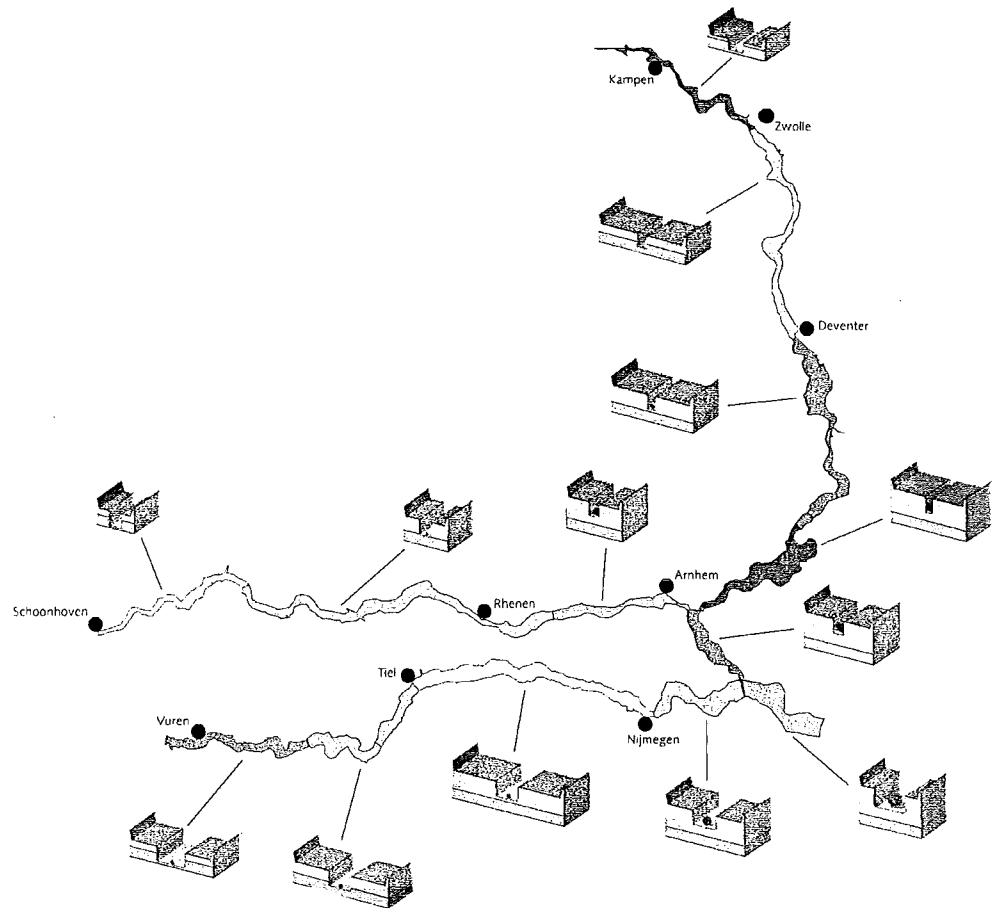


Bodemontwikkeling Rijnsysteem

Een verkenning van omvang, oorzaken, toekomstige ontwikkelingen en mogelijke maatregelen

oktober 2000

Dr.ir. P.J. Visser



Bodemontwikkeling Rijnsysteem

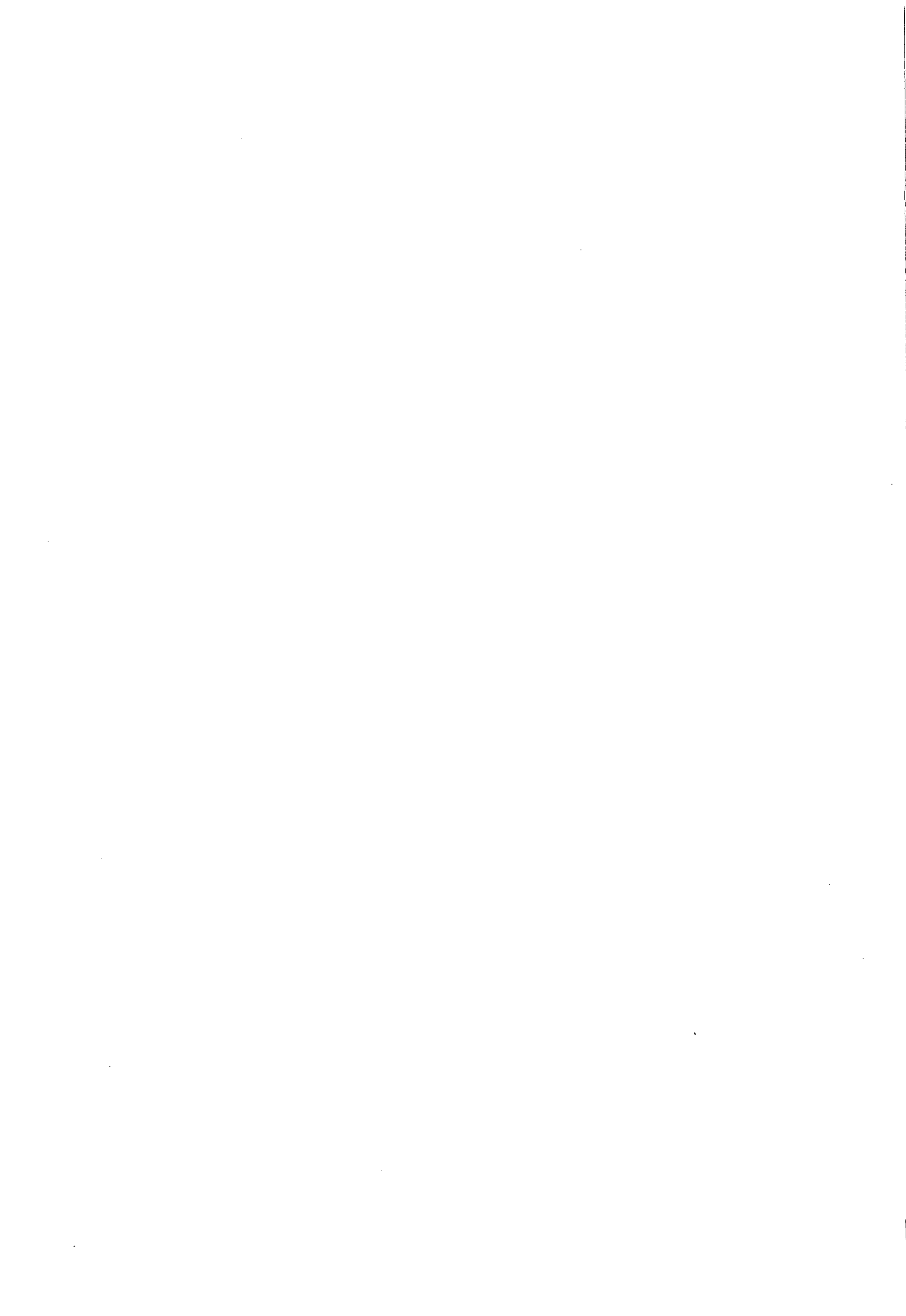
**Een verkenning van omvang, oorzaken, toekomstige
ontwikkelingen en mogelijke maatregelen**

Dr.ir. P.J. Visser

Studie verricht voor:

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Directie Oost-Nederland

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde
Oktober 2000



Voorwoord

Het voor u liggende rapport is opgesteld in opdracht van de Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat. In het rapport wordt ingegaan op de bodemdalingen en -rijzingen van de Rijntakken sedert ongeveer 1930, op de menselijke ingrepen die deze bodemontwikkelingen hebben veroorzaakt, op mogelijke toekomstige ontwikkelingen en op eventuele te nemen maatregelen. Voor de auteur een prima gelegenheid zich te verdiepen in wat afgelopen eeuwen heeft plaatsgevonden in het rivierengebied dat effect kan hebben op de morfologie van de Rijntakken. Vanuit de Directie Oost-Nederland werd de studie begeleid door drs. J. van Alphen en ir. H. Havinga. De auteur bedankt Van Alphen en Havinga voor hun kritische opmerkingen en suggesties. Veel dank is verschuldigd aan dr. W.B.M. ten Brinke van RIZA, Rijkswaterstaat, voor het aandragen van de belangrijke gegevens van de waargenomen bodemontwikkelingen van de Rijntakken, alsmede aan dr. W.B.M. ten Brinke en dr.ir. A. Sieben van RIZA, Rijkswaterstaat, voor het reviewen van dit rapport wat tot een aantal verbeteringen heeft geleid.

Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Doelstelling	1
1.4	Studiegebied	2
1.5	Relaties met andere rivierprojecten	3
1.6	Aanpak en leeswijzer	3
2	Ingrepen in Rijnsysteem sinds 1050	5
2.1	Totaaloverzicht	5
2.2	Riviernormalisatie	5
2.3	Zand- en grindwinning vanuit het zomerbed	8
2.4	Ophoging en bebouwing van uiterwaarden	12
2.5	Wijziging IJsselmonden en afsluiting Zuiderzee	13
2.6	Bochtafsnijdingen	13
2.7	Kanaliseatie van Neder-Rijn en Lek	14
2.8	Afsluiting Haringvliet en Volkerak	14
2.9	Toename scheepvaart	15
2.10	Aanbrengen oeververdediging	15
2.11	Ingrepen in de Rhein	15
3	Bodemontwikkeling sinds circa 1930	19
3.1	Inleiding	19
3.2	Ontwikkeling bed tussen kribkoppen van IJssel	21
3.3	Ontwikkeling bed tussen kribkoppen van Lek en Neder-Rijn	21
3.4	Ontwikkeling bed tussen kribkoppen van Waal, Pannerdensch Kanaal en Boven-Rijn	23
4	Verklaring bodemontwikkeling sinds circa 1930	29
4.1	Inleiding	29
4.2	Oorzaken ontwikkeling zomerbed van IJssel	30
4.3	Oorzaken ontwikkeling zomerbed van Lek en Neder-Rijn	32
4.4	Oorzaken daling zomerbed van Pannerdensch Kanaal	33

4.5	Oorzaken ontwikkeling zomerbed van Waal	35
4.6	Oorzaken daling zomerbed van Boven-Rijn	36
4.7	Discussie	38
5	Waarschijnlijke bodemontwikkeling in de nabije toekomst	41
5.1	Inleiding	41
5.2	Toekomstige ontwikkeling zomerbed van IJssel	41
5.3	Toekomstige ontwikkeling zomerbed van Lek en Neder-Rijn	44
5.4	Toekomstige ontwikkeling zomerbed van Pannerdensch Kanaal	46
5.5	Toekomstige ontwikkeling zomerbed van Waal	49
5.6	Toekomstige ontwikkeling zomerbed van Boven-Rijn	49
5.7	Discussie	54
6	Eventuele maatregelen	59
6.1	Inleiding	59
6.2	Verlagen en/of inkorten van kribben	59
6.3	Zandsuppleties	60
6.4	Discussie	60
7	Conclusies en aanbevelingen	61
7.1	Inleiding	61
7.2	Conclusies	61
7.3	Aanbevelingen	62
Bijlage A	Effecten van ingrepen in rivieren op korte en lange termijn	63
A.1	Inleiding	63
A.2	Morfologische ontwikkeling na normalisatie	64
A.3	Morfologische ontwikkeling na bochtafsnijding	67
A.4	Morfologische ontwikkeling na verandering in debiet	69
A.5	Morfologische ontwikkeling na verandering in sedimentaanvoer	71
A.6	Morfologische ontwikkeling na verandering in debiet en sedimentaanvoer	73
A.7	Morfologische ontwikkeling na verandering in bodemruwheid	79
A.8	Morfologische ontwikkeling na verandering getij aan benedenstroomse rand	80
A.9	Morfologische tijdschaal	81
Bijlage B	Lijst van symbolen	85
Bijlage C	Literatuur	87

Samenvatting

In de afgelopen 150 jaar is een groot aantal ingrepen gepleegd in de Nederlandse Rijntakken: de rivieren zijn genormaliseerd en vele bochten zijn afgesneden. Daarnaast zijn er enorme hoeveelheden zand en grind gewonnen. Mogelijk is ook de sedimentaanvoer bij Lobith verminderd door ingrepen in de Rhein en de zijrivieren in Duitsland. Deze ingrepen hebben geleid tot een forse daling van het bed tussen de koppen van de kribben in een aantal riviertrajecten (bijvoorbeeld in de Boven-Rijn 1,3 m in de periode 1935 - 1995, dat is dus ruim 2 cm per jaar). In dit rapport worden de opgetreden bodemdalingen verklaard aan de hand van de gepleegde ingrepen. Vervolgens wordt ingegaan op de vraag in hoeverre de bodemdaling zonder ingrijpen nog door zal gaan, en zo ja in welke mate.

Belangrijke ingrepen in de Rijntakken zijn de rivierregulering van midden negentiende eeuw en de normalisatie van de rivieren in twee fases tegen het einde van de negentiende en in het begin van de twintigste eeuw geweest. Om het effect van deze ingrepen (uitschuring van de rivierbodem voor een grotere veiligheid tegen overstromingen en een grotere diepgang voor de scheepvaart) te bespoedigen, werden vanaf het einde van de negentiende eeuw grote hoeveelheden zand en grind uit de rivieren gebaggerd. In de beginjaren waren de totale hoeveelheden gewonnen zand en grind zo groot dat deze de door de rivieren aangevoerde hoeveelheden sediment van ongeveer 500.000 m³ per jaar ruimschoots overtroffen. In de vijftiger jaren van de twintigste eeuw kwam daar verandering in. De voortdurende bodemdalingen waren aanleiding het baggervolume te beperken. Toch bleven de hoeveelheden gewonnen sediment relatief groot. Pas in de negentiger jaren van de twintigste eeuw is de winning van zand en grind drastisch beperkt.

Vergelijking van hoeveelheden gebaggerd zand en grind met hoeveelheden uit de rivierbodem verdwenen sediment laat zien dat de bodemdaling in de IJssel in de periode 1938 - 1990 (deze periode begint 10 jaar na de voltooiing van de normalisatie) geheel is teweeggebracht door de zand- en grindwinning. Voor de Lek en de Neder-Rijn geldt dat met de in de periode 1934 - 1970 (direct na de voltooiing van de normalisatie) waargenomen bodemdaling een hoeveelheid sediment is betrokken die gelijk is aan de in deze periode verrichte hoeveelheid baggerwerk. Met de in de Lek en de Neder-Rijn in de periode 1970 - 1990 waargenomen bodemdaling is aanzienlijk meer sediment betrokken dan wat is gerapporteerd aan baggerwerk. Het verschil bedraagt bijna twee keer de geschatte zandvracht. Mogelijke verklaringen zijn: (i) niet gerapporteerd baggerwerk, (ii) transport van het sediment naar kribvakken en uiterwaarden, (iii) het lager aanleggen van het nieuwe riviervak bij de bouw van de stuw bij Driel, (iv) de kruising met het Amsterdam-Rijnkanaal heeft als zandvang gewerkt. Daarnaast zal de zandvracht zijn toegenomen als gevolg van de in het verleden uitgevoerde normalisatie. Voor het Pannerdensch Kanaal wordt geschat dat ongeveer 40% van de sinds de voltooiing van de normalisatie in 1934 waargenomen bodemdaling te wijten is aan de zand- en grindwinning. Een toename van de

zandvracht (als gevolg van de normalisatie, of een afname van de sedimentaanvoer bij de Pannerden-sche Kop) van slechts ongeveer 18% is nodig om de overige 60% te verklaren. Voor de Waal geldt dat de bodemdaling die sinds 1926 (dat is 10 jaar na de voltooiing van de normalisatie in 1916) is waargenomen vrijwel geheel verklaard kan worden door baggerwerk. Van de waargenomen daling van het bed van de Boven-Rijn tussen de koppen van de kribben in de periode 1965 -1990 kan ongeveer 17% worden verklaard door baggerwerk. Een toename van de zandvracht (dan wel een afname van de aanvoer van sediment vanuit Duitsland) van slechts ongeveer 16% is nodig om de overige 83% te verklaren. Een dergelijke relatief kleine toename kan het gevolg van de normalisatie zijn geweest.

Met riviermorfologische basistheorieën zijn de uiteindelijke effecten afgeschat op de waterdiepte en het bodemverhang van de laatste normalisaties, de in de twintigste eeuw uitgevoerde bochtafsnijdingen en van een eventueel verminderd sedimentaanvoer bij Lobith als gevolg van ingrepen in de Neder-rhein. Ten aanzien van de effecten van deze ingrepen voorspelt de theorie voor IJssel, Lek, Neder-Rijn en Waal een uiteindelijke bodemdaling die overeenkomt met de in de periode sinds de laatste normalisatie tot 1990 ontstane bodemdalingen van deze riviertakken. Grote onzekerheid hierbij is dat de morfologische tijdschaal van met name de IJssel, Lek en Neder-Rijn en Waal zo groot is (orde van grootte enkele eeuwen) dat het feitelijk onvoldoende is alleen te kijken naar ingrepen uitgevoerd sedert 1890 en bodemontwikkelingen gemeten na ongeveer 1930. Wel is het zo dat door de intensieve sedimentwinning de periode waarin de evenwichtsligging zal worden benaderd aanzienlijk korter is dan de morfologische tijdschaal. Hetzelfde geldt voor de eventuele nog nawerkende effecten van eerdere ingrepen (normalisatie, rivierregulering, bochtafsnijdingen). Door de intensieve zand- en grindwinning eind negentiende en begin twintigste eeuw, zijn de beoogde effecten van die ingrepen zeer waarschijnlijk ook reeds lang bereikt.

De theoretische bodemdaling van de Boven-Rijn komt overeen met de sinds 1930 waargenomen bodemontwikkeling. Op grond van waarnemingen van waterstanden bij Lobith en in de Niederrhein zou geconcludeerd kunnen worden dat de bodemdaling tussen 1890 en 1930 relatief klein is geweest. Dit betekent dat de theoretische bodemdaling als gevolg van de normalisatie overeenkomt met de sinds de voltooiing van de normalisatie van de Boven-Rijn in 1890 (of zelfs nog iets eerder) opgetreden bodemdaling. Het ontbreken van nauwkeurige gegevens over zowel de bodemontwikkeling als de zand- en grindwinning in de Boven-Rijn over de periode 1890 - 1930 is er de oorzaak van dat voor deze rivier en feitelijk dus ook voor de benedenstroomse Rijntakken in de verdere toekomst het voorlopig onduidelijk is of de bodemdaling tot staan is gekomen. Ook een verminderd sedimentaanvoer bij Lobith vanuit Duitsland kan er de oorzaak van zijn dat de bodemdaling in de toekomst doorgaat. Door het stopzetten van de zand- en grindwinning zal de snelheid hiervan wel aanzienlijk kleiner zijn dan in de afgelopen eeuw.

Maatregelen om eventueel toekomstige bodemdaling te stoppen zijn verlaging van de kribben en

suppleties van zand en grind. Van deze twee maatregelen is suppletie van sediment verreweg het goedkoopst, en ook aan te bevelen gezien het mogelijk tot staan gekomen proces van bodemdaling.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de afgelopen 150 jaar is een groot aantal ingrepen gepleegd in de Nederlandse Rijntakken: de rivieren zijn genormaliseerd en vele bochten zijn afgesneden. Daarnaast zijn er enorme hoeveelheden zand en grind gewonnen. Deze ingrepen hebben geleid tot een forse daling van het gedeelte van het zomerbed tussen de koppen van de kribben in een aantal riviertrajecten (bijvoorbeeld in de Boven-Rijn 130 cm sinds 1934, dus ongeveer 2 cm per jaar). Deze bodemdalingen zijn voor hooguit 10 cm/eeuw het gevolg van een algehele daling van het omringende land (zie Haasnoot e.a., 1999). Mogelijk zal deze bodemdaling zonder ingrijpen nog eeuwen doorgaan (zie Taal, 1994), om welke reden de ontwikkeling ook wel autonoom wordt genoemd.

Aan de bodemdaling kleven zowel voor- als nadelen. De voordelen zijn te vinden in een hogere veiligheid tegen overstromen, omdat met de bodemdaling de hoogwaterstanden (afgezwakt) meedalen. De nadelen betreffen in het kort de versnelde afschrijving van waterstaatswerken (kribben, oeververdedigingen, sluizen, stuwen, vaste lagen, bodemkribben), verdroging van de uiterwaarden en verandering van afvoerverdelingen, zie ook Visser e.a. (1999).

1.2 Probleemstelling

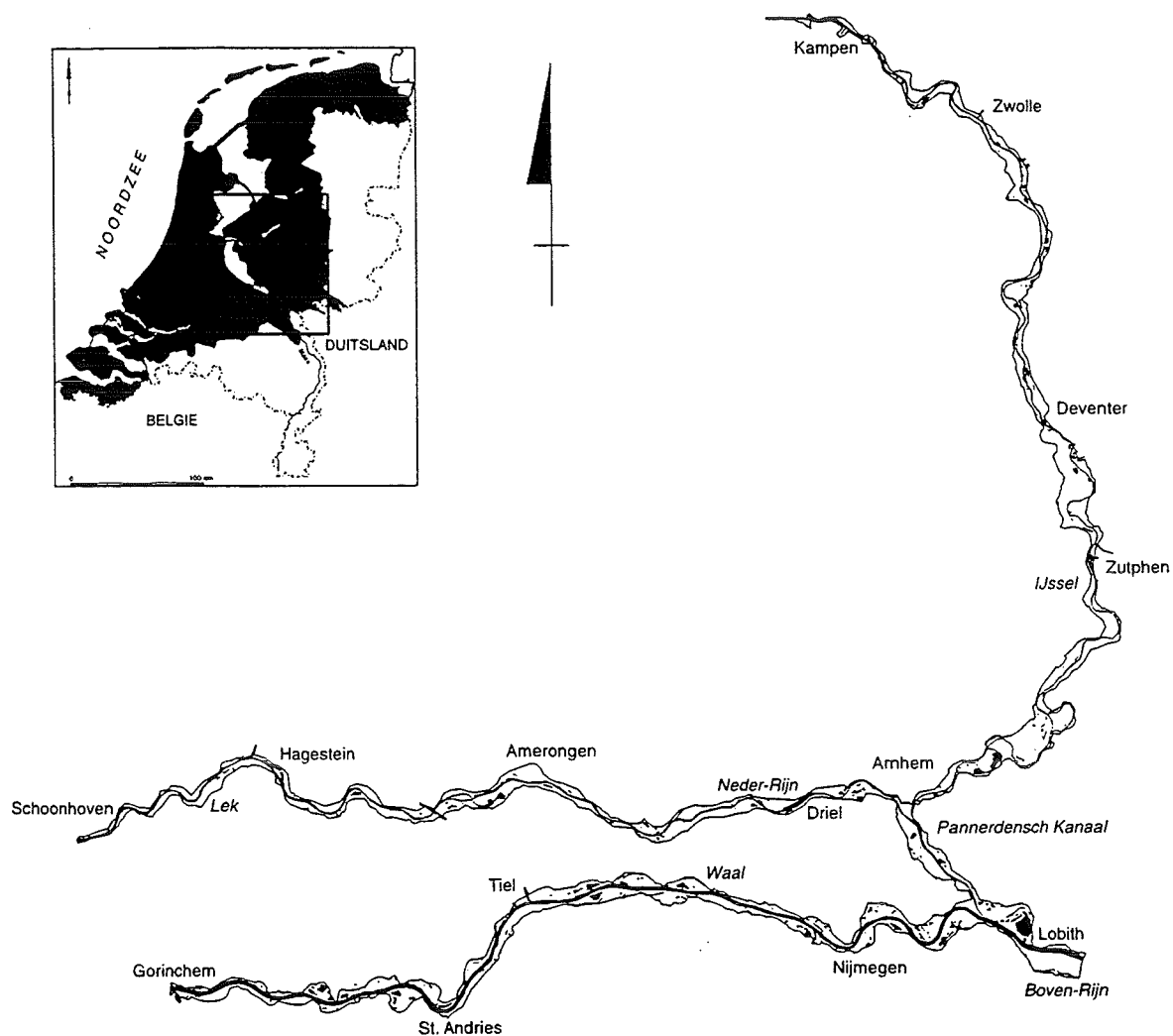
Het concrete probleem waarmee we in het gebied van de Rijntakken worden geconfronteerd is driedelig, n.l.:

1. Er is onvoldoende kwantitatieve kennis over de oorzaken van de tot nu toe opgetreden dalingen van het zomerbed van de Rijntakken tussen de koppen van de kribben.
2. Er is onvoldoende kennis over de te verwachten toekomstige ontwikkeling van het zomerbed van de Rijntakken.
3. Er ontbreekt een totaalbeeld van de mogelijke maatregelen (inclusief kosten) om de autonome bodemdaling te verminderen dan wel te stoppen.

1.3 Doelstelling

Het doel van de onderhavige studie is de hierboven beschreven ontbrekende kennis in te vullen. Concreet betekent dat:

1. Een beschrijving van de oorzaken van de opgetreden dalingen van het bed van de Rijntakken tussen de koppen van de kribben.
2. Een beschrijving van de te verwachten ontwikkeling van de ligging van het zomerbed van de Rijntakken in de nabije toekomst.



Figuur 1.1 Studiegebied.

3. Een beschrijving van eventuele maatregelen om de bodemdalingen te stoppen en een daaruit geselecteerde aanbevolen maatregel.

1.4 Studiegebied

Het studiegebied beslaat het beheersgebied van de Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat (zie Figuur 1.1), benedenstrooms uitgebreid tot Kinderdijk en bovenstrooms tot Emmerich of verder bovenstrooms indien dat voor het onderzoek noodzakelijk is. De benedenstroomse grenzen liggen op de overgang naar het benedenrivierengebied (Boven-Merwede bij Gorinchem), in het benedenrivierengebied (Lek bij Kinderdijk) en het IJsselmeer, waar de waterstanden nog maar voor een beperkt deel worden bepaald door de afvoer van de Rijn. Het riviertraject van de Boven-Rijn tussen kmr (kilome-

terraai) 862 bij Tolkamer en kmr 867 bij Millingen a/d Rijn, dat ook wel Bijlandsch Kanaal wordt genoemd, wordt in dit rapport bij de Boven-Rijn inbegrepen.

1.5 Relaties met andere rivierprojecten

De autonome bodemdaling heeft relaties met de volgende projecten:

- Ruimte voor Rijntakken

Naar verwachting zal de maatgevende afvoer van de Rijn bij Lobith in het jaar 2001 verhoogd worden van de huidige waarde van 15000 m³/s naar 16000 m³/s. Dat komt overeen met 20 tot 30 cm hogere waterstanden. Het project Ruimte voor Rijntakken beoogt 1000 m³/s meer door de Rijntakken te laten afvoeren zonder verhoging van de Maatgevende Hoogwaterstanden (MHW's). De bodemdaling kan substantieel bijdragen aan deze doelstelling (tot circa 40 % van de daling werkt door in de MHW's, afhankelijk van de verhouding van de breedte van het bed tussen de kribkoppen en van de breedte tussen de oeverlijnen).

- Waalproject

Dit project beoogt het dwarsprofiel van de Waal te verruimen ten behoeve van de scheepvaart (breedte 170 m, diepte 2,80 m bij de Overeengekomen Lage Rivierstand, OLR, bij Lobith, behorende bij een Boven-Rijnafvoer van 984 m³/s). Natuurlijke drempels en constructies op de rivierbodem (bijvoorbeeld in de bocht in de Waal bij St. Andries) worden na verloop van tijd ondiepten t.o.v. het niet-vastgelegde rivierbed dat verder daalt.

- Grensproject (regulering Niederrhein/Boven-Rijn)

In de omgeving van Emmerich ligt op de bodem van de Niederrhein (tussen kmr 853,4 en kmr 853,6) een natuurlijke drempel, die de bodemdaling bovenstrooms ervan afremt. Voortgaande bodemdaling benedenstrooms van de drempel zorgt ervoor dat deze drempel vanaf 2015 een groot knelpunt voor de scheepvaart wordt.

- Verkenning regelbereik splitsingspunten

De lokale bodemgeometrie nabij de splitsingspunten is van invloed op de afvoerdeling.

Voor bovengenoemde projecten is het al of niet stopzetten van de bodemdaling dus belangrijk, omdat de bodemligging (dus ook veranderingen erin) een belangrijke randvoorwaarde is.

1.6 Aanpak en leeswijzer

De daling van het zomerbed van de Rijntakken is het gevolg van de vele ingrepen die sedert 1850 hebben plaatsgevonden in deze rivieren. Het gaat hierbij met name om de aanleg van kribben, bocht-afsnijdingen en stuwen alsmede om baggerwerk. Hoofdstuk 2 bevat een beknopte omschrijving van deze ingrepen. In Hoofdstuk 3 wordt een beschrijving gegeven van de ontwikkeling van het bed van de Rijntakken tussen de kribkoppen sinds circa 1930. In Hoofdstuk 4 wordt getracht een verklaring te vinden voor deze ontwikkeling. Hoofdstuk 5 bevat een voorspelling van de ontwikkeling van het

bed tussen de kribkoppen als gevolg van de laatste normalisatie en andere ingrepen gedaan in de twintigste eeuw in de Rijntakken. Hieruit volgt de nog te verwachten ontwikkeling van het zomerbed in de toekomst als gevolg van deze ingrepen. In Hoofdstuk 6 wordt ingegaan op eventuele maatregelen om de bodemdaling te stoppen mocht deze zich voortzetten. Het rapport sluit af met de conclusies en aanbevelingen in Hoofdstuk 7.

2 Ingrepen in Rijnsysteem sinds 1050

2.1 Totaaloverzicht

De daling van het bed tussen de kribkoppen is het gevolg van de vele ingrepen die met name sedert 1850 hebben plaatsgevonden in de Rijntakken. In dit hoofdstuk wordt een beknopte omschrijving gegeven van deze ingrepen.

Het ingenieursbureau Haskoning heeft in 1989/1990 een literatuurstudie verricht naar de historische ontwikkeling van de Nederlandse Rijntakken. Het door Haskoning (1990) afgeleide overzicht van de ontwikkeling van het Nederlandse rivierensysteem aangevuld met recente gegevens en enigszins gewijzigd is weergegeven in Tabel 2.1.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op die ingrepen die mogelijkwijs hebben geleid tot de sedert circa 1930 in het studiegebied waargenomen veranderingen in de bodemligging.

2.2 Riviernormalisatie

De drie normalisaties in de Rijntakken in de negentiende en twintigste eeuw zijn belangrijke ingrepen geweest, met name voor de veiligheid van de bewoners van de gebieden langs de rivieren en voor de bevaarbaarheid. Door normalisatie wordt het laagwaterbed beperkt tot één geul van constante breedte welke over grotere lengte wordt gehandhaafd. Hiertoe werden op regelmatige afstanden kribben aangelegd, die ook de waterstroom van de erosiegevoelige oevers weghielden. Voordat deze systematische reguleringen werden uitgevoerd, verstoorden het onregelmatige laagwaterbed en allerlei obstakels in het hoogwaterbed de veilige afvoer van water en ijs naar zee. Als gevolg hiervan braken vele dijken door en kwamen vele inundaties voor.

De eerste fase van de normalisatie (1850 - 1870) was vooral bedoeld het zomerbed van de rivieren te verlagen en aldus de kans op overstromingen te verminderen. Deze fase bestond uit een regulering van de rivier, dat is de aanleg van dwarsdammen en zomerkaden als vaste begrenzing van het zomerbed. De tweede (1870 - 1890) en derde (1900 - 1934) fase van de normalisatie werden vooral uitgevoerd om tegemoet te komen aan de behoefte aan een grotere diepgang voor de scheepvaart. In de tweede fase werd de normaalbreedte van de rivier in twee stadia verkleind, eerst door bekribbing van de ene oever, daarna van de andere oever. De in de tweede fase aangelegde kribben werden in de derde fase verlengd toen bleek dat een verdere normalisatie nodig was.

Na de voltooiing van de normalisatie rond 1934 kregen de Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal,

1050	eerste rivierdijken
1122	afdamming van de Hollandsche IJssel bij Wijk bij Duurstede
1285	afdamming van de Kromme Rijn bij Vreeswijk
1421	St. Elisabeth's vloed (ontstaan Biesbosch, ingrijpende wijziging benedenloop van de rivieren)
1570 - 1600	aanleg tweede verbinding tussen Waal en Maas (Voornsche Gat)
1595 - 1700	verbeteringen splitsingspunten Rijn/Waal en Rijn/IJssel
1599	graven van kanaal tussen Waal en Maas bij St. Andries
1639	bochtafsnijding Waal bij Hurwenen
1649	bochtafsnijding Waal bij de Ooy/Bemmel
1655	bochtafsnijding Waal bij Zaltbommel
1700	splitsingspunt Rijn en IJssel (Schenkenschans)
1707	opening Pannerdensch Kanaal
1733	afsluiting van de verbindingen tussen Maas en Waal
1775 - 1776	afsnijding van de Bijlandsche Waard en de Pleij (IJsselkop)
1780 - 1810	aanleg van een aantal overlaten (o.a. Lobithse overlaat in 1780)
1782	verbetering van het splitsingspunt Pannerden
1852	sluiting Lymerse overlaat
1850 - 1870	aanleg Nieuwe Merwede
1850 - 1870	eerste fase van de normalisatie (rivierregulering)
1869 - 1885	verbetering van de IJsselmonden
1870 - 1890	tweede fase van de normalisatie (normaalbreedten: Boven-Rijn werd 400 m en vervolgens 340 m, was eerder 440 m, Waal 360 m en daarna 310 à 320 m, Pannerdensch Kanaal 170 m, Neder-Rijn en Lek tot Schoonhoven 150 m)
1872	aanleg van de Nieuwe Waterweg
1885 - 1904	scheiding van Maas en Waal/verbinding van de Maas met de Amer (tot 1904 mondde de Maas bij Loevestein uit in de Waal)
1900 - 1916	voltooiing van de normalisatie van de Waal (normaalbreedte 260 m bovenstrooms en ongeveer 300 m benedenstrooms van Zaltbommel) en Boven-Merwede (normaalbreedte ongeveer 400 m)
1907	bochtafsnijding in de Neder-Rijn bij Malburgen
1908	verdieping Nieuwe Waterweg

Tabel 2.1 Historische veranderingen in het Rijnsysteem (volgens Haskoning, 1990, en Schans, 1998, met wijzigingen en aanvullingen)

1914 - 1932	wijziging van de IJsselmonden
1915 - 1929	kanalisatie van de Maas
1927	aanleg Maas-Waalkanaal
1928	voltooiing van de normalisatie van de IJssel (normaalbreedte 100 m)
1929 - 1934	voltooiing van de normalisatie van het Pannerdensch Kanaal (normaalbreedte werd 140 m, was 170 m) en de Neder-Rijn (normaalbreedte 130 m, was 150 m)
1932	afsluiting Zuiderzee
1935 - 1939	verbetering van de Oude Maas
1936	aanleg Twenthekanaal
1938	aanleg Amsterdam-Rijnkanaal
1949	sluiting Baakse overlaat
1950	afdamming Brielse Maas
1952	aanleg Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal
1953	aanpassing van het Pannerdensch Kanaal (werd er 230 m korter door)
1954	bochtafsnijding in de IJssel bij Doesburg (IJssel werd er 4,6 km korter door)
1954 - 1958	bouw stormvloedkering in de Hollandsche IJssel
1954 - 1970	kanalisatie van Neder-Rijn en Lek (stuw bij Hagestein voltooid in 1958, stuw bij Amerongen in gebruik genomen in 1966, stuw bij Driel gereed in 1970)
1958 -	explosieve toename van de scheepvaart (duwvaart)
1959 - 1960	sluiting Lobithse en Spijkse overlaat
1960 - 1970	verruiming van de Beneden-Merwede
1962 - 1970	verbeteringen aan de Nieuwe Maas/Nieuwe Waterweg
1969	bochtafsnijdingen in de IJssel bij Rheden/De Steeg (rivier 4,0 km korter)
1970	correctie in de IJssel bij Doesburg
1970	afsluiting Haringvliet
1977 -	rivierdijkverbeteringen
1980 -	verdere normalisatie benedenstrooms gedeelte van de Waal
1985 - 1988	vaste laag in de bocht in de Waal bij Nijmegen
1991 -	stopzetting zand- en grindwinning in het zomerbed (vanaf 1991 alleen nog toegestaan in de Waal benedenstrooms van Zaltbommel, zie Paragraaf 2.3)
1996 - 1999	bodemkribben in de bocht in de Waal bij Erlecom en vaste laag in de bocht in de Waal bij St. Andries

Vervolg Tabel 2.1 Historische veranderingen in het Rijnsysteem (volgens Haskoning, 1990, en Schans, 1998, met wijzigingen en aanvullingen)

Rijntak	zomerbed		uiterwaarden		
	lengte [km]	gem. breedte* [m]	aantal	gem. breedte [m]	totale oppervlakte [ha]
Boven-Rijn	10	340/440	4	850	1100
Waal	84,5	260/370	43	550	8700
Pannerdensch Kanaal	11	140/200	9	400	1300
Neder-Rijn en Lek tot Schoonhoven**	93	130/200	48	400	6600
IJssel	126,5	100/120	59	500	10500
Totaal	325		163		28200
* respectievelijk binnen de normaal- en oeverlijnen: de ruimte daartussen wordt ingenomen door de kribvakken ** de totale lengte van de Neder-Rijn en de Lek tot Kinderdijk bedraagt 110,5 km					

Tabel 2.2 Enige belangrijke afmetingen van Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn, Lek tot Schoonhoven en IJssel (volgens Silva en Douben, 1998, met kleine correcties).

