

**SEDIMENTSORTERING EN TRANSPORTLAAGDYNAMIEK**  
**GEOLOGISCHE, ANTROPOGENE EN ALLUVIALE INVLOEDEN OP DE**  
**BEDDINGSAMENSTELLING VAN DE RIJN ROND DE PANNERDENSCH KOP**

R.M. Frings & M.G. Kleinhans

November 2002

ICG 02/7



# **SEDIMENTSORTERING EN TRANSPORTLAAGDYNAMIEK**

**GEOLOGISCHE, ANTROPOGENE EN ALLUVIALE INVLOEDEN  
OP DE BEDDINGSAMENSTELLING VAN DE RIJN ROND DE  
PANNERDENSCH KOP**

2002

**R.M. Frings & M.G. Kleinhans**

Fysische Geografie, Universiteit Utrecht,  
Heidelberglaan 2, Postbus 80.115, 3508 TC  
Utrecht

Interuniversitair Centrum voor Geo-ecologisch onderzoek  
Amsterdam



# Voorwoord

Deze studie is uitgevoerd in opdracht van het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) te Arnhem, volgens opdracht nummer 8020812 (d.d. 19 juli 2002).

Een woord van dank gaat uit naar Arjan Sieben (RIZA), Erik Mosselman en Astrid Blom (WL | Delft Hydraulics), Janrik van den Berg en Antoine Wilbers (Universiteit Utrecht). Zij hebben met hun discussies en raadgevingen allen sterk bijgedragen aan deze studie op het raakvlak van de historische geografie, de kwartairgeologie en de morfodynamica.



# Inhoud

VOORWOORD	1
INHOUD	3
Figuren	4
Tabellen	5
Bijlagen	5
1 INLEIDING	7
2 GEBIEDSBESCHRIJVING	9
3 WAARGENOMEN BODEMSAMENSTELLING	10
4 GEOLOGISCHE INVLOEDEN OP DE BODEMSAMENSTELLING	11
4.1 Geomorfogenese	11
4.2 Grootschalige effecten op de bodemsamenstelling: relatieve grindaanrijking	12
4.2.1 Hypothese	12
4.2.2 Voorkomens van de grindige en de zandige laag	13
4.2.3 Vergelijking van de korrelgrootteverdelingen	14
4.2.4 Vergelijking van de bodemdaling	16
4.2.5 Vergelijking van de dikte van de grindige laag met die van de transportlaag	16
4.2.6 Discussie	17
4.3 Kleinschalige effecten op de bodemsamenstelling	18
4.3.1 Effect van het geërodeerde zand	18
4.3.2 De invloed van resistente lagen	18
5 ANTROPOGENE INVLOEDEN OP DE BODEMSAMENSTELLING	20
5.1 Geschiedenis van menselijk handelen	20
5.1.1 Bedijkingen	20
5.1.2 De aanleg van het Pannerdensch Kanaal en het Bijlandsch Kanaal	20
5.1.3 De riviernormalisatie	23
5.1.4 De aanleg van stuwen	23
5.1.5 Scheepvaart	23
5.1.6 Bagger- en stortwerk	24
5.2 Grootschalige effecten op de bodemsamenstelling	26
5.2.1 Bodemdaling en relatieve grindaanrijking	26
5.2.2 Vergroving en verfijning als gevolg van bagger- en stortwerkzaamheden	27
5.3 Kleinschalige effecten op de bodemsamenstelling	28
5.3.1 Verandering van de bochtsortering	28
5.3.2 Zandleverantie vanuit kribvakken	29
5.3.3 Effecten van krib- en uiterwaardstroming	30
5.3.4 De gevolgen van bagger- en stortwerkzaamheden rond de Pannerdensch Kop	31
5.3.5 Vergroving van het bodemsediment door oeververstevingen	34
6 ALLUVIALE INVLOEDEN OP DE BODEMSAMENSTELLING	35
6.1 Grootschalige effecten op de bodemsamenstelling	35
6.1.1 Downstream fining	35
6.1.2 Sedimenttransport	36
6.2 Kleinschalige effecten op de bodemsamenstelling	36
6.2.1 Bochtsortering	36
6.2.2 Afpleisteringsprocessen	37
6.2.3 Zandgolven	37
6.2.4 Sortering door duinen	38
6.3 Vergelijking van de bochtsortering bij de Pannerdensch Kop met de bochtsortering in andere rivierbochten	38
6.3.1 Werkwijze	39
6.3.2 Resultaten	40
6.3.3 Discussie	42
6.3.4 Conclusies	43

7	RUIMTELIJKE VARIATIES IN BODEMRUWHEID	44
7.1	WAQUA-berekeningen	44
7.2	Interpolatie van de WAQUA-resultaten	45
7.3	Interpolatie van de bodemsamenstelling	45
7.4	Transportberekeningen	45
7.5	Bepaling van het evenwichtstransport	46
7.6	Bepaling van de bodemruwheid	47
7.7	Iteratie	47
7.8	Ruimtelijk patroon in de bodemruwheid	48
7.9	Foutenanalyse	49
8	SYNTHESE	52
8.1	Het ruimtelijk patroon in bodemsamenstelling	52
8.1.1	Totstandkoming	52
8.1.2	Verwachte toekomstige variabiliteit	54
8.2	Het ruimtelijk patroon in bodemruwheid	55
9	CONCLUSIE	57
10	AANBEVELINGEN	58
10.1	Het ruimtelijk patroon in de bodemsamenstelling	58
10.1.1	De bepaling van geologische invloeden	58
10.1.2	Bewijs voor de hypothese van relatieve grindaanrijking	58
10.1.3	De invloed van bovenstroomse bagger- en stortwerkzaamheden	58
10.1.4	De omvang van kleinschalige variaties in de bodemsamenstelling	58
10.2	Het ruimtelijk patroon in de bodemruwheid	59
10.3	Modellering van de bodemligging	59
10.3.1	Modelafvoer	59
10.3.2	Schematisatie van de rivierbodem	59
10.3.3	Interpolatie van de bodemsamenstelling	59
10.3.3	Bepaling van ruimtelijke variaties in bodemruwheid	60
	LITERATUUR	61

## Figuren

1.	Topografie van het splitsingspunt Pannerdensche Kop.	9
2.	Lithologische dwarsdoorsnede door de Bovenrijn bij kilometer 866,9.	10
3.	De migratiesnelheid op verschillende diepten van de transportlaag.	14
4.	Gemiddelde korrelgrootteverdelingen van de grindige laag en de zandige laag.	15
5.	De mobiliteit van enkele korrelgrootteklassen.	15
6.	Vergelijking van de dikte van de grindige laag met de maximale dikte van de transportlaag bepaald op basis van gemeten duinhoogtes en op basis van het voorkomen van de schelpsoort <i>Corbicula Fluminea</i> .	17
7.	Bodemdaling in de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal.	17
8.	De bodemligging en de locus van het grofste materiaal in de eerste anderhalve kilometer van de Waal.	19
9.	De splitsing van de Bovenrijn in de 16 <sup>e</sup> eeuw.	21
10.	De omgeving van Pannerden omstreeks 1705.	22
11.	De doorsnijding van de Bijlandmeander.	22
12.	De bovenmond van het Pannerdensch Kanaal in 1781.	22
13.	Bagger- en stortwerk in de Bovenrijn en de Waal in de periode 1900-1996.	24
14.	Bagger- en stortwerk in de Bovenrijn en de Waal per kilometervak in de periode 1900 – 1996.	25
15.	Bodemdaling als gevolg van baggeren in de periode 1988-1995 in de Waal en de Bovenrijn rond de Pannerdensche Kop.	25
16.	Bagger- en stortwerk in het Pannerdensch Kanaal in de periode 1951-1985.	25
17.	Bagger- en stortwerk in het Pannerdensch Kanaal per kilometervak in de periodes 1951-1956 en 1970-1985.	26
18.	Bodemdaling als gevolg van baggeren in het Pannerdensch Kanaal.	26
19.	Stromingspatroon in kribvakken.	29
20.	De bodemligging in de Bovenrijn ten opzichte van 1975.	32
21.	De bodemligging in de Bovenrijn en de Waal ten opzichte van 1975.	32



22.	De bodemligging in het Pannerdensch Kanaal ten opzichte van 1975.	33
23.	Bochtsortering in de Bovenrijn en de Waal.	40
24.	Vergelijking van de bochten bij de Pannerdensch Kop met de overige bochten in de Bovenrijn en de Waal.	41
25.	Vergelijking tussen het maximale korrelgrootteverschil tussen beide oevers berekend op basis van de korrelgroottedataset van Ten Brinke (1997) en het maximale korrelgrootteverschil tussen beide oevers berekend op basis van de korrelgroottedataset van Gruijters et al. (2001 <sup>a</sup> ).	42
26.	Stroomafwaartse verandering in de mediane korrelgrootte (D50) en het maximale korrelgrootteverschil tussen beide oevers o.b.v. D50 in de Bovenrijn en de Waal.	43
27.	Stroombanen rond de Pannerdensch Kop op basis van afvoergegevens uit WAQUA.	44
28.	Gemiddelde korrelgrootteverdeling van de bovengrond (0-20 cm) van de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal.	45
29.	Berekend totaal bodemtransport in de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal.	46
30.	Verandering van de bodemruwheid (k-waarde) gedurende de verschillende iteratiestappen in stroombaan 5 op de dwarsraaien 865,7, 866,1 en 867,3 in de Bovenrijn.	47
31.	Verandering van de bodemruwheid (k-waarde) gedurende de verschillende iteratiestappen in stroombaan 5 op de dwarsraaien 867,7 en 868,1 in het Pannerdensch Kanaal.	47
32.	Lateraal verloop van de bodemruwheid (k-waarde) in de Bovenrijn.	48
33.	Lateraal verloop van de bodemruwheid (k-waarde) in de Waal.	49
34.	Schematisatie van het berekende ruwheidspatroom in de Bovenrijn en de Waal tussen kilometer 865,3 en kilometer 969,3.	50
35.	Lateraal verloop van de duinhoogte in de Bovenrijn en de Waal op 29 oktober 1998 bij een Bovenrijnafvoer van 4000 m <sup>3</sup> /s.	55

## Tabellen

1.	Definities van ruimte- en tijdschalen.	8
2.	Bochten rond de Pannerdensch Kop.	9
3.	De mediane korrelgrootte van kronkelwaardafzettingen in de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal.	12
4.	Bodemdaling in het zomerbed van de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal.	12
5.	Bodemdaling rond de Pannerdensch Kop als aangenomen wordt dat de hypothese van relatieve grindaanrijking juist is.	16
6.	Rivienormalisatie-fasen in de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal.	23
7.	In- en uitstroompunten van uiterwaarden rond de Pannerdensch Kop.	31
8.	Sprongen in de mediane korrelgrootte in het benedenstroomse deel van de Rijn.	35
9.	Verandering van de waterstand en de stroomsnelheid gedurende de iteratie.	50
10.	Overzicht van processen die van invloed kunnen zijn op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop.	53

## Bijlagen

1.	Gegevens over de geometrie en de bochtsortering in meanderbochten in de IJssel.	64
2.	Gegevens over de geometrie en de bochtsortering in meanderbochten in de Bovenrijn en de Waal.	66



# 1 Inleiding

Op het splitsingspunt de Pannerdensche Kop wordt de water- en sedimentafvoer van de Rijn verdeeld over de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Morfologische veranderingen op dit splitsingspunt hebben gevolgen voor de water- en sedimentverdeling in een groot deel van Nederland. In het verleden heeft dit regelmatig voor problemen gezorgd, zowel in de vorm van wateroverlast als in de vorm van verdroging (Van de Ven, 1976). Het is dan ook van groot belang de morfodynamiek rond de Pannerdensche Kop te kunnen voorspellen.

Reeds verschillende malen is getracht de bodemligging rond de Pannerdensche Kop met een computermodel te simuleren. Daarvoor werd gebruik gemaakt van het model Delft2D-Rivieren, een op rivierkundige toepassingen toegesneden subsysteem van Delft3D. Redelijke resultaten werden behaald wanneer een uniforme bodemsamenstelling werd ingevoerd. Modelberekeningen waarbij ruimtelijk gedistribueerde waarden voor de bodemsamenstelling werden gebruikt, leverden echter onbevredigende resultaten op. Er werd geen stabiele bodemligging bereikt, doordat er transportgradiënten bleven bestaan (Struiksma, 1998; Mosselman & Sloff, 1998; Bernabè, 2002).

Het is mogelijk dat dit komt door een foutieve representatie van de bodemruwheid in het model. Het model gaat ervan uit dat de bodemruwheid overal gelijk is, maar in werkelijkheid bestaan er waarschijnlijk grote ruimtelijke verschillen in bodemruwheid. Mosselman *et al.* (1999) hebben aangetoond dat ruimtelijke variaties in bodemruwheid het effect van variaties in de bodemsamenstelling in theorie kunnen compenseren.

Een andere verklaring voor de onbevredigende modelresultaten schuilt in de gebruikte waarden voor de bodemsamenstelling. Ruimtelijk gedistribueerde waarden voor de bodemsamenstelling zijn verkregen door interpolatie van een beperkt aantal gemeten korrelgrootteverdelingen (Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>). Het is mogelijk dat hierbij fouten zijn gemaakt doordat grootschalige structuren in de bodemsamenstelling niet goed onderscheiden zijn van lokale, kleinschalige patronen.

In dit onderzoek wordt nader ingegaan op de ruimtelijke patronen in bodemruwheid en bodemsamenstelling. In het eerste deel van dit onderzoek staat het ruimtelijke patroon in de bodemsamenstelling centraal. Voor een goede interpolatie van de bodemsamenstelling is het van belang dat er onderscheid gemaakt kan worden tussen kleinschalige patronen in de bodemsamenstelling en grootschalige patronen in de bodemsamenstelling. Daartoe is het noodzakelijk te weten waardoor de grootschalige en de kleinschalige variatie in bodemsamenstelling veroorzaakt wordt. De probleemstelling van het eerste deel van dit onderzoek is dan ook:

## **Welke processen liggen ten grondslag aan de kleinschalige en de grootschalige variatie in de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop?**

Daarbij wordt alleen aandacht besteed aan de bodemsamenstelling in de bovenste meter van de rivierbedding, omdat actuele morfologische processen niet dieper reiken.

De processen die van invloed zijn op de bodemsamenstelling worden onderverdeeld naar hun oorsprong: er worden geologische, antropogene en alluviale invloeden op de bodemsamenstelling onderscheiden. Daarbij wordt expliciet aangegeven op welke lengteschaal deze processen van invloed zijn. Er worden vier lengteschalen gehanteerd. Deze zijn zodanig gekozen dat een goed onderscheid gemaakt kan worden tussen de verschillende processen die rond de Pannerdensche Kop van invloed zijn op de bodemsamenstelling. De onderverdeling van processen en fenomenen in harde klassen is echter indicatief en wordt in de tekst waar nodig genuanceerd.

Bij kleinschalige variatie in de bodemsamenstelling wordt onderscheid gemaakt tussen variatie op microschaal (1 tot 100 meter) en variatie op mesoschaal (100 meter tot 5 kilometer). Bij grootschalige variatie in de bodemsamenstelling wordt onderscheid gemaakt tussen variatie op macroschaal (5 tot 20 kilometer) en variatie op megaschaal (20 tot 2000 kilometer). In tabel 1 wordt een overzicht gegeven van deze ruimteschalen met de bijbehorende geschatte tijdschalen.

Tabel 1. Definitie van ruimten- en tijdschalen.

Naam	Dimensies (afstand)	Dimensies (tijd)
Microschaal	0,001 - 0,1 km	0,01 - 1 jaar
Mesoschaal	0,1 - 5 km	1 - 50 jaar
Macroschaal	5 - 20 km	50 - 200 jaar
Megaschaal	20 - 2000 km	200 - 20.000 jaar

In het tweede deel van dit onderzoek wordt kort ingegaan op het ruimtelijk patroon in bodemruwheid. De probleemstelling hierbij is:

**Is er een fysisch realistische verdeling van bodemruwheden mogelijk waarbij de transportgradiënten gelijk zijn aan nul?**

Op basis van een eenvoudige modelberekening zal getracht worden een verdeling van bodemruwheden te genereren, waarbij de transportgradiënten nul zijn. Daarna zal bekeken worden of dit ruwheidpatroon realistisch is en verklaarbaar met het oog op de waargenomen bodemsamenstelling en de riviermorfologie.

In dit rapport wordt eerst een beschrijving gegeven van het onderzoeksgebied (hoofdstuk 2) en de waargenomen bodemsamenstelling (hoofdstuk 3). Dan komen in een drietal hoofdstukken de geologische, antropogene en alluviale invloeden op de bodemsamenstelling aan bod (hoofdstuk 4, 5 en 6). Hoofdstuk 7 gaat in op de bepaling van ruimtelijke patronen in de bodemruwheid. In hoofdstuk 8 wordt vervolgens een synthese gemaakt van de bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken en in hoofdstuk 9 worden de belangrijkste conclusies samengevat. Tot slot wordt in hoofdstuk 10 een aantal aanbevelingen gedaan voor een nauwkeuriger bepaling van de ruimtelijke patronen in de bodemsamenstelling en bodemruwheid en de implicaties van deze ruimtelijke patronen voor de modellering van de bodemligging rond de Pannerdensch Kop.

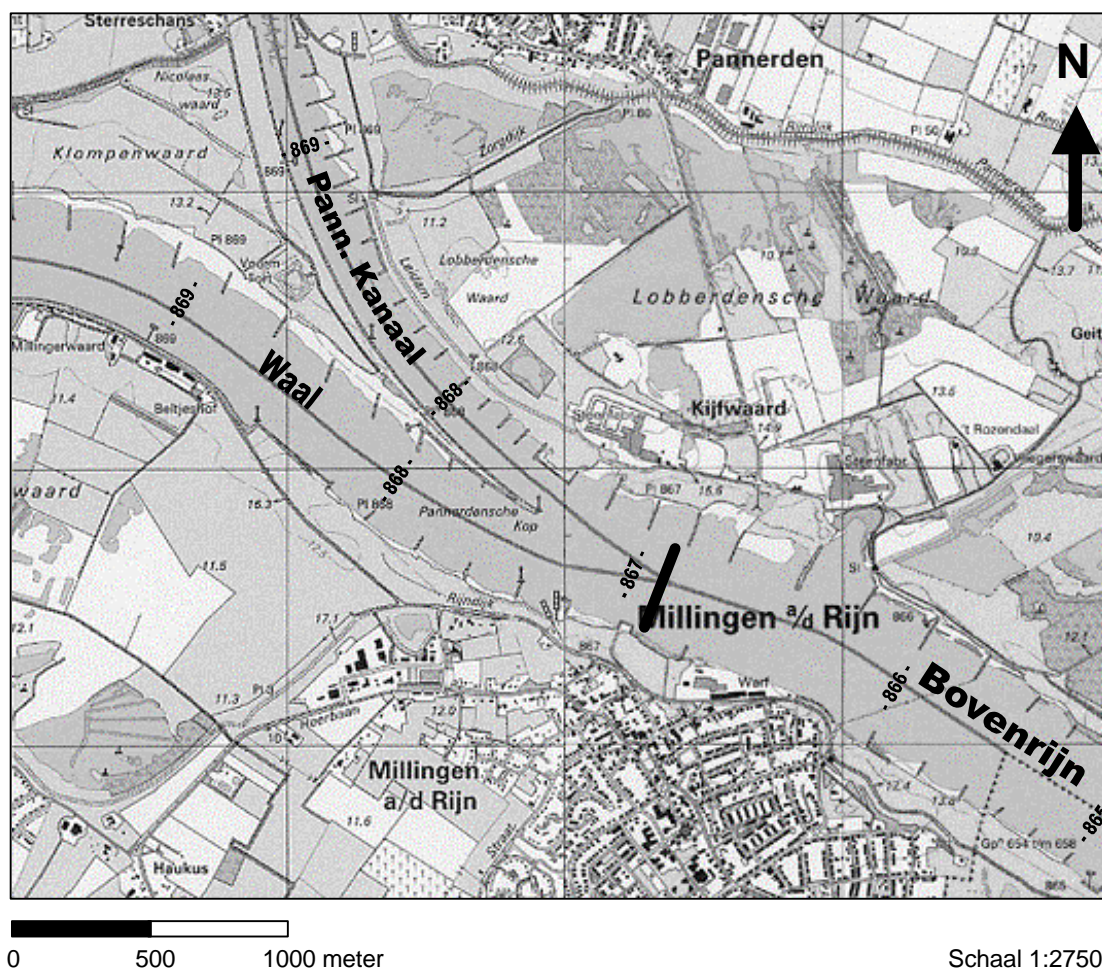
## 2 Gebiedsbeschrijving

Er wordt aandacht besteed aan de ruimtelijke patronen in bodemsamenstelling en bodemruwheid tussen kilometer 865,3 in de Bovenrijn en kilometer 869,3 in de Waal en het Pannerdensch Kanaal (fig. 1). Dit komt overeen met het traject waar in 2000 uitgebreide informatie is verzameld over de bodemsamenstelling (Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>). Het gebied omvat een bocht naar links in de Bovenrijn en twee bochten naar rechts, één in de Waal en één in het Pannerdensch Kanaal (tabel 2).

Tabel 2. Bochten rond de Pannerdensch Kop.

Riviertak	Kilometertraject	Richting	Straal (m)
Bovenrijn	864,25 - 867,00	naar links	9000
Waal	867,00 - 868,50	naar rechts	2800
Pannerdensch Kanaal	867,00 - 869,00	naar rechts	1680

De rechteroever van de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal zijn voorzien van kribben. Aan de linkeroever zijn de kribben veel korter en op veel plaatsen afwezig. De normaalbreedte (de rivierbreedte tussen de kribkoppen) bedraagt voor de Bovenrijn 340 meter, voor de Waal 260 meter en voor het Pannerdensch Kanaal ongeveer 135 meter. Het gemiddelde bodemniveau van deze rivieren lag in 2000 3,10 meter boven NAP, maar er zijn grote verschillen in bodemligging tussen binnen- en buitenbocht, zo'n 3 meter in de Bovenrijn en de Waal en circa 1½ meter in het Pannerdensch Kanaal. De gemiddelde jaarlijkse afvoer in de Bovenrijn bedraagt 2300 kubieke meter per seconde. De gemiddelde waterdiepte is ongeveer 7 meter.



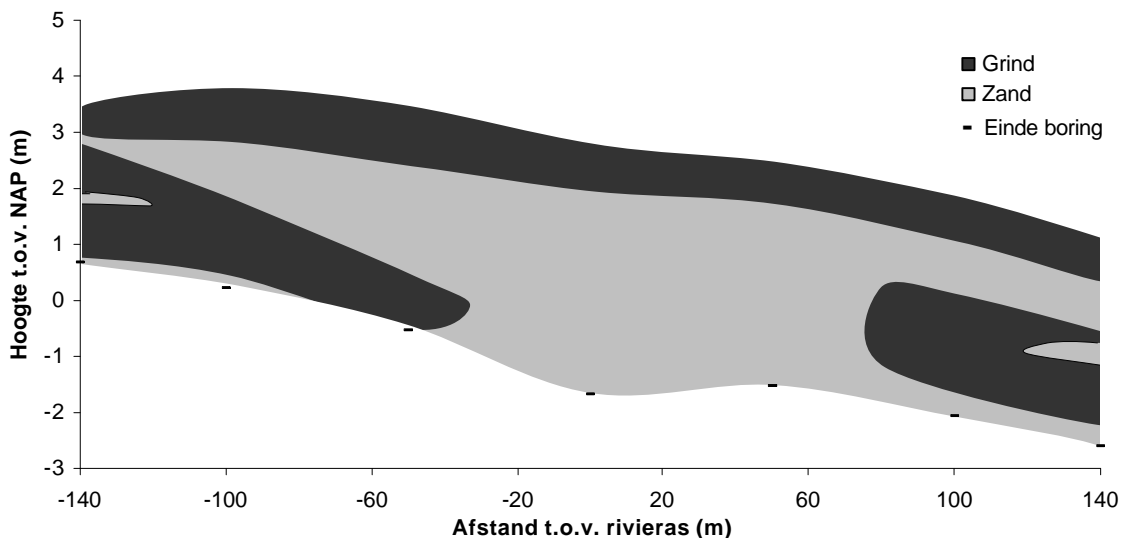
Figuur 1. Topografie van het splitsingspunt Pannerdensch Kop (TDN, 1985 & 1990). De dikke zwarte lijn geeft de ligging van het profiel in figuur 2 weer.

### 3 Waargenomen bodemsamenstelling

Hoewel in het verleden verschillende malen metingen zijn gedaan van de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop, wordt hier alleen aandacht besteed aan de bodemsamenstelling zoals die is gemeten door Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>). De dataset van Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>) is de meest recente en de meest gedetailleerde die beschikbaar is. Ze bevat voor 92 locaties verdeeld over 16 dwarsraaien (onderlinge afstand 400 meter) informatie over de korrelgrootteverdeling van het bodemsediment op vier verschillende dieptes.

De bovengrond van de rivierbedding rond de Pannerdensche Kop is grofweg opgebouwd uit twee lagen (fig. 2). De bovenste laag bestaat uit fijn grind, met wisselende bijmengingen van zand. Over het algemeen neemt het zandgehalte in de grindige laag licht toe met de diepte. In de Bovenrijn is het zandgehalte van de grindige laag gemiddeld 37 procent, het zandgehalte in de Waal is gemiddeld 46 procent en het zandgehalte in het Pannerdensch Kanaal bedraagt gemiddeld 26 procent. Deze getallen worden weerspiegeld in de gemiddelde mediaan van het totale sediment. Deze bedraagt voor de Bovenrijn 4,2 millimeter, voor de Waal 2,8 millimeter en voor het Pannerdensch Kanaal 6,1 millimeter. In alle drie de riviertakken gaat de grindige laag op een diepte van ongeveer 90 centimeter over in een grofzandige laag met een kleine grindcomponent (zo'n 20 procent). De mediane korreldiameter van deze laag bedraagt gemiddeld 0,7 millimeter.

Naast de verschillen in samenstelling van de grindige laag tussen de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch kanaal, zijn er ook verschillen in samenstelling op veel kleiner schaalniveau. Het meest opvallend zijn de laterale verschillen op mesoschaal. De mediane korrelgrootte is doorgaans veel kleiner in binnenbochten dan in buitenbochten. Deze verschillen bedragen ruim 4 millimeter in de Bovenrijn, zo'n 1½ millimeter in de Waal en wel 5½ millimeter in het Pannerdensch Kanaal. Verder zijn er ook laterale en longitudinale korrelgrootteverschillen op microschaal. Deze lijken random verdeeld te zijn en zijn niet te koppelen aan bepaalde locaties in de rivier.



Figuur 2. Lithologische dwarsdoorsnede door de Bovenrijn bij kilometer 866,9 (op basis van Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>).

## 4 Geologische invloeden op de bodemsamenstelling

Dit hoofdstuk behandelt de mogelijke geologische invloeden op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop. Hiermee worden de invloeden bedoeld van afzettingen die niet door de huidige rivier (in de afgelopen tweehonderd jaar) zijn afgezet. Eerst wordt kort ingegaan op de geomorfologische ontstaansgeschiedenis van het gebied. Daarna komen achtereenvolgens de grootschalige en de kleinschalige geologische invloeden op de bodemsamenstelling aan bod.

### 4.1 Geomorfogenese

In het Laat-Pleistoceen bestond het gebied rond de huidige Pannerdensche Kop uit een vlakte met vlechtende rivieren. De afzettingen uit deze periode worden gerekend tot de Kreftenheyeformatie en bestaan voornamelijk uit grof zand met grindlagen. Plaatselijk zijn geulopvullingen gevormd, bestaande uit klei en veen. Het pakket Kreftenheye-afzettingen is circa 15 meter dik en de top ervan ligt op 8 meter boven NAP op plaatsen waar geen erosie is opgetreden (Berendsen & Stouthamer, 2001).

Door de klimaatveranderingen aan het begin van het Holoceen veranderde het rivierpatroon in meanderend. De rivieren sneden zich in en de oorspronkelijke overstromingsvlakte werd een rivierterras. Aanvankelijk werd deze vlakte nog overstroomd, waarbij een dunne, meestal minder dan een meter dikke, kleilaag werd afgezet boven op de afzettingen van de vlechtende rivieren (Afzettingen van Wijchen). Later kwam het rivierwater niet meer over de terrasrand en kregen de Afzettingen van Wijchen door bodemvormende processen een zeer dichte structuur, die deze afzettingen zeer resistent maakt tegen erosie.

Nog weer later gingen de zich insnijdende meanderende rivieren over in accumulerende meanderende rivieren onder invloed van de stijgende zeespiegel. Rond de Pannerdensche Kop werden pas 3000 jaar geleden de eerste afzettingen boven op de afzettingen van Wijchen gevormd (Berendsen & Stouthamer, 2001). De afzettingen van de meanderende rivieren worden gerekend tot de Echteldformatie, voorheen de Betuweformatie genoemd. De stroomgordelafzettingen van deze rivieren bestaan uit zand en grind. In de komgebieden bestaan de afzettingen van de meanderende rivieren voornamelijk uit klei.

De grindige laag die in het gehele gebied rond de Pannerdensche kop aan het oppervlakte wordt aangetroffen (fig. 2) behoort tot de Echteldformatie (zie ook §4.2.1). De zandige laag die onder de grindige laag ligt (fig. 2), bestaat voor een deel uit Kreftenheye-afzettingen en voor een deel uit Echteldafzettingen. Deze afzettingen zijn vaak lithologisch niet van elkaar te onderscheiden (Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>). Dit is goed verklaarbaar want de Echteldafzettingen bestaan voor het grootste deel uit omgewerkt lokaal sediment uit oudere afzettingen. Slechts een klein deel van deze stroomgordelafzettingen is afkomstig uit bovenstroomse delen van het Rijnstroomgebied. Er is daarom ook geen strikte scheiding te maken tussen alluviale en geologische invloeden op de huidige beddingsamenstelling.

Plaatselijk bevat de zandige laag steenkoolbrokjes, soms wel tot op drie meter diepte en dan behoort de zandige laag natuurlijk tot de formatie van Echteld. Op basis van de aanwezigheid van steenkool concluderen Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>) dat dit deel van de zandige laag maximaal 100 jaar oud is en zij noemen het daarom de 'subrecente' laag. Waarnemingen van de bodemligging sinds 1926 tonen evenwel aan dat de bodem rond de Pannerdensche Kop sterk gedaald is in de afgelopen eeuw (Ten Brinke & Gözl, 2001). Het is dan ook waarschijnlijk dat de subrecente laag is afgezet voordat de periode van bodemdaling begon. Dit is ook goed mogelijk want al aan het einde van de 18<sup>e</sup> eeuw kwam de steenkoolontginning langs de Ruhr in Duitsland tot ontwikkeling. Een baron maakte in deze periode de Ruhr bevaarbaar om zijn steenkoolproducten via de Rijn in Nederland af te zetten (Raedts, 1971). En in 1850 werd in Duitsland al 6 miljoen ton steenkool gedolven; dit is bijna de helft van de hoeveelheid die in Nederland op het hoogtepunt van de Limburgse steenkoolmijnbouwperiode werd gedolven (14 miljoen ton in 1937, Westen, 1971). Het is dus zeer goed mogelijk dat de subrecente laag met steenkool meer dan 200 jaar oud is.

Opvallend is dat de subrecente laag in de Bovenrijn veel wordt aangetroffen, maar niet in het Pannerdensch Kanaal, het Bijlandsch Kanaal en in de Niederrhein. Ook in de Waal komt de subrecente laag nauwelijks voor (Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>, 2001<sup>b</sup>; Gruijters & De Kleine, 2001). De dikste afzettingen komen voor aan de boven- en benedenrand van het Bijlandsch Kanaal, in de zuidelijke helft van de Bovenrijn. Deze locaties komen exact overeen met de plaatsen waar voor

de aanleg van het Bijlandsch Knaal diepe geulen aanwezig moeten zijn geweest, behorende bij de scherpe bochten die de in- en uitgang vormden van de Bijlandmeander (fig. 11). Door de aanleg van het Bijlandsch Kanaal (1775) moet de stromingsrichting in de Bovenrijn veranderd zijn waardoor de diepe buitenbochtgeulen niet langer in evenwicht waren met het stromingspatroon (zie hoofdstuk 5). In de jaren na de aanleg van het kanaal zijn de geulen dan ook waarschijnlijk snel opgevuld met sediment. Waarschijnlijk is de subrecente laag een restant van deze geulopvullingen uit de periode na de aanleg van het Bijlandsch Kanaal. Op grond van de datering van de subrecente laag in de vorige paragraaf is dit goed mogelijk. Het betekent evenwel dat de subrecente laag ruim honderd jaar ouder is dan Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>) aannemen.

## 4.2 Grootschalige effecten op de bodemsamenstelling: *relatieve grind-aanrijking*

### 4.2.1 Hypothese

Uit figuur 2 blijkt dat de basis van de grindige laag parallel loopt aan de huidige rivierbedding. Dat betekent dat deze laag waarschijnlijk geen Pleistocene of oud-Holocene afzetting is, maar gevormd moet zijn door de huidige rivier. Een schatting van de ouderdom van de grindige laag kan gemaakt worden aan de hand van Hesselink (2002). Zij heeft de mediane korrelgrootte bepaald van binnenbochtafzettingen die in de 18<sup>e</sup> eeuw gevormd zijn. Deze is veel kleiner dan de mediane korrelgrootte van de grindige laag in de huidige binnenbochten (tabel 3). Er mag dus aangenomen worden dat de grindige laag in de 18<sup>e</sup> eeuw nog niet aanwezig was.

Tabel 3. De mediane korrelgrootte (mm) van kronkelwaardafzettingen in de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Naar: Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup> en Hesselink, 2002 (hoofdstuk 3).

Rijntak	1700-1800 AD	2000 AD
Bovenrijn	0,21-2,00	2,78
Waal	0,21-1,40	3,11
Pannerdensch Kanaal	0,30-2,00	4,55

Tabel 4. Bodemdaling (m) in het zomerbed van de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal (Ten Brinke & Götz, 2001 en Schans, 1998<sup>a</sup>).

Rijntak	1975-1995 <sup>1</sup>	1950-1995 <sup>2</sup>	1926-1995 <sup>2</sup>
Bovenrijn	0,67	1,30	
Waal	0,52	0,75	0,75
Pannerdensch Kanaal	1,00	1,30	2,30

<sup>1</sup> Gegeven data hebben betrekking op de riviertrajecten (2-3 kilometer) die grenzen aan de Pannerdensch Kop.

<sup>2</sup> Gegeven data hebben betrekking op de gehele Bovenrijn, het gehele Pannerdensch Kanaal en het bovenstroomse deel van de Waal.

