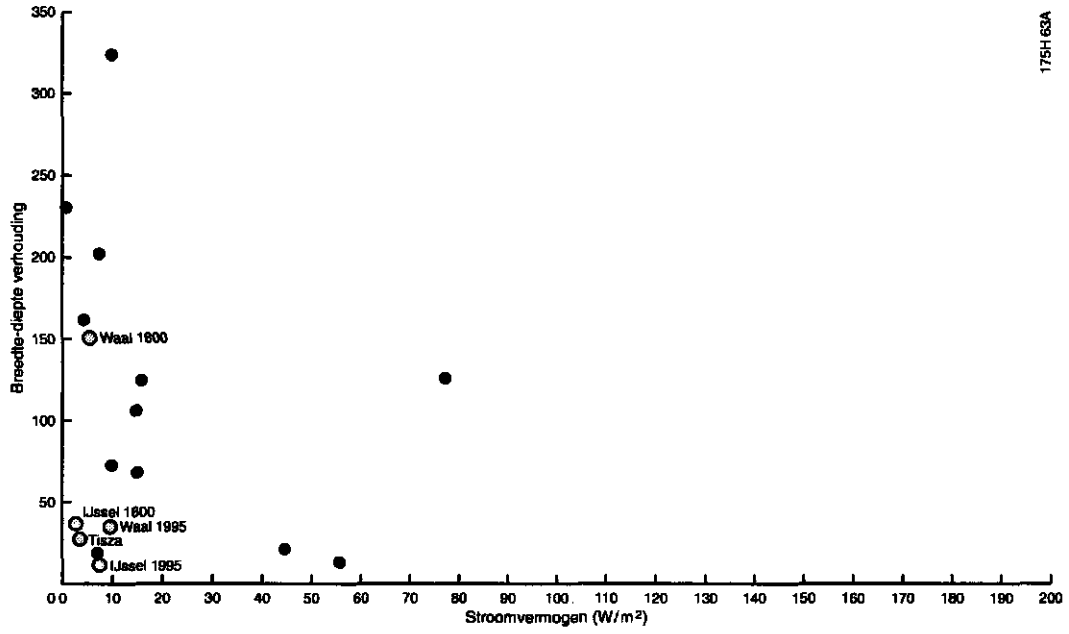
De grenzen in het diagram zijn berekend door bij verschillende afvoeren de kritieke breedten te berekenen die de overgangen tussen de aangrenzende situaties bepalen. Voor de Waal zijn hiervoor de afvoeren 100, 500, 1000, 2000 en 3000 m³/s gebruikt, voor de IJssel de afvoeren 20, 100, 200, 400 en 600 m³/s. Omdat geen hogere afvoeren gebruikt zijn, lopen de begrenzingen niet door in de rechterbovenhoek van de figuren. Aan de linkerzijde lopen de begrenzingen niet door omdat ook geen lagere afvoeren zijn gebruikt. De berekeningen met vrije banken zijn gebaseerd op de analyse van Struiksma en Crosato (1989), maar met verwaarlozing van de spiraalstroming. De berekeningen voor gedwongen banken zijn gebaseerd op het tweedegraads polynoom uit de analyse van Struiksma et al. (1985). Bij alle berekeningen is aangenomen dat de sedimenttransportformule van Engelund en Hansen (1967) geldt, en dat de coëfficiënt voor het effect van de zwaartekracht op het sedimenttransport over een helling in langsrichting 0,04 bedraagt. Met name bij lage waarden van de Shields parameter zijn grote afwijkingen ten opzichte van Engelund en Hansen te verwachten.

Een karakterisering op basis van alleen de zomerbedvullende afvoer is eigenlijk onvolledig, omdat de afvoer varieert. Bij lage afvoeren is de breedte-diepte verhouding groter, zodat de vorming van banken in principe sterker is. Omdat de sedimenttransporten dan echter laag zijn, duurt het lang voordat die banken ook daadwerkelijk gevormd zijn. De eerste stadia worden snel teniet gedaan zodra een hogere afvoer de breedte-diepte verhouding weer doet afnemen.

Met opzet wordt hier gesproken van een voorstel voor classificatie. In deze voorbeeldstudie zijn slechts twee historische trajecten en hun huidige tegenhangers bestudeerd. Er is niet getoetst of de beschreven verschillen in termen van fysiotopen en ecotopen ook gelden voor andere riviertrajecten van het sterk meanderende of zwak meanderende type in Nederland, en evenmin of de variabelen daar net zo verklarend zijn. Een meer betrouwbare classificatie kan pas opgesteld worden wanneer ook andere trajecten en andere trajecttypen zoals die van de Grensmaas, de Zandmaas en de Benedenrivieren worden betrokken in het onderzoek. Om dezelfde redenen zou er ook een vergelijking met buitenlandse rivieren gemaakt moeten worden. Uit een eerste verkennende vergelijking met 21 buitenlandse rivieren (tabel 6.1 en fig. 6.3 en 6.4) blijkt dat de Waal en IJssel slechts een deel van de grote variatie aan riviertypen vertegenwoordigen. Zowel breedte-diepte-verhouding, streampower als Shields parameter kunnen veel grotere waarden aannemen. Wel wordt duidelijk dat de classificatie perspectieven biedt om riviertypen te onderscheiden: de vlechtende riviertypen onderscheiden zich van de meanderende door een lage streampower en een grote breedte-diepte-verhouding. Meer gedetailleerde informatie over patronen van fysiotopen en/of ecotopen is echter niet vaak aanwezig.

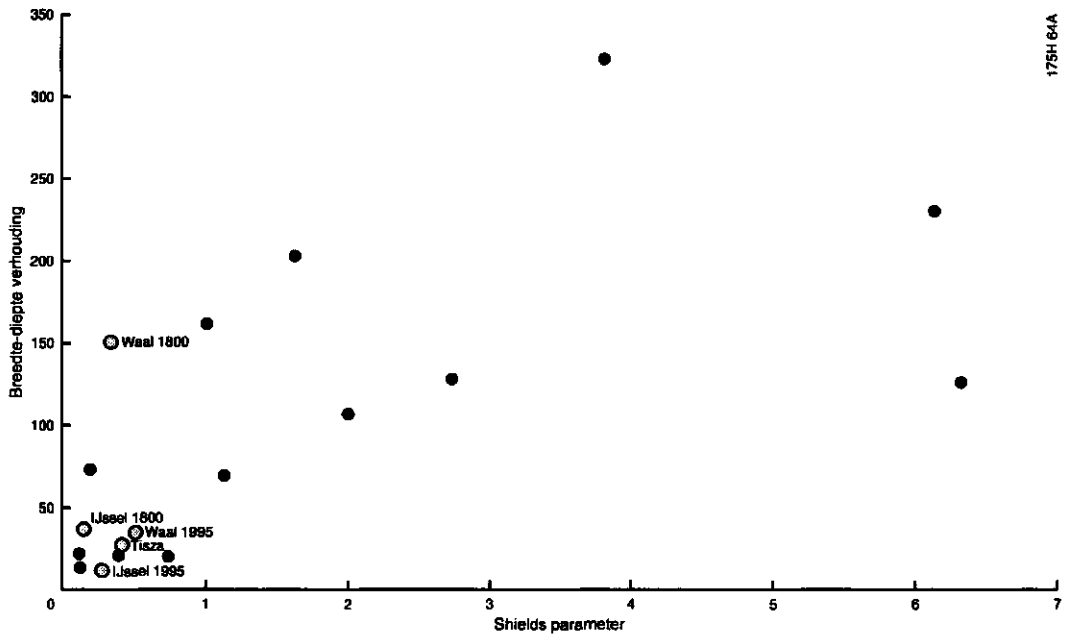
Tabel 6.1 Rivierkundige parameters van enkele buitenlandse rivieren

Rivier	Shields parameter (-)	Stream power (W/m ²)	Breedte-diepte-verhouding (-)
Jamuna	0,725	4,7	833,3
Bramaputra	0,774	6,5	6216,4
Saraswati	6,314	77,9	126,0
Ranoli	3,801	10,7	322,5
Yamuna	1,994	14,5	105,8
Ganga	1,165	20,6	776,6
Yashwantpu	0,208	9,9	72,6
Indus	1,627	7,1	201,4
Tonle Sap	6,121	0,8	229,8
Savannah	0,394	8,7	20,7
Mississippi	1,121	14,4	68,6
Mississippi	2,716	15,9	126,1
Beaver Creek	0,036	4,5	4740,7
Cottonwood Creek	0,000	0,1	5458,3
Yellowstone River	0,016	10,0	914,3
Watts Branch	0,011	0,9	2628,5
Middle Piney Creek	0,012	11,4	3323,8
Beaver	0,725	6,1	20,1
Ohau River	0,049	6,4	1800,0
Ohau River	0,110	53,6	803,6
Rio Parana	0,998	4,9	160,0
Tisza	0,420	3,6	28



175H 63A

Fig. 6.3 Breedte-diepte verhouding en stroomvermogen van de Waal en de IJssel in vergelijking met enkele buitenlandse rivieren



175H 64A

Fig. 6.4 Breedte-diepte verhouding en Shields parameter van de Waal en de IJssel in vergelijking met enkele buitenlandse rivieren

De toepassing van deze classificatie ligt op een aantal terreinen:

- het referentiebeeld: herkenning van de ruimtelijke variatie langs de riviertakken, zodat hierop ingespeeld kan worden bij het vaststellen van natuurdoeltypen voor riviertrajecten;
- de randvoorwaarden: duidelijk wordt welke variabelen van belang zijn voor het ontstaan en/of voortbestaan van natuurdoeltypen in het riviersysteem;
- de locatiekeuze: door de relatie tussen variabelen en de ruimtelijke variatie wordt duidelijk welke locaties in het riviersysteem kansrijk zijn voor ontwikkeling van doeltypen;
- de vormgeving: met behulp van de genoemde variabelen (vooral de breedte-diepteverhouding) kan soms gestuurd worden zodat een natuurdoeltype al snel tijdens het herstelproces optimaal functioneert.

6.2 Kansrijkdom ecotopen

De toepassing van de classificatie krijgt een verdere detaillering door de kansrijkdom van de in de trajecten voorkomende fysiotoepen en ecotopen uit te werken. De beschrijvingen van de historische en actuele situatie van de riviertrajecten geeft vooral inzicht in de aard en ligging van ecotopen en kunnen daarom beschouwd worden als referenties. Deze referenties geven tegelijkertijd ook inzicht in de vorming van ecotopen zodat daaruit verschillende randvoorwaarden te destilleren zijn waaraan een locatie moet voldoen om een fysiotoop of ecotoop duurzaam te laten voortbestaan. De kennis over processen blijft vooralsnog echter beperkt, zodat het beste gesproken kan worden van vuistregels.

De te maken keuzen in het proces van planvorming kunnen vervolgens in drie trappen worden ontleed, gaande van groot naar klein:

- als eerste moet duidelijk worden of er trajecten zijn die meer kansen bieden, en welke dat zijn;
- daarna kan aangegeven worden welke locaties in het traject het meest in aanmerking komen voor het herstel;
- tenslotte kunnen aanbevelingen worden gedaan voor de vormgeving.

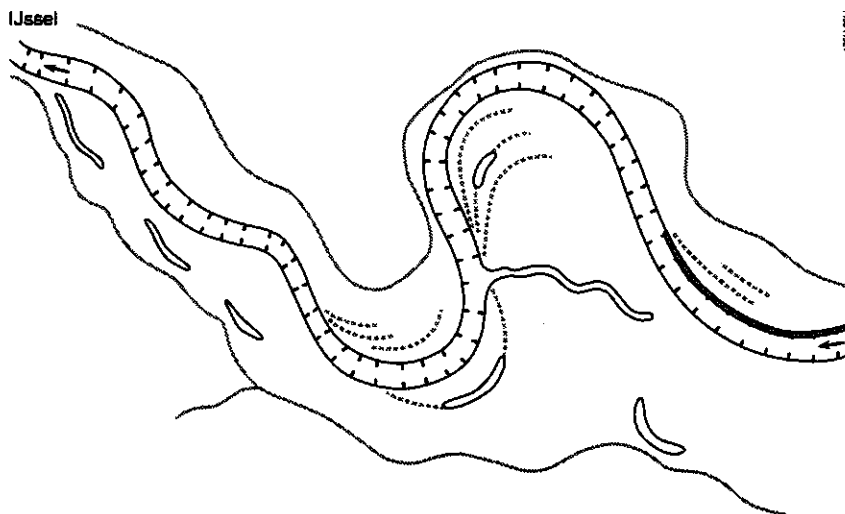
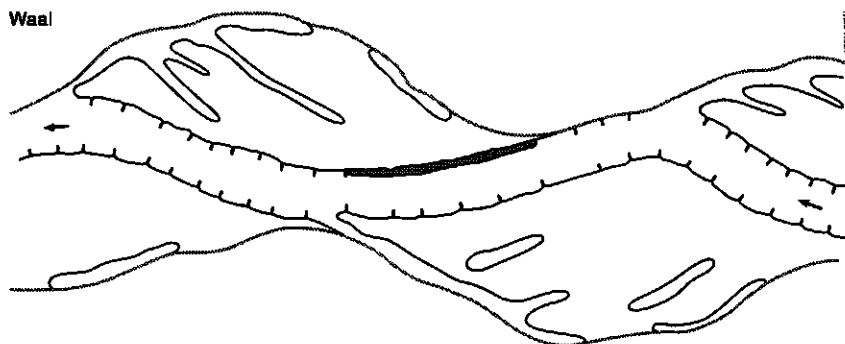
Bij elk van deze drie stappen dienen eerst de procesmatige mogelijkheden geanalyseerd te worden. Daarna komt de landschappelijke situering aan de orde.

De informatie die nodig is voor de planning van fysiotoepen en ecotopen wordt in deze paragraaf op systematische wijze gepresenteerd. Er zullen enkele vuistregels worden gegeven voor de planning van fysiotoop/ecotoop combinaties die als natuurdoel aangemerkt worden. De vuistregels gelden alleen voor de twee bestudeerde riviertrajecten en de daarin voorkomende fysiotoepen en ecotopen. De kansrijkdom voor de fysiotoop/ecotoop combinaties wordt samengevat in tabel 6.2.

Door een verdere uitwerking van het classificatiesysteem kan op deze wijze een set van staalkaarten ontworpen worden met aanwijzingen voor planning van natuurdoeltypen en daarbij horende inrichting van uiterwaarden. Twee volgende stappen zijn het aangeven van de kansrijkdom op gebiedsdekkende kaarten, en het opnemen van een dynamische abiotische module in ecologische beslissingsondersteunende systemen.

Ondiep laagwaterbed

- **Randvoorwaarden:** Een grotere breedte-diepteverhouding gaat samen met geleidelijk ondieper wordende oevers en daarmee een groter areaal aan ondiep laagwaterbed. Door de aanleg van kribben en vaste oevers zijn de rivieren zo smal geworden dat dit fysiotoop nagenoeg verdwenen is. Waar nog wel aanwezig, is het laagwaterbed door golfslag vaak te dynamisch om als habitat te kunnen functioneren.
- **Riviertraject:** Door de huidige grotere breedte-diepteverhouding biedt de Waal veel kansen, en de IJssel slechts weinig.
- **Locatie binnen traject:** Langs de Waal kan dit fysiotoop vrijwel overal tussen de kribben gerealiseerd worden. Wel is er variatie in kansrijkdom doordat de morfologie van het ondiepe laagwaterbed langs oevers afhankelijk is van de locatie ten opzichte van de uiterwaard: instroming of uitstroming bepalen het voorkomen van sedimentatie en erosie. Ook bij wilgenaanplant is de oever steiler (Van Splunder en Schoor, 1997) en de locatie dus minder kansrijk. Langs de IJssel is de vorming van dit fysiotoop meer afhankelijk van de grote sinuositeit van het laagwaterbed. De meest geschikte locaties zijn die langs de binnenbocht van de minder scherpe en brede meanders.
- **Vormgeving/maatregelen:** aanleg van langsdammen kan vorming van het fysiotoop bevorderen en kan voorkomen dat het te dynamisch is om als habitat te kunnen functioneren.



Nevengeul

— ***Randvoorwaarden:*** De natuurlijke vorming van nevengeulen is afhankelijk van de breedte-diepteverhouding van de rivier. Er kunnen twee typen nevengeulen onderscheiden worden. Langs zandbanken die in het verleden al snel verzandden: dynamische nevengeulen. Hiervoor is een grote breedte-diepteverhouding vereist. Daarnaast zijn er stabiele nevengeulen die lang kunnen functioneren en een kleine breedte-diepteverhouding van de rivier vereisen.

