

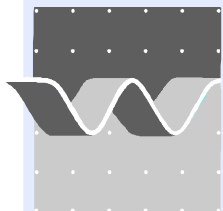
Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Morfologische effecten van zandwinning in de Merwedes

rapport

mei 2007



WL | delft hydraulics

Opdrachtgever:

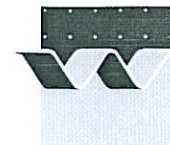
Rijkswaterstaat RIZA

Morfologische effecten van zandwinning in de Merwedes

Erik Mosselman & Anne Wijbenga

rapport

mei 2007



OPDRACHTGEVER:		Rijkswaterstaat RIZA Boompjes 200 3011 XD Rotterdam					
TITEL:		Morfologische effecten van zandwinning op de Merwedes					
SAMENVATTING: Voor de Boven Merwede heeft Rijkswaterstaat RIZA gevonden dat de bodem in de periode 1990-2000 met een snelheid van 38 mm/jaar is gedaald. Met een omvang van 225 duizend m³/jaar wordt zandwinning aangemerkt als de belangrijkste oorzaak. Tevens blijkt uit gegevens voor de periode 1970-2000 dat de waterstanden op de Boven Merwede dalen. In de verwachting dat de waterstanden verder zullen dalen bij voortzetting van het huidige beleid, heeft Rijkswaterstaat besloten de concessies voor zandwinning op de Merwedes voorlopig in te trekken. Toch duidt het optreden van natuurlijke sedimentatie in de Merwedes erop dat de jaarlijkse winning van een bepaald volume aan zand mogelijk moet zijn. Om de grootte van dit volume te bepalen, heeft Rijkswaterstaat Zuid Holland de voorliggende studie opgedragen aan WL Delft Hydraulics en HKV <u>Lijn in Water</u>. Deze is gericht op bepaling van de effecten van zandwinning in het verleden en bepaling van het volume dat jaarlijks kan worden gebaggerd zonder dat significante effecten optreden ten aanzien van waterstanden in het gebied en de afvoerverdeling op de Merwedesplicing. Berekeningen met een sterk vereenvoudigd SOBEK-model geven aan dat zelfs volledige stopzetting van de zandwinning binnen de periode tot 2080 geen halt toeroept aan de bodemdaling. Daardoor valt geen volume zand vast te stellen dat jaarlijks kan worden gebaggerd op de Boven Merwede en de Beneden Merwede zonder dat significante effecten optreden. Stroomafwaarts van het winpunt leidt vermindering van de zandwinning wel eerst tot een aanzienlijke verhoging van de bodem. Stroomopwaarts leidt stopzetting van de zandwinning ertoe dat de bodem bij St Andries in 2060 ongeveer 0,1 m hoger ligt dan in het geval van voortzetting van de winning op het huidige niveau. Aanvankelijk lag het in de bedoeling om binnen deze opdracht berekeningen uit te voeren met het morfologische SOBEK-model van Rijn-Maasmonding en Waal dat sinds de zomer van 2006 ontwikkeld wordt. Door tegenslagen moest dat plan verlaten worden. De conclusies zijn daarom nog niet definitief. Aanbevolen wordt om desalniettemin met reductie van de zandwinning te beginnen, de effecten daarvan nauwgezet te monitoren, de ontwikkeling van het SOBEK-model te vervolgen en de zandwinners nauw bij deze ontwikkeling te betrekken. Ook wordt aanbevolen om de speelruimte vast te stellen voor de toelaatbare bodemdaling bij St Andries tot 2060.							
REFERENTIES:		Bestelnummer 4500058407 betreffende "Project Morfologische effecten zandwinning Merwedes", d.d. 5 oktober 2006.					
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING		
1.0	E. Mosselman						
2.0	E. Mosselman	23 april 2007		F.C.M. v.d. Knaap		C.A. Bons	
3.0	E. Mosselman	16 mei 2007		F.C.M. v.d. Knaap		C.A. Bons	
PROJECTNUMMER:		Q4303					
TREFWOORDEN:		riviermorphologie, Waal, Merwedes, Rijn-Maasmonding					
AANTAL BLADZIJDEN:		25					
VERTROUWELIJK:		☐ JA			☒ NEE		
STATUS:		☐ VOORLOPIG			☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF		

Inhoud

1	Inleiding	1—1
1.1	Achtergrond	1—1
1.2	Opdracht	1—1
1.3	Organisatie	1—2
2	Morfologische systeembeschrijving.....	2—1
2.1	Een gebied vol veranderingen.....	2—1
2.2	Waargenomen daling.....	2—7
3	Analyse van morfologische reacties.....	3—1
3.1	Oorzaken van bodemdaling	3—1
3.2	Initiële morfologische reactie en nieuw evenwicht.....	3—1
3.3	Vuistregel voor nieuw evenwicht.....	3—4
3.4	Tijdschaal van morfologische aanpassing	3—5
3.5	Sterk geschematiseerde SOBEK-berekeningen	3—5
3.6	Berekening met model van Pannerdensche Kop tot Hoek van Holland..	3—9
4	Conclusies en aanbevelingen	4—1
5	Literatuurverwijzingen	5—1

I Inleiding

I.1 Achtergrond

In de periode 2000-2004 werd gemiddeld 225 duizend m³/jaar zand gewonnen in de Boven Merwede en gemiddeld 46 duizend m³/jaar in de Beneden Merwede. Gerekend over het zomerbed van de hele rivier betekent dit voor de Boven Merwede een laagdikte van ongeveer 0,06 m/jaar en voor de Beneden Merwede een laagdikte van ongeveer 0,01 m/jaar.