De grindige laag kan ontstaan zijn door sedimentatie. Het is echter onwaarschijnlijk dat dit gebeurd is in de 20<sup>e</sup> eeuw, want metingen van de bodemligging sinds 1926 tonen aan dat de bodemligging rond de Pannerdensch Kop één à twee meter gedaald is sindsdien (tabel 4). De sedimentatie kan wel zijn opgetreden in de 19<sup>e</sup> eeuw en dan met name in de periode voor de riviernormalisaties (dus vóór 1850, zie §5.1.3). Dit houdt wel in dat de oorspronkelijke dikte van de grindige laag minimaal drie meter moet zijn geweest, rekening houdende met de grote bodemdaling in de 20<sup>e</sup> eeuw. De menselijke invloed in het begin van de 19<sup>e</sup> eeuw was echter nog klein en een plotselinge sedimentatie van drie meter grind is dan niet waarschijnlijk.

Het is dus waarschijnlijk dat de grindige laag niet is ontstaan door sedimentatie van grof materiaal, maar ten dele door de erosie van fijn materiaal uit de zandige laag, waarbij grof materiaal is achtergebleven (*Eng. winnowing*). Dit proces treedt op als de transportsnelheid van fijn materiaal veel groter is dan die van grof materiaal (zie §6.1.1). (Met transportsnelheid wordt hier de verplaatsing van sediment in een bepaalde tijd bedoeld, niet de snelheid van de afzonderlijke korrels.) Daarnaast vindt selectief transport plaats, wat betekent dat het fijnere sediment relatief sneller en/of vaker wordt getransporteerd dan het grovere. Door beide



mechanismen vindt een relatieve aanrijking van grof materiaal plaats, hetgeen resulteert in het ontstaan van een grindige laag in het bovenste deel van de rivierbedding.

Aanvankelijk neemt het grindgehalte in de grindige laag snel toe, omdat er relatief veel fijn materiaal aanwezig is dat weg kan spoelen. Ook de bodemdaling is dan groot. Het gehalte aan fijn materiaal neemt echter steeds meer af, waardoor ook de snelheid van bodemdaling afneemt. Uiteindelijk zal de grindige laag een min of meer constante samenstelling bereiken. Er komt dan een einde aan de bodemdaling. Het is mogelijk dat dit een statische evenwichtstoestand is, waarbij de bovenlaag van de rivierbedding zo grof is dat er geen rivierduinen meer gevormd kunnen worden en er geen bodemtransport meer plaatsvindt. Waarschijnlijker is echter dat er sprake is van een dynamisch evenwicht, waarbij de grindige laag tijdens hoogwaters langzaam stroomafwaarts schuift, terwijl de samenstelling van de laag niet meer verandert.

Het is onbekend hoe lang het duurt voordat een dergelijke evenwichtstoestand bereikt wordt. Uit tabel 4 blijkt dat de bodemdaling rond de Pannerdensche Kop sinds 1926 niet is afgenomen. Dit zou erop kunnen wijzen dat er nog geen evenwichtssituatie is bereikt en het grindgehalte van de grindige laag nog steeds toeneemt. Het is echter ook mogelijk dat de samenstelling van de grindige laag wel een evenwichtswaarde bereikt heeft, maar dat externe factoren zoals baggerwerkzaamheden recentelijk ervoor gezorgd hebben dat het bovenste deel van de grindige laag verdwenen is (§5.3.4). Op dat moment konden de hoogwaterduinen weer tot in de zandige laag reiken, waardoor opnieuw zand weggespoeld is en de bodem gedaald. Er vond dan opnieuw relatieve grindaanrijking plaats, totdat de grindige laag weer even dik was en dezelfde samenstelling had als voorheen.

Het optreden van selectieve erosie van fijn materiaal, waardoor een relatieve grindaanrijking ontstaat, is al eens genoemd als mogelijke verklaring voor het samenvallen van een periode van vergroving van het sediment met een periode van sterke bodemdaling in de IJssel (Ten Brinke, 1997). Voor het optreden van relatieve grindaanrijking rond de Pannerdensche Kop zijn in de literatuur echter geen aanwijzingen gevonden. Relatieve grindaanrijking vormt echter een aannemelijke verklaring voor het ontstaan van de grindige laag in een periode van bodemdaling en voor het feit dat het zandgehalte in de grindige laag toeneemt met de diepte (hoofdstuk 3). Het is moeilijk om hard te bewijzen of de grindige laag rond de Pannerdensche Kop inderdaad is ontstaan uit de zandige laag door relatieve grindaanrijking. Alleen mineralogisch onderzoek zou dit eventueel kunnen aantonen, indien de samenstelling van het sediment dat door de Rijn van bovenstrooms wordt aangevoerd is veranderd in de tijd.

De hypothese van relatieve grindaanrijking kan echter alleen juist zijn als aan een viertal voorwaarden is voldaan. 1. Ook bovenstrooms en benedenstrooms van de Pannerdensche Kop komen de grindige laag en de zandige laag voor en wel over een afstand zover als het grovere deel van de grindige laag in de relevante periode stroomafwaarts getransporteerd kan zijn. 2. De korrelgrootteverdeling van de grindige laag moet kunnen zijn ontstaan uit de korrelgrootteverdeling van de zandige laag door preferentiële erosie van de fijne fracties. 3. De bodemdaling die gepaard moet zijn gegaan met de relatieve grindaanrijking moet in overeenstemming zijn met de gemeten bodemdaling. 4. De grindige laag moet ongeveer even dik zijn als de transportlaag bij de grootste hoogwaters in de relevante periode. In de volgende paragrafen wordt beschreven of aan deze voorwaarden wordt voldaan.

#### **4.2.2 Voorkomens van de grindige en de zandige laag**

Bodemtransport kan worden opgevat als een laag bodemmateriaal die in stroomafwaartse richting schuift. De dikte van deze transportlaag wordt bepaald door de hoogte van de rivierduinen, welke afhangt van de afvoer. Hoe groter de afvoer, des te hoger zijn de duinen en des te dikker is de transportlaag. Met andere woorden: bij lage afvoeren is alleen het bovenste deel van de grindige laag in beweging, terwijl bij hoge afvoeren ook het onderste deel van de grindige laag in beweging is.

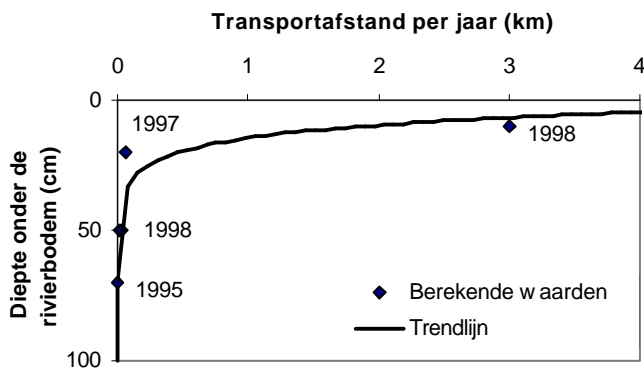
Het is mogelijk een schatting te maken van de snelheid waarmee bodemmateriaal op verschillende dieptes onder de rivierbedding stroomafwaarts verplaatst wordt, door de stroomafwaartse verplaatsing van de transportlaag bij een bepaalde afvoer (uit Wilbers, 1999) te vermenigvuldigen met de frequentie dat deze afvoer voorkomt (uit Middelkoop, 1997). In figuur 3 is voor een aantal afvoeren de dikte van de transportlaag in de Bovenrijn uitgezet tegen de gemiddelde, jaarlijkse, stroomafwaartse verplaatsing. Het blijkt dat de grindige laag ruwweg in

twee delen uiteenvalt. De bovenste 20 à 30 centimeter wordt snel stroomafwaarts verplaatst (zo'n 2 kilometer per jaar), terwijl de rest gemiddeld slechts 10 meter per jaar verplaatst wordt.

Als aangenomen wordt dat het proces van relatieve grindaanrijking geïnitieerd is rond 1850, toen de rivieren zich gingen insnijden als gevolg van riviernormalisaties en meanderbochtafsnijdingen (hoofdstuk 5), kan het grootste deel van de grindige laag sindsdien dus slechts anderhalve kilometer stroomafwaarts verplaatst zijn. Dit betekent dat de hypothese van relatieve grindaanrijking mogelijk is als de grindige laag en de zandige laag continu aanwezig zijn tussen minimaal anderhalve kilometer bovenstrooms (km 863,8) en benedenstrooms (km 870,8) van het onderzoeksgebied Pannerdensche Kop.

Bovenstrooms van de Pannerdensche Kop zijn de grindige laag en de zandige laag inderdaad aangetroffen, al vanaf kilometer 850, maar continu vanaf kilometer 857,5 (Gruijters & De Kleine, 2001 en Gruijters *et al.*, 2001<sup>b</sup>). Ook benedenstrooms zijn beide lagen aanwezig, maar over een veel kortere afstand (archief Kleinhans).

Het traject waarin zowel de zandige laag als de grindige laag voorkomen beslaat dus bijna 20 kilometer. Dit betekent dat relatieve grindaanrijking niet alleen rond de Pannerdensche Kop, maar ook bovenstrooms (en benedenstrooms) ervan kan hebben plaatsgevonden.



Figuur 3. De migratiesnelheid op verschillende diepten van de grindige laag.

#### 4.2.3 Vergelijking van de korrelgrootteverdelingen

Volgens de hypothese van relatieve grindaanrijking is de grindige laag een erosieresidu. Voor elke korrelgrootteklasse kan dan geschreven worden:

$$V_{i(\text{grindige laag})} = r_i V_{i(\text{oorspr. laag})}$$

Met:  $V_{i(\text{grindige laag})}$  het volume sediment in korrelgrootteklasse  $i$  in de grindige laag,  $V_{i(\text{oorspr. laag})}$  het volume sediment in korrelgrootteklasse  $i$  in de oorspronkelijke laag (de laag die door relatieve grindaanrijking geërodeerd en vergrofd is) en  $r_i$  de fractie van het volume sediment in korrelgrootteklasse  $i$  in de oorspronkelijke laag dat overgebleven is na het proces van relatieve grindaanrijking. Deze formule kan als volgt omgeschreven worden:

$$V_{i(\text{grindigelaag})} = r_i V_{i(\text{oorspr. laag})} \Leftrightarrow f_{i(\text{grindigelaag})} V_{\text{tot}(\text{grindigelaag})} = r_i f_{i(\text{oorspr. laag})} V_{\text{tot}(\text{oorspr. laag})} \Leftrightarrow$$

$$f'_{i(\text{grindigelaag})} = f_{i(\text{grindigelaag})} \frac{V_{\text{tot}(\text{grindigelaag})}}{V_{\text{tot}(\text{oorspr. laag})}}$$

Met:  $V_{\text{tot}(\text{grindige laag})}$  het totale volume sediment in de grindige laag,  $V_{\text{tot}(\text{oorspr. laag})}$  het totale volume sediment in de oorspronkelijke laag,  $f_{i(\text{grindige laag})}$  het aandeel van korrelgrootteklasse  $i$  in de totale korrelgrootteverdeling van de grindige laag en  $f_{i(\text{oorspr. laag})}$  het aandeel van korrelgrootteklasse  $i$  in de totale korrelgrootteverdeling van de oorspronkelijke laag.  $f'_{i(\text{grindige laag})}$  is gelijk aan  $r_i f_{i(\text{oorspr. laag})}$  en geeft het aandeel in de totale korrelgrootteverdeling van de oorspronkelijke laag aan van dat deel van korrelgrootteklasse  $i$  dat overgebleven is na het proces van relatieve grindaanrijking. De grofste korrelgrootteklassen zijn immobiel en daarvoor geldt dat  $r_i$  gelijk is aan 1, ofwel  $f'_{i(\text{grindige laag})}$  is  $f_{i(\text{oorspronkelijke laag})}$ , zodat:

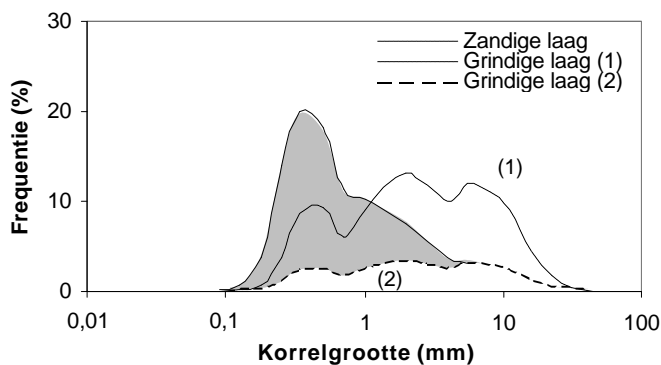
$$\frac{V_{tot(\text{grindigelaag})}}{V_{tot(\text{oorspr. laag})}} = \frac{f_{\text{grofste fracties(oorspr. laag)}}}{f_{\text{grofste fracties(grindigelaag)}}$$

Als deze formule gesubstitueerd wordt in de vorige en aangenomen wordt dat de samenstelling van het bovenste deel van de zandige laag gelijk is aan de samenstelling van de oorspronkelijke laag, dan volgt (zie ook Lisle & Hilton, 1999):

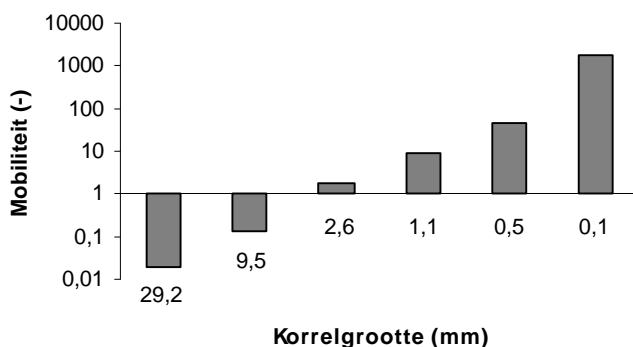
$$f_{i, \text{grindigelaag}}' = f_{i, \text{grindigelaag}} \cdot \left( \frac{f_{\text{grofste fracties(zandige laag)}}}{f_{\text{grofste fracties(grindigelaag)}}} \right)$$

Met deze formule kan de korrelgrootteverdeling van de grindige laag zodanig herschaald worden dat hij het deel van de zandige laag aangeeft dat overgebleven is na het proces van relatieve grindaanrijking (fig. 4).

Het verschil tussen de curve van de zandige laag en de herschaalde curve van de grindige laag geeft dan het deel van de korrelgrootteverdeling van de zandige laag weer dat geërodeerd moet zijn om de korrelgrootteverdeling van de grindige laag te verkrijgen. Geheel in overeenstemming met de theorie van relatieve grindaanrijking blijkt dat voornamelijk de korrelgroottefracties kleiner dan 1 millimeter geërodeerd zijn en dat de hoeveelheid erosie in de grovere fracties steeds kleiner wordt. De fracties grover dan 8 millimeter zijn in het geheel niet geërodeerd.



Figuur 4. Gemiddelde korrelgrootteverdelingen van de grindige laag en de zandige laag (naar: Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>). Met (1) is de gemeten korrelgrootteverdeling van de grindige laag aangegeven. (2) is de gereduceerde (herschaalde) verdeling van de grindige laag (zie tekst). Het gearceerde vlak geeft het deel van de korrelgrootteverdeling van de zandige laag weer dat geërodeerd moet zijn om de korrelgrootteverdeling van de grindige laag te verkrijgen.



Figuur 5. De mobiliteit van enkele korrelgrootteklassen (weergegeven met het klassenmidden), uitgedrukt als de ratio tussen de actuele en de kritieke schuifspanning.

Een controle is mogelijk door te berekenen of de grens tussen mobiele en niet-mobiele korrelgroottefracties inderdaad rond de 8 millimeter ligt. Daartoe is een mobiliteitsindex berekend aan de hand van stroomsnelheid- en waterdieptegegevens uit WAQUA voor een afvoer van 2400 m<sup>3</sup>/s (zie hoofdstuk 7). De mobiliteit voor korrelgrootteklasse *i* is uitgedrukt als de ratio tussen de actuele Shields-schuifspanning betrokken op de korrelruwheid ( $\mu_i$ ) en de kritieke Shields-schuifspanning, gecorrigeerd voor hiding-exposure-effecten ( $\mu_{cr,i}$ ):

$$Mobiliteit = \left( \frac{mq_i}{x_i q_{cr,i}} \right)$$

Voor de gebruikte waarden van de parameters wordt verwezen naar hoofdstuk 7. Mobiliteitswaarden kleiner dan één betekenen dat de desbetreffende korrelgrootteklasse niet mobiel is. Uit figuur 5 blijkt dat de grens tussen mobiele en niet-mobiele korrelgroottefracties ligt tussen 2,6 en 9,5 millimeter. Dit is dus in overeenstemming met de constatering dat alleen de korrelgroottefracties kleiner dan 8 millimeter geërodeerd moeten zijn indien de grindige laag ontstaan is uit de zandige laag.

#### 4.2.4 Vergelijking van de bodemdaling

Uit figuur 4 kan afgeleid worden dat het oppervlak onder de herschaalde curve voor de grindige laag slechts 25 % bedraagt van het oppervlak van de curve van de zandige laag. Dit betekent dat bij relatieve grindaanrijking elke 25 centimeter van de grindige laag afkomstig moet zijn uit 1 meter zandige laag. Er treedt dan een bodemdaling op van 75 cm.

Het is nu mogelijk de bodemdaling te berekenen die moet zijn opgetreden als de grindlaag rond de Pannerdensche Kop geheel het gevolg is van relatieve grindaanrijking. Uit tabel 5 blijkt dat deze ongeveer 2 meter 80 bedraagt. Indien de berekende bodemdaling (tabel 5) vergeleken wordt met de gemeten bodemdaling (tabel 4), blijkt dat de berekende bodemdaling stevast hoger is dan de gemeten bodemdaling. Dit is precies wat verwacht wordt indien inderdaad relatieve grindaanrijking is opgetreden, want de meetwaarden hebben betrekking op de periode vanaf 1926 of 1950, terwijl aangenomen wordt dat de relatieve grindaanrijking al veel eerder is begonnen (tussen 1850 en 1900). Toch zijn met name voor de Waal de afwijkingen tussen de gemeten en de berekende bodemdaling groot. Dit kan het gevolg zijn van een onderschatting van het grindgehalte in de weggeërodeerde zandige laag. De samenstelling van de weggeërodeerde zandige laag hoeft immers niet exact gelijk te zijn aan de samenstelling van de huidige, zandige laag onder de grindige laag. Het is echter ook niet uit te sluiten, maar zelfs aannemelijk dat een deel van de grindige laag in de Waal niet het gevolg is van relatieve grindaanrijking, maar van aanvoer van bovenstrooms (sedimentatie).

Tabel 5. Bodemdaling rond de Pannerdensche Kop als aangenomen wordt dat de hypothese van relatieve grindaanrijking juist is.

Rijntak	Dikte grindige laag (m)	Bodemdaling (m)
Bovenrijn	0,88 x 75/25	2,6
Waal	0,97 x 75/25	2,9
Pannerdensch Kanaal	0,93 x 75/25	2,8
Gemiddeld	0,93 x 75/25	2,8

#### 4.2.5 Vergelijking van de dikte van de grindige laag met die van de transportlaag

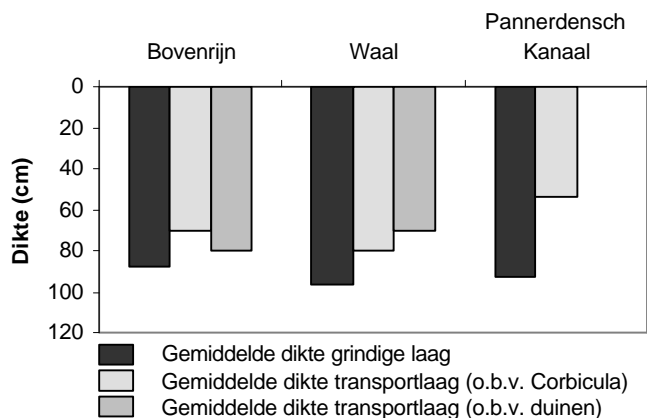
De belangrijkste voorwaarde voor de juistheid van de hypothese van relatieve grindaanrijking is dat de dikte van de grindige laag ongeveer gelijk is aan de dikte van de transportlaag tijdens de grootste hoogwaters. Relatieve grindaanrijking vindt namelijk alleen plaats in de bodemlaag die bij hoogwater in beweging is en er kan geen toename van het grindgehalte optreden in bodemlagen die bij hoogwater niet in beweging zijn.

Er zijn twee manieren om de dikte van de transportlaag te bepalen. Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>, 2001<sup>b</sup>) kijken naar het voorkomen van de schelpsoort *Corbicula Fluminea* in de boorkernen. Deze schelpsoort komt pas zo'n 15 jaar voor in het stroomgebied van de Rijn en de laag waarin *Corbicula* voorkomt, is met zekerheid in de afgelopen 15 jaar in beweging geweest. Het probleem is echter dat afwezigheid van *Corbicula* op een bepaalde diepte niet betekent dat dit deel van de grindige laag niet in beweging is geweest.

De tweede methode is de dikte van de transportlaag te relateren aan de duinhoogte. Bij min of meer driehoekige duinen is de dikte van de transportlaag ongeveer gelijk aan de helft van de duinhoogte. Voor de bepaling van de maximale dikte van de transportlaag moet niet gekeken worden naar de gemiddelde duinhoogte, want uit Kleinhans (2002, hoofdstuk 9) blijkt dat er een

grote variatie bestaat in de duinhoogte. De maximale dikte van de transportlaag is daarom bepaald op basis van de gemiddelde hoogte van de hoogste duinen die zijn waargenomen tijdens het hoogwater van 1995 (Kleinhans, 2002 - hoofdstuk 9). Dit was voor het Pannerdensch Kanaal niet mogelijk, omdat dat daar in 1995 geen metingen zijn uitgevoerd van de duinhoogte.

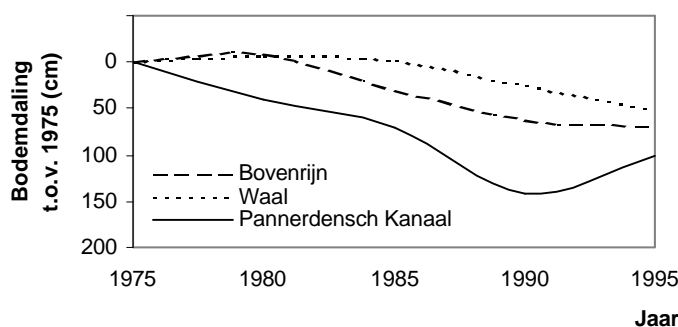
Uit figuur 6 blijkt dat de twee manieren om de dikte van de transportlaag te bepalen voor de Bovenrijn en de Waal vrijwel dezelfde resultaten opleveren. De transportlaag bij hoogwater is in beide riviertakken zo'n 80 centimeter dik. In het Pannerdensch Kanaal is de transportlaag zo'n 55 centimeter dik, maar deze waarde berust geheel op het voorkomen van *Corbicula* en hoeft dus niet juist te zijn.



Figuur 6. Vergelijking van de dikte van de grindige laag met de maximale dikte van de transportlaag bepaald op basis van gemeten duinhoogtes en op basis van het voorkomen van de schelpsoort *Corbicula Fluminea* (naar: Kleinhans, 2002, hoofdstuk 9 en Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>).

Maximale duinhoogte in 1995:  
 Bovenrijn: 150 cm  
 Waal: 140 cm

De grindige laag in het Pannerdensch Kanaal is 39 centimeter dikker dan de transportlaag bij hoogwater (fig. 6). Dit betekent dat de grindige laag hier niet geheel het gevolg kan zijn van relatieve grindaanrijking, maar dat er een aanzienlijke hoeveelheid sedimentatie moet zijn opgetreden. Dit wordt bevestigd door Ten Brinke & Gözl (2001) die op basis van dwarspeilingen hebben bepaald dat tussen 1990 en 1995 42 centimeter sedimentatie is opgetreden in het Pannerdensch Kanaal (fig. 7). Uit figuur 7 blijkt ook dat er tussen 1975 en 1980 5 tot 10 centimeter sedimentatie is opgetreden in de Waal en de Bovenrijn. Ook in deze riviertakken kan de grindige laag dus niet alleen het gevolg zijn van relatieve grindaanrijking. Omdat de transportlaag en de grindige laag in de Bovenrijn ongeveer even dik zijn (fig. 6), is het echter waarschijnlijk dat de invloed van sedimentatie hier klein is geweest. Dit geldt in mindere mate voor de Waal; daar is de grindige laag gemiddeld 17 centimeter dikker dan de transportlaag bij hoogwater.



Figuur 7. Bodemdaling in de Bovenrijn (km 865,4 – 867,4), de Waal (km 867,4 - 869) en het Pannerdensch Kanaal (km 867,4 - 872) (naar: Ten Brinke & Gözl, 2001).

#### 4.2.6 Discussie

Uit voorgaande paragrafen blijkt dat het zeer aannemelijk is dat er inderdaad relatieve grindaanrijking is opgetreden rond de Pannerdensch Kop, hoewel er geen harde bewijzen voor te geven zijn. Tevens is gebleken dat niet de gehele grindige laag kan zijn ontstaan door relatieve grindaanrijking: een klein deel is het gevolg van aanvoer van bovenstrooms (sedimentatie). Deze aanvoer komt echter niet van zó ver bovenstrooms dat de aannamen in de berekening van

grindaanrijking uit de onderliggende zandlaag niet opgaan. De samenstelling van de zand- en de grindlaag kan voor de ruwe berekening namelijk constant worden verondersteld in het hele gebied rond de Pannerdensche Kop. De conclusie is dan ook dat relatieve grindaanrijking in samenhang met bodemdaling in het gehele gebied rond de Pannerdensche Kop heeft geleid tot een toename van de mediane korrelgrootte en daarom een grote invloed heeft gehad op de bodemsamenstelling op macroschaal.

### **4.3 Kleinschalige effecten op de bodemsamenstelling**

#### **4.3.1 Effect van het geërodeerde zand**

Het is niet te verwachten dat relatieve grindaanrijking voor significante korrelgroottevariatie op micro- en mesoschaal zorgt. Door verschillen in de samenstelling van de geërodeerde zandlaag kunnen wel verschillen ontstaan in de samenstelling van de grindlaag, maar deze verschillen worden tijdens het eerstvolgende hoogwater weggepoetst door alluviale processen als bochtsoortering en verticale sortering door duinen (zie hoofdstuk 6). Omdat waarschijnlijk ook bovenstrooms van de Pannerdensche Kop selectieve erosie van de onderliggende zandlaag plaatsvindt, zal de aanvoer van zand naar de Pannerdensche Kop bij hoogwater tijdelijk toenemen. Dit heeft een tijdelijke verfijning van de korrelgrootte van de bovengrond tot gevolg, maar het is de vraag hoe significant dit is. Tenzij het vrijgekomen fijne materiaal wordt verplaatst als zandgolven (§6.2.3), zal het nauwelijks ruimtelijke variatie op micro- of mesoschaal kan veroorzaken. Bovendien is de hoeveelheid zand die tijdens hoogwaters vrij kan komen doorgaans klein in verhouding tot de actieve laagdikte, zal ook het effect op de bodemsamenstelling gering zal zijn (Kleinhans, 2002, hoofdstuk 6).

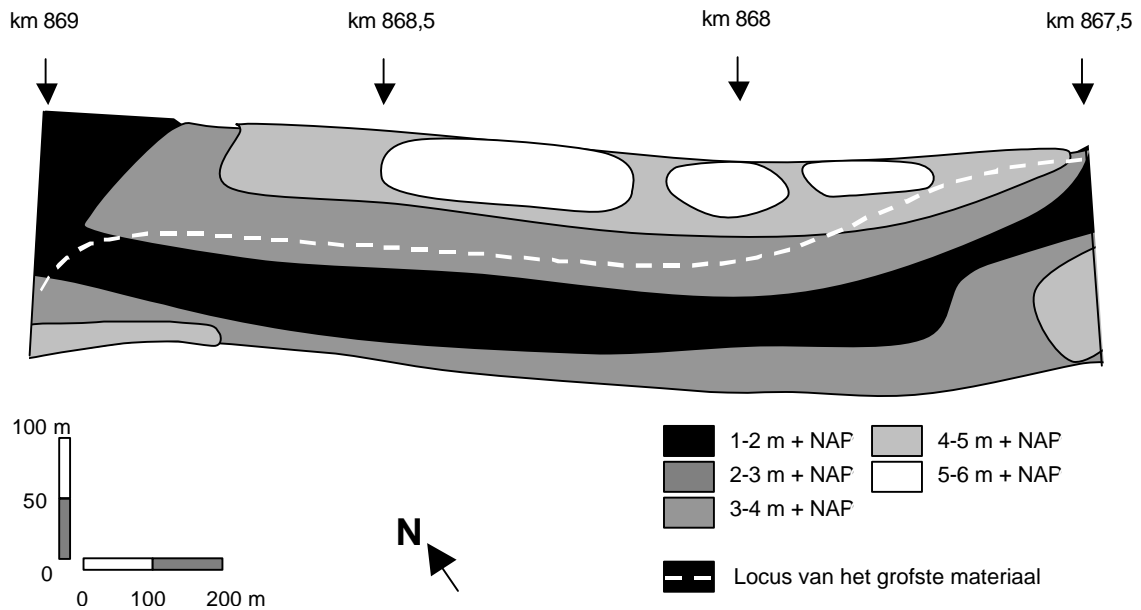
#### **4.3.2 De invloed van resistente lagen**

Ook lokale voorkomens van resistente lagen kunnen zorgen voor korrelgroottevariatie op meso- en microschaal. In vrij meanderende rivieren vormen resistente grind-, klei- of veenlagen in de oevers een belemmering voor de bochtmigratie. Ze zijn daarmee van invloed op het stromingspatroon en de sedimentverdeling. De oevers van de Rijn zijn echter vastgelegd met kribben, zodat bochterosie verwaarloosd moet worden. Hoewel uit de boringendatabase van de Universiteit Utrecht blijkt dat er met name in de oevers van de Waal en het Pannerdensch Kanaal resistente kleilagen voorkomen (bijvoorbeeld de eerder genoemde vroeg-Holocene Afzettingen van Wijchen; Berendsen & Stouthamer, 2001), is het dus niet waarschijnlijk dat deze van invloed zijn op de korrelgroottevariatie.

Lokale voorkomens van resistente lagen (klei of grof grind) op geringe diepte beneden de huidige rivierbedding kunnen verdere bodemerrosie remmen en de ontwikkeling van een 'normaal' asymmetrisch bochtprofiel hinderen. Dit belemmert de bochtsoortering en kan zo een grote invloed uitoefenen op de bodemsamenstelling. Verder heeft de lokale aansnijding van een resistente laag natuurlijk ook een direct effect op de korrelgroottevariatie. Door Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>) zijn echter geen resistente lagen aangetroffen op geringe diepte in de bedding van de rivieren rond de Pannerdensche kop, noch in de boringen, noch in de seismische data. De Kreftenheye-afzettingen die vaak als grof en resistent beschouwd worden, bestaan rond de Pannerdensche Kop uit zand (ze behoren tot de zandige laag) en zijn veel fijner dan het sediment dat aan het oppervlak ligt (de grindige laag). Het is evenwel mogelijk dat er zeer lokaal toch resistente lagen voorkomen die niet naar voren zijn gekomen in het seismisch onderzoek en de lithologische boringen. Indien er lokaal resistente lagen voorkomen, dan zouden er afwijkingen in het duinpatroon te zien kunnen zijn. Hierbij moet wel worden bedacht dat de natuurlijke variatie van duindimensies enorm is en wordt beïnvloed door rivierbreedte en waterdiepte, locale sedimentsamenstelling en kribben en andere oeververdedigingswerken.

Zowel in de Waal als in het Pannerdensch Kanaal komen inderdaad gebieden voor waar de duinen significant slechter zijn ontwikkeld (Wilbers, 1999). In het Pannerdensch Kanaal (km 868-869) komen nauwelijks duinen voor nabij de noordoever. Het gaat hier om een binnenbocht met een relatief hoge bodemligging en een lage stroomsnelheid. Het sediment is zeer grof, omdat het Pannerdensch Kanaal vrijwel uitsluitend grof materiaal ontvangt uit de Bovenrijn (§6.2.1). Het is waarschijnlijk deze combinatie van een geringe waterdiepte, een lage stroomsnelheid en grof

sediment die ervoor zorgt dat hier nauwelijks duinen voorkomen en niet het voorkomen van resistente lagen (zie ook Kleinhans *et al.*, 2002). In de Waal (km 868-869) zijn de duinen net ten noorden van de rivieras beduidend kleiner. Ook hiervoor geldt dat dit waarschijnlijk niet veroorzaakt wordt door resistente lagen. Het gaat hier om het einde van de eerste (rechter) Waalbocht (km 867-868,5). De bodemligging is volledig aangepast aan deze bocht en is dus hoog in de noordelijke helft van de Waal. De bochtsoortering is echter nog niet aangepast aan deze bocht. De locus van het grofste materiaal steekt juist rond kilometer 868,5 de rivier over van de rechter naar de linkeroever. Net ten noorden van de rivieras is er dus een combinatie van grof materiaal en een hoge bodemligging, hetgeen de waarschijnlijke oorzaak is van de lagere duinhoogte in dit gebied (figuur 8). Er kan derhalve geconcludeerd worden dat er geen significante geologische invloeden (resistente lagen) zijn op de korrelgroottevariatie op meso- en microschaal.



Figuur 8. De bodemligging en de locus van het grofste materiaal in de eerste anderhalve kilometer van het zomerbed van de Waal (naar Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>). De stromingsrichting is van rechts naar links.

## 5 Antropogene invloeden op de bodemsamenstelling

Dit hoofdstuk behandelt de mogelijke antropogene invloeden op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop. Eerst wordt een overzicht gegeven van de verschillende menselijke ingrepen en activiteiten die hebben plaatsgehad rond de Pannerdensch Kop. Daarna wordt beschreven in hoeverre deze activiteiten invloed hebben gehad op de bodemsamenstelling. Daarbij wordt weer onderscheid gemaakt tussen grootschalige en kleinschalige invloeden op de bodemsamenstelling.

### 5.1 Geschiedenis van menselijke activiteiten

#### 5.1.1 Bedijkingen

Om het rivierengebied te beschermen tegen overstromingen werden vanaf circa 1000 AD op veel plaatsen dijken aangelegd. Dit gebeurde eerst in het westelijk deel van het rivierengebied, later ook in het oostelijk deel van het rivierengebied. De eerste dijken langs de Waal en de Bovenrijn stammen dus uit de tweede helft van de Middeleeuwen (Berendsen, 1997). Het Pannerdensch Kanaal en het Bijlandsch Kanaal zijn aangelegd in de 18<sup>e</sup> eeuw. Vanzelfsprekend stammen ook de dijken langs deze kanalen grotendeels uit de 18<sup>e</sup> eeuw (Van de Ven, 1976). Toen zijn ook langs de Bovenrijn en de Waal op verschillende plaatsen nieuwe dijken aangelegd en oude aangepast (zie volgende paragraaf).