IJssel, Neder-Rijn en Lek min of meer hun huidige vorm, d.w.z. een stelsel van rivieren met vastliggende splitsingspunten, met een hoofdgeul die een ongeveer constante breedte en diepte heeft, en met niet te scherpe bochten. Door de verbeterde afvoer van water, ijs en sediment is de kans op overstromingen sterk afgenomen. Voor de scheepvaart was een min of meer stabiele vaargeul gerealiseerd. In Tabel 2.2 is een aantal belangrijke afmetingen van de verschillende riviertakken weergegeven.

2.3 Zand- en grindwinning vanuit het zomerbed¹⁾

Om het beoogde effect van de tweede en derde normalisatie (uitschuring van de rivierbodem voor een grotere diepgang voor de scheepvaart) te bespoedigen werden vanaf het einde van de negentiende eeuw grote hoeveelheden zand en grind uit de rivieren gebaggerd. In de beginjaren gebeurde dit bewust, maar ongecontroleerd en zonder vergunning. In de jaren dertig van de twintigste eeuw werd begonnen met het afgeven van vergunningen. De totale hoeveelheden gewonnen zand waren in die tijd zo groot dat deze de door de rivier aangevoerde hoeveelheden zand ruimschoots overtroffen (De Boer en Swanenberg, 1989).

¹⁾ De zandwinning in diepe putten in de uiterwaarden blijft in dit rapport buiten beschouwing.

Periode	Boven-Rijn	Pannerdensch Kanaal
1965 t/m 1969	39.000	
1970 t/m 1974	59.000	159.000
1975 t/m 1979	118.000 ^{a)}	123.000
1980 t/m 1984	127.000 ^{b)}	7.000
1985 t/m 1989	71.000 ^{c)}	
1990 t/m 1993	93.000 ^{c)}	
Totaal	507.000	289.000
a) waarvan 44.000 m ³ sediment volgens bestekken b) waarvan 11.000 m ³ sediment volgens bestekken c) gegevens van 1989 t/m 1993 zijn afkomstig van Dienstkring Boven-Rijn en Waal		

Tabel 2.3 Volgens vergunningen (en bestekken, indien aangegeven) gebaggerde hoeveelheden zand (in m³ per 5 jaar) uit het zomerbed van Boven-Rijn volgens De Boer en Swanenberg²⁾ (DBS, 1989, zie ook Haskoning, 1990) en van het Pannerdensch Kanaal volgens Haskoning (1990).

In 1935 werd een zandcontingentering ingesteld, waarbij de vergunninghouder een hoeveelheid zand kreeg toegewezen welke was gebaseerd op door hem gebaggerde hoeveelheden zand in een aantal voorgaande jaren. Het gevolg was echter dat nog steeds vrij ongelimiteerd zand aan de rivier kon worden onttrokken. Pas in de vijftiger jaren van de twintigste eeuw kwam daar verandering in. De voortdurende bodemdalingen waren aanleiding het baggervolume te beperken. Volgens De Boer en Swanenberg (1989) werd op 1 juli 1974 de hele zandcontingentering gestopt. Echter in de periode 1975 t/m 1993 zijn toch ook nog grote hoeveelheden sediment gebaggerd. Tegenwoordig worden voor het beheersgebied van de Directie Oost-Nederland vergunningen afgegeven voor ongeveer 180.000 m³/jaar, voor de Waal benedenstrooms van Zaltbommel (hier wordt ook gebruik van gemaakt). Bovenstrooms van Zaltbommel wordt het gebaggerde zand dat bij het weghalen van voor de scheepvaart hinderlijke ondiepten wordt verkregen, weer elders in de rivier teruggestort.

Tabel 2.3 bevat hoeveelheden sediment (in m³ per 5 jaar), volgens vergunningen gebaggerd uit het zomerbed van de Boven-Rijn, als gerapporteerd door De Boer en Swanenberg (DBS, 1989), aangevuld met gegevens van de Dienstkring Boven-Rijn en Waal, en van het Pannerdensch Kanaal volgens Haskoning (1990). Tabel 2.4 bevat hoeveelheden gebaggerd zand (in m³ per 5 jaar) uit het zomerbed

²⁾ Rapporteren baggerwerk in tonnen; omgerekend naar m³ volgens 1 m³ sediment weegt 1,6 ton.

Periode	Waal		
	Volgens Struijk	Volgens DBS	Opgave Dienstkring
1900 t/m 1904	3.680.000		
1905 t/m 1909	4.780.000		
1910 t/m 1914	1.930.000		
1915 t/m 1919	940.000		
1920 t/m 1924	2.090.000		
1925 t/m 1929	6.090.000		
1930 t/m 1934	2.340.000		
1935 t/m 1939	2.220.000		
1940 t/m 1944	460.000 ^{a)}		
1945 t/m 1949	1.160.000		
1950 t/m 1954	900.000	810.000	
1955 t/m 1959	500.000	440.000	
1960 t/m 1964	300.000	300.000	
1965 t/m 1969	190.000	260.000	
1970 t/m 1974	210.000	180.000	
1975 t/m 1979	480.000	670.000 ^{d)}	
1980 t/m 1984	2.150.000	2.150.000 ^{e)}	1.270.000
1985 t/m 1989	2.650.000 ^{b)}	3.280.000 ^{b)+f)}	2.740.000 ^{c)}
1990 t/m 1993			1.760.000
Totaal	33.070.000	8.090.000	5.770.000
a) ontbrekende waarde van 1944 is vervangen door hoeveelheid van 1945 b) ontbrekende waarde van 1989 is vervangen door jaargemiddelde over periode 1985 t/m 1988 c) ontbrekende waarde van 1987 is vervangen door gemiddelde over 1985, 1986, 1988 en 1989 d) waarvan 260.000 m ³ sediment volgens bestekken e) waarvan 900.000 m ³ sediment volgens bestekken f) waarvan 1.070.000 m ³ sediment volgens bestekken			

Tabel 2.4 Gebaggerde hoeveelheden zand (in m³ per 5 jaar) uit het zomerbed van de Waal volgens Struijk (1994), De Boer en Swanenberg (DBS, 1989, zie ook Haskoning, 1990) en de Dienstkring Boven-Rijn en Waal (zie Taal, 1994); de hoeveelheden volgens DBS en Struijk sinds 1935 hebben betrekking op afgegeven vergunningen en op bestekken t.b.v. eigen werk (bij DBS zijn de op bestekken betrekking hebbende hoeveelheden afzonderlijk aangegeven).

Periode	Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn, Lek	IJssel
1900 t/m 1904	3.520.000	360.000
1905 t/m 1909	3.690.000	920.000
1910 t/m 1914	2.440.000	1.990.000
1915 t/m 1919	3.910.000	3.310.000
1920 t/m 1924	3.450.000	1.420.000
1925 t/m 1929	2.230.000	2.010.000
1930 t/m 1934	2.350.000	2.460.000
1935 t/m 1939	2.040.000	2.030.000
1940 t/m 1944	980.000 ¹⁾	950.000 ^{a)}
1945 t/m 1949	620.000	460.000
1950 t/m 1954	820.000	290.000
1955 t/m 1959	670.000	120.000
1960 t/m 1964	760.000	240.000
1965 t/m 1969	400.000	160.000
1970 t/m 1974	440.000	960.000 ^{b)}
1975 t/m 1979	520.000	2.070.000 ^{c)}
1980 t/m 1984	220.000	560.000 ^{c)}
1985 t/m 1989	60.000	120.000 ^{c)}
1990 t/m 1994	40.000	
1995 t/m 1999	1.380.000	
Totaal	30.540.000	20.430.000
a) ontbrekende waarde van 1944 is vervangen door hoeveelheid van 1945 b) waarvan 880.000 m ³ t.b.v. eigen werk c) t.b.v. eigen werk		

Tabel 2.5 Hoeveelheden gewonnen zand (in m³ per 5 jaar) in het zomerbed van Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek en vervolgens IJssel; gegevens van 1900 t/m 1969 afkomstig van Struijk (1994), gegevens over 1970 t/m 1985 van Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek afkomstig van Haskoning (1990) en van IJssel afkomstig van Struijk (1994), gegevens over 1970 t/m 1989 van hoeveelheden gewonnen zand t.b.v. eigen werk zijn afkomstig van Wolters (2000) en die over 1990 t/m 1999 van Berben (1999); de hoeveelheden sinds 1935 hebben betrekking op vergunningen en, indien aangegeven, bestekken t.b.v. eigen werk.

van de Waal volgens Struijk (1994), De Boer en Swanenberg (DBS, 1989) en de Dienstkring Boven-Rijn en Waal (zie Haskoning, 1990 en Taal, 1994). De in Tabel 2.4 weergegeven waarden die zijn overgenomen van De Boer en Swanenberg (1989), betreffen hoeveelheden m^3 gewonnen zand waarvoor vergunningen werden verleend (welke dus niet volledig gebaggerd behoeven te zijn), vermeerderd met hoeveelheden gewonnen zand voor nieuwe werken (volgens bestekken, echter uitsluitend bestekken van na 1975; "het naspeurwerk in bestekken van voor 1975 bleek dermate moeilijk dat besloten is dit achterwege te laten", De Boer en Swanenberg, 1989). Tabel 2.5 bevat hoeveelheden zand (in m^3 per 5 jaar) gebaggerd uit het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal, de Neder-Rijn, de Lek en de IJssel. Het zand gebaggerd voor eigen werk is vooral gebruikt voor het vastleggen van de IJsseloevers, zie Wolters (2000).

Volgens De Boer en Swanenberg (1989) was de controle op het baggergebeuren in het verleden beperkt. Daarnaast was ook de registratie en verwerking van de baggergegevens niet altijd vlekkeloos en werden deze over het algemeen niet gepubliceerd. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de cijfers in Tabel 2.4 van verschillende bronnen voor 'dezelfde hoeveelheden gewonnen zand' nogal eens verschillen. Men vermoedt dat het overgrote deel van de hoeveelheden gegeven in de Tabellen 2.3 t/m 2.5 in het zomerbed zijn gewonnen, dus niet in de uiterwaarden, maar helemaal zeker is dat niet. In deze studie wordt aangenomen dat de zandwinning in het gedeelte van het zomerbed tussen de normaallijnen heeft plaatsgevonden.

Tabel 2.4 laat zien dat er in de Waal in de periode 1980 t/m 1993, dus na de beëindiging van de zandcontingentering op 1 juli 1974, zeer grote hoeveelheden zand zijn gewonnen. Deze winning vond vooral plaats in het benedenstroomse gedeelte van de Waal, d.w.z. benedenstrooms van kmr 910, d.w.z. vooral tussen kmr 924 (Varik) en kmr 950 (Vuren), zie De Boer en Swanenberg (1989). Echter ook op het bovenstroomse gedeelte van de Waal, d.w.z. tussen kmr 867.5 (Pannerdensch Kop) en kmr 887 (Weurt) werd in de periode 1975 t/m 1993 toch ook nog zo'n 1.800.000 m^3 zand gewonnen (Schans, 1998, gebaseerd op gedetailleerde gegevens van de Dienstkring Boven-Rijn en Waal).

2.4 Ophoging en bebouwing van uiterwaarden

De daling van het bed van een groot deel van het Rijnsysteem heeft zich afgespeeld uitsluitend in het zomerbed tussen de koppen van de kribben. In de uiterwaarden is er zelfs sprake van een bodemrijzing als gevolg van sediment dat hier door hoge rivierafvoeren gebracht wordt en hier vervolgens sedimenteert. Verder zijn er afgelopen eeuwen ongeveer 100 hoogwatervrije terreinen, landhoofden van zo'n 20 bruggen en ongeveer 30 veerwegen in de uiterwaarden van de Rijntakken aangebracht (zie Silva en Douben, 1998, en Silva en Jol, 1999) die voor de stroming in de uiterwaard een weerstandsverhogend effect hebben (in het project Ruimte voor Rijntakken ook wel hydraulische knelpunten genoemd). Het effect van ophogingen van of constructies in de uiterwaarden is hetzelfde als dat van

kribben: de stroming in het zomerbed wordt versterkt.

2.5 Wijziging IJsselmonden en afsluiting Zuiderzee

De IJssel heeft vanaf de twaalfde eeuw, in wisselwerking met de steeds groter wordende Zuiderzee, een kleine delta gevormd waarin een relatief klein getijverschil van 0,2 m optrad. In deze delta bezonk het door de IJssel aangevoerde sediment. Nieuw land werd ingepolderd, en vanaf de vijftiende eeuw damde men af en toe IJsseltakken af om de resterende takken beter bevaarbaar te maken (zie Ploeger, 1992). In 1840 is het Keteldiep aangelegd, een ruim 3 km lange en ongeveer 100 m brede geul tussen twee hoofden, aan de monding van de IJssel. Omdat het Keteldiep voortdurend verondiepte, werden de dammen in 1869 met 800 m verlengd. In 1870 - 1871 werd een voor de scheepvaart hinderlijke bocht in de benedenloop van de IJssel weggenomen; in de jaren daarna zijn nog een aantal werken uitgevoerd om de voor de scheepvaart vereiste waterdiepte in de monding van de IJssel te verkrijgen.

Als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee met de Afsluitdijk in 1932 ontstond het IJsselmeer met een waterniveau dat dagelijks minder varieerde dan dat van de Zuiderzee (met een gemiddeld getijverschil bij de IJsselmonden van ongeveer 0,2 m). Voor de rivier de IJssel betekende dit dus dat de waterstand bij de monding (benedenstroomse randvoorwaarde) niet meer met het getij varieerde, als gevolg waarvan dus de maximale stroomsnelheden op het benedenstroomse gedeelte van de IJssel enigszins afnamen. Een vergelijkbaar verschijnsel heeft zich later in een veel sterkere mate voorgedaan aan de benedenstroomse rand van de Waal na afsluiting van het Haringvliet (zie Paragraaf 2.8). Door het waterpeil in het IJsselmeer 's winters op ongeveer NAP - 0,35 m te houden en 's zomers op ongeveer NAP - 0,20 m (zie Rijkswaterstaat, 1964 en Ploeger, 1992) nam de gemiddelde benedenstroomse waterstand met ongeveer 0,30 m af t.o.v. de situatie van voor 1932. Dit heeft mogelijk de afname van de maximale stroomsnelheden in het benedenstroomse gedeelte van de IJssel door het verdwijnen van het getij voor een bepaalde tijd omgezet in een geringe toename van deze stroomsnelheden.

Omstreeks 1940 werden i.v.m. de droogmaking van de Noordoostpolder, twee belangrijke takken in de monding van de IJssel afgedamd; ter compensatie werd een nieuwe monding (het Kattendiep) gegraven. De ligging hiervan is zodanig dat deze geul een groot deel van de sedimentvracht van de IJssel afvoert; het nog steeds noodzakelijke periodieke baggerwerk hindert nu de scheepvaart niet meer, omdat deze van het Keteldiep gebruik maakt.

2.6 Bochtafsnijdingen

Bochtafsnijdingen leiden tot een kortere rivier, resulterend in een groter verhang en als gevolg daarvan tot bodemdalingen bovenstrooms van de afgesneden bocht. In de Waal zijn in de zeventiende eeuw drie bochten afgesneden; met het graven van het Pannerdensch kanaal in de achttiende eeuw en een bochtafsnijding aan het begin van de twintigste eeuw werd ook de Neder-Rijn korter. Nadien is

echter de normalisatie voltooid en zijn zeer grote hoeveelheden zand gebaggerd, als gevolg waarvan het langetermijneffect op de bodem van de ingekorte rivieren en de bovenstroomse trajecten zeer waarschijnlijk al teweeggebracht is. Derhalve wordt het effect van deze bochtafsnijdingen op de na de normalisatie geconstateerde bodemdaling verwaarloosd.

Bochtafsnijdingen in de IJssel bij Doesburg (gereed in 1954) en bij Rheden/De Steeg in de jaren 1963 t/m 1969 hebben in eerste instantie tot een groter verhang van de IJssel (Struijk, 1994, laat dat zien bij OLR) en dus ook tot een grotere afvoercapaciteit van deze rivier geleid. Deze bochtafsnijdingen werden uitgevoerd om de afvoer van de IJssel bij lage Boven-Rijnafoeren te vergroten. Ploeger (1992) suggereert dat, "omdat de IJsselafvoer alleen hoger mocht worden bij lage Boven-Rijnafoeren, de bochtafsnijdingen moesten worden gecompenseerd met een vergroting van de stromingsweerstand in het winterbed. Hiertoe werden kaden verhoogd." Struijk (1994) laat zien dat bij hogere Boven-Rijnafoeren (6000 m³/s en 8000 m³/s) inderdaad de afvoerverdeling ongeveer gelijk is aan die van voor de bochtafsnijdingswerken, en dat bij lagere afvoeren (984 m³/s en 2000 m³/s) van de Boven-Rijn de afvoer van de IJssel wel is toegenomen.

2.7 Kanalisatie van Neder-Rijn en Lek

De kanalisatie van de Neder-Rijn en de Lek heeft plaatsgevonden door middel van de bouw van drie stuwen, bij Driel, bij Amerongen en bij Hagestein. De meest bovenstroomse stuw (bij Driel) heeft als functie om bij relatief lage Boven-Rijnafoeren de afvoer van de IJssel te vergroten. Omdat de afstand tussen Driel en de Pannerdensche Kop relatief kort is zou niet alleen water naar de IJssel worden gestuwd, maar ook nog naar de Waal. Dit bezwaar is ondervangen door bochten in de rivier bij Doesburg en Rheden/De Steeg af te snijden (zie Paragraaf 2.6). De twee andere stuwen zijn gebouwd ter bevordering van de bevaarbaarheid van de Neder-Rijn en de Lek. De aanleg van de stuwen heeft niet alleen de waterbeweging op met name de Neder-Rijn veranderd, maar ook de morfologie van deze rivier (vooral door de betonnen drempels waarop de stalen stuwen in gesloten stand rusten) en van de IJssel.

2.8 Afsluiting Haringvliet en Volkerak

Het Volkerak en het Haringvliet zijn afgesloten in respectievelijk 1969 en 1970 in het kader van de Deltawerken. Als gevolg van deze afsluitingen (vooral die van het Haringvliet) is de amplitude van het getij in de benedenrivieren aanzienlijk afgenomen. Voor de Waal, en in mindere mate voor de Lek, had dit tot gevolg dat de benedenstroomse waterstand (randvoorwaarde) minder in de tijd varieerde; bij Gorinchem was er voor 1969 een gemiddeld getijverschil van 1,4 m, na 1970 was dit 0,35 m; bij Kinderdijk was er voor 1969 een gemiddeld getijverschil van 1,8 m, na 1970 was dit 1,35 m (zie Rijkswaterstaat, 1985). Het gevolg hiervan was dat de maximale stroomsnelheden in grootte afnamen. Omdat het sedimenttransport vooral plaats vindt bij de grotere stroomsnelheden, leidde dit dus ook tot lagere sedimenttransporten en tot een rijzing van de bodem van het zomerbed aan het be-

nedestroomse eind van de Waal (zie Havinga, 1982, Hoofdstuk 3 en Paragraaf A.8 in Bijlage A).

Sinds enige jaren wordt met de gedachte gespeeld het spuiregime van de Haringvlietsluizen zodanig te veranderen dat er weer meer getij doordringt in de benedenrivieren. De drijfveer achter dit idee is natuurontwikkeling. Het is duidelijk dat een dergelijke ingreep de morfologische ontwikkeling op het benedenstroomse gedeelte van de Waal zal beïnvloeden. Ook een eventuele zeespiegelrijzing zal tot andere (namelijk hogere) gemiddelde waterstanden leiden aan de benedenstroomse rand van de Waal (Boven-Merwede bij Gorinchem) en op de Lek bij Schoonhoven en dus invloed hebben op de morfologie van de bovenstroomse riviertrajecten.

2.9 Toename scheepvaart

De afgelopen decennia is de intensiteit van de scheepvaart toegenomen. Daarnaast wordt met steeds krachtiger boten gevaren die grotere eenheden toestaan. Het mogelijke gevolg is een toename van de sedimenttransportcapaciteit van de rivieren. De in de laatste decennia waargenomen toename van de bodemerosie wordt voor een deel toegeschreven aan de intensievere scheepvaart. Er zijn overigens geen betrouwbare gegevens over de toename van zowel het zandtransport als de oevererosie als gevolg van een toename van de intensiteit van de scheepvaart.

2.10 Aanbrengen oeververdediging

Met het aanleggen van dwarsdammen en zomerkaden als vaste begrenzing van het zomerbed in de eerste fase van de normalisatie (1850 - 1870) en het bouwen en verlengen van kribben in de tweede (1870 - 1890) en derde (1900 - 1934) fase van de normalisatie waren ook de rivieroeveren min of meer beschermd tegen oevererosie. Echter in de loop van de tijd zijn toch nog een groot aantal oevers van een stenen verdediging voorzien om geconstateerde overafslag tegen te gaan, bijvoorbeeld rond 1973 langs de IJssel, zie Verheij en Huyskens (1993).

2.11 Ingrepen in de Rhein

Haskoning (1990) rapporteert dat volgens de Duitse literatuur op de Niederrhein tussen 1890 en 1970 een verlaging van de waterstanden van een meter is opgetreden t.g.v. (i) bochtafsnijdingen, (ii) bedreguleringswerken, (iii) normalisatiewerken, (iv) de bouw van stuwen, (v) aanpassingen van de hoogwaterkeringen en (vi) de regulering van de afvoeren van de zijrivieren en stuwen. Haskoning (1990) concludeert ook dat de bodem van het gedeelte van de Niederrhein tussen Königswinter (km 640) en Leverkusen (km 700) niet-erodeerbaar is, terwijl het gedeelte tussen Leverkusen en Düsseldorf (km 740) wordt gezien als een overgangsgedeele dat niet erg erosiegevoelig is. Het riviergedeelte tussen Düsseldorf en de Nederlandse grens (km 865) is zeer erosiegevoelig, hetgeen in het verleden tot grote bodemdalingen heeft geleid (in de afgelopen decennia tot 1990 met 1 - 2 cm/jaar, zie Gözl, 1994),

zie Figuur 3.6.

Naast de hierboven genoemde ingrepen zou ook een verminderde aanvoer van sediment naar het benedenstroomse gedeelte van de Rhein verantwoordelijk kunnen zijn voor de in de Niederrhein waargenomen bodemdaling. Deze afname van de zandvracht zou kunnen zijn teweeggebracht door bodemdalingen bovenstrooms als gevolg van mijnzakkingen, en door de hierboven genoemde bouw van stuwen.

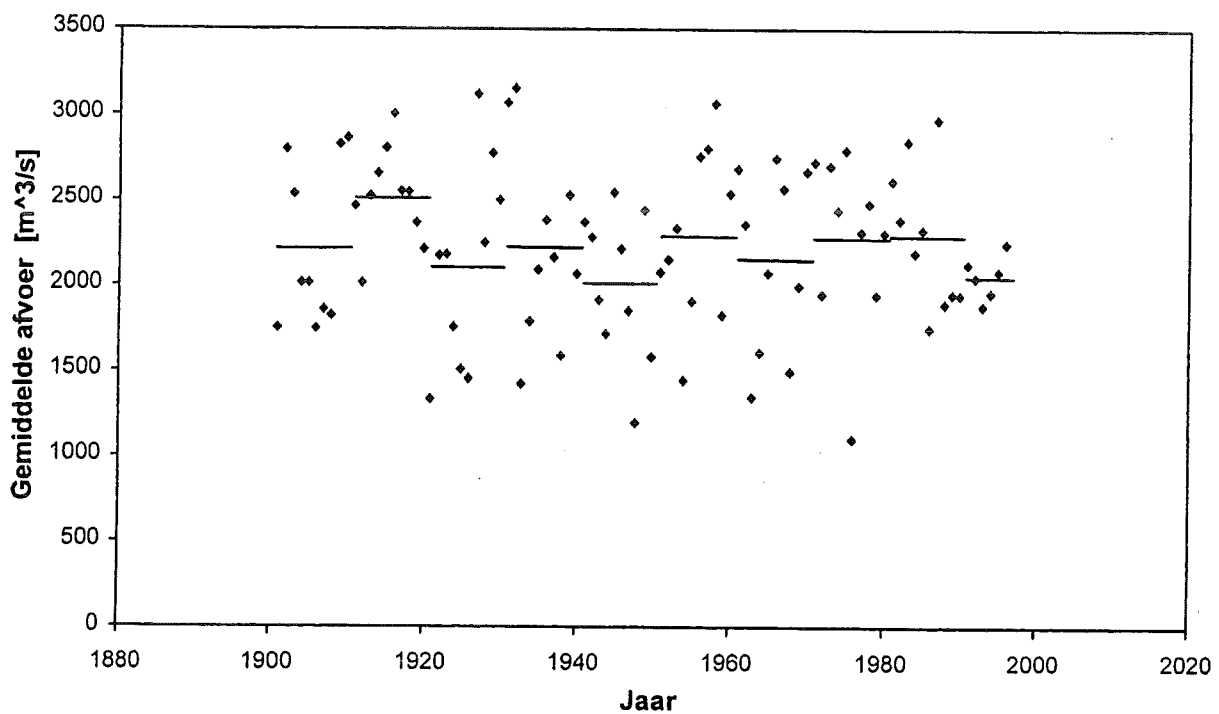
Overigens hebben de ingrepen in de Rhein, en ook een eventuele klimaatverandering, het gemiddelde debiet bij Lobith in de twintigste eeuw niet veranderd. Tabel 2.6 (zie ook Figuur 2.1) bevat de over perioden van 1 jaar gemiddelde afvoeren (in m³/s) bij Lobith voor de jaren 1901 t/m 1996. De over

1901: 1751	1902: 2795	1903: 2531	1904: 2013	1905: 2012
1906: 1745	1907: 1856	1908: 1821	1909: 2823	1910: 2861
1911: 2462	1912: 2010	1913: 2520	1914: 2652	1915: 2801
1916: 3001	1917: 2547	1918: 2543	1919: 2361	1920: 2208
1921: 1333	1922: 2170	1923: 2177	1924: 1754	1925: 1504
1926: 1451	1927: 3116	1928: 2244	1929: 2770	1930: 2495
1931: 3066	1932: 3149	1933: 1421	1934: 1787	1935: 2087
1936: 2375	1937: 2158	1938: 1584	1939: 2524	1940: 2063
1941: 2365	1942: 2277	1943: 1912	1944: 1715	1945: 2542
1946: 2211	1947: 1849	1948: 1193	1949: 2437	1950: 1578
1951: 2073	1952: 2148	1953: 2329	1954: 1441	1955: 1903
1956: 2753	1957: 2799	1958: 3063	1959: 1823	1960: 2534
1961: 2680	1962: 2352	1963: 1345	1964: 1603	1965: 2069
1966: 2742	1967: 2564	1968: 1489	1969: 1991	1970: 2664
1971: 2720	1972: 1944	1973: 2696	1974: 2435	1975: 2789
1976: 1096	1977: 2306	1978: 2475	1979: 1939	1980: 2301
1981: 2608	1982: 2378	1983: 2841	1984: 2187	1985: 2319
1986: 1746	1987: 2968	1988: 1887	1989: 1943	1990: 1939
1991: 2121	1992: 2041	1993: 1876	1994: 1952	1995: 2077
1996: 2240				

Tabel 2.6 Over tijdvakken van 1 jaar gemiddelde afvoeren (in m³/s) bij Lobith in de periode 1901 t/m 1996 (volgens Global Runoff Data Center (GRDC), Koblenz, 1999, zie Van Gelder, 2000).

1901 t/m 1910: 2222	1951 t/m 1960: 2287
1911 t/m 1920: 2510	1961 t/m 1970: 2150
1921 t/m 1930: 2101	1971 t/m 1980: 2270
1931 t/m 1940: 2221	1981 t/m 1990: 2282
1941 t/m 1950: 2008	1991 t/m 1996: 2051

Tabel 2.7 Over tijdvakken van 10 jaren gemiddelde afvoeren (in m^3/s) bij Lobith in de periode 1901 t/m 1996 (bepaald met de gegevens van Tabel 2.6).



Figuur 2.1 Over tijdvakken van 1 jaar (rechthoekjes) en 10 jaren (lijnen) gemiddelde afvoeren (in m^3/s) bij Lobith in de periode 1901 t/m 1996 (afgeleid van Tabel 2.6).

een periode van 10 jaren gemiddelde afvoeren (in m^3/s) bij Lobith zijn weergegeven in Tabel 2.7 (zie ook Figuur 2.1). Duidelijk is dat de gemiddelde afvoer gedurende de twintigste eeuw niet wezenlijk is veranderd. Over perioden van zo'n halve eeuw is deze zelfs behoorlijk constant gebleven, d.w.z. met afwijkingen t.o.v. de over de gehele periode van 96 jaar gemiddelde afvoer van $2217 \text{ m}^3/\text{s}$ van maximaal ongeveer $\pm 3\%$, zie Tabel 2.8. Ofschoon de piekafvoeren wel iets toegenomen zijn, bete-

<i>1901 t/m 1950:</i>	<i>2212</i>	<i>1931 t/m 1980:</i>	<i>2187</i>
<i>1911 t/m 1960:</i>	<i>2225</i>	<i>1941 t/m 1990:</i>	<i>2199</i>
<i>1921 t/m 1970:</i>	<i>2153</i>	<i>1951 t/m 1996:</i>	<i>2222</i>

Tabel 2.8 Over tijdvakken van 50 jaren gemiddelde afvoeren (in m³/s) bij Lobith in de periode 1901 t/m 1996 (bepaald met de gegevens van Tabel 2.6).

kent dit wel dat de bodemdaling niet teweeggebracht is door een toename van de rivierafvoeren. Immers de dominante afvoer maatgevend voor de zandvracht is ongeveer gelijk aan die afvoer die ongeveer 30 % van de tijd wordt overschreden.

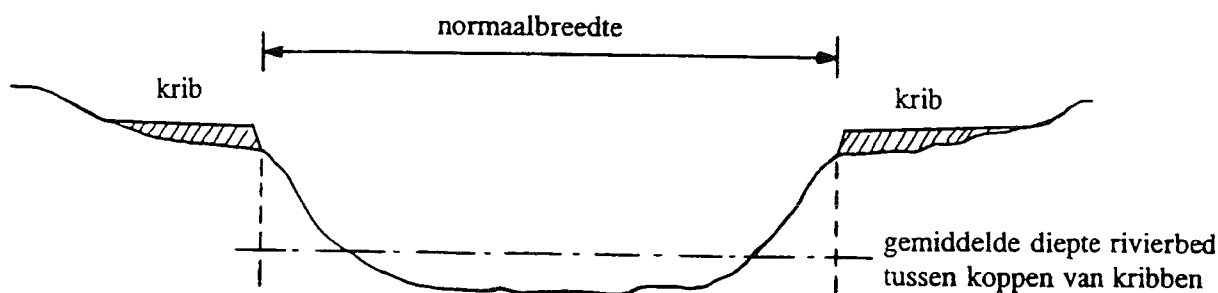
3 Bodemontwikkeling sinds circa 1930

3.1 Inleiding

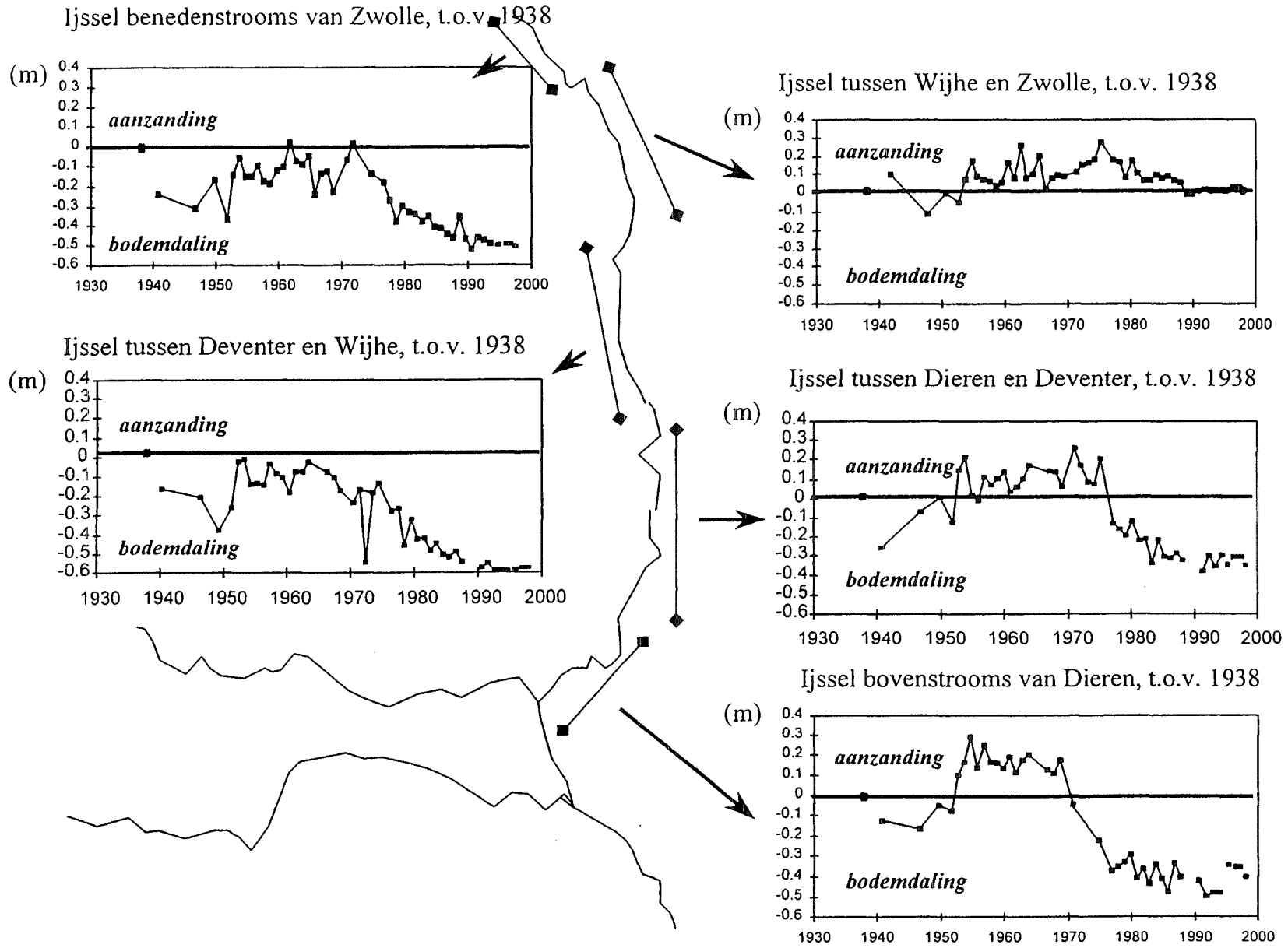
Jaarlijks worden door Rijkswaterstaat peilingen verricht van het zomerbed van de rivieren (t.o.v. NAP). Deze peilingen vinden plaats in dwarsdoorsneden, gelegen op onderlinge afstanden van 100 m (IJssel, Boven-Rijn) en 125 m (Lek, Neder-Rijn, Pannerdensch Kanaal, Waal), zie Tabel 3.1. In een dwarsdoorsnede worden deze peilingen continu gedaan; de getallen worden tegenwoordig om de 1 m opgeslagen. Uit deze jaarlijkse peilingen wordt de gemiddelde ligging van het zomerbed tussen de kribkoppen verkregen (zie Figuur 3.1). In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de ontwikkeling van het bed tussen de kribkoppen van het Pannerdensch Kanaal, het bovenstrooms gedeelte van de Waal, de Neder-Rijn en de Lek bovenstrooms van Hagestein sedert 1926, van de Lek benedenstrooms van Hagestein sinds 1933, van het middengedeelte van de Waal sedert 1934, van de IJssel sinds 1938 en van de Boven-Rijn en het benedenstroomse gedeelte van de Waal sedert 1950. Van de Boven-Rijn en een gedeelte van de Waal benedenstrooms van kmr 914 zijn de gegevens van voor 1950 niet meer beschikbaar; het rapport van Struijk (1994) bevat de gegevens van de Boven-Rijn en die van de Waal gemiddeld over de lengte van de rivier nog wel, en deze zijn voor dit onderzoek overgenomen.