Recent heeft Rijkswaterstaat RIZA de bodemontwikkeling onderzocht van de Rijn-Maasmonding in de periode 1990-2000. Voor de Boven Merwede is gevonden dat de bodem in die periode met 38 mm/jaar is gedaald als netto resultaat van een natuurlijke sedimentatie van gemiddeld 21 mm/jaar en baggerwerk van gemiddeld 60 mm/jaar. Dit totale baggerwerk is de som van nautisch onderhoudsbaggerwerk en zandwinning. Gegevens van Rijkswaterstaat Zuid-Holland spreken van ongeveer 61,5 duizend m³/jaar aan (achterstallig) onderhoudsbaggerwerk en ongeveer 225 duizend m³/jaar aan zandwinning. Dat wijst erop dat de verdieping van de Boven Merwede vooral wordt veroorzaakt door de zandwinning.

Tevens blijkt uit gegevens voor de periode 1970-2000 dat de waterstanden op de Boven Merwede dalen. De verwachting is dat de waterstanden verder zullen dalen door bodemdaling bij voortzetting van het huidige zandwinbeleid. Rijkswaterstaat heeft daarom besloten de concessies voor zandwinning op de Merwedes voorlopig tot 50% te reduceren. Toch duidt het optreden van natuurlijke sedimentatie in de Merwedes erop dat de jaarlijkse winning van een bepaald volume aan zand mogelijk moet zijn. Om de grootte van dit volume te bepalen, heeft Rijkswaterstaat RIZA een nadere studie opgedragen aan WL | Delft Hydraulics en HKV [Lijn in Water](#).

I.2 Opdracht

De opdracht is gericht op het beantwoorden van de volgende vragen:

1. Wat zijn de effecten geweest van het tot 2005 gevoerde zandwinbeleid op:
 - a) de morfologie van de riviersecties Beneden-Waal, Boven Merwede, Beneden Merwede en Nieuwe Merwede;
 - b) de waterstanden (vaardiepten) op bovengenoemde riviersecties;
 - c) de afvoerverdeling over de Beneden Merwede en de Nieuwe Merwede (splitsingspunt Kop van de Oude Wiel).

2. Wat is het volume zand dat jaarlijks kan worden gebaggerd op de Boven Merwede en Beneden Merwede, met het zwaartepunt op de Boven Merwede, zonder dat significante effecten optreden ten aanzien van:
 - d) de waterstanden op de riviersecties Beneden-Waal, Boven Merwede, Beneden Merwede en Nieuwe Merwede, waarbij met name de waterstand ter hoogte van St. Andries van belang is;
 - e) de afvoerverdeling over de Beneden Merwede en de Nieuwe Merwede.

De opdracht is vastgelegd in de opdrachtbon met bestelnummer 4500058407 betreffende “Project Morfologische effecten zandwinning Merwedes” d.d. 5 oktober 2006. Het project is bij WL | Delft Hydraulics bekend onder nummer Q4303.00 en bij HKV Lijn in Water onder nummer PR1253.10.

1.3 Organisatie

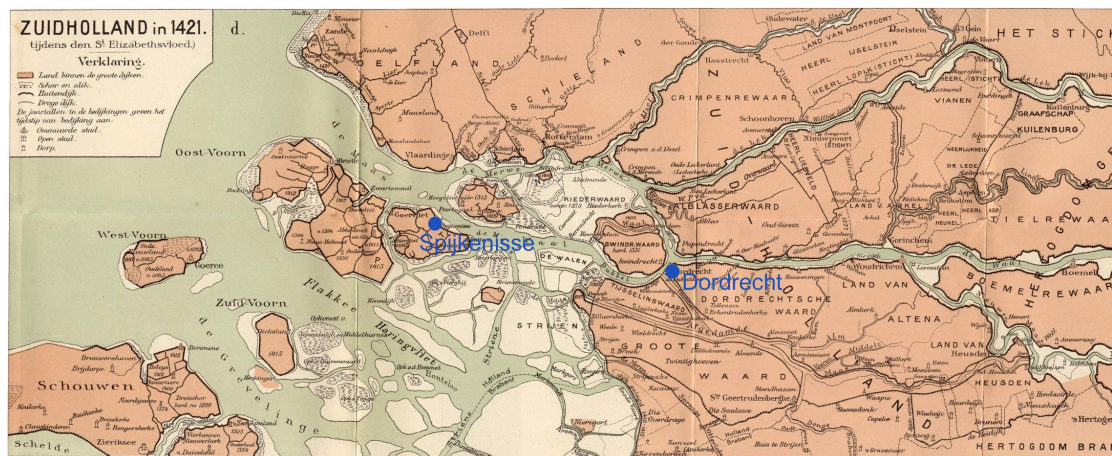
De opdracht is uitgevoerd door Anne Wijbenga van HKV Lijn in Water en Erik Mosselman van WL | Delft Hydraulics. Laatstgenoemde was tevens de projectleider. Jasper Hugtenburg, Marcel Bruggers en Almer de Swaaf begeleidden het project vanuit Rijkswaterstaat RIZA. Tijdens de uitvoering heeft verder overleg plaatsgevonden met Jan Al (Rijkswaterstaat Zuid-Holland), Arjo Harmans (Rijkswaterstaat Zuid-Holland), Ary van Spijk (Rijkswaterstaat Zuid-Holland), Fokke van der Meulen (Verdoorn & van der Kamp BV) en Cees van Putten (Nederlandse Vereniging van Zandwinners).