#### 5.1.2 De aanleg van het Pannerdensch Kanaal en het Bijlandsch Kanaal

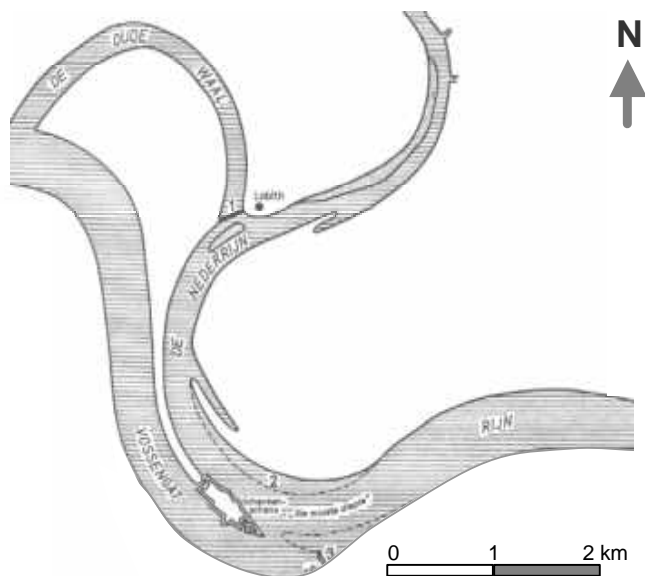
Tot in de jaren '30 van de 16<sup>e</sup> eeuw ging een belangrijk deel van de Rijnafvoer door de Nederrijn en de IJssel. In deze tijd lag de splitsing van de Waal en de Nederrijn bij Lobith. Rond 1538 brak enige kilometers bovenstrooms van het splitsingspunt een oeverwal door en er kwam een nieuwe bovenloop van de Waal tot stand (fig. 9; Van de Ven, 1976). Het verhang in deze nieuwe bovenloop van de Waal was groter dan het verhang in de Nederrijn en de afvoer van de Nederrijn nam dan ook flink af ten gunste van de afvoer van de Waal, waardoor de Nederrijn begon te verzanden (Ploeger, 1992).

In de 16<sup>e</sup> eeuw zijn nauwelijks pogingen ondernomen om iets te veranderen aan de voor veel steden steeds ongunstiger wordende afvoerverdeling, mede door de oorlog met Spanje (de Tachtigjarige Oorlog). In de 17<sup>e</sup> eeuw werden wel een groot aantal werken uitgevoerd om de afvoerverdeling te verbeteren, maar deze werken haalden niets uit. In 1696 bedroeg de afvoer van de Nederrijn nog slechts 4 procent van de Bovenrijnafvoer (Van de Ven, 1976). Het stromingsvermogen (*Eng. stream power*) van de Bovenrijn en de Waal was in deze periode drie à vier maal groter dan dat van de Nederrijn (Hesselink, 2002), waardoor de Nederrijn steeds verder aanzandde.

Inmiddels dreigde een inval van de Franse troepen onder leiding van de Zonnekoning. De doorwaadbare Nederrijn en IJssel vormden zwakke plaatsen in de verdediging van de Republiek der Verenigde Nederlanden en er werd besloten tot de aanleg van vestingwerken. Benedenstrooms van Pannerden werd in 1701 een *retranchement* aangelegd, een verschansing bestaande uit een wal met een 45 meter brede en tweeënehalve meter diepe gracht erlangs (fig. 10). Het zuidelijk deel van de wal volgde de loop van de reeds bestaande Overbetuwse dwarsdijk. Het noordelijk deel van de wal werd langs een strang aangelegd die in de Nederrijn uitmondde. De strang werd uitgediept om als gracht te dienen (Van de Ven, 1976).

In 1705 werd besloten de retranchementsgracht om te vormen tot een kanaal en zo de afvoer van de Nederrijn (en IJssel) te vergroten. In 1706 werd begonnen met de werkzaamheden. De retranchementsgracht werd aan beide zijden verlengd opdat hij aansloot op de Waal en de Nederrijn. De bovenmond werd verbreed tot 90 meter om meer water in het kanaal te trekken. De westelijke oever van het kanaal werd verstevigd om oevererosie en ondergraving van de retranchementswal tegen te gaan. Op de oostelijke oever werd een nieuwe dijk gebouwd. Het zuidelijke deel van deze dijk had bandijkhoogte en diende om Pannerden en de omliggende dorpen te beschermen. Het noordelijke deel van de dijk was veel lager en diende als zomerkade. In 1709 waren de werken gereed. De aanleg van het Pannerdensch Kanaal had zo'n f 125.000,- gekost (Van de Ven, 1976).





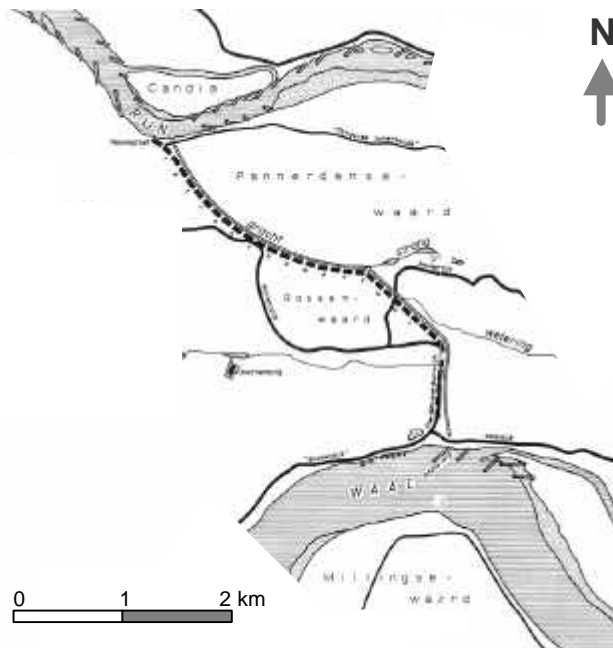
Figuur 9. De splitsing van de Bovenrijn in de 16<sup>e</sup> eeuw (Van de Ven, 1976). Tot 1538 splitsten de Waal en de Nederrijn zich bij Lobith af van de Bovenrijn. Toen ontstond een nieuwe bovenloop van de Waal (aangegeven met "Vossengat"). De oude bovenloop van de Waal ("De Oude Waal") verzandde.

Hoewel het Pannerdensch kanaal na de aanleg goed onderhouden werd, werd het steeds meer uitgeschuurd. In 1745 had het een breedte van 140 à 190 meter en een diepte van 6 à 7 ½ meter bereikt. De afvoer van de Nederrijn bedroeg inmiddels 45 procent van de Bovenrijnafvoer, tegen een gewenste afvoer van 33 procent. Regelmatig kreeg de Nederrijn zelfs zoveel water te verwerken dat er overstromingen optraden. Om de hoeveelheid water die via de oude bovenmond (nu Oude Rijn geheten) de Nederrijn instroomde te verminderen werd bij het voormalige splitsingspunt een nieuwe dijk aangelegd. Ook op de rechteroever van de Bovenrijn bij Pannerden kwam een nieuwe dijk om verdere verbreding van het Pannerdensch Kanaal te voorkomen. Op de tegenoverliggende oever bij Millingen kwam een dam die ervoor moest zorgen dat er geen bochtafsnijding plaats zou vinden. Verder werden er op verschillende plaatsen kribben aangelegd (Van de Ven, 1976).

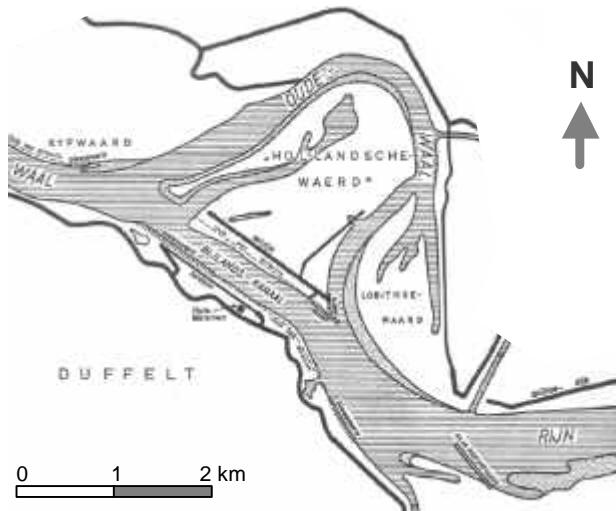
De uitgevoerde werken hadden geen enkel effect. De afvoer van de Nederrijn bleef toenemen. Dit werd mede veroorzaakt door het ontstaan van de Bijlandmeander in de Bovenrijn bovenstrooms van Pannerden vanaf 1750 (figuur 1). Het gevaar bestond dat deze meander zo ruim zou worden dat de Bovenrijn zich daar geheel in de Nederrijn zou storten. In 1764 begon de Bijlandmeander zich versneld te verplaatsen. De stroming liep nu recht aan op de linkeroever van de Bovenrijn tegenover de bovenmond van het Pannerdensch Kanaal. Deze kalfde af en het daarbij vrijkomende zand had reeds in 1765 een zandrug gevormd voor de mond van het Pannerdensch Kanaal. Na jaren van ongecontroleerde verbreding en verdieping van het Pannerdensch Kanaal ontstond nu opeens het gevaar voor verzanding (Van de Ven, 1976).

In 1775 werd daarom de Bijlandmeander afgesneden door een kanaal van 2,5 meter diep en 115-140 meter breed. Met de vrijgekomen grond werd op de noordelijke oever een dijk gebouwd en de reeds bestaande dijk op de zuidelijke oever van het kanaal werd versterkt. Ondanks de aanleg van verschillende kribben en lijdammen, trok het Bijlandsch Kanaal echter nauwelijks water. Nu schoot de natuur te hulp. In 1776 was de Bovenrijn dichtgevroren. Bij het begin van de dooi werd het ijs in het Bijlandsch Kanaal weggekapt, terwijl dat in de Bijlandmeander ongemoeid werd gelaten. Het water stortte zich in één keer in het Bijlandsch Kanaal, zodat dit werd uitgeschuurd tot een diepte van 5,5 meter en een breedte van 190-215 meter (fig. 11; Van de Ven, 1976).

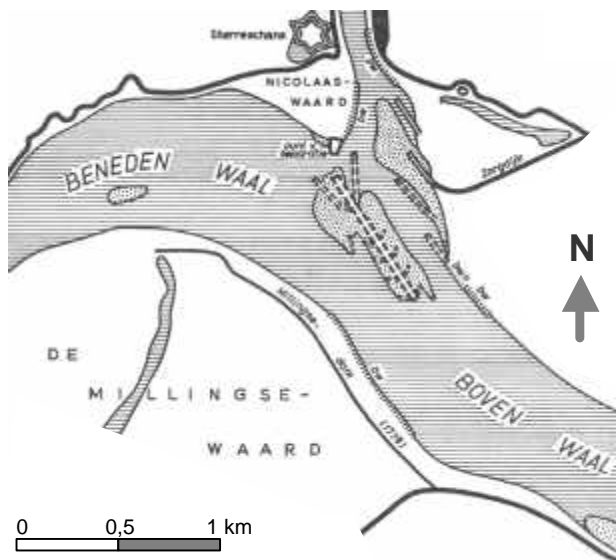
In de winter van 1780-'81 verplaatste de zandbank in de mond van het Pannerdensch Kanaal zich stroomafwaarts. Hij lag nu in het verlengde van de linkeroever van het kanaal en was verworpen tot een enorm schephoofd dat veel Bovenrijnwater het Pannerdensch Kanaal in stuwde (fig. 12). In de jaren 1782-1795 werd dit schephoofd vastgelegd en verlengd (Van de Ven, 1976). Nu was een stabiele afvoerverdeling over de Rijntakken gevormd. 70 procent van de Bovenrijnafvoer ging via de Waal en 30 procent via de Nederrijn.



Figuur 10. De omgeving van Pannerden omstreeks 1705 (bron: Van de Ven, 1976). De retranchementswal en de retranchementsgracht zijn te breed getekend.



Figuur 11. De doorsnijing van de Bijlandmeander in 1784 (Van de Ven, 1976). Het afgebeelde gebied ligt direct ten oosten van het gebied dat in figuur 10 en 12 is afgebeeld.



Figuur 12. De bovenmond van het Pannerdensch Kanaal in 1781. Duidelijk zichtbaar is de grote zandbank. Ook de voorgenomen werkzaamheden staan aangegeven: het grote, nieuwe schephoofd en een aantal oeververstevingen (Van de Ven, 1976). De riviertak die met "Boven Waal" staat aangegeven is de huidige Bovenrijn.

De Oude Rijn bleef water voeren. Pas in 1959 werd deze definitief afgesloten. Voorafgaand hieraan werden in 1953 werken uitgevoerd om de afvoercapaciteit van het Pannerdensch Kanaal te vergroten. De bocht halverwege het Pannerdensch Kanaal werd verbeterd, waardoor de rivier hier 160 m korter werd en de afvoercapaciteit van het zomerbed toenam. Het winterbed werd verruimd door op de rechter oever een nieuwe bandijk te leggen (Van de Ven, 1976; Ploeger, 1992).

### 5.1.3 De riviernormalisatie

Tussen 1804 en 1861 werden verschillende plannen gemaakt om de afvoercapaciteit van de rivieren te vergroten, de vorming van ijssdammen te voorkomen en de scheepvaart te vergemakkelijken. Uiteindelijk werd besloten de rivieren te *normaliseren*: zandbanken werden verwijderd, de geulbreedte werd verminderd en de oevererosie werd tegengegaan door de aanleg van een regelmatige rij kribben (Middelkoop, 1997). Deze plannen werden uitgevoerd in een aantal fases tussen 1850 en 1934 (tabel 6). De Bovenrijn kreeg een normaalbreedte van 340 meter, de Waal een breedte van 260 meter en het Pannerdensch Kanaal een breedte van 130-140 meter. De afstand tussen de kribben bedraagt in de Bovenrijn en de Waal zo'n 200 meter en in het Pannerdensch Kanaal ongeveer 100 meter (TDN, 1985 en 1990).

Tabel 6. Riviernormalisatiefasen in de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal (naar: Middelkoop, 1997 en Ploeger, 1992).

Rijntak	1e fase	2e fase	3e fase
Bovenrijn/Waal	1850-1875	1890	1900-1916
Pannerdensch Kanaal	1850-1875?	1890	1929-1934

### 5.1.4 De aanleg van stuwen

Tussen 1954 en 1967 zijn in de Nederrijn en de Lek een drietal stuwen aangelegd, om de IJsselafvoer te vergroten. Dit is van belang voor de instandhouding van het zoetwaterreservoir in het IJsselmeer, dat irrigatiewater levert voor geheel Noord-Nederland. De meest bovenstroomse stuw ligt bij Driel. Deze is geheel gesloten bij Bovenrijnafvoeren van minder dan 1400 m<sup>3</sup>/s. Er stroomt dan slechts 25 m<sup>3</sup>/s door de Nederrijn, de rest gaat door de IJssel. Bij een Bovenrijnafvoer van 1400 m<sup>3</sup>/s gaat 25 m<sup>3</sup> door de Nederrijn en 285 m<sup>3</sup>/s door de IJssel. Als de Bovenrijnafvoer toeneemt, leidt men de meerdere afvoer op het Pannerdensch Kanaal in eerste instantie geheel door de Nederrijn. De stuw bij Driel wordt daartoe zoveel geopend dat op de IJssel een afvoer van 285 m<sup>3</sup>/s gehandhaafd blijft. Is de Bovenrijnafvoer groter dan 2300 m<sup>3</sup>/s, dan is de stuw bij Driel geheel geopend. Er is dan sprake van een natuurlijke, vrije afvoerverdeling. De twee andere stuwen in de Nederrijn/Lek liggen bij Amerongen en Hagestein. Deze zijn geheel geopend vanaf een Bovenrijnafvoer van 3000 m<sup>3</sup>/s (Ploeger, 1992).

### 5.1.5 Scheepvaart

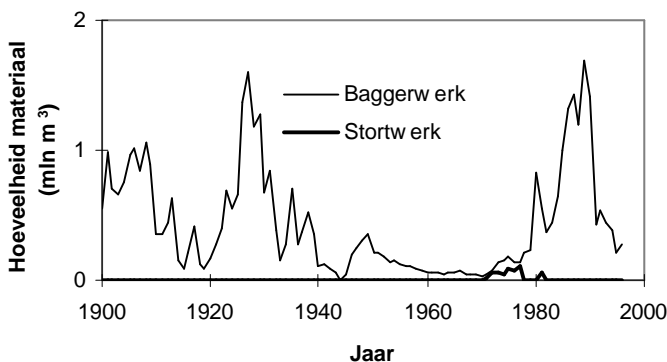
De grootte van de schepen die over de Rijntakken varen, is sinds 1840 sterk toegenomen. Rond 1800 gold een zeilschip met een lengte van 30 meter en een laadvermogen van 250 ton als groot. In 1850 waren er al stoomschepen van meer dan 60 meter lengte en in 1890 waren de grootste schepen meer dan 90 meter lang (Ploeger, 1992). Tegenwoordig zijn er schepen met een lengte van meer dan 180 meter lang en zo'n 3 procent van de schepen heeft een laadvermogen van meer dan 3000 ton (CBS, 2000). De maximale diepteligging bedraagt nu meer dan 4 meter (duwvaart).

Tezamen met de toename van het scheepstonnage is ook de omvang van het goederenvervoer op de Rijn toegenomen. In 1998 werd 112 miljoen ton lading langs de Pannerdensch Kop naar Duitsland vervoerd, voornamelijk bestaande uit ertsen en brandstoffen. In hetzelfde jaar passeerde 46 miljoen ton lading de Pannerdensch Kop in stroomafwaartse richting. Dit stroomafwaarts transport bestond voor een groot deel uit zand en grind (CBS, 2000). Uitgaande van een (geschat) gemiddeld laadvermogen van 1500 ton per schip kan geconcludeerd worden dat er in 1998 zo'n 150.000 schepen de Pannerdensch Kop gepasseerd moeten zijn.

### 5.1.6 Bagger- en stortwerk

Een geheel ander type menselijke activiteit op de Rijntakken is het bagger- en stortwerk. Ten Brinke heeft een dataset samengesteld van bagger- en stortwerkzaamheden voor de Bovenrijn, de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn/Lek en de IJssel. Een gedeelte van deze data is gepubliceerd in Ten Brinke & Gözl (2001). De data zijn voor een groot deel gebaseerd op vergunningen; ze geven dus de toegestane bagger- of storthoeveelheden aan maar niet de werkelijke. Vaak is ook de exacte locatie waar werkzaamheden zijn uitgevoerd niet bekend. Het is dus zaak de dataset met enige voorzichtigheid te hanteren. Hoewel de dataset ook gegevens bevat over de uitgevoerde werkzaamheden buiten de normaallijnen (dus in kribvakken en in het winterbed), wordt in deze paragraaf alleen ingegaan op de uitgevoerde bagger- en stortwerkzaamheden in het zomerbed.

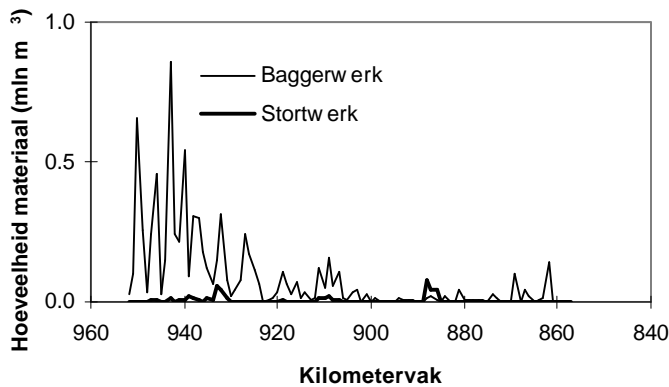
Voor de Bovenrijn en de Waal zijn gegevens beschikbaar voor de periode van 1900 tot 1996. Uit figuur 13 blijkt dat het stortwerk in deze periode verwaarloosbaar was bij het uitgevoerde baggerwerk. Van 1900 tot 1910 was de baggeractiviteit in de Bovenrijn en Waal aanzienlijk. Ploeger (1992) geeft aan dat het gewonnen zand in deze periode hoofdzakelijk werd gebruikt voor het opvullen van kribvakken. Tussen 1910 en 1920 werd er slechts weinig gebaggerd in de Bovenrijn en Waal, maar na 1920 brak opnieuw een periode aan van intensief baggeren. Het gewonnen zand werd vanaf toen voornamelijk gebruikt als bouwgrondstof (Schans, 1998<sup>a</sup>). Na 1940 nam de baggeractiviteit opnieuw af. Tussen 1978 en 1990 was er echter weer sprake van een opleving. Sinds 1990 is bovenstrooms van Zaltbommel netto extractie van zand en grind uit het zomerbed van de Nederlandse rivieren verboden (Schans, 1998<sup>a</sup>). Dat betekent echter niet dat er niet meer gebaggerd wordt, maar het gebaggerde materiaal wordt nabij de baggerlocatie weer teruggestort.



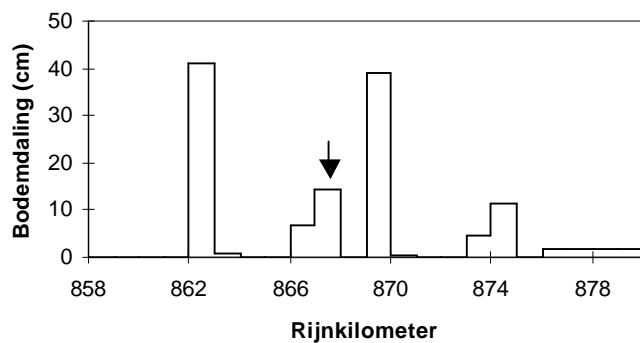
Figuur 13. Bagger- en stortwerk in de Bovenrijn en de Waal in de periode 1900 – 1996 (naar: Ten Brinke & Gözl, 2001)

Figuur 14 toont de hoeveelheden bagger- en stortwerk in de Bovenrijn en Waal uitgesplitst naar locatie. Hieruit blijkt dat rond de Pannerdensch Kop (km 867,5) geen materiaal in het zomerbed is gestort. Verder blijkt dat de baggeractiviteit rond de Pannerdensch Kop zeer gering is geweest in vergelijking met de activiteit benedenstrooms in de Waal. Echter van 34 miljoen m<sup>3</sup> is niet bekend waar het gebaggerd is. Dit zou rond de Pannerdensch Kop geweest kunnen zijn. Het is nochtans redelijk aan te nemen dat deze hoeveelheid ook betrekking heeft op het benedenstroomse deel van de Waal.

Het baggerwerk rond de Pannerdensch Kop heeft plaatsgehad in twee periodes: 1978-1980 en 1988-1995. De hoeveelheden uit de eerste periode zijn verwaarloosbaar ten opzichte van die uit de tweede periode. Door de hoeveelheid materiaal die in een kilometervak gebaggerd is te delen door de breedte van de rivier en de lengte van het kilometervak, verkrijgt men de gemiddelde bodemdaling die moet zijn opgetreden door baggerwerk. In figuur 15 is deze bodemdaling weergegeven voor de trajecten van de Waal en de Bovenrijn grenzend aan de Pannerdensch Kop voor de periode 1988-1995. Daarbij is aangenomen dat de 34 miljoen m<sup>3</sup> materiaal waarvan de baggerlocatie niet bekend is, geen betrekking heeft op het gebied rond de Pannerdensch Kop. Duidelijk blijkt dat de lokale verschillen in bodemdaling als gevolg van baggeren groot zijn. De grootste bodemdaling is opgetreden tussen km 862 en 863 in de Bovenrijn (41 cm in de periode 1988-1991) en tussen 869 en 870 in de Waal (39 cm in de periode 1991-1992).



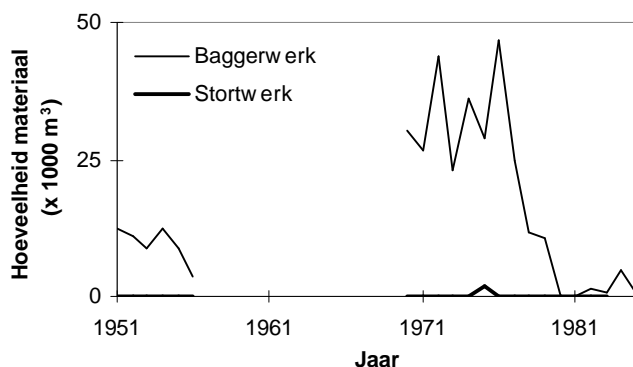
Figuur 14. Bagger- en stortwerk in de Bovenrijn en de Waal per kilometervak in de periode 1900 - 1996 (Ten Brinke, niet-gepubliceerde data). Van 34 miljoen m<sup>3</sup> die tussen 1900 en 1996 gebaggerd is, is de exacte lokatie niet bekend. Deze hoeveelheid is in de figuur niet weergegeven. Datzelfde geldt voor een hoeveelheid gestort materiaal van 0,03 miljoen m<sup>3</sup>.



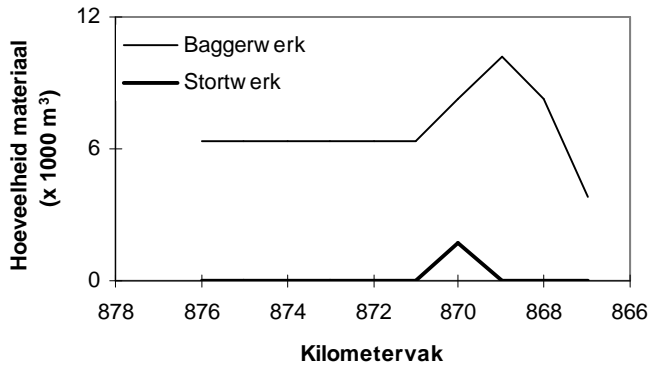
Figuur 15. Bodemdaling als gevolg van baggeren in de periode 1988-1995 in de Waal en de Bovenrijn rond de Pannerdensch Kop (naar: Ten Brinke, niet-gepubliceerde data). De lokatie van de Pannerdensch Kop is aangegeven met een pijltje.

Voor het Pannerdensch Kanaal zijn gegevens over bagger- en stortwerkzaamheden slechts bekend voor de perioden 1951-1956 en 1970-1985. In figuur 16 en 17 staat de hoeveelheid gebaggerd en gestort materiaal weergegeven tegen de tijd en de locatie. Uit de figuren blijkt dat stortwerk in het Pannerdensch Kanaal verwaarloosbaar is. In de baggerdata zijn twee maxima te ontdekken: de periode 1951-1956 en de periode 1970-1978. In de eerste periode is gebaggerd in het hele kanaal, maar voor de tweede periode is nauwelijks bekend waar gebaggerd is. Alleen voor 1978 zijn de baggerlocaties bekend. De hoeveelheid gebaggerd materiaal waarvan de exacte locatie niet bekend is, bedraagt ruim 270 duizend m<sup>3</sup>. Als deze hoeveelheid evenredig verdeeld wordt over de kilometervakken waar in 1978 gebaggerd is, dan blijkt dat in de eerste kilometers van het kanaal over evenveel gebaggerd is, terwijl in de tweede helft van het kanaal niet gebaggerd is.

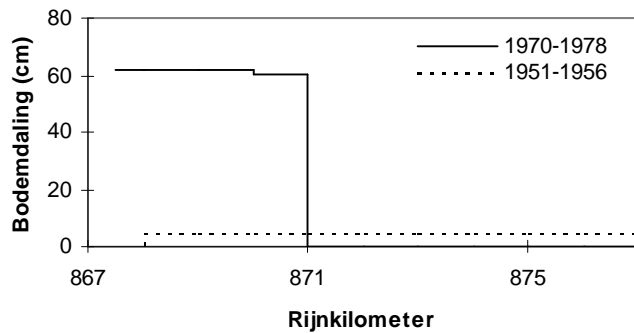
In figuur 18 zijn de gebaggerde hoeveelheden omgerekend naar de hoeveelheid bodemdaling. Uit de figuur blijkt dat de eerste baggerperiode een bodemdaling van 5 centimeter teweeg moet hebben gebracht in het hele kanaal. In de tweede periode is alleen de bodem in het eerste deel van het kanaal gedaald door baggerwerkzaamheden, ruim 60 centimeter. Deze waarde moet echter met enige voorzichtigheid gehanteerd worden, want de aanname dat tussen 1970 en 1977 op exact dezelfde locaties gebaggerd is als in 1978, hoeft natuurlijk niet juist te zijn.



Figuur 16. Bagger- en stortwerk in het Pannerdensch Kanaal in de periode 1951-1985 (naar: Ten Brinke & Gözl, 2001).



Figuur 17. Bagger- en stortwerk in het Panneerdensch Kanaal per kilometervak in de periodes 1951-1956 en 1970-1985 (Ten Brinke, niet-gepubliceerde data). Van 281 duizend m<sup>3</sup> materiaal dat in genoemde periodes gebaggerd is, is de exacte lokatie niet bekend. Deze hoeveelheid is in de figuur niet weergegeven.



Figuur 18. Bodemdaling als gevolg van baggeren in het Panneerdensch Kanaal (naar: Ten Brinke, niet-gepubliceerde data).

## 5.2 Grootschalige effecten op de bodemsamenstelling

### 5.2.1 Bodemdaling en relatieve grindaanrijking

Antropogene factoren zijn waarschijnlijk de oorzaak van de grote bodemdaling, die al minstens 75 jaar aan de gang is rond de Panneerdensche Kop (Ten Brinke & Gözl, 2001). Aangezien deze bodemdaling waarschijnlijk gepaard is gegaan met een relatieve aanrijking van grind (hoofdstuk 4), zijn de antropogene factoren indirect van grote invloed geweest op de bodemsamenstelling op macro- en megaschaal.

Met name de aanleg van kribben en de meanderbochtafsnijdingen worden verantwoordelijk geacht voor de grote bodemdaling van de zomerbedding. Door de aanleg van kribben is de effectieve afvoerbreedte van de rivier immers verkleind en daarom zal ongetwijfeld insnijding zijn opgetreden.

De invloed van meanderbochtafsnijdingen is ingewikkelder. Meanderbochtafsnijdingen zorgen voor een lokale toename van het bodemverhang. Volgens De Vries (1975) tracht een rivier lokale toenames in het verhang weg te werken door een bodemdaling in het gebied bovenstrooms van de ingreep. De omvang van de bodemdaling ( $d$ ; m) is afhankelijk van het oorspronkelijke verhang ( $i$ ; -) en de afstand waarmee de rivierlengte is afgenomen door de aanleg van het kanaal ( $L$ ; m):

$$d = \Delta L \cdot i$$

De afsnijding van de Bijlandmeander heeft gezorgd voor een verkorting van de Bovenrijn met ongeveer drie kilometer. Als aangenomen wordt dat het evenwichtsverhang voor de Rijn ongeveer  $1,2 \cdot 10^{-4}$  bedraagt, dan ligt de bodemdaling die wordt veroorzaakt door de aanleg van het Bijlandsch Kanaal in de grootteorde van 30 à 40 centimeter. Het Panneerdensch Kanaal heeft gezorgd voor een verkorting van de Nederrijn met eveneens drie kilometer. Ook het Panneerdensch Kanaal heeft dus een bodemdaling tot gevolg die in de grootteorde ligt van 30 à 40 centimeter.

De Vries (1975) berekent uitgaande van uniforme stroming en de transportvergelijking van Meyer-Peter & Müller (1948) dat het 1000 jaar duurt voordat de Rijn zich 200 kilometer bovenstrooms van een ingreep voor 50 procent heeft aangepast. De Rijn is daarmee een morfologisch langzame rivier, want in bijvoorbeeld de Donau wordt een dergelijke aanpassing al na enkele tientallen jaren bereikt.

Deze berekening suggereert dat de aanleg van het Pannerdensch en het Bijlandsch Kanaal anno 2002 nog steeds bodemdaling veroorzaakt in de Duitse Rijntrajecten. Omdat de aanpassing direct bovenstrooms van een ingreep het snelst verloopt, mag er echter van worden uitgegaan dat de rivierbedding rond de Pannerdensche Kop reeds geheel is aangepast aan het Pannerdensch Kanaal en het Bijlandsch Kanaal. De bochtafsnijdingen die in de 19<sup>e</sup> en de 20<sup>e</sup> eeuw benedenstrooms in de Rijntakken tot stand zijn gekomen (Ploeger, 1992), zouden wellicht wel nog bodemdaling en vergroving rond de Pannerdensche Kop tot gevolg kunnen hebben. Hierbij moet vooral gedacht worden aan grote bochtafsnijdingen zoals die bij Wijk bij Duurstede (Roodvoetmeander, 1874) en die bij Doesburg (1954). De bochtverkorting die in 1953 is uitgevoerd in het Pannerdensch Kanaal zal geen merkbare bodemdaling tot gevolg hebben. De rivierlengte is hier slechts 160 meter korter geworden en dit resulteert volgens bovenstaande formule in een verwaarloosbare bodemdaling van minder dan 2 centimeter.

De berekening van De Vries (1975) suggereert dat ook in de komende decennia nog een grote bodemdaling verwacht kan worden rond de Pannerdensche Kop. Ten Brinke & Gözl (2001) menen echter dat een groot deel van de bodemaanpassing in de Rijn reeds plaats gehad heeft. Dat komt voor een deel omdat niet alleen natuurlijke processen, maar ook baggerwerkzaamheden zorgen voor bodemdaling. Belangrijker is echter dat er - behalve bodemdaling - nog andere mogelijkheden zijn voor een rivier om zich aan te passen aan een verhangtoename (Dietrich & Whiting, 1989). Een van deze mogelijkheden is vergroving van de bedding. Dit zorgt namelijk voor een toename van de kritieke schuifspanning, hetgeen de toename van de actuele schuifspanning die wordt veroorzaakt door de verhangtoename kan compenseren. Omdat in het vorige hoofdstuk is gebleken dat er rond de Pannerdensche Kop een aanzienlijke vergroving van de bedding is opgetreden, zou de Rijn zich inderdaad wel eens veel vlugger kunnen aanpassen aan menselijke ingrepen dan De Vries (1975) berekent.

## **5.2.2 Vergroving en verfijning als gevolg van bagger- en stortwerkzaamheden**

In de vorige paragraaf is beschreven dat antropogene factoren mogelijk een grote indirecte invloed hebben op de grootschalige bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop. Bagger- en stortwerkzaamheden kunnen echter ook direct zorgen voor variatie in de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop op macroschaal. In deze paragraaf wordt alleen aandacht besteed aan de gevolgen van bagger- en stortwerkzaamheden boven- en benedenstrooms van de Pannerdensche Kop, omdat dergelijke werkzaamheden rond de Pannerdensche Kop zelf een veel kleinschaligere invloed hebben op de bodemsamenstelling (zie § 5.3.4).

Baggerwerkzaamheden bovenstrooms van de Pannerdensche Kop zorgen ervoor dat de sedimentaanvoer naar de Pannerdensche Kop vermindert, hetgeen kan leiden tot uitzeying van zand en een vergroving van het bodemsediment (Dietrich & Whiting, 1989). Het storten van zand of grind bovenstrooms van de Pannerdensche Kop kan zorgen voor een toename van de sedimentaanvoer naar de Pannerdensche Kop; dit kan leiden tot een (tijdelijke) depositie van materiaal met een andere korrelgrootte. Het gaat hier echter om activiteiten die in Duitsland zijn uitgevoerd, waarover geen gedetailleerde informatie beschikbaar is. Bagger- en stortwerkzaamheden bovenstrooms van de Pannerdensche Kop kunnen echter een belangrijke invloed hebben op de ruimtelijke en temporele korrelgroottevariatie rond de Pannerdensche Kop op macroschaal.