De dynamiek in de geulen zelf is afhankelijk van de breedte-diepteverhouding van de nevengeul: in brede ondiepe nevengeulen kunnen meer erosie- en sedimentatieverschijnselen ontstaan die vergelijkbaar zijn met die van het vroegere laagwaterbed van de rivier.

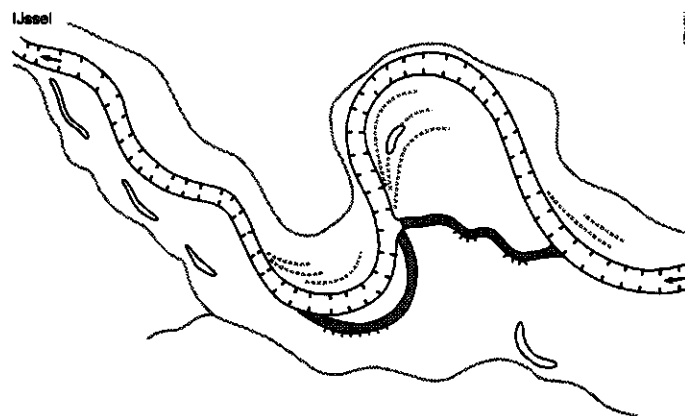
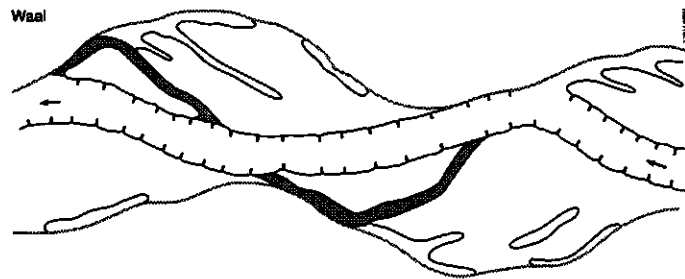
— ***Riviertraject:*** Door de aanleg van kribben is de breedte-diepteverhouding van beide rivieren zodanig veranderd dat natuurlijke vorming van nevengeulen niet meer mogelijk is. Verzanding van aangelegde, of weer aangetakte, nevengeulen zal langs de Waal echter nog steeds sterker zijn dan bij de IJssel, waar door de kleinere breedte-diepteverhouding en de ligging in kronkelwaarden nevengeulen permanent stromend kunnen blijven. Door opening van dergelijke geulen heeft de IJssel goede kansen voor dit type.

— ***Locatie binnen traject:*** Dynamische nevengeulen kunnen langs de Waal het meest efficiënt aangelegd worden in de jongere uiterwaardstrangen.

Langs de IJssel kunnen nevengeulen het beste aangelegd worden in de buitenbocht van meanders. Tevens zijn die strangen geschikt die een meanderbocht via de kronkelwaard afsnijden.

— ***Vormgeving/maatregelen:*** Voor een dynamisch en divers milieu binnen de nevengeul dienen de geulen langs de Waal een vrij grote breedte-diepteverhouding te krijgen; bij voorkeur dienen de oevers te bestaan uit zandige substraten.

Langs de IJssel is juist een kleinere breedte-diepteverhouding gewenst. Oevers aangelegd in kleiige substraten bieden aanvullend kansen voor steilwanden.



Natuurlijke rivieroever

— **Randvoorwaarden:** De vorming van natuurlijke rivieroeveren zoals zandplaten en rivierstranden is afhankelijk van de breedte-diepteverhouding: een grotere waarde betekent een grotere variatie aan dynamiek en aan afzettingsmilieus binnen het zomerbed. Het voortbestaan van steiloevers is gebaat bij een lage breedte-diepteverhouding van de watervoerende geul, zodat afkalving kan plaatsvinden. Daarnaast zijn sterk wisselende waterstanden van belang.

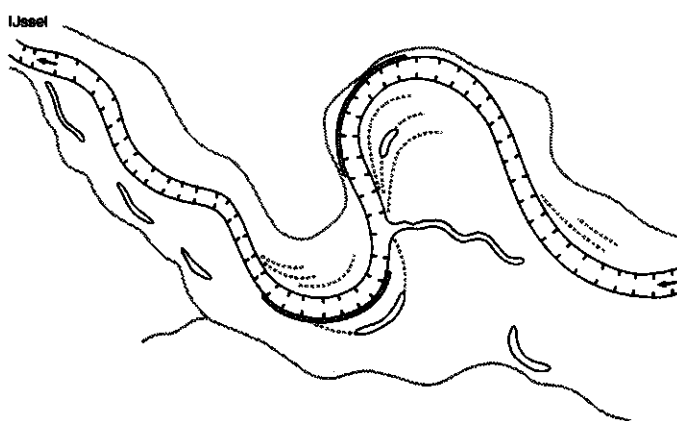
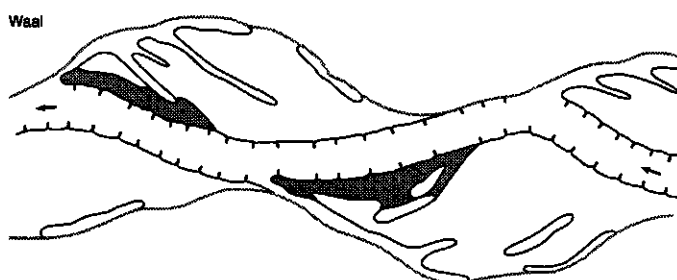
— **Riviertraject:** Langs de Waal waren vroeger uitgestrekte zandplaten aanwezig, en ook nu zijn er nog brede zandstranden langs de oevers. Langs de veel smallere IJssel waren vroeger wel natuurlijke rivieroeveren aanwezig, maar in de huidige situatie niet meer. De Waal is daarom kansrijk voor zandige rivieroeveren, terwijl de IJssel minder kansen biedt.

De IJssel biedt echter wel grotere kansen voor de ontwikkeling van steiloevers en steilranden, die daar ook vroeger voorkwamen in de buitenbochten waar oevererosie plaatsvond.

— **Locatie binnen traject:** Langs het gehele zomerbed van de Waal zijn de omstandigheden gunstig voor zandige natuurlijke rivieroeveren. Voor bredere zandplaten kunnen delen van oevers afgegraven worden: de meest interessante locaties zijn hier de jongere delen van de uiterwaard, die gelegen zijn langs het stroomafwaartse deel van een convexe oever. Hier vindt meer sedimentatie plaats en sluit ook qua landschappelijke ligging het beste aan op het historische patroon van de uiterwaard.

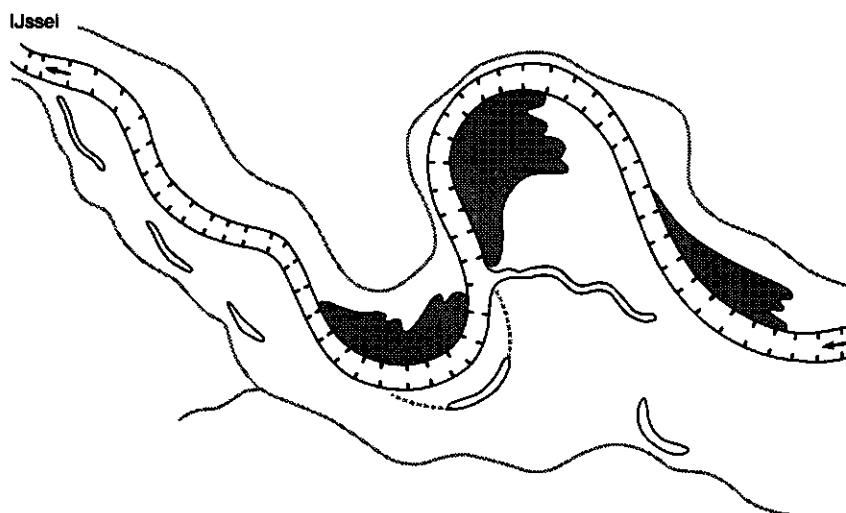
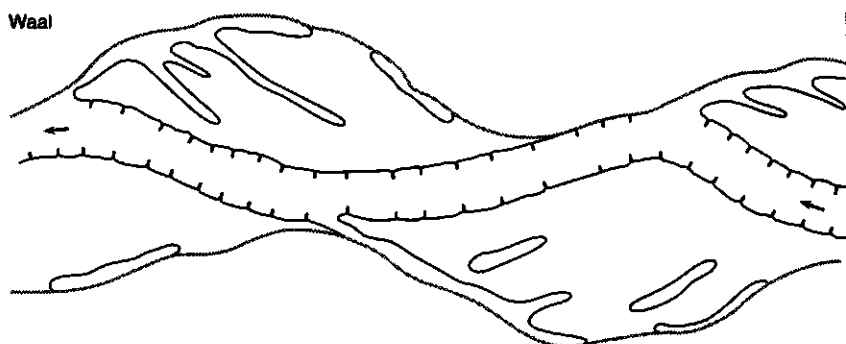
Steiloevers langs de IJssel kunnen het beste gerealiseerd worden in de buitenbochten van meanders, aangezien daar tussen de kribben kleilagen aangesneden kunnen worden. Behalve in het zomerbed zijn steiloevers ook te realiseren in nevengeulen en beekstrangen.

— **Vormgeving/maatregelen:** Het verwijderen van harde oeververdediging leidt tot natuurlijke rivieroeveren.



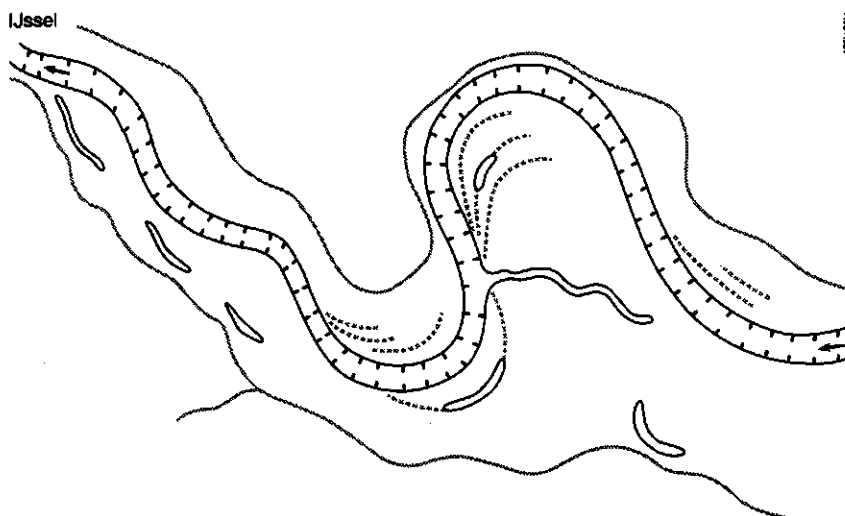
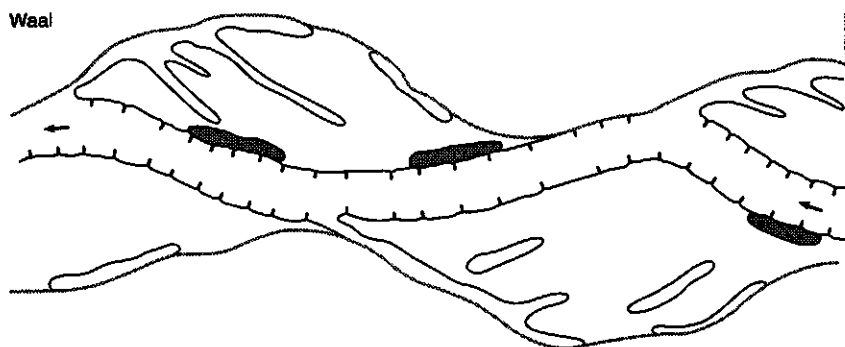
Kronkelwaardruggen en -geulen

- ***Randvoorwaarden:*** Aangroei van kronkelwaarden vond in de vroegere situatie plaats door een continu proces van erosie van oevers en depositie van zandbanken aan de oever daar tegenover. Aangroei van zandbanken was vooral mogelijk onder omstandigheden met een grotere breedte-diepte verhouding.
- ***Riviertraject:*** Door de aanwezigheid van kribben zijn er geen kansen meer voor de vorming van kronkelwaardruggen en -geulen. Het nog aanwezige kronkelwaardreliëf is dus onvervangbaar. Door de geringere opslibbing worden de relictten uit het verleden langs de IJssel het langste geconserveerd.
- ***Locatie binnen traject:*** De ruggen- en geulen zijn vooral duidelijk tot ontwikkeling gekomen aan de binnenzijde van grotere meanders van de IJssel.
- ***Vormgeving/maatregelen:*** Het reliëf van de kronkelwaard kan geaccentueerd worden door juist de hogere ruggen te laten begroeien met hardhoutbos.



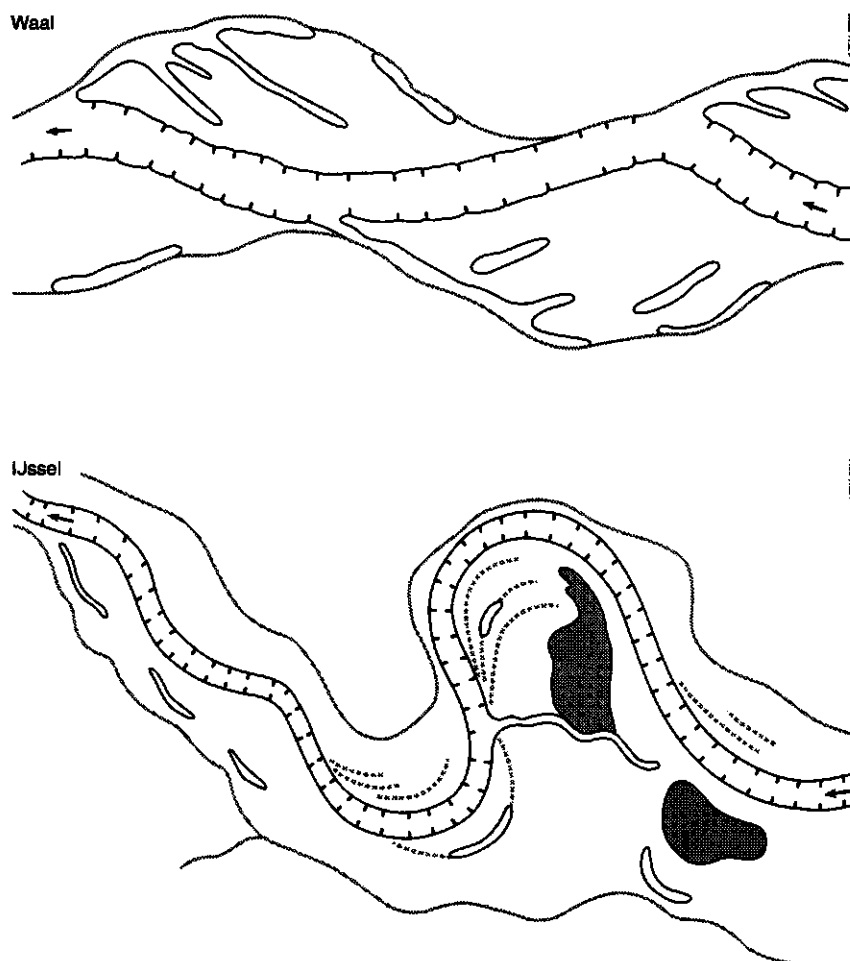
Oeverwal / rivierduin / stroomdalgrasland

- **Randvoorwaarden:** De vorming van zandige oeverwallen is gebaat met een hoge stream power van de rivier. Door de aanleg van kribben is de stream power van de huidige rivieren veel hoger dan die van de vroegere, zodat er nu veel meer zandig materiaal op de oevers wordt afgezet. Hoe hoger de oeverwal wordt, des te minder materiaal er wordt afgezet.
- **Riviertraject:** De stream power van de huidige Waal is veel groter dan die van de IJssel. De huidige Waal is dan ook zeer kansrijk, terwijl de IJssel dat veel minder is.
- **Locatie binnen traject:** Kansrijke locaties zijn gelegen in de binnenbochten (Sorber, 1997) en in laaggelegen delen van uiterwaarden waar het water bij hoge afvoeren uit het zomerbed in de uiterwaard stroomt, met name waar het water door een in de uiterwaard gelegen diepe zandwinplas of strang wordt aangetrokken. De oriëntatie ten opzichte van de overheersende windrichting doet er niet toe daar het proces van depositie bepaald wordt door oeverafzetting. Voor verdere verstuuving blijken een grote breedte van de rivier en het rivierstrand belangrijker (pers. med. P. Jongerius).
- **Vormgeving/maatregelen:** De kansen kunnen vergroot worden door het water op bepaalde locaties aan te trekken. Sturing is mogelijk door het uitbaggeren van plassen en het slechten van kaden in combinatie met de aanleg van bos. Door de oever van het laagwaterbed af te graven wordt er op de kansrijke locaties veel meer zand afgezet.