2 Morfologische systeembeschrijving

2.1 Een gebied vol veranderingen

De Merwedes vormen een onderdeel van de Rijn-Maasmonding, het gebied waar de Rijn en de Maas via een stelsel van vertakte waterlopen uitmonden in de Noordzee. Het gebied kende in het verleden talrijke grote veranderingen van waterlopen, deels veroorzaakt door de natuur en deels door het ingrijpen van de mens. De Figuren 2-1 tot en met 2-6 illustreren dit. Het gebied is dan ook vanuit waterloopkundig en morfologisch oogpunt zeer dynamisch en complex.

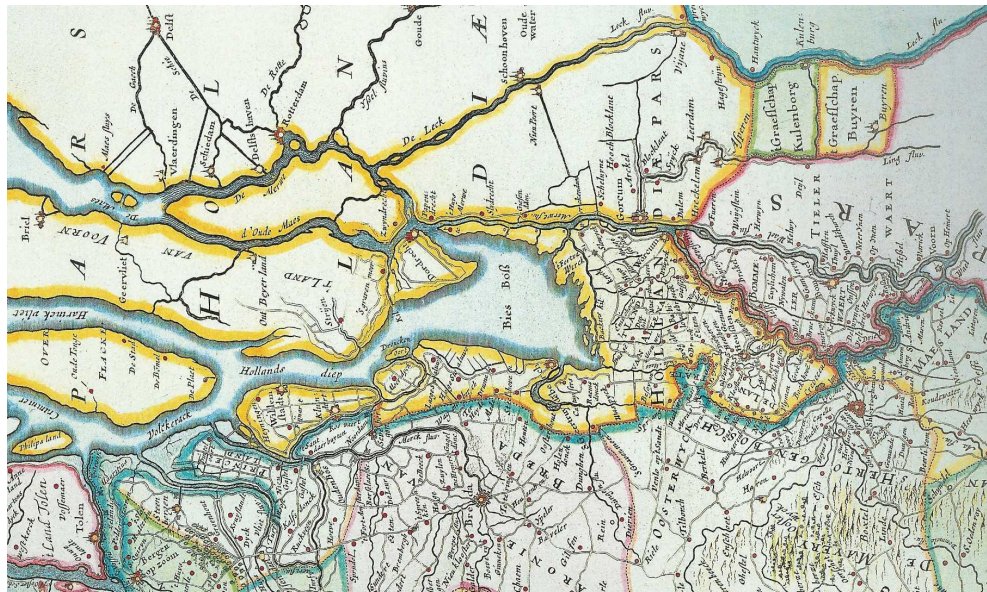
Het gebied van de Biesbosch ontstond door een combinatie van zware storm en springtij op de naamdag van Sint Elisabeth van Hongarije in 1421. Door het hoge zeewater kon de rivier de Merwede haar water niet meer afvoeren, waardoor het rivierwater steeg en de verwaarloosde dijken doorbraken. Nadien groeide de Biesbosch uit tot een uitgestrekt zoetwatergetijdengebied van eilanden en slingerende waterwegen. Door plantengroei en sedimentatie slibde het gebied geleidelijk op, zodat sommige delen op den duur opnieuw konden worden ingericht als polders. Door geregelde overstroming waren de gronden hier zeer vruchtbaar.



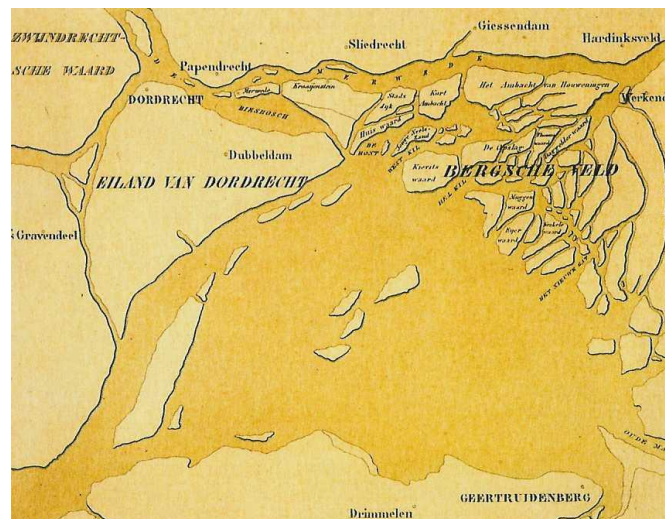
Figuur 2-1. Rijn-Maasmonding aan de vooravond van de Sint Elisabethsvloed van 1421 (Beekman, 1932).