Rijntak	Afstand raaien	Beschikbare data
IJssel	100 m	1938 - 1998
Neder-Rijn en Lek	125 m	1926 - 1998
Pannerdensch Kanaal	125 m	1926 - 1998
Waal	125 m	1926 - 1998
Boven-Rijn	100 m	1950 - 1998

Tabel 3.1 Beschikbare gegevens van de jaarlijkse bodempeilingen.



Figuur 3.1 Gemiddeld niveau van zomerbed tussen de koppen van de kribben.



Figuur 3.2 Ontwikkeling zomerbed van de IJssel in de periode 1938 - 1998 (Ten Brinke, 2000).

3.2 Ontwikkeling bed tussen kribkoppen van IJssel

Figuur 3.2 toont de ontwikkeling van de gemiddelde ligging van de bodem tussen de kribkoppen van de IJssel in de periode 1938 - 1998. De bodemvariaties zijn hier in deze periode relatief gering geweest, namelijk benedenstrooms van Zwolle (kmr 989 - kmr 1005) een bodemdaling van gemiddeld 0,5 m, tussen Wijhe en Zwolle (kmr 969 - kmr 989) een verwaarloosbare bodemontwikkeling, tussen Deventer en Wijhe (kmr 939 - 969) een bodemdaling van gemiddeld 0,6 m, tussen Dieren en Deventer (kmr 914 - kmr 939) een bodemdaling van gemiddeld 0,4 m en bovenstrooms van Dieren (kmr 878,5 - kmr 914) een bodemdaling van gemiddeld 0,4 m. Voor de gehele IJssel betekent dit een gemiddelde bodemdaling van ongeveer 0,4 m in de periode 1938 - 1990, terwijl er in de periode 1990 - 1998 geen sprake is van een significante hoogteverandering van het bed tussen de kribkoppen. Over

periode	kilometerraaien van de riviervakken van de IJssel					gemiddeld
	989-1005	969-989	939-969	914-939	878,5-914	878,5-1005
1938-1950	- 0,2 m	0,0 m	- 0,3 m	0,0 m	- 0,1 m	- 0,12 m
1950-1970	0,0 m	+ 0,1 m	+ 0,1 m	+ 0,1 m	+ 0,1 m	+ 0,09 m
1970-1990	- 0,3 m	- 0,1 m	- 0,4 m	- 0,5 m	- 0,4 m	- 0,36 m
1990-1998	0,0 m	0,0 m	0,0 m	0,0 m	0,0 m	0,0 m
1938-1990	- 0,5 m	0,0 m	- 0,6 m	- 0,4 m	- 0,4 m	- 0,39 m

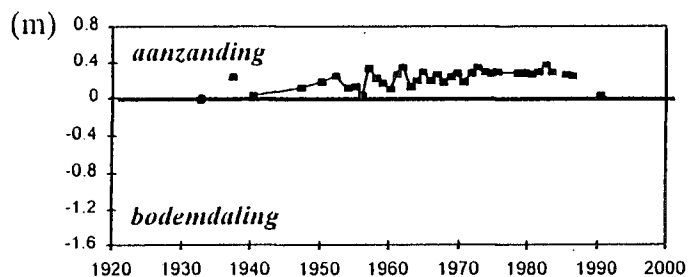
Tabel 3.2 Waargenomen ontwikkelingen van het bed tussen de kribkoppen van de IJssel benedenstrooms van Zwolle (kmr 989 - kmr 1005), tussen Wijhe en Zwolle (kmr 969 - kmr 989), tussen Deventer en Wijhe (kmr 939 - kmr 969), tussen Dieren en Deventer (kmr 914 - kmr 939) en tussen de IJsselkop en Dieren (kmr 878,5 - kmr 914) en van de gehele IJssel in verschillende perioden tussen 1938 en 1998; de tabel is afgeleid van Figuur 3.2.

de gehele periode 1938 - 1998 is een gemiddelde bodemdaling van 0,4 m waargenomen zowel benedenstrooms van Dieren als bovenstrooms van Dieren (waar bochten zijn afgedened). In Tabel 3.2 zijn deze gegevens uitgesplitst in de perioden 1938 - 1950, 1950 - 1970, 1970 - 1990 en 1990 - 1998.

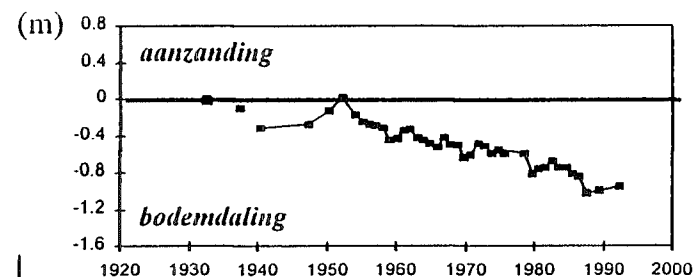
3.3 Ontwikkeling bed tussen kribkoppen van Lek en Neder-Rijn

In Figuur 3.3 is de ontwikkeling weergegeven van het gedeelte van het zomerbed tussen de kribkopen van de Neder-Rijn in de periode 1926 t/m 1993 en van de Lek in de periode 1933 t/m 1993. Een gemiddelde bodemdaling van 0,4 m tot 0,8 m vond hier plaats in de periode 1926 - 1940, met uitzon-

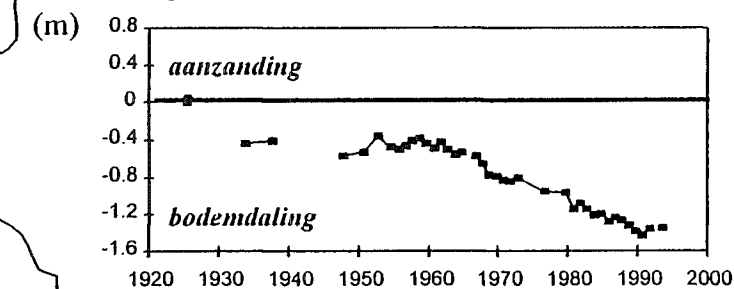
E Lek benedenstrooms van Nieuwpoort, t.o.v. 1933



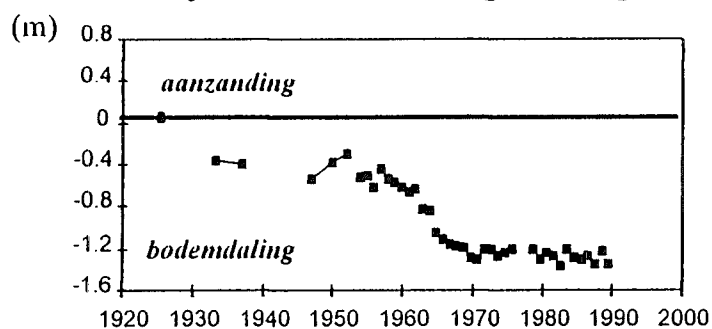
D Lek tussen Hagestein - Nieuwpoort, t.o.v. 1933



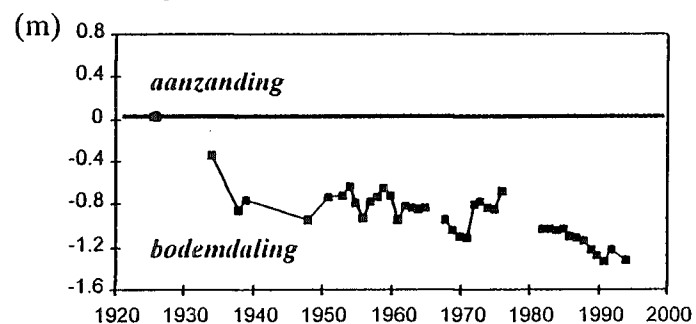
B Nederrijn tussen Driel en Amerongen, t.o.v. 1926



C Nederrijn-Lek tussen Amerongen en Hagestein, t.o.v. 1926



A Nederrijn bovenstrooms van Driel, t.o.v. 1926



Figuur 3.3 Ontwikkeling zomerbed van de Neder-Rijn in de periode 1926 - 1993 en van de Lek in de periode 1933 - 1993 (Ten Brinke, 2000).

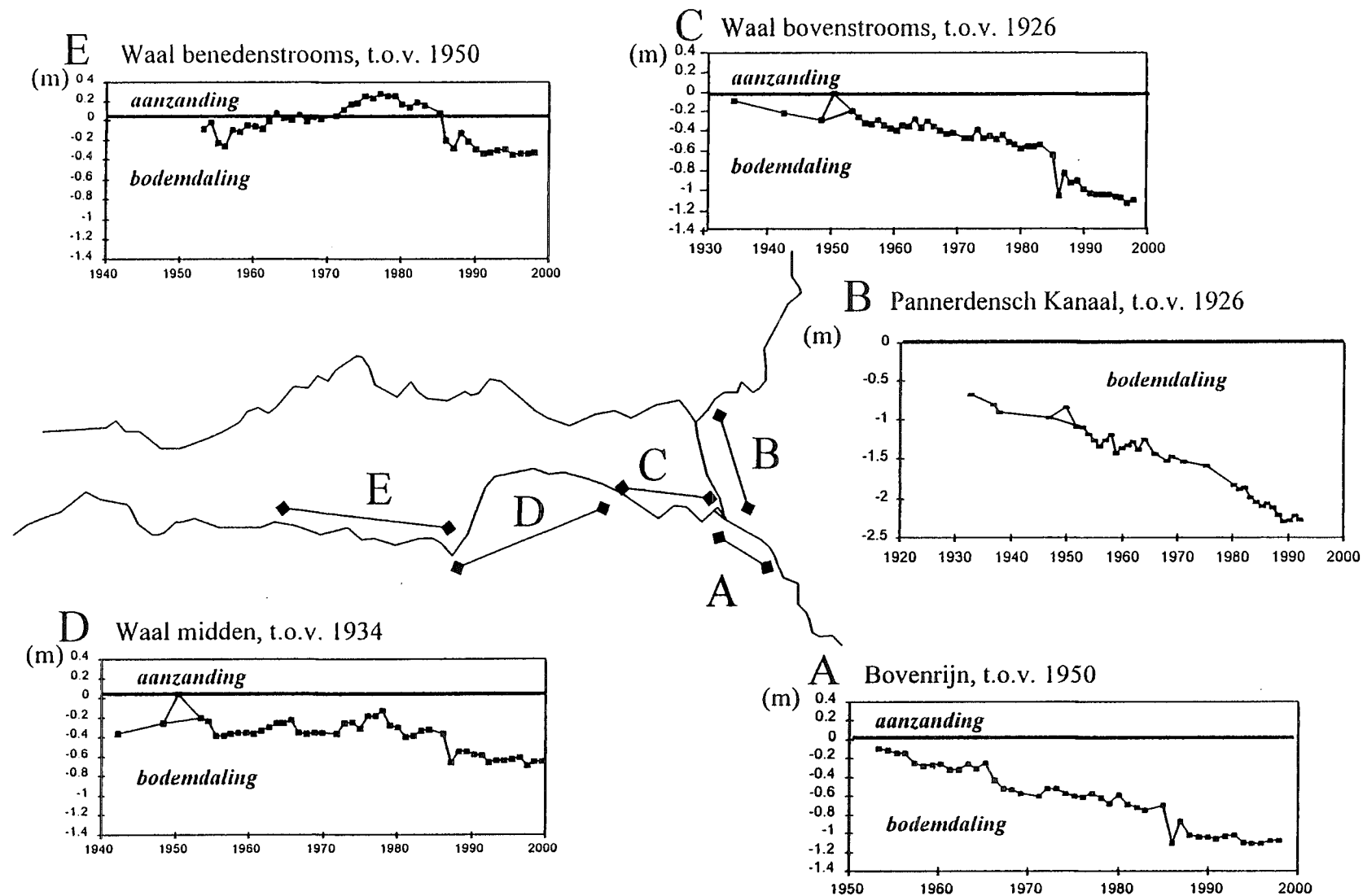
periode	kilometerraaien van riviervakken van Lek en Neder-Rijn					gemiddeld
	970-989	947-970	922-947	891-922	878,5-891	878,5-989
1926-1933			- 0,4 m	- 0,4 m	- 0,4 m	
1933-1950	+ 0,2 m	- 0,1 m	0,0 m	- 0,1 m	- 0,4 m	- 0,06 m
1950-1970	0,0 m	- 0,5 m	- 0,8 m	- 0,3 m	- 0,3 m	- 0,40 m
1970-1990	- 0,2 m	- 0,4 m	0,0 m	- 0,5 m	- 0,2 m	- 0,28 m
1990-1993		0,0 m		0,0 m	0,0 m	
1933-1990	0,0 m	- 1,0 m	- 0,8 m	- 0,9 m	- 0,9 m	- 0,74 m

Tabel 3.3 Waargenomen rijzingen en dalingen van het bed tussen de koppen van de kribben van de Lek en de Neder-Rijn tussen Nieuwpoort en Kinderdijk (kvr 970 - kvr 989), tussen Hagestein en Nieuwpoort (kvr 947 - kvr 970), tussen Amerongen en Hagestein (kvr 922 - kvr 947), tussen Driel en Amerongen (kvr 891 - kvr 922) en tussen de IJsselkop en Driel (kvr 878,5 - kvr 891) en gesommeerd over de vijf vakken in verschillende perioden tussen 1926 en 1993; de tabel is afgeleid van Figuur 3.3.

dering van het benedenstroomse traject van de Lek waar een geringe aanzanding plaatsvond. Tussen 1955 en 1990 is het bed tussen de kribkoppen van de Neder-Rijn en de Lek bovenstrooms van Hagestein nog met ongeveer 0,6 m gezakt. In de korte periode 1990 - 1993 is er geen sprake van een significante verandering van de gemiddelde ligging van het bed tussen de koppen van de kribben; deze trend heeft zich ook in de periode 1994 t/m 1998 voortgezet, volgens de na afloop van dit onderzoek beschikbaar gekomen data over deze periode (Ten Brinke, 2000). In Tabel 3.3 zijn deze gegevens uitgesplitst in de perioden 1926 - 1933, 1933 - 1950, 1950 - 1970, 1970 - 1990 en 1990 - 1993.

3.4 Ontwikkeling bed tussen kribkoppen van Waal, Pannerdensch Kanaal en Boven-Rijn

Figuur 3.4 toont de ontwikkeling van het gedeelte van het zomerbed tussen de koppen van de kribben van de Waal, het Pannerdensch Kanaal en de Boven-Rijn sinds 1950 (sommige trajecten sinds 1926 of 1934). Enige niet-realistische sprongen in de figuren zijn uitgesmeerd; het gaat hierbij om variaties in de gemiddelde bodemligging van zo'n 0,2 m in korte tijd die enige tijd later weer lijken te verdwijnen. Het is niet onwaarschijnlijk dat het hier gaat om fouten in de ijking. Eén van de correcties is de ligging van het bed van de Boven-Rijn tussen de kribkoppen in 1950, dat volgens de resultaten van de peilingen in dat jaar een abrupte stijging van ongeveer 0,2 m laat zien (zie de van Struijk, 1994, overgenomen Figuur 3.5). De in Figuur 3.4 weergegeven bodemdalingen zijn met deze correctie



Figuur 3.4 Ontwikkeling zomerbed van de Boven-Rijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal in de periode 1950 - 1998 (sommige riviervakken vanaf 1926 of 1934; figuur afkomstig van Ten Brinke, 2000).

periode	kilometerraaien van Waal, Pannerdensch Kanaal en Boven-Rijn					
	924-952	895-924	867,5-895	gehele Waal	867,5-878,5	857,5-867,5
1926-1934			- 0,1 m	- 0,15 m ¹⁾	- 0,7 m	
1934-1950		- 0,2 m	- 0,2 m	- 0,13 m ¹⁾	- 0,3 m	- 0,2 m ¹⁾
1950-1970	0,0 m	- 0,2 m	- 0,2 m	- 0,13 m	- 0,5 m	- 0,6 m
1970-1990	- 0,3 m	- 0,2 m	- 0,5 m	- 0,33 m	- 0,7 m	- 0,4 m
1990-1998	0,0 m	0,0 m	- 0,1 m	- 0,03 m	0,0 m	- 0,1 m
1950-1990	- 0,3 m	- 0,4 m	- 0,7 m	- 0,46 m	- 1,2 m	- 1,0 m

¹⁾ volgens Struijk's (1994) Figuur 3.5, met kleine correcties voor Boven-Rijn en Waal rond 1950

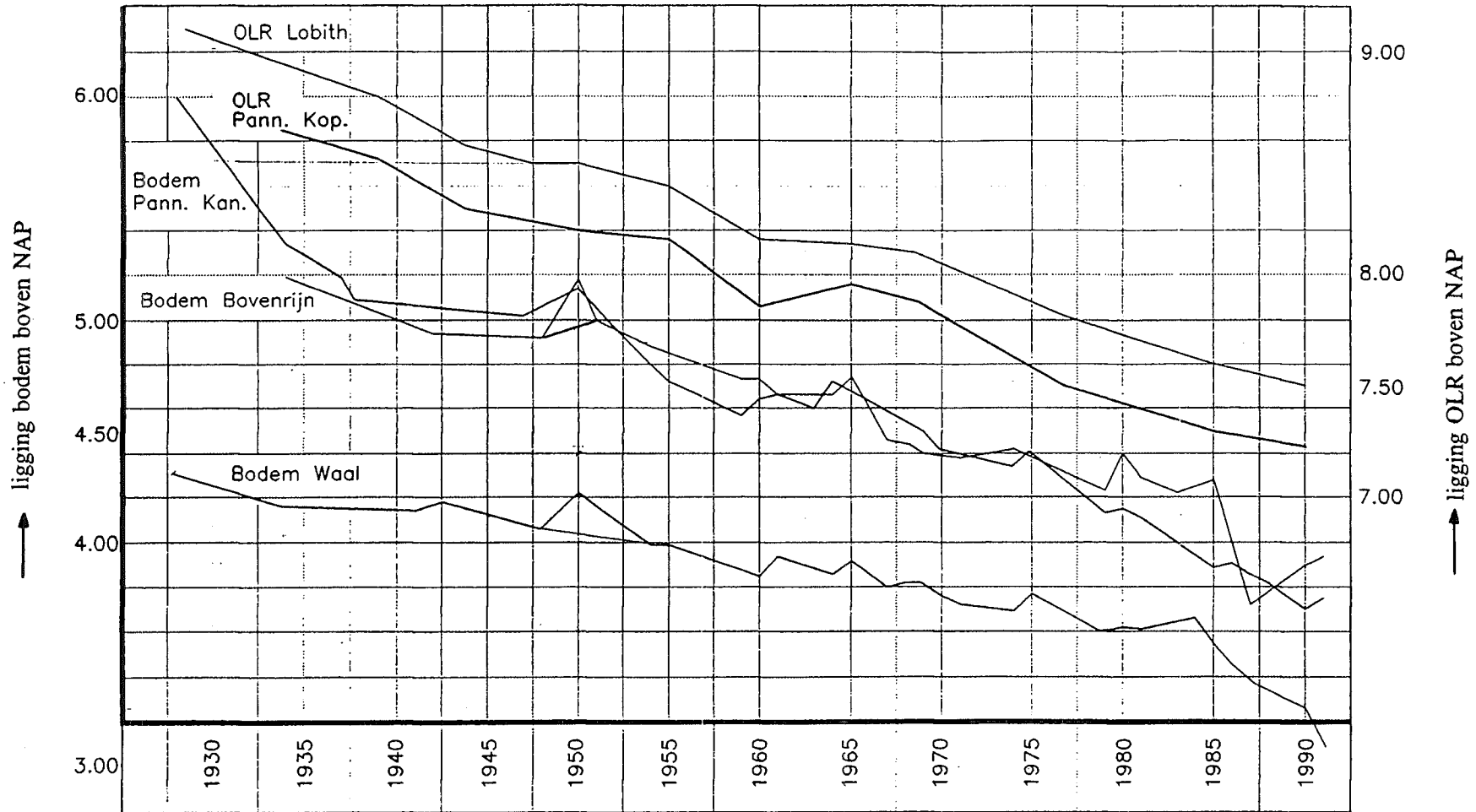
Tabel 3.4 Waargenomen dalingen van het bed tussen de kribkoppen van de Waal benedenstrooms (kmr 924 - kmr 952), Waal midden (kmr 895 - kmr 924), Waal bovenstrooms (kmr 867,5 - kmr 895), gehele Waal (kmr 867,5 - kmr 952), Pannerdensch Kanaal (kmr 867,5 - kmr 878,5) en Boven-Rijn (kmr 857,5 - kmr 867,5) in verschillende perioden tussen 1926 en 1998; de tabel is afgeleid van Figuren 3.4 en 3.5.

0,2 m minder dan volgens de oorspronkelijke gegevens; t.o.v. de situatie van 1930 is er uiteraard geen verschil.

Op het benedenstroomse traject van de Waal is een gemiddelde bodemdaling van ongeveer 0,6 m geweest in de periode 1980 - 1990 en op het middenstuk van ongeveer 0,4 m in de periode 1950 - 1990. Op het bovenstroomse traject van de Waal is deze groter geweest, namelijk ongeveer 0,7 m in de periode 1950 - 1990, dat is zo'n 1,8 cm per jaar.

De bodemdaling van het Pannerdensch Kanaal (kmr 867,5 - kmr 878,5) is gedurende de afgelopen decennia behoorlijk continu geweest; de rivierbodem tussen de kribkoppen daalde hier in de periode 1926 - 1990 in totaal met ongeveer 2,2 m, dat is gemiddeld 3,4 cm per jaar, en in de periode 1934 - 1990 in totaal met ongeveer 1,5 m, dat is gemiddeld 2,7 cm per jaar. In de korte periode 1990 - 1993 is er geen sprake van een significante verandering van de gemiddelde ligging van het bed tussen de koppen van de kribben; deze trend heeft zich ook in de periode 1994 t/m 1998 voortgezet, volgens de na afloop van dit onderzoek beschikbaar gekomen data over deze periode (Ten Brinke, 2000).

Figuur 3.4 toont ook een duidelijke, min of meer continue daling van het bed tussen de kribkoppen van de Boven-Rijn (kmr 857,5 - kmr 867,5) in de periode 1950 - 1990; het gaat hierbij om ongeveer

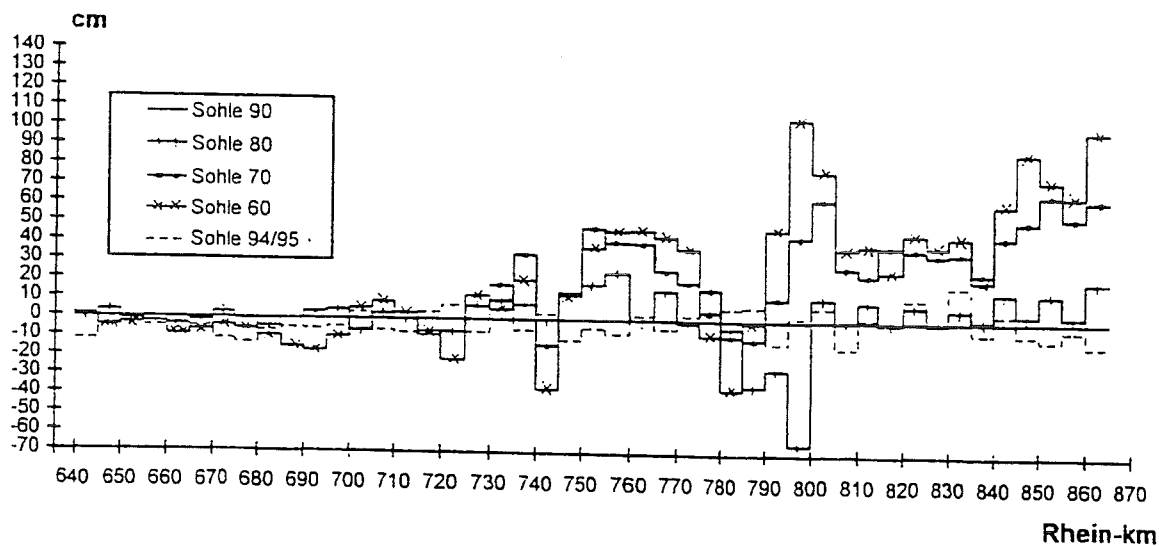


Figuur 3.5 Ontwikkeling bodem tussen de kribkoppen van Boven-Rijn sinds 1934 en van Pannerdensch Kanaal en Waal sinds 1927, OLR bij Lobith sinds 1928 en bij Pannerdensch Kop sinds 1934 (volgens Struijk, 1994).

1,0 m, dat is dus gemiddeld 2,5 cm per jaar.

In Tabel 3.4 zijn deze gegevens voor Waal, Pannerdensch Kanaal en Boven-Rijn uitgesplitst in de periodes 1926 - 1934, 1934 - 1950, 1950 - 1970, 1970 - 1990 en 1990 - 1998. De bodemdalingen van 0,15 m in de gehele Waal in de periode 1926 - 1934 en van 0,10 m in de gehele Waal en van 0,2 m in de Boven-Rijn in de periode 1934 - 1950 zijn overgenomen van Struijk (1994), waarbij de eerder beschreven correcties van 0,2 m zijn toegepast, zie Figuur 3.5.

Figuur 3.6 toont de ontwikkeling van het zomerbed van de Rhein tussen Königswinter (kvr 640) en Millingen a/d Rijn (kvr 865). De figuur toont een toenemende erosie vanaf Leverkusen (kvr 700) tot aan de Nederlandse grens. Nabij de Nederlandse grens zijn de gegevens in overeenstemming met de Nederlandse gegevens voor de Boven-Rijn.



Figuur 3.6 Ontwikkeling van het zomerbed van de Rhein tussen kvr 640 (Königswinter) en kvr 865 (Millingen a/d Rijn), zie Hansen (1999).

4 Verklaring bodemontwikkeling sinds circa 1930

4.1 Inleiding

De oorzaken van de in Hoofdstuk 3 beschreven bodemontwikkelingen moeten gezocht worden in de vele ingrepen die met name sinds 1850 in het Rijnsysteem zijn gepleegd. Wat betreft de bodemdalingen gaat het hierbij dan vooral om de normalisatie van de rivieren, de intensieve zand- en grindwinning (vanwege de zeer grote tijdschalen van een aantal Rijntakken, zie Paragraaf A.9 in Bijlage A, werd deze in eerste instantie vooral uitgevoerd om het effect van de normalisatie, namelijk een verdieping van het bed tussen de kribkoppen, te versnellen), bochtafsnijdingen en mogelijk de toegenomen scheepvaart en een verminderde sedimentaanvoer bij Lobith door ingrepen in de Niederrhein in Duitsland. In dit hoofdstuk zal getracht worden de geconstateerde ontwikkelingen van het zomerbed van de Rijntakken te verklaren aan de hand van de in Hoofdstuk 2 beschreven ingrepen. De beschrijving van de verklaring wordt per riviertak gedaan, waarbij i.v.m. de subkritische stroming benedenstrooms wordt begonnen. Voor elke Rijntak wordt allereerst de bodemdaling als gevolg van de zand- en grindwinning afgeschat, omdat deze op zichzelf relatief eenvoudig is te kwantificeren. Echter, als reeds in Paragraaf 2.3 beschreven, de nauwkeurigheid van de gegevens over gebaggerde hoeveelheden sediment is niet groot. Enerzijds is het mogelijk dat niet alle gewonnen hoeveelheden zand en grind zijn gerapporteerd, anderzijds is het niet duidelijk of afgegeven vergunningen wel volledig zijn benut. De hoeveelheid sediment betrokken bij bodemdalingen dat niet door baggerwerk kan worden verklaard wordt vervolgens vergeleken met de voor de betreffende Rijntak geschatte gemiddelde zandvracht (zie Tabel 4.1). Het idee hierachter is dat door ingrepen in het verleden de gemiddelde zandvracht (gemiddeld over perioden van zo'n 20 jaar) slechts in beperkte mate toegenomen zal zijn.

Rijntak	Zandvracht [m ³ /jaar], volgens Rijkswaterstaat (2000)	Zandvracht [m ³ /jaar], volgens Ten Brinke (2000)
Boven-Rijn	425.000	550.000
Waal	300.000	400.000
Pannerdensch Kanaal	125.000	150.000
Neder-Rijn en Lek	90.000	90.000
IJssel	35.000	60.000

Tabel 4.1 Geschatte zandvrachten Rijntakken (als bulktransport, dat is inclusief poriën) volgens Rijkswaterstaat (2000) en Ten Brinke (2000).

4.2 Oorzaken ontwikkeling zomerbed van IJssel

De derde en laatste fase van de normalisatie van de IJssel werd in 1928 voltooid. Om het beoogde effect van de normalisatie (namelijk een verdieping van het bed tussen de kribkoppen, zie Paragraaf A.2) te versnellen zijn in de direct daarop volgende jaren, evenals in de periode daarvoor (zie Tabel 2.5), relatief grote hoeveelheden zand en grind in de IJssel gewonnen. Volgens Struijk (1994) ging het in de periode 1928 t/m 1937 om 4.500.000 m³ baggerwerk. Dit houdt voor de 126,5 km lange en 100 m brede (tussen de kribkoppen) rivier een bodemdaling in van gemiddeld ongeveer 0,36 m gedurende 10 jaar (zo'n 3,6 cm per jaar). In 1938 en 1939 zijn volgens Struijk (1994) ongeveer 770.000 m³ sediment in het bed van de IJssel tussen de kribkoppen gewonnen. In de periode 1940 t/m 1949 is 1.410.000 m³ sediment gebaggerd (zie Tabel 2.5), dus in de periode 1938 t/m 1949 is in totaal ongeveer 2.200.000 m³ sediment gewonnen. Dit komt voor de IJssel overeen met een bodemdaling van gemiddeld ongeveer 0,17 m gedurende 12 jaar (zo'n 1,4 cm per jaar). Het gemiddelde (over de lengte van de IJssel) van de in de periode 1938 - 1950 waargenomen bodemdalingen is 0,12 m (zie Tabel 3.2), een verschil van slechts 0,05 m met de berekende 0,17 m als gevolg van baggerwerk (waarvoor dus mogelijk de vergunningen niet ten volle zijn benut).

In de periode 1950 t/m 1969 zijn ongeveer 810.000 m³ sediment in de IJssel gewonnen, verantwoordelijk voor een gemiddelde bodemdaling van ongeveer 0,06 m. Tabel 3.2 laat zien dat in de periode 1950 - 1970 gemiddeld over het gehele traject van de rivier geen netto bodemdaling is waargenomen, eerder een geringe rijzing van de bodem van ongeveer 0,09 m. Een groot deel van deze bruto aanzanding van ongeveer 0,15 m is teweeggebracht door afslag van de IJsseloevers, met name na 1960 (zie Verheij en Huyskens, 1993). Volgens Verheij en Huyskens kan op grond van historische gegevens voor de periode 1966 - 1972 een oeverafslag van 0,65 m/jaar berekend worden. Volgens dezelfde gegevens is in die periode ongeveer 56 % van de oevers geërodeerd. Een dergelijke afslag, vertaald naar de gehele IJssel, komt overeen met een toename van de zandvracht van 80.000 m³/jaar, of ook een sedimentatie van 0,63 cm/jaar over het gehele bed van de IJssel tussen de kribvakken, dat is 0,13 m per 20 jaar, niet veel verschillend van de waargenomen bruto aanzanding van ongeveer 0,15 m. Figuur 3.2 laat zien dat de oeverafslag rond 1950 is begonnen. Volgens Verheij en Huyskens (1993) is de afslag voornamelijk veroorzaakt door de scheepvaart: "uitgevoerde berekeningen maken duidelijk dat rivierstroming wel oeverafslag kan veroorzaken, maar alleen in extreme omstandigheden". Teneinde de oevererosie te stoppen, zijn in de periode 1965 - 1975 stap voor stap de oevers van de IJssel voorzien van een stenen verdediging.