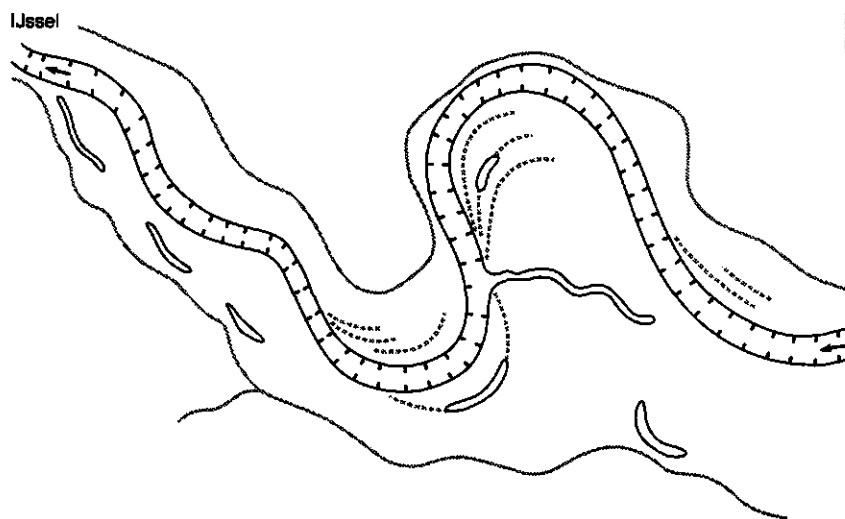
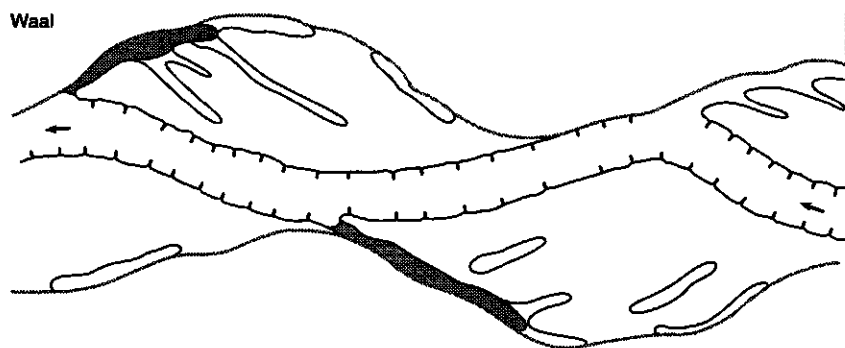
Oeverwal / hardhoutooibos

- *Randvoorwaarden:* hardhoutooibos is gebaat bij een rustig milieu dat niet te vaak overstroomt. Oude, hooggelegen oeverwallen zijn daarom een gunstig fysiotoop, ook al omdat het bos daar minder waterstandsverhoging oplevert.
- *Riviertraject:* Hooggelegen oeverwallen met een geringe fluviale dynamiek zijn gelegen langs de IJssel. Bovendien is bij de IJssel de uiterwaard naar verhouding erg breed zodat er ook meer ruimte is voor de aanleg van bos. De IJssel biedt dus uitstekende kansen. Bij de Waal zijn die gering: de recente oeverwallen zijn voor hardhoutooibos te dynamisch. Misschien bieden hoog opgeslibde kernen van oude eilanden met ooivaaggronden (Mulder et al., 1992) nog een kleine geschikte plek.
- *Locatie binnen traject:* Oude oeverwallen die gelegen zijn in een breder gedeelte van de uiterwaard komen als eerste in aanmerking voor hardhoutooibos.
- *Vormgeving/maatregelen:* Beplanting en uitrastering bevordert de groei van hardhoutsoorten.



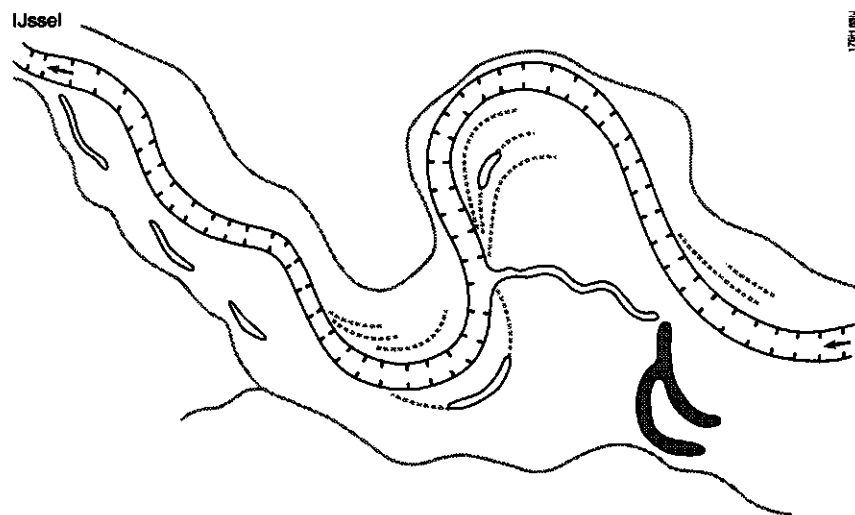
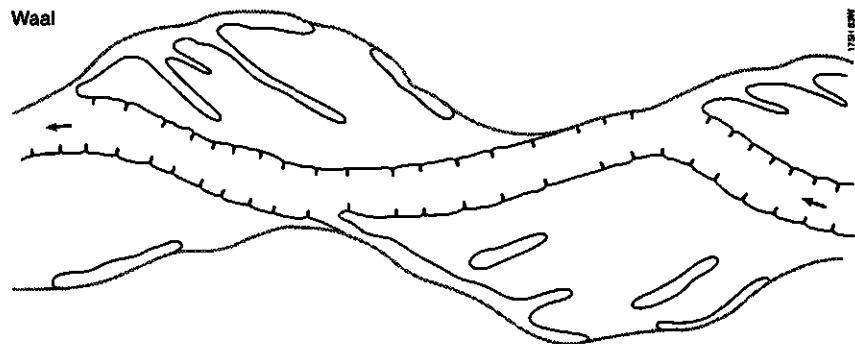
Aangekoppelde strang / dynamische ruigte

- **Randvoorwaarden:** Aangekoppelde strangen blijven aangekoppeld wanneer er grote stroomsnelheden optreden gedurende hoge afvoeren. Anders slibben ze langzaam dicht.
- **Riviertraject:** Periodieke hoge stroomsnelheden komen vooral voor langs de Waal. Bij de uiterwaarden van de IJssel zijn stroomsnelheden over het algemeen lager dan langs de Waal, zodat deze strangen daar sneller verlanden.
- **Locatie binnen traject:** Het meeste perspectief bieden de strangen die langs de Waalbandijk gelegen zijn, en dan vooral hun benedenstroomse deel. Dynamische ruigten kunnen vooral tot ontwikkeling komen op de oevers tussen het punt van samenkomst van twee strangen en aan het bovenstroomse einde van de strangen.
- **Vormgeving:** Door de stroming in uiterwaarden te geleiden kunnen de snelheden worden gestuurd. Maatregelen hiervoor zijn bijvoorbeeld aanleg van kaden en bos.



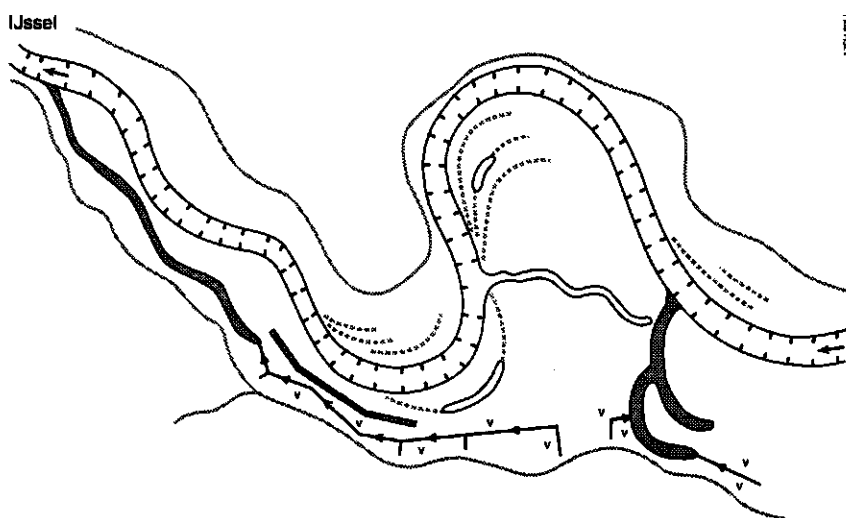
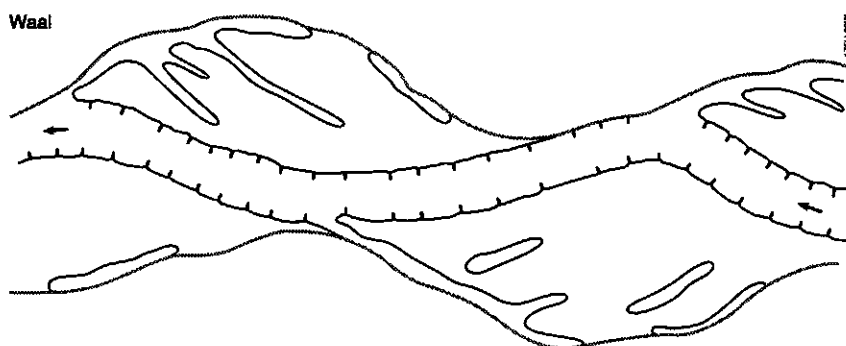
Geïsoleerde strang / moeras

- **Randvoorwaarden:** Randvoorwaarden voor de ontwikkeling van moeras in een geïsoleerde strang zijn een lage ligging ten opzichte van de grondwaterstand en een geringe stroomsnelheid bij overstromingen.
- **Riviertraject:** Moeras is als verlandingsvorm meer kansrijk voor de IJssel. Langs de IJssel is de insnijding van het zomerbed minder sterk, met als gevolg een minder sterke verdroging. Bovendien is de dynamiek in de geïsoleerde strangen minder doordat de stroomsnelheden in de brede uiterwaarden lager zijn. De Waal biedt voor deze fysiotoop/ecotoop combinatie minder kansen.
- **Locatie binnen traject:** Meest geschikt voor moerasontwikkeling zijn de diepere afgesneden meanders van de IJssel, vooral die die verder van de IJssel af gelegen zijn.
- **Vormgeving/maatregelen:** Bestaande strangen kunnen geïsoleerd worden van de rivier door aanleg van kaden. In reeds totaal verlande strangen kan de moerasontwikkeling op gang gebracht worden door ze uit te graven.



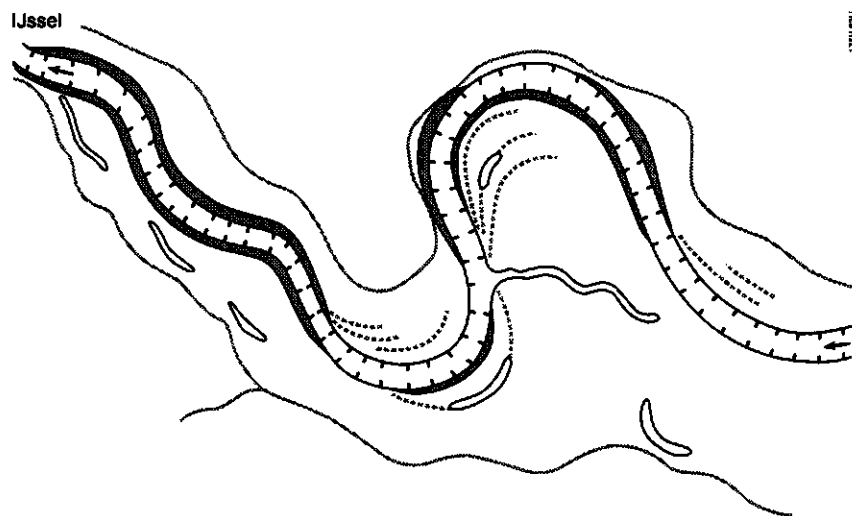
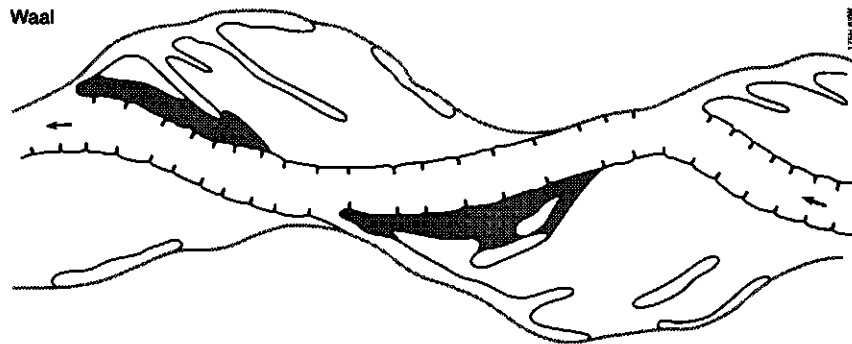
Beekstrang

- **Randvoorwaarden:** Beekstrangen komen voor waar relatief een grote aanvoer van kwelwater zorgt voor een permanente waterstroming in strangen en daarmee het proces van verlanding tegengaat.
- **Riviertraject:** Beekstrangen kwamen en komen voor waar de in een dal gelegen IJssel grenst aan de voet van de Veluwezoom, maar niet langs de Waal waar kwel van geen betekenis is. Kansen voor herstel of uitbreiding van dit ecotoop doen zich daarom niet voor langs de Waal, maar wel langs de IJssel.
- **Locatie binnen traject:** Geschikt voor de ontwikkeling van beekstrangen zijn bestaande strangen in de uiterwaarden die met hun loop dicht bij een beek of een kwelzone komen, die gelegen is langs hoger gelegen gronden zoals de stuwwallen.
- **Vormgeving:** Om een permanente stroming en rustig milieu te creëren is een kleine breedte-diepte-verhouding gewenst, echter wel met natuurlijke flauwe oevers. De werking van een beekstrang kan verbeterd worden door het kwelgebied alleen op deze strang te laten afwateren, bijvoorbeeld door dit te omkaden.



Zachthoutooibos

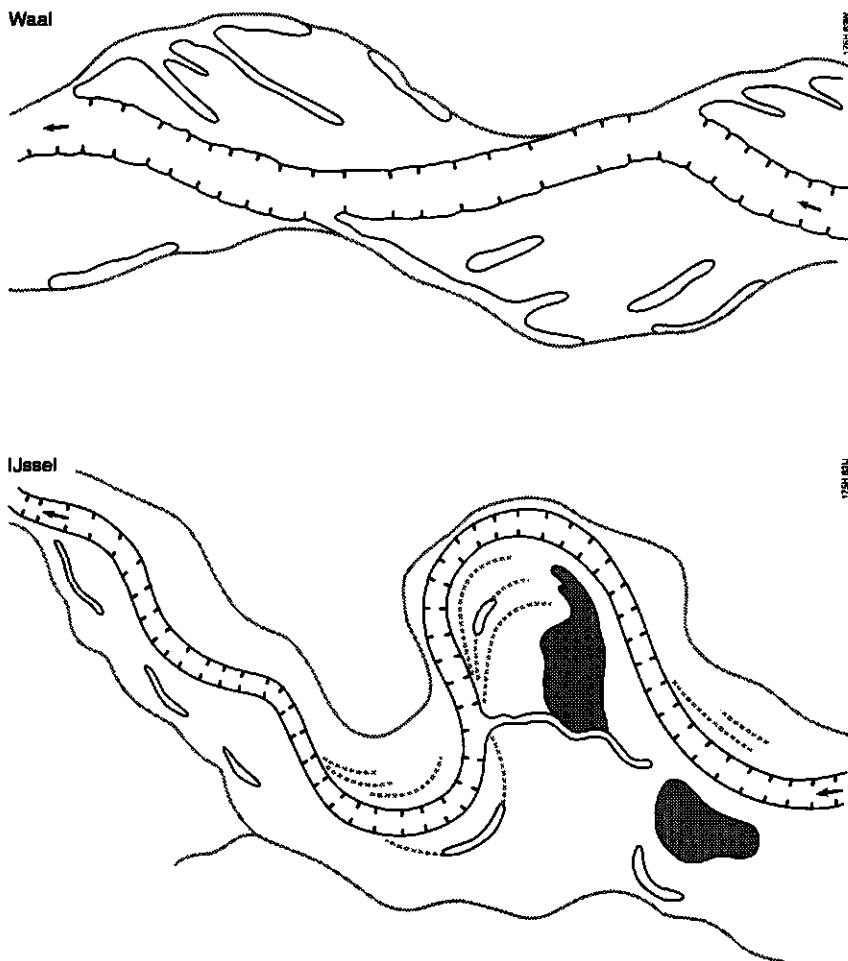
- *Randvoorwaarden:* Zachthoutooibos kan langs de rivieren tot ontwikkeling komen op recent sediment dat nog zeer regelmatig overstroomt.
- *Riviertraject:* Vroeger kwamen op de jongere aanwassen langs de Waal zachthoutooibossen voor. De ontwikkeling van zachthoutooibos is daar nu kansrijk op de zandstranden tussen de kribben.
Bij de IJssel zijn de kansen minder groot, doordat de oevers vrij hoog zijn gelegen. Afgraven biedt hier perspectief.
- *Locatie binnen traject:* De kansrijke locaties langs de Waal bevinden zich in het hogere deel van de kribvakken. Interessant vanuit historisch perspectief zijn de jongere delen van de uiterwaard, die gelegen zijn langs het stroomafwaartse deel van een convexe oever. Langs de IJssel is om deze redenen geen differentiatie in meer of minder interessante locaties.
- *Vormgeving:* Aansluitend op de historische situatie langs de IJssel, kan de afgraving van oevers langs de IJssel het beste plaats vinden in een smalle, langgerekt strook direct langs het zomerbed. Hier ontstaat dan juist een aaneengesloten lint van zachthoutooibos langs de oever van de rivier.