Rond 1850 stroomde het water van de Waal bij Gorinchem in het deel van de Merwede dat nu Boven Merwede heet. Bij hogere afvoeren stroomde een deel van het water via het deel van de Merwede dat nu Beneden Merwede heet door naar Dordrecht. De rest stroomde via diverse geulen in de Biesbosch naar de Amer en het Hollandsch Diep. De Maas stroomde bij Woudrichem uit in de Waal. Tussen Heerewaarden en St. Andries liggen de Waal en de Maas op korte afstand van elkaar. Rond 1850 was de waterscheiding tussen beide rivieren laag en kon er bij hoogwater makkelijk water van de Waal naar de Maas stromen. Bovendien was er via het Schanse Gat een open verbinding tussen Maas en Waal.

In 1856 werd het Schanse Gat gekanaliseerd en werd een schutsluis aangebracht, zodat bij normaal peil beide rivieren van elkaar gescheiden raakten. De overlaten van het Heerewaardense gebied werden overal laag gehouden, zodat het water van de Waal vrijelijk naar de Maas kon stromen om het gevaar van overstromingen in de omliggende polders te verminderen. Een scheiding van Maas- en Waalwater werd pas mogelijk toen in de jaren daarna de afvoer van Maas en Waal was verbeterd.



Figuur 2-2. Rivieren van Rijn-Maasmonding in Atlas Maior van Blaeu (1665).



Figuur 2-3. Zoetwaterbinnenzee in 1699 ter plaatse van de in 1421 verdrongen Grote Waard (Roodnat, 2006).

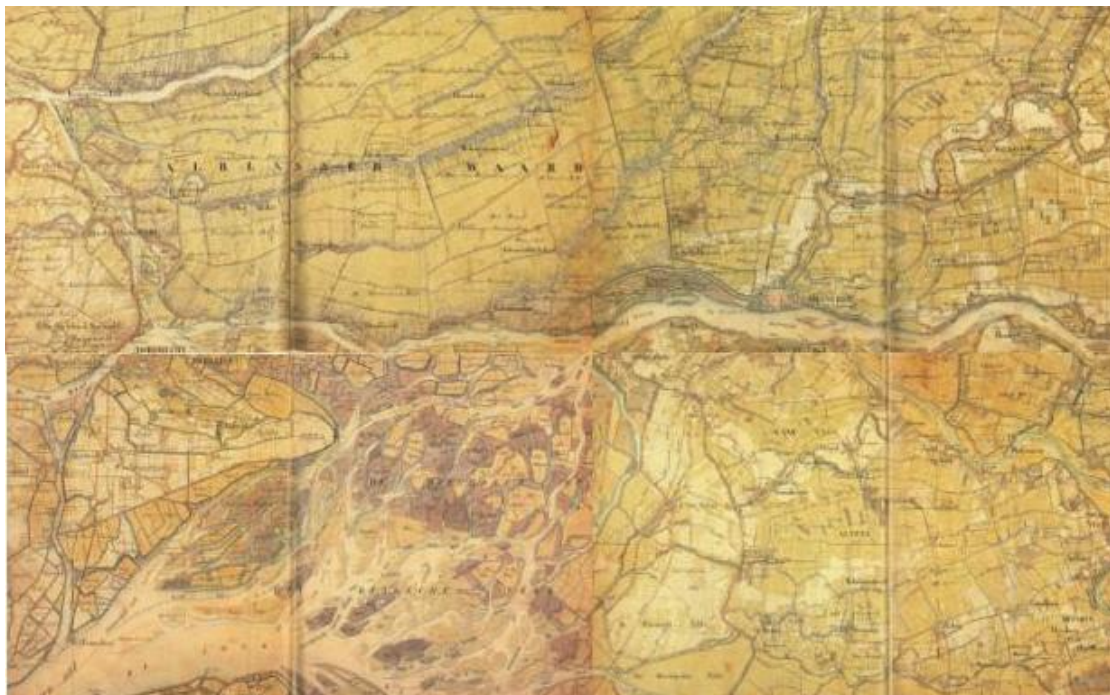
Door de grillig gevormde dijken, die waren ontstaan door het geleidelijk koppelen van dijkvakken, de aanwezigheid van zomerkaden en kleine kribben, die bedoeld waren om landaanwas te bevorderen of afkalving tegen te gaan, en de aanwezigheid van meerdere geulen, wisselden stroomverlammingen en versnellingen elkaar af. Lokaal ontstonden hierdoor verzandingen, waardoor ijsdammen konden ontstaan. Het afdalen van water via de overlaat bij Heerewaarden zorgde lokaal voor stroomverlamming op de Waal.