In de periode 1970 t/m 1989 zijn officieel 80.000 m³ sediment in de IJssel gewonnen (zie Tabel 2.5: de totale winning minus eigen werk), verantwoordelijk voor een gemiddelde bodemdaling van slechts 0,006 m. Volgens Wolters (2000) zijn in de periode 1970 t/m 1989 nog eens 3.630.000 m³ sediment voor eigen werk gewonnen (zie Tabel 2.5), in totaal dus 3.710.000 m³ zand. Omdat dit sediment niet

uit de rivier werd gehaald maar in de oevers werd verwerkt en bij het herstellen van achterloopse kribben werd gebruikt, is deze ook niet als gewonnen zand gerapporteerd. Deze hoeveelheid komt overeen met een gemiddelde daling van het bed van de IJssel tussen de kribkoppen met 0,293 m, slechts 0,067 m³) minder dan de waargenomen daling van het bed van de IJssel tussen de kribkoppen van gemiddeld 0,36 m (zie Tabel 3.2), d.w.z. benedenstrooms van Dieren (kmr 914) met ongeveer 0,34 m, en met 0,4 m tussen de IJsselkop en Dieren (kmr 878,5 - kmr 914).

In totaal zijn dus in de periode 1938 t/m 1989 6.700.000 m³ sediment in de IJssel gewonnen, verantwoordelijk voor een gemiddelde daling van het bed tussen de kribkoppen van ongeveer 0,53 m. De in de periode 1938 t/m 1989 waargenomen daling van het zomerbed van de IJssel is gemiddeld 0,39 m, zo'n 0,14 m minder dan gebaggerd. Als hierboven beschreven is dit verschil geheel te verklaren door oeverafslag in de jaren 1950 - 1975.

De daling of rijzing van het bed van de IJssel tussen de kribkoppen in de periode 1990 - 1998 is zeer klein geweest (zie Figuur 3.2 en Tabel 3.2), feitelijk is er in deze korte periode nauwelijks nog sprake geweest van bodemdaling of -rijzing.

Samenvattend kan gesteld worden:

- de daling van het bed van de IJssel tussen de kribkoppen in de periode 1938 - 1990 bedraagt gemiddeld 0,4 m benedenstrooms van Dieren en gemiddeld ook 0,4 m bovenstrooms van Dieren, voor de gehele IJssel gemiddeld dus ook 0,4 m;
- de waargenomen daling van de rivierbodem van de IJssel tussen de kribkoppen van de kribben in de periode 1938 - 1990 kan volledig worden verklaard door baggerwerk;
- in de periode 1950 - 1970 is er sprake geweest van een geringe rijzing van het zomerbed, grotendeels veroorzaakt door oeverafslag als gevolg van de toegenomen scheepvaart;
- in de periode 1990 - 1998 is de daling of rijzing van het zomerbed van de IJssel nihil geweest.

In Paragraaf 5.2 zal aangetoond worden dat de bodemdalingen op de IJssel zoals deze tot nu toe zijn waargenomen na de laatste normalisatie ongeveer overeenkomen met de bodemdalingen welke met morfologische basiskennis worden voorspeld (als uiteindelijke effecten van de in de twintigste eeuw in de rivier gepleegde ingrepen).

³⁾ Dit kleine verschil kan het gevolg zijn van onvermijdelijke meeton nauwkeurigheden. Overigens komt dit geringe verschil van 0,067 m in 20 jaar tussen verdwenen en gebaggerd sediment voor het gehele bed van de IJssel tussen de kribkoppen overeen met zo'n 826.000 m³ sediment, dat is ongeveer 41.000 m³/jaar, globaal gelijk aan de geschatte zandvracht (zie Tabel 4.1).

4.3 Oorzaken ontwikkeling zomerbed van Lek en Neder-Rijn

De derde en laatste fase van de normalisatie van de Lek en de Neder-Rijn werd voltooid in 1934. Ook in deze Rijntakken werden, om het beoogde effect van de normalisatie te versnellen (verdieping van het bed tussen de kribkoppen), in de direct daarop volgende jaren, evenals in de periode daarvoor (zie Tabel 2.5), relatief grote hoeveelheden sediment gewonnen. De ontwikkeling van het bed tussen de normaallijnen van Neder-Rijn en Lek is bekend vanaf 1933 (zie Figuur 3.3). Volgens Struijk (1994) zijn in de jaren 1933 en 1934 ongeveer $1.130.000 \text{ m}^3$ sediment gebaggerd uit het zomerbed van de Lek, Neder-Rijn en het Pannerdensch Kanaal, in de periode 1935 t/m 1969 $6.290.000 \text{ m}^3$ (zie Tabel 2.5), en dus in de periode 1933 t/m 1969 in totaal ongeveer $7.420.000 \text{ m}^3$ sediment. Als wordt aangenomen dat dit sediment evenredig over het oppervlak van het bed tussen de normaallijnen is gewonnen (van de periode voor 1970 is de werkelijke verdeling niet bekend), dan is hiervan 90 % gebaggerd in de Lek en de Neder-Rijn (dat is $6.680.000 \text{ m}^3$ sediment, of zo'n $180.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$). Dit houdt voor de 110,5 km lange en 130 m brede (tussen de normaallijnen) rivier een bodemdaling in van gemiddeld 0,47 m gedurende 37 jaar (zo'n 1,3 cm per jaar), ongeveer gelijk aan de in de periode 1933 - 1970 waargenomen en over de lengte van de rivier gemiddelde bodemdaling (zie Tabel 3.3).

In de periode 1970 - 1990 is er tussen Amerongen en Hagestein geen daling of rijzing van het zomerbed geconstateerd, voor het overige traject van Lek en Neder-Rijn echter een daling van het bed tussen de koppen van de kribben van gemiddeld 0,36 m (0,28 m gemiddeld over de gehele lengte van Lek en Neder-Rijn, zie Tabel 3.3). Het gaat hierbij dus om ongeveer $4.000.000 \text{ m}^3$ zand en grind, dat is ongeveer $3.050.000 \text{ m}^3$ meer dan de in deze periode gewonnen hoeveelheid sediment van ongeveer 951.000 m^3 (zie Tabellen 2.3 en 2.5). Het verschil van $3.050.000 \text{ m}^3$ sediment in 20 jaar komt overeen met $152.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Dat is dus zo'n 1,7 keer de op $90.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ geschatte zandvracht (zie Tabel 4.1), wat zou duiden op een toename van het jaarlijkse sedimenttransport met 170 %. Een dergelijke toename van de jaarlijkse zandvracht is aanzienlijk groter dan verwacht na een normalisatie waarbij de breedte afneemt van 150 m tot 130 m. Volgens vergelijking (A.7) in Bijlage A.2 zou het sedimenttransport voor $n = 4$ met ongeveer 5 % toenemen, en voor $n = 5$ met zo'n 10 %. Andere tijdelijke effecten, zoals een verandering in de bodemwrijving of een relatief groot aantal hoge rivierafvoeren in de periode van 20 jaar, maken het mogelijk dat de over 20 jaar gemiddelde zandvracht in totaal met ruwweg enige tientallen procenten toeneemt, maar niet met 170 %. Mogelijke verklaringen voor dit 'verdwenen sediment' kunnen zijn:

- niet gerapporteerd baggerwerk en/of verdwijnen van het sediment in uiterwaarden of kribvakken;
- bij de aanleg van de drie stuwen in de Lek en de Neder-Rijn zijn de nieuwe riviervakken (met een totale lengte van ongeveer 8 km) 0,5 m tot 1,0 m lager aangelegd; gemiddeld dus 0,75 m, overeenkomend met een volume van ongeveer 800.000 m^3 ; echter omdat de stuw bij Hagestein reeds in 1958 en de stuw bij Amerongen in 1966 gereed zijn gekomen (de stuw bij Driel is in 1970 gereed gekomen), komt slechts ongeveer 300.000 m^3 van dit volume toe aan de periode 1970 - 1990;

- de kruising met het Amsterdam-Rijnkanaal heeft als zandvang gewerkt.

De daling of rijzing van het zomerbed van de Lek en de Neder-Rijn in de korte periode 1990 - 1993 is zeer klein geweest (zie Figuur 3.3); als reeds beschreven in Paragraaf 3.3, heeft deze trend zich ook in de periode 1994 t/m 1998 voortgezet. Overigens zijn in Lek en Neder-Rijn in de periode 1990 t/m 1999 nog 1.420.000 m³ zand (zie Tabel 2.5) gebaggerd. Deze hoeveelheid komt overeen met een gemiddelde bodemdaling van 0,10 m.

Samenvattend kan gesteld worden:

- de waargenomen daling van het bed van de Lek en de Neder-Rijn tussen de kribkoppen (gemiddeld ongeveer 0,46 m) in de periode 1933 - 1970 kan volledig worden verklaard door de zand- en grindwinning;
- de in de periode 1970 - 1990 waargenomen bodemdaling komt overeen met ongeveer 4.000.000 m³ sediment, dat is ongeveer 3.050.000 m³ meer dan wat aan zand en grind is gewonnen; deze laatste hoeveelheid komt overeen met 152.000 m³/jaar, dat is zo'n 1,7 keer de op 90.000 m³/jaar geschatte zandvracht, wat een toename van de zandvracht met 170 % zou inhouden of een iets kleinere toename gecombineerd met een afgenomen aanbod van sediment van bovenstreams; een dergelijke verandering van de over een periode van 20 jaar gemiddelde zandvracht is niet realistisch; niet gerapporteerd baggerwerk, transport van sediment naar uiterwaarden of kribvakken, het graven van het nieuwe riviervak 0,5 m tot 1,0 m lager bij de bouw van de stuw bij Driel en het functioneren van de kruising met het Amsterdam-Rijnkanaal als zandvang zijn mogelijke verklaringen voor het verdwenen sediment;
- de daling of rijzing van het zomerbed van de Lek en de Neder-Rijn in de periode na 1990 is zeer klein geweest.

In Paragraaf 5.3 zal aangetoond worden dat de bodemdalingen op de Lek en de Neder-Rijn die tot nu toe zijn waargenomen na de laatste normalisatie ongeveer overeenkomen met de uiteindelijk te verwachten bodemdalingen zoals deze met morfologische basiskennis worden voorspeld.

4.4 Oorzaken daling zomerbed van Pannerdensch Kanaal

In de periode 1970 t/m 1990 zijn volgens Tabel 2.3 ongeveer 289.000 m³ sediment gewonnen in het Pannerdensch Kanaal. Omdat het hierbij om baggerhoeveelheden gaat volgens vergunning is het niet duidelijk of in werkelijkheid ook 289.000 m³ sediment is gewonnen. Deze hoeveelheid komt voor de 11 km lange en 140 m brede (tussen de normaallijnen) rivier overeen met een bodemdaling van 0,19 m gedurende 20 jaar (1,0 cm per jaar). De over deze periode waargenomen gemiddelde bodemdaling bedraagt ongeveer 0,7 m. Dit betekent dat, indien de baggerhoeveelheden correct zijn, de daling van het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal tussen de normaallijnen in de periode 1970 t/m 1990 voor

ongeveer 27 % door de zandwinning is veroorzaakt.

De normalisatie van het Pannerdensch Kanaal werd voltooid in 1934. In de daarop volgende periode, d.w.z. in 1935 t/m 1969 zijn ongeveer 6.290.000 m³ gebaggerd in Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek (Struijk, 1994, zie ook Tabel 2.5). Indien de baggerhoeveelheden evenredig met de oppervlakte van het bed tussen de normaallijnen wordt verdeeld, dan zal van deze 6.290.000 m³ ongeveer 10%, dus ongeveer 629.000 m³ in het Pannerdensch Kanaal zijn gewonnen. Met de in de periode 1970 t/m 1989 gebaggerde 289.000 m³ sediment, is de geschatte totale hoeveelheid gewonnen sediment in de periode 1935 t/m 1989 dan ongeveer 918.000 m³. Dit baggerwerk komt overeen met een bodemdaling van 0,60 m (dat is 1,1 cm per jaar). Uit Figuur 3.4 (zie ook Tabel 3.4) volgt dat de gemiddelde bodemdaling in het Pannerdensch Kanaal tussen 1935 en 1990 ongeveer 1,5 m is geweest. Dit betekent dat de zand- en grindwinning voor ongeveer 40 % procent verantwoordelijk zou zijn geweest voor de daling van het bed tussen de kribkoppen van het Pannerdensch Kanaal⁴). Een bodemdaling van ongeveer 0,9 m in de periode 1935 - 1990 zou dus niet veroorzaakt zijn door de zand- en grindwinning. Dit is ongeveer 1,6 cm per jaar, of voor het gehele Pannerdensch Kanaal 24.600 m³/jaar, dat is respectievelijk 20 % en 16 % van de op 125.000 m³/jaar of 150.000 m³/jaar geschatte zandvracht (zie Tabel 4.1). Zo'n toename van de zandvracht, of een kleinere toename gecombineerd met een afgenomen aanbod van sediment van bovenstreams, zou heel goed kunnen zijn veroorzaakt door de in de rivier en benedenstroomse riviervakken gepleegde ingrepen als normalisatie (zie Figuur A.1) en bocht-afsnijding (zie Figuur A.2). Een toename van 24.600 m³/jaar is ook relatief klein t.o.v. het jaarlijkse sedimenttransport in de Neder-Rijn en de IJssel, en kan derhalve moeilijk gelokaliseerd worden in Figuren 3.2 en 3.3.

In de korte periode 1990 - 1993 is er geen sprake geweest van een significante verandering van de gemiddelde ligging van het bed tussen de koppen van de kribben (zie Figuur 3.4); als reeds beschreven in Paragraaf 3.4, heeft deze trend heeft zich ook in de periode 1994 t/m 1998 voortgezet.

Samenvattend kan gesteld worden:

- de sinds de voltooiing van de normalisatie waargenomen daling van het bed van het Pannerdensch Kanaal tussen de kribkoppen (gemiddeld ongeveer 1,5 m) in de periode 1935 - 1990 kan (ruw geschat) voor ongeveer 40 % worden verklaard door de zand- en grindwinning;
- het gedeelte van de bodemdaling dat niet aan de zandwinning kan worden toegewezen (ongeveer 0,9 m) komt overeen met een toename van de zandvracht in het Pannerdensch Kanaal met 24.600 m³/jaar (of een kleinere toename gecombineerd met een afname van de aanvoer van sediment bij de Pannerdensch Kop), ongeveer 18 % van de op 125.000 m³/jaar of 150.000 m³/jaar geschatte

⁴) onnauwkeurig door ruwe schatting hoeveelheid gewonnen zand in de periode 1935 t/m 1969.

zandvracht (zie Tabel 4.1);

- in de periode na 1990 is de gemiddelde ligging van het zomerbed van het Pannerdensch Kanaal niet significant veranderd.

In Paragraaf 5.4 zal aangetoond worden dat de bodemdalingen in het Pannerdensch Kanaal, zoals deze tot nu toe zijn waargenomen na de laatste normalisatie, ongeveer overeenkomen met de bodemdalingen welke met morfologische basiskennis worden voorspeld (als gesommeerde uiteindelijke effecten op het bed tussen de kribvakken van het Pannerdensch Kanaal als gevolg van de normalisatie van het Pannerdensch Kanaal zelf en van de normalisatie van de benedenstroomse Rijntakken).

4.5 Oorzaken ontwikkeling zomerbed van Waal

De voltooiing van de derde normalisatie van de Waal vond plaats in 1916. Ook in deze rivier werden, om het beoogde effect van de normalisatie te versnellen (verdieping van het bed tussen de normaallijnen), in de direct daarop volgende jaren, evenals in de periode daarvoor (zie Tabel 2.4), relatief grote hoeveelheden sediment gewonnen. In de periode 1916 t/m 1933 ging het hierbij om 11.100.000 m³ sediment (zie Struijk, 1994). Deze hoeveelheid sediment komt voor de 84,5 km lange en 260 m brede Waal overeen met een bodemdaling van 0,51 m. In de periode 1934 t/m 1949 werden 4.120.000 m³ sediment uit de Waal gebaggerd (zie Struijk, 1994 en Tabel 2.4), overeenkomend met een bodemdaling van 0,19 m. Tabel 3.4 laat zien dat dit ongeveer gelijk is aan de waargenomen bodemdaling. In de periode 1950 t/m 1969 werden volgens De Boer en Swanenberg (1989) 1.810.000 m³ sediment in de Waal gewonnen, overeenkomend met een bodemdaling van 0,08 m. Deze daling is 0,05 m minder dan de over de gehele Waal gemiddeld waargenomen bodemdaling, zie Tabel 3.4. In de periode 1970 t/m 1989 werden volgens De Boer en Swanenberg (1989) 6.280.000 m³ sediment uit de Waal gebaggerd (zie Tabel 2.4), overeenkomend met een bodemdaling van 0,29 m. Tabel 3.4 laat zien dat de in deze periode over de Waal gemiddelde daling van het bed tussen de kribkoppen gelijk is aan 0,33 m, dus slechts iets groter dan op grond van de baggergegevens valt te verklaren.

In de periode 1934 t/m 1989 is dus gemiddeld zo'n 0,56 m dikke laag sediment uit de gehele Waal gebaggerd; de over deze periode waargenomen gemiddelde bodemdaling is 0,59 m (zie Tabel 3.4), een zeer klein verschil van 0,03 m (dat is 0,5 mm/jaar). Dit zeer kleine verschil vertegenwoordigt overigens wel in totaal zo'n 660.000 m³ sediment, of ook een (toename van de) zandvracht van ongeveer 12.000 m³/jaar. Een toename van het jaarlijkse sedimenttransport met 12.000 m³/jaar is ongeveer 4 % en 3 % van de respectievelijk op 300.000 m³/jaar en 400.000 m³/jaar geschatte zandvracht (zie Tabel 4.1). Een dergelijk toename van de zandvracht, of een nog iets kleinere toename gecombineerd met een afgenomen aanbod van sediment van bovenstrooms, zou heel goed het gevolg kunnen zijn van de normalisatie, zie vergelijking (A.7) en Figuur (A.1) in Bijlage A.2. Overigens kan de gehele 660.000 m³ sediment, of een groot deel ervan, ook heel goed in de kribvakken en de uiterwaarden

terecht zijn gekomen.

Aan het begin van deze paragraaf is voor de periode 1916 t/m 1934 een voor de gehele Waal gemiddelde bodemdaling geschat van 0,51 m. Dus de bodemdaling sinds de voltooiing van de normalisatie in 1916 tot aan 1990 kan worden geschat op $0,51 \text{ m} + 0,13 \text{ m} + 0,13 \text{ m} + 0,33 \text{ m} = 1,1 \text{ m}$. Figuur 3.4 en Tabel 3.4 laten zien dat in de periode 1990 t/m 1998 de daling van het bed van de Waal tussen de kribkoppen zeer klein is geweest.

Samenvattend kan gesteld worden:

- de waargenomen daling van het bed van de Waal tussen de kribkoppen in de periode 1934 - 1970 kan vrijwel volledig worden verklaard door baggerwerk, als wordt aangenomen dat de baggergegevens een realistische schatting zijn van de daadwerkelijk gewonnen hoeveelheden zand en grind; ook de geconstateerde daling in de periode 1970 - 1990 kan bijna geheel worden verklaard door de zand- en grindwinning;
- van de in de periode 1934 - 1990 waargenomen bodemdaling van gemiddeld 0,59 m kan 0,56 m worden verklaard door baggerwerk; het restant vertegenwoordigt zo'n 660.000 m^3 sediment, overeenkomend met een toename van de jaarlijkse zandvracht met $12.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (of een nog iets kleinere toename gecombineerd met een afname van de aanvoer van sediment bij de Pannerdensch Kop), dat is slechts 4 % en 3 % van de respectievelijk op $300.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en $400.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ geschatte zandvracht; een dergelijke toename van de zandvracht zou het gevolg van de normalisatie kunnen zijn; een gedeelte van het sediment zou ook in de kribvakken of de uiterwaarden terecht gekomen kunnen zijn;
- de daling van het bed van de Waal tussen de kribkoppen in de periode 1990 t/m 1998 is zeer klein geweest.

In Paragraaf 5.5 zal aangetoond worden dat de bodemdalingen op de Waal zoals deze tot nu toe zijn waargenomen na de laatste normalisatie ongeveer overeenkomen met de bodemdalingen zoals deze met morfologische basiskennis worden voorspeld.

4.6 Oorzaken daling zomerbed van Boven-Rijn

In de periode 1965 t/m 1989 zijn volgens Tabel 2.3 ongeveer 414.000 m^3 sediment gewonnen in de Boven-Rijn, dat is zo'n 16.600 m^3 per jaar. Dit houdt gemiddeld voor de 10 km lange en 340 m brede (tussen de normaallijnen) rivier een bodemdaling in van 0,12 m in 25 jaar (0,5 cm per jaar). De over deze periode waargenomen gemiddelde bodemdaling bedraagt ongeveer 0,7 m (2,8 cm/jaar), zie Figuur 3.4. Dus de daling van het zomerbed van de Boven-Rijn tussen de normaallijnen kan voor ongeveer 17 % aan de zand- en grindwinning worden toegewezen. Ongeveer 83 % van de bodemdaling kan niet worden verklaard door baggerwerk, maar het betreffende sediment is door de rivier afge-

voerd of in de uiterwaarden of de kribvakken terecht gekomen. Indien de rivier dit sediment heeft afgevoerd, dan komt dit overeen met een toename van het sedimenttransport door de Boven-Rijn met 79.000 m³/jaar, ongeveer 18 % en 14 % van de respectievelijk op 425.000 m³/jaar en 550.000 m³/jaar geschatte zandvracht (zie Tabel 4.1). Deze bijdrage aan het sedimenttransport door erosie van het rivierbed zou veroorzaakt kunnen zijn door de eind negentiende eeuw voltooide normalisatie van de Boven-Rijn zelf, zie vergelijking (A.7) in Bijlage A.2, door normalisatie en bochtafsnijding van benedenstroomse riviervakken, en daarnaast ook het gevolg kunnen zijn van een afgenomen sedimentaanvoer vanuit Duitsland (zie Paragraaf 2.11).

In de periode 1990 t/m 1993 zijn volgens Tabel 2.3 nog ongeveer 93.000 m³ sediment gewonnen in de Boven-Rijn, dat is zo'n 23.300 m³ per jaar. De daling van het bed van de Boven-Rijn tussen de kribkoppen die hieraan toegewezen kan worden bedraagt 2,7 cm (0,7 cm per jaar). De sinds 1990 waargenomen gemiddelde daling van het bed tussen de normaallijnen bedraagt ook ongeveer 3 cm, zie Figuur 3.4.

De normalisatie van de Boven-Rijn werd reeds in de tweede fase van de normalisatie (1870 - 1890) voltooid, zie Tabel 2.1. "Bij de stroombevaring van 1908 werd geen nadere normalisatie van de Boven-Rijn noodzakelijk gevonden" (Ploeger, 1992), wel die van de andere Rijntakken. Figuur 3.5 (met de in Paragraaf 3.4 beschreven correctie) laat zien dat het bed van de Boven-Rijn tussen de kribkoppen in de periode 1934 - 1965 vrij continu is gedaald, d.w.z. in de periode 1934 - 1950 met ongeveer 0,2 m (zo'n 1,2 cm/jaar), en in de periode 1950 - 1965 met ongeveer 0,3 m (zo'n 2,0 cm/jaar, zie ook Figuur 3.4). De bodemdaling van 0,6 m in de periode 1965 t/m 1989 (2,4 cm/jaar) die niet kan worden verklaard door baggerwerk is dus feitelijk een voortgang van de in gang zijnde daling.

Samenvattend kan gesteld worden:

- van de waargenomen daling van het bed van de Boven-Rijn tussen de kribkoppen (ongeveer 0,7 m) in de periode 1965 t/m 1989 kan ongeveer 17 % worden verklaard door baggerwerk;
- het gedeelte van de bodemdaling dat niet kan worden verklaard door de zand- en grindwinning (ongeveer 0,6 m in de periode 1965 - 1990) komt overeen met een verandering in het sedimenttransport door de Boven-Rijn van zo'n 79.000 m³/jaar, ongeveer 18 % en 14 % van de respectievelijk op 425.000 m³/jaar en 550.000 m³/jaar geschatte zandvracht komend van de Rhein; naast een verminderd aanbod van bovenstrooms zou een dergelijke toename van de zandvracht teweeggebracht kunnen zijn door de normalisatie;
- de daling van het bed tussen de kribkoppen in de periode 1990 - 1998 is ongeveer 3 cm geweest, voornamelijk teweeggebracht door baggerwerk: het tempo van de bodemdaling lijkt gestopt of in ieder geval sterk afgenomen te zijn.

In Paragraaf 5.6 zal aangetoond worden dat de bodemdalingen in de Boven-Rijn zoals deze zijn waar-

genomen in de periode 1934 - 1990 ongeveer overeenkomen met de bodemdalingen zoals deze met morfologische basiskennis worden voorspeld (als gesommeerde uiteindelijke effecten van de normalisatie van de Boven-Rijn zelf en van de normalisatie van de benedenstroomse Rijntakken op het bed tussen de kribvakken van de Boven-Rijn); het ontbreken van voldoende gegevens over de periode 1890 - 1933 (met name de periode 1890 - 1911) brengt enige onzekerheid in de constatering dat deze bodemdaling direct het gevolg is van de normalisatie van de Boven-Rijn zelf en van de benedenstroomse Rijntakken.

4.7 Discussie

In dit hoofdstuk is geconstateerd dat, als wordt aangenomen dat de baggergegevens een realistische schatting zijn van de daadwerkelijk gewonnen hoeveelheden zand en grind, in de periode direct na de normalisatie tot 1970 de dalingen van de rivierbodembodem tussen de kribkoppen van de IJssel, Lek en Neder-Rijn volledig en van de Waal vrijwel volledig kunnen worden toegeschreven aan baggerwerk. Met dit baggerwerk werd beoogd het effect van de normalisatie versneld te bereiken. De in de periode 1970 - 1990 waargenomen bodemdaling in de IJssel is ook volledig te wijten aan baggerwerk. Voor de Lek en Neder-Rijn kan ongeveer 25% van de in deze periode geconstateerde bodemdaling toegeschreven worden aan (gerapporteerd) baggerwerk; naast een toename van de zandvracht, zijn niet-gerapporteerd baggerwerk, transport van sediment naar uiterwaarden of kribvakken, het graven van het nieuwe riviervak 0,5 m tot 1,0 m lager bij de bouw van de stuw bij Driel en het functioneren van de kruising met het Amsterdam-Rijnkanaal als zandvang zijn mogelijke verklaringen voor de overige 75% van de waargenomen dalingen van het bed tussen de kribkoppen. De hoeveelheden sediment welke bij de bodemdalingen betrokken waren, zijn in ieder geval zodanig groot dat deze niet alleen door de zandvracht meegenomen kunnen zijn. De in de periode 1970 - 1990 waargenomen bodemdaling in de Waal kan ook vrijwel volledig verklaard worden door baggerwerk. De relatief sterke dalingen van het bed tussen de koppen van de kribben van Pannerdensch Kanaal en Boven-Rijn kunnen voor minder dan 30% toegeschreven worden aan baggerwerk; hier zijn de bodemdalingen waarschijnlijk tweegebracht door ingrepen in de benedenstroomse Rijntakken (normalisatie, bochtafsnijdingen) en de normalisatie van de rivier zelf (als gevolg waarvan de zandvracht tijdelijk toenam). Na 1990 lijken de bodemdalingen overal sterk afgenomen te zijn.

De voltooiing van de kanalisatie van de Lek en de Neder-Rijn in 1970 heeft met de bochtafsnijdingen in de IJssel bij Doesburg (gereed in 1954) en bij Rheden/De Steeg (gereed in 1969) geleid tot grotere afvoeren van de IJssel bij lage Boven-Rijnafvoeren, ten koste van de afvoer van de Neder-Rijn en de Lek; volgens Struijk (1994) zijn de IJsselafvoeren bij Boven-Rijnafvoeren van 984 m³/s en 2000 m³/s met ongeveer 25% toegenomen. De rivierafvoeren van de IJssel bij relatief hoge Boven-Rijnafvoeren zijn door de normalisatie niet wezenlijk veranderd; Struijk (1994) toont dat aan voor 6000 m³/s en 8000 m³/s. Het transport van sediment wordt niet zozeer bepaald door de zeer hoge afvoeren die wei-

nig voorkomen, maar door de dominante afvoeren (die iets groter zijn dan de gemiddelde afvoer, ongeveer de afvoer die 70 % van de tijd onderschreden wordt, bij Lobith ongeveer gelijk aan 2800 m³/s). Door het toenemen van de lagere afvoeren na het in gebruik nemen van de stuw bij Driel zal ook de dominante afvoer van de IJssel wel enigszins toegenomen zijn, als gevolg waarvan ook de zandvracht van de IJssel en mogelijk ook de aanvoer van sediment naar de IJssel bij de IJsselkop zal zijn toegenomen. In Bijlage A.6 wordt aangetoond dat dit uiteindelijk tot daling van het bed tussen de normaallijnen zal leiden. Voor de Lek en Neder-Rijn geldt dan het tegenovergestelde: door de afgenomen afvoeren via deze rivier zal hier sedimentatie kunnen optreden. In Hoofdstuk 5 wordt hierop nog teruggekomen.

De twee bochtafsnijdingen in de IJssel bij Doesburg en Rheden/De Steeg hebben een proces van terugschrijdende erosie teweeggebracht. Volgens Rijkswaterstaat (1985) heeft "vooral die bij Rheden/De Steeg een daling van de bodem van de bovenloop van de IJssel bewerkstelligd". De voortplantingssnelheid van deze terugschrijdende erosie wordt geschat op 1,5 km/jaar. De afstand van Doesburg naar de IJsselkop is ongeveer 17,5 km; dus het effect van deze bochtafsnijding heeft in ongeveer 12 jaar de IJsselkop bereikt, dus ongeveer in 1966. Voor de bochtafsnijding bij Rheden/De Steeg kan aldus berekend worden dat ongeveer in 1976 het effect van deze bochtafsnijding was doorgedrongen tot de IJsselkop. Dit laatste wordt min of meer bevestigd door Figuur 3.2.

Van de in de Paragrafen 2.2 t/m 2.11 beschreven ingrepen lijken dus de volgende ingrepen effect gehad te hebben en mogelijk (zie Hoofdstuk 5) ook nog te hebben op de ontwikkeling van het bed tussen de kribkoppen van de Rijntakken: de riviernormalisatie, de zand- en grindwinning vanuit het zomerbed, het aanbrengen van oeververdedigingen (via de hiervoor uitgevoerde zand- en grindwinning), de kanalisatie van de Lek en de Neder-Rijn en de bochtafsnijdingen in de IJssel bij Doesburg en Rheden/De Steeg. Opgehoogde en bebouwde uiterwaarden hebben mogelijk plaatselijk de stroming in het zomerbed versterkt en tot enige bodemdaling geleid.

Waarschijnlijk zullen ook de vele werken aan de IJsselmonden en de afsluiting van de Zuiderzee met de Afsluitdijk effect hebben gehad en mogelijk nog hebben op de ontwikkeling van het bed van de benedenloop van de IJssel. Hetzelfde geldt voor de afsluitingen van het Haringvliet en het Volkerak op de benedenlopen van de Lek en de Waal. Het gaat hier dan met name om effecten op de aanzanding in de benedenlopen van deze Rijntakken, voor het probleem van de onderhavige studie van de daling van het rivierbed van minder belang.

Het effect van de toename van de scheepvaart (toename zandvracht door meer turbulentie in het water) is zeer moeilijk aan te tonen; de intensieve zand- en grindwinning alsmede effecten van ingrepen als de normalisatie zijn daarvoor te dominant geweest. Hetzelfde geldt eigenlijk ook voor het effect van ingrepen in de Rhein (afname aanvoer van zand, met bodemdalingen als gevolg) en voor het effect van de aangebrachte vaste lagen.

5 Waarschijnlijke bodemontwikkeling in de nabije toekomst

5.1 Inleiding

In Hoofdstuk 4 zijn relaties gelegd tussen de in Hoofdstuk 3 beschreven bodemontwikkelingen en enkele ingrepen die in het verleden in het Rijnsysteem hebben plaatsgevonden. Met name de intensieve zand- en grindwinning, de normalisatie van de rivieren en bochtafsnijdingen hebben op een aantal riviertrajecten tot aanzienlijke bodemdalingen geleid.

De tijdschaal van morfologische processen in rivieren met een lengte van 10 km tot 130 km is groot (10 tot 100 jaar) tot zeer groot (orde 1000 jaar), zie Bijlage A.9. Dit betekent dat het effect van een aantal ingrepen mogelijk nog niet is uitgewerkt en dat een min of meer nieuwe evenwichtssituatie nog niet is bereikt. Echter, door deze grote tijdschaal heeft men in het verleden om het effect van de normalisatie te bespoedigen, grote hoeveelheden sediment in de Rijntakken gewonnen. Dus het zou ook heel goed mogelijk kunnen zijn dat er geen grote dalingen en rijzingen van de rivierbodem meer zijn te verwachten.

In dit hoofdstuk zal getracht worden een voorspelling te geven van de toekomstige ontwikkelingen van het bed tussen de kribkoppen van de Rijntakken. Deze voorspelling wordt gedaan door met riviermorfologische basistheorieën de uiteindelijke effecten af te schatten van ingrepen in de Rijntakken (zoals de voltooiing van de normalisatie, bochtafsnijdingen, kanalisatie, etc.) op de ligging van het rivierbed tussen de kribkoppen. De theorie voor het effect van een rivierversmalling (normalisatie) geldt formeel voor rivieren met constante afvoeren, en voor rivieren met variabele afvoeren indien de rivier relatief lang is t.o.v. de aanpassingslengte van de stroming (zie Bijlage A.2), in geval van de Rijntakken voor de rivieren met een lengte van meer dan ongeveer honderd kilometer. Het is niet bekend wat de afwijkingen zijn indien niet aan deze voorwaarden wordt voldaan. Omdat het om relatief kleine versmallingen gaat, zullen deze mogelijk klein zijn. Er wordt verder aangenomen dat de diameter van het bodemmateriaal op een bepaalde plaats in de tijd niet verandert.