Bloemrijke akker

- *Randvoorwaarden*: Akkers kwamen vroeger alleen voor op zelden overstromde locaties; de randvoorwaarde van een hoge ligging geldt nog steeds.
- *Riviertraject*: In de uiterwaarden van de IJssel komen zelden overstromde locaties van voldoende omvang voor. Ook in de vroegere situatie onderscheidde de IJssel zich van de Waal door het voorkomen van akkers naast grasland, terwijl de Waal uiterwaarden nagenoeg alleen als weide en hooiland in gebruik waren.
- *Locatie binnen traject*: De meest geschikte locaties zijn de hoog opgeslibde en bekade oude oeverwallen langs de IJssel.
- *Vormgeving/maatregelen*: Afstemming van beheer door minder intensieve grondbewerking en afzien van bemesting en bestrijdingsmiddelen. Aanleg van hoge kaden kan ook lager gelegen gronden geschikt maken voor akkerland.

De kansen voor een aantal fysiotoop/ecotoop combinaties zijn dus sterk gebonden aan een bepaalde locatie in een bepaald riviertraject (tabel 6.2). Dergelijke fysiotoop/ecotoop combinaties kunnen dus niet elders tot ontwikkeling gebracht worden. Dit in tegenstelling tot sommige andere combinaties die vrijwel overal kansrijk zijn. Bij het maken van inrichtingsplannen zou de eerstgenoemde groep daarom prioriteit moeten krijgen in die uiterwaarden waar zij gerealiseerd kunnen worden.



Tabel 6.2 Indicatie van kansrijkdom van fysiotoopen in de Waal en de IJssel

Fysiotoopecotoop	Waal	IJssel
Ondiep laagwaterbed	++	+
Nevengeul	+ -	++
Natuurlijke rivieroever	+	- +
Kronkelwaardruggen en -geulen	--	- +
Oeverwal/rivierduin/stroomdalgrasland	++	- +
Oeverwal/hardhoutoobos	-	++
Aangekoppelde strang/dynamische ruigte	++	-
Geïsoleerde strang/moeras	--	+
Beekstrang	--	++
Zachthoutoobos	+	-
Akker	--	++

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Riviertrajecten en ecotopen

Het blijkt goed mogelijk om op basis van historisch (kaart)materiaal de toestand van riviertrajecten uit te drukken in fysiotopen en ecotopen en de bijbehorende rivierkundige parameters te berekenen. Er is dus een redelijk betrouwbare reconstructie te maken van het historische rivierenlandschap en de belangrijkste geomorfologische processen daarin. Met deze gegevens is het functioneren van de vroegere riviertrajecten goed te vergelijken met dat in de huidige of een toekomstige situatie.

De twee onderzochte trajecten van de Waal en de IJssel blijken duidelijk van elkaar te verschillen. Elk traject kenmerkt zich door een karakteristiek patroon van ecotopen en fysiotopen, hetgeen samenhangt met verschillen in dynamiek van geomorfologische processen en met kenmerkende waarden van de onderzochte rivierkundige parameters. Alhoewel de verschillen vroeger groter waren dan nu, zijn zij nog steeds relevant en bieden daarom goede mogelijkheden voor een classificatie van riviertrajecten.

De verkregen inzichten konden vertaald worden in een voorstel voor een classificatie van riviertrajecten, waarin de ecologische toestand van de riviertrajecten van de Waal en de IJssel (uitgedrukt in ecotopen) afgezet is tegen rivierkundige parameters die èn nauw samenhangen met de geconstateerde verschillen in dynamiek van de geomorfologische processen èn beïnvloed kunnen worden door rivierkundige maatregelen. Daarmee biedt de classificatie goede perspectieven om uitspraken te doen over de kansrijkdom van ecotopen in riviertrajecten.

7.2 Aanbevelingen voor het natuurbeleid

De huidige streefbeelden voor natuur wijken af van de historische beschrijvingen. Bij de formulering van streefbeelden wordt nog onvoldoende rekening gehouden met het specifieke karakter van riviertrajecten. Het verdient aanbeveling voor elk riviertraject een eigen streefbeeld te construeren, uitgedrukt in ecotopen. Kansen voor de ontwikkeling van ecotopen kunnen dan beter benut worden. In de eerste plaats doordat er meer rekening gehouden kan worden met de procesvoorwaarden die gelden voor het ontstaan en voortbestaan van een ecotoop, die de ontwikkeling in een riviertraject al dan niet succesvol maken.

In de tweede plaats kan er dan in inrichtingsplannen beter aangesloten worden bij de historisch gegroeide ordening van ecotopen in uiterwaarden. Daarmee wordt het eigen karakter van de verschillende landschappen van de riviertrajecten beter behouden. Waar behoud van diversiteit en kenmerkendheid doelen zijn in het nationale landschapsbeleid, kan zodoende het natuurbeleid het beleid voor het landschap ondersteunen.

7.3 Aanbevelingen voor onderzoek

Aangezien in deze voorbeeldstudie slechts twee riviertrajecten zijn bestudeerd dient de classificatie nog verder getoetst te worden aan meer en anderssoortige riviertrajecten, om geldig te kunnen zijn voor geheel Nederland. Het verdient daarom aanbeveling om alle in Nederland voorkomende trajecttypen in de classificatie onder te brengen. Te denken valt aan de Lek, de IJsseldelta, de Maas en de Benedenrivieren.

De mogelijkheden voor het herstellen van de geomorfologische dynamiek in de riviertrajecten zijn beperkt door de vaste ligging van oevers en kribben. De mogelijkheden om onder deze randvoorwaarden een meer natuurlijke morfodynamiek te krijgen zijn nog onvoldoende verkend. Aanbevolen wordt om met name maatregelen met betrekking tot de in dit onderzoek van belang gebleken breedte/diepte-verhouding op hun mogelijkheden te onderzoeken.

De verschillen in kansrijkdom zijn niet alleen gerelateerd aan de riviertrajecten, maar ook aan specifieke locaties binnen de uiterwaarden. Naast een beschrijving van de kansrijkdom met voorbeeldschetsen, zoals de staalkaarten in dit rapport, worden de verschillen beter zichtbaar en ook meer operationeel voor de ruimtelijke planning door de kansrijkdom voor ecotopen weer te geven op een kaart van alle riviertrajecten.

Literatuur

- Beek, A.J. van der, 1990. *Een analyse van de waterstanden en de overstromingskarakteristiek van de Waal tussen Nijmegen en Hulhuizen in de periode 1770-1989*. Utrecht, Rijksuniversiteit Utrecht, Geografisch Instituut, Vakgroep Fysische Geografie, Rapport GEOPRO 1990.13.
- Berendsen, H.J.A., 1982. *De genese van het landschap in het zuiden van de provincie Utrecht; een fysisch-geografische studie*. Utrecht, Rijksuniversiteit Utrecht, Geografisch Instituut. Utrechtse Geografische Studies 25.
- Berg, J.H. van den, 1995. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers. *Geomorphology* 12: 259-279.
- Brinke, W. ten, 1997. *De bodemsamenstelling van Waal en IJssel in de jaren 1966, 1976, 1984 en 1995*. Arnhem, RIZA Rapport 97.009
- Brookes, A. 1988. *Channelized rivers; perspectives for environmental management*. Chichester. John Wiley & Sons Ltd.
- Dirkx, G.H.P., P. Hommel, J. Vervloet, 1996. *Kampereiland; een wereld op de grens van zout en zoet*. Utrecht, Matrijs.
- Dirkx, G.H.P., 1997. *Hackfort in het Gelderse landschap*. In: Hackfort. F. Keeverling Buisman (red) et al. Utrecht, Matrijs.
- Donkersloot-De Vrij, M., 1981. *Topografische kaarten van Nederland voor 1750; handgetekende en gedrukte kaarten, aanwezig in de Nederlandse Rijksarchieven*. Groningen, Wolters-Noordhoff.
- Douben, K.J., 1995. *Info waterdieptes en zomerbedbreedtes op de Waal, IJssel en Neder-Rijn*. RIZA Memo WSR/95-68
- Douben, N., D. Klopstra, M. Kok, R.L.J. Nieuwkamer, G.B.M. Pedroli, J.G.M. Rademakers, W. Silva & K. Vermeer, 1996. *Integrale Verkenning inrichting Rijntakken; Inrichtingvarianten*. RWS-RIZA/WL/Grontmij, IVR rapport nr. 11.
- Driessen, A.M., 1994. *Watersnood tussen Maas en Waal; Overstromingsrampen in het rivieren gebied tussen 1780 en 1810*. Zutphen. Walburg Pers.
- Engelund, F., E. Hansen, 1967. *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Esri, 1989. Users Guide ARC/INFO. Vol.1: *The Geographic System Software*. Redlands, Environmental Systems Research Institute.

Fijnje, J.G.W., 1850. *Register V, bevattende de beschrijving van de Peilschalen, hakkelbouten en anderer verkenmerken langs de rivieren de Neder-Rijn en de Lek van Pannerden tot Vreeswijk en tot Vianen, en langs den Ouden Rijn. Bijlagen N° IV, V en VI: Tabellen van hoogste, laagste en gemiddelde standen der oppervlakte van het water in de rivieren de Boven-Rijn, de Neder-Rijn, en de Lek, volgens dagelijksche waarnemingen aan de peilschalen te Keulen, Emmerik, Doornenburg (voorheen Pannerden), Arnhem en Vianen of Vreeswijk; herleid tot A.P.; van 1-1-1772 t/m 31-12-1849.*

Fijnje J.G.W. en J. Lebret, 1852. *Register VIII, bevattende de beschrijving van de peilschalen, hakkelbouten en andere verkenmerken langs de rivier de IJssel van Westervoort tot de Zuiderzee. Bijlagen N° IV, V en VI: Tabellen van hoogste, laagste en gemiddelde standen der oppervlakte van het Water in de rivier de IJssel, volgens de dagelijksche waarnemingen aan de peilschalen te Westervoort, Doesburg, Zutphen, Deventer, Katerveer, Kampen en en Paardenboer; herleid tot A.P.; van 1-1-1765 t/m 31-12-1850.*

Grontmij, 1994. *Een verkenning naar Ecotopen-AMOEBES voor de Maas; een studie naar toetsbare ecologische doelstellingen voor vijf deelsystemen. Eindhoven, Grontmij. Rapport.*

Hamming, C., M. Knibbe, G.C. Maarleveld, 1965. *Afzettingen van de IJssel nabij Zwolle. Boor en Spade XIV: 88-103.*

Harms, W.B., J. Roos-Klein Lankhorst (eindred.), 1994. *Toekomst voor de natuur in de Gelderse Poort. Planvorming en evaluatie. Wageningen, DLO-Staring Centrum / De Bilt, Grontmij. Rapport 298.1.*

Helmer, W, G. Klaassen, W. Silva, 1991. *Toekomst voor een grindrivier, deel 5, rivierkundige aspecten van natuurontwikkeling. Laag-Keppel, Stroming bureau voor natuur- en landschapsontwikkeling / Delft, Waterloopkundig Laboratorium / Lelystad, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor integraal zoetwaterbeheer en afvalwaterbehandeling. Nota nr. 91.007.*

Henket, N.H., Ch.M.Schols & J.M. Telders (1890) *Platen behorende bij de Waterbouwkunde, tweede deel, afd. XI Rivieren en Rivierwerken (Lely, 1890). 's-Gravenhage, de Gebr. van Cleef.*

Hesselink, A.W., H.J.A. Berendsen, 1996. *Eilanden en zandbanken in de Rijntakken rond 1850. Utrecht, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie. ICG-rapport 96/8.*

Kamphuis, H., 1990. *Sediment-transportmetingen rijntakken. Arnhem, Rijkswaterstaat Dienst Binnenwateren / Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Nota nr. 90.075*

Koeman, C., 1985. *Geschiedenis van de kartografie van Nederland: Zes eeuwen land- en zeekaarten en stadsplattegronden. Alphen aan den Rijn. Canaletto.*

Kun, L.J.A. van der, 1849. *Registers I, II en III, bevattende de beschrijving van de peilschalen, hakkelbouten en andere verkenmerken, langs de rivieren de Boven-Rijn, de Waal en de Merwede, van Emmerik tot Gorinchem.*

Kun, L.J.A. van der, 1854. *Tabellen van hoogste, laagste en gemiddelde standen der oppervlakte van het water in de rivieren de Waal en de Merwede, volgens de dagelijksche waarnemingen aan de peilschalen te Hulhuizen, Nijmegen, Tiel, Bommel, Gorinchem en Dordrecht 1-1-1772 t/m 31-12-1856, herleid tot A.P. Bijlagen N° III, IV en V bij van der Kun (1849): Registers I,II en III.*

Lely 1890. *Rivieren en rivierwerken. Waterbouwkunde tweede deel, afdeeling XI. 's-Gravenhage, de Gebr. van Cleef.*

Meene, E.A. van de, 1977. *Toelichtingen bij de Geologische kaart van Nederland 1 : 50 000. Blad Arnhem Oost (400). Haarlem, Rijks Geologische Dienst.*

Miall, A.D., 1985. Architectural-Element Analysis; a New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits. *Earth-Science Reviews* 22: 261-308.

Miall, A.D., 1996. *The Geology of Fluvial Deposits; Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology.* Berlin, Springer.

Middelkoop, H., 1997. *Embanked Floodplains in the Netherlands; Geomorphological evolution over various time scales.* Utrecht, Universiteit Utrecht. Proefschrift.

Middelkoop, H., N.J. van den Berg, E.L.J.H. Faessen, H.J.A. Berendsen, 1992. *Morfodynamiek van nevengeulen van de Waal: een historisch overzicht.* Universiteit Utrecht, Geografisch Instituut, Vakgroep Fysische Geografie. Rapport GEOPRO 1992.07.

Middelkoop, H., M. Deurloo, 1993. *Geomorfologische en historisch-geografische waardering van het uiterwaardengebied rond Sint Andries. Toetsing van een inrichtingsschets.* Universiteit Utrecht, Geografisch Instituut, Vakgroep Fysische Geografie. Rapport GEOPRO 1993.13.

Middelkoop, H., M. Deurloo, 1994. *Geomorfologische en historisch-geografische waardering van het uiterwaardengebied Noordoever Nederrijn van Arnhem tot Renkum.* Universiteit Utrecht, Geografisch Instituut, Vakgroep Fysische Geografie. Rapport GEOPRO 1994.06.

Mulder, J.R., E.T.M. Overkamp, F. Brouwer, M. Knotters, 1992. *Een ecohydrologische systeembeschrijving van het landinrichtingsgebied Ochten-Opheusden.* Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 166.

Nanson, G.C., J.C. Croke. 1992. A genetic classification of floodplains. *Geomorphology* 4: 459-486.

Overmars, W., 1992. *De Waal en de Winssense Waard.* In: *Levende rivieren.* Zeist, Wereld Natuur Fonds. Bijlagen.