Ook door terugstuwing van water bij de samenvloeiing van Maas en Waal trad stroomverlamming op, waarbij zich van tijd tot tijd ijsdammen vormden die tot overstromingen leidden.

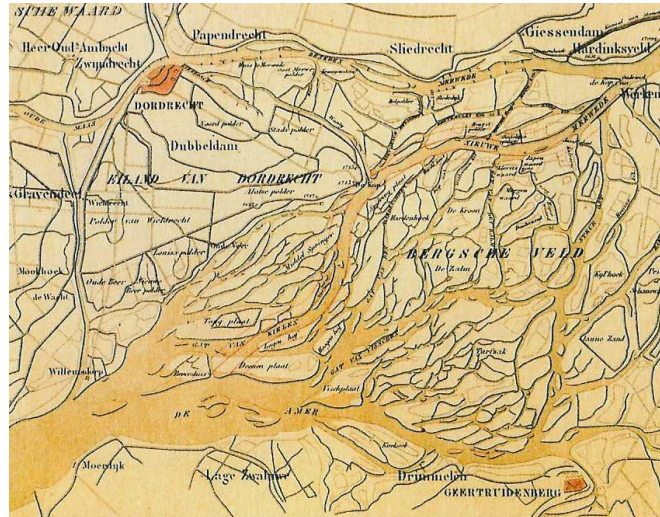
Naar aanleiding van de overstromingen werden in de periode 1809-1849 door diverse riviercommissies plannen opgesteld om de waterhuishouding te verbeteren (Praamsma, 1986). Deze plannen bestonden uit de volgende elementen:

1. Het normaliseren van de rivieren om stroomverlammingen te vermijden. De normalisatie hield in dat het zomerbed lokaal werd verbreed of versmald om een ideale zomerbedbreedte van 360 m te realiseren. Het versmallen werd bereikt door de aanleg van kaden op de normaallijn of met kribben waarvan de kribkop op de normaallijn eindigde.
2. Het handhaven van de waterverdeling tussen de Rijntakken in de verhouding 2/3 naar de Waal, 2/9 naar de Nederrijn en de Lek en 1/9 naar de IJssel.
3. Het opheffen van stroomsplitsingen en het afsnijden van grote bochten.
4. Het afsluiten van de Biesbosch en de aanleg van een nieuwe monding voor de Merwede tussen Werkendam en de Amer: de Nieuwe Merwede.
5. Het voorkomen van zijdelingse in- en uitstromingen door afsluiting van het kanaal bij St. Andries, maar met behoud van de overlaat bij Heerewaarden zolang de benedenloop van de Waal niet was verbeterd.
6. Het verleggen van de Maasmonding via de Bergsche Maas naar de Amer en het afsluiten van de Maas bij Well en Andel. Deze ingrepen werden naar aanleiding van nieuwe overstromingen in 1861 aan de plannen toegevoegd.

De normalisatiewerken werden uitgevoerd in de periode 1867-1890, de aanleg van de Nieuwe Merwede in de periode 1861-1874 en de scheiding van Maas en Waal in de periode 1884-1904.



Figuur 2-4. Biesbosch omstreeks 1840 (Wolters-Noordhoff, 1990).



Figuur 2-5. Biesbosch en aanleg van Nieuwe Merwede rond 1856 (Roodnat, 2006).



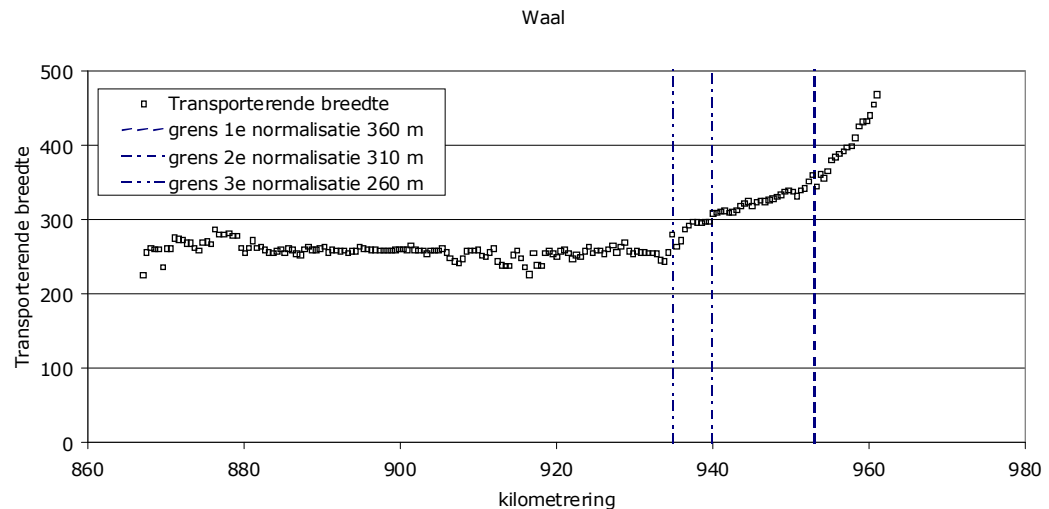
Figuur 2-6. Huidige situatie (Vermeer & Mosselman, 2005).