5.2 Toekomstige ontwikkeling zomerbed van IJssel

In Paragraaf 4.2 is beschreven dat in de periode 1928 t/m 1937 direct na de voltooiing van de normalisatie 4.500.000 m³ sediment in de IJssel is gewonnen; dit komt voor de 126,5 km lange en 100 m brede IJssel overeen met een gemiddelde bodemdaling van 0,36 m. In de periode 1938 - 1998 is een gemiddelde bodemdaling van 0,4 m waargenomen zowel benedenstrooms als bovenstrooms van Dieren (zie Paragraaf 3.2). De geschatte daling van het bed tussen de koppen van de kribben sinds de voltooiing van de normalisatie in 1928 is dus ongeveer 0,8 m, zowel benedenstrooms als bovenstrooms van Dieren. De vraag is nu of hiermee de uiteindelijk te verwachten ontwikkeling van de rivierbodem van de IJssel na de gedane ingrepen als de normalisatie, de bochtafsnijdingen en de kana-

	waterdiepten IJssel op verschillende lokaties en gemiddeld over deze lokaties								
afvoer	IJssel- kop	Does- burg	Zut- phen	De- venter	Olst	Wijhe	Kater- veer	Kam- pen	gemid- deld
Q 50%	4,1 m	4,5 m	4,4 m	5,0 m	4,4 m	4,7 m	3,7 m	4,4 m	4,4 m
Q 10%	5,9 m	6,5 m	6,4 m	6,9 m	6,2 m	6,2 m	4,8 m	6,2 m	6,0 m

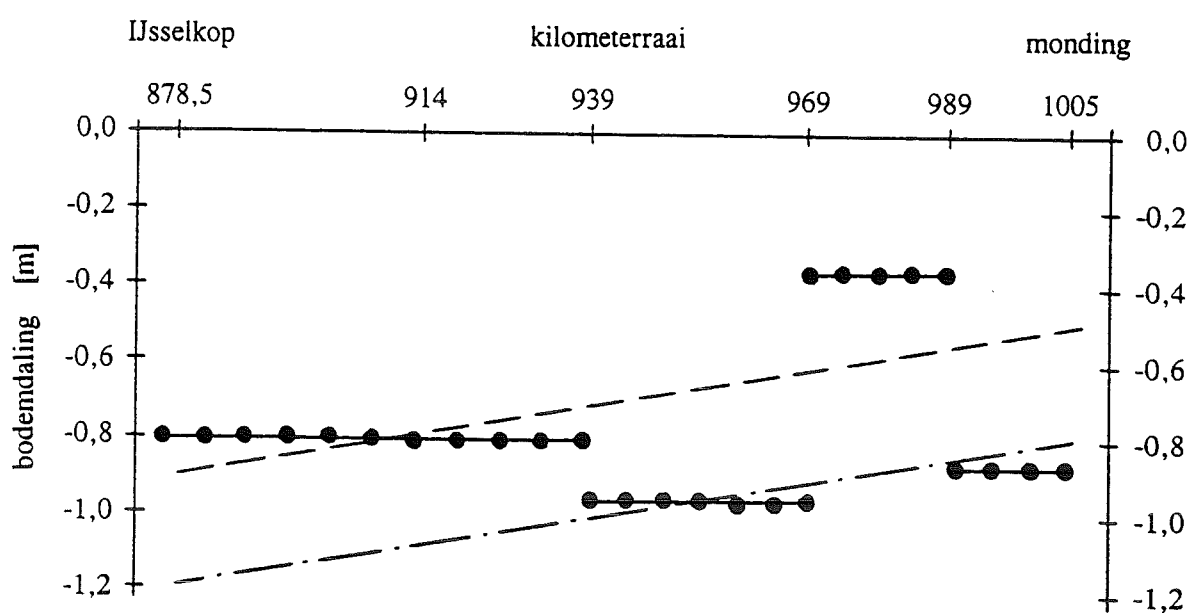
Tabel 5.1 Huidige waterdiepten IJssel bij rivierafvoeren die 50% en 10% van de tijd overschreden worden (Rijkswaterstaat, 2000).

lisatie van Lek en Neder-Rijn is bereikt.

Gedurende de derde fase van de normalisatie van de IJssel werd de normaalbreedte teruggebracht van gemiddeld 115 m (dit is een ruwe schatting) tot gemiddeld 100 m. Overigens varieert de huidige normaalbreedte van de IJssel van 80 m bij de IJsselkop, 90 m bij Rheden, Dieren en Doesburg, 100 m bij Zutphen en Deventer, 110 m bij Olst en Wijhe, 120 m bij Hattem, 130 m bij Zwolle tot 150 m bij Kampen. De meeste kribben in de IJssel zijn relatief kort, op sommige plaatsen ontbreken ze.

Volgens vergelijkingen (A.11) en (A.12) in Bijlage A.2 met $n = 4$ heeft een dergelijke reductie van de breedte uiteindelijk tot gevolg dat de waterdiepte met een factor 1,11 toeneemt en het verhang met een factor 0,97 afneemt. Indien verondersteld wordt dat het uiteindelijke effect van de normalisatie reeds is bereikt, dan is de waterdiepte d_1 in vergelijking (A.11) de huidige waterdiepte. De verdieping als gevolg van de normalisatie volgt dan uit (A.11) als $\Delta z_b = d_0 - d_1$. Uitgaande van een over de lengte van de rivier gemiddelde (huidige) waterdiepte d_1 van ongeveer 5,2 m bij dominante afvoer betekent dit een toenmalige waterdiepte $d_0 \approx 4,7$ m en dus een vergroting van de waterdiepte met ongeveer 0,5 m (er wordt aangenomen dat de waterdiepte d_1 bij dominante afvoer ongeveer gelijk is aan het gemiddelde van de beide waterdiepten welke optreden bij rivierafvoeren die respectievelijk 10% en 50% van de tijd worden overschreden, zie Tabel 5.1).

Het huidige, over het riviertraject van de IJsselkop tot Wijhe gemiddelde bodemverhang van de IJssel is ongeveer $1,0 \cdot 10^{-4}$ (zie Rijkswaterstaat, 2000). Indien weer verondersteld wordt dat het uiteindelijke effect van de normalisatie reeds is bereikt, dan is dus $i_1 = 1,0 \cdot 10^{-4}$ en is het verhang direct na de normalisatie in 1928 ongeveer $i_0 = 1,0 \cdot 10^{-4} / 0,97 = 1,03 \cdot 10^{-4}$ geweest. Deze afname van het verhang heeft volgens vergelijking (A.13) in Bijlage A.2 uiteindelijk tot gevolg dat de bodem bij de IJsselkop 126,5 km stroomopwaarts van de monding van de IJssel nog eens is gedaald met $\Delta z_b = (1,0 - 1,03) \cdot 10^{-4} \cdot 126,5 \cdot 10^3 \text{ m} \approx -0,4 \text{ m}$. Het uiteindelijke effect van de laatste normalisatie is dus een bodemdaling van ongeveer 0,5 m bij de monding en van ongeveer 0,9 m bij de IJsselkop (zie Figuur 5.1).



Figuur 5.1 Vergelijking van berekende bodemdalingen in de IJssel sinds 1928 a.g.v. de normalisatie alleen (— —) en a.g.v. normalisatie en vergroting debiet en zandvracht bij lage Boven-Rijnafoeren na de ingebruikname van de stuw bij Driel (— · —) met geschatte opgetreden bodemdalingen sedert 1928 (● ● ●); de geschatte opgetreden bodemdalingen sedert 1928 zijn bepaald uit de baggergegevens van de periode 1928 t/m 1937 (zie begin Paragraaf 5.2) en de bodemdalingen waargenomen in de periode 1938 - 1998 (zie Tabel 3.2).

Naast de normalisatie zijn de bouw van de stuw bij Driel en de daarmee samenhangende bocht-afsnijdingen bij Doesburg in 1954 en bij Rheden/De Steeg in 1969 belangrijke ingrepen geweest voor de IJssel. Na het gereedkomen van de stuw bij Driel is de afvoer via de IJssel bij lage Boven-Rijnafoeren toegenomen, en door de bochtafsnijdingen werd de rivier in totaal 8,6 km korter. Bij een verhang van de IJssel tussen de IJsselkop en Doesburg van ongeveer $1,2 \cdot 10^{-4}$ (zie Rijkswaterstaat, 2000), zouden de bochtafsnijdingen zonder compenserende maatregelen volgens vergelijking (A.14) in Bijlage A.3 een uiteindelijke daling van het zomerbed van de rivier bovenstrooms van de bochtafsnijdingen hebben veroorzaakt van $-8600 \cdot 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m} \approx -1,0 \text{ m}$. Uiteindelijk zou dit hebben geleid tot een behoorlijke toename van de IJsselafvoer. Omdat de IJsselafvoer alleen hoger mocht worden bij lage afvoeren van de Boven-Rijn zijn de bochtafsnijdingen gecompenseerd door de stromingsweerstand in het winterbed bij de IJsselkop te vergroten (volgens Ploeger, 1992). Hiertoe werden kaden in het winterbed (bij de IJsselkop) verhoogd. De grotere weerstand maakt dat de afvoerverdeling bij hoge afvoeren ongeveer gelijk is aan die van voor de werken, en dat de hierboven berekende daling van het rivierbed bovenstrooms van de bochtafsnijdingen zich heeft beperkt tot geschat ongeveer 0,4 m (zie Figuur 3.2). In Paragraaf 4.7 is beredeneerd dat het effect van de bochtafsnijdingen reeds de

IJsselkop heeft bereikt.

Het effect van het in gebruik nemen van de stuw bij Driel en van de voltooiing van de bochtafsnijdingen bij Doesburg en bij Rheden/De Steeg is dat de afvoer via de IJssel, en dus ook de zandvracht, bij lage Boven-Rijnafoeren is toegenomen. Volgens Struijk (1994) zijn de lage afvoeren met ongeveer 25 % toegenomen en zijn de hoge afvoeren inderdaad ongeveer gelijk gebleven. Indien aangenomen wordt dat de dominante afvoer met ongeveer 10 % is toegenomen en dat $n = 4$ en $p = n/3$ (dus dat de zandvracht met 13,5 % is toegenomen, zie vergelijking (A.31) in Bijlage A.6), dan volgt uit vergelijking (A.32) een vergroting van de waterdiepte met een factor $d_{11}/d_1 = 1,066$. Dus indien $d_1 = 5,2$ m (aanname d_1 is de huidige waterdiepte), dan wordt de uiteindelijke waterdiepte als gevolg van een toename van het debiet met 10 % en van de zandvracht met 13,5 % gelijk aan $d_{11} \approx 5,5$ m, een verdieping van ongeveer 0,3 m. Het bodemverhang zal hierbij niet veranderen, zie Bijlage A.6.

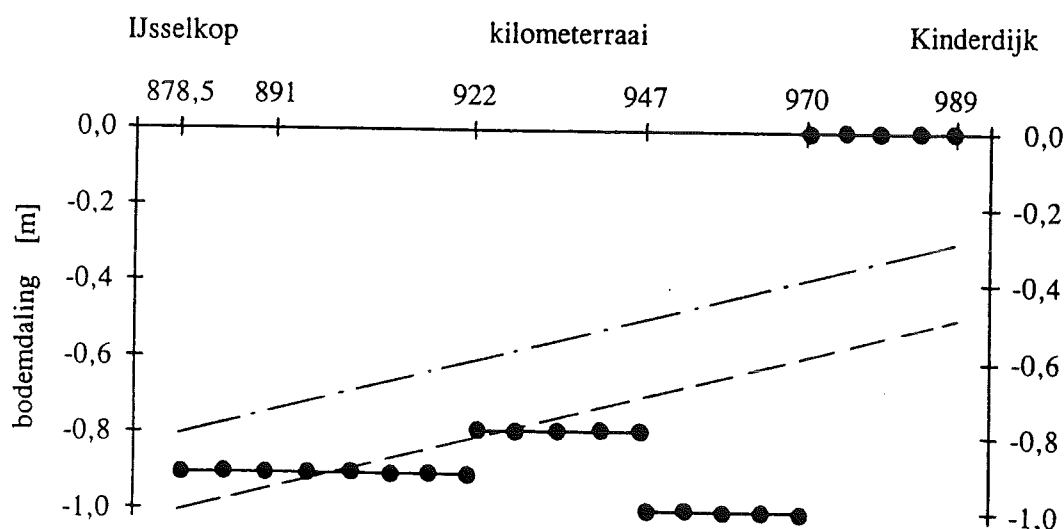
Het uiteindelijke gesommeerde effect van de laatste normalisatie en het in gebruik nemen van de stuw bij Driel met de daarmee samenhangende bochtafsnijdingen kan dus ruwweg als volgt geschat worden: een bodemdaling van ongeveer 0,8 m bij de monding en van ongeveer 1,2 m bij de IJsselkop (zie Figuur 5.1). De waarde van 0,8 m bij de monding komt overeen met wat aan het begin van deze paragraaf is geschat als zijnde te zijn opgetreden na 1928. De waarde van 1,2 m bij de IJsselkop is ongeveer 0,4 m lager dan de geschatte opgetreden waarde van ongeveer 0,8 m bij de IJsselkop. Dit zou betekenen dat in de boven- en middenloop van de IJssel nog enige bodemdaling is te verwachten, van ongeveer 0,4 m bij de IJsselkop afnemend tot nihil bij de monding. Bedacht moet worden dat er het nodige is aangenomen en dat dit een erg ruwe schatting is.

5.3 Toekomstige ontwikkeling zomerbed van Lek en Neder-Rijn

In Paragraaf 3.3 is beschreven dat in de periode 1933 - 1993 na de voltooiing van de normalisatie de bodem van de Lek en de Neder-Rijn gemiddeld 0,74 m is gedaald (zie Tabel 3.3). De vraag is nu of hiermee de uiteindelijk te verwachten ontwikkeling van de rivierbodem van de rivier na de gedane ingrepen als de voltooiing van de normalisatie in 1934 en van de kanalisatie in 1970 is bereikt. Bij de laatste normalisatie werd de normaalbreedte van de rivier verkleind van 150 m tot 130 m. Volgens vergelijkingen (A.11) en (A.12) in Bijlage A.2 met $n = 4$ heeft zulk een ingreep uiteindelijk tot gevolg dat de waterdiepte met een factor 1,11 toeneemt en het verhang met een factor 0,965 afneemt. Uitgaande van een over de lengte van de rivier gemiddelde (huidige) waterdiepte d_1 van ongeveer 5,1 m bij dominante afvoer (zie Paragraaf 5.2 en Tabel 5.2) betekent dit een toenmalige waterdiepte $d_0 = 4,6$ m en dus een vergroting van de waterdiepte met ongeveer 0,5 m. Het huidige, over het traject tussen de IJsselkop en Hagestein gemiddelde bodemverhang van Neder-Rijn en Lek is $i_1 = 1,26 \cdot 10^{-4}$, zie Rijkswaterstaat (2000); er wordt aangenomen dat het huidige verhang van de Neder-Rijn en de Lek tot Kinderdijk hieraan gelijk is. Dit betekent dat direct na de normalisatie in 1934 het verhang ongeveer $i_0 = 1,26 \cdot 10^{-4} / 0,965 = 1,306 \cdot 10^{-4}$ is geweest. Deze afname van het verhang heeft volgens

waterdiepten Lek en Neder-Rijn op verschillende plaatsen en gemiddeld over deze plaatsen								
afvoer	IJssel- kop	Driel boven	Driel beneden	Greb- be	Amerongen boven	Amerongen beneden	Culem- borg	gemid- deld
Q 50%	4,7 m	4,7 m	4,0 m	4,6 m	6,2 m	3,7 m	5,6 m	4,8 m
Q 10%	6,5 m	5,1 m	5,8 m	5,2 m	4,6 m	4,9 m	5,2 m	5,3 m

Tabel 5.2 Huidige waterdiepten Lek en Neder-Rijn bij rivierafvoeren die 50% en 10% van de tijd overschreden worden (Rijkswaterstaat, 2000).



Figuur 5.2 Vergelijking van berekende bodemdalingen in de Lek en de Neder-Rijn sinds 1934 a.g.v. de normalisatie (— —) en a.g.v. normalisatie en afname debiet en zandvracht bij lage Boven-Rijnafvoeren na ingebruikname van de stuw bij Driel (— · —) met sedert 1934 waargenomen bodemdalingen (●—●—●, zie Tabel 3.3).

vergelijking (A.13) tot gevolg gehad dat de bodem van de Neder-Rijn bij de IJsselkop 110,5 km stroomopwaarts van Kinderdijk nog eens met $\Delta z_b = (1,26 - 1,306) \cdot 10^{-4} \cdot 110,5 \cdot 10^3 \text{ m} \approx -0,5 \text{ m}$ is gedaald. Het uiteindelijke effect van de normalisatie is dus een bodemdaling van ongeveer 0,5 m bij Kinderdijk en van ongeveer 1,0 m bij de IJsselkop (zie Figuur 5.2).

Ook voor de Lek en de Neder-Rijn zijn, naast de normalisatie, de voltooiing van de bouw van de stuw bij Driel in 1970 en de daarmee samenhangende bochtafsnijdingen bij Doesburg in 1954 en bij Rheden/De Steeg in 1969 belangrijke ingrepen geweest. Na het gereedkomen van de stuw bij Driel

is de afvoer via de IJssel bij lage Boven-Rijnafoeren toegenomen, als gevolg waarvan ook de dominante afvoer is toegenomen; in de vorige paragraaf is de toename van de dominante afvoer van de IJssel geschat op ongeveer 10 %. Omdat de afvoer van de Neder-Rijn ongeveer twee keer zo groot is als die van de IJssel (Struijk, 1994), wordt de afname van de dominante afvoer van de Lek en de Neder-Rijn door het in gebruik nemen van de stuw bij Driel in 1970 geschat op ongeveer 5 % (factor 0,95; de zandvracht zal dan met ongeveer een factor 0,93 zijn afgenomen, zie Bijlage A.6). Uit vergelijking (A.32) met $p = n/3$ volgt nu een afname van de waterdiepte met een factor $d_{11}/d_1 = 0,966$. Dus indien $d_1 = 5,1$ m (aannahme d_1 is de huidige waterdiepte), dan wordt uiteindelijk de waterdiepte als gevolg van de debietafname gelijk aan $d_{11} \approx 4,9$ m, een verondieping van ongeveer 0,2 m. Het bodemverhang zal hierbij (d.w.z. als $p = n/3$) niet veranderen, zie Bijlage A.6.

Het uiteindelijke gesommeerde effect op het bed tussen de normaallijnen van de laatste normalisatie en het in gebruik nemen van de stuw bij Driel met de daarmee samenhangende bochtafsnijdingen in de IJssel kan dus ruwweg als volgt geschat worden: een bodemdaling van ongeveer 0,3 m bij Kinderdijk en van ongeveer 0,8 m bij de IJsselkop (zie Figuur 5.2). In werkelijkheid is het zomerbed van de Lek tussen Kinderdijk en Hagestein met gemiddeld ongeveer 0,5 m gedaald maar deze waarde bestaat uit een bodemdaling van 1,0 m tussen Nieuwpoort en Hagestein en van 0,0 m tussen Kinderdijk en Nieuwpoort (zie Tabel 3.3). De berekende waarde van 0,8 m voor de bodemdaling bij de IJsselkop komt vrij goed overeen met de waargenomen bodemontwikkeling, zoals ook de berekende gemiddelde bodemdaling van 0,55 m redelijk goed overeenkomt met de gemiddelde waargenomen bodemdaling van 0,74 m.

Gezien het bovenstaande wordt geconcludeerd dat indien in de toekomst verdere ingrepen in de Lek en de Neder-Rijn uitblijven en ook het afvoerregime en de zandaanvoer van de rivier niet veranderen, de netto gemiddelde bodemontwikkeling van Lek en Neder-Rijn in de toekomst niet groot zal zijn. Mogelijk zal er sprake zijn van enige aanzanding als gevolg van het afnemen van het debiet en de zandvracht sinds 1970.

5.4 Toekomstige ontwikkeling zomerbed van Pannerdensch Kanaal

Het Pannerdensch Kanaal is 11 km lang en dus een relatief korte rivier. De rivierlengte is aanzienlijk korter dan de aanpassingslengte van de verhanglijnen die optreden in de rivier zelf bij verschillende afvoeren. De morfologische basistheorie van Bijlage A.2 mag dus eigenlijk hier niet toegepast worden. Echter, omdat het om een relatief kleine versmalling gaat zal de afwijking a.g.v. het niet voldoen aan de voorwaarde van een lange rivier wellicht niet zo groot zijn. Daarnaast is het interessant om na te gaan wat het verschil is tussen deze 'voorspelling' en de na de normalisatie tot nu toe gerealiseerde bodemdaling.

In Paragraaf 3.4 is beschreven dat in de periode 1934 - 1998 na de voltooiing van de normalisatie het bed van het Pannerdensch Kanaal tussen de koppen van de kribben met gemiddeld 1,5 m is gedaald (zie Tabel 3.4). De vraag is nu of hiermee de uiteindelijk te verwachten ontwikkeling van de rivierbodembodem van het Pannerdensch Kanaal na de gedane ingrepen als de voltooiing van de normalisatie in 1934 is bereikt. Bij deze normalisatie werd de normaalbreedte van de rivier verkleind van 170 m tot 140 m. Volgens vergelijkingen (A.11) en (A.12) in Bijlage A.2 met $n = 4$ heeft zulk een ingreep uiteindelijk tot gevolg dat de waterdiepte met een factor 1,16 toeneemt en het verhang met een factor 0,95 afneemt. Uitgaande van een over de lengte van de rivier gemiddelde (huidige) waterdiepte d_1 van ongeveer 5,7 m bij dominante afvoer (zie Paragraaf 5.2 en Tabel 5.3) betekent dit een toenmalige waterdiepte $d_0 = 4,9$ m en dus een vergroting van de waterdiepte met ongeveer 0,8 m. Het huidige bodemverhang van het Pannerdensch Kanaal is $i_1 = 0,73 \cdot 10^{-4}$, zie Rijkswaterstaat (2000). Dit betekent dat direct na de normalisatie in 1934 het verhang ongeveer $i_0 = 0,73 \cdot 10^{-4} / 0,95 = 0,77 \cdot 10^{-4}$ is geweest. Deze afname van het verhang heeft volgens vergelijking (A.13) tot gevolg gehad dat de bodem van het Pannerdensch Kanaal bij de Pannerdensch Kop 11 km stroomopwaarts van de IJsselkop met $\Delta z_b = (0,73 - 0,77) \cdot 10^{-4} \cdot 11 \cdot 10^3 \text{ m} \approx -0,04 \text{ m}$ extra is gedaald, door de relatief kleine lengte van het Pannerdensch Kanaal een kleine daling.

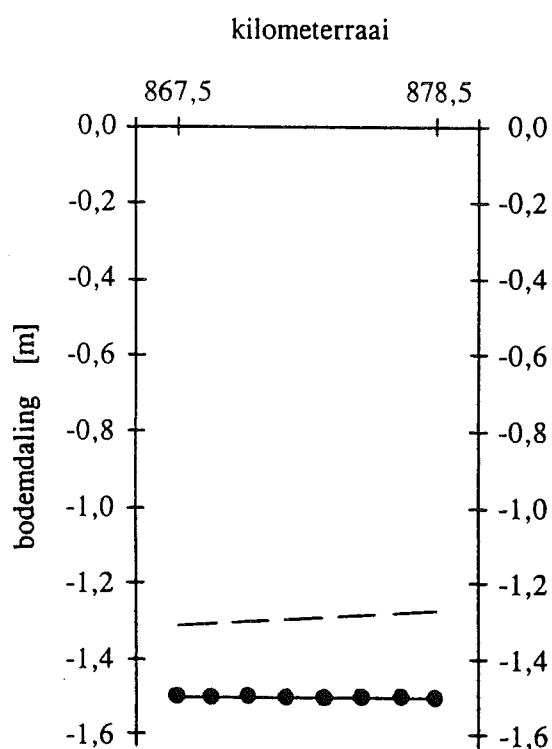
In 1953 is het Pannerdensch Kanaal aangepast als gevolg waarvan de rivier 230 m korter werd. Bij een verhang van $0,73 \cdot 10^{-4}$ zou dit volgens vergelijking (A.14) in Bijlage A.3 een uiteindelijke daling van het bed van de rivier tussen de kibkoppen bovenstrooms van de bochtafsnijding hebben veroorzaakt van $0,73 \cdot 10^{-4} \cdot (-230 \text{ m}) \approx -0,02 \text{ m}$.

Als gevolg van de normalisatie van de benedenstroomse riviertrajecten zijn de verhangen op deze rivieren afgenomen. In Paragrafen 5.2 en 5.3 is berekend dat dit voor het bovenstroomse riviertraject (Pannerdensch Kanaal) zal leiden tot een bodemdaling van 0,4 m als gevolg van de normalisatie van de IJssel of van 0,5 m als gevolg van de normalisatie van Lek en Neder-Rijn.

Het gesommeerde effect van de normalisatie van het Pannerdensch Kanaal en die van de benedenstroomse riviertrajecten en die van de kleine bochtafsnijding is dus een bodemdaling van 0,8 m (normalisatie Pannerdensch Kanaal) + 0,45 m (gemiddeld effect bij IJsselkop van afname verhang van IJssel, Lek en Neder-Rijn door normalisatie van deze rivieren) + 0,02 m (effect bochtafsnijding) = 1,27 m bij de IJsselkop en van 1,27 m + 0,04 m (effect afname verhang Pannerdensch Kanaal door normalisatie) = 1,31 m bij de Pannerdensch Kop. Deze waarden komen redelijk goed overeen met de sinds de voltooiing van de normalisatie in 1934 waargenomen bodemdaling van ongeveer 1,5 m (zie Tabel 3.4 en Figuur 5.3). Dit betekent dat geconcludeerd kan worden dat indien in de toekomst verdere ingrepen in het Pannerdensch Kanaal uitblijven en ook het afvoerregime van de rivier niet verandert, de netto gemiddelde bodemontwikkeling van de rivier in de toekomst nihil zal zijn.

waterdiepten Pannerdensch Kanaal bij de splitsingspunten en gemiddeld over deze punten			
afvoer	Pannerdensche Kop	IJsselkop	gemiddeld
Q 50%	4,6 m	4,7 m	4,6 m
Q 10%	6,8 m	6,5 m	6,7 m

Tabel 5.3 Huidige waterdiepten Pannerdensch Kanaal bij rivierafvoeren die 50% en 10% van de tijd overschreden worden (Rijkswaterstaat, 2000).



Figuur 5.3 Vergelijking van berekende bodemdalingen in het Pannerdensch Kanaal sinds 1934 a.g.v. de normalisatie, een kleine bochtafsnijding en ontwikkelingen van het bed van de benedenstroomse Rijntakken (— —) met sedert 1934 waargenomen bodemdalingen (●—●—●, zie Tabel 3.4).

5.5 Toekomstige ontwikkeling zomerbed van Waal

In Paragraaf 4.5 is beschreven dat in de periode 1916 t/m 1949 direct na de voltooiing van de normalisatie 15.200.000 m³ sediment in de Waal is gewonnen; dit komt voor de 84,5 km lange en 260 m brede Waal overeen met een gemiddelde bodemdaling van 0,7 m. Indien deze bodemdaling opgeteld wordt bij de sinds 1950 waargenomen bodemontwikkeling (zie Tabel 3.4) dan is de bodem op het benedenstroomse traject met 1,0 m gedaald, op het middenstuk met 1,1 m en op het bovenstroomse vak met 1,4 m. Ook nu weer de vraag of hiermee de uiteindelijk te verwachten ontwikkeling van de rivierbodem van de Waal na de gedane ingrepen als de normalisatie reeds is bereikt.

Gedurende de derde fase van de normalisatie van de Waal werd de normaalbreedte teruggebracht van ongeveer 320 m tot 260 m. Volgens vergelijkingen (A.11) en (A.12) in Bijlage A.2 met $n = 4$ heeft zulk een ingreep uiteindelijk tot gevolg dat de waterdiepte met een factor 1,17 toeneemt en het verhang met een factor 0,95 afneemt. Uitgaande van een over de lengte van de rivier gemiddelde (huidige) waterdiepte d_1 van ongeveer 6,3 m bij dominante afvoer (zie Paragraaf 5.2 en Tabel 5.4) betekent dit een toenmalige waterdiepte $d_0 = 5,4$ m en dus een vergroting van de waterdiepte met ongeveer 0,9 m. Het huidige bodemverhang van de Waal is $i_1 = 1,1 \cdot 10^{-4}$, zie Rijkswaterstaat (2000). Dit betekent dat direct na de normalisatie in 1928 het verhang ongeveer $i_0 = 1,1 \cdot 10^{-4} / 0,95 = 1,16 \cdot 10^{-4}$ is geweest. Deze afname van het verhang heeft volgens vergelijking (A.13) tot gevolg gehad dat de bodem van de Waal bij de Pannerdensch Kop 84,5 km stroomopwaarts van de uitstroming van de Waal in de benedenstroomse Boven Merwede met $\Delta z_b = (1,1 - 1,16) \cdot 10^{-4} \cdot 84,5 \cdot 10^3 \text{ m} \approx -0,5$ m extra is gedaald. Het uiteindelijke effect van de normalisatie is dus een bodemdaling van ongeveer 0,9 m benedenstrooms en van 1,4 m bovenstrooms. Deze waarden komen goed overeen met de hierboven geschatte opgetreden waarden van respectievelijk 1,0 m en 1,4 m (zie Figuur 5.4).

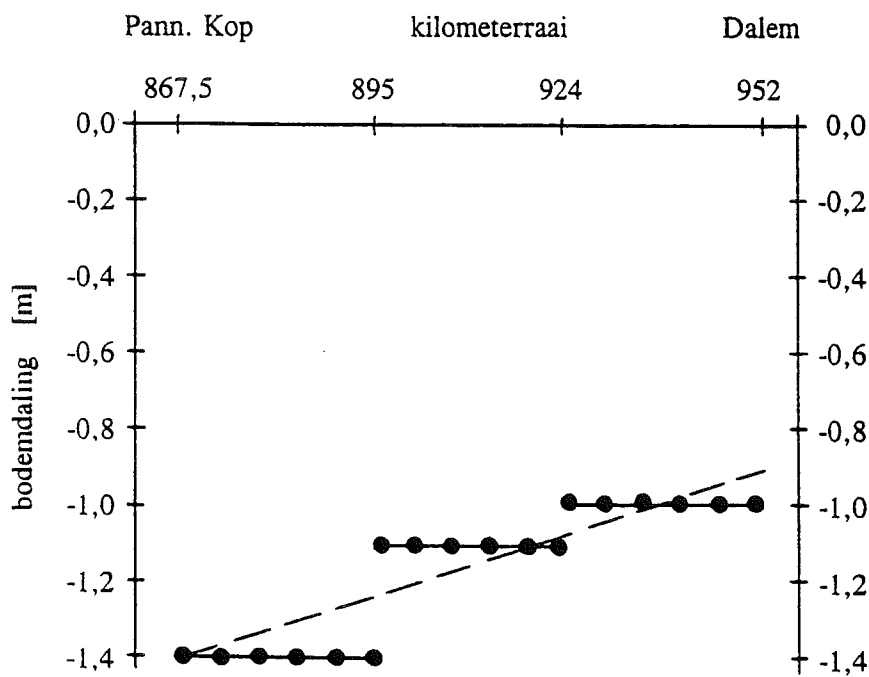
Gezien het bovenstaande wordt geconcludeerd dat indien in de toekomst verdere ingrepen in de Waal uitblijven en ook het afvoerregime van de rivier en de aanvoer van sediment naar de rivier niet veranderen, de netto gemiddelde bodemontwikkeling van de Waal relatief klein zal zijn.

5.6 Toekomstige ontwikkeling zomerbed van Boven-Rijn

De normalisatie van de Boven-Rijn werd reeds in de tweede fase van de normalisatie (1870 - 1890) voltooid, zie Tabel 2.1. "Bij de stroombevaring van 1908 werd geen nadere normalisatie van de Boven-Rijn noodzakelijk gevonden" (Ploeger, 1992), wel die van de andere Rijntakken. In de tweede fase van de normalisatie werd de normaalbreedte van de Boven-Rijn teruggebracht van 400 m tot 340 m, na eerder 440 m te zijn geweest. Volgens vergelijkingen (A.11) en (A.12) in Bijlage A.2 met $n = 4$ heeft een afname van de breedte van 400 m naar 340 m uiteindelijk tot gevolg dat de waterdiepte met een factor 1,13 toeneemt en het verhang met een factor 0,96 afneemt. Uitgaande van een over de lengte van de rivier gemiddelde (huidige) waterdiepte van ongeveer 6,8 m bij dominante afvoer

waterdiepten Waal op verschillende lokaties en gemiddeld over deze lokaties							
afvoer	Pannerden- sche Kop	Nijme- gen	Tiel	St. An- dries	Zalt- bommel	Vuren	gemid- deld
Q 50%	5,7 m	4,9 m	4,9 m	5,0 m	5,5 m	6,1 m	5,3 m
Q 10%	7,9 m	7,1 m	7,0 m	6,9 m	7,3 m	6,8 m	7,2 m

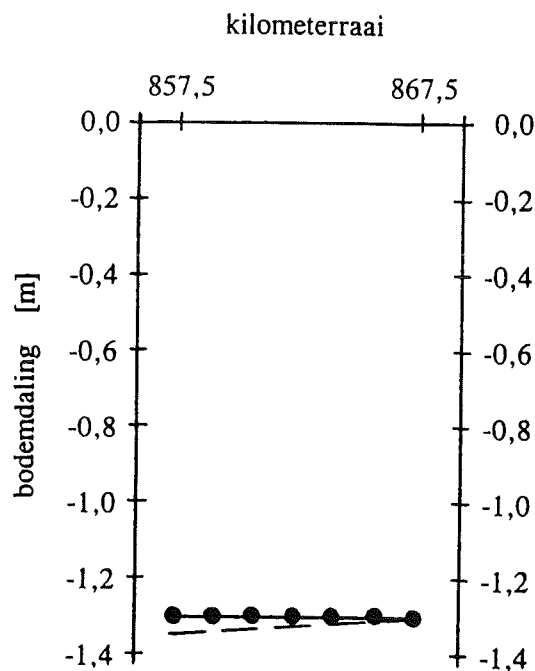
Tabel 5.4 Huidige waterdiepten Waal bij rivierafvoeren die 50% en 10% van de tijd overschreden worden (Rijkswaterstaat, 2000).



Figuur 5.4 Vergelijking van berekende bodemdalingen in de Waal sinds 1916 a.g.v. de normalisatie (—) met geschatte opgetreden bodemdalingen sedert 1916 (●—●); de geschatte opgetreden bodemdalingen sedert 1916 zijn bepaald uit de baggergegevens van de periode 1916 t/m 1949 (zie begin Paragraaf 5.5) en de bodemdalingen waargenomen in de periode 1950 - 1998 (zie Tabel 3.4).

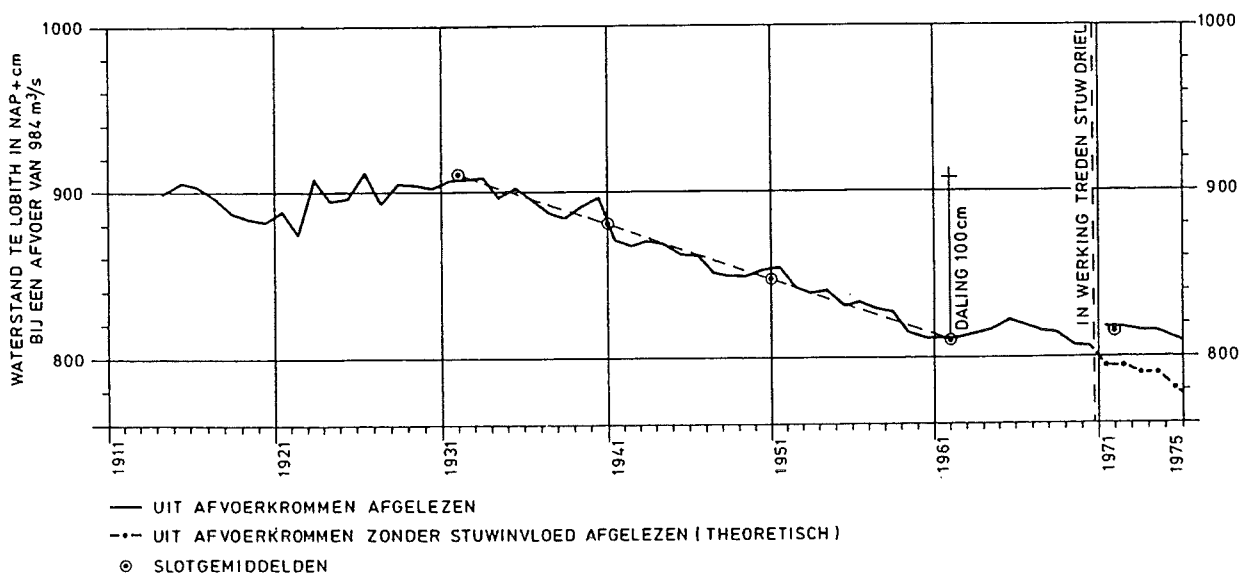
waterdiepten Boven-Rijn bij Lobith en Pannerdenschse Kop en gemiddeld over deze lokaties			
afvoer	Lobith	Pannerdenschse Kop	gemiddeld
Q 50%	5,6 m	5,7 m	5,7 m
Q 10%	7,9 m	7,9 m	7,9 m

Tabel 5.5 Huidige waterdiepten Boven-Rijn bij rivierafvoeren die 50% en 10% van de tijd overschreden worden (Rijkswaterstaat, 2000).