- Overmars, W., 1993. *Millingerwaard, Kekerdomse Waard, Erlecomse Waard. Historische Atlas van de Rijntakken in de Gelderse Poort*. Laag Keppel, Bureau Stroming
- Overmars, W., 1995. *Rosande-Doorwerth; historisch morfologische studie*. Laag Keppel, Bureau Stroming
- Page, K., G. Nanson, 1982. Concave-bank Benches and Associated Floodplain Formation. *Earth Surface Processes and Landforms* 7: 529-544.
- Petersen, J.W. van, 1974. *Des landmeters trots; Oude kaarten van het gebied achter rijn en IJssel*. Zutphen. De Walburg Pers.
- Ploeger, B., 1992. *Bouwen aan de Rijn. Menselijke ingrepen op de Rijn en zijn takken*. Min. v. V&W, Directoraat Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat serie nr 53.
- Ponte, J., 1995. *Bodemontwikking van de IJssel sinds 1938: trendanalyse en causale factoren*. Arnhem, RIZA, Stage verslag.
- Rademakers, J.G.M., H.P. Wolfert, 1994. *Het Rivier-Ecotopen-Stelsel; een indeling van ecologisch relevante ruimtelijke eenheden ten behoeve van ontwerp- en beleidsstudies in het buitendijkse rivierengebied*. Lelystad, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Publicaties en rapporten van het project 'Ecologisch Herstel Rijn en Maas' 61-1994.
- Rademakers, J.G.M., G.B.M. Pedroli, L.H.M. van Herk, 1996. *Een stroom natuur; natuurstreefbeelden voor Rijn en Maas*. RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Watersysteemverkenningen 1996. Achtergronddocument A: Kansrijkdom van ecotopen. Werkdocument 95.172X.
- Reijnen, R., W.B. Harms, R.P.B. Foppen, R. de Visser, H.P. Wolfert, 1995. *Ecological networks in river rehabilitation scenarios: a case study for the lower Rhine*. Publications and reports of the project 'Ecological rehabilitation of the rivers Rhine and Meuse', nr 58
- Richards, K.S., 1982. *Rivers: form and process in alluvial channels*. London, Methuen.
- Rijkswaterstaat (1989). *Tienjarig Overzicht der waterhoogten, afvoeren en watertemperaturen 1971-1980*. Dienst Getijdewateren, 's Gravenhage.
- Rijkswaterstaat (1994). *Tienjarig Overzicht 1981-1990: presentatie van afvoeren, waterstanden, watertemperaturen, golven en kustmetingen*. Den Haag, RIKZ/RIZA.
- Rijkswaterstaat (1995). *Jaarboek Monitoring Rijkswateren (Presentatie van Fysische, Chemische en Biologische kenmerken) 1994*. Den Haag, RIKZ/RIZA
- Schelling, J., 1951. *De bodem van de gemeente Wijhe, in verband met de mogelijkheden van intensivering van het grondgebruik*. Wageningen, Stichting voor Bodemkartering. Rapport 256.

- Scholten, F.W.J., 1989. Militaire topografische kaarten en stadsplattegronden van Nederland 1579-1795. Alphen aan den Rijn. Canaletto.
- Schoor, M.M., 1994. *De geomorfologie en het ontstaan van de Afferdensche en Deestsche waarden*. RIZA, nota 94.002
- Schoor, M.M., 1994. *De Tisza, een morfologische referentie voor nevengeulen langs de Rijn?* RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Werkdocument 94.141X.
- Schumm, S.A., 1977. *The Fluvial System*. New York, Wiley.
- Schumm, S.A., M.P. Mosley, W.E. Weaver, 1987. *Experimental Fluvial Geomorphology*. New York, Wiley.
- Silva, W., M. Kok, 1996. *Een weegschaal voor rivierbeheer*. RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Integrale Verkenning inrichting Rijntakken. Rapport 1.
- Spek, T., F.D. Zeiler, E. Raap, 1996. *Van de Hunnepe tot de zee; de geschiedenis van het Waterschap Salland*. Kampen, IJsselakademie.
- Splunder, I van, M.M. Schoor 1997. *Wilgenaanplant in kribvakken langs de Waal 1990-1995*. Lelystad, RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Rapport 97.031.
- Sorber, A.M., 1997. *Oeversedimentatie tijdens de hoogwaters van 1993/1994 en 1995*. Lelystad, RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Rapport 97.015.
- Stichting voor Bodemkartering, 1979. *Bodemkaart van Nederland Schaal 1: 50.000; Toelichting bij de kaartbladen 33 West Apeldoorn en 33 Oost Apeldoorn*. Wageningen, Stichting voor Bodemkartering.
- Struiksma, N., K.W. Olesen, C. Flokstra, H.J. de Vriend, 1985. *Bed deformation in curved alluvial channels*. J. Hydr. Res., JAHR 23; 57-79
- Struiksma N. & G.J. Klaassen (1988). *On the threshold between meandering and braiding*. Int. Conf. River Regime, 1988, Wallingford.
- Struiksma, N., A. Crosato, 1989. *Analysis of a 2-D bed topography model for rivers*. In: River meandering, AGU, Water Resources Monograph 12, Fds. S. Ikeda, G. Parker; 153-180.
- Taal, M., 1994. *Ontwikkeling scenario's autonome bodemontwikkeling Waal*. Arnhem, RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Nota 94.062.

Talmon, A.M., N. Struiksma & M.C.L.M. van Mierlo (1995). Laboratory measurements of the direction of sediment transport on traverse alluvial-bed slopes. *J. Hydr. Res., IAHR*, Vol. 33, No.4, pp. 495-517.

Törnqvist, T.E., 1993. *Fluvial sedimentary geology and chronology of the Holocene Rhine-Meuse delta, The Netherlands*. Utrecht, Universiteit Utrecht. Proefschrift.

Verbraeck, A. (1984). *Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland, 1:50.000. Blad Tiel west (39 W) en Tiel oost (39 O)*. Rijksgeologische dienst, Haarlem.

Vriend, H.J. de & N. Struiksma (1983). *Flow, and bed deformation in river bends*. In: *River Meandering*, Proc. Conf. Rivers, 1983, New Orleans, ed. C.M. Elliott, ASCE, 1984, pp. 810-828.

Weerts, H.J.T., H.J.A. Berendsen, 1995. Late Weichselian and Holocene fluvial palaeogeography of the southern Rhine-Meuse delta (the Netherlands). *Geologie en Mijnbouw* 74: 199-212.

Verhoeff, J.M., 1982. *De oude Nederlandse maten en gewichten*. Amsterdam. P.J. Meertens-Instituut.

Wolfert, H.P., 1992. *Geomorphological differences between river reaches; differences in nature rehabilitation potentials*. In: *Contributions to the European Workshop Ecological Rehabilitation of Floodplains*, Arnhem, The Netherlands, 22-24 September 1992. Lelystad, International Commission for the Hydrology of the Rhine basin. Report II-6, pp. 137-144.

Wolfert, H.P., 1996. *Rijkswateren-Ecotopen-Stelsels; uitgangspunten en plan van aanpak*. Lelystad, RIZA Rijksinstituut voor Intergraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling. Nota 96.050.

Wolfert, H.P., G.J. Maas, G.H.P. Dirks, 1996. *Het meandergedrag van de Overijsselse Vecht; historische morfodynamiek en kansrijkdom voor natuurontwikkeling*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 408.

Zeeman, M. (1994). *Schematisatie voor het SOBEK-model Nederlandse Rijntakken*. Amsterdam, Geodan Geodesie bv.

Zonneveld, I.S., 1960. *De Brabantse biesbosch; een studie van bodem en vegetatie van een zoetwatergetijdendelta*. Wageningen, Stichting voor Bodemkartering. Bodemkundige studies 4.

Aanhangsel 1 Beschikbare historische kaarten

Waal

BEIJERINCK, F. 1777. Kaart der rivier de Waal van de mond van het Panmerdensch kanaal tot de paal van 't Ambt Nederbetuwe in 't jaar 1777.

Rijksarchief Gelderland, archief Rijkswaterstaat, Kaart nr. 33.

BEIJERINCK, F. 1800. Kaart van een gedeelte der rivier de Whaal van den Oosterhoudsche schaaldijk, tot het dorp Winssen toe, waarop zijn uitgedrukt alle waterwerken, zandplaatsen enz.

Rijksarchief Gelderland, archief Rijkswaterstaat, Kaart nr. 38.

BEIJERINCK, F. 1810. Kaart van de rivier de waal beneden Nijmegen gemeete in Slagtmaand 1810.

Rijksarchief Gelderland, archief Rijkswaterstaat, Kaart nr. 37.

BEIJERINCK, M. en W. 1778. Kaarten van de metinge der buitenlanden in den Ampte van Nederbetuwe. Atlas met 6 kaarten, blad 1: Hien-Wely-Doodeweerd, blad 2: Doodeweerd-Ochten, blad 3: IJzendoorn-Echteld.

Rijksarchief Gelderland, Algemene kaartenverzameling, kaart nr. 18.

BERCK, C. VAN, EN E. VAN SCHAICK JANSZ, 1571. Chaerte en beschrijvighe van de middelweert met die aangewasse sande gelegen tot Ochten. Schaal: 1 : 5000

R.A.Gld 0124 Hof van Gelre en Zutphen AKV 389 (420 blw 11)

CAMP. JOH., 1766. [Kaart figuratief van de rivier de Waal met de waarden en situatie gelegen boven de stad Thiel tot de zoogenaamde schipperswaard onder het kerspel Echteld]

Schaal: 1; 2900. Bijzonderheden: De metingen zijn verricht bij zeer lage waterstand.

R.A.Gld 0476 Familie Lidth de Jeude AKV 471 (neg.nr 1211)

COUWATER, J. 1722. Kaart van den aanwas aan de waarden van den schepen Vermeer onder Lent en Oosterhout. Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 49.

COUWATER, J. 1722. Kaart van de uiterwaarden van den heer Hacfort te Oosterhout.

Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 50.

COUWATER, J. 1722. Kaart van de Ewijksche en Loevensche rijswaarden van de freules Van Wickradt.

Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 51.

COUWATER, J. 1723. Kaart van aangewonnen land en rijswaarden van den heer van Winssen tusschen Ewijk en Winssen.

Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 53.

COUWATER, J. 1723. Kaart van uiterwaarden onder Hien.

Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 54.

COUWATER, J. 1723. Kaart van de middelwaard van Arent Vijgh tot de Snor onder Dodewaard.

Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 55.

COUWATER, J. 1724. Kaart van een waard onder Ochten. Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 56.

GEELKERCKEN, N. VAN, 1634. Carte van bevaringe, gedaan door de rekenkamer des vorstendoms Gelre en de Graeffschap Zutphen anno 1634 den 10 octobris, van de sanden gelegen onder den weert omtrent de Snor. Schaal: 200 passen welken maeken 44 roeden = 99mm

R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k61 inv.nr 668

GEELKERCKEN, N. VAN, 1634. Kaart van een in 1634 door de Rekenkamer bevaren zand in de Waal tussen de Nieuwe dijk bij Hien en de reduite de Rijkkamer.
R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k59 inv.nr 668

GEELKERCKEN, N. VAN, 1646. [Een in 1646 door de Rekenkamer bevaren zand in de Waal tussen de Nieuwe Dijk bij Hien en de Reduite Rijkkamer].
R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k60 inv.nr 668

GEELKERCKEN, N. VAN, 1639. Kaart van de Waal langs de heerlijkheid Loenen.
R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k54

GEELKERCKEN, N. VAN, 1646. kaart van een door de Rekenkamer bevaren zand in de Waal boven Ochten.
R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k62

GEELKERCKEN, N. VAN, 1651. [Een middelzand genaamd landschaps Middelweerd en Jr de Raetweerd in de Waal beneden Leeuwen]
Bijzonderheden: Moeilijk te plaatsen
R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k63 inv.nr. 668 (neg.nr 2284)

GEELKERCKEN, N. VAN, 1651. [Zanden waaronder 't Grootte Sandt en kribben in de Waal ter hoogte van Latestein boven Tiel]. Schaal: niet op schaal getekend. Bijzonderheden: 'Naer den oogenschijn sonder meat, dienende alleen om te sien wat vroeger 't grootte Sant gelegen is'.
R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k64 inv.nr 668 (neg.nr 213)

GEELKERCKEN, N. VAN, 1654. [Een rijswaard in de Waal onder Leeuwen en Ochten]
R.A.Gld 0124 Hof van Gelre en Zutphen AKV 35 (neg.nr 131)
R.A.Gld 0124 Hof van Gelre en Zutphen AKV 97 (neg.nr 741) (zelfde kaart minder detail)

GEELKERCKEN, I. VAN, 1664. De landschaps Middelweert bij Winssen
Schaal: 1 : 2500
R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k139 inv.nr 845 (neg.nr 2330)

HENDRIKMAN, H.G. en P. PRILLERITZ (1776/78). Kaart van de Buijten Landen onder Leeuwen en Drueten.
Rijksarchief Gelderland, Archief Verpondingskaarten, kaart nr. 171.

HENDRIKMAN, H.G. en P. PRILLERITZ (1776/78). Kaart van de Buijten Landen onder Waarnel.
Rijksarchief Gelderland, Archief Verpondingskaarten, kaart nr. 183.

HENDRIKMAN, H.G. en P. PRILLERITZ (1776/78). Kaart van de Buijten Landen onder Deest, Afferden en Winssen.
Rijksarchief Gelderland, Archief Verpondingskaarten, kaart nr. 195.

KEMPINCK, B., 1601/07. Caarte van sekere questieuse middelsant op ten Waalstroom tegenover Drueten en Afferden.
R.A.Gld 0124 Hof van Gelre en Zutphen AKV 387
R.A.Gld 0124 Hof van Gelre en Zutphen AKV 388 (kopie van AKV 387)

KEMPINCK, B., 1607. Kaart van de rijswaard tussen winssen en Ewijk.
R.A.Gld 0124 Hof van Gelre en Zutphen AKV 386

KEMPINCK, B., 1620. Carthe van de situatie des onlangs opten Waelstroom tegens de schaaldijk tot Winssen vanwege der Heren van Gelrelant bevaren sandtwelle
R.A.GLD 0012 Gelderse Rekenkamer k57

LEEMPOEL, W., 1709. Caerte van de situatie den Waelstroom voor en beneden de Rijswaarden van den Hoog welgeboren heer van Klingsted boven de stad Tiel gelegen. Schaal: 1: 5000
R.A.GLD 0124 Hof van Gelre en Zutphen AKV 395

LEEMPOEL, W. 1723. Kaart van de wei- en rijswaarden onder Echteld.
Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 58.

PASSAVANT, G. 1694. Caarte van de wei en rijswaarden van de heer van Hees en Leen tegens de Grote Reduijt boven Tiel onder Echtelt gelegen. Schaal: ca 1 : 4900
R.A.Gld 0003 Staten van het Kwartier van Nijmegen en hun Gedeputeerden K57

PASSAVANT, G. 1688. Kaart van den rijswaarden van den heer Winssen beneden Ewijk.
Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 52.

PASSAVANT, G. 1694. Kaart van de wei- en rijswaarden van den heer van Hees onder Echteld.
Rijksarchief Gelderland, Archief Gedepudeerden Nijmegen, kaart nr. 57.

Tabel A1 Beschikbare historische kaarten van de Waal gerangschikt per periode en uiterwaard van het studiegebied

NR (de soet)	NAAM UITERWAARD	1600-1700	1700-1750	1750-1800	1800-1830
W7	Oosterhoudse waarden	K 1620	C 1722	FB 1777	FB 1800 FB 1810
W8	Moespotse waard			FB 1777	FB 1800 FB 1810
W9	Ewijkse waarden			FB 1777 MB 1760/66	FB 1800 FB 1810
W10	Loenense buitenpolder	G 1639 G 1650 K 1615	C 1722	FB 1777 MB 1760/66	FB 1800 FB 1809 FB 1810
W11	Wolferense waarden	K 1615		FB 1777	FB 1800 FB 1810
W12	Winssense waarden	K 1601 K 1607 K 1620 G 1651 G 1664 P 1688	C 1723	FB 1777	FB 1800 FB 1810
W13	Hiense uiterwaarden	G 1634 G 1646	C 1723	MB 1778	FB 1813
W14	Afferden en Deestse w	K 1601/07		HP 1776	
W15	Gouvenurse polder	G 1646	C 1723	MB 1778	FB 1800
W16	Drutense waarden o.			HP 1776 FB 1784	
W17	Drutense waarden w.			HP 1776 FB 1784	
W18	Ijzendoorn			MB 1778	
W19	Willemspolder	P 1694	L 1723 L 1709	MB 1778 CJ 1766	
W20	Wamelse waarden	G 1640 G 1656/61		HP 1776 FB 1784	
W21	Tiel		L 1723	MB 1778 CJ 1766	

K= Kempinck B.