Ook na 1900 zijn diverse waterstaatkundige ingrepen uitgevoerd die in meer of mindere mate invloed hebben op de waterhuishouding van de Merwedes, de Waal en de Maas. Tabel 2-1 geeft hiervan een overzicht. Het meest relevant voor de huidige situatie op de Merwedes en de Waal zijn de normalisatiewerken op de Waal, de sluiting van het Haringvliet in het kader van de Deltawerken, het aanleggen van een vaste laag in de Waalbocht bij St. Andries en baggerwerken in de Waal, de Merwedes en het Rotterdamse havengebied.

Tabel 2-1. Overzicht van grote veranderingen in de Rijn-Maasmonding (naar Vermeer & Mosselman, 2005).

Jaar	Gebeurtenis	Omschrijving
1421	Sint Elizabethsvloed	Ontstaan van Biesbosch, grootschalige veranderingen van waterlopen en eilanden
1570	Allerheiligenvloed	Grootschalige veranderingen van waterlopen en eilanden (ook verdrinken land van Saeftinghe)
17 ^e eeuw	's Gravendeelsche Kil	Uitdieping ten behoeve van de scheepvaart tussen Zeeland en Holland. Dit traject heet tegenwoordig de Dordtsche Kil
1861 - 1874	Nieuwe Merwede	Verbinding van de Waal met het Hollandsch Diep ter verbetering van de hoogwaterafvoer
1867 - 1890	1 ^e riviernormalisatie	Het versmallen en verbreden van onder meer de Waal tot een normaalbreedte van 360 m
1868	Nieuwe Waterweg	Graven van de Nieuwe Waterweg, met name ten behoeve van de scheepvaart
1880 - 1893	2 ^e normalisatie van de Waal	Versmalling van de Waal tot een normaalbreedte van 310 m
1884 - 1904	Bergsche Maas	Aanleg Bergsche Maas en afsluiting Andelse Maas: scheiding Waal en Maas
1910 - 1916	3 ^e normalisatie van de Waal	Verdere versmalling van de Waal tot een normaalbreedte van 260 m
1950	Brielse Maas	Afsluiting van Brielse Maas
1953	Watersnoodramp	Aanzet tot de Deltawerken, een omvangrijk plan met een veelheid aan dammen, sluizen, compartimenteringen en dijkverbeteringen
1957-1987	Nieuwe Waterweg	Steeds verdergaande verdieping ten behoeve van de scheepvaart
1965-1975	Aanleg Europoort	Aanzienlijk gebied voor uitbreiding van de havenactiviteiten rond Rotterdam
1969	Volkerak	Afsluiting, onderdeel van de Deltawerken
1970	Haringvliet	Afsluiting, onderdeel van de Deltawerken
1997 - 1999	Vaste laag St. Andries	Vastlegging van de buitenbocht tussen km 925.0 en km 928.2
2005-2015	Ruimte voor de Rivier	Doorstroming Noordwaard, ontpoldering Overdiepse Polder en een aantal maatregelen met geringe morfologische gevolgen

Bij de eerste normalisatie werd het zomerbed van de Waal versmald en verbreed tot een uniforme normaalbreedte van 360 m. Omdat het zomerbed van de Nieuwe Merwede tussen kribkoppen en strekdammen nog steeds 360 m breed is, valt af te leiden dat de breedte van de Nieuwe Merwede na aanleg niet meer is gewijzigd. Sinds de derde normalisatie is de Waal 260 m breed. De breedte van de Beneden Merwede kort na het splitsingspunt bedraagt 190 m. Bij Werkendam is de Boven-Merwede globaal 470 m breed. Het verloop van de zomerbedbreedtes is weergegeven in Figuur 2-7. De breedte van het zomerbed is tevens de breedte waarover zand door de rivier getransporteerd wordt.



Figuur 2-7. Zomerbedbreedte van Waal en Boven Merwede.

De in het gebied uitgevoerde baggerwerken betreffen zowel onderhoud aan de vaarweg als zandwinning. Rivierzand van goede kwaliteit voor industriële toepassingen wordt sinds 1906 gewonnen bij Woudrichem (km 953). Dit betreft zand met een ronde korrelvorm, dat geofysisch gekenmerkt wordt als eentoppig zand met een monogranulaire korrelgrootte boven $250\ \mu\text{m}$, in tegenstelling tot het scherpe en hoekige zand uit oude fluvioglaciale afzettingen waarvan de korrelgrootte ligt tussen $125\ \mu\text{m}$ en $2\ \text{mm}$ (van Putten, 2006).