Figuur 5.5 Vergelijking van berekende bodemdalingen in de Boven-Rijn sinds 1890 a.g.v. de normalisatie (—) met geschatte opgetreden bodemdalingen sedert 1890 (●—●).

(zie Paragraaf 5.2 en Tabel 5.5) betekent dit een toenmalige waterdiepte $d_0 = 6,0$ m en dus een verhoging van de waterdiepte met ongeveer 0,8 m. Het huidige bodemverhang van de Boven-Rijn is $i_1 = 0,88 \cdot 10^{-4}$, zie Rijkswaterstaat (2000). Dit betekent dat direct na de normalisatie in 1890 het verhang ongeveer $i_0 = 0,88 \cdot 10^{-4} / 0,96 = 0,92 \cdot 10^{-4}$ is geweest. Deze afname van het verhang heeft volgens vergelijking (A.13) tot gevolg gehad dat de bodem van de Boven-Rijn bij Spijk 10 km stroomopwaarts van de Pannerdenschse Kop met $\Delta z_b = (0,88 - 0,92) \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ m} \approx -0,04$ m extra is gedaald, door de relatief kleine lengte van de Boven-Rijn een kleine daling.



Figuur 5.6 Verloop van de Overeengekomen Lage Rivierstand (OLR) bij Lobith, behorende bij een Boven-Rijnafvoer van $984 \text{ m}^3/\text{s}$, in de periode 1914 - 1970 (Rijkswaterstaat, 1985)

Als gevolg van de normalisatie van de benedenstroomse riviertrajecten zijn de verhangen op deze rivieren afgenomen. In Paragrafen 5.2 t/m 5.5 is berekend dat dit voor het bovenstroomse riviertraject (Boven-Rijn) zal leiden tot een bodemdaling van ongeveer 0,5 m via het Pannerdensch Kanaal door de normalisatie van de IJssel, de Lek en de Neder-Rijn en het Pannerdensch Kanaal, of van ongeveer 0,4 m door de normalisatie van de Waal. Dit betekent dat als gevolg van de laatste fase van elk van de normalisaties van de Rijntakken een totale daling van het zomerbed van de Boven-Rijn van ongeveer $0,8 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 1,3 \text{ m}$ is te verwachten.

In de periode 1934 - 1998 is het bed tussen de kribkoppen met ongeveer 1,3 m gedaald (zie Tabel 3.4), gelijk aan de hierboven berekende daling als gevolg van de laatste fase van de normalisatie. Het is jammer dat geen gegevens beschikbaar zijn van de ontwikkeling van het zomerbed van de Boven-Rijn in de periode 1890 - 1934. Wel zijn gegevens bekend van het OLR bij Lobith in de periode 1914 - 1934, zie Figuur 5.6. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat in deze periode het OLR bij Lobith vrijwel niet is veranderd. Verder rapporteert Haskoning (1990) dat volgens de Duitse literatuur op de Neder-rhein tussen 1890 en 1970 een verlaging van de waterstanden van een meter is opgetreden t.g.v. (i) bochtafsnijdingen, (ii) bedreguleringswerken, (iii) normalisatiewerken, (iv) de bouw van stuwen, (v) aanpassingen van de hoogwaterkeringen en (vi) de regulering van de afvoeren van de zijrivieren en stuwen. Indien deze verlaging ook is opgetreden op de Boven-Rijn, dan betekent dat met Figuur 5.6 dat in de periode 1890 - 1934 er geen verandering van het OLR op de Boven-Rijn is geweest. Indien deze conclusie voor het OLR doorgetrokken wordt naar het rivierbed, dan betekent dit dat in de peri-

ode 1890 - 1934 de ontwikkeling van het rivierbed van de Boven-Rijn tussen de kribkoppen verwaarloosbaar klein is geweest en dat de voltooiing van de normalisatie van de Boven-Rijn in 1890 pas sinds 1934 tot bodemdaling van de rivier zelf heeft geleid. Dit is niet erg logisch. Een verklaring zou kunnen zijn dat de korte-termijn effecten van benedenstroomse normalisaties (aanzanding van de rivierbodem, zie Figuur A.1 voor $t = t_0^+$) en bovenstroomse ingrepen (aanzanding a.g.v toename van het sedimenttransport) in evenwicht waren met de korte-termijn effecten (verlaging van het bed, zie Figuur A.1 voor $t = t_0^+$) van de normalisatie van de Boven-Rijn zelf.

Figuur 5.5 geeft weer dat de met de morfologische basistheorie voorspelde bodemdaling als gevolg van de normalisatie en van ingrepen in de benedenstroomse riviervakken goed overeenkomt met de sedert 1934 waargenomen bodemdaling; hierboven is beredeneerd dat deze laatste waarschijnlijk overeenkomt met de sedert 1890 opgetreden bodemdaling. Mogelijk geldt dus ook voor de Boven-Rijn dat de effecten van de normalisatie van de rivier en van de ingrepen in benedenstroomse Rijntakken reeds zijn gerealiseerd en dat de bodemdaling tot stilstand is gekomen.

Een zeer onzekere factor is de aanvoer van sediment vanuit Duitsland naar de Boven-Rijn, zeker ook ten aanzien van toekomstige ontwikkelingen. Naast de in het rapport van Haskoning (1990) genoemde ingrepen, zou ook een verminderde aanvoer van sediment naar het benedenstroomse gedeelte van de Rhein verantwoordelijk kunnen zijn voor de in de Niederrhein waargenomen bodemdaling. Deze afname van het sedimenttransport zou kunnen zijn teweeggebracht door bodemdalingen bovenstrooms als gevolg van mijnzakkingen, en door de hierboven genoemde bouw van stuwen.

Stel dat het sedimenttransport bij Lobith op enig moment met 25% is afgenomen of zal afnemen. Een afname van de zandvracht met 25% heeft volgens vergelijkingen (A.22) en (A.23) in Bijlage A.5 met $n = 4$ uiteindelijk tot gevolg dat de waterdiepte met een factor 1,075 toeneemt en het verhang met een factor 0,80 afneemt. Uitgaande van een huidige waterdiepte d_0 van ongeveer 6,8 m bij dominante afvoer betekent dit een uiteindelijke waterdiepte $d_1 = 7,3$ m, dat is een toename van 0,5 m. Het verhang neemt af van $0,88 \cdot 10^{-4}$ tot $0,71 \cdot 10^{-4}$. Deze afname van het verhang heeft volgens vergelijking (A.24) in Bijlage A.5 tot gevolg dat de bodem bij Spijk 10 km stroomopwaarts van de Pannerdensch Kop met $\Delta z_b = (0,71 - 0,88) \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ m} \approx -0,17 \text{ m}$ extra daalt. Het te verwachten effect van een afname van het sedimenttransport naar de Boven-Rijn met 25% op het bed tussen de normaallijnen van de Boven-Rijn is dus een extra bodemdaling van 0,5 m bij de Pannerdensch Kop en van 0,67 m bij Spijk. Door de vaste laag in de Niederrhein bij Emmerich zou een dergelijke extra daling van het zomerbed bij OLR wel eens tot problemen voor de scheepvaart kunnen leiden (zie Hoofdstuk 1).

5.7 Discussie

In dit hoofdstuk is getracht te bepalen wat het uiteindelijke effect op de ligging van de bodems van de Rijntakken tussen de normaallijnen zal zijn van de laatste fases van de normalisaties (die voorafgegaan en gevolgd werden door intensieve zand- en grindwinning om het beoogde effect van de normalisaties te bespoedigen), de kanalisatie van Lek en Neder-Rijn en bochtafsnijdingen. Hierbij is gebruik gemaakt van relatief eenvoudige morfologische basistheorieën. Deze theorieën voorspellen uiteindelijke bodemdalingen die redelijk goed overeenkomen met de bodemdalingen die na de betreffende normalisaties tot aan ongeveer 1990 zijn waargenomen. Mogelijk is dus het effect van deze ingrepen al gerealiseerd, dankzij het vele baggerwerk in de twintigste eeuw, en ondanks de relatief grote morfologische tijdschalen die voor de verschillende Rijntakken zijn afgeleid (Waal tot Zaltbommel 260 jaar, gehele Neder-Rijn en Lek 1300 jaar, gehele IJssel 2400 jaar, in tegenstelling tot de kortere tijdschalen voor de kortere trajecten Boven-Rijn vanaf Lobith 2 jaar, Pannerdensch Kanaal 4 jaar, Neder-Rijn tot Wageningen 42 jaar, IJssel tot Doesburg 60 jaar, zie Bijlage A.9). De constatering dat vanaf ongeveer 1990 de bodemdalingen tot staan lijken te zijn gekomen, dan wel in een aanzienlijk lager tempo terecht zijn gekomen, lijkt deze conclusie te ondersteunen.

Echter, in de periode 1985-1993 is ook de zand- en grindwinning geleidelijk gestopt, d.w.z. in de IJssel sinds 1990, in het Pannerdensch Kanaal sedert 1985, in de Waal en de Boven-Rijn vanaf 1993. In Hoofdstuk 4 is aangetoond dat de zand- en grindwinning in de twintigste eeuw verantwoordelijk is geweest voor het overgrote deel van de bodemdalingen in de IJssel, Lek, Neder-Rijn en Waal. Dus het stoppen van dit baggerwerk zal zeker leiden tot een aanzienlijke reductie van de bodemdalingen. Overigens lijkt het stoppen van het baggerwerk op een moment dat theoretisch het beoogde effect van ingrepen als de riviernormalisatie is gerealiseerd wel erg toevallig. Daartegenover kan geconstateerd worden dat de resultaten van de in dit hoofdstuk toegepaste morfologische basistheorieën als redelijk overkomen. Dus de conclusies van de Paragrafen 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 en 5.6 dat de toekomstige bodemontwikkelingen van respectievelijk IJssel, Lek en Neder-Rijn, Pannerdensch Kanaal, Waal en (met de nodige omzichtigheid) Boven-Rijn relatief klein zullen zijn, kunnen wel gehandhaafd worden. Mochten er nog bodemdalingen voortvloeien uit de gepleegde ingrepen, dan zullen deze in ieder geval aanzienlijk kleiner zijn dan die van de periode 1926-1990.

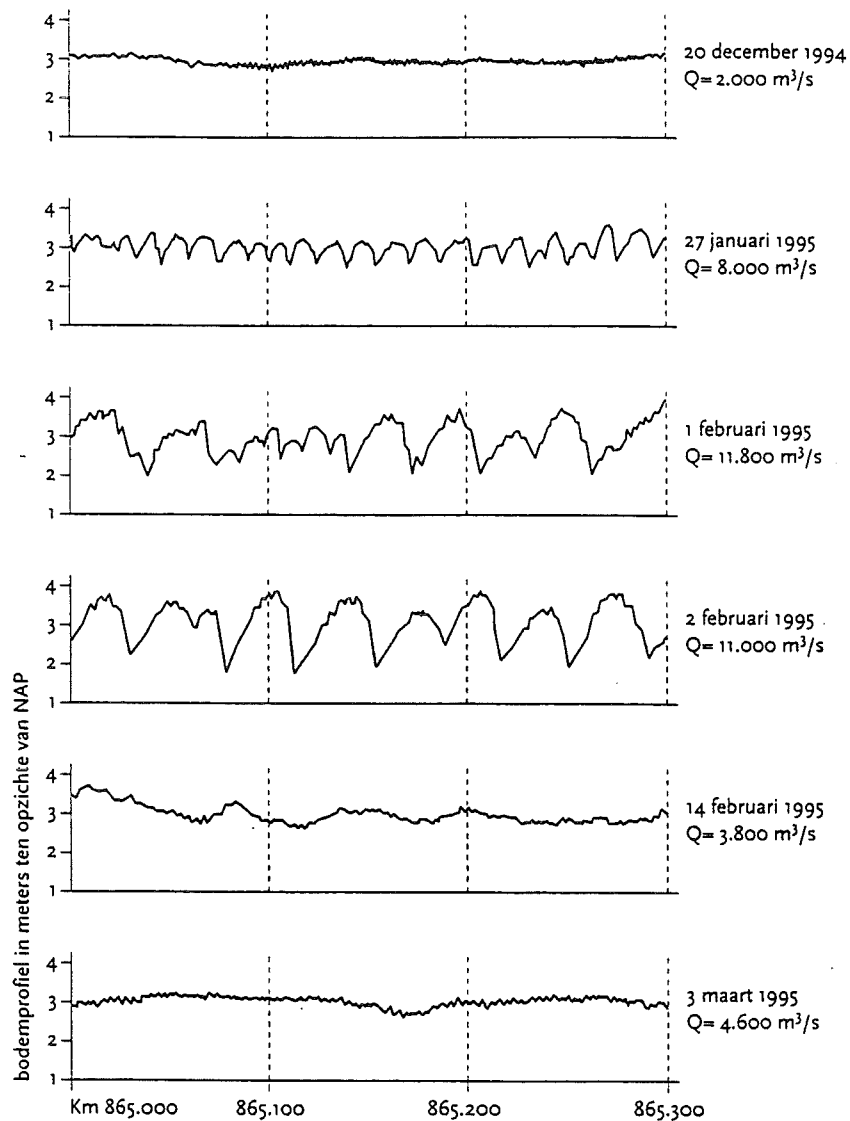
Aanvullend worden nog de volgende opmerkingen gemaakt:

- De constatering dat vanaf ongeveer 1990 de bodemdalingen tot stilstand lijken te zijn gekomen, dan wel in een aanzienlijk lager tempo terecht zijn gekomen, moet met de nodige omzichtigheid behandeld worden. Immers het gaat hierbij om een periode van slechts ongeveer tien jaar. In het verleden zijn er in sommige riviervakken wel perioden van tien jaar (of zelfs meer) geweest dat de bodemdaling ook tot staan lijkt te zijn gekomen, terwijl het bed van het zomerbed later weer verder daalde.
- Van de uitgevoerde rivierreguleringen en normalisaties zijn alleen de effecten van de laatst uitge-

voerde normalisaties berekend. Dit betekent dat voor de Boven-Rijn het effect van de eerste fase van de normalisatie (rivierregulering van 1850 - 1870) en voor de overige Rijntakken het effect van de rivierregulering en de tweede fase van de normalisatie van 1870 - 1890 niet zijn meegenomen. Ook is aangenomen dat eerdere ingrepen zijn uitgewerkt en geen merkbaar effect meer hebben gehad na ongeveer 1930. Dit is waarschijnlijk wel juist omdat men, om het effect van de tweede normalisatie (uitschuring van de rivierbodembodem voor een grotere diepgang voor de scheepvaart) te bespoedigen, vanaf het einde van de negentiende eeuw grote hoeveelheden zand en grind uit de rivieren heeft gebaggerd. Echter door het ontbreken van baggergegevens van voor 1900 en van bodempeilingen van voor circa 1930 en door de relatief grote morfologische tijdschaal is dit een veronderstelling die niet aangetoond kan worden.

- De aanpassing van de ligging van het rivierbed aan gepleegde ingrepen (als normalisatie) zal in het begin relatief snel zijn en daarna zal de aanpassingssnelheid afnemen. Omdat niet alleen in het begin maar ook, zoals het zich nu laat aanzien, aan het einde van de aanpassing relatief grote hoeveelheden sediment zijn gebaggerd, kan een afname van de aanpassingssnelheid niet in de Figuren 3.2, 3.3 en 3.4 geconstateerd worden.
- Direct na een normalisatie treedt bij een voldoende lange rivier over een relatief groot riviertraject een stijging van de waterstanden op (zie Figuur A.1). In de periode hierna zal de waterstand in het versmalde riviertraject weer dalen, evenals de bodem. De hogere waterkolom die het gevolg is van normalisatie kan dus alleen waargenomen worden indien de waterstanden van voor de normalisatie bekend zijn. Na de normalisatie zal geen vergroting van de waterkolom optreden en zal de waterstand min of meer met de bodem meezakken.
- De conclusies van de Paragrafen 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 en 5.6 dat de toekomstige bodemontwikkelingen van respectievelijk IJssel, Lek en Neder-Rijn, Pannerdensch Kanaal, Waal en (met de nodige omzichtigheid) Boven-Rijn relatief klein zullen zijn, zijn gebaseerd op berekeningen uitgevoerd met relatief eenvoudige morfologische basistheorieën, zie Bijlage A. Hierbij is ten aanzien van ingrepen als normalisatie, bochtafsnijding, verandering in afvoer en verandering in sedimentaanvoer aangenomen dat in de uiteindelijke evenwichtssituatie de bodemwrijving hetzelfde is als in de evenwichtssituatie voor de ingreep. Echter, deze veronderstelling kan niet getoetst worden omdat niet bekend is hoe groot de bodemwrijving bij aanvang van de derde fase van de normalisatie (voor Boven-Rijn de tweede fase van de normalisatie) is geweest.

Volgens Struijk (1994) is de wrijvingscoëfficiënt $C_f (= g/C^2$, C is coëfficiënt van Chézy) van de IJssel, Neder-Rijn, Pannerdensch Kanaal en Waal nabij de splitsingspunten in de periode 1934 - 1991 eerst afgenomen van $C_f \approx 0,0045$ in 1934 (bijbehorende ruwheidshoogte $k = 0,18$ m, zie vergelijking (A.42)) tot $C_f \approx 0,0027$ in 1969 om vervolgens weer toe te nemen tot $C_f \approx 0,0031$ (ruwheidshoogte $k = 0,05$ m) in 1991 (waarden bij een waterdiepte van ongeveer 5,8 m bij dominante afvoer, zie Bijlage A.7). Omdat nog grotere variaties van de bodemruwheid over aanzienlijk kortere perioden zijn waargenomen, mag echter hieruit niet de conclusie getrokken worden dat de 'dominante bodemwrijving' ook daadwerkelijk deze wijzigingen heeft ondergaan. Een voorbeeld



Figuur 5.7 Bodemveranderingen tijdens de hoogwatergolf van 1995 (Rijkswaterstaat, 1995).

van zo'n snelle verandering van de bodemruwheid is waargenomen tijdens de hoogwatergolf van 1995 (Rijkswaterstaat, 1995). Gedurende een periode van zo'n 2 maanden zijn toen enorme verschillen in hoogten van duinen en megaribbels in het rivierbed waargenomen, zie Figuur 5.7. De bijbehorende bodemruwheidshoogten kunnen met de volgende door Van Rijn (1993) ontwikkelde formule bepaald worden:

$$k = 3D_{90} + 20\gamma_r\Delta_r\left(\frac{\Delta_r}{\lambda_r}\right) + 1,1\gamma_d\Delta_d(1 - e^{-25\Delta_d/\lambda_d}) \quad (5.1)$$

waarin D_{90} de korreldiameter die door 90% van de sedimentdeeltjes wordt onderschreden, γ_r is een ribbelfactor ($\gamma_r = 1$ voor een bed met alleen ribbels, $\gamma_r = 0,7$ voor een bed met ribbels en

duinen), Δ_r is de ribbelhoogte, λ_r is de ribbellengte, γ_d is een vormfactor ($\gamma_d = 0,7$ voor prototypecondities), Δ_d is de duinhoogte, λ_d is de duinlengte. Vergelijking (5.1) is gebaseerd op data van zowel metingen in het laboratorium als in het veld.

Nabij de Pannerdensche Kop en de IJsselkop is $D_{90} \approx 0,01$ m. Dit betekent met (5.1) dat als $k = 0,05$ m, dat dan de ribbels of de duinen slechts beperkt van omvang zijn, $\Delta_r \approx 0,01$ m of $\Delta_d \approx 0,1$ m. Figuur 5.7 laat zien dat op 20 december 1994 bij een debiet bij Lobith van $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ duinen met een hoogte van ongeveer $0,1$ m waargenomen zijn. De ruwheidshoogte is toen dus ongeveer $k \approx 0,05$ m geweest, en de bodemruwheidscoëfficiënt $C_f \approx 0,0031$. Bij het hoogwater in de Rijntakken van 1995 ontstonden op 14 februari 1995 bij een debiet van $11.000 \text{ m}^3/\text{s}$ duinen in het rivierbed met een hoogte $\Delta_d \approx 2$ m en een lengte $\lambda_d \approx 40$ m (zie Figuur 5.7). Uit vergelijking (5.1) volgt voor de ruwheidshoogte onder dergelijke condities $k \approx 1,1$ m (de duinen domineren k). Bij een waterdiepte $d \approx 10$ m betekent dit dat $C_f \approx 0,0073$. Omgekeerd hoort bij een $C_f \approx 0,0073$ en een waterdiepte $d \approx 5,8$ m bij dominante afvoer een ruwheidshoogte $k \approx 0,64$ m.

Uit het bovenstaande blijkt wel dat de ruwheidscoëfficiënt van een riviervak van maand tot maand sterk kan verschillen, vooral rond hoogwaters. Dit betekent dat gedetailleerde waarnemingen als weergegeven in Figuur 5.7 regelmatig en over zeer grote oppervlakten van de bodems van de Rijntakken nodig zijn om uitspraken te doen over of en in welke mate de bodemruwheid in de tijd verandert. Omdat dergelijke waarnemingen van de Rijntakken na de laatste normalisaties niet zijn gedaan, is het dus ook niet mogelijk om een uitspraak te doen over bodemruwheden en eventuele veranderingen hiervan in de periode na de laatste normalisaties.

6 Eventuele maatregelen

6.1 Inleiding

In Hoofdstuk 5 is geconcludeerd dat, indien in de toekomst verdere ingrepen in de IJssel, Lek en Neder-Rijn, Pannerdensch Kanaal en Waal uitblijven, en ook het afvoerregime van de riviertakken niet verandert, de netto gemiddelde bodemontwikkeling nihil zal zijn. Ook voor de Boven-Rijn lijkt het effect van de laatste normalisatie van de rivier zelf en van de laatste normalisatie van benedenstroomse riviervakken op het bed tussen de kribkoppen reeds tot stand gekomen zijn. Wel is deze conclusie deels gebaseerd op gegevens van het OLR i.p.v. de bodemligging (gegevens van de bodemligging in de periode 1890 - 1934, dat is de periode direct na de voltooiing van de normalisatie, zijn niet aanwezig).

Een zeer onzekere factor is de aanvoer van sediment vanuit Duitsland naar de Boven-Rijn, zeker ook ten aanzien van toekomstige ontwikkelingen. Als beschreven in Paragraaf 5.6 zijn voor deze rivier mogelijk op korte termijn maatregelen nodig, temeer daar ook in de Boven-Rijn bij voortgaande bodemdaling de eerste problemen zullen ontstaan, namelijk de bevaarbaarheid bij laagwater, vooral als gevolg van de drempel in de rivier bij Emmerich.

In dit hoofdstuk zal kort ingegaan worden op twee mogelijke maatregelen, namelijk een maatregel om de bodemdaling te stoppen (verlagen en/of inkorten van kribben) en een maatregel om de bodemdaling te compenseren (zandsuppleties).

6.2 Verlagen en/of inkorten van kribben

Een mogelijke maatregel om bodemdaling te stoppen is het verbreden van het bed tussen de kribkoppen door het inkorten van de kribben. Hiermee wordt een gedeelte van het uiteindelijke effect van de normalisatie geneutraliseerd. Het verlagen van kribben is een vergelijkbare maatregel.

De Boven-Rijn heeft in totaal ongeveer 1000 kribben, waarvan ongeveer 38 op Duits grondgebied. Het inkorten van een krib wordt ruw geschat op ongeveer 70.000 euro (*f* 150.000,-) per krib; dit betekent dat deze maatregel in totaal ongeveer 70 miljoen euro (*f* 150 miljoen) kost. Het verlagen van een krib wordt ruwweg geschat op zo'n 35.000 euro (*f* 75.000,-) per krib; deze maatregel kost dus in totaal ongeveer 35 miljoen euro (*f* 75 miljoen). Uit kosten oogpunt is het verlagen dus te prefereren boven het inkorten.

6.3 Zandsuppleties

In Paragraaf 4.6 is uitgerekend dat het gedeelte van de in de Boven-Rijn in de periode 1965 - 1990 is opgetreden bodemdaling welke niet het gevolg is van baggerwerk, overeenkomt met een zandvracht van 79.000 m³/jaar. Dus als de bodemdaling in het zelfde tempo als in de periode 1965 - 1990 zou doorgaan, waar het niet naar uitziet, is 'slechts' 79.000 m³/jaar sediment benodigd om de bodemdaling te compenseren.

Als eerder beschreven is de winning van zand en grind vanuit het zomerbed van de Rijntakken niet meer toegestaan. Alleen benedenstrooms van Zaltbommel wordt jaarlijks een vergunning afgeven om 180.000 m³ sediment in de rivier te winnen. Van het gewonnen zand wordt de grove fractie weer teruggestort omdat dat sediment commercieel niet aantrekkelijk is. In plaats van terugstorten zou dit sediment echter ook relatief goedkoop naar de Boven-Rijn gevaren kunnen worden, om daar te worden gestort in het kader van de hierboven voorgestelde suppleties. Indien de kosten voor overslag, transport en stort op 7 euro/m³ (*f* 15,-/m³) worden geschat, komen de kosten van deze maatregel uit op ongeveer 550.000 euro (*f* 1.200.000) per jaar. Dit bedrag is mogelijk wat hoger. Immers de grove fractie van het sediment van de Waal benedenstrooms van Zaltbommel is nog wel fijner dan het sediment waaruit het bed van de Boven-Rijn bestaat. Dit betekent dat het wat sneller afgevoerd zou kunnen worden dan het sediment van de Boven-Rijn, als gevolg waarvan de efficiency van de maatregel wat afneemt.

6.4 Discussie

In Paragraaf 6.1 zijn de totale bouwkosten voor het verlagen van de kribben in de Boven-Rijn geschat op 35 miljoen euro (*f* 75 miljoen). Bij een rentestand van iets meer dan 5% is dat ongeveer 1,8 miljoen euro (*f* 4,0 miljoen) per jaar. Dit bedrag is aanzienlijk hoger dan de in Paragraaf 6.3 geschatte 550.000 euro (*f* 1,2 miljoen) per jaar voor suppletie. De conclusie is duidelijk: suppletie van grind en zand is aanzienlijk goedkoper. Daar bovendien een voortgaande bodemdaling en de mate waarin onzeker is, mogelijk is deze in de Boven-Rijn ook tot stilstand gekomen, of aanzienlijk gereduceerd, heeft sedimentsuppletie ook vanuit dit aspect de voorkeur. Immers met suppletie van grind en zand kan om de paar jaar de in die periode opgetreden bodemdaling relatief nauwkeurig gecompenseerd worden. De maatregel is veel flexibeler dan het verlagen van de kribben.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Inleiding

De afgelopen 150 jaar is een groot aantal ingrepen gepleegd aan de Nederlandse Rijntakken: de rivieren zijn genormaliseerd en vele bochten zijn afgesneden. Daarnaast zijn er enorme hoeveelheden zand en grind gewonnen. Mogelijk is ook de sedimentaanvoer bij Lobith verminderd door ingrepen in de Niederrhein in Duitsland. Deze ingrepen hebben geleid tot een forse daling van het bed tussen de koppen van de kribben in een aantal riviertrajecten. In de onderhavige studie is plausibel gemaakt dat het overgrote deel van de opgetreden bodemdalingen is teweeggebracht door baggerwerk. Daarnaast is aangetoond dat het gedeelte van de bodemdalingen dat niet is gebaggerd verklaard kan worden door de overige gepleegde ingrepen. Vervolgens is ingegaan op de vraag in hoeverre de bodemdaling zonder ingrijpen nog door zal gaan, en zo ja in welke mate. Met riviermorfologische basistheorieën zijn de uiteindelijke effecten afgeschat op de waterdiepte en het bodemverhang van de laatste normalisaties, het in gebruik nemen van de stuw bij Driel, de in de twintigste eeuw uitgevoerde bochtafsnijdingen en van een eventueel verminderd sedimentaanvoer bij Lobith als gevolg van ingrepen in de Niederrhein.

In dit hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen resulterend uit deze studie samengevat.

7.2 Conclusies

Ten aanzien van de effecten van de laatste uitgevoerde normalisaties voorspellen de toegepaste morfologische basistheorieën voor IJssel, Lek en Neder-Rijn en Waal uiteindelijke bodemdalingen die overeenkomen met de in de periode sinds de laatste normalisatie tot 1990 ontstane bodemdalingen van deze riviertakken. De theoretische bodemdaling van de Boven-Rijn komt overeen met de sinds 1930 waargenomen bodemontwikkeling. Echter, omdat in de periode 1890 - 1934 er geen verandering van het OLR op de Boven-Rijn is geweest, is de sedert 1930 geconstateerde bodemdaling ongeveer gelijk aan die opgetreden na 1890, dat is na de voltooiing van de normalisatie van de Boven-Rijn.

Deze constatering zou erop kunnen wijzen dat de bodemdalingen als gevolg van de in het verleden gepleegde ingrepen tot staan zijn gekomen. Grote onzekerheid hierbij is echter dat de morfologische tijdschaal van met name de IJssel, Lek en Neder-Rijn en Waal zo groot is (orde van grootte van vele eeuwen, zie Paragraaf A.9) dat het feitelijk onvoldoende is alleen te kijken naar ingrepen uitgevoerd sedert 1890 en bodemontwikkelingen gemeten na ongeveer 1930. Wel is het zo dat door de intensieve sedimentwinning de periode dat de evenwichtsligging zal worden benaderd aanzienlijk korter is dan de morfologische tijdschaal. Hetzelfde geldt voor de eventuele nog nawerkende effecten van eerdere ingrepen (normalisatie, rivierregulering, bochtafsnijdingen). Door de intensieve zand- en

grindwinning eind negentiende en begin twintigste eeuw, zijn ook zeer waarschijnlijk de beoogde effecten van die ingrepen reeds lang bereikt. Overigens lijken ook de resultaten van de bodempeilingen erop te wijzen dat het bed van de Rijntakken tussen de koppen van de kribben sinds ongeveer 1990 niet verder daalt.

Indien zich in de toekomst veranderingen voordoen in het rivierregime, bijvoorbeeld een niet te verwaarlozen toename van de rivierafvoeren, of een afname van de zandvracht bij Lobith, zal het proces van bodemdalingen uiteraard kunnen doorgaan dan wel opnieuw opgestart kunnen worden.

Maatregelen om eventuele toekomstige bodemdaling te stoppen zijn verlaging van de kribben en sedimentsuppletie. Van deze twee maatregelen is suppletie van grind en zand het goedkoopst. Voor de Boven-Rijn worden de kosten hiervan ruwweg geschat op 550.000 euro (*f* 1,2 miljoen) per jaar indien de bodemdaling in hetzelfde tempo zou doorgaan als de niet door baggerwerk teweeggebrachte daling van het bed tussen de normaallijnen in de periode 1965 - 1990.

7.3 Aanbevelingen

Uit deze studie resulteren de volgende aanbevelingen:

- Het proces van bodemdalingen lijkt te zijn gestopt. De jaarlijkse bodempeilingen in de nabije toekomst zullen hier meer zekerheid over kunnen geven. Deze zullen dus ook om deze reden uitgevoerd, uitgewerkt en geanalyseerd moeten blijven worden.
- Er wordt aanbevolen om een numeriek model als SOBEM/Rijntakken te toetsen aan de in dit rapport beschreven bodemontwikkelingen. Het doel hiervan is SOBEM/Rijntakken geschikt te maken voor toepassing in projecten als Ruimte voor Rijntakken en het grensproject.
- Indien uit toekomstige jaarlijkse bodempeilingen blijkt dat de bodemdalingen (weliswaar in een langzamer tempo t.o.v. het verleden door het stopzetten van de zand- en grindwinning) doorgaan, wordt aangeraden met SOBEM/Rijntakken na te gaan tot hoever de bodemdalingen nog verantwoord door kunnen gaan voordat waterstaatswerken afgeschreven moeten worden of de bevaarbaarheid van de rivier in gevaar komt.
- Uit deze studie met SOBEM/Rijntakken moet voor het gehele Rijnsysteem een minimale bodemligging volgen. Deze zal per Rijntak verschillen en ook over de lengte-as van de rivieren niet constant zijn. Indien door voortgaande bodemdaling in de toekomst dit minimaal niveau bereikt dreigt te worden, wordt als maatregel suppletie van grind en zand aanbevolen. Deze methode is relatief goedkoop en het meest flexibel (alleen vervangen wat is weggeërodeerd).

Bijlage A Effecten van ingrepen in rivieren op korte en lange termijn

A.1 Inleiding

In deze bijlage worden de ontwikkelingen beschreven zoals deze op korte en lange termijn optreden in een rivier nadat hierin een ingreep is gepleegd. Er wordt uitgegaan van een rivier van constante breedte (B_0), bodem- en waterspiegelverhang (i_0), diepte ($d_0 = d_{e0}$), diepte-gemiddelde snelheid ($U_0 = U_{e0}$) en bovenafvoer (Q_0) die uitmondt in een meer met constant peil. Er wordt aangenomen dat de rivier van het M-type is ('mild slope', subkritische stroming), zoals geldt voor de Nederlandse Rijntakken. De rivier is in evenwicht (aangeduid met subscript e) tot aan een moment ($t = t_0$) waarop een ingreep in het riviersysteem wordt gedaan. De voor deze studie van belang zijnde ingrepen zijn: verkleining van de rivierbreedte (normalisatie, zie Bijlage A.2), bochtafsnijding (Bijlage A.3), verandering in debiet (Bijlage A.4), verandering in sedimentaanvoer (Bijlage A.5) en verandering in debiet en sedimentaanvoer (Bijlage A.6). Er wordt bij de berekening van de morfologische effecten van deze ingrepen aangenomen dat de stromingsweerstand van de rivier als gevolg van de ingreep niet zal veranderen. Wat het morfologische effect is als dit wel gebeurt wordt onderzocht in Bijlage A.7.

De waterbeweging past zich veel sneller aan de ingreep aan dan de bodem. Er wordt verondersteld dat op $t = t_0^+$ kort na $t = t_0$ de waterbeweging al is aangepast terwijl de bodem nog zo goed als onveranderd is gebleven. Vervolgens zal de bodem zich gaan aanpassen aan de veranderde waterbeweging. De ontwikkeling die de bodem in eerste instantie ondergaat wordt de ontwikkeling op korte termijn genoemd. Op de lange duur zal de ingreep tot een nieuwe evenwichtssituatie in het riviersysteem leiden. Deze nieuwe evenwichtssituatie wordt de ontwikkeling op lange termijn genoemd. De ontwikkeling op korte termijn kan tegenovergesteld zijn aan die op lange termijn.