P= Passevant, G.

L= Leempoel W.

HP= Hendrikman/Prilleritz

G= Geelkercken N. of I., van

C= Couwater, J.

FB= Beyerinck F.

MB= Beyerinck M. W.

CJ= Camp Joh.

Gebiedsdekkende kaarten van de Waal:

- Wiebeking K.F. von, [ca.1800]. Karte von der Waal, von dem untern Rhein, dem Leck, von der Merwede, undder Maas und von den Gegenden welche an diesen Flüssen liegen. Darmstadt. Rijksarchief Gelderland AKV 281. Samengesteld uit bestaand materiaal van Nederlandse landmeters; bijvoorbeeld rivierpeilen uit ca 1740. Kaarten zijn geometrisch juist (Koeman, 1985) .
- Goudriaan B.H., 1827. Kaart van de rivieren; De Boven Rijn, De Waal, De Merwede, De Oude en een gedeelte van de Nieuwe Maas, van Lobith tot Brielle. Schaal 1: 10 000 (20 bladen). Kaartenverzameling Topografische dienst Emmen.
- Rivierkaart, 1e herziening, schaal 1:10.000, blad 2 t/m 12, 1e druk ca 1880, 2e druk ca 1920. Kaartenverzameling Topografische Dienst, Emmen.
- Rivierkaart, 2e herziening, schaal 1:10.000, blad 3 t/m 12, ca 1950. Kaartenverzameling Topografische Dienst, Emmen.

IJssel

ANONIEM, vóór 1604. [Transumpt uyt afgecopieerde carthe van een middelsant gelegen omtrent Wijchmond]. R.A.Gld 0124 Hof van Gelre en Zutphen AKV 357

BEYERINCK, F. cs., 1775. Kaart of plattegrond-tekening van den nieuwen IJssel-mond door de pley, strekkende uit den beneden Rhijn tot in den Ouden IJssel bij de Westervoordsche veerdam, gegraven in den jaare 1773, 1774 en 1775 opgemeten Aug. 1775. R.A.Gld 0875 Archief Rijkswaterstaat k41

BEIJERINCK, M., 1771. Kaart van de Rivier de Yssel....den Emptepol...gelegen in de heerlijkheit Westervoort, en verder beneden waarts langs een gedeelte der buijtenlanden gehorende de respectieve geërfdens der heerlijkheid Lathum.. R.A. Gld. 0012 Gelderse Rekenkamer k77 inv.nr.1203

BEIJERINCK, M., [1776a]. Kaart vertonende den loop van de rivier de IJssel langs domain goederen deser provincie met desselfs zuydoever en een gedeelte van de banddijk, gelegen onder de baronie van Bahr en Lathum. R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k81 inv.nr. 1219

BEIJERINCK, M., 1776b. Kaart van een gedeelte den buytenlanden langs de rivier den IJssel onder heerlijkheid Latum gelegen. R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k82 inv.nr. 1219

BEIJERINCK, M., 1776. Plan van den Rivier den IJssel tegen en beneden de Bahrsche Rhijswaerd onder de baronie van Bahr en Lathum. R.A.Gld Gelderse Rekenkamer k83 inv.nr 1203

GEELKERCKEN, I. VAN, 1657. [Een tegen de koewaard onder Brummen aanwassende rijswaard, tussen de Geldersche Toren en de Schans] R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k95 inv.nr. 966 (neg.nr. 2309)

GEELKERCKEN, I. VAN, 1660. [De steenhouwersrijswaard in de ijssel ten westen van Lathum]. A.R.Gld. 0012 Gelderse Rekenkamer k78 inv.nr.656

GEELKERCKEN, I. VAN, 1661. Zanden en kribben in de IJssel van boven de Engel in de Steeg tot beneden het huis Middachten. R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k89 inv.nr.656

GEELKERCKEN, I. VAN, 1661. De lanschaps - nu Meulenschots-Middelwaard in de Ysel bij Brummen. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K17

GEELKERCKEN, I. VAN, ca. 1670. [De rivier de IJssel tussen Arnhem en Deventer, met aanliggende gebied] R.A.Gld. archief Rekenkamer van Gelderland inv.nr. 651 k.76

GEELKERCKEN, N. OF I. VAN. 2^e helft 17e eeuw [1670]. [De rivier de IJssel tussen Arnhem en Deventer, met aanliggende gebied]. A.R.A. aanwinst 1903 XXI nr. 12.

GEELKERCKEN, N. VAN, 1632. Kaerte van de Canalen des Ysselstrooms voor de stadt Doesborgh. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K4

GEELKERCKEN, N. VAN, 1633. [De landschapswaard in de IJssel onder Brummen tegenover Bronkhorst en Spaensweerd]. R.A.Gld Gelderse Rekenkamer 0012 k220 inv.nr. 1464

GEELKERCKEN, N. VAN, 1634. Een grintbank in den Ysel tegen de Fraterwaard bij Doesburg R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K15

GEELKERCKEN, N. VAN, 1634. De Ysel langs de Havikkenwaard R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K4

GEELKERCKEN, N. VAN, 1635. De Ysel beneden de Pol bij Zutphen met aanduiding van kribben. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K18

GEELKERCKEN, N. VAN, 1637. Kaart betreffende de grensbepaling tusschen de aangewassen gronden van de Rekenkamer en van jr Willem van Gent aan den Ysel boven Doesburg. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K5

- GEELKERCKEN, N. VAN, 1638. Een bevaren zand in den Ysel tegenover de Fraterwaard. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K16
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1639. [Een zand in de IJssel tegenover 's-landschaps Hanewaard en Crayevangerswaard in de Emmer onder Steenderen]. R.A.Gld. 0012 Gelderse Rekenkamer K98 inv.nr 674
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1640. De ysel en de daaraan gelegen aanwassen vóór en onmiddelijk beneden Doesburg. R.A.Gld. 0498 Archief Geelkercken K12
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1640. De Ysel tusschen Doesburg en de Fraterweerden met aanduiding van een grintbank van de landschap. R.A.Gld. 0498 Archief Geelkercken, K14
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1641. De waarden der stad Doesburg beneden het veer tusschen het oude en het nieuwe kanaal van den Ysel. R.A.Gld. 0498 Archief Geelkercken, K11
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1641. [Een zand in de IJssel tegenover het land van Jan Crayvanger in den Emmer onder Steenderen]. R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer K100 inv.nr.674
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1642. Caert van questieuse pootinge tegen den Angelersen schaerdijck door schepen Jacob Muis. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K9
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1642. Twee middelwaarden in de Ysel tusschen Sinderen en Eschede. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K21
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1644. Aangewassen gronden aan de Ysel bij Wetterswaard. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K6
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1644. Een Uiterwaard aan den Ysel bij Wetterwaard (boven Doesburg). R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K7
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1645. De Ysel beneden Zutphen tussen Sinderen en Rysselt. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K20
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1646. De Ysel tusschen 's Landschaps Wetterswaard en Verstegen's Havikkenwaard (boven Doesburg). R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K8
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1653. [Rijswaarden toebehorende aan de vrouw van Middachten en de landschap bij de schans te Brummen tegenover de steenoven van Krayvanger, alsmede een middelzand aldaar]. R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer K97 inv.nr.669
- GEELKERCKEN, N. VAN, 1653. De Ysel beneden Zutphen tot het huis Nyenbeek, met aanduiding van de kribben en zanden. R.A.Gld 0498 Archief Geelkercken K23
- HEIJS, VAN H. (1778). Het havesaedt en adelijk huijs Bingerden R.A.Gld Algemene kaartenverzameling nr 127.
- HERTELL, W. C. EN B.J DE ROY, 1739. Caart van een gedeelte der rivier den Neder Rijn vant Looveer tot de stad Arnhem met een gedeelte der Rivier den Yssel van Ysseloort tot besyden de stad Doesburg. A.R.A Genie-archief, situatiekaart nr. OSK Y.8. (verkleinde kopie A.R.A Hingman, 376)
- HEUVEL, I. VAN DEN, 1716. Een middelzand en een krib in de IJssel bij Lathum R.A.Gld 0012 Geldersche Rekenkamer inv.nr 648
- HEUVEL, I. VAN DEN, 1717-1720. Caarte der rivieren den IJssel van IJsseloort tot voor de catten schans bij Zwol: Den Nederrijn van Schenkenschans tot voor Arnhem met den Nieuwen Rijn: De waal tot nijmegen...
A.R.A. Genie-archief, situatiekaart nr. OSK.Y.7 (verkleinde kopie 1752, Hattinga OSK.Y.9; 1786, Ragay. R.A.Gld kaartenverzameling a.v. 350)

HEUVEL, I. VAN DEN, [1719]. Den Ysselstroom van Isseloort tot voor de stad Deventer. R.A. Gld. 0012 Gelderse Rekenkamer k76 Inv.nr. 651

HEUVEL, I. VAN DEN, 1723. Den Fraterweerd. R.A.Gld. kaartenverzameling a.v. 913

HOOFF, H. VAN, 1773-1779. Caart van een gedeelte der Whaalstroom, gedeelte van de rivier den Rhijn en den geheelen IJsselstroom met de situatie daar annex. A.R.A. Geniearchief OSK Y.10c (brouillon); OSK Y. 10 (netkaarten) OSK Y 10a,b (waterpassingen)

HOTTINGER, J.H., G.F. SMEDEKEN EN J.L. BERCKEN, 1779. De kaart van de stad Zutphen en haare environs... A.R.A. Geniearchief OSPV Z 3

KEMPINCK, B., 1596. [De IJssel tussen Doesburg en Zutphen, met aangrenzend gebied]. A.R.A. Geniearchief, situatiekaart OSK.Y.5.

KEMPINCK, B., 1596. [De IJssel tussen Hattem en Wijhe met aangrenzende gebied]. A.R.A. Geniearchief, situatiekaart Y4

LEENEN, W., 1740. Caart van de rievier den IJssel van boven de Brummer schans tot beneeden Zutphen. A.R.A Genie-archief, OSK Y.14

LEENEN, W., 1759-1760. Caart figuratief van de situatie van den Rivier den IJssel met de daarin geleeene cribben en ander rhijswerken. R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k80 inv.nr 1219

PASSEVANT, G., 1676. Carte van des Landschaps koeweert, neffens den rijweert, daarvoor leggende, gelegen omtrent Brummen. R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k217 inv.nr 1464

PASSEVANT, G., 1676. Caerte van des Lantschaps Scherpensteynsweert
R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k218 inv.nr 1464

PASSEVANT, G., 1696-1700. Caarte van den rivier den Nederrijn en IJssel van den dorrenheuvel of het looveer... (tot dieren). A.R.A Genie-archief situatiekaart OSK Y 6

PAULMIER, L. A., 1825 Atlas der kaarten en profielen behorende tot het rapport der kommissie over de beste rivier-afleidingen. R.A.Gld Algemene kaarten verzameling AKV 288 (13 bladen)

ROY, B. DE, 1681. IJssel bij Rheden
A.R.A. Geniearchief, OSK Y 27

ROIJ, B.J. DE, 1738. [Kaart van de IJssel tussen Zutphen en Arnhem, met een deel van de Nederrijn, de Waal en het Pannerdens kanaal, uit oude kaarten van Van Geelkercken, en De Roij van 1668, 1674 en 1698.] A.R.A. Genie-archief situatiekaart Y.13

RUYSCH, J., 1577 [Kaarten]
R.A.Gld 0012 Gelderse Rekenkamer k160, k194, k227

VERPONDINGSKAARTEN [IJssel]

R.A.gld 0873 Archief verpondingskaarten:

- k27 1810 Bemmerwaard
- k28 1809 Bahr en Lathum
- k29 1778 Bahr en Lathum
- k33 1807 Steenderen
- k34 1807 Steenderen
- k36 1807 Steenderen
- k37 1807 Steenderen
- k35 1807 Spaensweerd

Tabel A2 Beschikbare historische kaarten van de Gelderse IJssel gerangschikt per periode en uiterwaard van het studiegebied

NR (De Soet)	NAAM UITTERWAARD	1600-1700 (<1600)	1700-1750	1750-1800	1800-1830
Y4	Ijsseloordse polder	P 1696	R 1739		
Y5	Ijsseldijkerwaard	P 1696	R 1739		
Y6	Velperwaarden	P 1696	R 1739		
Y7	Koppenwaard	G 1660 P 1696	R 1739	MB 1771	
Y8	Lathumse en Bahrse waard	G 1645 P 1696	H 1716 R 1739	MB 1776 A 1778	A 1809
Y9	Zuiderwaard	R 1681 P 1696	H 1714 R 1739	LW 1753	
Y10	Rheden	R 1681 P 1696	R 1739		
Y11	Rheden de Steeg	G 1661 R 1681 P 1696	R 1739		
Y12	Vaalwaard	K 1613 R 1681 P 1696 P 1697	R 1739		
Y13	Kroonestein	G 1642 P 1696	R 1739	HH 1778	
Y14	Havikkerwaard	G 1632 G 1634 G 1637 G 1640 G 1641 G 1644 G 1646 P 1696	R 1739		
Y15	Noordingsbouwing	K 1596 P 1696	H 1723		
Y16	Fraterwaard	K 1596 G 1632 G 1638 G 1640 G 1641 G 1644 P 1696	H 1723		
Y17	De Grind	K 1596 G 1634 P 1696			
Y18	Oldenburgse waarden	K 1596 P 1696			
Y19	Brummensche waarden	K 1596 G 1633 G 1653 G 1657 G 1661 P 1676	LW 1740		
Y20	Spaensweerd	K 1596 G 1639 G 1641			A 1807
Y21	Bronkhorster waarden	K 1596 A 1604	LW 1740		A 1807
Y22	Reuversweerd	K 1596	LW 1740	HJ 1779	
Y23	Stokebrandsweerd	K 1596	LW 1740	HJ 1779	
Y24	Tichelbeeksewaarden	K 1596	LW 1740	HJ 1779	

A= Anonimus (oa. verpondingskaarten)

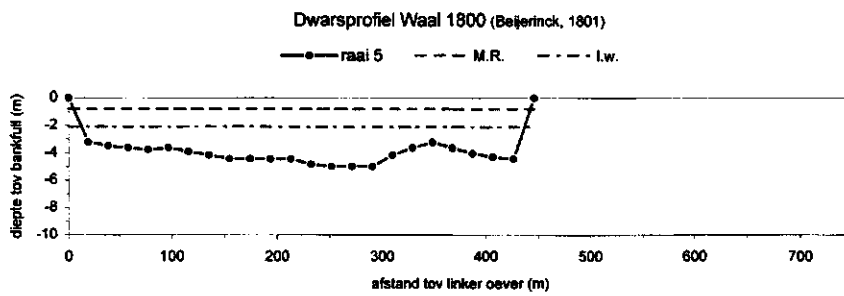
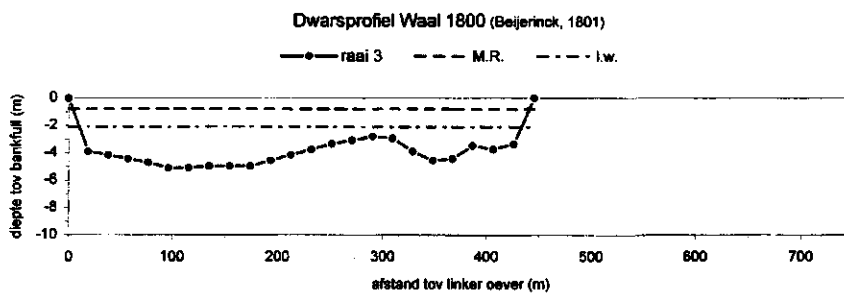
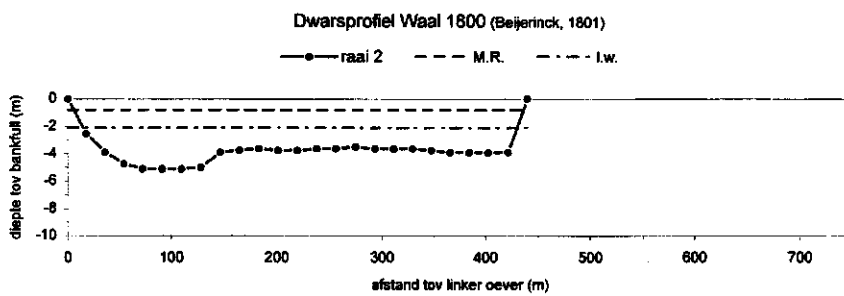
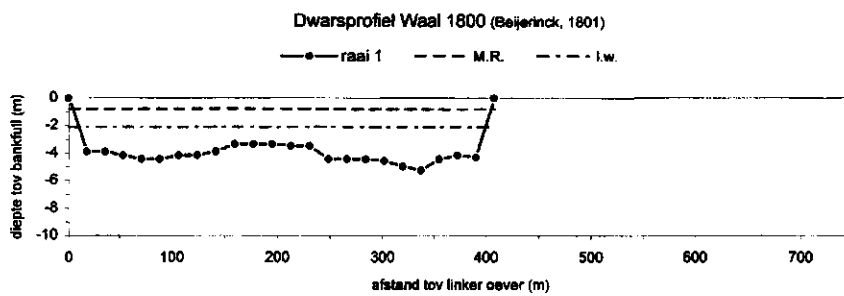
K= Kempinck B.