Bij de opdrachtverlening heeft Rijkswaterstaat RIZA voor de periode 1994-2004 de baggergegevens verstrekt die zijn weergegeven in Tabel 2-2. Deze zijn gebaseerd op een inventarisatie door Ary van Spijk van Rijkswaterstaat Zuid-Holland. Uit de tabel volgt dat in de periode 2000-2004 gemiddeld 225 duizend m^3 /jaar zand werd gewonnen in de Boven Merwede en gemiddeld 46 duizend m^3 /jaar in de Beneden Merwede. Gerekend over het zomerbed van de hele rivier betekent dit voor de Boven Merwede een laagdikte van ongeveer $0,06\ \text{m}$ /jaar en voor de Beneden Merwede een laagdikte van ongeveer $0,01\ \text{m}$ /jaar. Gegevens uit voorgaande perioden blijken erg moeilijk te achterhalen. Als referentie geeft Tabel 2-3 een overzicht van baggerhoeveelheden sinds 1950 voor de Bovenrijn en de Waal, ontleend aan Van Vuren en Sloff (2006) met correcties door Van Vuren (2006). Opvallend zijn de grote hoeveelheden voor de Beneden-Waal in de periode 1970-1989. Overigens zijn de zandwinners van mening dat in het verleden veel meer gebaggerd is (Van der Meulen, 2007).

Tabel 2-2. Baggerhoeveelheden op Boven en Beneden Merwede in periode 1994-2006.

Jaar	Zandbestek in m^3 (beun)	
	Boven Merwede	Beneden Merwede
1994	263 260	25 140
1995	256 500	0
1996	134 690	28 600
1997	178 640	84 910
1998	201 590	21 600
1999	231 170	0

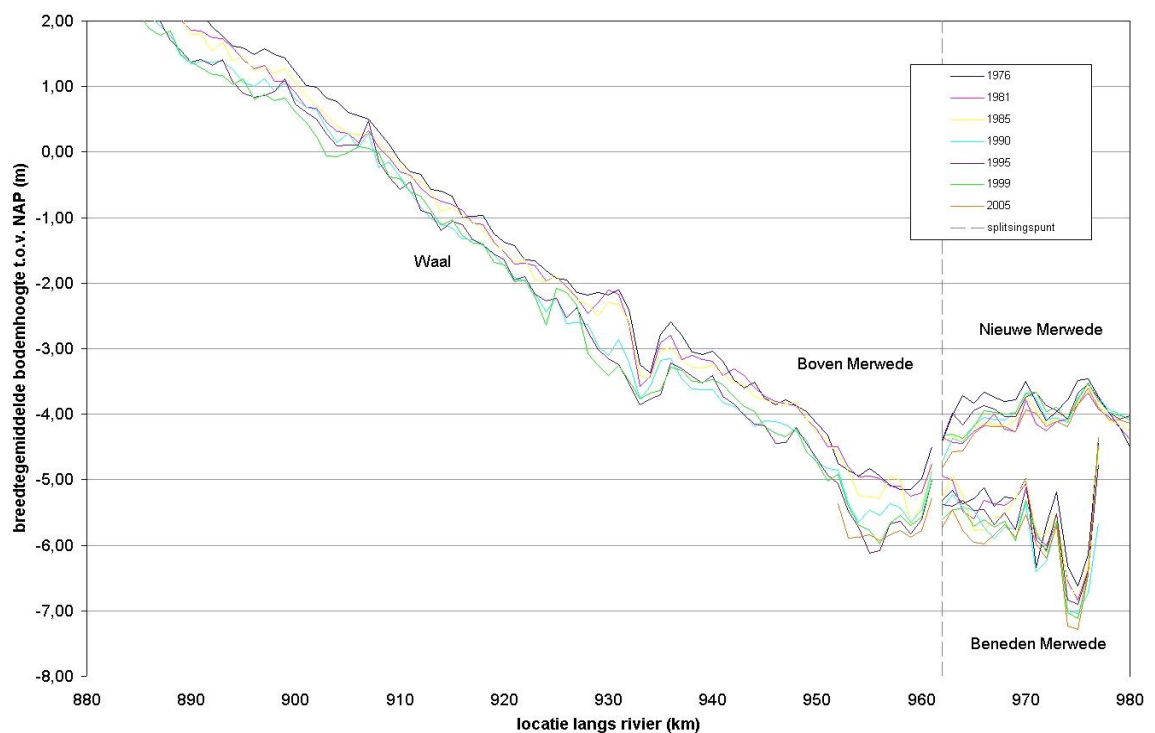
Jaar	Zandbestek in m^3 (beun)	
	Boven Merwede	Beneden Merwede
2000	208 820	0
2001	275 620	77 980
2002	252 266	19 908
2003	196 795	0
2004	192 330	134 181

Tabel 2-3. Baggerhoeveelheden op Bovenrijn en Waal in periode 1950-1996.