De ontwikkelingen worden bekeken aan de hand van de volgende vergelijkingen:

$$Q = Bq = BUd \quad (\text{A.1})$$

$$S = Bs = BmU^n \quad (\text{A.2})$$

$$d_e = \left[\frac{C_f q^2}{i_b g} \right]^{1/3} \quad (\text{A.3})$$

$$(1 - p)B \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (\text{A.4})$$

waarin U de diepte-gemiddelde stroomsnelheid, S het over de rivierbreedte gesommeerde sediment-

transport (transport van korrels), s het specifieke sedimenttransport, C_f een dimensieloze wrijvingscoëfficiënt ($= g/C^2$, C is de coëfficiënt van Chézy), i_b de bodemhelling, q het specifieke debiet, g de zwaartekrachtsversnelling, p de porositeit van de rivierbodem en z_b de verticale positie van de bodem is, en m en n 'constanten' zijn. Vergelijking (A.2) geeft het sedimenttransport als machtsfunctie van de snelheid U . De constante n in (A.2) verschilt van transportformule tot transportformule. Voor enkele bekende transportformules geldt: $n = 3$ bij bodemtransport volgens Bagnold (1963, 1966), $n \approx 4$ bij bodemtransport volgens Meyer-Peter en Müller (1948), $n = 4$ bij suspensietransport volgens Bagnold (1963, 1966), $n = 5$ bij totaaltransport volgens Engelund en Hansen (1967), zie ook Visser (1998) voor een aantal andere transportformules. In dit rapport zal aangenomen worden dat $n \approx 4$. Vergelijking (A.3) kan ook herschreven worden als de vergelijking van Chézy:

$$U_e = \left[\frac{g d_e i_b}{C_f} \right]^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

Vergelijking (A.4) volgt uit een beschouwing van de massabalans van sediment. De vergelijking laat zien dat indien het sedimenttransport verandert, dit veranderingen in de ligging van het rivierbed tot gevolg heeft, en omgekeerd.

A.2 Morfologische ontwikkeling na normalisatie

Door normalisatie wordt het laagwaterbed beperkt tot één geul van constante breedte die over grotere lengte wordt gehandhaafd. In Nederland zijn de rivieren genormaliseerd door op regelmatige afstanden kribben aan te brengen. Deze werden in de tweede fase van de normalisatie aangebracht (daarvoor werden ook al kribben gebouwd, maar meer incidenteel, zie Ploeger, 1992), en vervolgens in de derde fase verlengd. Normalisatie betekent dus versmalling van de breedte van het laagwaterbed van de rivier (feitelijk van het gedeelte tussen de koppen van de kribben).

Er wordt verondersteld dat op $t = t_0$ de rivier tussen punt P_1 en punt P_2 over een relatief lang traject (vak 1, met lengte $L_1 > 4d/i_b$) wordt versmald. De breedte neemt hierbij over het versmalde vak af van B_0 tot B_1 . Op $t = t_0^+$ heeft de waterbeweging zich aangepast aan de nieuwe situatie. Omdat $B_1 q_1 = B_0 q_0$ volgt uit (A.3) dat op $t = t_0^+$:

$$\frac{d_{e1}}{d_{e0}} = \left[\frac{B_0}{B_1} \right]^{2/3} \quad (\text{A.6})$$

Substitutie van (A.6) in (A.5) en (A.2) geeft

$$\frac{S_{e1}}{S_{e0}} = \left[\frac{B_0}{B_1} \right]^{n/3 - 1} \quad (\text{A.7})$$

Figuur A.1 toont het lengteprofiel op $t = t_0^+$. Bovenstrooms van P_1 neemt de waterdiepte met de stroming toe (vanaf d_{e0} tot - indien het traject tussen P_1 en P_2 voldoende lang is - ongeveer d_{e1} , M_1 verhanglijn). De hiervoor benodigde lengte l_e (is aanpassingslengte voor de stroming) is bij benadering gelijk aan

$$l_e \approx \frac{d_e}{i_b} \quad (\text{A.8})$$

Voor de Rijntakken met $i_b \approx 10^{-4}$ is l_e dus enige tientallen kilometers groot, afhankelijk van de waterdiepte. In de zone bovenstrooms van P_1 vertraagt de stroming dus; hier zal aanvankelijk aanzanding plaatsvinden. Voor $n \approx 4$ volgt uit (A.7) dat over het versmalde gedeelte de evenwichtswaarde van het sedimenttransport S_{e1} is toegenomen t.o.v. de oorspronkelijke waarde S_{e0} . Dit betekent dat als $L_1 \geq l_e$ het sedimenttransport juist benedenstrooms van P_1 zal toenemen tot ongeveer S_{e1} en dus dat er in dit gebied erosie zal plaatsvinden. Verder benedenstrooms maar nog voor P_2 neemt de waterdiepte af van ongeveer d_{e1} tot d_{e0} (M_2 verhanglijn) en versnelt de stroming dus ($\partial U/\partial x > 0$). In deze zone zal dus ook erosie plaatsvinden. Als $L_1 < l_e$ versnelt de stroming over het hele versmalde traject en vindt er dus over dit hele vak erosie plaats.

Na verloop van tijd zal door de bodemdaling in het versmalde traject de waterstand er dalen, en dus ook bovenstrooms ervan; het gevolg is dat in deze bovenstroomse zone de aanvankelijke aanzanding afneemt, en uiteindelijk overgaat in erosie.

Op de lange duur (theoretisch $t \rightarrow \infty$) zal zich een nieuw evenwicht instellen, met snelheid U_1 , waterdiepte d_1 , bodem- en waterspiegelverhang i_1 en sedimenttransport S_1 in het versmalde gedeelte. Omdat $S_0 = S_1$ volgt uit (A.2):

$$B_1 m U_1^n = B_0 m U_0^n \quad (\text{A.9})$$

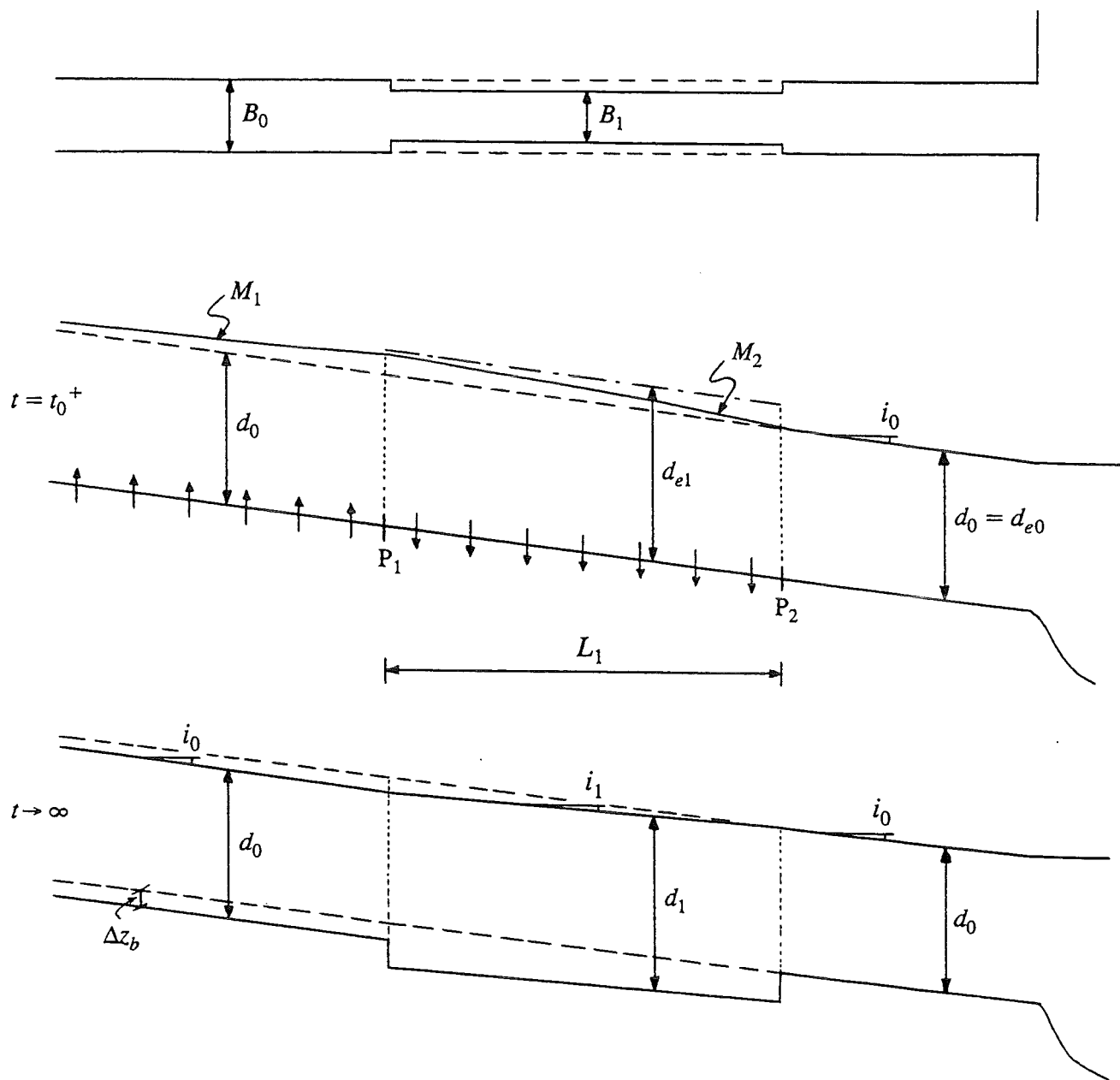
zodat

$$\frac{U_1}{U_0} = \left(\frac{B_0}{B_1} \right)^{1/n} \quad (\text{A.10})$$

Uit (A.1) volgt nu:

$$\frac{d_1}{d_0} = \left(\frac{B_0}{B_1} \right)^{1-1/n} \quad (\text{A.11})$$

De verhouding tussen de verhangen volgt uit substitutie van (A.10) en (A.11) in (A.5):



Figuur A.1 Lengteprofiel kort na voltooiing van de riviersversmalling tussen P_1 en P_2 ($t = t_0^+$) en in de nieuwe evenwichtssituatie ($t \rightarrow \infty$).

$$\frac{i_1}{i_0} = \left(\frac{B_1}{B_0} \right)^{1-3/n} \quad (\text{A.12})$$

Normalisatie leidt tot verdieping van het versmalde traject dat ook een kleiner verhang krijgt. Als gevolg van deze afname van het verhang zal de bodem van het bovenstroomse traject uiteindelijk met Δz_b zakken (zie Figuur A.1):

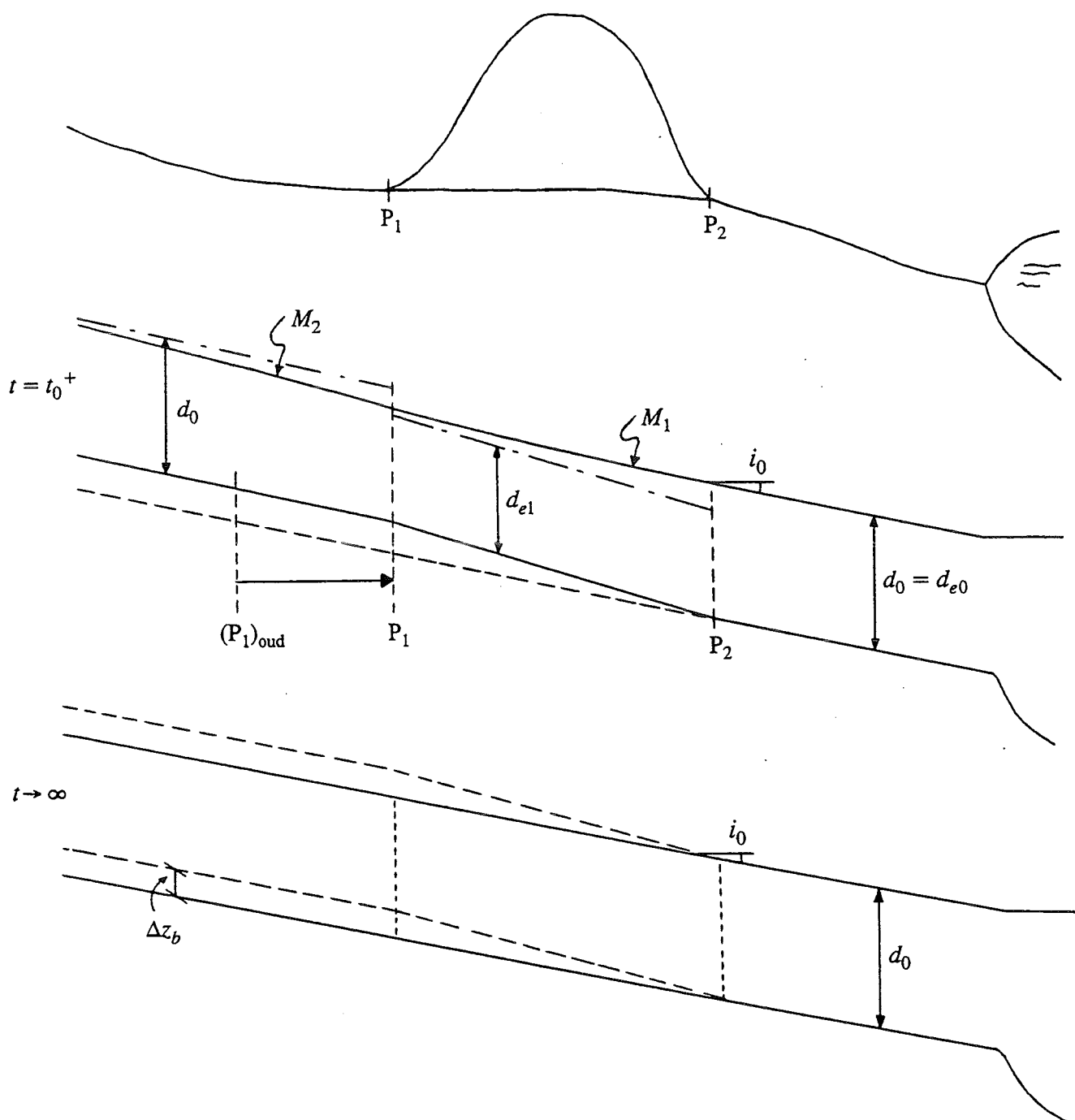
$$\Delta z_b = (i_1 - i_0)L_1 \quad (\text{A.13})$$

A.3 Morfologische ontwikkeling na bochtafsnijding

Door bochtafsnijding wordt de rivier korter (met ΔL), als gevolg waarvan het verhang over het ingekorte riviertraject toeneemt (zie Figuur A.2). Door deze toename van het verhang neemt de evenwichtsdiepte d_{e1} over het ingekorte vak af, zie (A.3). Figuur A.2 toont ook het lengteprofiel op $t = t_0^+$. Bovenstrooms van P_1 neemt de waterdiepte met de stroming af, van d_{e0} tot een waarde die groter blijft dan de evenwichtswaarde d_{e1} van het ingekorte traject. Immers de bochtafsnijdingen in de Nederlandse Rijntakken, waarvan hier de effecten worden bekeken (die in de IJssel, zie Tabel 2.1), hebben de rivier 4 km en 4,6 km korter gemaakt, waarden aanzienlijk kleiner dan de aanpassingslengte l_e van een verhanglijn op de IJssel. Dit houdt in dat direct na de realisatie van de bochtafsnijding de stroming bovenstrooms ervan versnelt ($\partial U/\partial x > 0$), als gevolg waarvan het sedimenttransport hier met de stroom mee toeneemt ($\partial S/\partial x > 0$), met volgens (A.4) bodemdaling ($\partial z_b/\partial t < 0$) als gevolg. Benedenstrooms van P_1 neemt de waterdiepte weer toe, en dus de stroomsnelheid af. Dit betekent dat hier aanvankelijk sedimentatie optreedt. Na verloop van tijd, als de bodemdaling bovenstrooms van P_1 zich voortzet, zal de sedimentatie langs het ingekorte traject overgaan in erosie.

Op de zeer lange duur (theoretisch $t \rightarrow \infty$) zal zich een nieuw evenwicht instellen, met snelheid, waterdiepte, bodem- en waterspiegelverhang gelijk aan de oorspronkelijk waarden, maar waarbij de bodem bovenstrooms van P_1 met Δz_b gezakt is ten opzichte van de oorspronkelijke ligging (zie Figuur A.2):

$$\Delta z_b = i_0 \Delta L \quad (\text{A.14})$$



Figuur A.2 Lengteprofiel kort na voltooiing van de bochtafsnijding tussen P_1 en P_2 ($t = t_0^+$) en in de nieuwe evenwichtssituatie ($t \rightarrow \infty$).

A.4 Morfologische ontwikkeling na verandering in debiet

Het effect van een debietverandering zal bekeken worden aan de hand van het geval van een continue lozing in punt P in een rivier van constante breedte (B_0), diepte ($d_0 = d_{e0}$), diepte-gemiddelde snelheid ($U_0 = U_{e0}$) en bovenafvoer (Q_0) die uitmondt in een meer met constant peil. De lozing bedraagt ΔQ . Omdat het debiet Q_1 in vak 1 benedenstrooms van P groter is dan Q_0 volgt uit (A.3) dat de evenwichtsdiepte in vak 1 groter is dan voorheen (en dan die in vak 0, welke constant blijft). Het waterniveau stelt zich dan in volgens twee verhanglijnen M_1 en M_2 , zie Figuur A.3. Bovenstrooms van P is de stroming vertragend ($\partial U/\partial x < 0$) als gevolg waarvan het sedimenttransport hier met de stroom mee afneemt ($\partial S/\partial x < 0$). Hier treedt dus aanzanding op. Benedenstrooms van P geldt het tegengestelde: daar treedt erosie op. Door deze erosie neemt de bodemhelling in vak 1 op den duur af, waardoor d_{e1} verder toeneemt.

Op de lange duur (theoretisch $t \rightarrow \infty$) zal zich een nieuw evenwicht instellen, met snelheid U_1 , waterdiepte d_1 , bodem- en waterspiegelverhang i_1 en sedimenttransport S_1 benedenstrooms van P. Omdat $S_0 = S_1$ volgt uit (A.2):

$$BmU_1^n = BmU_0^n \quad (\text{A.15})$$

zodat

$$U_1 = U_0 \quad (\text{A.16})$$

Uit (A.1) volgt nu:

$$\frac{d_1}{d_0} = \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_0} \quad (\text{A.17})$$

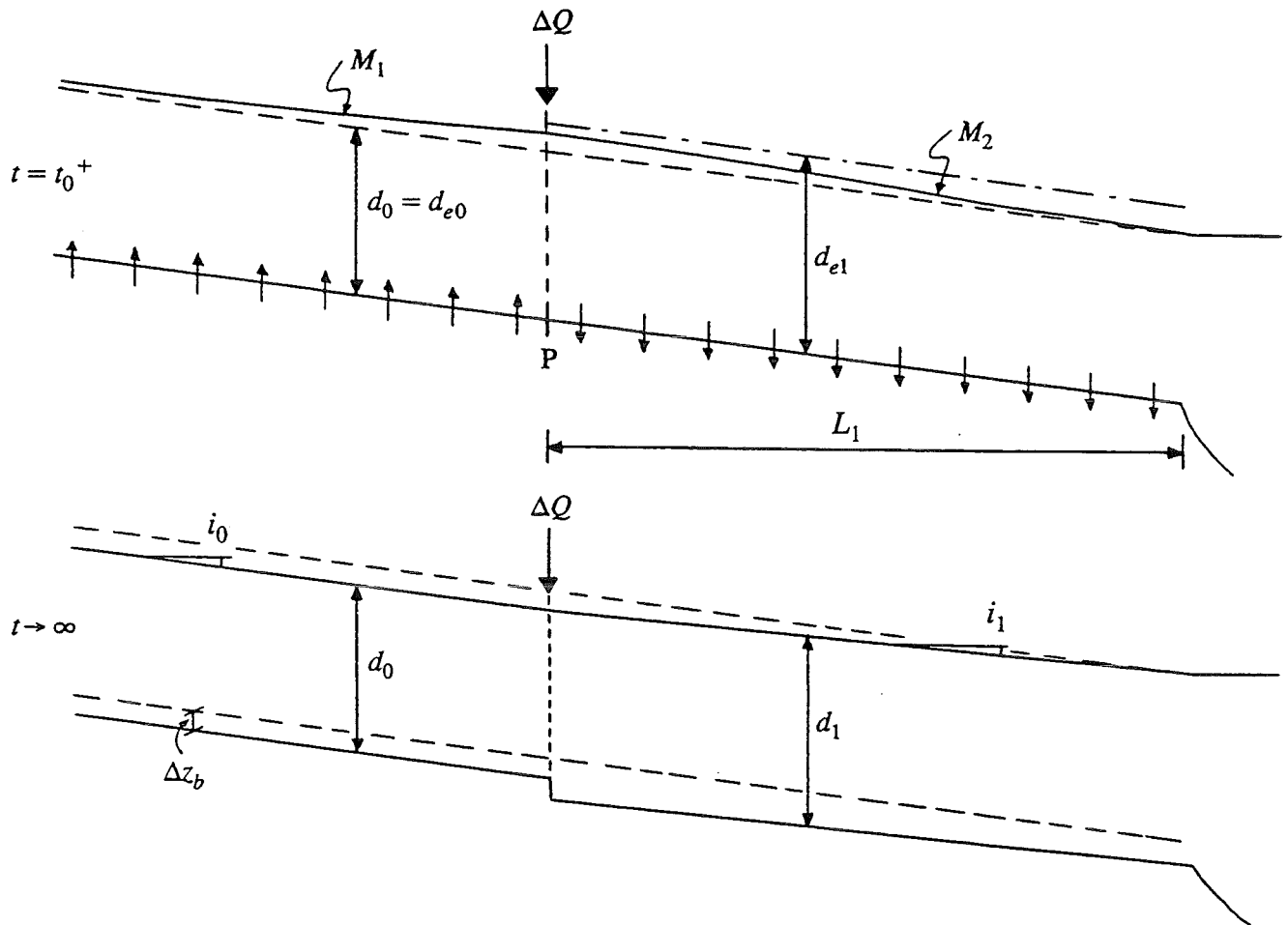
De verhouding tussen de verhangen kan met (A.5) bepaald worden:

$$\frac{i_1}{i_0} = \frac{Q_0}{Q_1} \quad (\text{A.18})$$

Een vergroting van het debiet leidt dus tot verdieping van het traject met de grotere afvoer dat ook een kleiner verhang krijgt (zie Figuur A.3). Als gevolg van deze afname van het verhang zal de bodem van het bovenstroomse traject uiteindelijk met Δz_b zakken (zie Figuur A.3):

$$\Delta z_b = (i_1 - i_0)L_1 \quad (\text{A.19})$$

waarin L_1 de lengte is van het benedenstroomse riviervak.



Figuur A.3 Lengteprofiel kort na het begin van de verandering in de afvoerverdeling bij splitsingspunt P ($t = t_0^+$) en in de nieuwe evenwichtssituatie ($t \rightarrow \infty$).

A.5 Morfologische ontwikkeling na verandering in sedimentaanvoer

Er zijn aanwijzingen dat als gevolg van ingrepen in de Rhein in Duitsland (zie Paragraaf 2.11) de aanvoer van sediment naar de Boven-Rijn is afgenomen. De bouw van stuwen, maar ook dalingen van de rivierbodem als gevolg van mijnzakkingen, zouden daar verantwoordelijk voor kunnen zijn. Helaas zijn geen veldmetingen beschikbaar die dit vermoeden bevestigen. Het is echter duidelijk dat een verminderd sedimentaanvoer vanuit Duitsland tot bodemdaling zal leiden, of misschien samen met de gerealiseerde ingrepen als de normalisatie met name in de Boven-Rijn, Pannerdensch Kanaal en het bovenstroomse traject van de Waal tot bodemdaling heeft geleid. In deze paragraaf zal worden bekeken wat de morfologische gevolgen zijn van een verminderd sedimentaanvoer voor de benedenstroomse Rijntakken.

Het effect van een verminderde sedimentaanvoer zal bekeken worden aan de hand van het geval van een continue onttrekking van zand in punt P uit dezelfde rivier als van de vorige paragrafen. De zandonttrekking bedraagt ΔS en wordt verondersteld te zijn aangevangen op $t = t_0$. In eerste instantie zal als gevolg van deze ingreep de waterbeweging niet veranderen. Dus op $t = t_0^+$ kort na $t = t_0$ is de waterbeweging nog niet veranderd (zie Figuur A.4). Wel zal de stroming direct benedenstrooms van P zand van de bodem opnemen om het afgenomen sedimenttransport aan te vullen tot de evenwichtswaarde. Deze opname zal zich in eerste instantie beperken tot een relatief kleine zone benedenstrooms van P. De resulterende bodemdaling zal ook de waterspiegel doen dalen, als gevolg waarvan verhanglijnen ontstaan. Bovenstrooms van P wordt de stroming dan versnellend ($\partial U/\partial x > 0$) als gevolg waarvan het sedimenttransport hier met de stroom mee toeneemt ($\partial S/\partial x > 0$). Hier begint dus ook opname van sediment en bodemdaling. Door de bodemdaling benedenstrooms van P geldt hier het tegengestelde. Daar vertraagt de stroming, als gevolg waarvan de opname van zand (die hier plaatsvindt als gevolg van de zandonttrekking bij P) afneemt.

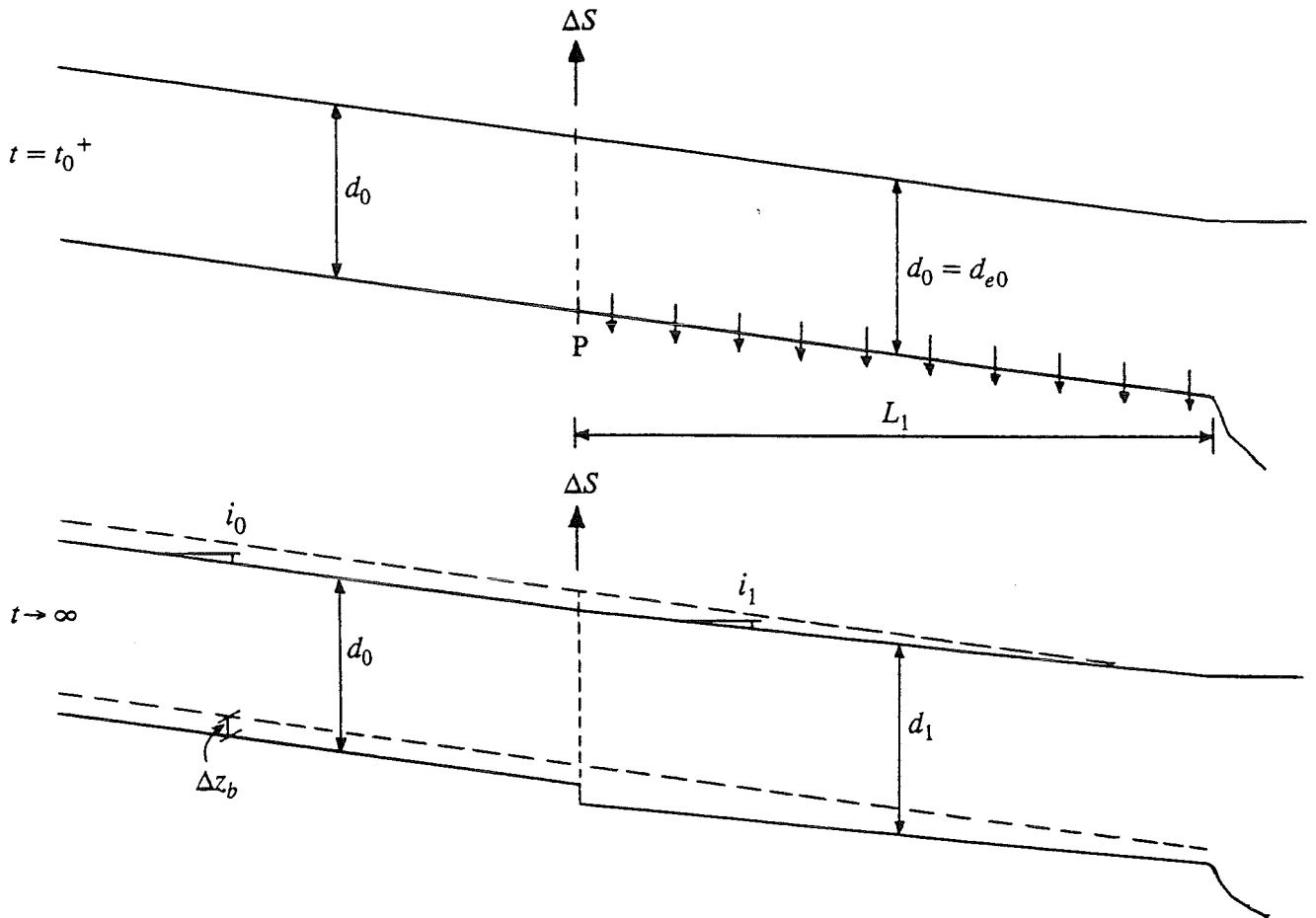
Op de lange duur (theoretisch $t \rightarrow \infty$) zal zich een nieuw evenwicht instellen, met snelheid U_1 , waterdiepte d_1 , bodem- en waterspiegelverhang i_1 en sedimenttransport S_1 benedenstrooms van P. Uit de verhoudingen tussen de sedimenttransporten

$$\frac{S_1}{S_0} = \frac{Bm U_1^n}{Bm U_0^n} \quad (\text{A.20})$$

volgt

$$\frac{U_1}{U_0} = \left[\frac{S_1}{S_0} \right]^{1/n} \quad (\text{A.21})$$

Omdat $Q_1 = Q_0$ volgt nu voor de waterdiepten:



Figuur A.4 Lengteprofiel kort nadat de sedimentaanvoer bij P is afgenomen ($t = t_0^+$) en in de nieuwe evenwichtssituatie ($t \rightarrow \infty$).

$$\frac{d_1}{d_0} = \left[\frac{S_0}{S_1} \right]^{1/n} \quad (\text{A.22})$$

De verhouding tussen de verhangen kan met (A.5) bepaald worden:

$$\frac{i_1}{i_0} = \left[\frac{S_1}{S_0} \right]^{3/n} \quad (\text{A.23})$$

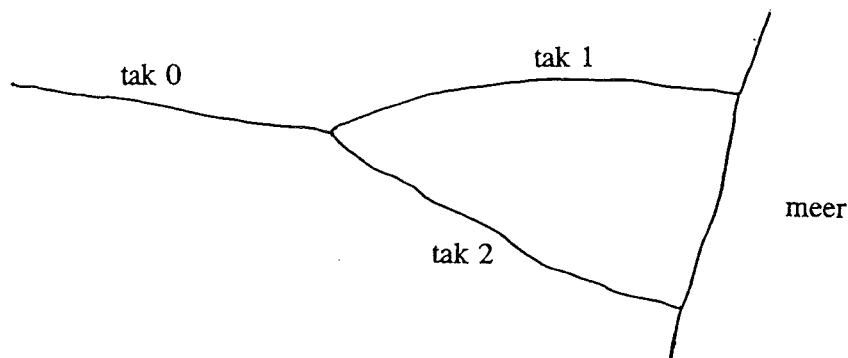
Bij onttrekking van sediment is de waterdiepte benedenstrooms groter dan bovenstrooms en het verhang is benedenstrooms kleiner dan bovenstrooms. Als gevolg van de afname van het verhang benedenstrooms zal de bodem van het bovenstroomse traject uiteindelijk met Δz_b zakken (zie Figuur A.4):

$$\Delta z_b = (i_1 - i_0)L_1 \quad (\text{A.24})$$

waarin L_1 de lengte is van het benedenstroomse riviervak.

A.6 Morfologische ontwikkeling na verandering in debiet en sedimentaanvoer

Indien de debietverdeling bij een splitsingspunt verandert, zal over het algemeen ook de verdeling van het sedimenttransport over de twee takken veranderen. Als gevolg hiervan zullen de bodems van beide takken alsmede ook die van het bovenstroomse vak hierop anders reageren dan wanneer alleen de debietverdeling verandert. Het effect van een verandering in debiet en sedimentaanvoer zal bekeken worden aan de hand van het geval van een rivier (tak 0) die in punt P zich splitst in twee takken (tak 1 en tak 2) die beide uitmonden in een meer met constant peil (zie Figuur A.5). Er wordt verondersteld dat alle riviervakken een constante breedte hebben en in evenwicht zijn (tak 0 heeft een breedte B_0 , diepte $d_0 = d_{e0}$, diepte-gemiddelde snelheid $U_0 = U_{e0}$ en bovenafvoer Q_0 , voor takken 1 en 2 worden dezelfde symbolen gebruikt, maar dan met de respectievelijk ondergeschreven 1 en 2). Er wordt verondersteld dat de totale breedte van takken 1 en 2 groter is dan die van tak 0, als gevolg waarvan de waterdiepten in takken 1 en 2 kleiner zijn dan de d_0 van tak 0. Op $t = t_0$ verandert de afvoerverdeling bij punt P, d.w.z. de afvoer van vak 1 wordt ΔQ groter en de afvoer van vak 2 wordt ΔQ kleiner, als gevolg waarvan de sedimentverdeling bij het splitsingspunt zodanig verandert dat het sedimenttransport van tak 1 met ΔS toeneemt en dat van tak 2 met ΔS afneemt. Omdat het nieuwe debiet Q_{11} in vak 1 benedenstrooms van P groter is dan het oude debiet Q_1 volgt uit (A.3) dat de evenwichtsdiepte in vak 1 (d_{e11}) groter is dan voorheen (d_{e1}), zie Figuur A.6; de evenwichtsdiepte in vak 0 verandert niet. Het waterniveau stelt zich dan weer (zie Paragraaf A.4) in volgens twee verhanglijnen M_1 en M_2 . Bovenstrooms van P is de stroming vertragend ($\partial U/\partial x < 0$) als gevolg waarvan het



Figuur A.5 Vertakking van riviervak 0 in twee takken 1 en 2 bij splitsingspunt P. Beide takken stromen uit in een meer met vaste waterstand.

sedimenttransport hier met de stroom mee afneemt ($\partial S/\partial x < 0$). Hier treedt dus aanzanding op. Benedenstrooms van P geldt het tegengestelde: daar versnelt de stroming en treedt dus erosie op, ondanks de toegenomen sedimentaanvoer bij P. Door deze erosie neemt de bodemhelling in vak 1 na verloop van tijd af, waardoor d_{e11} verder toeneemt.