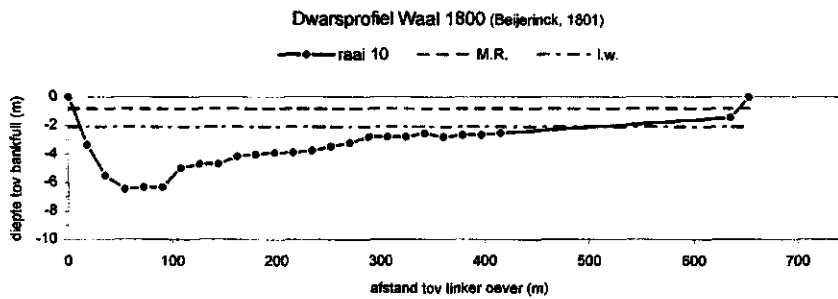
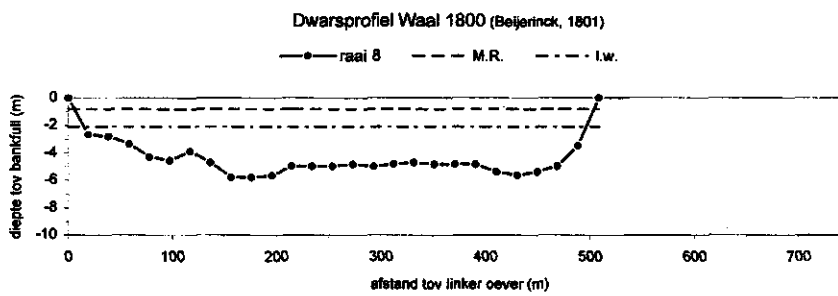
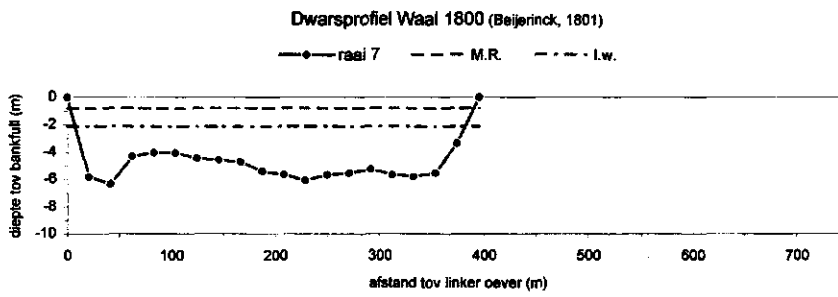
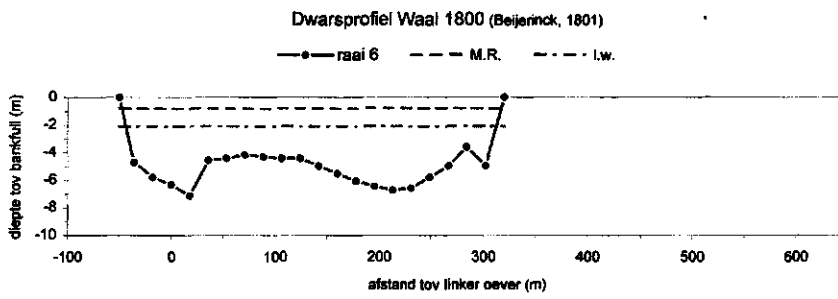
G= Geelkercken N. of I., van
P= Passevant G.
LW= Leenen W.
R= Roy B., de
H= Heuvel I. van de
HH= Heijs H. van
HJ= Hottinger J.H.
MB= Beyerinck M.

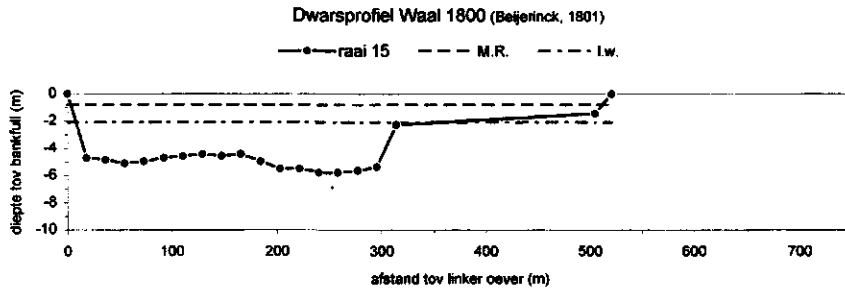
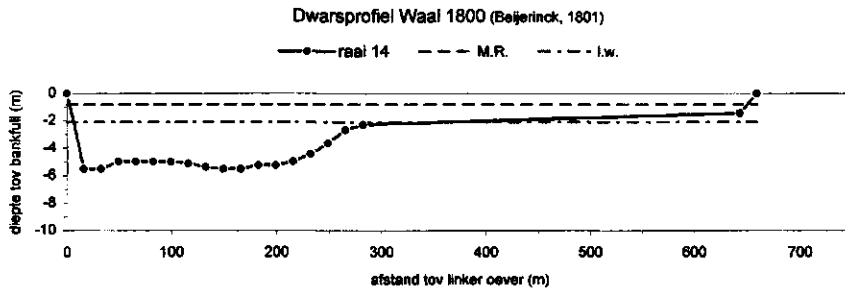
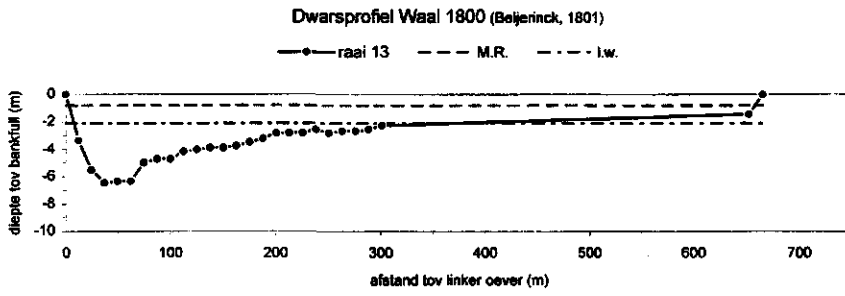
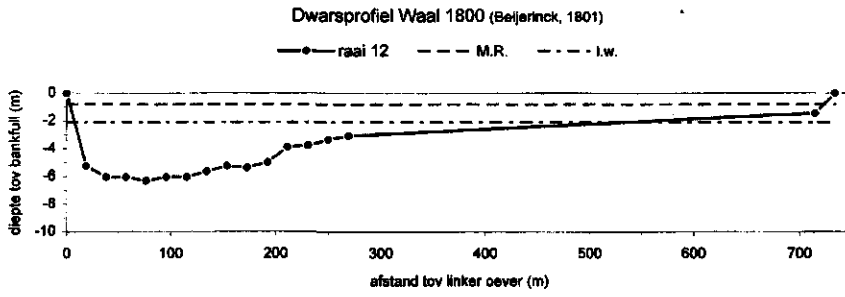
Gebiedsdekkende kaarten van de IJssel

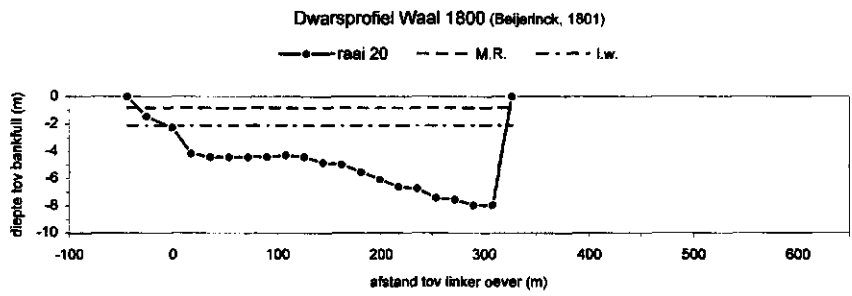
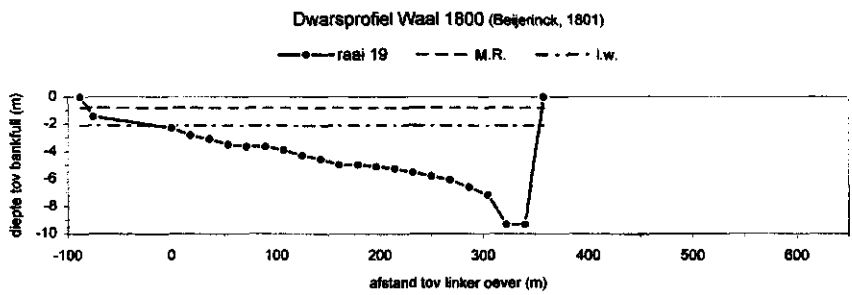
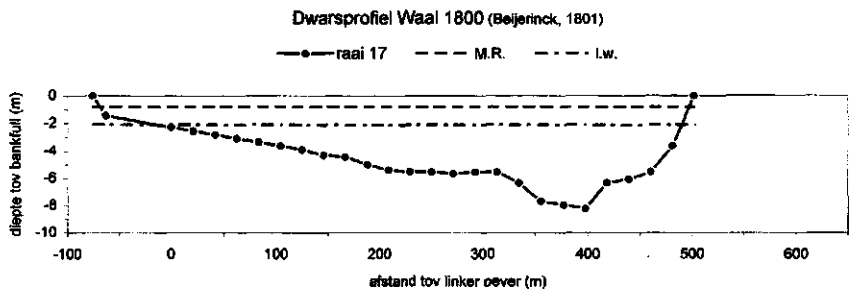
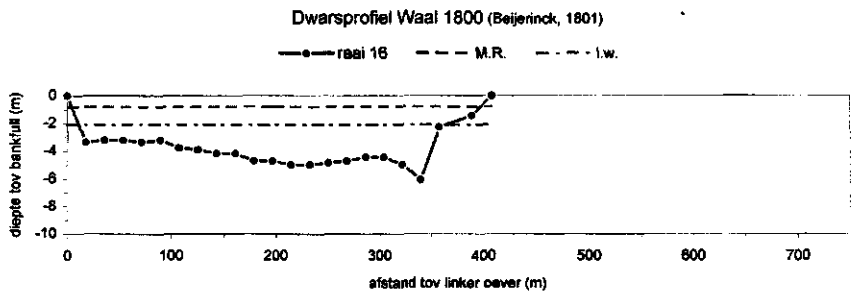
Geelkercken N. of I. van, [2^e helft 17^e eeuw]
Geelkercken I. van, 1670
Heuvel I. van den, 1717
Heuvel I. van den, [1719]
Roy B.J. de, 1738
Leenen W. 1759
Hooff H. van 1773
Paulmier L.A. 1825

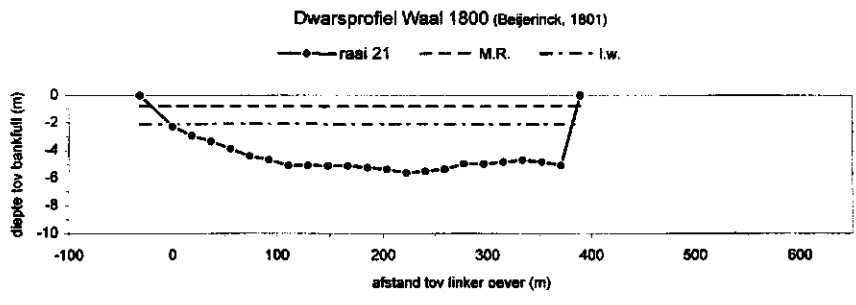
Aanhangsel 2 Historische dwarsprofielen van de Waal en de IJssel



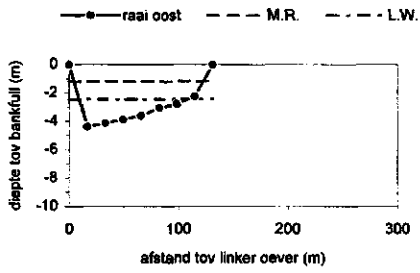




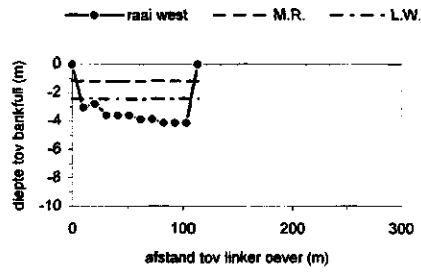




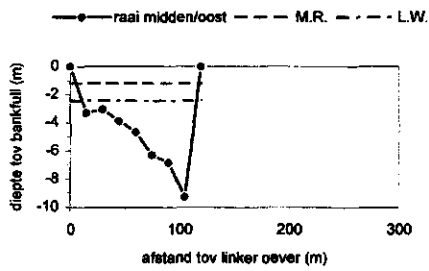
4 Dwarsprofiel IJssel 1800 (Beijerinck, 1776a)



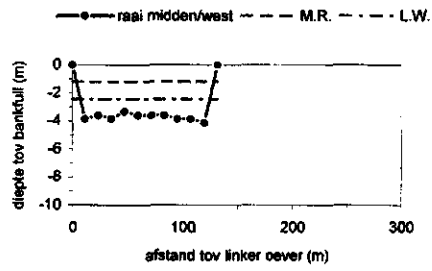
5 Dwarsprofiel IJssel 1800 (Beijerinck, 1776a)



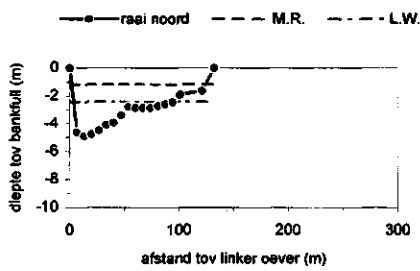
6 Dwarsprofiel IJssel 1800 (Beijerinck, 1776a)



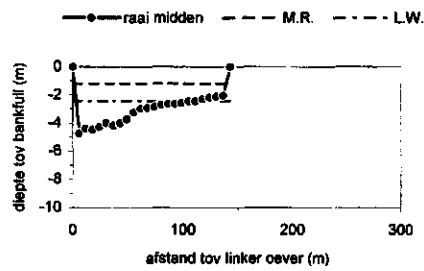
7 Dwarsprofiel IJssel 1800 (Beijerinck, 1776a)



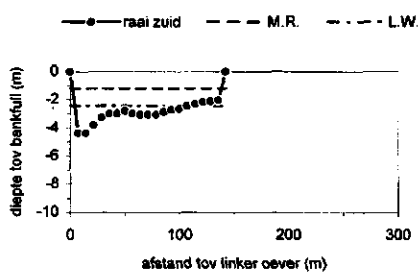
2 Dwarsprofiel IJssel 1800 (Beijerinck, 1776b)