Ook bagger- of stortwerkzaamheden benedenstrooms van de Pannerdensche Kop kunnen in principe van invloed zijn op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop. Immers, benedenstroomse bagger- of stortwerkzaamheden leiden tot veranderingen in het bodemverhang en kunnen rond de Pannerdensche Kop dus zorgen voor bodemdaling en relatieve grindaanrijking, zoals is beschreven in de vorige paragraaf (zie ook Ten Brinke & Gözl, 2001). Echter op korte afstand van de Pannerdensche Kop zijn geen grootschalige bagger- of stortwerken uitgevoerd (fig. 14 en 17). Daarbij komt dat de veranderingen in het bodemverhang die het gevolg zijn van bagger- en stortwerk naar verwachting klein zijn, omdat baggergaten opgevuld worden en

storthopen geërodeerd. Daarom wordt aangenomen dat benedenstroomse bagger- of stortactiviteiten geen invloed hebben op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop.

### 5.3 Kleinschalige effecten op de bodemsamenstelling

Voor de meeste menselijke activiteiten in het gebied rond de Pannerdensch Kop geldt dat de invloed op de bodemsamenstelling op macro- en megaschaal klein is. De antropogene invloed op de bodemsamenstelling op mesoschaal is veel groter. In de eerste plaats uit zich dit in veranderingen in de bochtsortering. Verder kan er als gevolg van scheepvaart zandleverantie vanuit de kribvakken plaatsvinden. Daarnaast kan de bodemsamenstelling beïnvloed worden door secundaire stromingen die ontstaan bij kribben en bij in- en uitstroompunten van uiterwaarden. Ook oeververstevingen kunnen een invloed uitoefenen op de bodemsamenstelling. Tot slot is het mogelijk dat baggerwerkzaamheden het proces van relatieve grindaanrijking versterken.

#### 5.3.1 Verandering van de bochtsortering

Bochtsortering zorgt ervoor dat het bodemsediment in de binnenbocht fijner is dan in de buitenbocht. De grootte van het verschil in korrelgrootte tussen binnen- en buitenbocht is onder meer afhankelijk van de helling van het dwarsprofiel (zie ook paragraaf 6.2.1). Als door meanderbochtsafsnijdingen en de aanleg van kanalen het stromingspatroon verandert, dan zal het dwarsprofiel veranderen, met als gevolg dat ook aanpassingen in de bochtsortering op zullen treden. Het is te verwachten dat de veranderingen in het dwarsprofiel zich in enkele jaren voltrekken (Wilson, 1973). Er is immers veel minder sedimenttransport mee gemoeid dan met aanpassingen in het lengteprofiel.

Een aanwijzing voor de snelle aanpassing in dwarsrichting kan gevonden worden in Van de Ven (1976). Hij beschrijft dat de Bijlandmeander zich in 1764 versneld begon te verplaatsen, waardoor het Pannerdensch Kanaal opeens in een binnenbocht van de Bovenrijn kwam te liggen. Binnen een jaar werd toen een enorme zandbank gevormd voor de bovenmond van het Pannerdensch Kanaal. Deze kan beschouwd worden als de kronkelwaard behorende bij de nieuwe binnenbocht. De aanpassingen in de bochtsortering vinden grotendeels gelijktijdig met de veranderingen in het bochtprofiel plaats. Als een kronkelwaard lager moet worden na de aanleg van het kanaal, dan zullen immers eerst de fijnste korrelgroottefracties geërodeerd worden, waardoor meteen het verschil in korrelgrootte tussen binnen- en buitenbocht kleiner wordt. Als tijdens de verandering van het bochtprofiel de bochtsortering nog niet geheel aangepast is, zullen verdere aanpassingen plaatsvinden tijdens de hoogwaters in de jaren na de aanleg van het kanaal. Alleen tijdens hoogwaters zijn de duinen namelijk zo hoog dat de hele bovenlaag van de bodem omgewoeld en opnieuw gesorteerd kan worden. Gelet op het grote aantal hoogwaters dat is opgetreden sinds de aanleg van het Pannerdensch Kanaal en het Bijlandsch Kanaal, mag aangenomen worden dat de bochtsortering anno 2002 volledig is aangepast aan de aanwezigheid van deze kanalen. Waarschijnlijk is de bochtsortering ook reeds volledig aangepast aan de ingrepen die in 1953 in het Pannerdensch Kanaal zijn uitgevoerd. Dit is echter niet helemaal zeker.

Uit Parker & Andrews (1985) blijkt dat ook de breedte van de rivier van invloed kan zijn op het verschil in korrelgrootte tussen de binnen- en de buitenbocht. Omdat de aanleg van de kribben tussen 1850 en 1934 een flinke reductie in rivierbreedte heeft betekend, kan daardoor dus ook de bochtsortering veranderd zijn. Het is niet mogelijk om aan te tonen of dit inderdaad het geval is geweest. Wel mag er weer vanuit gegaan worden dat eventuele veranderingen in de bochtsortering als gevolg van de aanleg van kribben geheel zijn voltooid, gezien de lange periode die is verstreken sinds de aanleg van de kribben.

Verder kan ook de aanwezigheid van de stuwen in de Nederrijn en de Lek invloed hebben op de bochtsortering. De stuwen zorgen er namelijk voor dat de gemiddelde waterstanden rond de Pannerdensch Kop bij laagwater ongeveer 20 centimeter hoger zijn dan bij een vrije rivierafvoer (Schans, 1998<sup>3</sup>). Een toename van de waterdiepte zorgt in het algemeen voor een sterkere bochtsortering (§6.2.1). Of dit proces werkelijk optreedt, is niet bekend. Het heeft in ieder geval alleen invloed op het bovenste laagje van de bodem, omdat bochtsorteringsprocessen bij laagwater slechts in een dunne bodemlaag optreden. Bij hoogwater is de laag waarin bochtsorteringsprocessen optreden veel dikker door het voorkomen van hoge duinen, maar dan



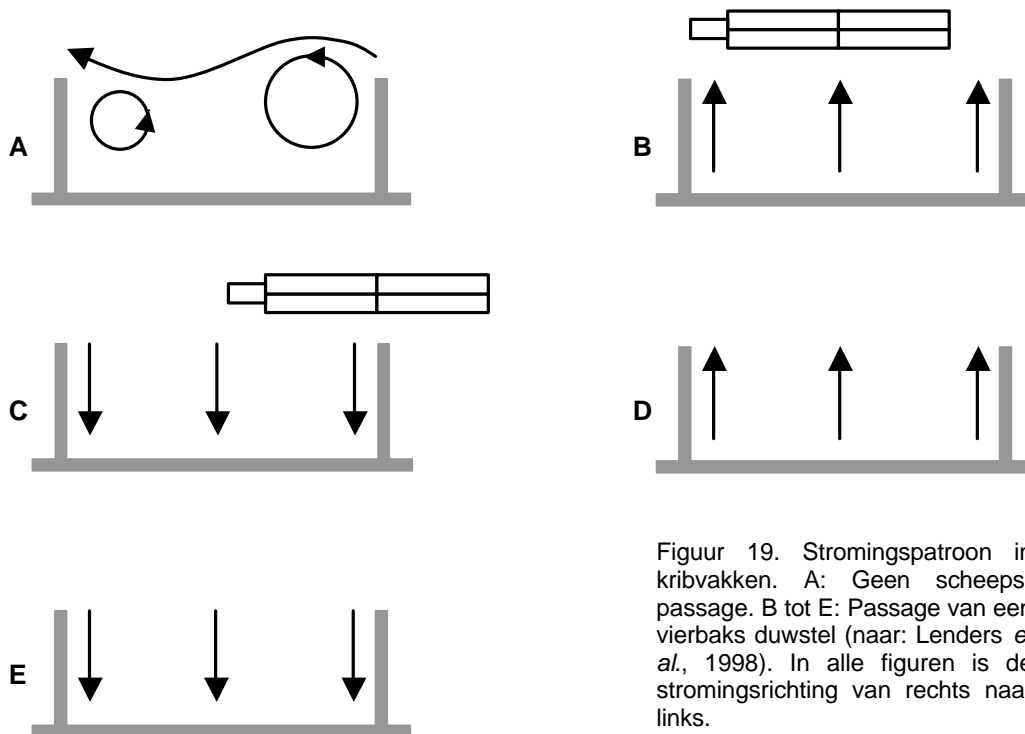
zijn de stuwen geopend (§5.1.4) en oefenen ze geen invloed meer uit op de waterstand en de bochtsortering.

Tot slot kunnen ook de aanwezigheid van kribben en de passage van schepen invloed hebben op de bochtsortering rond de Pannerdensch Kop. Scheepvaart en kribben veroorzaken namelijk extra stromingen in andere richtingen dan de natuurlijke waterbeweging. Deze stromingen kunnen de helicoïdale beweging die zorgt voor de bochtsortering (§6.2.1) verstoren. Net als bij de invloed van de stuwen zal dit alleen van belang zijn bij laag water en dientengevolge alleen voor het bovenste laagje van de bodem. Men mag namelijk aannemen dat bij hoogwater de scheeps- en kribgeïnduceerde stromingen klein zijn in vergelijking met de natuurlijke stroming.

### 5.3.2 Zandleverantie vanuit kribvakken

Als er geen schepen passeren is het stromingspatroon in een kribvak gescheiden van dat in de rivier (fig. 19). De waterbeweging heeft net benedenstrooms van de bovenstroomse krib een rondgaande beweging tot gevolg, de neer. In grote kribvakken ontstaat bij de stroomafwaartse krib een tweede neer (Lenders *et al.*, 1998). Tijdens de passage van schepen is de situatie geheel anders. Het kribvak wordt dan eerst leeggezogen en stroomt vervolgens weer vol. Onderzoek op de Waal heeft uitgewezen dat één schip verschillende leeg- en volstroomcycli opwekt (fig. 19). Tijdens de passage van een schip zijn geen neren aanwezig en de snelheidscomponenten staan voortdurend loodrecht op de as van de rivier (Lenders *et al.*, 1998). De toename van de stroomsnelheid in kribvakken tijdens scheepspassages is het grootst bij lage waterstanden (Schans, 1998<sup>b</sup>).

In laagwaterperioden kunnen alleen de stromingen die worden opgewekt door passerende schepen zorgen voor sedimenttransport in de kribvakken. De natuurlijke rivierstroming is hiertoe niet in staat (Lenders *et al.*, 1998). Uit Ten Brinke *et al.* (2001) volgt dat dit sedimenttransport vooral in de richting van het zomerbed gericht is. Tijdens laagwaterperioden wordt dus sediment uit de kribvakken naar het zomerbed gevoerd. Bij hoogwater wordt het verloren gegane zand weer aangevuld. Deze sedimentatie vindt plaats onder invloed van de natuurlijke rivierstroming; scheepsgeïnduceerde stromingen spelen hierbij geen rol.



Figuur 19. Stromingspatroon in kribvakken. A: Geen scheepspassage. B tot E: Passage van een vierbaks duwstel (naar: Lenders *et al.*, 1998). In alle figuren is de stromingsrichting van rechts naar links.

Sukhodolov *et al.* (2002) hebben voor twee kribvakken langs de Elbe aangetoond dat er geen erosie van de kribvakbodem plaatsvindt bij laagwater. Het gehalte aan suspensief materiaal

verandert niet tijdens de stroming door een kribvak. Wel verandert de samenstelling van het suspensief materiaal. Grof materiaal bezinkt en fijn materiaal wordt opgenomen. Ook dit betekent een netto aanlevering van fijn materiaal naar het zomerbed tijdens laagwaterperioden.

De mediane korrelgrootte in de zuidelijke helft van de Waal is gemiddeld kleiner dan de mediane korrelgrootte in de noordelijke helft van de Waal. Ten Brinke (1997) gaat ervan uit dat dit komt omdat de kribvakken aan de zuidoever meer (fijn) zand leveren aan het zomerbed dan de kribvakken aan de noordoever. In het begin van dit hoofdstuk is al aangegeven dat het goederenvervoer in stroomopwaartse richting veel groter is dan het goederenvervoer in stroomafwaartse richting. In de praktijk komt dit erop neer dat stroomopwaarts varende schepen volgeladen zijn, terwijl stroomafwaarts varende schepen vaak leeg zijn. Omdat stroomopwaarts varende schepen langs de zuidoever van de rivier varen, kunnen hier grotere turbulenties worden opgewekt dan in de noordelijke rivierhelft, waardoor ook de zandleverantie aan het zomerbed in de zuidelijke rivierhelft groter is (Ten Brinke, 1997).

Lenders *et al.* (1998) geven een andere verklaring voor het feit dat stroomopwaarts varende schepen meer sedimenttransport veroorzaken dan stroomafwaarts varende schepen. Volgens hen zijn de schuifspanningen die worden opgewekt door stroomopwaarts varende schepen niet merkbaar hoger dan de schuifspanningen die worden opgewekt door stroomafwaarts varende schepen, maar is het zo dat de periode van hoge kribvakschuifspanningen (lees: de periode waarin sediment geleverd wordt aan het zomerbed) langer duurt bij de passage van een stroomopwaarts varend schip, omdat de vaarsnelheid van stroomopwaarts varende schepen kleiner is.

Ten Brinke (1997) heeft ook voor de IJssel onderzocht of er verschil bestaat in de mediane korrelgrootte tussen de linker- en de rechtterrivierhelft. Dit bleek niet het geval. Blijkbaar leveren de kribvakken aan beide oevers evenveel sediment aan het zomerbed. Dit is wel verklaarbaar, want de IJssel is een smalle rivier en de schepen varen er voornamelijk over de as van de rivier. Daarbij komt dat de kribvakken in de IJssel op veel plaatsen zijn volgestort met keien.

Voor de Pannerdensche Kop is zandleverantie vanuit de kribvakken aan het zomerbed een reëel proces waarmee rekening gehouden moet worden. Echter dit proces zal beslist niet zorgen voor een kleinere korrelgrootte in de zuidelijke rivierhelften. Op de zuidelijke oever van de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal bij de Pannerdensche Kop komen namelijk nauwelijks kribben voor (fig. 1). De meeste kribben liggen op de noordelijke oevers van deze riviertakken. Het is dus mogelijk dat zandleverantie vanuit kribvakken bij laagwater rond de Pannerdensche Kop zorgt voor een verfijning van het bodemsediment in de noordelijke helft van de riviertakken.

### 5.3.3 Effecten van krib- en uiterwaardstroming

De neren die bij de kribben aanwezig zijn op momenten dat geen schepen passeren, zorgen voor turbulentie en een lokale verhoging van de bodemschuifspanning. Daardoor ontstaan ellipsvormige depressies in de rivierbedding. Deze depressies, *ontgrondingskuilen* genaamd, strekken zich schuin van de kribkoppen uit in de richting van de rivieras. Bodempeilingen die in de Waal bij Beneden-Leeuwen zijn uitgevoerd met multibeamapparatuur, tonen aan dat de ontgrondingskuilen hier vrijwel tot op de rivieras te volgen zijn (Wilbers, 1999). Uit multibeamdata die op hetzelfde moment verzameld zijn rond de Pannerdensche Kop, blijkt dat ook daar ontgrondingskuilen aanwezig zijn, hoewel minder geprononceerd.

Zoals vermeld kan een hoge bodemschuifspanning niet alleen gecompenseerd worden door erosie, maar ook door vergroving van de bodem (Dietrich & Whiting, 1989). De bodemsamenstelling in de ontgrondingskuilen kan daarom verschillen van de bodemsamenstelling in de omgeving. De dichtheid van de lithologische boringen rond de Pannerdensche Kop (Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>) is niet groot genoeg om aan te tonen of dit inderdaad het geval is.

De diepte van de ontgrondingskuilen kan variëren als gevolg van veranderingen in de rivierafvoer. Over het algemeen is de diepte van de ontgrondingskuilen het kleinst bij laagwater. Een toename van de rivierafvoer zorgt voor een grotere waterdiepte en grotere stroomsnelheden, waardoor de diepte van de ontgrondingskuilen doorgaans toeneemt. De maximale diepte wordt bereikt als de waterniveau gelijk is met de bovenkant van de kribben. Stijgt de afvoer (of de waterstand) nog meer, dan neemt de diepte van de ontgrondingskuilen weer af. Tijdens de gehele hoogwatercyclus van 1998 zijn multibeambodempelingen uitgevoerd rond de Pannerdensche Kop. Uit deze bodempelingen blijkt dat veranderingen in de diepte van de ontgrondingskuilen

rond de Pannerdensche Kop beperkt blijven tot minder dan 10 à 20 centimeter. De exacte verandering in de diepte is aan de hand van de peilingen uit 1998 niet te bepalen. Dit komt enerzijds omdat er nauwelijks bodempeilingen zijn gedaan tijdens laagwater en anderzijds door de migratie van duinen en andere bodemvormen.

Het is mogelijk dat bij de eventuele erosie en opvulling van de ontgrondingsgaten voornamelijk de kleinste korrelgroottefracties betrokken zijn. Dit zou betekenen dat de bodem van een ontgrondingsgat tijdens middelhoge afvoeren grover is dan bij laagwater. Ook hiervoor bestaat echter geen bewijs. Dat neemt niet weg dat bij ontgrondingskuilen ruimtelijke en temporele veranderingen kunnen optreden in de bodemsamenstelling op mesoschaal.

Iets dergelijks kan voorkomen bij stroming van of naar de uiterwaarden tijdens hoogwaters. De afstand tussen de winterdijken varieert, waardoor ook de afvoercapaciteit van de uiterwaarden varieert. Op plaatsen waar de uiterwaarden breder worden, neemt de afvoer door de hoofdgeul af ten gunste van de afvoer door de uiterwaarden. Het omgekeerde gebeurt op plaatsen waar de winterdijken de hoofdgeul naderen. Daar stroomt water vanuit de uiterwaarden terug in de hoofdgeul. Omdat het meeste sedimenttransport in de onderste meter van de waterstroming plaatsvindt, neemt de sedimentlast in de hoofdgeul relatief toe als er water de uiterwaard instroomt. In de hoofdgeul kan dan sedimentatie optreden. Op de plaats waar het water de hoofdgeul weer binnenkomt, kan erosie plaatsvinden. Bij hoogwater kan zo een patroon ontstaan van lokale verdiepingen en verondiepingen, dat weer verdwijnt in laagwaterperioden (zie ook Sieben, 2002).

In tabel 7 staan voor het onderzoeksgebied rond de Pannerdensche Kop de plaatsen aangegeven waar de stroming bij hoogwater de hoofdgeul verlaat of binnenkomt. Multibeamdata uit de hoogwaterperiode van 1998 leveren geen aanwijzingen op dat juist op deze locaties grote verdiepingen of verondiepingen zijn opgetreden. Toch staat één van deze lokaties (de noordelijke helft van de Waal tussen km 868 en 869) erom bekend dat er na hoogwaters altijd gebaggerd moet worden om de scheepvaartgeul op diepte te houden. Het is echter goed mogelijk dat de sedimentatie die hier klaarblijkelijk tijdens hoogwater optreedt, niet samenhangt met het instroompunt van de uiterwaard, maar met de binnenbochtbank die hier ligt (fig. 8; §6.2.1). Het blijft dus onduidelijk of er bij de Pannerdensche Kop veranderingen optreden in de bodemligging van het zomerbed op plaatsen waar stroming de uiterwaarden ingaat of verlaat. Merkbare veranderingen zullen waarschijnlijk alleen optreden bij de grootste hoogwaters, zoals die van 1995. Het bodemniveau van de uiterwaarden rond de Pannerdensche Kop is namelijk relatief hoog, zodat stroming door de uiterwaarden alleen bij zeer grote afvoeren voorkomt. De verdiepingen en de verondiepingen kunnen gepaard gaan met veranderingen in de bodemsamenstelling (op mesoschaal), maar dit is niet te bewijzen.

Tabel 7. In- en uitstroompunten van uiterwaarden rond de Pannerdensche Kop.

Rijntak	Kilometer	Oever	Stroming
Waal	868	links	Stroming de uiterw aard in
Waal	869	rechts	Stroming de uiterw aard in
Pannerdensch Kanaal	868.5	rechts	Stroming de uiterw aard uit

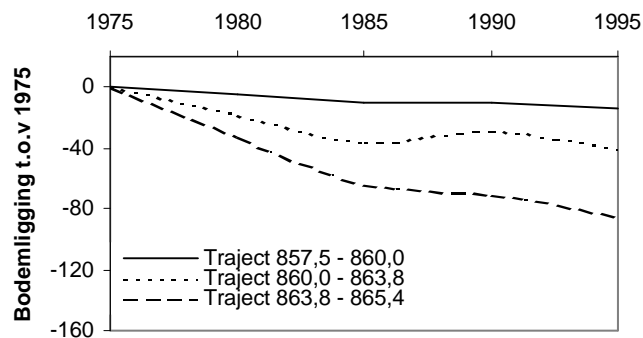
#### 5.3.4 De gevolgen van bagger- en stortwerkzaamheden rond de Pannerdensche Kop

In paragraaf 5.2.2 is ingegaan op de grootschalige invloed van bagger- en stortwerkzaamheden op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop. In deze paragraaf wordt beschreven in hoeverre baggerwerkzaamheden rond de Pannerdensche Kop invloed hebben gehad op de variatie in bodemsamenstelling op mesoschaal. Aan stortwerkzaamheden wordt minder aandacht besteed, want uit figuur 14 en figuur 17 blijkt dat deze rond de Pannerdensche Kop nauwelijks uitgevoerd zijn.

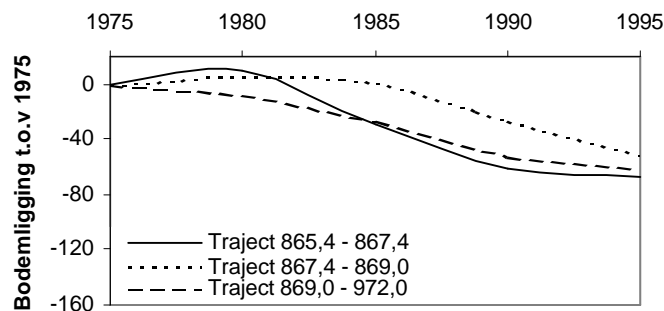
Baggerwerkzaamheden in de Bovenrijn hebben vooral plaatsgevonden tussen kilometer 862 en 863. Hier is tussen 1988 en 1991 41 centimeter van de grindige laag weggebaggerd (fig. 15). De gemiddelde bodemligging in riviertraject 860-863,8 is in deze periode echter enigszins gestegen (fig. 20; Schans, 1998<sup>a</sup>). Dit kan alleen verklaard worden door het optreden van sedimentatie. Blijkbaar is het baggergat vrijwel ogenblikkelijk na het ontstaan weer opgevuld met sediment. Hoewel het materiaal waarmee de gaten zijn opgevuld in theorie sterk kan afwijken van

het omliggende bodemmateriaal, zijn hiervoor geen aanwijzingen gevonden in de boringen die in 2000 zijn uitgevoerd (Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>). Eventuele afwijkingen kunnen echter zijn weggewerkt tijdens de hoogwaters van 1995 en 1998.

Ook de baggerwerkzaamheden in de Waal hebben vooral plaatsgevonden in één kilometervak (869-870). In figuur 15 is aangegeven dat hier in 1991 en 1992 gemiddeld 39 centimeter van de rivierbodem is weggebaggerd. De rivierbodem is in deze periode echter slechts weinig gedaald (fig. 21; Schans, 1998<sup>a</sup>). Waarschijnlijk is ook hier sedimentatie opgetreden. Er kan echter ook niet uitgesloten worden dat het weggebaggerde materiaal in hetzelfde riviertraject weer is teruggestort. Sinds 1990 is netto extractie van sediment uit de Rijn bovenstrooms van Zaltbommel immers verboden. Zowel sedimentatie als terugstorten kan gezorgd hebben voor een tijdelijke verandering van de bodemsamenstelling, maar in de lithologische boringen van 2000 is hiervan niets teruggevonden.

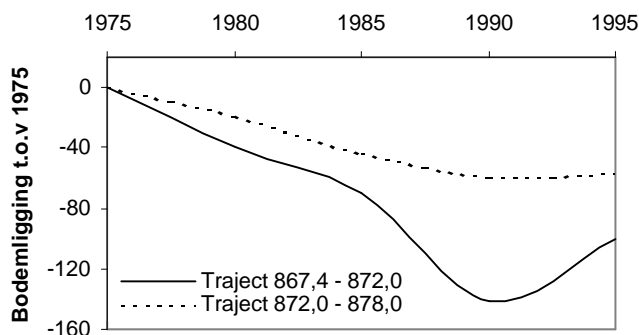


Figuur 20. De bodemligging in de Bovenrijn ten opzichte van 1975 (naar: Schans, 1998<sup>a</sup>).



Figuur 21. De bodemligging in de Bovenrijn en de Waal ten opzichte van 1975 (naar: Schans, 1998<sup>a</sup>).

Voor het Pannerdensch Kanaal is niet goed bekend waar gebaggerd is. In paragraaf 5.1.6 is afgeleid dat de meeste baggeractiviteit waarschijnlijk in het eerste deel van het kanaal heeft plaatsgevonden, tussen kilometer 867,5 en 871. Volgens figuur 18 moet de bodem hier tussen 1970 en 1978 ruim 60 centimeter zijn gedaald als gevolg van baggerwerkzaamheden: 35 centimeter tussen 1970 en 1975 en 27 centimeter tussen 1975 en 1978 (Ten Brinke & Gözl, 2001). Als de bodemdaling in deze laatste periode vergeleken wordt met de werkelijke bodemdaling, dan blijken beide waarden goed met elkaar in overeenstemming (fig. 22; Ten Brinke & Gözl, 2001). In tegenstelling tot de baggergaten in de Waal en de Bovenrijn is het baggergat in het Pannerdensch Kanaal dus niet dichtgesedimenteerd. Een mogelijke verklaring hiervoor schuilt in het verschil in omvang van de baggergaten. De baggergaten in de Bovenrijn en de Waal waren maximaal een kilometer lang, terwijl het baggergat in het Pannerdensch Kanaal bijna vier maal zo lang was, en het sediment er veel grover en immobieler is.



Figuur 22. De bodemligging in het Pannerdensch Kanaal ten opzichte van 1975 (naar: Ten Brinke & Gölz, 2001).

Opvallend in figuur 22 is, dat na afloop van de baggerwerkzaamheden in 1978 een veel grotere bodemdaling begon in het eerste deel van het Pannerdensch Kanaal. Tussen 1980 en 1990 daalde de bodem hier 102 centimeter, terwijl de bodem in het tweede deel van het Pannerdensch Kanaal slechts 59 centimeter daalde. Tussen 1990 en 1995 trad in het eerste deel van het Pannerdensch Kanaal sedimentatie op, in het tweede deel echter niet.

Dit patroon is te verklaren als aangenomen wordt dat er inderdaad relatieve grindaanrijking optreedt in het Pannerdensch Kanaal. Stel dat de dikte van de grindige laag in het Pannerdensch Kanaal in 1970 ongeveer even dik was als de transportlaag tijdens hoogwater, zo'n 55 centimeter (fig. 6). Na afloop van de baggerperiode zal van de grindige laag dus niet veel over zijn geweest, mogelijk nog zo'n 15 centimeter (de grindige laag kan immers niet helemaal verdwenen zijn, want vanuit de Bovenrijn wordt voortdurend grind aangevoerd naar het Pannerdensch Kanaal).

Tijdens de hoogwaters van 1983 en 1988 zullen de duintroggen dus tot diep in de zandige laag gereikt hebben. Dit zand werd gemengd met het restant van de grindige laag, waardoor de samenstelling van de transportlaag zeer fijn moet zijn geweest. Dit zal geleid hebben tot een sterke bodemdaling in combinatie met een relatieve grindaanrijking, zodat in 1990 het grindgehalte in de bovenste 55 centimeter weer sterk zal zijn toegenomen, hoewel het misschien iets kleiner was dan in de periode voor het baggeren.

De snelle bodemdaling in de periode 1985-1990 had een groot verschil veroorzaakt tussen het bodemniveau van het Pannerdensch kanaal en dat van de Bovenrijn. Dit zal de reden zijn dat tussen 1990 en 1995 een sedimentatie van 42 cm optrad in het eerste deel van het Pannerdensch Kanaal. Hierdoor werd de grindige laag zo'n 97 cm dik. Dit is ongeveer even dik als de dikte van de grindige laag die in 2000 gemeten is door Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>).

Nu is ook te verklaren waarom de bodemdaling in het tweede deel van het Pannerdensch Kanaal tussen 1980 en 1990 veel kleiner was dan de bodemdaling in het eerste deel, en waarom daar geen sedimentatie is opgetreden. In het tweede deel is immers niet gebaggerd en de dikte van de grindige laag zal hier dus slechts weinig veranderd zijn. Veel relatieve grindaanrijking kan derhalve niet zijn opgetreden. De bodem daalde slechts weinig en daardoor trad tussen 1990 en 1995 hier ook geen sedimentatie op.

Op soortgelijke wijze is te verklaren waarom in de Bovenrijn en de Waal na afloop van de baggerwerkzaamheden geen grote bodemdaling is opgetreden. De transportlaag bij hoogwater is hier veel dikker dan in het Pannerdensch Kanaal, zo'n 80 centimeter. Als aangenomen wordt dat de dikte van de grindige laag voor aanvang van de baggerwerkzaamheden (in 1988 respectievelijk 1991), ook 80 centimeter dik was, dan moet na afloop van de baggerwerkzaamheden nog altijd zo'n 40 centimeter grind aanwezig zijn geweest. Alleen bij hoge afvoeren zou dan relatieve grindaanrijking kunnen zijn opgetreden en omdat de baggergaten klein waren en snel opgevuld werden met sediment, is dit waarschijnlijk nauwelijks gebeurd. De bodem is dus niet of nauwelijks gedaald.

Uit voorgaande blijkt dat baggerwerkzaamheden zowel direct als indirect van invloed kunnen zijn geweest op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop. De directe invloed berust op het feit dat het baggergat opgevuld kan worden met ander materiaal dan er oorspronkelijk lag. De indirecte invloed van baggerwerkzaamheden houdt in dat baggerwerkzaamheden de relatieve grindaanrijking kunnen versterken. Omdat er geen informatie is over de bodemsamenstelling vlak voor en vlak na de baggerwerkzaamheden is niet te bepalen of de directe baggerinvloed van belang is. De indirecte invloed van baggerwerkzaamheden is naar verwachting van groter belang.

Tot slot moet benadrukt worden dat baggerwerkzaamheden ook in de toekomst kunnen zorgen voor veranderingen in de bodemsamenstelling, ook al is het in Nederland sinds 1990 verboden netto sediment uit de rivieren te verwijderen. Er wordt namelijk nog steeds gebaggerd, maar na het baggeren wordt het gebaggerde materiaal elders in de rivier teruggestort.

### **5.3.5 Vergroving van het bodemsediment door oeververstevingen**

Er is reeds aangegeven dat op de linkeroevers van de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal op verschillende plaatsen geen kribben aanwezig zijn. Hier is de oever versteefd met asfalt of basaltblokken. In het verleden werd ook vaak puin gebruikt ter verdediging van de oevers. Basaltblokken en puin zijn onderhevig aan vertering. Het verteringsproces begint al tijdens het storten zelf. Afbrekende stukjes zijn vaak zo groot dat ze niet meegenomen kunnen worden door het water en ze blijven daarom liggen aan de voet van de oever. Door Kleinhans en Ten Brinke (2001) werd aan de linkeroever van de Waal tussen kilometer 868 en 869 basalt gevonden aan het oppervlak. Oeververdedigingen kunnen zo zorgen voor vergroving van het sediment in een smalle strook langs de oevers. Naar verwachting is deze vergroving zeer lokaal en klein.

## 6 Alluviale invloeden op de bodemsamenstelling

Dit hoofdstuk gaat in op de alluviale invloeden op de bodemsamenstelling. Met de term *alluviaal* wordt hier bedoeld: *het gevolg zijnde van actuele fluviatiele processen*. Net als in voorgaande hoofdstukken komen eerst de grootschalige invloeden op de bodemsamenstelling aanbod en daarna de kleinschalige invloeden.

### 6.1 Grootschalige effecten op de bodemsamenstelling

#### 6.1.1 Downstream fining

Een van de meest kenmerkende eigenschappen van een rivier is dat het bodemsediment steeds fijner wordt in stroomafwaartse richting (*Eng. downstream fining*). Vaak wordt dit toegeschreven aan abrasie, de mechanische verwerking van sedimentkorrels tijdens het transport. Echter ook selectief transport van fijn materiaal is van belang (Powell, 1998). Fijn materiaal wordt sneller stroomafwaarts getransporteerd dan grof materiaal, waardoor dit laatste in de bovenstroomse rivierdelen achterblijft, terwijl het fijne materiaal in de benedenstroomse rivierdelen terecht komt. Dat de transportsnelheid van fijn materiaal groter is, komt in de eerste plaats omdat fijn materiaal voor een groot deel zwevend getransporteerd wordt, terwijl grof materiaal via (het langzamere) bodemtransport getransporteerd wordt. Maar ook in het bodemtransport zelf worden fijne fracties sneller getransporteerd dan grove fracties. Verder is het zo, dat in de bovenste bodemlaag vaak een verticale sortering aanwezig is, met het fijnste materiaal bovenin (§6.2.4). Omdat bij laagwater de dikte van de sedimentlaag die getransporteerd wordt dun is, wordt alleen fijn materiaal stroomafwaarts getransporteerd. Het grove materiaal komt veel minder vaak in beweging, alleen bij hoogwaters als de transportlaag dik is (Kleinhans 2002, hoofdstuk 11). Als gevolg hiervan wordt het fijne sediment relatief sneller stroomafwaarts verplaatst dan het grovere.

Tabel 8. Sprongen in de mediane korrelgrootte in het benedenstroomse deel van de Rijn (naar: Ten Brinke & Gölz, 2001).

Rijntraject	Mediane korrelgrootte
Kilometer 800-850 (Niederrhein)	10 millimeter
Kilometer 850-870 (Niederrhein-Bovenrijn-Waal)	4 millimeter
Kilometer 870-950 (Waal)	1 millimeter

Hoewel de algemene trend een geleidelijke afname van de korrelgrootte is, is er vaak sprake van een plotselinge overgang van grindrivier naar zandrivier, over een afstand van enkele honderden meters tot enkele kilometers. Sambrook Smith & Ferguson (1995) geven drie mogelijke verklaringen: veranderingen in de erosiebasis, extra zandaanvoer via zijrivieren en een snelle abrasie van fijn grind. Voor de Rijn is de overgang van een rivier die gedomineerd wordt door grind naar een rivier die gedomineerd wordt door zand echter veel minder scherp (Ten Brinke & Gölz, 2001). De grootste overgang ligt zo'n 18 km bovenstrooms van de Pannerdensch Kop, maar er is een tweede sprong enkele kilometers stroomafwaarts van de Pannerdensch Kop (tabel 8). Rond de Pannerdensch Kop is het bodemsediment dus over een traject van zo'n twintig kilometer grover dan op grond van het standaard downstream fining patroon verwacht kan worden. Een mogelijke verklaring hiervoor is het optreden van relatieve grindaanrijking in dit riviertraject (zie hoofdstuk 4).