Op de lange duur (theoretisch $t \rightarrow \infty$) zal zich een nieuw evenwicht instellen, met snelheid U_{11} , watterdiepte d_{11} , bodem- en waterspiegelverhang i_{11} en sedimenttransport S_{11} in tak 1. Uit de verhoudingen tussen de sedimenttransporten

$$\frac{S_{11}}{S_1} = \frac{Bm(U_{11})^n}{Bm(U_1)^n} \quad (\text{A.25})$$

volgt

$$\frac{U_{11}}{U_1} = \left[\frac{S_{11}}{S_1} \right]^{1/n} \quad (\text{A.26})$$

Substitutie van (A.25) in de verhouding tussen de debieten

$$\frac{Q_{11}}{Q_1} = \frac{BU_{11}d_{11}}{BU_1d_1} \quad (\text{A.27})$$

geeft

$$\frac{d_{11}}{d_1} = \frac{Q_{11}}{Q_1} \left[\frac{S_1}{S_{11}} \right]^{1/n} \quad (\text{A.28})$$

waarin $Q_{11} = Q_1 + \Delta Q$. De verhouding tussen het nieuwe verhang i_{11} en het oude verhang i_1 volgt uit (A.5):

$$\frac{i_{11}}{i_1} = \frac{(U_{11})^2 d_1}{(U_1)^2 d_{11}} \quad (\text{A.29})$$

Substitutie van (A.26) en (A.28) in (A.29) geeft

$$\frac{i_{11}}{i_1} = \frac{Q_1}{Q_{11}} \left[\frac{S_{11}}{S_1} \right]^{3/n} \quad (\text{A.30})$$

Een gangbare relatie voor splitsingspunten is dat de verhouding tussen de specifieke sedimenttransporten over de beide takken evenredig is met de macht van de verhouding tussen de specifieke debieten. Dit betekent dat ook

$$\frac{s_{11}}{s_1} = \left[\frac{q_{11}}{q_1} \right]^p \quad (\text{A.31})$$

waarin p een coëfficiënt is. Substitutie van (A.31) in (A.28) en (A.30) geeft

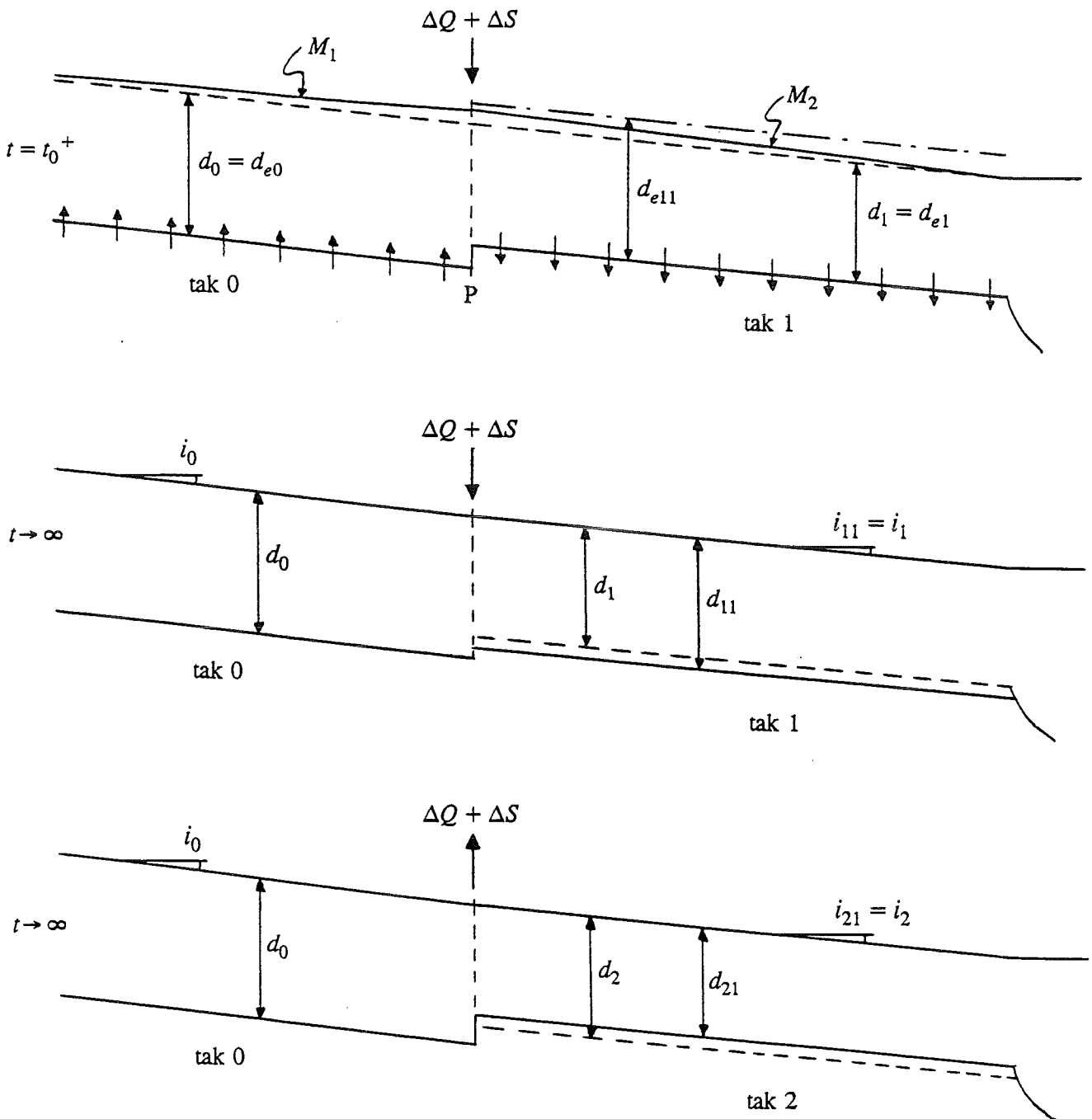
$$\frac{d_{11}}{d_1} = \left[\frac{Q_{11}}{Q_1} \right]^{1-p/n} \quad (\text{A.32})$$

$$\frac{i_{11}}{i_1} = \left[\frac{Q_{11}}{Q_1} \right]^{3p/n-1} \quad (\text{A.33})$$

Uit (A.1), (A.2) en (A.3) volgt dat, indien C_f en i_b weinig variëren (en bijna constant zijn), q ongeveer evenredig is met U^3 . Dit betekent met (A.31) en (A.1) dat de orde van grootte van p gelijk is aan $n/3$. Uit (A.32) volgt nu dat de grotere afvoer van tak 1 ($Q_{11} > Q_1$) uiteindelijk tot een grotere waterdiepte in deze tak zal leiden en dat het nieuwe verhang in tak 1 (i_{11}) zowel groter (als $p > n/3$) als kleiner ($p < n/3$) kan zijn dan het oude verhang (i_1) en hier weinig van verschilt (zoals verondersteld). Dit betekent dat de bodem van het bovenstroomse traject als gevolg van de ontwikkeling van tak 1 (met lengte L_1) uiteindelijk zowel kan zakken als omhoog kan gaan, en wel met Δz_{b1} :

$$\Delta z_{b1} = (i_{11} - i_1)L_1 \quad (\text{A.34})$$

Op de tak (vak 2) waar de afvoer met ΔQ afneemt gebeurt globaal het tegengestelde aan wat zich in



Figuur A.6 Lengteprofiel kort na het begin van de verandering in de verdeling van debiet en sedimenttransport bij splitsingspunt P ($t = t_0^+$) en in de nieuwe evenwichtssituatie ($t \rightarrow \infty$), voor het geval dat de bodemhellingen van takken 1 en 2 niet veranderen.

vak 1 morfologisch afspeelt. In de uiteindelijke evenwichtssituatie wordt de waterdiepte d_{21} en het verhang i_{21} hier respectievelijk

$$\frac{d_{21}}{d_2} = \frac{Q_{21}}{Q_2} \left[\frac{S_2}{S_{21}} \right]^{1/n} \quad (\text{A.35})$$

$$\frac{i_{21}}{i_2} = \frac{Q_2}{Q_{21}} \left[\frac{S_{21}}{S_2} \right]^{3/n} \quad (\text{A.36})$$

waarin $Q_{21} = Q_2 - \Delta Q$. Het nieuwe verhang i_{21} van tak 2 (met lengte L_2) heeft tot gevolg dat de bodem van het bovenstroomse traject uiteindelijk met Δz_{b2} zal zakken of omhoog zal gaan:

$$\Delta z_{b2} = (i_{21} - i_2)L_2 \quad (\text{A.37})$$

In het onderhavige, geïdealiseerde geval moet ook nog gelden:

$$\Delta z_{b1} = \Delta z_{b2} \quad (\text{A.38})$$

In het algemeen zal aan de voorwaarde (A.38) niet worden voldaan.

Een bijzonder geval doet zich voor als $p = n/3$, dus als

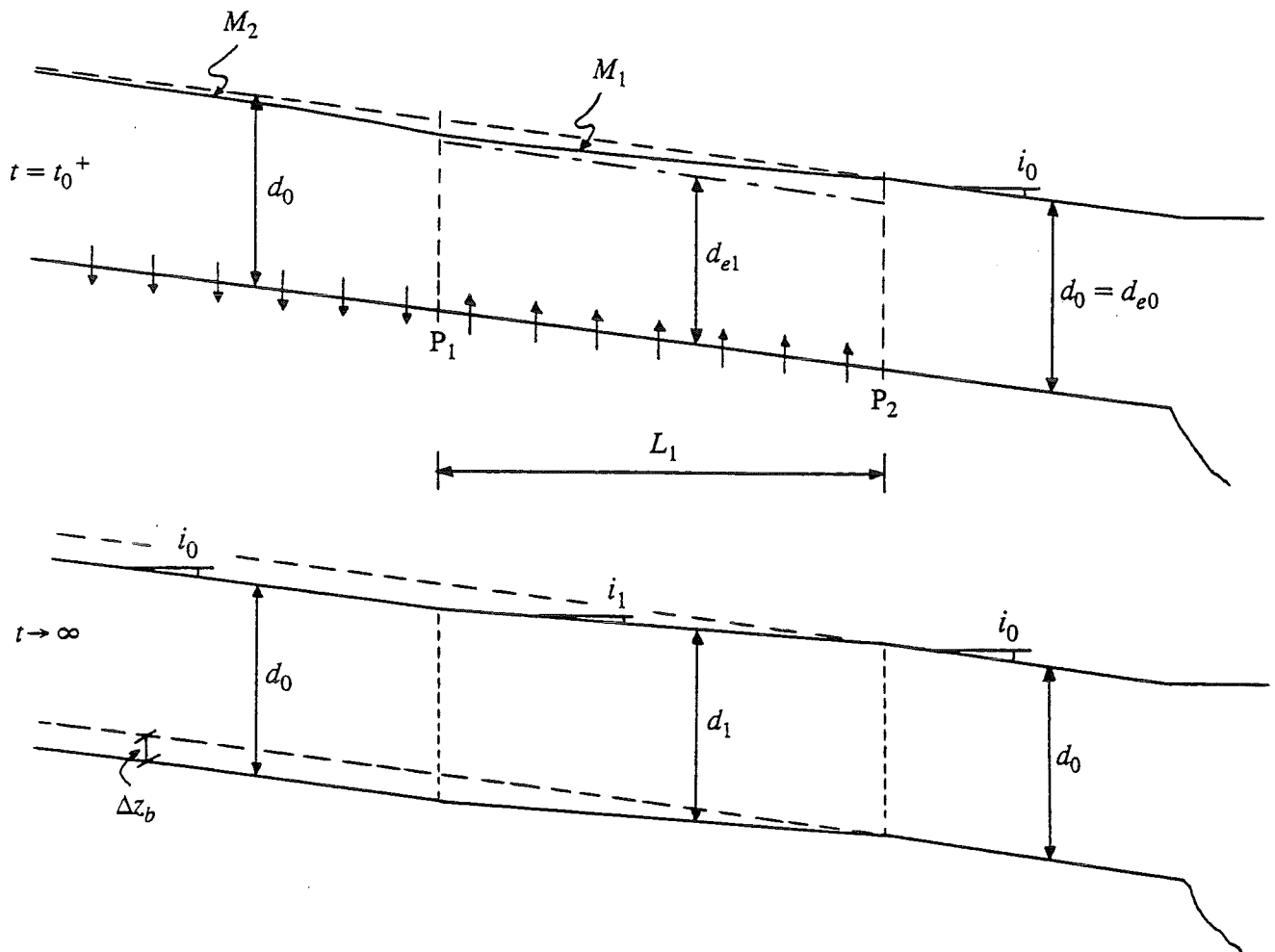
$$\frac{s_{11}}{s_1} = \left[\frac{q_{11}}{q_1} \right]^{4/3} \quad (\text{A.39})$$

Substitutie van (A.39) in (A.28) en (A.30) t/m (A.34) geeft dan achtereenvolgens

$$d_{11}/d_1 = (Q_{11}/Q_1)^{2/3}, \quad i_{11} = i_1, \quad \Delta z_{b1} = 0 \quad (\text{A.40})$$

$$d_{21}/d_2 = (Q_{21}/Q_2)^{2/3}, \quad i_{21} = i_2, \quad \Delta z_{b2} = 0 \quad (\text{A.41})$$

In het bijzondere geval dat (A.39) geldt veranderen de bodemhellingen van beide takken 1 en 2 niet, en wordt dus ook aan de voorwaarde (A.38) voldaan. In Figuur A.6 zijn voor dit geval de lengteprofielen van takken 1 en 2 in de uiteindelijke evenwichtssituaties weergegeven. De vergelijkingen voor bodemtransport ($n = 3$) van Bathurst et al. (1987) en Rickenmann (1991), zie Visser (1998), voldoen overigens aan (A.39). Voorzover bekend aan de auteur, zijn dit de enige sedimenttransportvergelijkingen waarin het sedimenttransport uitgedrukt wordt in het specifieke debiet q .



Figuur A.7 Lengteprofiel kort nadat de stromingsweerstand tussen P_1 en P_2 is afgenomen ($t = t_0^+$) en in de nieuwe evenwichtssituatie ($t \rightarrow \infty$).

A.7 Morfologische ontwikkeling na verandering in bodemruwheid

Volgens Struijk (1994) is de bodemruwheid van de IJssel, Neder-Rijn, Pannerdensch Kanaal en Waal bij de splitsingspunten in de periode 1934 - 1990 afgenomen, d.w.z. van gemiddeld $C_f \approx 0,0055$ (coëfficiënt van Chézy $C \approx 42 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) bij OLR (met een gemiddelde waterdiepte $d \approx 3,3 \text{ m}$, zie Rijks-waterstaat, 2000) in 1934 tot gemiddeld $C_f \approx 0,0031$ ($C \approx 56 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) bij OLR in 1969, om vervolgens weer toe te nemen tot gemiddeld $C_f \approx 0,0036$ ($C \approx 52 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) bij OLR in 1991. De vergelijking voor C_f kan geschreven worden als:

$$C_f = \left[\frac{0,4}{\ln \frac{12d}{k}} \right]^2 \quad (\text{A.42})$$

waarin k de ruwheidshoogte is. Substitutie van $C_f \approx 0,0055$ en $d \approx 3,3 \text{ m}$ in (A.42) geeft een ruwheidshoogte $k \approx 0,18 \text{ m}$, substitutie van $C_f \approx 0,0031$ en $d \approx 3,3 \text{ m}$ in (A.42) geeft een ruwheidshoogte $k \approx 0,030 \text{ m}$ en evenzo geeft substitutie van $C_f \approx 0,0036$ en $d \approx 3,3 \text{ m}$ in (A.42) een ruwheidshoogte $k \approx 0,050 \text{ m}$. Bij waterdiepten die ongeveer bij dominante afvoer optreden ($d \approx 5,8 \text{ m}$, zie Tabellen 5.1 t/m 5.5) worden de waarden voor C_f bij deze ruwheidshoogten $C_f \approx 0,0045$ bij $k \approx 0,18 \text{ m}$, $C_f \approx 0,0027$ bij $k \approx 0,030 \text{ m}$ en $C_f \approx 0,0031$ bij $k \approx 0,050 \text{ m}$. De door Struijk (1994) gerapporteerde afname van C_f bij de splitsingspunten bij OLR komt neer op een afname van $C_f \approx 0,0045$ tot $C_f \approx 0,0031$ bij dominante afvoer.

Er wordt verondersteld dat op $t = t_0$ de stromingsweerstand van de rivier tussen punt P_1 en punt P_2 over een relatief lang traject (vak 1, met lengte L_1 , zie Figuur A.7) wordt verlaagd (hoe doet niet ter zake). De weerstand neemt hierbij over vak 1 af van C_{f0} tot C_{f1} . Op $t = t_0^+$ heeft de waterbeweging zich aangepast aan de nieuwe situatie; de ligging van het rivierbed is dan nog niet veranderd. Omdat $q_1 = q_0$ volgt uit (A.3) dat op $t = t_0^+$:

$$\frac{d_{e1}}{d_{e0}} = \left[\frac{C_{f1}}{C_{f0}} \right]^{1/3} \quad (\text{A.43})$$

Substitutie van (A.43) in (A.5) en (A.2) geeft

$$\frac{S_{e1}}{S_{e0}} = \left[\frac{C_{f0}}{C_{f1}} \right]^{n/3} \quad (\text{A.44})$$

Figuur A.7 toont het lengteprofiel op $t = t_0^+$. Bovenstrooms van P_1 neemt de waterdiepte met de stroming af (vanaf d_{e0} tot - indien het traject tussen P_1 en P_2 voldoende lang is - ongeveer d_{e1} , M_2 verhanglijn). De hiervoor benodigde lengte l_e is voor de Rijntakken enige tientallen kilometers groot

(zie Paragraaf A.2). In de zone bovenstrooms van P_1 versnelt de stroming dus; hier vindt erosie plaats. Voor $n \approx 4$ volgt uit (A.44) dat over vak 1 de evenwichtswaarde van het sedimenttransport S_{e1} is toegenomen t.o.v. de oorspronkelijke waarde S_{e0} . Dit betekent dat als $L_1 \geq l_e$ het sedimenttransport bij P_1 zal toenemen tot ongeveer S_{e1} . Verder benedenstrooms, maar nog voor P_2 neemt de waterdiepte toe van ongeveer d_{e1} tot d_{e0} (M_1 verhanglijjn) en vertraagt de stroming dus ($\partial U/\partial x < 0$). In deze zone zal dus aanvankelijk aanzanding plaatsvinden. Als $L_1 < l_e$ vertraagt de stroming over het gehele vak 1 en vindt er dus over dit hele vak aanvankelijk aanzanding plaats.

Op de lange duur (theoretisch $t \rightarrow \infty$) zal zich een nieuw evenwicht instellen, met snelheid U_1 , waterdiepte d_1 , bodem- en waterspiegelverhang i_1 en sedimenttransport S_1 in het riviervak met gewijzigde bodemruwheid. Omdat $S_0 = S_1$ volgt uit (A.2)

$$B_1 m U_1^n = B_0 m U_0^n \quad (\text{A.45})$$

zodat

$$\frac{U_1}{U_0} = 1 \quad (\text{A.46})$$

Uit $q_1 = q_0$ volgt nu:

$$\frac{d_1}{d_0} = 1 \quad (\text{A.47})$$

De verhouding tussen de verhangen kan met (A.5) bepaald worden:

$$\frac{i_1}{i_0} = \frac{C_{f1}}{C_{f0}} \quad (\text{A.48})$$

Een verkleining van de stromingsweerstand van een riviervak leidt dus tot een kleiner verhang over het betreffende vak. Als gevolg van deze afname van het verhang zal de bodem van het bovenstroomse traject uiteindelijk met Δz_b zakken (zie Figuur A.7):

$$\Delta z_b = (i_1 - i_0)L_1 \quad (\text{A.49})$$

A.8 Morfologische ontwikkeling na verandering getij aan benedenstroomse rand

In het rivierengebied dat onder invloed van het getij staat, kan de over het dwarsprofiel van het zomerbed gemiddelde stroomsnelheid U geschreven worden als:

$$U = U_0 + \hat{u} \sin \omega t \quad (\text{A.50})$$

waarin U_0 stroomsnelheid in de rivier is als gevolg van de bovenafvoer, \hat{u} de amplitude van het horizontale getij is (beide gemiddeld over het dwarsprofiel van het zomerbed), t de tijd is en ω de getijfrequentie is.

Substitutie van (A.50) in (A.2) geeft:

$$S = BmU^n = \frac{Bm}{T} \int_0^T (U_0 + \hat{u} \sin \omega t)^n dt \quad (\text{A.51})$$

Integratie van (A.51) over een getijperiode T geeft voor $n = 4$:

$$S = BmU_0^4 \left[1 + 3 \left[\frac{\hat{u}}{U_0} \right]^2 + \frac{3}{8} \left[\frac{\hat{u}}{U_0} \right]^4 \right] \quad (\text{A.52})$$

Vergelijking (A.52) laat zien dat het getij een vergrotend effect op het sedimenttransport heeft. Door afsluiting van de Zuiderzee is de sedimenttransportcapaciteit in de benedenloop van de IJssel afgenomen; hetzelfde geldt voor de benedenlopen van Waal en Lek als gevolg van afsluitingen van het Haringvliet en het Volkerak (zie Havinga, 1982).

A.9 Morfologische tijdschaal

De volgende twee bladzijden, overgenomen uit Rijkswaterstaat (2000), bevatten enige informatie over de morfologische tijdschalen van de Rijntakken.

Morfologische tijdschalen

Bron: Voorbereiding ijking Rijntakkenmodel, C.J.Sloff, E.Mosselman, WL delft hydraulics, Q2460

Het tempo waarmee de morfologische processen optreden kan worden afgeleid met behulp van een morfologische tijdschaal. Bij het bestuderen van de beoogde ingrepen kan met deze wijze los van numerieke berekeningen een snelle schatting worden gemaakt van de snelheid waarmee aanpassingen in de riviermorfologie optreden. Morfologische aanpassingen van het lengteprofiel van een rivierbodem hebben zowel een golfkarakter als een diffusiekarakter. Over korte afstanden overheerst het golfkarakter, maar over langere afstanden het diffusiekarakter. Voor de langere afstanden is de morfologische tijdschaal daarom af te leiden uit de morfologische diffusiecoëfficiënt. Voor de beschrijving van de tijdschaal voor de huidige situatie is de afleiding beperkt tot het diffusiekarakter van de rivier, waarbij de korte afstanden (lokale fenomenen) buiten beschouwing worden gelaten.

Desondanks kan worden gesteld dat een analyse voor een tijdschaal gebaseerd op het golfkarakter tot vrijwel dezelfde resultaten leidt. Hierop wordt later ingegaan.

Bij elk afvoerniveau kan de diffusiecoëfficiënt K bepaald worden uit

$$K = \frac{b \cdot s}{3 \cdot i_b}$$

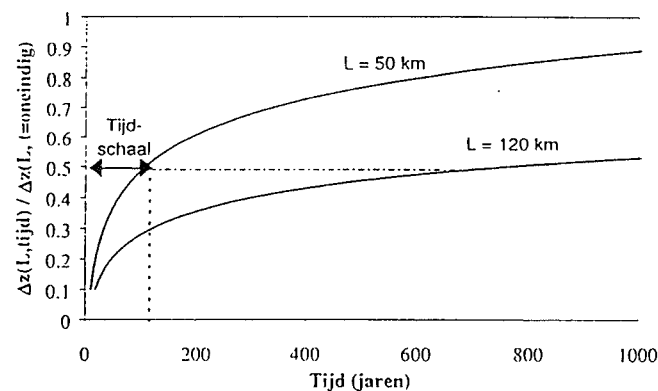
waarin:

- b = exponent in de als machtswet geformuleerde transportvergelijking, die gebruikt wordt als benadering voor de sedimenttransportformule (-)
- K = diffusiecoëfficiënt (m^2/s)
- s = sedimenttransport per eenheid van breedte (m^3/s)
- i_b = verhang (-)

Uit deze overall diffusiecoëfficiënt kan voor een bepaalde trajectlengte L een morfologische tijdschaal T worden afgeleid volgens

$$T = \frac{L^2}{K}$$

Deze tijdschaal is bij benadering gelijk aan de tijd die nodig is voor de helft van de totale ophoging of verdieping van de bodem ten gevolge van een ingreep in de rivier op een afstand L benedenstrooms. In Figuur 9 is ter verduidelijking getoond hoe volgens de diffusieanalogie een bodemverandering Δz zich in de tijd ontwikkelt naar zijn eindwaarde $\Delta z(L, t = \infty)$ wanneer deze wordt veroorzaakt door een ingreep in de rivier op een afstand L benedenstrooms. De tijdschaal T voor $L = 50$ km bedraagt in het figuur circa 110 jaar, en de tijdschaal voor $L = 120$ km bedraagt ongeveer 700 jaar. Voor het samenstellen van het figuur is gebruik gemaakt van benaderingen voor de Bovenrijn (zie ook Tabel 2), waarbij de lengteschaal L ongeveer gelijk is genomen aan respectievelijk 50 km en 120 km.



Ontwikkeling van het een bodemverandering naar de eindwaarde overeenkomstig de diffusieanalogie (schematisch weergegeven voor de Bovenrijn)

Voor de afzonderlijke Rijntakken is een zeer ruwe schatting gemaakt van de relevante parameters en de tijdschaal in Tabel 2:

	Breedte (m)	Verhang (m)	Jaar transport ($10^3 \cdot m^3/jr$)	s (m^2/s)	K (m^2/s)	L (km)	T (jaar)
Bovenrijn (vanaf Lobith)	340	1.00E-04	425	3.96E-05	0.661	6	2
Waal (tot Zaltbommel)	260	1.20E-04	300	3.66E-05	0.508	65	264
Nederrijn (tot Wageningen)	106	1.50E-04	90	2.69E-05	0.299	20	42
IJssel (tot Doesburg)	80	1.10E-04	35	1.39E-05	0.210	20	60
Pannerdens Kanaal	135	4.00E-05	125	2.94E-05	1.223	12	4

Tabel 2 Morfologische tijdschalen voor de Rijntakken (bepaald op basis van de diffusieanalogie)

In deze schatting is er van uitgegaan dat de macht b bij benadering een waarde heeft van 5. Verder zijn trajecten geselecteerd waarvoor kenmerkende grootheden (zoals breedte en verhang) vrij eenduidig zijn af te leiden. Bijvoorbeeld benedenstrooms van Zaltbommel neemt de Waalbreedte geleidelijk toe. De jaartransporten zijn afgeleid uit berekende waarden en historische metingen gerapporteerd in de literatuur (bijvoorbeeld van Til, 1954, Kleinmans) en dus niet afkomstig uit deze studie. Daarnaast is niet uitgegaan van een variatie van de transporten (en dus van de waarde van K) in de tijd.

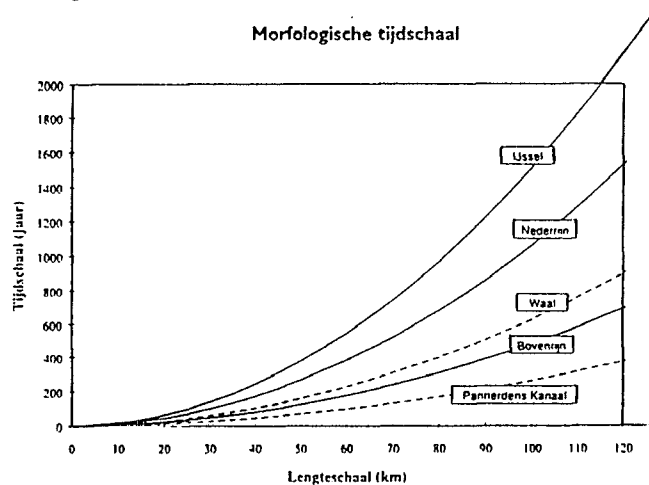
In Tabel 2 is sprake van een aantal relatief korte tijd-/lengteschalen (minder dan 10 jaar en orde enkele kilometers). In dit geval schijnt aan de voorwaarden voor toepassing van de diffusieanalogie niet te zijn voldaan (d.w.z. grote tijd- en lengteschalen). Voor tijdschalen op basis van het golfkarakter van de morfologie geldt:

$$T = \frac{L}{c} \quad (7)$$

waarin c = de karakteristieke voortplantingssnelheid van morfologische verstoringen. Globaal geldt, dat wil zeggen gemiddeld over meerdere jaren, dat de voortplantingssnelheid varieert tussen circa 1,5 km/jaar voor de Bovenrijn en 0,7 km/jaar voor de IJssel. Wanneer de tijdschalen worden berekend op basis van het golfkarakter blijken deze van dezelfde orde van grootte te zijn als de waarden in Tabel 2. Gezien het globale karakter van deze analyse is een verder uitwerking dan ook niet noodzakelijk.

Duidelijk blijkt uit Tabel 2 de gevoeligheid van de tijdschaal voor de beschouwde trajectlengte (d.w.z. L^2). Immers, hoe langer een traject, hoe grootschaliger de beschouwde morfologische verandering zal moeten zijn. Bijvoorbeeld, de tijdschalen variëren tussen 10 jaar (Pannerdens Kanaal) en 60 jaar (IJssel) wanneer alle beschouwde trajecten een lengte van 20 km zouden hebben. Om de relatie te illustreren zijn in Figuur 10 de berekende tijdschalen uitgezet als functie van de lengteschaal van het beschouwde proces. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de verschillende takken.

Morfologische tijdschaal



Morfologische tijdschaal als functie van de beschouwde lengteschaal

De betreffende lengteschalen kunnen worden geassocieerd met verschillende morfologische processen:

- Effect van verlegging van de monding van de IJssel (uitgevoerd in periode 1914-1932) over het gehele riviertraject: $L = 120$ km: $T =$ orde enkele eeuwen.
- de ontwikkeling van de bodemligging ter plaatse van de bochtafsnijding bij Doesburg (uitgevoerd in 1954): $L = 5$ km: $T =$ orde 5 jaar;
- de bodemverandering bij Lobith veroorzaakt door de bochtafsnijding bij Doesburg: $L = 40$ km: $T =$ orde 100 jaar;
- gebaggerde sleuf in Waal: $L = 1$ km: orde 1 maand
- voortplanting bodemgolf op resolutie van SOBEK rekenrooster (d.w.z. 5*roosterstap van 500 m): $L = 2500$ m: $T =$ orde 2 tot 12 maanden (afhankelijk van de beschouwde tak):

	Lengteschaal voor $T = 4$ jaar (km)	Lengteschaal voor $T = 8$ jaar (km)	Lengteschaal voor $T = 50$ jaar (km)
Bovenrijn (vanaf Lobith)	9	13	32
Waal (tot Zaltbommel)	8	11	28
Nederrijn (tot Wageningen)	6	10	22
IJssel (tot Doesburg)	5	7	18
Pannerdens Kanaal	12	18	44

Lengteschalen van morfologische veranderingen die met behulp van diffusieanalogie zijn afgeleid voor een bepaalde tijdshorizon.

Bijlage C Literatuur

- Bagnold, R.A., 1963. Mechanics of marine sedimentation. In *The Sea: Ideas and Observations*, vol. 3. Interscience, New York, USA, pp. 507–528.
- Bagnold, R.A., 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. Geological Survey Professional Paper 422-I, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., USA.
- Berben, F.M.L. (1999). Persoonlijke communicatie. Rijkswaterstaat, Directie Oost Nederland, Arnhem.
- De Boer, H. en Swanenberg, T., 1989. Baggergegevens voor de Boven-Rijn en de Waal. Nota ANWR 89.12, Rijkswaterstaat, Directie Gelderland, Arnhem.
- Engelund, F. and Hansen, E., 1967. A monograph on sediment transport. Technisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- Gölz, E., 1994. Bed degradation - nature, causes, countermeasures. *Water, Science and Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 325–333.
- Haasnoot, M., Vermulst, J.A.P.H. and Middelkoop, H., 1999. Impact of climate change and land subsidence on the water systems in the Netherlands. RIZA rapport 99.049, Rijkswaterstaat, RIZA, Lelystad.
- Hansen, H., 1999. Auswirkungen des Feststoffhaushaltes auf die Schifffahrt. In: *Hydrologische Dynamik im Rheingebiet*, Proc. Int. Rhein-Konferenz, 27–28 April 1999, Koblenz, pp. 147–156.
- Haskoning, 1990. Autonome morfologische ontwikkeling van de Rijntakken (5 delen). Onderzoek voor Rijkswaterstaat, Directie Gelderland, Nijmegen.
- Havinga, H., 1982. Aanzandingen in de Beneden-Waal. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en waterbeweging, Distrikt Zuid-Oost, Arnhem.
- Meyer-Peter, E. and Müller, R., 1948. Formulas for bed-load transport. Proc. 2nd Congress IAHR, Stockholm, Sweden, Appendix 2, pp. 39–64.
- Ploeger, B., 1992. Bouwen aan de Rijn. Rijkswaterstaat-serie 53, Rijkswaterstaat, Directie Gelderland, Arnhem.
- Rijkswaterstaat, 1964. Tienjarig overzicht der waterhoogten en afvoeren. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.
- Rijkswaterstaat, 1985. Tienjarig overzicht der waterhoogten, afvoeren en watertemperaturen. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging. Hoofdafdeling Gegevens, 's-Gravenhage.
- Rijkswaterstaat, 1995. Een zee van rivieren. Rijkswaterstaat, Directie Oost Nederland, Arnhem.
- Rijkswaterstaat, 2000. Overzicht van belangrijke gegevens van de Rijntakken. Rijkswaterstaat, Directie Oost Nederland, afdeling Rivierkunde, Arnhem.
- Schans, H., 1998. Bed level development in Boven-Rijn, Pannerdensch Kanaal and the upstream part of the Waal. Rep. ICG 98/16, Universiteit Utrecht, Fysieke Geografie, Utrecht.

- Silva, W. en Douben, N., 1998. Verwijderen van hydraulische knelpunten in het rivierbed. RVR-rapport 98.002, Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland en RIZA, Arnhem.
- Silva, W. en Jol, C., 1999. Obstakels verwijderen uit het rivierbed; ruimte voor Rijntakken. *Land + Water*, nr. 9, september 1999, pp. 29–31.
- Struijk, A.J., 1994. Ontwikkelingen in de afvoerverdelingen over de Rijntakken 1900–1991. Rijkswaterstaat, Directie Gelderland, Arnhem.
- Taal, M., 1994. Ontwikkeling scenario's autonome bodemontwikkeling Waal. Nota 94.062, Rijkswaterstaat, RIZA, Arnhem.
- Ten Brinke, W.B.M., 2000. Persoonlijke communicatie.
- Van Gelder, P.H.A.J.M., 2000. Statistical methods for the risk-based design of civil structures. Doctoral dissertation. Delft Univ. of Techn. (also published in the series Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Fac. Civil Eng. and Geosciences, Delft Univ. Techn., Delft, The Netherlands, Rep. no. 00-1.
- Van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.
- Verheij, H.J. en Huyskens, R.B.H., 1993. Verwijderen harde oeververdediging IJssel. Rapport Q 1721, Waterloopkundig Laboratorium, Delft.
- Visser, P.J., 1998. Breach growth in sand-dikes. Doctoral dissertation. Delft Univ. of Techn. (also published in the series Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Fac. Civil Eng. and Geosciences, Delft Univ. Techn., Delft, The Netherlands, Rep. no. 98-1.
- Visser, P.J., Havinga, H. en Ten Brinke, W.B.M., 1999. Hoe houden we de rivier bevaarbaar?; daling zomerbed Rijntakken vraagt aandacht. *Land + Water*, nr. 9, september 1999, pp. 24–27.
- Wolters, A.F., 2000. Modelanalyses met SOBEK. Memo Rijn2000-02, Rijkswaterstaat, RIZA, Arnhem.