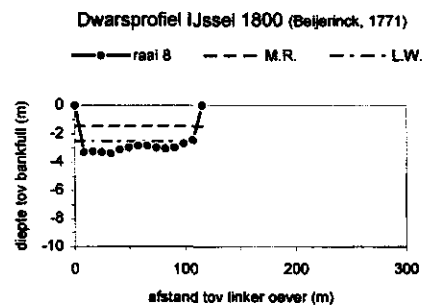
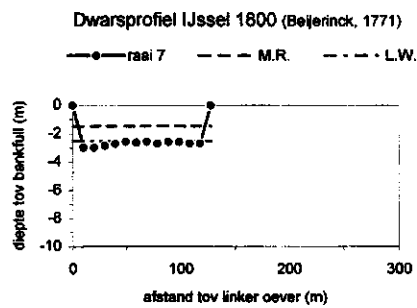
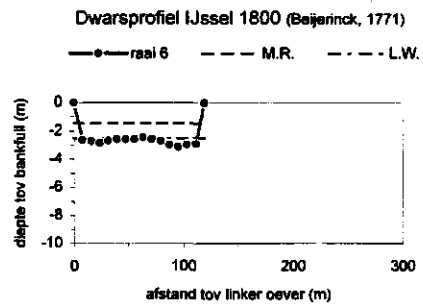
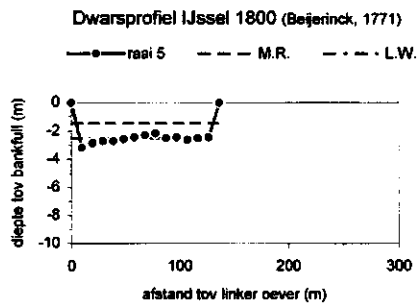
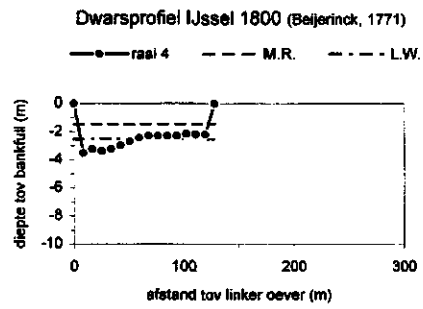
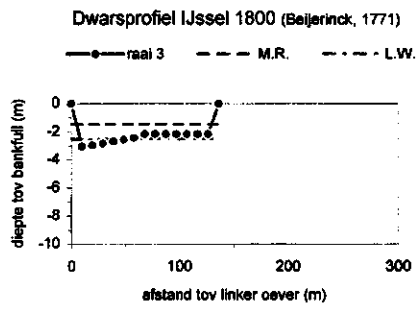
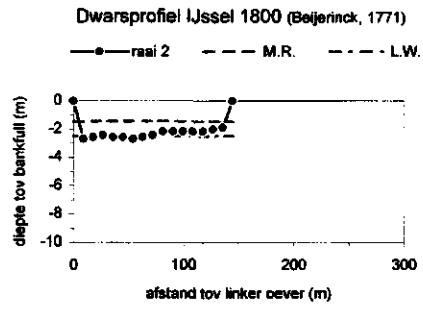
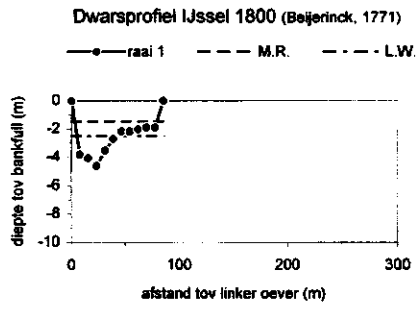
1 Dwarsprofiel IJssel 1800 (Beijerinck, 1776b)

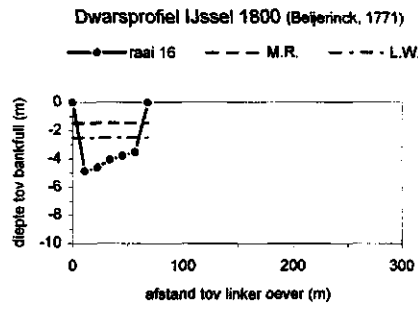
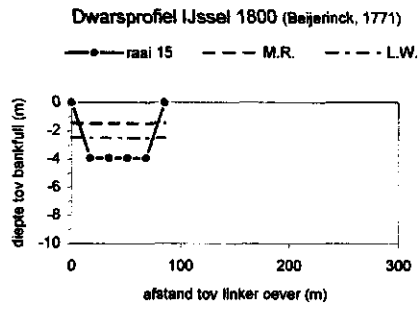
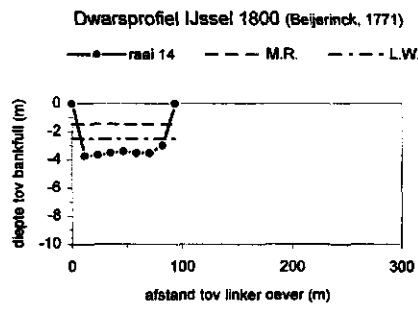
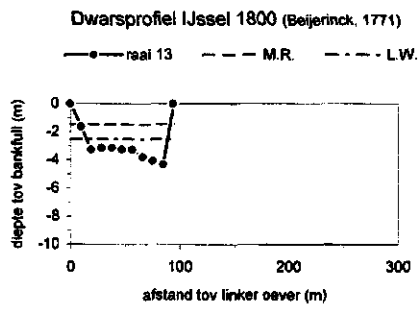
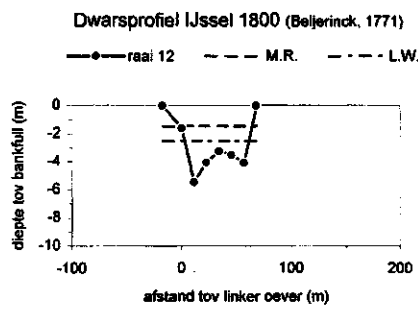
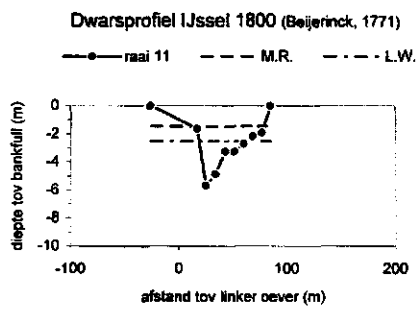
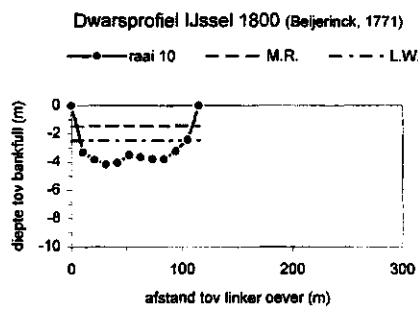
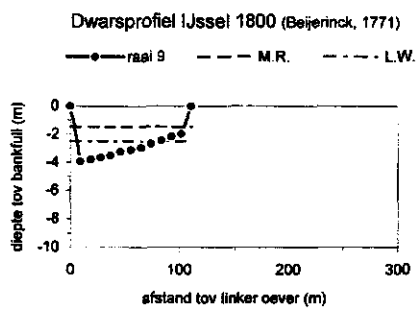


3 Dwarsprofiel IJssel 1800 (Beijerinck, 1776b)



Nummers verwijzen naar historische profielen in fig. 4.10





Dwarsprofielen 1800 Waal en IJssel

Waal	raai	B	d	B/d	A	R
Waal	1	468	4.13	113	1933	4.06
Waal	2	499	3.96	126	1976	3.90
Waal	3	506	4.11	123	2080	4.04
Waal	5	506	4.11	123	2080	4.04
Waal	6	410	5.30	77	2173	5.17
Waal	7	456	5.11	89	2330	5.00
Waal	8	569	4.68	122	2663	4.60
Waal-plaat	10	713	3.07	232	2189	3.04
Waal-plaat	12	795	2.81	283	2234	2.79
Waal-plaat	13	725	2.56	283	1856	2.54
Waal-plaat	14	719	2.90	248	2085	2.88
Waal-plaat	15	561	3.59	162	2088	3.55
Waal	16	468	3.95	118	1849	3.88
Waal	17	637	4.21	151	2682	4.16
Waal	19	506	5.16	98	2611	5.06
Waal	20	430	4.69	92	2017	4.59
Waal	21	480	3.89	123	1867	3.83

IJssel	raai	B	d	B/d	A	R
IJssel-krib	1	85	2.88	30	245	2.70
IJssel	2	145	2.35	62	341	2.28
IJssel	3	136	2.42	56	329	2.34
IJssel	4	128	2.65	48	339	2.54
IJssel	5	136	2.57	53	350	2.48
IJssel	6	119	2.73	44	325	2.61
IJssel	7	128	2.71	47	347	2.60
IJssel	8	115	3.01	38	346	2.86
IJssel	9	111	3.04	37	337	2.88
IJssel-krib	10	115	3.58	32	412	3.37
IJssel-krib	11	85	2.82	30	240	2.64
IJssel-krib	12	68	3.66	19	249	3.30
IJssel-krib	13	94	3.31	28	311	3.09
IJssel-krib	14	94	3.47	27	326	3.23
IJssel-krib	15	85	3.14	27	267	2.92
IJssel-krib	16	68	3.47	20	236	3.15
IJssel	oost	132	3.43	38	453	3.28
IJssel	midden/oost	120	5.33	23	840	4.90
IJssel	midden/west	132	3.72	35	491	3.52
IJssel	west	114	3.67	31	418	3.45
IJssel	zuid	143	2.95	48	422	2.83
IJssel	midden	143	3.19	45	456	3.05
IJssel	noord	132	3.30	40	436	3.14

Gemiddelde dwarsprofielen Waal 1800

	B	d	B/d	A	R
Waal-gem	557	4.01	151	2159	3.96
Waal-plaat	707	2.99	242	2090	2.96
Waal-geen plaat	495	4.44	113	2168	4.36

Gemiddelde dwarsprofielen IJssel 1800

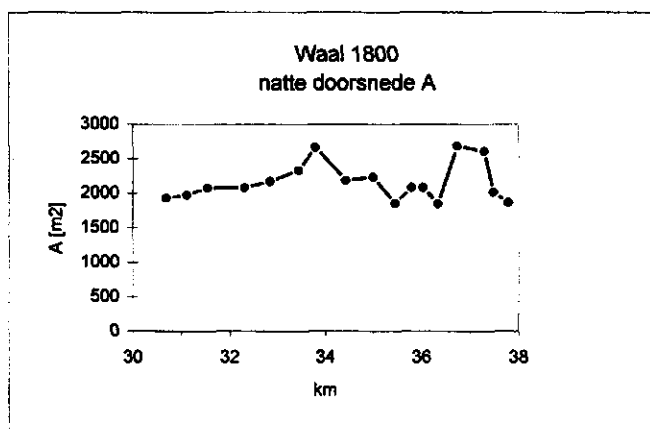
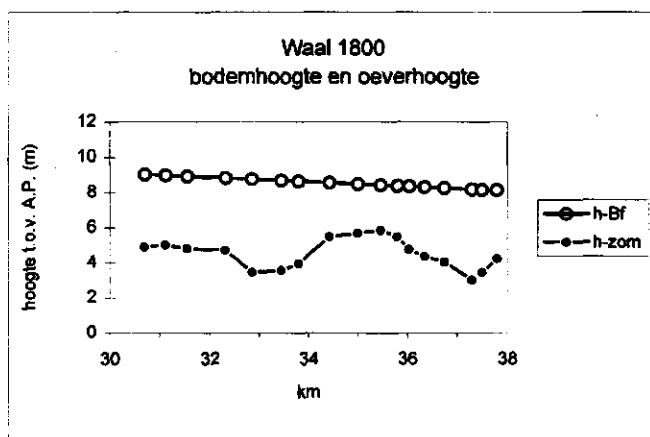
	B	d	B/d	A	R
IJssel-gem	114	3.19	37	362	3.02
IJssel-geen krib	129	3.14	43	402	2.99
IJssel-krib	87	3.29	27	286	3.05

- B** = gemiddelde zomerbed breedte
d = gemiddelde zomerbed diepte
B/d = breedte/diepte verhouding
A = natte doorsnede = $B \cdot d$
R = hydraulische straal = $A / (2d + B)$

Aanhangsel 3 Achtergrondinformatie t.b.v. SOBEK-berekeningen

SOBEK- Waal 1800

rivier	raai	sobeknr	Bzom	Dgem	km	A	h-Bf	h-zom	Bwin	hwin	krib	bos%
Waal	1	1	468	4.13	30.700	1933	9.03	4.90	1250	9.5		0
Waal	2	2	499	3.96	31.120	1976	8.97	5.01	1200	9.6		0
Waal	3	3	506	4.11	31.550	2080	8.92	4.81	1175	9.1		0
Waal	5	4	506	4.11	32.320	2080	8.82	4.71	975	9.3		15
Waal	6	5	410	5.30	32.850	2173	8.75	3.45	950	10.4	75	10
Waal	7	6	456	5.11	33.450	2330	8.67	3.56	1050	9.5	157	15
Waal	8	7	569	4.68	33.800	2663	8.63	3.95	1050	9.5		10
Waal-plaat	10	8	713	3.07	34.430	2189	8.54	5.47	1000	8.9		10
Waal-plaat	12	9	795	2.81	35.000	2234	8.47	5.66	1050	9.4		0
Waal-plaat	13	10	725	2.56	35.460	1856	8.41	5.85	1000	9.1		50
Waal-plaat	14	11	719	2.90	35.800	2085	8.37	5.47	1050	9.0		50
Waal-plaat	15	12	581	3.59	36.040	2086	8.34	4.75	1100	9.1		30
Waal	16	13	468	3.95	36.350	1849	8.30	4.35	1250	9.3		30
Waal	17	14	637	4.21	36.750	2682	8.25	4.04	1150	9.3	94	0
Waal	19	15	506	5.16	37.300	2611	8.17	3.01	1200	9.6		0
Waal	20	16	430	4.69	37.500	2017	8.15	3.46	1100	9.6		0
Waal	21	17	480	3.89	37.800	1867	8.11	4.22	1200	9.5		10



SOBEK profielen Waal 1800

```

description "Dwarsprof1" 410
{
    5.29 410 410
    9.4 410 410
    9.5 1250 1250
    20 1250 1250
}
description "Dwarsprof2" 440
{
    5.29 440 440
    9.5 440 440
    9.6 1200 1200
    20 1200 1200
}
description "Dwarsprof3" 450
{
    5.19 450 450
    9 450 450
    9.1 1175 1175
    20 1175 1175
}
description "Dwarsprof4" 450
{
    5.09 450 450
    9.2 450 450
    9.3 975 975
    20 975 975
}
description "Dwarsprof5" 240
{
    4.6 320 240
    10.3 320 240
    10.4 950 950
    20 950 950
}
description "Dwarsprof6" 240
{
    4.57 400 240
    9.4 400 240
    9.5 950 950
    20 950 950
}
description "Dwarsprof7" 510
{
    4.69 510 510
    9.4 510 510
    9.5 1050 1050
    20 1050 1050
}
description "Dwarsprof8" 650
{
    5.61 650 650
    8.8 650 650
    8.9 1000 1000
    20 1000 1000
}
description "Dwarsprof9" 740
{
    5.96 740 740
    9.3 740 740
    9.4 1050 1050
    20 1050 1050
}

```

```

description "Dwarsprof10" 670
{
    5.89 670 670
    9 670 670
    9.1 1000 1000
    20 1000 1000
}
description "Dwarsprof11" 660
{
    5.76 660 660
    8.9 660 660
    9 1050 1050
    20 1050 1050
}
description "Dwarsprof12" 520
{
    5.25 520 520
    9 520 520
    9.1 1100 1100
    20 1100 1100
}
description "Dwarsprof13" 410
{
    4.72 410 410
    9.2 410 410
    9.3 1250 1250
    20 1250 1250
}
description "Dwarsprof14" 490
{
    4.48 580 490
    9.2 580 490
    9.3 1150 1150
    20 1150 1150
}
description "Dwarsprof15" 450
{
    4.48 450 450
    9.5 450 450
    9.6 1200 1200
    20 1200 1200
}
description "Dwarsprof16" 370
{
    4.12 370 370
    9.5 370 370
    9.6 1100 1100
    20 1100 1100
}
description "Dwarsprof17" 420
{
    4.16 420 420
    9.4 420 420
    9.5 1200 1200
    20 1200 1200
}
}

```

SOBEK IJssel , vergelijking heden en 1800

SOBEK nr	profiel	h-Bf	d-gem	h-1800	b-zomer	A	s1	s2	s3	s4	h-nu	verschil
427	noord	8.59	3.30	5.29	132	436	1.64	2.92	4.21	5.50	3.57	1.73
428	midden	8.53	3.19	5.34	143	456	1.45	2.70	3.93	5.16	3.31	2.03
429	zuid	8.47	2.95	5.52	143	422	1.14	2.20	3.25	4.30	2.72	2.79
430	oost	8.40	3.43	4.97	132	453	1.45	2.78	4.12	5.46	3.45	1.62
431	west	8.34	3.67	4.67	114	418	1.66	2.72	3.78	4.84	3.25	1.42
432	midden	8.27	3.19	5.08	143	456	1.49	2.72	3.96	5.20	3.34	1.74
433	mid/wes	8.21	3.72	4.49	132	491	1.61	2.82	4.03	5.24	3.43	1.07
434	mid/oost	8.15	5.33	2.82	120	640	0.65	2.14	3.61	5.08	2.87	-0.06
435	noord	8.08	3.30	4.78	132	438	0.91	2.31	3.69	5.07	3.00	1.79
436	midden	8.02	3.19	4.83	143	456	1.19	2.37	3.54	4.71	2.95	1.88
437	west	7.95	3.67	4.28	114	418	0.92	2.20	3.49	4.78	2.85	1.44
438	oost	7.89	3.43	4.46	132	453	0.83	2.24	3.64	5.04	2.94	1.52
overige profielen:											gemiddelde	1.57