Downstream fining is de belangrijkste oorzaak van de korrelgroottevariatie op megaschaal. Alleen op plaatsen waar een rivier plotseling overgaat van grindrivier in zandrivier zorgt downstream fining voor korrelgroottevariatie op lagere schaalniveaus. Omdat de korrelgroottesprongen behorende bij de overgang van een grindrivier naar een zandrivier voor de Rijn niet in het onderzoeksgebied van de Pannerdensch Kop liggen, mag worden aangenomen dat downstream fining rond de Pannerdensch Kop niet zorgt voor korrelgroottevariatie op meso- en microschaal. Downstream fining kan dus worden gezien als een randvoorwaarde voor de kleinere lengteschalen, en is als proces, gezien de waarschijnlijk zeer grote tijdschaal nodig om de downstream fining tot stand te brengen, niet relevant voor de laatste paar honderd jaar.

## 6.1.2 Sedimenttransport

De hele grindige laag is sinds 1850 ongeveer anderhalve kilometer stroomafwaarts geschoven (§4.2.1). De grindige laag in de bovenloop van de Waal en het Pannerdensch Kanaal is dus afkomstig uit de Bovenrijn. Dit verklaart waarom de mediaan van de grindige laag in het Pannerdensch Kanaal groter is dan die in de Bovenrijn en de Waal. Het Pannerdensch Kanaal takt namelijk in een buitenbocht af van de Bovenrijn en ontvangt daarom voornamelijk het grove deel van het sedimentmengsel in de Bovenrijn (zie ook §6.2.1). De Waal daarentegen ontvangt voornamelijk fijn materiaal. Het sedimenttransport heeft zo dus een grote invloed op de bodemsamenstelling op mesoschaal.

## 6.2 Kleinschalige effecten op de bodemsamenstelling

### 6.2.1 Bochtsortering

In meanderbochten stroomt het water langs het oppervlak tegen de buitenbochttoever aan. Daardoor ontstaat een compensatiestroming langs de bodem van de rivier die naar de binnenbocht gericht is (zie bijvoorbeeld Thorne & Hey, 1979). Samen met de stroomafwaartse waterbeweging ontstaat zo een schroefdraadvormige (*helicoïdale*) beweging. Deze helicoïdale beweging ('spiraalstroming') zorgt ervoor dat er een karakteristieke bochtmorfologie ontstaat, met de diepste delen in de buitenbocht en de ondiepste in de binnenbocht.

De steilheid van het dwarsprofiel is het grootst in het eerste deel van de bocht. Dit is het gevolg van de herverdeling van water en sediment die hier optreedt en van doorschotverschijnselen (De Vriend & Struiksmā, 1983; Struiksmā *et al.*, 1985). In het tweede deel van de meanderbocht is het dwarsprofiel doorgaans wat minder steil. Hier kan de dwarshelling ( $\beta$ , °) benaderd worden met de volgende formule (bijv. Odgaard, 1981):

$$\sin(\beta) = K \frac{d}{r}$$

met:  $K$  een constante (-),  $d$  de waterdiepte (m) en  $r$  de bochtstraal (m).

De sedimentbeweging in meanderbochten wordt bepaald door twee krachten. Op de eerste plaats de bodemschuifspanning, die als gevolg van de helicoïdale beweging enigszins naar de binnenbocht gericht is. Ten tweede de zwaartekracht, die als gevolg van de grote dwarshelling naar de buitenbocht gericht is. De eerste kracht is evenredig met het oppervlak van de sedimentkorrels ( $D^2$ ); de tweede met de massa, of het volume van de sedimentkorrels ( $D^3$ ). Daardoor worden grote korrels voornamelijk naar de buitenbocht getransporteerd, terwijl voor de kleine korrels de netto verplaatsing in de richting van de binnenbocht plaatsvindt (Odgaard, 1981).

Dit *bochtsortering*sproces begint bij het bovenstroomse buigpunt van de bocht. In de meeste gevallen ligt op dit punt het grofste materiaal nog in de binnenbocht, als gevolg van de bochtsortering in de voorgaande bocht. In de loop van de bocht wordt het grove materiaal steeds meer naar de buitenbocht getransporteerd, en het fijne materiaal steeds meer naar de binnenbocht. Doorgaans kruist de lijn met het grofste materiaal ergens halverwege de bocht de rivieras. Pas aan het einde van de bocht (nabij het benedenstroomse buigpunt) ligt de lijn met het grofste materiaal in de buitenbocht (zie ook Parker & Andrews, 1985).

Het verschil in korrelgrootte tussen binnen- en buitenbocht is op de eerste plaats afhankelijk van de standaarddeviatie van het sediment. Hoe groter de standaarddeviatie van het sedimentmengsel, hoe groter het korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht (Parker & Andrews, 1985). Sediment met een uniforme korrelgrootte kan immers niet gesorteerd worden. Een andere belangrijke factor die de mate van bochtsortering bepaalt, is de sterkte van de secundaire stroming. Deze wordt op haar beurt bepaald door de bochtstraal en de waterdiepte. Verder is volgens Parker & Andrews (1985) ook de breedte van de rivier van belang, maar het is niet duidelijk hoe groot de invloed van de rivierbreedte is. De laatste factor van betekenis is de bochtlengte. In korte bochten is het korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht vaak kleiner, omdat het bochtsorteringproces over een korte afstand actief is.



Als gevolg van bochtsortering kunnen niet alleen ruimtelijke, maar ook temporele variaties in de bodemsamenstelling optreden. Bij toenemende afvoer, neemt namelijk ook de sterkte van de helicoïdale stroming toe. Omdat de invloed van de zwaartekracht gelijk blijft, zorgt dit ervoor dat grover materiaal hoger de helling op getransporteerd kan worden. Een direct gevolg hiervan is overigens dat er netto sedimenttransport optreedt van de buitenbocht naar de binnenbocht. De buitenbochtgeul wordt daardoor dieper en de zandbank in de binnenbocht hoger. Veel onderzoekers hebben inderdaad waargenomen dat de bodemligging in de binnenbocht toeneemt tijdens afvoergolven en weer afneemt tijdens laagwaterperioden (zie bijvoorbeeld Bartholdy & Kisling-Möller, 1996). Ook bij de Pannerdensch Kop vindt tijdens hoogwater opbouw van de binnenbochtbanken plaats. In de eerste bocht van de Waal bijvoorbeeld moet na hoogwaters altijd gebaggerd worden om de scheepvaartgeul weer op diepte te brengen. Uit de multibeamgegevens van de hoogwatercyclus van 1998 blijkt echter dat de veranderingen in de bodemligging beperkt blijven tot 10 à 20 centimeter en het is niet te verwachten dat dergelijke kleine veranderingen in het bochtprofiel een merkbare invloed zullen uitoefenen op het bochtsorteringspatroon rond de Pannerdensch Kop. De temporele invloed van bochtsortering op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop is dus waarschijnlijk klein. Wel wordt verwacht dat het bochtsorteringsproces een grote ruimtelijke invloed uitoefent op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop.

### **6.2.2 Afpleisteringsprocessen**

Uit figuur 5 is gebleken dat bij laagwater niet alle korrelgroottefracties mobiel zijn rond de Pannerdensch Kop. Dit maakt het waarschijnlijk dat er lokaal pleisterlagen ontstaan, doordat het fijne materiaal wordt weggespoeld en het grove materiaal achterblijft. Mogelijk is de invloed van afpleisteringsprocessen groter bij kribben en bij uitstroompunten van uiterwaarden, omdat hier de bodemschuifspanningen extra groot zijn.

Pleisterlagen zijn slechts enkele korreldiameters dik en daarom niet te traceren met korrelgroottemonsters. Ze hebben ook geen directe invloed op de gemiddelde bodemsamenstelling van de bovenste meter van de rivierbedding. Wel kunnen ze mogelijk het optreden van andere processen, zoals het bochtsorteringsproces, hinderen.

### **6.2.3 Zandgolven**

Een zandgolf is een hoeveelheid fijn materiaal die bij middelhoge en hoge afvoeren stroomafwaarts getransporteerd wordt en bij lage afvoeren bezinkt op plaatsen met een lage schuifspanning. Zandgolven kunnen ontstaan door suppleties van zand en door de lokale aansnijding van fijne lagen. Een andere mogelijkheid is dat zandgolven ontstaan als gevolg van de vorming van pleisterlagen (Lisle & Hilton, 1999). Als bij afnemende afvoer een pleisterlaag ontstaat, wordt het vrijkomende zand aanvankelijk stroomafwaarts getransporteerd. Als de afvoer verder afneemt, bezinkt het zand op plaatsen met een lage schuifspanning. Er ontstaan dan plekken met fijn materiaal. Op het moment dat de afvoer weer gaat toenemen, komen deze plekken fijn materiaal in hun geheel in beweging en verplaatsen zich als zandgolven.

Omdat zandgolven bij lage afvoeren bezinken, zorgen ze lokaal voor een tijdelijke verfijning van de korrelgrootte. De hoeveelheid zand die tijdens de laagste afvoeren aanwezig is op plaatsen met een lage schuifspanning is volgens Lisle & Hilton (1999) afhankelijk van de bovenstroomse aanvoer van materiaal, de standaarddeviatie van het sedimentmengsel en de verhouding tussen het voorkomen van afvoeren die fijn materiaal leveren en het voorkomen van afvoeren die fijn materiaal verplaatsen.

Kleinhans (2002) suggereerde dat er gedurende het hoogwater van 1998 een zandgolf passeerde ter plekke van de Pannerdensch Kop, maar de gegevens waren niet toereikend om dit met zekerheid te kunnen zeggen. Het voorkomen van zandgolven in de Rijn blijft dus met grote onzekerheid omgeven. Datzelfde geldt voor de invloed van eventuele zandgolven op de bodemsamenstelling.

#### 6.2.4 Sortering door duinen

Tijdens hoogwater zorgen de grote duinen in de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal (fig. 6) voor een verticale sortering van de bovengrond, waarbij de korrelgrootte afneemt naar boven toe (*Eng. fining upward*). Dit is het gevolg van twee processen: kinematische sortering op de steile lijzijdehelling van duinen en preferentiële afzetting van grof materiaal in de troggen (Kleinhans, 2002). Het meest kenmerkend gevolg van de verticale duinsortering is het ontstaan van een grindrijke laag in de bedding ter hoogte van de troggen van de grootste duinen die tijdens een hoogwater voorkomen. Kleinhans (2001 en 2002) heeft in de Bovenrijn en de Waal de grindrijke lagen die afkomstig zijn van de hoogwaters van 1995 en 1998 op veel plaatsen terug kunnen vinden.

De verticale sortering door duinen ‘concurrereert’ waarschijnlijk met het bochtsorteringproces (Kleinhans 2002, hoofdstuk 11). Als grof grind namelijk opgeslagen wordt in de troggen van de duinen, dan kan het niet naar de buitenbocht getransporteerd worden door het bochtsorteringproces. Het korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht is dan kleiner dan het geval zou zijn bij afwezigheid van verticale sortering.

Duinen kunnen niet alleen zorgen voor verticale variatie in de bodemsamenstelling, maar ook voor horizontale variatie in de bodemsamenstelling. Wilbers (1999) heeft aangetoond dat de duinen rond de Pannerdensch Kop zich na een afvoerpiek vaak niet aan kunnen passen aan de afnemende afvoer en inactief worden. De toppen van de inactieve duinen worden dan door nieuwe, kleinere duinen afgeërodeerd en het vrijkomende materiaal belandt in de troggen van de inactieve duinen. Omdat als gevolg van de verticale sortering het bovenste deel van een duin veel fijner is dan het eronderliggende deel, kan dit tot een patroon leiden met afwisselend grove en fijne plekken (Kleinhans, 2002). De afstand tussen de grove en fijne plekken is afhankelijk van de afmetingen van de inactieve duinen en varieert tussen 10 en 20 meter. Het mogelijk optreden van dit patroon hangt sterk af van de abruptheid waarmee de grote duinen inactief worden. Tijdens laagwater wordt het patroon van fijne en grove plekken deels weer omgewerkt door de kleine duinen, maar een deel zou intact kunnen blijven totdat de duinen weer groot genoeg worden in een volgend hoogwater om een nieuwe sortering aan te brengen. Dat werd bevestigd in stroomgootproeven met snel veranderende stroming (Kleinhans, 2002), maar kon niet worden aangetoond in de boringen rond de Pannerdensch Kop wegens de lage ruimtelijke resolutie.

#### 6.3 Vergelijking van de bochtsortering bij de Pannerdensch Kop met de bochtsortering in andere rivierbochten

Het is te verwachten dat het korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht in de bochten rond de Pannerdensch kop anders is dan het korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht in andere rivierbochten. In paragraaf 6.2.1 is immers aangegeven dat het korrelgrootteverschil tussen de beide oevers dat veroorzaakt wordt door bochtsortering afhangt van de standaarddeviatie van het sedimentmengsel, de breedte van de rivier, de waterdiepte, de bochtstraal en de bochtlengte.

In deze paragraaf wordt onderzocht of er nog andere factoren van invloed zijn op het korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht. Daartoe wordt het korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever rond de Pannerdensch Kop vergeleken met dat in andere rivierbochten terwijl voor de invloed van de standaarddeviatie, de rivierbreedte, de waterdiepte, de bochtstraal en de bochtlengte gecorrigeerd wordt. Als na deze correctie het korrelgrootteverschil tussen beide oevers bij de Pannerdensch Kop nog steeds afwijkt van dat in andere rivierbochten, dan kan geconcludeerd worden dat de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop beïnvloed wordt door processen of factoren die in andere rivierbochten niet (of in mindere mate) optreden.

In aanvulling op het voorgaande is onderzocht of de bochten rond de Pannerdensch Kop misschien afwijken van de andere rivierbochten met betrekking tot de locatie waarop het korrelgrootteverschil tussen beide oevers maximaal is. Ook dit kan namelijk een aanwijzing vormen voor het optreden van processen die elders niet optreden.

### 6.3.1 Werkwijze

Voor de invloed van de standaarddeviatie van het sedimentmengsel kan gecorrigeerd worden door het absolute korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever te delen door de standaarddeviatie van het sediment. De beschikbare korrelgroottedataset bevat echter geen uitgewerkte waarden voor de standaarddeviatie. Daarom is gestandaardiseerd door te delen door de som van de korrelgrootte aan de linkeroever en de korrelgrootte aan de rechteroever. In feite wordt dus een vorm van de variatiecoëfficiënt (*Eng. coefficient of variation, CV*) gebruikt en er wordt dus impliciet aangenomen dat de standaarddeviatie van het sedimentmengsel lineair toeneemt met de korrelgrootte. Het verschil tussen de korrelgrootte aan de linker- en de rechteroever ( $\Delta D$ , -) wordt dus als volgt berekend:

$$\Delta D = \frac{D50_{links} - D50_{rechts}}{D50_{links} + D50_{rechts}} \quad \text{of} \quad \Delta D = \frac{D90_{links} - D90_{rechts}}{D90_{links} + D90_{rechts}}$$

met:  $D50$  de mediane korrelgrootte (mm) en  $D90$  het negentigste percentiel van de korrelgrootteverdeling (mm). Het subscript *links* duidt op de waarde gemeten op éénvierde van de normaalbreedte van de linkeroever en het subscript *rechts* duidt op de waarde gemeten op éénvierde van de normaalbreedte van de rechteroever.

De benodigde waarden voor de  $D50$  en de  $D90$  zijn ontleend aan de korrelgroottedataset van Ten Brinke (1997). Deze dataset bevat gegevens over de bodemsamenstelling in de Bovenrijn, de Waal en de IJssel. Voor elke kilometer van deze rivieren zijn drie waarden voor de bodemsamenstelling beschikbaar. De eerste waarde is gemeten op éénvierde van de normaalbreedte vanaf de linkeroever, de tweede waarde is gemeten op de rivieras en de derde op éénvierde van de normaalbreedte van de rechteroever. De dataset bevat gegevens over 1951, 1966, 1976, 1984 en 1995. Alleen de gegevens over de laatste twee jaren zijn gebruikt in de analyse. Er bestaan namelijk vermoedens dat in 1951 en misschien ook in 1966 en 1976 een andere meetmethode is gehanteerd, zodat deze data niet vergeleken kunnen worden met de data uit 1984 en 1995. Daarbij komt dat juist in de beginperiode grote temporele veranderingen in de bodemsamenstelling zijn optreden (Ten Brinke, 1997). De gegevens over 1984 en 1995 zijn daarentegen min of meer vergelijkbaar. Voor elke kilometer in de Waal, de Bovenrijn en de IJssel is de waarde van 1984 gemiddeld met die van 1995 om zo de invloed van meetfouten en kleinschalige ruimtelijke variabiliteit (microschaal) te verminderen. Omdat de dataset van Ten Brinke (1997) geen data bevat over het Pannerdensch Kanaal kon het korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever voor de bochten in deze rivier niet berekend worden.

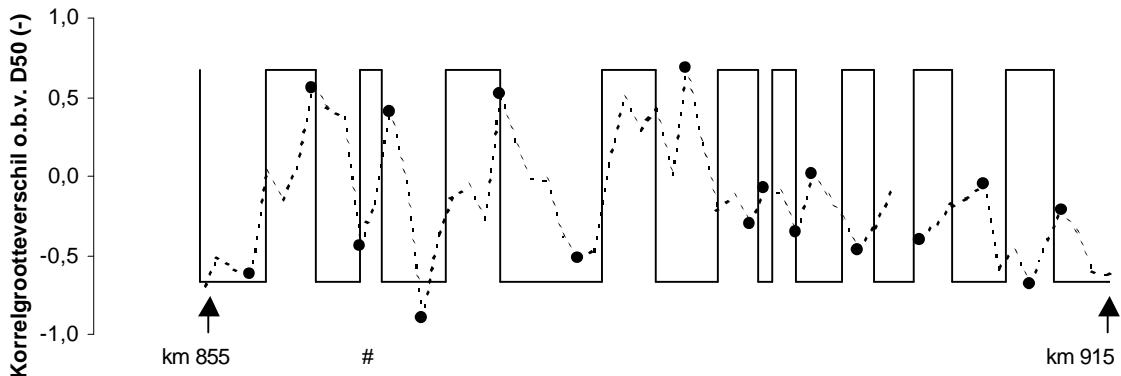
In paragraaf 6.2.1 is beschreven dat het korrelgrootteverschil tussen de beide oevers toeneemt in de loop van de bocht. Een goede vergelijking tussen de bochten bij de Pannerdensch Kop en andere rivierbochten is alleen mogelijk als daarvoor het maximale (gestandaardiseerde) korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever gebruikt wordt. Dit is visueel bepaald aan de hand van grafieken zoals in figuur 23.

Met verschillen in rivierbreedte en bochtstraal is op een andere manier rekening gehouden dan met verschillen in de standaarddeviatie van het sediment. De berekende maximale korrelgrootteverschillen zijn namelijk uitgezet tegen de ratio tussen de rivierbreedte en de bochtstraal. Alleen als de waarden voor de bochten rond de Pannerdensch Kop ver afdiggen van de regressielijn, dan kan geconcludeerd worden dat de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop wordt beïnvloed door factoren die in de rest van de Waal en de Bovenrijn niet (of in mindere mate) voorkomen.

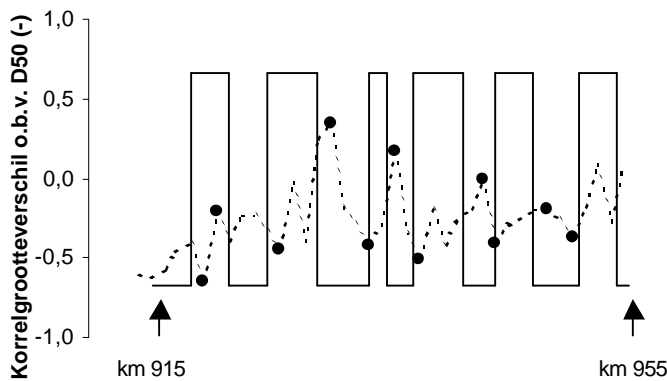
Waarden voor de bochtstraal zijn gedocumenteerd voor de Waal en de IJssel. Voor de IJssel zijn echter op zes plaatsen twee bochten samengevoegd, omdat ze achter elkaar liggen en dezelfde richting op gaan. Ook voor de Waal zijn twee bochten samengevoegd. De straal van de samengestelde bochten is bepaald door het gewogen gemiddelde te nemen van de stralen van de afzonderlijke bochten. Verder is de eerste Waalbocht gesplitst in tweeën, een bocht naar rechts en een bocht naar links. De overgang tussen beide bochten is bepaald aan de hand van een digitaal bestand van de ligging van de rivieras. De plaats waar de richting van de as sterk verandert, is beschouwd als de grens tussen de twee bochten. De straal van deze bocht is bepaald aan de hand van de topografische kaart (TDN, 1985 en 1990). Voor de bochten in de Bovenrijn waren geen

bochtdata beschikbaar. Daarom zijn de bochtstralen voor deze bochten op dezelfde manier bepaald als voor de eerste Waalbocht.

Met verschillen in bocht lengte is op soortgelijke wijze rekening gehouden als met de verschillen in bochtstraal en rivierbreedte: door de maximale korrelgrootteverschillen tussen beide oevers uit te zetten tegen de bocht lengte en te kijken of de bochten rond de Pannerdensch Kop afwijken van de regressielijn door deze data. Met verschillen in waterdiepte is echter geen rekening gehouden. Er wordt namelijk aangenomen dat de verschillen in waterdiepte zo klein zijn dat ze geen invloed hebben op het korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht.



Figuur 23. Bochtsortering in de Bovenrijn en de Waal. De zaagtandcurve geeft de ligging van de bochten aan. Negatieve waarden betekenen een bocht naar links, positieve waarden een bocht naar rechts. De stippelijijn geeft voor elke kilometer het korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever o.b.v. de D50 aan (zie tekst voor definitie). Maxima in dit korrelgrootteverschil die gekoppeld kunnen worden aan bochten zijn aangegeven met een zwarte punt.

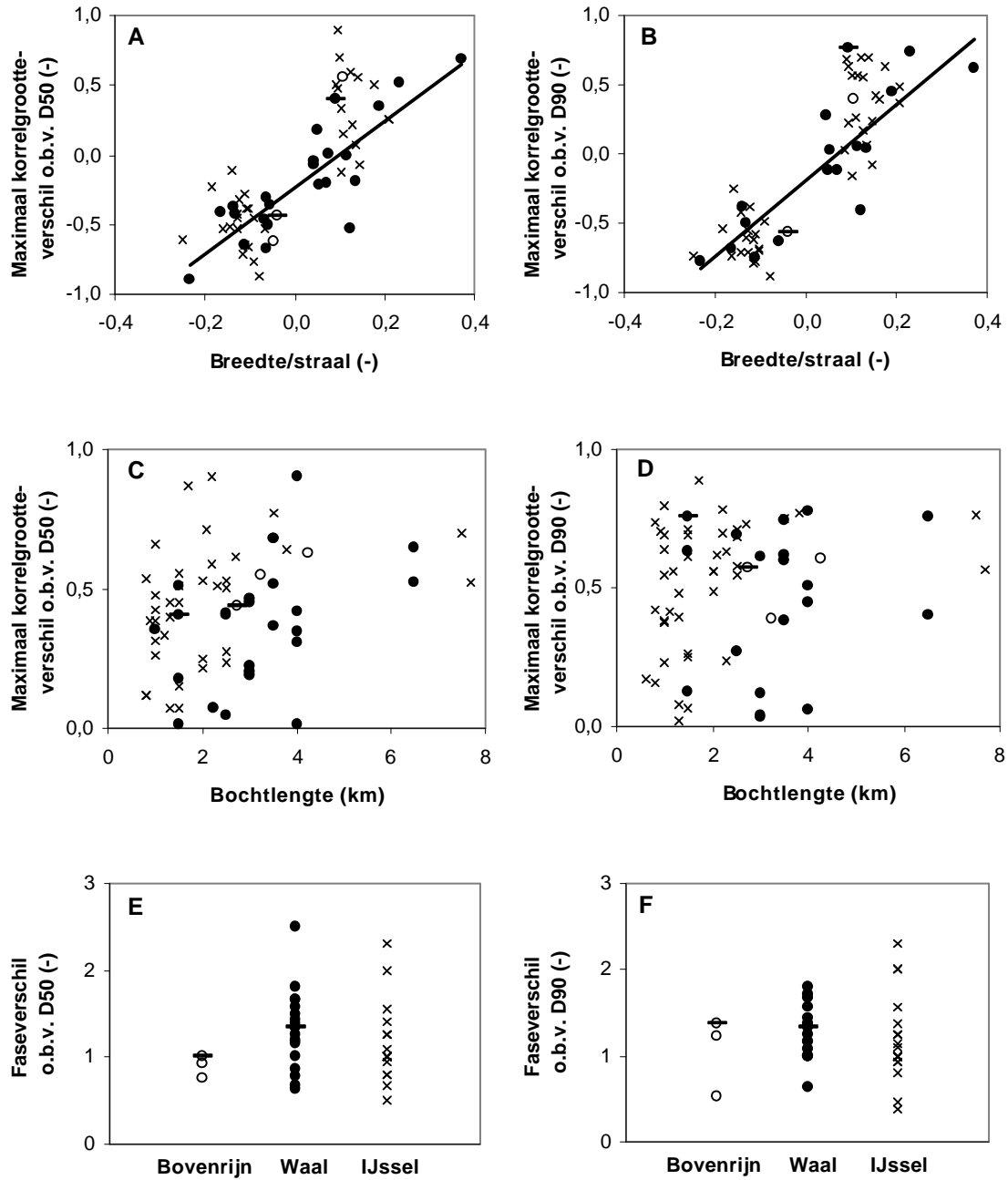


NB: Het hekje geeft de ligging van de Pannerdensch Kop weer, de overgang van de Bovenrijn in de Waal.

Om te onderzoeken of de bochten rond de Pannerdensch Kop misschien afwijken van de andere rivierbochten met betrekking tot de locatie waarop het korrelgrootteverschil tussen beide oevers maximaal is, is een nieuwe parameter berekend, het faseverschil. Dit is gedefinieerd als de afstand van het begin van de bocht tot de plaats waar het korrelgrootteverschil tussen beide oevers maximaal is, gedeeld door de lengte van de bocht. Als de locatie van dit maximale korrelgrootteverschil samenvalt met het einde van de bocht, dan is het faseverschil gelijk aan 1. Waarden voor het faseverschil zijn afgeleid uit figuur 23. Door het faseverschil in de bochten rond de Pannerdensch Kop te vergelijken met dat in andere rivierbochten is onderzocht of de bochten rond de Pannerdensch Kop afwijken van de andere rivierbochten.

### 6.3.2 Resultaten

In figuur 24A tot en met D staat het gestandaardiseerde maximale korrelgrootteverschil uitgezet tegen de bocht kromming en de bocht lengte (zie ook bijlage 1 en 2). Uit de grafieken blijkt dat vooral de bocht kromming sterk van invloed is op het korrelgrootteverschil. In figuur A en B valt op dat enkele bochten een veel groter korrelgrootteverschil vertonen tussen binnen- en buitenbocht dan de andere bochten. Het gaat hier om de bochten in de Bovenrijn, de eerste bocht in de Waal en de eerste paar bochten in de IJssel. In figuur 24E en F is het faseverschil weergegeven. Uit deze grafieken blijkt dat de bochten rond de Pannerdensch Kop met betrekking tot het faseverschil niet verschillen van de andere bochten in de Waal, de Bovenrijn en de IJssel.



Figuur 24. Vergelijking van de bochten bij de Pannerdensch Kop met andere rivierbochten in de Bovenrijn, de Waal en de IJssel. De Waalbochten zijn aangegeven met een zwart bolletje, de bochten in de Bovenrijn met een open bolletje en de bochten in de IJssel met een kruisje. De bochten rond de Pannerdensch Kop zijn bovendien gemarkeerd met een liggend streepje. A. Maximaal korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever o.b.v. D50 versus de ratio tussen rivierbreedte en bochtstraal. B. Maximaal korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever o.b.v. D90 versus de ratio tussen rivierbreedte en bochtstraal. C. De absolute waarde van het maximale korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever o.b.v. D50 versus bochtlengthe. D. De absolute waarde van het maximale korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever o.b.v. D90 versus bochtlengthe. E. Faseverschil o.b.v. D50. F. Faseverschil o.b.v. D90. In de grafieken A en B is tevens de regressielijn door de Waaldata getekend. Voor de definitie van de gebruikte parameters wordt verwezen naar de tekst.

### 6.3.3 Discussie

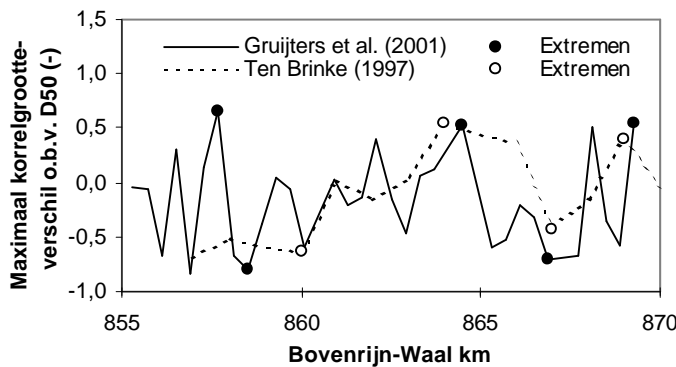
In de vorige paragraaf is gebleken dat het korrelgrootteverschil tussen de linker- en de rechteroever in de bochten rond de Pannerdensche Kop groter is dan in de meeste andere rivierbochten. Alleen enkele bochten in het begin van de IJssel hebben een vergelijkbaar korrelgrootteverschil. De vraag is nu of dit het gevolg is van onderliggende processen of van fouten in bovenstaande analyse.

Bovenstaande analyse heeft te lijden onder twee soorten fouten: fouten in de locatie van het punt waarop het korrelgrootteverschil tussen beide oevers maximaal is en fouten in de waarde van dit maximale korrelgrootteverschil. In theorie kunnen ook de gebruikte bochtlengte- en bochtkrommingswaarden fouten bevatten, maar deze worden verwaarloosbaar geacht.

Fouten in de locatie van het punt waarop het korrelgrootteverschil tussen beide oevers maximaal is, zijn voornamelijk het gevolg van het feit dat alleen voor de kilometerpunten korrelgroottegegevens beschikbaar zijn. Het werkelijke maximale korrelgrootteverschil kan dus ten hoogste één kilometer afliggen van het punt dat in figuur 23 aangewezen is als maximaal korrelgrootteverschil. Verder kunnen dergelijke fouten ook veroorzaakt worden door fouten in de korrelgrootte. Als er namelijk twee pieken in het korrelgrootteverschil optreden vlak na elkaar, kunnen korrelgroottefouten ervoor zorgen dat de verkeerde piek geselecteerd wordt als maximaal korrelgrootteverschil.

Ook fouten in de waarde van het maximale korrelgrootteverschil kunnen veroorzaakt worden door fouten in de korrelgroottedataset en door de geringe meetdichtheid. Het is onwaarschijnlijk dat precies op het punt waarop het korrelgrootteverschil tussen beide oevers maximaal is een korrelgroottemeting is gedaan. Het berekende maximale korrelgrootteverschil zal daarom vrijwel altijd kleiner zijn dan het werkelijke.

Voor de meeste rivierbochten is het niet mogelijk in te schatten hoe groot bovengenoemde fouten zijn. Voor de bochten rond de Pannerdensche Kop kan dat echter wel. De korrelgroottedataset van Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>) bevat immers korrelgroottegegevens om de 400 meter.



Figuur 25. Vergelijking tussen het maximale korrelgrootteverschil tussen beide oevers berekend op basis van de korrelgroottedataset van Ten Brinke (1997) en het maximale korrelgrootteverschil tussen beide oevers berekend op basis van de korrelgroottedataset van Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>). De dataset van Ten Brinke (1997) bevat korrelgroottewaarden om de 1000 meter, terwijl de dataset van Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>) data bevat om de 400 meter.

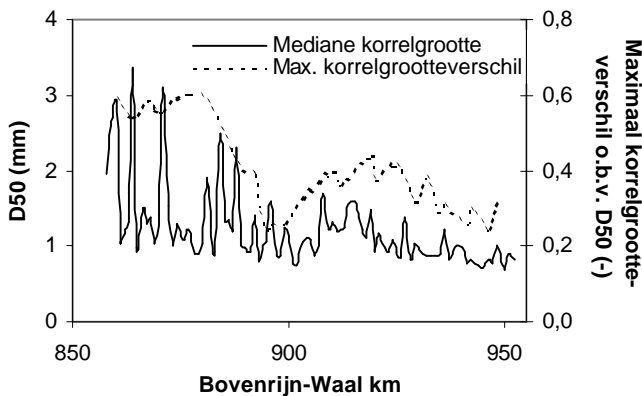
In figuur 25 staat het maximale korrelgrootteverschil tussen beide oevers weergegeven, berekend op basis van de dataset van Ten Brinke (1997) en de dataset van Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>). Uit de figuur blijkt dat de afwijking in de locatie van het punt waar het korrelgrootteverschil maximaal is, klein is. De faseverschillen rond de Pannerdensche Kop zijn dus goed berekend. Het is echter waarschijnlijk dat dit op veel plaatsen in de andere rivierbochten niet het geval is. De curve op basis van de data van Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>), toont namelijk aan dat de kleinschalige longitudinale variatie zeer groot is, terwijl deze variabiliteit in de data van Ten Brinke (1997) niet naar voren komt, door de grotere afstand tussen de boringen. Dit betekent dat de kans groot is dat in verschillende andere bochten een secundaire top aangewezen is als maximaal korrelgrootteverschil, en niet de werkelijke top. Het betreft hier echter een random fout, die niets afdoet aan de conclusie dat de bochten rond de Pannerdensche Kop wat betreft het faseverschil niet afwijken van de andere rivierbochten.

Uit figuur 25 blijkt tevens dat de grootte van het maximale korrelgrootteverschil tussen beide oevers berekend volgens Ten Brinke (1997) ongeveer 0,1 à 0,2 kleiner is dan indien berekend

volgens Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>). Zoals al vermoed wordt het maximale korrelgrootteverschil tussen beide oevers dus steevast onderschat bij gebruik van de data van Ten Brinke. Deze onderschatting zal in andere rivierbochten even sterk zijn als rond de Pannerdensche Kop.

Er is geen enkele aanleiding om te veronderstellen dat de grote korrelgrootteverschillen tussen binnen- en buitenbocht rond de Pannerdensche Kop het gevolg zijn van fouten. Er moet een fysische verklaring voor bestaan. In figuur 26 staat het verloop van het maximale korrelgrootteverschil in stroomafwaartse richting gegeven voor de Bovenrijn en de Waal. Duidelijk blijkt dat er een plotselinge afname optreedt rond rivierkilometer 890. Deze sprong valt samen met de al eerder genoemde sprong in korrelgrootte, de overgang van grindrivier naar zandrivier. Ook in de IJssel valt de overgang van bochten met een groot korrelgrootteverschil naar bochten met een klein korrelgrootteverschil samen met de overgang van grindrivier naar zandrivier. Blijkbaar is het verschil in korrelgrootte tussen binnen- en buitenbocht in grindrivieren groter dan in zandrivieren. Zelfs groter dan op grond van de grotere standaarddeviatie van het sedimentmengsel verwacht kan worden, want hiervoor is gecorrigeerd.

Een mogelijke verklaring kan gevonden worden in Dietrich & Whiting (1989). In grindrivieren is het schuifspanningoverschot (*Eng. excess shear stress*) boven de kritieke schuifspanning veel kleiner dan in zandrivieren. Zeer grof materiaal kan dan ook alleen tijdens extreme hoogwaters getransporteerd worden. Na afloop van zo'n extreem hoogwater rolt dit zeer grof materiaal onder invloed van het bochtsorteringsproces naar de buitenbocht en blijft daar liggen wachten op een volgend extreem hoogwater. Daardoor is het materiaal dat in de buitenbochten van grindrivieren aanwezig is, volgens Dietrich & Whiting (1989) grover dan het grofste deel uit het jaarlijkse bodemtransport. In zandrivieren is dat niet het geval. Daar is het materiaal in de buitenbocht qua samenstelling wel vergelijkbaar met het grofste deel uit het jaarlijkse bodemtransport.



Figuur 26. Stroomafwaartse verandering in de mediane korrelgrootte (D50) en het maximale korrelgrootte-verschil tussen beide oevers o.b.v. D50 in de Bovenrijn en de Waal.

### 6.3.4 Conclusies

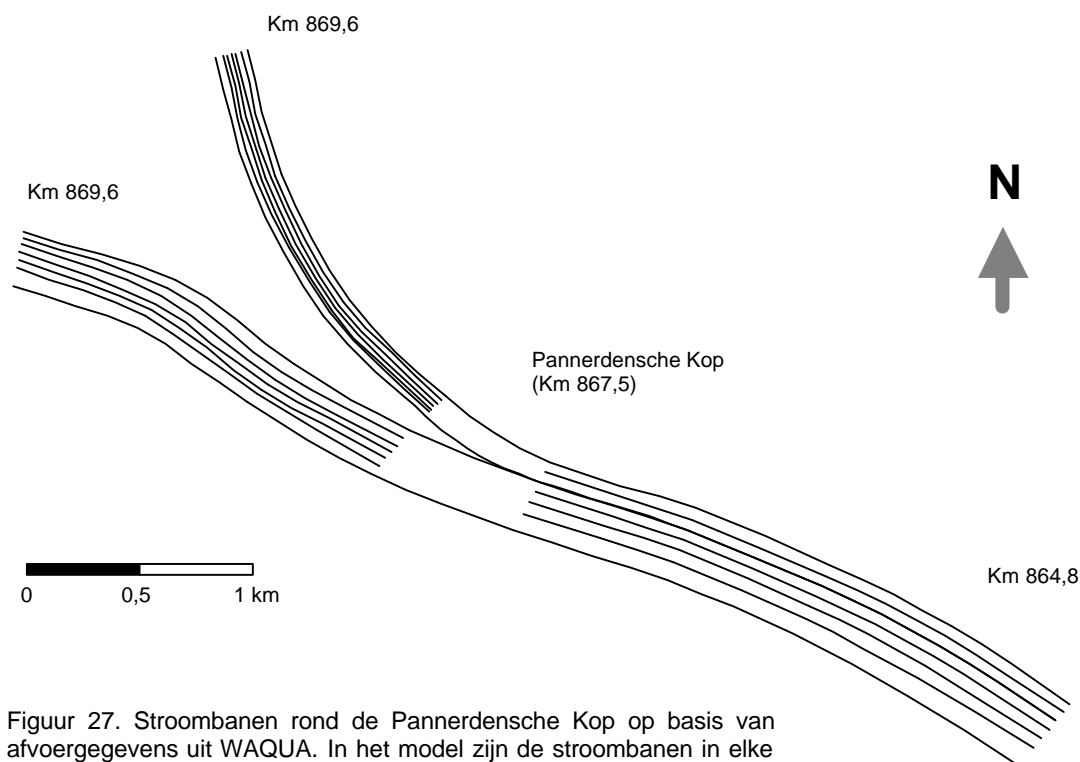
Zelfs als gecorrigeerd wordt voor verschillen in bochtvorming, standaarddeviatie van het sediment, rivierbreedte, waterdiepte en bocht lengte, blijkt het maximale korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht in de bochten rond de Pannerdensche Kop veel groter te zijn dan in de benedenstroomse bochten van de Waal (en de IJssel). Het is onwaarschijnlijk dat dit veroorzaakt wordt door fouten in de berekening, hoewel deze plaatselijk groot kunnen zijn als gevolg van de geringe datadichtheid.

De afwijking van de eerste Waalbocht in vergelijking met de andere Waalbochten heeft vermoedelijk te maken met de verschillen in beddingsediment. In vrijwel de gehele Waal bestaat de bedding uit zand, maar in de eerste paar Waalbochten bestaat de bodem uit grind. Omdat het schuifspanningoverschot in grindrivieren veel kleiner is dan in zandrivieren is het sediment in de buitenbochten van grindrivieren relatief veel grover dan het sediment in de buitenbochten van zandrivieren (Dietrich & Whiting, 1989).

Ook in de Bovenrijn bestaat het beddingsediment uit grind en daarom is het korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht hier ook groot. De bocht in de Bovenrijn bij de Pannerdensche Kop wijkt echter niet af van de andere bochten in de Bovenrijn.

## 7 Ruimtelijke variaties in bodemruwheid

Vaak wordt getracht ruimtelijke variaties in bodemruwheid te voorspellen aan de hand van alluviale ruwheidvoorspellers, zoals de formules van Vanoni & Hwang (1989), Engelund (1977) en Van Rijn (1984; alle in Ogink, 1989). Deze formules zijn echter gebaseerd op stroomgootproeven en daarom minder geschikt voor natuurlijke rivieren.



Figuur 27. Stroombanen rond de Pannerdensche Kop op basis van afvoergegevens uit WAQUA. In het model zijn de stroombanen in elke riviertak genummerd van 1 tot en met 6, beginnende bij de linkeroever.

In dit hoofdstuk wordt op een andere manier getracht de ruimtelijke variaties in bodemruwheid rond de Pannerdensche Kop te achterhalen. Met behulp van het waterbewegingsmodel WAQUA wordt de ruimtelijke verdeling van een aantal hydraulische parameters bepaald. Deze worden samen met gegevens over het ruimtelijk patroon in de bodemsamenstelling gebruikt om het sedimenttransport te berekenen. Er wordt verondersteld dat de richting van het sedimenttransport gelijk is aan de richting van de waterstroming, zodat er stroombanen gecreëerd kunnen worden, waartussen geen sedimentuitwisseling plaatsvindt. Binnen een stroombaan moet het sedimenttransport overal gelijk zijn, omdat de bodemligging rond de Pannerdensche Kop niet significant verandert op een tijdschaal van één tot enkele jaren. Als uit de transportberekening volgt dat binnen een stroombaan wel verschillen bestaan in het sedimenttransport dan wordt ervan uitgegaan dat dit komt door een foute waarde voor de bodemruwheid. De bodemruwheid wordt vervolgens zoveel veranderd dat het sedimenttransport overal in een stroombaan gelijk is.

Aan het eind van dit hoofdstuk wordt ingegaan op de betrouwbaarheid van het aldus bepaalde ruimtelijke patroon in bodemruwheid. In hoofdstuk 8 zal getracht worden een fysische verklaring te vinden voor het gevonden patroon in bodemruwheid.

### 7.1 WAQUA-berekeningen

Het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) heeft voor een aantal dwarsraaien de waterstand, de afvoer en de stroomsnelheid berekend. Deze dwarsraaien (voortaan aangeduid met *RIZA-raaien*) liggen 600 meter van elkaar. Op elke dwarsraai liggen 7 tot 22 datapunten met waterstand-, afvoer- en snelheidwaarden.



Voor de berekening van de waterstand-, afvoer- en snelheidwaarden is gebruik gemaakt van het tweedimensionale waterbewegingsmodel WAQUA. Daarbij is een geschematiseerde vaste rivierbedding met een (vrijwel) constante bodemruwheid gebruikt. De modelafvoer bedroeg 2400 m<sup>3</sup>/s.

## 7.2 Interpolatie van de WAQUA-resultaten

Op basis van de afvoerwaarden uit WAQUA zijn in elke riviertak zes stroombanen gecreëerd met een gelijke afvoer (fig. 27). Een aantal van zes stroombanen is voldoende om de laterale variatie in sedimenttransport goed te kunnen berekenen (Kleinhans & Ten Brinke, 2001). De afvoer per stroombaan is in de Bovenrijn 400 m<sup>3</sup>/s, in de Waal 273 m<sup>3</sup>/s en in het Pannerdensch Kanaal 127 m<sup>3</sup>/s.

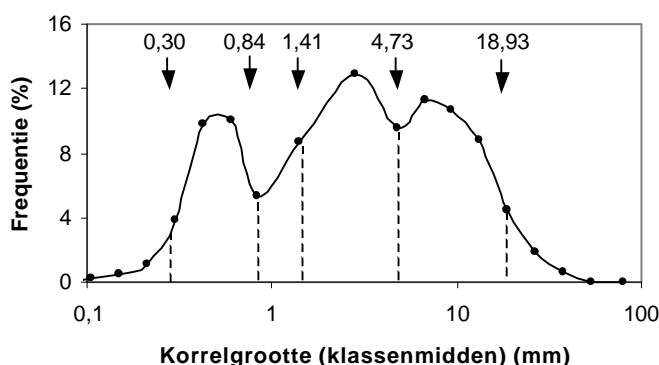
De breedte van de stroombanen varieert tussen de opeenvolgende RIZA-raaien en is groter in binnenbochten dan in buitenbochten. Van elke stroombaan is voor elke RIZA-raai de exacte breedte bepaald, alsmede de gemiddelde snelheid, de gemiddelde waterdiepte en de gemiddelde bodemruwheid. Daarbij is aangenomen dat de waterdiepte, de bodemruwheid en de snelheid lineair veranderen in dwarsrichting.

De RIZA-raaien vallen niet samen met de dwarsraaien waarop het NITG (Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>) de bodemsamenstelling gemeten heeft. Deze raaien (voortaan aangeduid met *NITG-raaien*) liggen namelijk slechts 400 meter uiteen. Per stroombaan zijn daarom de waterdiepte, de bodemruwheid, de stroomsnelheid en stroombaanbreedte van de RIZA-raaien lineair geïnterpoleerd naar de NITG-raaien.

## 7.3 Interpolatie van de bodemsamenstelling

In het Pannerdensch Kanaal is op drie punten per NITG-dwarsraai de bodemsamenstelling van de bovengrond (0 – 20 centimeter diepte) bekend. In de Bovenrijn en de Waal is de bodemsamenstelling van de bovengrond op 7 punten per NITG-dwarsraai bekend. Op basis van al deze meetwaarden is de gemiddelde korrelgrootteverdeling van de bovengrond berekend (fig. 28). Dit bleek een drietoppige verdeling te zijn. Elk van deze drie toppen is in tweeën gedeeld, zodat er zes korrelgrootteklassen zijn ontstaan (fig. 28). Er is gecontroleerd of deze klassen ook in de afzonderlijke riviertakken een goede representatie vormen van de korrelgrootteverdeling. Dat bleek het geval. Van elke klasse is toen de gemiddelde korrelgrootte bepaald en het aandeel van deze klasse in de totale korrelgrootteverdeling.

Vervolgens zijn deze waarden toegekend aan de stroombaan waar ze in liggen. Voor stroombanen waarin geen meting van de bodemsamenstelling is uitgevoerd, is aangenomen dat de bodemsamenstelling gelijk is aan de bodemsamenstelling van de aangrenzende stroombaan. Er is dus geen lineaire interpolatie uitgevoerd in dwarsrichting, want er wordt vermoed dat het verloop van de korrelgrootte in dwarsrichting sterk niet-lineair is.



Figuur 28. Gemiddelde korrelgrootteverdeling van de bovengrond (0-20 cm) van de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal (naar: Gruijters *et al.*, 2001). Ook zijn de klassengrenzen van de zes korrelgrootteklassen aangegeven, die in de analyse onderscheiden zijn.

## 7.4 Transportberekeningen

Op basis van enerzijds de stroomsnelheid-, breedte-, waterdiepte- en ruwheidwaarden en anderzijds de gegevens over de bodemsamenstelling is per stroombaan het sedimenttransport voor

alle korrelgrootteklassen berekend op de NITG-raaien. Daarbij is gebruik gemaakt van een door het RIZA gebruikte variant van de transportformule van Meyer-Peter & Müller (1948), waarin wordt gecorrigeerd voor afschermings-blootstellingseffecten (*Eng. hiding-exposure*) (zie ook Kleinhans & Van Rijn, 2002). Deze formule heeft de volgende vorm:

$$s_i = p_i m w \sqrt{\Delta g D_i^3 q_{cr,i}^3} \left( \frac{m q_i}{q_{cr,i}} \right)^{3/2} \left( 1 - x \left[ \frac{D_i}{D_m} \right]^{-r} \left[ \frac{q_{cr,i}}{m q_i} \right] \right)^{3/2}$$

met:

$$q_i = \frac{u^2}{C^2 \Delta D_i} \quad \text{en} \quad C = 18 \log \left( \frac{12h}{k} \right)$$

Hierin is  $s_i$  het bodemtransport per korrelgrootteklasse  $i$  ( $m^3/s$ ),  $p_i$  het aandeel van korrelgrootteklasse  $i$  in de toplaag (volumefractie, -),  $m$  een constante (13,3),  $w$  de breedte van de stroombaan (m),  $\rho$  de relatieve dichtheid van sediment onder water (1,65),  $g$  de zwaartekrachtversnelling ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $\tau_{cr,i}$  de kritieke Shieldsschuifspanning, voor elke korrelgrootteklasse  $i$  bepaald aan de hand van de Shieldscurve (-),  $\tau$  de Shieldsschuifspanning van korrelgrootteklasse  $i$  (-),  $\mu$  de ribbelfactor (0,7),  $x$  de hiding-exposurecoëfficiënt (1),  $D_i$  het klassenmidden van korrelgrootteklasse  $i$  (m),  $D_m$  de gemiddelde korrelgrootte van de toplaag (m),  $u$  de stroomsnelheid (m/s),  $C$  de Chézy-waarde ( $m^{1/2}/s$ ),  $h$  de waterdiepte (m) en  $k$  de bodemruwheid uitgedrukt als Nikuradses equivalente ruwheidlengte (m).

Vervolgens is voor elke stroombaan het totale transport over alle korrelgrootteklassen berekend ( $s$ ,  $m^3/s$ ):

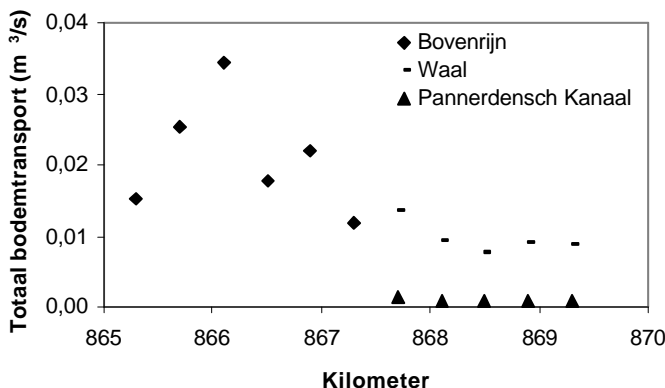
$$s = \sum_{i=1}^6 s_i$$

Alle berekeningen zijn uitgevoerd in een spreadsheet met het programma *Microsoft Excel*.

## 7.5 Bepaling van het evenwichtstransport

Aan het begin van dit hoofdstuk is al aangegeven dat het sedimenttransport overal binnen een bepaalde stroombaan gelijk moet zijn, omdat wordt aangenomen dat de bodemligging rond de Pannerdensche Kop niet significant verandert op korte tijdschaal. Er is echter niet bekend hoe groot dit evenwichtstransport per stroombaan is. Er is getracht een schatting van deze evenwichtstransporten per stroombaan te maken door eerst het evenwichtstransport per dwarsdoorsnede te bepalen (dus de som van de transporten in de zes stroombanen) en dit vervolgens onder te verdelen in evenwichtstransporten per stroombaan.

Om het evenwichtstransport per dwarsdoorsnede te bepalen, ligt het voor de hand per riviertak de berekende totaaltransporten van alle dwarsdoorsneden te middelen. Op deze manier bepaalde evenwichtstransporten voldoen echter niet aan de essentiële voorwaarde dat het transport in de



Figuur 29. Berekend totaal bodemtransport in de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal. De gegeven waarden zijn sommaties van het transport van alle stroombanen in een dwarsdoorsnede.

Bovenrijn gelijk moet zijn aan de som van de transporten in de Waal en het Pannerdensch Kanaal (fig. 29). Daarom zijn de transporten aan de bovenstroomse randen van de riviertakken opgevat als evenwichtstransport. Nu geldt dat de massabalans kloppend is.

Vervolgens is het gemiddelde aandeel van een stroombaan in het totaal transport van een dwarsdoorsnede bepaald per riviertak. Het evenwichtstransport per stroombaan is vervolgens berekend door deze aandelen te vermenigvuldigen met het totaal transport aan de bovenstroomse randen.

## 7.6 Bepaling van de bodemruwheid

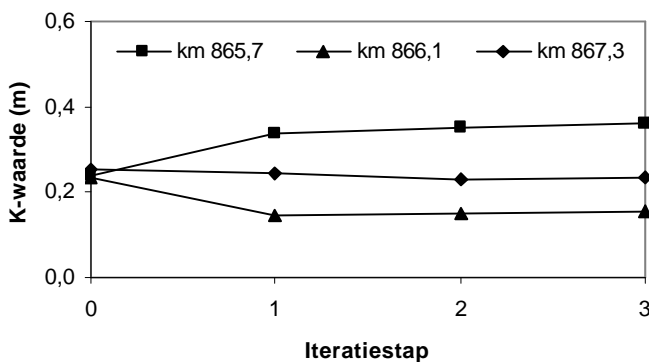
Voor elke stroombaan in elke dwarsdoorsnede is de afwijking berekend tussen het transport en het evenwichtstransport. In Microsoft Excel is vervolgens met het commando *Doelzoeken* en de toepassing *Oplosser* getracht deze afwijkingen te minimaliseren. Daarbij zijn alleen de ingevoerde waarden voor de bodemruwheid ( $k$ ) veranderd.

Voor het grootste deel van de stroombanen was het mogelijk de transporten gelijk te krijgen aan de evenwichtstransporten met reële ruwheidwaarden (kleiner dan 80 centimeter). Op enkele plaatsen (vooral in stroombaan 1) was dit niet mogelijk. Deze plaatsen lijken samen te vallen met de locaties waarop de korrelgroottemonsters een extreem aandeel grof of fijn materiaal bevatten. Op deze plaatsen zijn de oorspronkelijke ruwheidswaarden teruggeplaatst.

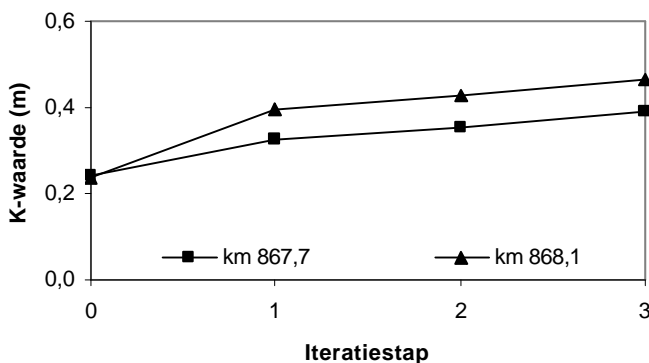
## 7.7 Iteratie

Het nu berekende ruimtelijk patroon in de bodemruwheid is nog niet juist. Veranderingen in de bodemruwheid hebben namelijk gevolgen voor de stroomsnelheid en de waterdiepte. Daarom zijn de berekende waarden voor de bodemruwheid teruggeïnterpoleerd naar de RIZA-raaien. Het RIZA heeft vervolgens weer nieuwe stroomsnelheid- en waterdieptegegevens berekend. Deze waarden zijn gebruikt om een nieuwe bodemruwheidverdeling te berekenen. Daarna is deze iteratieprocedure nogmaals herhaald.

In figuur 30 en 31 staat het verloop van de bodemruwheid voor twee representatieve stroombanen weergegeven in de verschillende iteratiestappen. Op de meeste plaatsen nadert de bodemruwheid tot een constante waarde. Dit geldt niet voor stroombaan 6 in de Bovenrijn en de stroombanen 2, 4 en 5 in het Pannerdensch Kanaal. Daar vindt een voortdurende stijging van de bodemruwheid plaats (voor de ligging van deze stroombanen zie fig. 27)



Figuur 30. Verandering van de bodemruwheid ( $k$ -waarde) gedurende de verschillende iteratiestappen in stroombaan 5 op de dwarsraaien 865,7, 866,1 en 867,3 in de Bovenrijn. Het getoonde verloop in  $k$ -waarden is representatief voor de stroombanen 1 tot en met 5 in de Bovenrijn, 2 tot en met 6 in de Waal en stroombanen 3 en 6 in het Pannerdensch Kanaal.

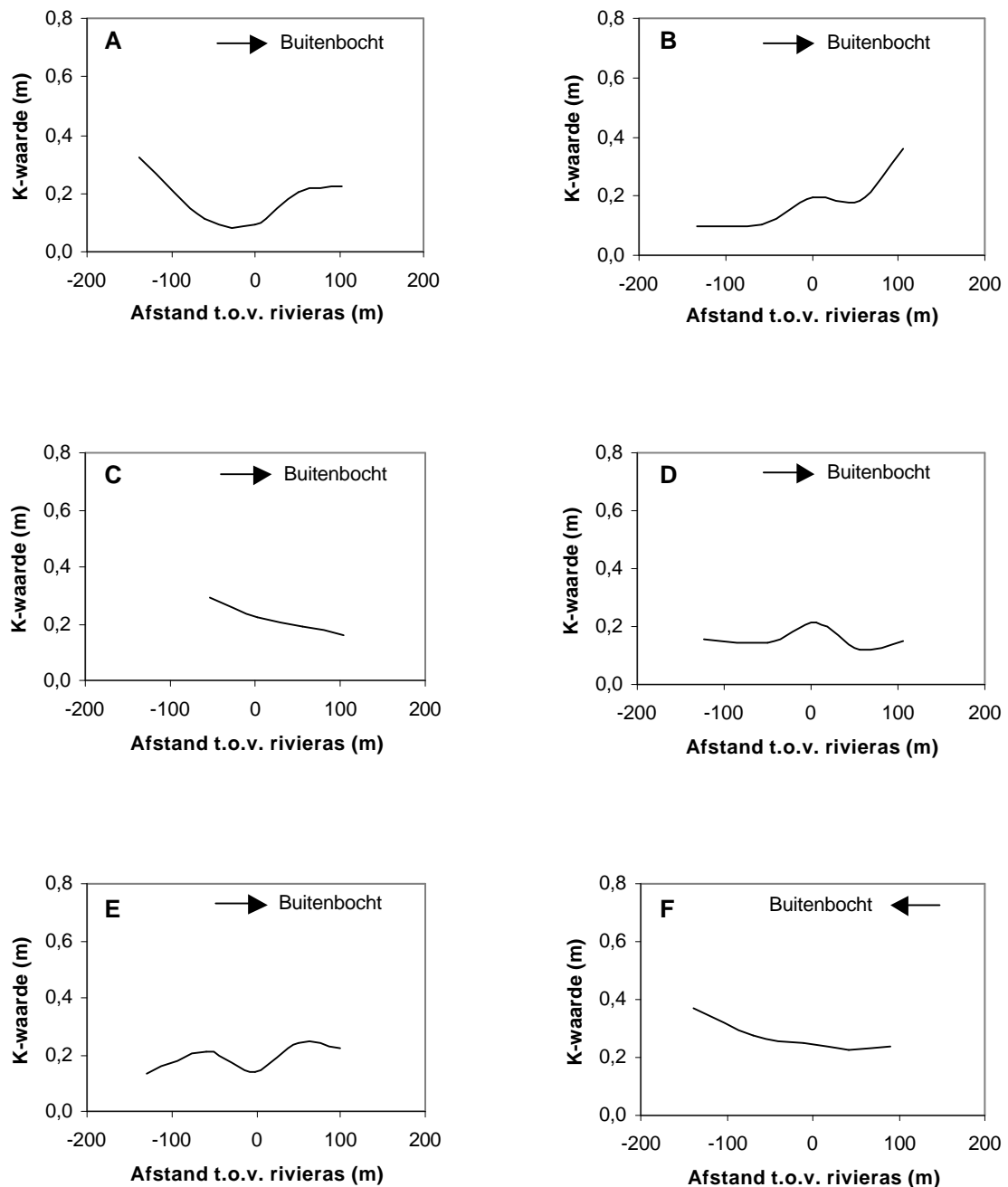


Figuur 31. Verandering van de bodemruwheid ( $k$ -waarde) gedurende de verschillende iteratiestappen in stroombaan 5 op de dwarsraaien 867,7 en 868,1 in het Pannerdensch Kanaal. Het getoonde verloop in  $k$ -waarden is representatief voor stroombaan 6 in de Bovenrijn en stroombanen 2, 4 en 5 in het Pannerdensch Kanaal.

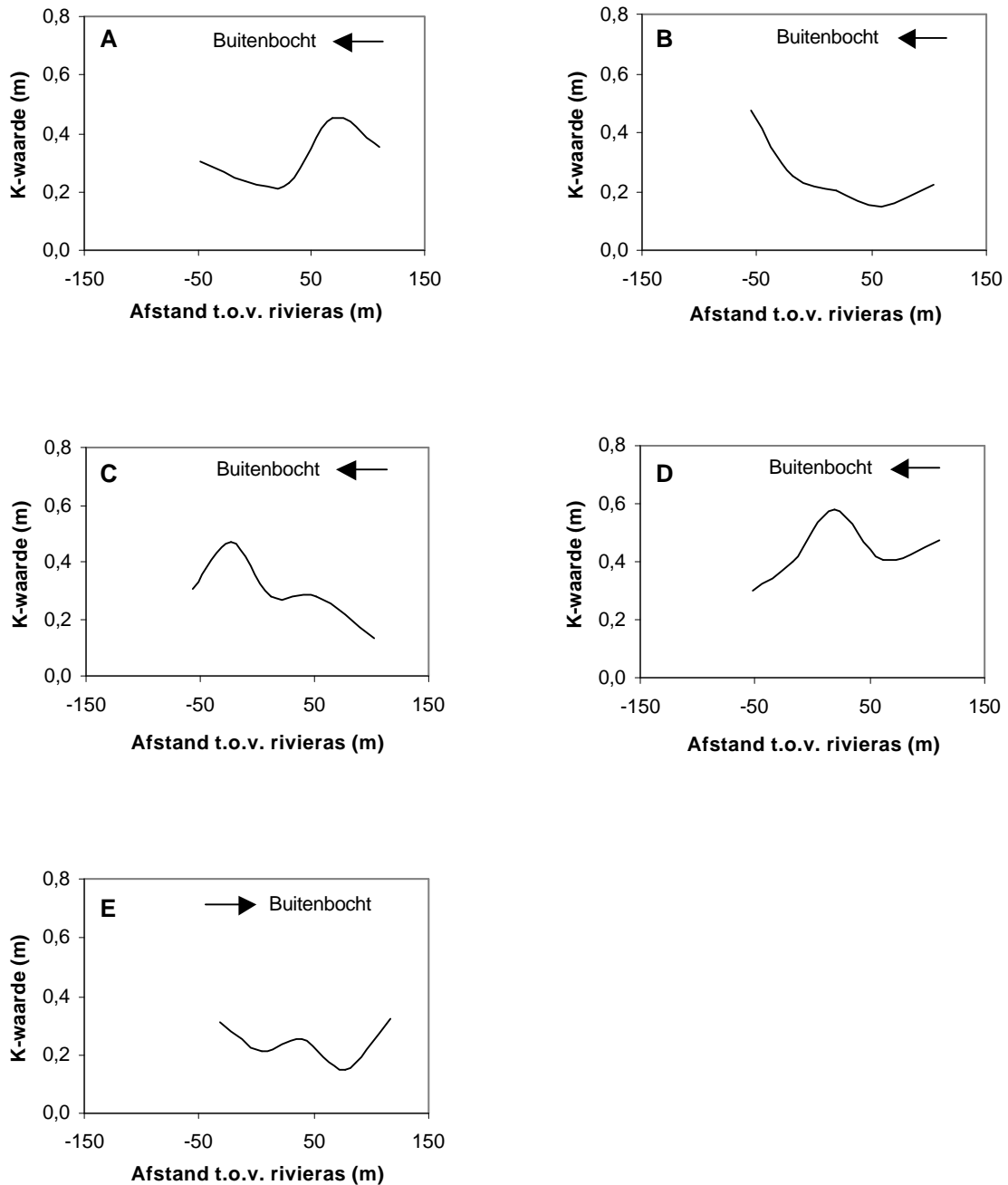
## 7.8 Ruimtelijk patroon in de bodemruwheid

In figuur 32 en 33 is voor alle dwarsdoorsneden in de Bovenrijn en de Waal het lateraal verloop in de bodemruwheid weergegeven. Op plaatsen waar geen evenwichtstransport bereikt kon worden met reële ruwheidwaarden, is de ruwheidwaarde weggelaten uit de grafieken. Het lateraal verloop van de bodemruwheid in het Pannerdensch Kanaal is niet weergegeven, omdat de de ruwheidswaarden tijdens de uitgevoerde iteratiestappen hier niet convergerden..

In figuur 34 is het ruwheidspatroom in de Bovenrijn en de Waal bovendien twee-dimensionaal weergegeven. Uit de figuren blijkt dat de berekende bodemruwheid sterk varieert op korte afstand: het ruwheidspatroom is zeer vlekkerig.



Figuur 32. Lateraal verloop van de bodemruwheid (k-waarde) in de Bovenrijn . A. dwarsraai 865,3. B. dwarsraai 865,7. C. dwarsraai 866,1. D. dwarsraai 866,5. E. dwarsraai 866,9. F. dwarsraai 867,3.

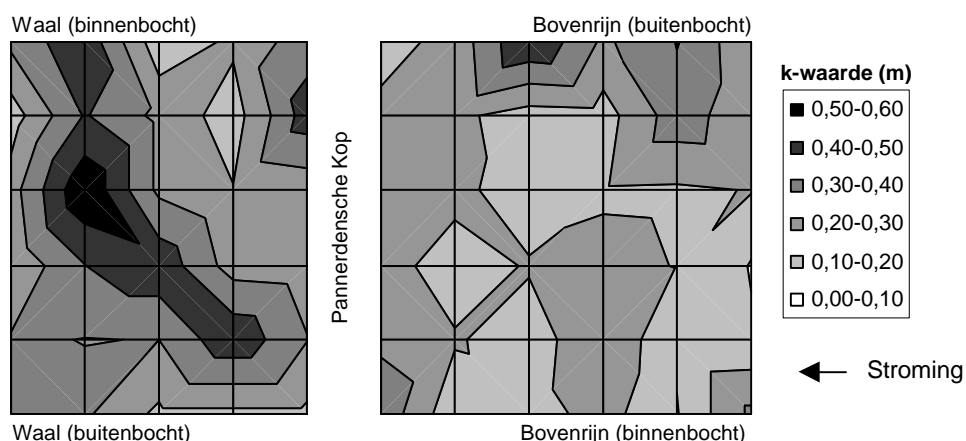


Figuur 33. Lateraal verloop van de bodemruwheid (k-waarde) in de Waal. A. dwarsraai 867,7. B. dwarsraai 868,1. C. dwarsraai 868,5. D. dwarsraai 868,9. E. dwarsraai 869,3.

## 7.9 Foutenanalyse

In deze paragraaf zal ingegaan worden op de betrouwbaarheid van het bepaalde ruimtelijk patroon in bodemruwheid.

Een eerste voorwaarde voor de juistheid van de bepaalde ruwheden is dat de sediment- en waterverdeling die berekend wordt in overeenstemming is met de werkelijkheid. In het afvoerpatroon dat bepaald is met WAQUA gaat 68 % van de Bovenrijnafvoer naar de Waal en 32 % naar het Pannerdensch Kanaal. Deze waarden komen overeen met de werkelijke afvoerdeling. Het berekende evenwichtstransport in de Bovenrijn bedraagt ongeveer 475.000 m<sup>3</sup> per jaar (fig. 29). Dit is ongeveer 50 % hoger dan het door Ten Brinke *et al.* (2001) berekende



Figuur 34. Schematisatie van het berekende ruwheidspatroon (k-waarde) in de Bovenrijn en de Waal tussen kilometer 865,3 (rechtterrand) en kilometer 969,3 (linkerand). De afstand tussen twee verticale rasterlijnen is gelijk aan 400 meter. Omdat in de strook langs de linkeroever met de hier gebruikte methode geen reële ruwheidswaarden gegenereerd konden worden (§7.6), zijn voor deze strook de oorspronkelijke ruwheidswaarden weergegeven.

jaarlijkse sedimenttransport. Van de 475.000 m<sup>3</sup> gaat 88 % door de Waal en 12 % door het Pannerdensch Kanaal. Dit zijn reële waarden.

Een andere voorwaarde voor de juistheid van het bepaalde ruwheidspatroon is dat de waterstand en de stroomsnelheid gedurende de iteratieprocedure geen irreële waarden hebben bereikt. Uit tabel 9 blijkt dat ook aan deze voorwaarde wordt voldaan. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het feit dat hoewel de ruimtelijke verdeling van de bodemruwheid sterk is veranderd gedurende de iteratie, de gemiddelde bodemruwheid in een dwarsdoorsnede vrijwel gelijk is gebleven.

Tabel 9. Verandering van de waterstand en de stroomsnelheid gedurende de iteratie.

	Gemiddelde verandering	Max. verandering (lokaal)
Stroomsnelheid	-0,005 m/s	0,05 m/s
Waterdiepte	0,4 cm	15 cm

Als gevolg van de veranderingen in de stroomsnelheid en de waterdiepte verandert ook de afvoerverdeling over de dwarsdoorsnede. Dit houdt in dat eigenlijk in elke iteratiestap nieuwe stroombanen gecreëerd hadden moeten worden. Dit is niet gebeurd, maar in geen enkele stroombaan veranderde de afvoer gedurende de iteratiestappen meer dan 2 procent, zodat hierdoor geen significante fouten zullen zijn ontstaan.

Toch zorgt het gebruik van stroombanen voor een grote onzekerheid in de hele analyse. Er is namelijk aangenomen dat alle water door de zes stroombanen in het zomerbed stroomt, maar uit de door het RIZA geleverde data blijkt dat er op sommige plaatsen ook afvoer door of langs de kribvakken gaat (maximaal 4 procent). Daar komt bij dat ervan uitgegaan is dat er geen sedimentuitwisseling tussen de stroombanen plaatsvindt. In meanderbochten is de richting van het sedimenttransport echter niet precies gelijk aan de richting van de netto waterstroming (Parker & Andrews, 1985; Kissing-Möller, 1993; Dietrich & Whiting, 1989), maar de fouten die hierdoor veroorzaakt worden, zijn waarschijnlijk verwaarloosbaar. Toch levert het gebruik van de evenwichtstransporten fouten op in het bepaalde ruwheidspatroon. Met het bepaalde ruwheidspatroon is er namelijk wel evenwicht in het totale transport, maar niet in het transport per korrelgrootteklasse. Dit verschilt sterk in de loop van een stroombaan; gemiddeld bedragen de afwijkingen 42 procent.

Een andere factor die voor onzekerheden in de analyse zorgt, is de gebruikte transportvergelijking. Indien alle korrelgroottefracties mobiel zijn, levert de gebruikte Meyer-Peter & Müller-vergelijking betrouwbare resultaten op. Rond de Pannerdensch Kop zijn de grootste fracties echter niet mobiel (zie ook figuur 5). Kleinhans & Van Rijn (2002) hebben aangetoond dat in dat geval de Meyer-Peter & Müller-vergelijking op een stochastische manier gebruikt moet worden. Dit is echter niet gebeurd. Ook zou een andere transportvergelijking

gebruikt kunnen worden zonder een kritiek begin van beweging, zoals Engelund-Hansen. Hieraan kleven echter weer andere bezwaren zoals het niet binnen het geldigheidsbereik vallen van de korreldiameter van dit gebied.

Daarbij komt dat niet bekend is of de juiste waarden voor de hiding-exposurecoëfficiënten gebruikt zijn. De gebruikte hiding-exposure-correctie is een benadering van de formule van Egiazaroff, maar het is niet bekend of de Egiazaroff-formule geschikt is voor de condities rond de Pannerdensche Kop. De keuze voor de hiding-exposurecorrectie heeft een grote invloed op de transportberekeningen. Andere waarden voor de hiding-exposureparameters zouden dan ook een ander ruwheidpatroon opgeleverd hebben.

Verder wordt in de transportvergelijking gebruik gemaakt van de ribbelfactor. In feite wordt daarmee aangenomen dat de turbulentie die wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van beddingvormen niet zorgt voor een toename van de schuifspanning die wordt uitgeoefend op de sedimentkorrels. Dit hoeft echter helemaal niet het geval te zijn en een andere methode voor de bepaling van de schuifspanning die wordt uitgeoefend op de sedimentkorrels zou totaal andere sedimenttransporten geven (Kleinhans en Van Rijn 2002, Kleinhans 2002, hoofdstuk 11). Hiermee zou dus ook het ruwheidpatroon veranderen.

Echter ook de invoerwaarden voor de Meyer-Peter & Müller-vergelijking zijn waarschijnlijk niet helemaal juist. De betrouwbaarheid van de gebruikte waterstand- en stroomsnelheidsgegevens heeft te lijden onder het grote aantal interpolaties. Daarnaast zijn deze gegevens afhankelijk van de opgelegde rivierbodembodem in WAQUA, die slechts een grove schematisatie is van de werkelijkheid. De belangrijkste foutenbron in de bepaling van het ruwheidpatroon is echter de gebruikte bodemsamenstelling. Steeds is gebruik gemaakt van de lokale waarden voor de bodemsamenstelling. Deze waarden zijn niet representatief voor de stroombanen als gevolg van de sterke kleinschalige variatie in bodemsamenstelling die wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van duinen (zie hoofdstuk 6 en 8). Dit heeft ongetwijfeld een grote invloed op de bepaalde ruwheidsverdeling. Het zou dan ook beter zijn geweest als met een grootschaliger, globaal bodemsamenstellingspatroon was gerekend. Binnen het bestek van dit onderzoek was het echter niet mogelijk een betrouwbare globale interpolatie van de bodemsamenstelling uit te voeren.

Er kan geconcludeerd worden dat de betrouwbaarheid van de bepaalde ruimtelijke verdeling van bodemruwheden klein is. Hiermee dient rekening gehouden te worden in de interpretatie van het bepaalde ruwheidpatroon.

## 8 Synthese

In dit hoofdstuk wordt een synthese gemaakt van de bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken. In paragraaf 8.1 wordt getracht een samenhangende verklaring te geven voor de waargenomen bodemsamenstelling en aan te geven welke processen in de nabije toekomst veranderingen teweeg kunnen brengen in dit waargenomen ruimtelijk patroon. In paragraaf 8.2 wordt getracht een verklaring te vinden voor het berekende ruimtelijk patroon in bodemruwheid.

### 8.1 Het ruimtelijk patroon in bodemsamenstelling

#### 8.1.1 Totstandkoming

In voorgaande hoofdstukken zijn zo'n 19 processen aan de orde gekomen die in theorie van invloed kunnen zijn geweest op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop. Sommige processen kunnen de bodemsamenstelling sterk beïnvloed hebben, andere kunnen hoogstens een marginale invloed hebben gehad. In tabel 10 wordt een overzicht gegeven van alle processen en ook van de invloed die deze processen zouden hebben gehad op de bodemsamenstelling als de processen inderdaad opgetreden zijn. Verder wordt aangegeven hoe waarschijnlijk het is dat deze processen inderdaad zijn opgetreden. Op basis daarvan kan een reconstructie gemaakt worden van de totstandkoming van de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop, zoals die door Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>) is waargenomen.

Het grootschalig patroon in de bodemsamenstelling is waarschijnlijk tot stand gekomen door downstream fining (megaschaal), relatieve grindaanrijking (macroschaal) en sedimenttransport (macroschaal). Relatieve grindaanrijking heeft waarschijnlijk geleid tot de vorming van de grindige laag, terwijl sedimenttransportprocessen ervoor gezorgd hebben dat de samenstelling van deze grindige laag in alle drie de riviertakken anders is. Het is niet geheel zeker of er inderdaad relatieve grindaanrijking is opgetreden, maar het is wel aannemelijk. Relatieve grindaanrijking is van nature een alluviaal proces, maar het zal geïnitieerd zijn door antropogene factoren: de meanderbochtafsnijdingen en de aanleg van kribben die vanaf circa 1850 hebben plaatsgevonden. Ook geologische factoren hebben een rol gespeeld bij de relatieve grindaanrijking. Zonder aanwezigheid van een zandige laag, met een kleine grindcomponent, had dit proces immers nooit kunnen optreden. Naast bovengenoemde processen kunnen ook bagger- en stortwerkzaamheden van invloed zijn geweest op het grootschalig patroon in bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop, maar er wordt aangenomen dat deze invloed klein is.

Op mesoschaal is de waargenomen bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop hoofdzakelijk het gevolg van het bochtsorteringsproces. Er is gebleken dat het bochtsorteringsproces rond de Pannerdensch Kop voor grotere korrelgrootteverschillen tussen binnen- en buitenbocht zorgt dan in de benedenstroomse delen van de Waal (en de IJssel). Dit is waarschijnlijk het gevolg van het lagere schuifspanningoverschot rond de Pannerdensch Kop.

Het bochtsorteringsproces is waarschijnlijk sterk beïnvloed door afpleisteringsprocessen en de verticale sortering door duinen (zie volgende paragraaf). Verder wordt aangenomen dat ook een groot aantal antropogene factoren invloed gehad heeft op het bochtsorteringsproces. Het gaat hierbij vooral om de aanleg van het Pannerdensch Kanaal en het Bijlandsch Kanaal, de aanwezigheid van de stuwen in de Nederrijn/Lek en secundaire stromingen die zijn ontstaan als gevolg van de ligging van kribben.

Andere processen die op mesoschaal een effect (kunnen) hebben gehad op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensch Kop zijn zandleverantie vanuit kribvakken door scheepvaart, relatieve grindaanrijking, baggerwerkzaamheden, de passage van zandgolven en de vergroving als gevolg van oeververdedigingen en kribvakstromingen. De invloed die deze processen hebben gehad op de bodemsamenstelling was echter vermoedelijk klein in vergelijking met de invloed van het bochtsorteringsproces.

Op het kleinste schaalniveau (microschaal) zijn de variaties in de bodemsamenstelling hoofdzakelijk veroorzaakt door de aanwezigheid van duinen. Ook oeververstevigingen en de passage van zandgolven kunnen een invloed hebben gehad, maar deze valt waarschijnlijk in het niet bij de invloed van de duinen.



Proces	Potentiele invloed op de bodemsamenstelling (de invloed van het proces op de bodemsamenstelling als het proces daadwerkelijk optreedt)			Waarschijnlijkheid dat het proces in het verleden is opgetreden	Waarschijnlijkheid dat het proces in de toekomst op zal treden	Historische invloed op de bodemsamenstelling rond de Pannerdenschse Kop (een afweging tussen de potentiële invloed van het proces en de waarschijnlijkheid dat het proces op deze locatie is opgetreden)			Toekomstige invloed op de bodemsamenstelling rond de Pannerdenschse Kop (een afweging tussen de potentiële invloed van het proces en de waarschijnlijkheid dat het proces op deze locatie zal optreden)		
	Macro-	Meso-	Micro-			Macro-	Meso-	Micro-	Macro-	Meso-	Micro-
<b>Geologisch</b> Relatieve grindaanrijking Erosieremming door resistente lagen	++	+	+	+		++	+				
<b>Antropogeen</b> Bovenstrooms baggeren of storten Benedenstrooms baggeren of storten Baggeren rond de Pannerdenschse Kop Storten rond de Pannerdenschse Kop Meanderbochtatfijnningen	+			+	+	+	++	+	+	+	+
Stuwwerking Zandleverantie vanuit kribvakken door scheepvaart Kribstromingen Stroming naar of uit uiterwaarden Vergroving door oeververstevingen	++	++	++	+	+	++	+	+	+	+	+
<b>Alluviaal</b> Downstream fining Sedimenttransport Bochtsortering Afpleistering Vertikale sortering door duinen Passage van zandgolven Horizontale sortering door duinen	+	++		++	++	++	++	++	++	++	++

	Klein/geen
+	Groot
++	Zeer groot

Tabel 10. Overzicht van processen die van invloed (kunnen) zijn op de bodemsamenstelling rond de Pannerdenschse Kop.

### 8.1.2 Verwachte toekomstige variabiliteit

Een deel van de processen die in het verleden van invloed zijn geweest op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop, zullen ook in de toekomst de bodemsamenstelling nog beïnvloeden (tabel 10). Daardoor kunnen temporele en ruimtelijke veranderingen optreden in de bodemsamenstelling. Op mega- en macroschaal zijn deze veranderingen vooral het gevolg van het downstream fining proces en van bagger- en stortwerkzaamheden. Op meso- en microschaal kunnen de veranderingen het gevolg zijn van bochtsortering, duinsortering, afpleisteringsprocessen, bagger- en stortwerkzaamheden, kribvakstromingen, zandleverantie uit kribvakken en de passage van zandgolven.

De meest opvallende veranderingen in de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop op mesoschaal hangen samen met de hoogwater-laagwatercyclus. Eventueel aanwezige zandgolven bezinken bij laagwater en zorgen zo voor een tijdelijke verfijning van de bodem, die duurt totdat de zandgolf bij hoogwater weer verder getransporteerd wordt. Ook kan tijdens laagwater zand vanuit de kribvakken naar het zomerbed geleverd worden, waardoor in het noordelijk deel van het zomerbed een verfijning kan ontstaan. Deze verdwijnt weer bij hoogwater, als de zandleverantie stopt en het gedeponeerde zand gemengd wordt met de ondergrond of stroomafwaarts getransporteerd wordt. Een derde verandering in de bodemsamenstelling die samenhangt met de hoogwater-laagwatercyclus wordt veroorzaakt door kribstromingen. De ontgrondingskuilen die het gevolg zijn van kribstromingen worden namelijk waarschijnlijk tijdens lage afvoeren voor een deel gevuld met fijn sediment, waardoor een verfijning van de bodem optreedt. Als de afvoer toeneemt wordt dit materiaal weer verwijderd met een vergroving van de bodem als gevolg. Bij hoogwater neemt de diepte van de ontgrondingskuilen echter weer af. Zowel het voorkomen van zandgolven als het optreden van zandleverantie vanuit de kribvakken is echter met grote onzekerheid omgeven. Datzelfde geldt ook voor de hoogwatereffecten van kribstromingen.

Behalve deze drie processen kunnen ook bagger- en stortwerkzaamheden rond de Pannerdensche Kop zorgen voor veranderingen in de bodemsamenstelling op mesoschaal. Door baggerwerkzaamheden komt namelijk sediment dat oorspronkelijk op enige diepte lag aan het oppervlak te liggen. Dit sediment heeft vaak een andere samenstelling dan het materiaal dat oorspronkelijk aan het oppervlak lag. Ook de verplichting om het gebaggerde materiaal weer terug te storten in het zomerbed kan een grote invloed op de bodemsamenstelling hebben. De samenstelling van het materiaal dat gestort wordt, verschilt namelijk vaak van het materiaal dat al aanwezig is op de rivierbedding op de plaats waar gestort wordt. Als het baggergat vervolgens dichtsedimenteert en de storthoop opgeruimd wordt, kan weer een verandering in de bodemsamenstelling optreden.

Veranderingen in de bodemsamenstelling op microschaal worden voornamelijk veroorzaakt door de sortering in duinen. Kleinhans (2002) heeft aangetoond dat dit proces een grote invloed heeft op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop. Duinen zorgen vooraleerst voor een verticale sortering van het sediment, maar kunnen ook zorgen voor tijdelijke horizontale patronen in de bodemsamenstelling. Na afloop van een hoogwater worden de fijne toppen van de aanwezige duinen namelijk vaak afgeërodeerd en gedeponeerd in de troggen.

De aanwezigheid van duinen zorgt er dus voor dat er temporele en ruimtelijke variaties optreden in de bodemsamenstelling op microschaal. Op mesoschaal zijn deze variaties te beschouwen als een random component over een soort gemiddelde bodemsamenstelling. Deze gemiddelde bodemsamenstelling komt voornamelijk tot stand tijdens hoogwater als gevolg van de interactie tussen het bochtsorteringsproces en de verticale sortering in duinen.

Tijdens hoogwater is een laag sediment in beweging van 60 tot 120 centimeter dik. Als alleen het bochtsorteringsproces zou optreden, dan zou er uiteindelijk een situatie ontstaan waarbij in een dwarsdoorsnede alle korrelgroottefracties netjes naast elkaar liggen, de fijnste in de binnenbocht en de grofste in de buitenbocht. Tegelijkertijd met het bochtsorteringsproces treedt echter ook verticale sortering op in duinen. Daarbij wordt een deel van het grove materiaal opgeslagen in de duintroggen. Dit grove materiaal kan dan dus niet door het bochtsorteringsproces naar de buitenbocht getransporteerd worden. Het patroon in bodemsamenstelling dat hierbij ontstaat, blijft tijdens laagwater grotendeels intact. Bij laagwater kan namelijk slechts een laag sediment in beweging komen van 10 tot 25 centimeter dik. Alleen in deze toplaag zouden veranderingen kunnen optreden in de bodemsamenstelling. Op veel plaatsen zijn deze veranderingen echter waarschijnlijk beperkt. Tijdens laagwater zijn niet alle korrelgroottefracties mobiel (fig. 5) en dit

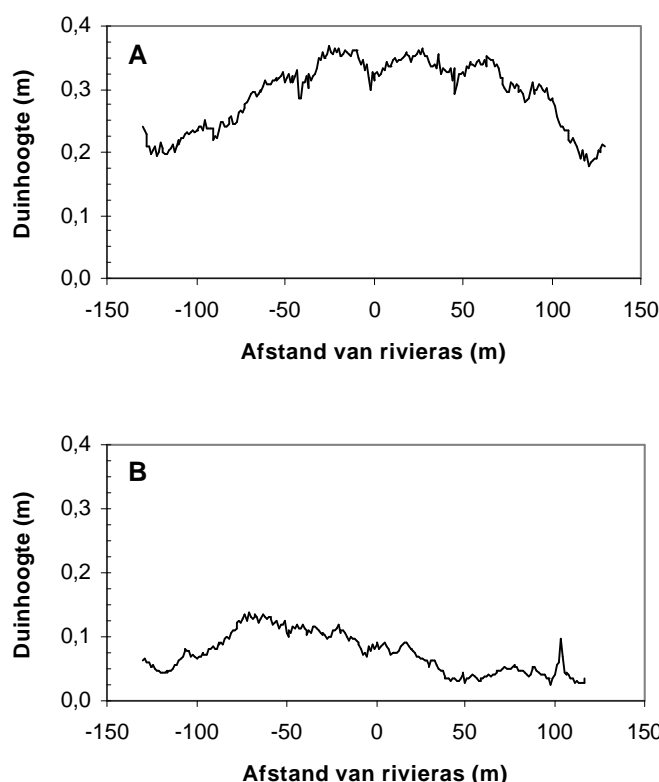
resulteert op een aantal plaatsen waarschijnlijk in de vorming van een pleisterlaag, die voorkomt dat de samenstelling van het onderliggende sediment verandert. Op plaatsen waar geen pleisterlaag gevormd wordt, kunnen wél aanzienlijke veranderingen optreden in de bodemsamenstelling van de bovenste 10 tot 25 centimeter van de bodem. Deze veranderingen zijn voornamelijk het gevolg van de sortering in laagwaterduinen. Het bochtsorteringsproces tijdens laagwater wijkt namelijk niet veel af van het bochtsorteringsproces tijdens hoogwater (§6.2.1).

## 8.2 Het ruimtelijk patroon in bodemruwheid

In hoofdstuk 7 is vastgesteld dat voor de Waal en de Bovenrijn gradiënten in het sedimenttransport kunnen worden gecompenseerd door ruimtelijke variaties in bodemruwheid. Er zijn echter nogal wat onzekerheden in de sedimenttransportberekeningen, waardoor niet zeker is of het bepaalde ruwheidpatroon wel juist is.

De totale ruwheid in een rivier is opgebouwd uit een deel korrelruwheid, een deel vormruwheid en een deel geometrie-ruwheid.

De korrelruwheid (*Eng. grain roughness*) verdisconteert de wrijving die wordt uitgeoefend door sedimentkorrels op de bedding. Het spreekt voor zich dat grotere korrels voor meer wrijving zorgen en dus een grotere ruwheid opleveren. De korrelruwheid is ongeveer gelijk aan de D90 van het sediment. De variatie in D90 rond de Pannerdensche Kop bedraagt maximaal 5 centimeter. Dit is veel minder dan de variatie in de berekende bodemruwheden (60 centimeter). Verschillen in korrelruwheid kunnen het berekende ruwheidpatroon dus niet verklaren. Dit is niet verbazingwekkend. Het aandeel van de korrelruwheid in de totale ruwheid is doorgaans zeer klein, met name als er bodemvormen voorkomen.



Figuur 35. Lateraal verloop van de duinhoogte in de delen van de Bovenrijn (A) en de Waal (B) die grenzen aan de Pannerdensche Kop op 29 oktober 1998 bij een Bovenrijnafvoer van  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$  (naar Wilbers, 1999).

Meestal bestaat het grootste deel van de ruwheid uit vormruwheid (*Eng. form roughness*). Deze wordt veroorzaakt door de turbulenties die ontstaan aan de lijzijde van duinen op de rivierbodem. De vormruwheid is afhankelijk van de omvang van de duinen en de waterdiepte. De grootteorde van de vormruwheid kan benaderd worden met de duinhoogte. Laterale variaties in duinhoogte kunnen aanzienlijk zijn en dus in theorie het berekende ruwheidpatroon verklaren. In figuur 35 staat het (gemiddelde) laterale verloop van de duinhoogte weergegeven in de delen van

de Bovenrijn en de Waal die grenzen aan de Pannerdensche Kop. Deze duinhoogtewaarden zijn bepaald aan de hand van multibeam-echolodingen die zijn uitgevoerd op 29 oktober 1998 bij een Bovenrijnafvoer van  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$  (Wilbers, 1999). Als het duinhoogtepatroon uit figuur 35 vergeleken wordt met het bepaalde bodemruwheidspatroon in figuur 34, dan blijkt dat er nauwelijks overeenkomsten zijn tussen beide figuren. Hoewel de invloed van duinen op de bodemruwheid nog niet volledig begrepen is, zijn de verschillen tussen beide figuren zo groot dat geconcludeerd kan worden dat ook variaties in vormruwheid het berekende ruimtelijke ruwheidpatroon niet kunnen verklaren.

Alleen verschillen in geometrie-ruwheid blijven dus over als verklaring voor het berekende ruwheidpatroon. De geometrieruwheid wordt bepaald door de afwisseling van meanderbochten en door de oevergesteldheid. Bij dat laatste moet vooral gedacht worden aan de wervels die ontstaan bij kribben. Doorgaans wordt aangenomen dat het aandeel van de geometrieruwheid op de totale ruwheid klein is, maar het is mogelijk dat de geometrie-ruwheid rond de Pannerdensche Kop wel een grote invloed heeft. Er is echter nauwelijks bekend hoe de afwisseling van meanderbochten en de oevergesteldheid het ruwheidpatroon beïnvloedt, dus er kan niet gecontroleerd worden of het berekende ruwheidpatroon veroorzaakt kan zijn door verschillen in geometrieruwheid. Indien de geometrieruwheid een grote invloed heeft, dan zou men op zijn minst aan de rechteroevers een sterke verhoging van de ruwheid verwachten, omdat daar grote kribben voorkomen, in tegenstelling tot de linkeroevers. Uit figuur 34 blijkt dat dat vrijwel nergens het geval is. Ook verschillen in geometrieruwheid kunnen het berekende ruwheidpatroon dus niet verklaren.

Er kan dus geconcludeerd worden dat er geen fysische verklaring is voor het gevonden patroon in bodemruwheden. Waarschijnlijk is het dus niet in overeenstemming met de werkelijkheid.

## 9 Conclusie

De bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop wordt voornamelijk bepaald door actuele fluviaatiele processen. Antropogene en geologische invloeden zijn van veel minder belang.

De grindige laag die in het gehele gebied rond de Pannerdensche Kop is aangetroffen in de bovenlaag van de bodem, is waarschijnlijk ontstaan uit de onderliggende zandige laag door preferentiële erosie van fijn materiaal, waarbij een relatieve aanrijking van grind is opgetreden. De grindige laag schuift in zijn geheel langzaam stroomafwaarts, waarbij het sediment aan het oppervlak veel sneller beweegt dan dat onder in de laag. Daarbij ontvangt het Pannerdensch Kanaal het grove deel van de grindige laag in de Bovenrijn en de Waal het fijnere deel, omdat het Pannerdensch Kanaal in een buitenbocht aftakt van de Bovenrijn en de Waal in een binnenbocht.

De competitie tussen bochtsortering en sortering in duinen zorgt waarschijnlijk voor het ontstaan van een globaal patroon in de samenstelling van de grindige laag, waarbij een deel van het grove materiaal in de buitenbocht ligt en een deel is opgeslagen in de troggen van de duinen. Boven op dit globale patroon ontstaat een veel kleinschaliger patroon van lokale variaties in de bodemsamenstelling. Deze worden hoofdzakelijk veroorzaakt door passerende duinen, maar mogelijk spelen ook een aantal andere factoren een rol, zoals de effecten van kribben en baggeren stortwerkzaamheden. Het globale patroon in de bodemsamenstelling blijft vrijwel constant, maar het daarop gesuperponeerde kleinschalige patroon wordt voortdurend gewijzigd. Voor een deel hangen deze wijzigingen samen met de hoogwater-laagwatercyclus.

Er is gebleken dat het bochtsorteringsproces rond de Pannerdensche Kop voor grotere korrelgrootteverschillen tussen binnen- en buitenbocht zorgt dan in de benedenstroomse delen van de Waal (en de IJssel). Dit is waarschijnlijk het gevolg van het lagere schuifspanningoverschot rond de Pannerdensche Kop, dat wordt veroorzaakt door het grote aandeel grind in het beddingsediment.

In dit onderzoek is vastgesteld dat gradiënten in het sedimenttransport kunnen worden gecompenseerd met grote variaties in bodemruwheid in het gebied rond de Pannerdensche Kop, maar deze variaties konden niet gekoppeld worden aan fysische factoren. Daarbij komt dat er grote onzekerheden zitten in de juistheid van de transportberekeningen. Het bepaalde ruimtelijk patroon in bodemruwheid is dus waarschijnlijk niet in overeenstemming met de werkelijkheid.

## 10 Aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt een aantal aanbevelingen gedaan met betrekking tot de bepaling van het ruimtelijk patroon in de bodemsamenstelling en het ruimtelijk patroon in de bodemruwheid rond de Pannerdensche Kop. Ook wordt ingegaan op de implicaties van de ruimtelijke variaties in de bodemsamenstelling en de bodemruwheid voor de modellering van de bodemligging.

### 10.1 Het ruimtelijk patroon in de bodemsamenstelling

#### 10.1.1 De bepaling van geologische invloeden

Het is als groot gebrek ervaren dat voor het gebied rond de Pannerdensche Kop geen lithologische en geologische profielen beschikbaar waren, terwijl deze wel beschikbaar zijn voor het gebied bovenstrooms van de Pannerdensche Kop (Gruijters *et al.*, 2001<sup>b</sup>). Dergelijke profielen tonen in één keer of er mogelijk geologische factoren van invloed zijn op de bodemsamenstelling. Het is daarom aan te bevelen in toekomstige meetcampagnes altijd lithologische en geologische profielen te maken op basis van de seismische metingen en de lithologische boringen.

#### 10.1.2 Bewijs voor de hypothese van relatieve grindaanrijking

Mineralogisch onderzoek naar de samenstelling van de grindige laag en de zandige laag kan misschien aantonen of er inderdaad relatieve grindaanrijking is opgetreden. Als het grind in de grindige laag mineralen bevat die in de laatste twee eeuwen niet door de Rijn kunnen zijn aangevoerd, maar die wel in de zandige laag zitten, dan staat vast dat er inderdaad relatieve grindaanrijking is opgetreden.

Bij dit onderzoek naar de juistheid van de hypothese van relatieve grindaanrijking, kan ook gebruikt gemaakt worden van de lithologische boringen die uitgevoerd zijn in het gebied rond de Pannerdensche Kop in de periodes 1949-1952 en 1987-1989.

#### 10.1.3 De invloed van bovenstroomse bagger- en stortwerkzaamheden

Bovenstroomse bagger- en stortwerkzaamheden kunnen een duidelijke invloed hebben op de bodemsamenstelling in het gebied rond de Pannerdensche Kop. Voor dit onderzoek waren echter geen gegevens beschikbaar over bagger- en stortwerkzaamheden in Duitsland. Het verdient aanbeveling de omvang en de locatie van bagger- en stortwerkzaamheden in Duitsland te achterhalen om zo de invloed van deze activiteiten op de bodemsamenstelling rond de Pannerdensche Kop beter vast te kunnen stellen.

#### 10.1.4 De omvang van kleinschalige variaties in de bodemsamenstelling

In dit rapport is duidelijk geworden dat een groot aantal factoren voor kleinschalige ruimtelijke en temporele variaties in de bodemsamenstelling kunnen zorgen. De omvang van deze variaties kon echter niet vastgesteld worden als gevolg van de te kleine ruimtelijke en temporele resolutie van de lithologische boringen. Om de omvang van ruimtelijke variaties in de bodemsamenstelling te kunnen bepalen, verdient het aanbeveling in een klein gebied een groot aantal ondiepe boringen te zetten, evenredig verdeeld in langsricting en in dwarsrichting. Om de omvang van temporele variaties in de bodemsamenstelling te kunnen bepalen dienen deze boringen verschillende malen uitgevoerd te worden. Bijvoorbeeld aan het eind van een laagwaterperiode en aan het begin van de volgende laagwaterperiode, maar liefst ook tijdens hoogwater, hoewel dat natuurlijk praktische problemen met zich mee brengt.

Verder is het ook interessant om tegelijkertijd met deze boringen multibeam-bodempeilingen uit te voeren, met regelmatige tijdsintervallen gedurende een hoogwatergolf. Zo kunnen eventuele veranderingen in bodemsamenstelling gekoppeld worden aan periodieke veranderingen in de bodemligging die samenhangen met ontgrondingsgaten, in- en uitstroompunten van uiterwaarden en het bochtsorteringsproces.

## 10.2 Het ruimtelijk patroon in de bodemruwheid

Hoewel in dit onderzoek is vastgesteld dat gradiënten in het sedimenttransport kunnen worden gecompenseerd met grote variaties in bodemruwheid in het gebied rond de Pannerdensche Kop, konden deze variaties niet gekoppeld worden aan fysische factoren. Dit komt hoogstwaarschijnlijk door fouten in de transportberekeningen, maar het is ook mogelijk dat de invloed van duinen op de bodemruwheid nog niet goed begrepen is. Verder is het mogelijk dat de afwisseling van meanderbochten en de gesteldheid van de rivieroever (kribben!) rond de Pannerdensche Kop een belangrijke invloed uitoefenen op het ruimtelijk patroon in bodemruwheid. Het verdient aanbeveling verder onderzoek te doen naar de invloed van kribben en de afwisseling van meanderbochten op het ruimtelijk patroon in de bodemruwheid in de Rijn. Een beter begrip van de invloed van duinen op de bodemruwheid zou verkregen kunnen worden door middel van een modelstudie naar het ontstaan van duinen bij gegradeerd sediment onder verschillende afvoercondities.

## 10.3 Modelling van de bodemligging

### 10.3.1 Modelafvoer

Bij laagwater ontstaan rond de Pannerdensche Kop waarschijnlijk pleisterlagen omdat niet alle korrelgroottefracties mobiel zijn. Bovendien is de transportlaag bij laagwater veel dunner dan bij hoogwater. Het sedimenttransport tijdens laagwater is daarom veel kleiner dan dat tijdens hoogwater. Dit impliceert dat het onmogelijk is betrouwbare simulaties uit te voeren van de bodemligging als slechts gebruik wordt gemaakt van een riviervormende of jaargemiddelde afvoer.

Daarbij komt dat er sprake is van geschiedeniseffecten (Kleinans, 2002). De verticale sortering die tijdens hoogwater aangebracht wordt door passerende duinen, zorgt ervoor dat de gemiddelde samenstelling van het transportmateriaal verschilt tussen laagwater en hoogwater. Als bij hoogwater de dikte van de transportlaag toeneemt, komen namelijk ook de grove trogafzettingen uit het vorige hoogwater weer in beweging. Bij de modellering kan dus absoluut niet worden volstaan met een enkele afvoer, maar moet de gehele afvoerkansverdeling worden verdisconteerd. Mogelijk is het bovendien niet voldoende om een kansverdeling van afvoeren door te rekenen, maar moet daadwerkelijk de gemeten tijdserie van afvoeren worden gebruikt als randvoorwaarde voor het model.

### 10.3.2 Schematisatie van de rivierbodem

Daarnaast is modellering met een enkellaags-actieve laagmodel niet afdoende in deze condities. Er zou een modelconcept moeten worden gebruikt waarbij de actieve laag wordt opgedeeld in verschillende sublagen (Blom *et al.* 2002). De reden hiervoor is niet alleen de sterke verticale gradiënt in de bodemsamenstelling, maar ook het feit dat de bochtsortering en verticale sortering een sterk variabele evenwichtstijdschaal hebben, waarvan de duur toeneemt met de diepte. Op grotere diepte komt omwerking minder vaak voor, zodat daar zowel de verticale sortering als de bochtsortering veel langzamer in evenwicht komen. Dit zal ongetwijfeld gevolgen hebben voor de samenstelling van het ondiepere sediment en voor de bodemligging.

### 10.3.3 Interpolatie van de bodemsamenstelling

Het vermoeden bestaat dat in de korrelgrootte-interpolatie die is uitgevoerd door Gruijters *et al.* (2001<sup>a</sup>) geen goed onderscheid is gemaakt tussen grootschalige patronen en kleinschalige variatie. In deze korrelgrootte-interpolatie zijn namelijk verschillende grove plekken te zien, welke (met name in het Pannerdensch Kanaal) samenvallen met de plaatsen waar boringen zijn verricht (zie Gruijters *et al.*, 2001<sup>a</sup>, bijlage H).

De invloed van de bodemsamenstelling op de bodemligging wordt vermoedelijk vooral bepaald door grootschalige patronen in de bodemsamenstelling. Er wordt dan ook aangeraden een

meer gemiddelde en afgevlakte interpolatie van de bodemsamenstelling uit te voeren, waarbij alle kleinschalige variatie verwijderd wordt.

#### **10.3.4 Bepaling van ruimtelijke variaties in bodemruwheid**

Ruimtelijke variaties in bodemruwheid oefenen een grote invloed uit op de bodemligging (Mosselman *et al.*, 1999) en zijn mogelijk de oorzaak van de instabiele modelsimulaties van de bodemligging rond de Pannerdensche Kop. De wijze waarop in dit onderzoek het ruimtelijke ruwheidpatroon bepaald is, bevat te veel onzekerheden om het patroon te kunnen gebruiken in modelsimulaties. Daarbij komt dat er geen fysische verklaring is gevonden die het berekende ruwheidpatroon kan verklaren.

Alluviale ruwheidvoorspellers zoals de formules van Vanoni & Hwang (1989), Englund (1977) en Van Rijn (1984; alle in Ogink, 1989) blijven dus de beste manier om de ruimtelijke verdeling van bodemruwheden rond de Pannerdensche Kop te schatten (zie Julien *et al.*, 2002), hoewel ook deze formules grote tekortkomingen hebben. Mogelijk moeten de bestaande ruwheidsvoorspellers voor de Pannerdensche Kop uitgebreid worden met de invloed van de kribben op de bodemruwheid (§10.2)



## Literatuur

- BARTHOLDY, J. & J. KISLING-MÖLLER (1996): Bed-load sorting in an alluvial channel. *Journal of Sedimentary Research*, vol. 66 (1), pp. 26-35.
- BERENDSEN, H.J.A. (1997): Landschap in delen. Overzicht van de geofactoren. *Fysische Geografie van Nederland*. Van Gorcum, Assen, 320 pp.
- BERENDSEN, H.J.A. & E. STOUTHAMER (2001): Palaeogeographic development of the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Koninklijke Van Gorcum, Assen, 268 pp.
- BERNABÈ, M. (2002): Bed level and material interaction in river morphology. Report Q3178. WL | Delft Hydraulics, Delft.
- BLOM, A., RIBBERINK, J.S. & G. PARKER (2002). Sediment continuity for rivers with non-uniform sediment, dunes, and bed load transport. In: *Sedimentation & Sediment-Transport, Proc. Monte Verità Symposium*, 1-6 Sept., Ascona, Switzerland.
- CBS (2000): *Statistisch Jaarboek 2000*. Centraal Bureau voor de Statistiek, Voorburg/Heerlen, 561 pp.
- DE VRIEND, H.J. & N. STRUIKSMA (1983): Flow and bed deformation in river bends. *Publicatie 317*. WL | Delft Hydraulics, Emmeloord, 19 pp.
- DE VRIES, M. (1975): A morphological time-scale for rivers. IAHR publication 147. IAHR, Sao Paulo, 7 pp.
- DIETRICH, W.E. & P. WHITING (1989): Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel. In: S. Ikeda & G. Parker: *River Meandering*. Water Resources Monograph 12, pp. 1-50. American Geophysical Union, Washington DC.
- ENGELUND, F. (1977): Hydraulic resistance for flow over dunes. Progress report 44. Institute for Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark.
- GRUIJTERS, S.H.L.L. & M.P.E. DE KLEINE (2001): Lithologische en seismische opname van de ondergrond van de Rijn. Traject km 850.0 - 856.3 (Bovenrijn-Niederrhein). Eindrapport. TNO-rapport NITG 01-043-b. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Nuenen, 5 pp.
- GRUIJTERS, S.H.L.L., J.G. VELDKAMP, J. GUNNINK & J.H.A. BOSCH (2001<sup>a</sup>): De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Pannerdensch Kop. Interpretatie van de meetresultaten. Eindrapport. TNO-rapport NITG 01-166-B. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Zwolle, 41 pp.
- GRUIJTERS, S.H.L.L., J.G. VELDKAMP, J. GUNNINK & J.H.A. BOSCH (2001<sup>b</sup>): De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Bovenrijn / Niederrhein. Interpretatie van de meetresultaten. Eindrapport. TNO-rapport NITG 01-167-B. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Zwolle, 43 pp.
- HESSELINK, A.W. (2002): History makes a river. Morphological changes and human interference in the river Rhine, The Netherlands. *Netherlands Geographical Studies* 292. Royal Dutch Geographical Society/Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, Utrecht, 177 pp.
- JULIEN, P.Y., G.J. KLAASSEN, W.B.M. TEN BRINKE & A.W.E. WILBERS (2002): Case study: bed resistance of Rhine River during 1998 flood. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128 (12), pp. 1042-1050.
- KISLING-MÖLLER, J. (1993): Bedform migration and related sediment transport in a meander bend. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, vol. 17, pp. 51-61.
- KLEINHANS, M.G. (2001): The key role of fluvial dunes in transport and deposition of sand-gravel mixtures, a preliminary note. *Sedimentary Geology*, vol. 143, pp. 7-13.
- KLEINHANS, M.G. (2002): Sorting out sand and gravel: sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers. *Netherlands Geographical Studies* 293. Royal Dutch Geographical Society/Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, Utrecht, 317 pp.
- KLEINHANS, M.G. & W.B.M. TEN BRINKE (2001): Accuracy of cross-channel sampled sediment transport in large sand-gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 127 (4), pp. 258-269.
- KLEINHANS, M.G. & L.C. VAN RIJN (2002): Stochastic prediction of sediment transport in sand-gravel bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128 (4), pp. 412-425.

- KLEINHANS, M.G., A.W.E. WILBERS, A. DE SWAAF & J.H. VAN DEN BERG (2002): Sediment supply-limited bedforms in sand-gravel bed rivers. *Journal of Sedimentary Research*, vol. 27 (5), pp. 629-640.
- LENDERS, R., B. VAN MAREN & J.-W. MOL (1998): Wind-, golf- en stromingsgeïnduceerd sedimenttransport in kribvakken langs de Waal. Kribvakmetingen Druten/Ochten juli 1996 tot april 1997. ICG 98/10. Interuniversitair Centrum voor Geo-ecologisch onderzoek / Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht, 153 pp.
- LISLE, T.E. & S. HILTON (1999): Fine bed material in pools of natural gravel bed channels. *Water Resources Research*, vol. 35 (4), pp. 1291-1304.
- MEYER-PETER, E. & R. MÜLLER (1948): Formulas for bed-load transport. Third Conference of the International Association of Hydraulic Research, pp. 39-64, Sweden.
- MIDDELKOOP, H. (1997): Embanked floodplains in the Netherlands. *Netherlands Geographical Studies* 224. Royal Dutch Geographical Society/Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, Utrecht, 341 pp.
- MOSSELMAN, E., J. SIEBEN, K. SLOFF & A.F. WOLTERS (1999): Effect of spatial grain size variations on two-dimensional river bed morphology. *Proceedings of the IAHR Symposium on "River, Coastal and Estuarine Morphodynamics"*, Genoa, vol. 1, pp. 499-508.
- MOSSELMAN, E. & K. SLOFF (1998): Probleemanalyse ijking Delft 3D voor Pannerdense Kop. Rapport Q2495. WL | Delft Hydraulics, Delft, 51 pp.
- ODGAARD, A.J. (1981): Transverse bed slopes in alluvial channel bends. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 107 (HY12), pp. 1677-1694.
- OGINK, H.J.M. (1989): Hydraulic roughness of single and compound bed forms. Part XI: Report on model investigations. WL|Delft Hydraulics, Delft.
- PARKER, G. & E.D. ANDREWS (1985): Sorting of bed load sediment by flow in meander bends. *Water Resources Research*, vol. 21 (9), pp. 1361-1373.
- PLOEGER, B. (1992): Bouwen aan de Rijn: menselijke ingrepen op de Rijn en zijn takken. Rijkswaterstaat-serie 53. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, 's-Gravenhage, 104 pp.
- POWELL, D.M. (1998): Patterns and processes of sediment sorting in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography*, vol. 22 (1), pp. 1-32.
- RAEDTS, C.E.P.M. (1971): De opgang en teleurgang van de Limburgse steenkoolindustrie (een historisch overzicht). *Geologie en Mijnbouw*, vol. 50 (2), pp. 105-118.
- SAMBROOK SMITH, G.H. & R.I. FERGUSON (1995): The gravel-sand transition along alluvial river channels. *Journal of Sedimentary Research*, vol. 65A, pp. 423-430.
- SCHANS, H. (1998<sup>a</sup>): Bed level development in Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal and the upstream part of the Waal. ICG 98/16. Netherlands Centre for Geo-ecological Research / Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, Utrecht, 38 pp.
- SCHANS, H. (1998<sup>b</sup>): Representativiteit van kribvakmetingen uit 1996 en 1997 ten opzichte van de hele Waal. ICG 98/15. Interuniversitair Centrum voor Geo-ecologisch onderzoek / Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht, 34 pp.
- SIEBEN, J. (2002): Hoogwatereffecten in het zomerbed. Verkenning kennis en kennisbehoefte. Werkdocument 2001.142x. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), Arnhem, 46 pp.
- STRUIKSMA, N. (1998): Morfologisch model Pannerdense Kop op basis van DELFT2DMOR, verslag rekenonderzoek. Rapport Q2403. WL | Delft Hydraulics, Delft.
- STRUIKSMA, N., K.W. OLESEN, C. FLOKSTRA & H.J. DE VRIEND (1985): Bed deformation in curved alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 23 (1), pp. 57-79.
- SUKHODOLOV, A., W.S.J. UIJTTEWAAL & C. ENGELHARDT (2002): On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 27, pp. 289-305.
- TDN (1985): Topografische Kaart van Nederland, schaal 1:25.000, blad 40D Gendt. Topografische Dienst Nederland, Emmen.
- TDN (1990): Topografische Kaart van Nederland, schaal 1:25.000, blad 40G Lobith. Topografische Dienst Nederland, Emmen.

- TEN BRINKE, W.B.M. (1997): De bodemsamenstelling van Waal en IJssel in de jaren 1966, 1976, 1984 en 1995. RIZA rapport 97.009. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), Arnhem, 158 pp.
- TEN BRINKE, W.B.M., L.J. BOLWIDT, E. SNIPPEN & L.W.J. VAN HAL (2001): Sedimentbalans Rijntakken 2000. Een actualisatie van de sedimentbalans voor slib, zand en grind van de Rijntakken in het beheersgebied van de Directie Oost-Nederland. RIZA rapport 2001.043. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), 57 pp.
- TEN BRINKE, W.B.M. & E. GÖLZ (2001): Bed level changes and sediment budget of the Rhine near the German-Dutch border. RIZA report 2001.044. National Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA), 50 pp.
- THORNE, C.R. & R.D. HEY (1979): Direct measurements of secondary currents at a river inflexion point. *Nature*, vol. 280, pp. 226-228.
- VAN DE VEN, G.P. (1976): Aan de wieg van Rijkswaterstaat: wordingsgeschiedenis van het Pannerdens Kanaal. Gelderse Historische Reeks VIII. De Walburg Pers, Zutphen, 437 pp.
- VAN RIJN, L.C. (1984): Sediment transport part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110, pp. 1733-1754.
- VANONI, V.A. & L.S. HWANG (1989): Relation between bed forms and friction in streams. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, vol. 93 (HY3).
- WESTEN, J.M.J. (1971): Statistisch overzicht van productie, bezetting en prestaties van de Limburgse steenkolenmijnen. *Geologie en Mijnbouw*, vol. 50 (2), pp. 311-320.
- WILBERS, A.W.E. (1999): Bodemtransport en duinontwikkeling in de Rijntakken : bodempeilingen hoogwater november 1998. ICG 99/10. Interuniversitair Centrum voor Geo-ecologisch onderzoek / Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, Utrecht.
- WILSON, I.G. (1973): Equilibrium cross-section of meandering and braided rivers. *Nature*, vol. 241, pp. 393-294.

**Bijlage 1. Gegevens over de geometrie en de bochtsortering in meanderbochten in de IJssel (wordt vervolgd op de volgende pagina).**

Rivier	Begin bocht	Einde bocht	Bochtrichting	Bochtstraal	Rivierbreedte	Breedte/straal	Bochtlengte
	(km)	(km)		(m)	(m)	(-)	(m)
IJssel	878,60	882,0	naar rechts	1073	76	0,07	3400
IJssel	882,00	884,5	naar links	710	76	0,11	2500
IJssel	884,50	886,7	naar rechts	796	76	0,10	2200
IJssel	886,70	888,8	naar links	706	81	0,11	2100
IJssel	888,80	896,5	naar rechts	698	81	0,12	7700
IJssel	896,50	900,0	naar links	883	81	0,09	3500
IJssel	900,00	901,0	naar rechts	838	81	0,10	1000
IJssel	901,00	902,0	naar links	792	81	0,10	1000
IJssel	902,00	903,3	naar rechts	920	81	0,09	1300
IJssel	903,30	905,0	naar links	1042	81	0,08	1700
IJssel	905,00	912,5	naar rechts	825	81	0,10	7500
IJssel	912,50	913,5	naar links	745	82	0,11	1000
IJssel	913,50	914,3	naar rechts	750	82	0,11	800
IJssel	914,30	914,7	naar links	700	82	0,12	400
IJssel	914,70	915,3	naar rechts	635	82	0,13	600
IJssel	916,20	917,5	naar links	900	82	0,09	1300
IJssel	917,50	918,8	naar rechts	499	82	0,16	1300
IJssel	918,80	919,7	naar links	499	82	0,16	900
IJssel	919,70	920,2	naar rechts	500	82	0,16	500
IJssel	920,20	924,0	naar links	741	82	0,11	3800
IJssel	924,00	926,5	naar rechts	893	82	0,09	2500
IJssel	926,50	928,5	naar links	1200	82	0,07	2000
IJssel	930,00	931,0	naar rechts	880	82	0,09	1000
IJssel	931,00	933,0	naar links	687	82	0,12	2000
IJssel	933,00	933,8	naar rechts	812	83	0,10	800
IJssel	934,00	934,8	naar links	521	84	0,16	800
IJssel	934,80	937,0	naar rechts	686	85	0,12	2200
IJssel	940,50	941,5	naar links	782	88	0,11	1000
IJssel	942,00	943,5	naar rechts	649	90	0,14	1500
IJssel	945,00	946,0	naar links	740	92	0,12	1000
IJssel	946,50	947,6	naar rechts	603	93	0,15	1100
IJssel	947,60	948,5	naar links	900	93	0,10	900
IJssel	948,50	950,0	naar rechts	860	94	0,11	1500
IJssel	950,00	950,8	naar links	675	95	0,14	800
IJssel	950,80	951,3	naar rechts	627	95	0,15	500
IJssel	951,30	951,8	naar links	565	96	0,17	500
IJssel	951,80	952,6	naar rechts	838	96	0,11	800
IJssel	952,60	953,6	naar links	765	97	0,13	1000
IJssel	953,60	954,8	naar rechts	936	97	0,10	1200
IJssel	956,50	958,0	naar links	689	99	0,14	1500
IJssel	959,70	962,0	naar rechts	582	102	0,17	2300
IJssel	963,50	965,0	naar links	800	104	0,13	1500
IJssel	965,00	966,3	naar rechts	720	105	0,15	1300
IJssel	966,50	969,0	naar links	830	105	0,13	2500
IJssel	972,00	973,5	naar rechts	858	117	0,14	1500
IJssel	974,50	977,0	naar links	1088	122	0,11	2500
IJssel	977,00	979,0	naar rechts	1000	126	0,13	2000
IJssel	979,00	980,5	naar links	825	130	0,16	1500
IJssel	982,00	984,3	naar rechts	912	136	0,15	2300
IJssel	984,30	987,0	naar links	564	140	0,25	2700
IJssel	988,50	990,5	naar rechts	705	147	0,21	2000
IJssel	990,50	993,0	naar links	821	151	0,18	2500
IJssel	993,00	994,0	naar rechts	738	154	0,21	1000
IJssel	994,00	997,0	naar links	1175	155	0,13	3000

Maximale waarde van het gestandaardiseerde korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht <sup>1</sup>		Lokatie waar het gestandaardiseerde korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht maximaal is <sup>1</sup>		Faseverschil (afstand van bochtbegin tot plaats van maximaal korrelgrootteverschil, gedeeld door de bochtlengthe) <sup>1</sup>	
op basis van D50	op basis van D90	op basis van D50	op basis van D90	op basis van D50	op basis van D90
(-)	(-)	(km)	(km)	(-)	(-)
0,90	0,8	886	887,0	0,7	1,14
-0,71	-0,6	889	889,0	1,1	1,10
0,52	0,6	896	896,0	0,9	0,94
-0,77	-0,7	900	900,0	1,0	1,00
0,47	0,2	901	901,0	1,0	1,00
-0,66	-0,7	902	902,0	1,0	1,00
0,40	0,0	903	903,0	0,8	0,77
-0,87	-0,9	905	905,0	1,0	1,00
0,70	0,8	911	912,0	0,8	0,93
-0,39		913		0,5	
	0,2				
-0,45	-0,5				
	0,4		918,0		0,38
-0,64	-0,8	924	922,0	1,0	0,47
0,50	0,7	926	926,0	0,8	0,80
-0,53	-0,6				
	0,6				
-0,12	-0,2	934	934,0	1,3	1,25
-0,54	-0,7	935	935,0	1,3	1,25
0,59	0,7				
	-0,8				
0,56	0,7				
-0,31	-0,4				
	0,4		948,0		1,36
-0,39	-0,7	949	949,0	1,6	1,56
0,15	0,3	950	950,0	1,0	1,00
-0,12	-0,4	951	951,0	1,3	1,25
-0,42	-0,5	954	954,0	1,4	1,40
0,33	0,6				
-0,51	-0,7				
0,51	0,6				
-0,45	-0,6				
-0,07	-0,1	968	968,0	2,3	2,31
-0,53	-0,7				
0,07	0,1				
-0,28	-0,6				
0,21	0,6	979	981,0	1,0	2,00
	-0,3				
	0,2				
-0,61	-0,7				
0,25	0,5				
-0,23	-0,5	993	993,0	1,0	1,00
0,26	0,4	995	995,0	2,0	2,00

<sup>1</sup> Voor de exacte definitie van deze parameters wordt verwezen naar paragraaf 6.3.1.

**Bijlage 2. Gegevens over de geometrie en de bochtsoortering in meanderbochten in de Bovenrijn en de Waal (wordt vervolgd op de volgende pagina).**

Rivier	Begin bocht	Einde bocht	Bochtrichting	Bochtstraal	Rivierbreedte	Breedte/straal	Bochtlengte
	(km)	(km)		(m)	(m)	(-)	(m)
Bovenrijn	856,75	861,00	naar links	7400	340	0,05	4250
Bovenrijn	861,00	864,25	naar rechts	3200	340	0,11	3250
Bovenrijn	864,25	867,00	naar links	9000	340	0,04	2750
Waal	867,00	868,50	naar rechts	2800	260	0,09	1500
Waal	868,50	872,50	naar links	1120	260	0,23	4000
Waal	872,50	876,00	naar rechts	1120	260	0,23	3500
Waal	876,00	882,50	naar links	2120	260	0,12	6500
Waal	882,50	886,00	naar rechts	700	260	0,37	3500
Waal	886,00	890,00	naar links	4070	260	0,06	4000
Waal	890,00	892,25	naar rechts	6120	260	0,04	2250
Waal	892,50	893,50	naar links	4820	260	0,05	1000
Waal	893,50	895,00	naar rechts	3370	260	0,08	1500
Waal	895,00	898,00	naar links	3870	260	0,07	3000
Waal	898,00	900,00	naar rechts	6870	260	0,04	2000
Waal	900,00	902,50	naar links	6870	260	0,04	2500
Waal	902,50	905,00	naar rechts	5870	260	0,04	2500
Waal	905,00	908,50	naar links	4170	260	0,06	3500
Waal	908,50	911,50	naar rechts	4620	260	0,06	3000
Waal	911,50	918,00	naar links	2370	260	0,11	6500
Waal	918,00	921,00	naar rechts	3620	260	0,07	3000
Waal	921,00	924,00	naar links	4870	260	0,05	3000
Waal	924,00	928,00	naar rechts	1370	260	0,19	4000
Waal	928,00	932,00	naar links	2000	260	0,13	4000
Waal	932,00	933,50	naar rechts	5000	259	0,05	1500
Waal	933,50	935,00	naar links	4450	256	0,06	1500
Waal	935,50	939,50	naar rechts	2500	286	0,11	4000
Waal	939,50	942,00	naar links	1850	305	0,16	2500
Waal	942,00	945,00	naar rechts	2300	313	0,14	3000
Waal	945,00	948,50	naar links	2360	323	0,14	3500
Waal	948,50	951,25	naar rechts	2500	332	0,13	2750

Maximale waarde van het gestandaardiseerde korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht <sup>1</sup>		Lokatie waar het gestandaardiseerde korrelgrootteverschil tussen binnen- en buitenbocht maximaal is <sup>1</sup>		Faseverschil (afstand van bochtbegin tot plaats van maximaal korrelgrootteverschil, gedeeld door de bochtlengte) <sup>1</sup>	
op basis van D50	op basis van D90	op basis van D50	op basis van D90	op basis van D50	op basis van D90
(-)	(-)	(km)	(km)	(-)	(-)
-0,6	-0,6	860	859	0,8	0,5
0,6	0,4	864	865	0,9	1,2
-0,4	-0,6	867	868	1,0	1,4
0,4	0,8	869	869	1,3	1,3
-0,9	-0,8	871	871	0,6	0,6
0,5	0,7	876	876	1,0	1,0
-0,5	-0,4	881	883	0,8	1,1
0,7	0,6	888	888	1,6	1,6
-0,3		892		1,5	
-0,1		893		1,3	
-0,4		895		2,5	
0,0		896		1,7	
-0,5		899		1,3	
-0,4		903		1,2	
0,0	0,3	907	905	1,8	1,0
-0,7	-0,6	910	910	1,4	1,4
-0,2	0,0	912	912	1,2	1,2
-0,6	-0,8	919	919	1,2	1,2
-0,2	-0,1	920	922	0,7	1,3
-0,4	-0,6	925	925	1,3	1,3
0,3	0,5	929	929	1,3	1,3
-0,4	-0,5	932	932	1,0	1,0
0,2	-0,1	934	934	1,3	1,3
-0,5	-0,6	936	935	1,7	1,0
0,0	0,1	941	941	1,4	1,4
-0,4	-0,7	942	944	1,0	1,8
-0,2	0,0	946	947	1,3	1,7
-0,4	-0,4	948	951	0,9	1,7

<sup>1</sup> Voor de exacte definitie van deze parameters wordt verwezen naar paragraaf 6.3.1.



Het ICG onderzoekprogramma richt zich op de volgende thema's gebundeld in het onderzoekprogramma "Patterns and Processes in Changing Environments":<sup>1</sup>

1. "Dynamics and Palaeorecords of Depositional Environments"
  - a. "Dynamics and evolution of river and coastal systems"
  - b. "Palaeoclimatology and paleoecology of the Quaternary"
2. "Functioning of Landscape Ecosystems"
  - a. "Processes and change in terrestrial ecosystems"
  - b. "Processes and changes in geomorphological systems"

Bij vele onderzoeken wordt gebruik gemaakt van technieken van "Methods, data analysis and modelling". Een deel van de ICG medewerkers houdt zich bezig met ontwikkelen en uitvoeren van deze technieken.

De rapporten die in de ICG-reeks verschijnen worden in zeer beperkte oplage gedrukt en worden verspreid onder deelnemende onderzoeksgroepen en andere belangstellenden. Overname van gegevens en/of citeren is alleen toegestaan na overleg met de auteur(s) en/of leider(s) van het onderzoek. Losse afleveringen zijn verkrijgbaar bij onderstaande personen:

Fysische Geografie en Milieukunde  
Universiteit Utrecht

Dr. J.H. van den Berg  
(030-2532752)

IBED/Fysische Geografie en Bodemkunde  
Universiteit van Amsterdam

Dr. Ir G.B.M. Heuvelink  
(020-5257448)

IBED/Palynologie en Paleo/Actuo-ecologie  
Universiteit van Amsterdam

Prof dr. H. Hooghiemstra  
(020-5257857)

Kwartairgeologie en Geomorfologie  
Vrije Universiteit Amsterdam

Dr. C. Kasse  
(020-4447381)

Centrum voor Isotopenonderzoek  
Rijksuniversiteit Groningen

Afdeling Geografie en Geologie,  
Fysische Geografie en Regionale Geografie  
Katholieke Universiteit Leuven, België

---

#### TOT NU TOE VERSCHENEN:

- 95/1 Zeeberg, J.J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The nature and distribution of Late Pleistocene dunes in the European lowlands and on the Russian platform*
- 95/2 Dinter, M. van, Sorber, A.M. en H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Inventarisatie van de sedimentatie van zand op de oeverwallen van de Waal en de Gelderse IJssel tijdens het hoogwater van januari en februari 1995*
- 95/3 Sorber, A.M. en G. de Vaan, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Ruimtelijke variatie van de sedimentaire structuur en textuur van de bedding van de Grensmaas (stuw Borgharen, km. 15.5 - Maaseik, km. 52.7)*
- 95/4 Hessel, R., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Investigation of drought patterns - a case study in Southern Germany*

---

<sup>1</sup> Research Programme 1999-2003



95/5 Meursing, L., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *De hydraulische ruwheid van doorstroomde vegetatie. Analyse van gepubliceerde model- en prototype metingen.*

## 1996

96/1 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Suspended sediment concentrations during high discharge events in the river Rhine.*

96/2 Makaske, B. en M. Terlien, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Le développement géomorphologique de la partie méridionale du Delta intérieur du Niger.*

96/3 Van der Wateren-de Hoog, B., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Adaptation of a daily weather generator to represent long term precipitation persistence.*

96/4 Fehse, J. Universiteit van Amsterdam, Sectie Palynologie en Paleo/Actuo-ecologie: *The Chocó biogeographic region - high levels of biodiversity and endemism threatened in Colombia's Pacific lowland.*

96/5 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Grainsize characteristics used to identify sediment transport pathways on fine grained aggrading floodplains.*

96/6 Boer, A. de, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *(Semi)automatische meetsystemen voor het sedimenttransport in rivieren - literatuurstudie.*

96/7 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sediment transport in de Nederlandse rijntakken -verwerking metingen 1988-1995 en toetsing transportvergelijkingen.*

96/8 Hesselink, A.W., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Eilanden en zandbanken in de Rijntakken rond 1850*

96/9 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sediment transport in the dutch Rhine branches - annual transport and interim sediment budget.*

## 1997

97/1 Asselman, N., van Deursen, W., Kwadijk, J., Middelkoop, H. en C. Wesseling (Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie) van Dijk, P. en F. Kwaad. Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Environmental change and the river Rhine, implications for discharge, sediment supply and water management - progress report 1*

97/2 Kabout, J.A.H., Hesselink, A.W. en H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Inventarisatie van de sedimentatie van zand op de oeverwallen van de Waal tijdens het hoog water van februari en maart 1997.*

97/3 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sedimenttransport in de Waal: betrouwbaarheidsanalyse en meetstrategie.*

97/4 Bruinsma, M. en J.C.J. Kwadijk, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Uitbreiding Rhine Flow Model 1902 - 1980*

97/5 Storms, J. en J.C.J. Kwadijk, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Verandering van de kans op extreme afvoeren 1990 - 2100 voor het UKHI klimaat scenario.*

97/6 Hoek, W.Z., Vrije Universiteit, Sectie Kwartairgeologie en Laaglandgenese: *Reference list of Late glacial and Early Holocene pollen diagrams from The Netherlands and adjacent parts of Belgium and Germany.*

97/7 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Sedimenttransport in de Waal: hoogwater Maart 1997.*

97/8 Wilbers, A., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Duinkarakteristieken en dune tracking tijdens een hoogwater in de Rijntakken.*

97/9 Ancker, J.A.M. van den en Jungerius, P.D., Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek, Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Eolische processen langs de Waal, zomer 1997.*

## 1998

- 98/1 Wateren, B. van der, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Een afvoer model gebaseerd op het probability distributed principe.*
- 98/2 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The impact of climatic change on suspended sediment transport in the river Rhine*
- 98/3 Buma, J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Finding the most suitable slope stability model for the assessment of the impact of climate change on a landslide in South East France*
- 98/4 Buma, J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The impact of climate change on a landslide in South East France, simulated using different GCM-scenarios and downscaling methods for local precipitation.*
- 98/5 Buma, J., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Modelling the impact of climate change on a landslide in the Italian Dolomites*
- 98/6 Dijk, P.M. van and Kwaad, F.J.P.M., Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Estimation of suspended sediment supply to the stream network of the river Rhine under present-day climate and land use*
- 98/7 Hesselink, A.W., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Ontwikkeling van de uiterwaarden langs de Lek. Vanaf de 16e eeuw tot heden*
- 98/8 Imeson, A.C., Cammeraat, L.H. and Bergkamp, G., Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *Mediterranean Desertification and Land Use. Annual report for 1996*
- 98/9 Blom, J. van, Coppel, R., Dekker, L.C. and Sevink, J., Universiteit van Amsterdam, Vakgroep Fysische Geografie en Bodemkunde: *De bodems van de loofbossen op de oudere duinen en strandwallen van de Nederlandse kust. Profielontwikkeling en bodemverzuring*
- 98/10 Lenders, R., Maren, B. van and Mol, J.-W., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Wind-, golf-, en stromingsgeïnduceerd sedimenttransport in kribvakken langs de Waal*
- 98/11 Lev, T., M. van der Perk, A. Gillett, J.P. Absalom, N.M.J. Crout and G. Voigt, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *GIS-based modelling of radiocaesium transfer to agricultural food products in the Chernigov region, Ukraine.*
- 98/12 Wilbers, A., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Bodemtransport en duinontwikkeling tijdens afvoergolven in de Rijn en Waal.*
- 98/13 Kleinhans, M.G., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Kalibratie van de Valbuis Fysische Geografie Utrecht.*
- 98/14 Cohen, K.M., S. Quartel en H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Zanddikte op de oeverwallen van de Waal (km 900 - 910) een jaar na het hoogwater van 1997.*
- 98/15 Schans, H., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Representativiteit van kribvakmetingen uit 1996 en 1997 ten opzichte van de hele Waal.*
- 98/16 Schans, H., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Bed level development in Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal and the upstream part of the Waal.*
- 98/17 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Estimation of the sediment load in the lower Rhine basin using sediment rating curves.*
- 98/18 Asselman, N.E.M., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *The concept of a suite of linked models to simulate sediment transport in the Rhine basin.*
- 98/19 Wilbers, A.W.E., Universiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie: *Ruimtelijke variabiliteit van duinkarakteristieken in de Waal tijdens een afvoergolf in 1997.*
- 98/20 Dijk, P.J.M. van, Kwaad F.J.P.M. Universiteit van Amsterdam, Fysische Geografie en Bodemkunde: *The Rhine basin sediment supply model: the quality of morphometric input parameters and snowmelt modelling.*

98/21 Hesselink, A.W. Universiteit Utrecht ,Disciplinegroep Geomorfologie en klimaat: *Beschrijving van steekboringen in twee uiterwaarden langs de IJssel en de Waal, Nederland. Data rapport.*  
**1999**

99/1 Cohen K.M. & H.J.A. Berendsen, Universiteit Utrecht, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Inventarisatie van zand op oeverwallen van de Waal (km 900-917) na het hoogwater van November 1998.*

99/2 Tietema A., Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie en Bodemkunde: *Nitraatuitspoeling in een intrekgebied bestudeerd met een dynamisch GIS.*

99/3 Hiemstra J.F. & J.J.M. van der Meer, Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie en Bodemkunde. *Neogene Glacial History at the Allan Hills, Antarctica – Section Logs*

99/4 Moor J.J.W. , Vrije Universiteit Amsterdam, Faculteit der Aardwetenschappen, Kwartairgeologie en Geomorfologie: *Sub-arctic Rivers in Northern Russia. The influence of vegetation, landscape, climate and hydrology on the river morphology of two catchments areas in the Usa Basin in Northeast-European Russia.*

99/5 Dijk P.M. van & F.J.P.M. Kwaad, Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie en Bodemkunde: *The supply of sediment to the river Rhine drainage network*

99/6 Kleinhans M.G., Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Sedimenttransport in de Waal: hoogwater november 1998*

99/7 Hesselink A.W., Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Opzet digitale inventaris oude rivierkaarten: combineren van verschillende inventarissen van oude rivierkaarten.*

99/8 Wilbers A.W.E. & M.G. Kleinhans, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Gevoeligheidsanalyse dune tracking in 2 dimensies.*

99/9 Middelkoop, H. & A. Kroon: Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Analyse historische waterstanden Maas -Benedenrivierengebied.*

99/10 Wilbers, A., Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Bodemtransport en duinontwikkeling in de Rijntakken: bodempeilingen hoogwater november 1998.*

99/11 Linden, S. van der, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Modelling runoff in arctic river systems: the impact of climate change.*

## **2000**

00/1 Tietema, A. & J. Kros, Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica, Fysische Geografie: *Modelling critical nitrogen loads and nitrate leaching in Dutch forest ecosystems.*

00/2 Tietema, A., Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica, Fysische Geografie: *Validatie van gemodelleerde nitraatuitspoeling in bossen.*

00/3 Dankers, R., Universiteit Utrecht, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Application of remote sensing in hydrological modelling of sub-arctic environments, a literature review.*

00/4 Middelkoop, H., N.E.M. Asselman, H. Buitenveld, M. Haasnoot, J.C.J. Kwadijk, J.A.P.H. Vermulst, W.P.A. van Deursen, P.M. van Dijk, and C. Wesseling, Universiteit Utrecht, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *The impact of climate change on the river Rhine and the implications for water management in the Netherlands.*

00/5 Kroon, A., S. Vermeer, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Eolische processen Millinger Duin.*

00/7 Veer J.A. , Vrije Universiteit Amsterdam, Faculteit Aardwetenschappen, Afdeling Kwartairgeologie en Geomorfologie: *Geochemical comparison of Lateglacial lacustrine deposits in the Weerterbos area (southern Netherlands)*

- 00/8 Middelkoop H. & B.G. Ruessink, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Analyse historische waterstanden Maas - Benedenrivierengebied II.*
- 00/9 Putten, M.J. van, Vrije Universiteit Amsterdam, Faculteit Aardwetenschappen, Afdeling Kwartairgeologie en Geomorfologie : *Fluvial response to climatic fluctuations in north eastern European Russia.*
- 00/10 Pebesma, E.J., R.N.M. Duin & A.M.F. Bio, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Spatial interpolation of sea bird densities on the Dutch part of the North Sea.*

## 2001

- 01/1 Bogaard, T.A. & M.R. Hendriks, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Hydrological pilot study of the Ijen caldera and Asembagus irrigation area.* Technical report. Visit 14-28 August 2000.
- 01/2 Dankers, R. Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *TANAFLOW, a large-scale water balance model of the Tana river basin.*
- 01/3 Kleinhans, M. Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Calibratie van bodem-transportmeetmethoden, literatuurstudie*
- 01/4 Lloyd Davies, Mark T. & Jaap J.M. van der Meer, Universiteit van Amsterdam, Faculteit NWI/IBED: *Neogene Glacial History of the Allan Hills. South Victoria Land, Antarctica-Field Report, 1999-2000*
- 01/5 Middelkoop, H. Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Morfologische karakterisatie van het Nederlandse benedenrivierengebied, verkenning van parameters.*
- 01/6 Kleinhans, M.G., A.W.E. Wilbers & J.H. van den Berg, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Effect van het getij op het sedimenttransport in de Merwede: Proefmeting splitsingspunt, April 2001.* ISBN 90-77079-01-7
- 01/7 Wilbers, A.W.E. & J.H. van den Berg, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Beddingvormen en baggerwerk in de Waal.* ISBN 90-77079-02-5

## 2002

- 02/1 Frings, R.M. Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Duinen, hydraulische ruwheid en bodemtransport in het zomerbed van de Maas bij Broekhuizen.* ISBN 90-77079-03-3
- 02/2 Perk, M. van der, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *"Evaluatie van het effect van vooroeververdediging op de ontwikkeling van de waterbodemkwaliteit van de vooroevers van de Lek".* ISBN 90-77079-04-1
- 02/3 Lloyd Davies, M.T. & J.J.M. van der Meer: Universiteit van Amsterdam, Faculteit NWI/IBED: *The Glacial History of the East Antarctic Ice Sheet at Allan Hills and Mount Feather and contemporary Glacial processes at Blood Falls, Taylor Valley, Antarctica-Field Report, 2001-2002.* ISBN 90-77079-05-X
- 02/4...Pebesma, E.J. & A.M.F. Bio, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Landsdekkende interpolatie van aanwezigheid van plantensoorten.* ISBN 90-77079-07-6
- 02/5 Pebesma, E.J., Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Interpolating sea bird densities: cokriging temporal changes and block aggregate estimates.* ISBN 90-77079-06-8
- 02/6 Kramer, J. de, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Waterbeweging in de Westerschelde, een literatuurstudie.* ISBN 90-77079-08-4
- 02/7 Frings R.M. & M.G. Kleinhans, Universiteit Utrecht, Ruimtelijke Wetenschappen, Fysische Geografie: *Sedimentsortering en transportlaagdynamiek, geologische, antropogene en alluviale invloeden op de beddingsamenstelling van de Rijn rond de Pannerdense Kop,* ISBN 90-77079-