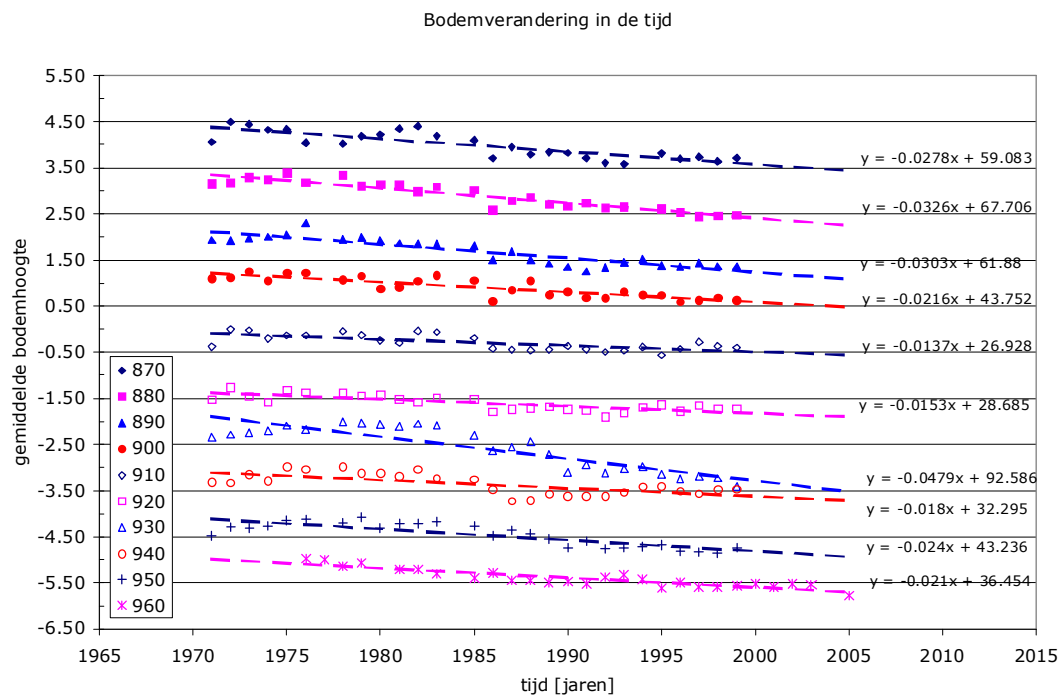
Riviertraject	Netto baggervolume in hele periode (m ³)			Netto baggervolume per jaar (m ³ /jaar)		
	1950-1969	1970-1989	1990-1996	1950-1969	1970-1989	1990-1996
Bovenrijn	565 000	152 300	267 400	28 250	7 615	38 200
Boven-Waal	565 000	275 700	370 400	28 250	13 785	52 914
Midden-Waal	565 000	4 028 200	437 900	28 250	201 410	62 557
Beneden-Waal	565 000	14 243 800	2 606 000	28 250	712 190	372 286

2.2 Waargenomen daling

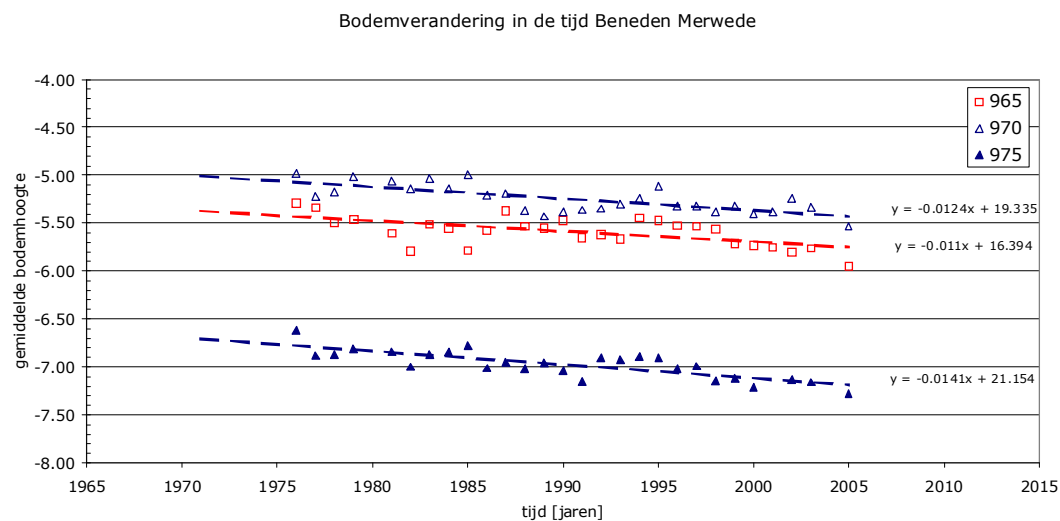
De Figuren 2-8 tot en met 2-11 tonen voor de periode 1970-2005 de resultaten van jaarlijkse bodempeilingen op de Waal en de Merwedes. Hieruit blijkt dat de bodems van de Waal en de Boven Merwede dalen met een gemiddelde van 26 mm/jaar. De bodem van de Beneden Merwede daalt eveneens, maar de bodem van de Nieuwe Merwede is globaal op hetzelfde niveau gebleven. In de trajecten km 930-939 en km 950-959 daalt de bodem sneller dan het gemiddelde van 26 mm/jaar. Van het eerste traject is bekend dat daaruit zand gewonnen is voor de aanleg van de brug bij Zaltbommel. Het tweede traject omvat het gebied bij Woudrichem waar zand wordt gewonnen voor industriële toepassingen.



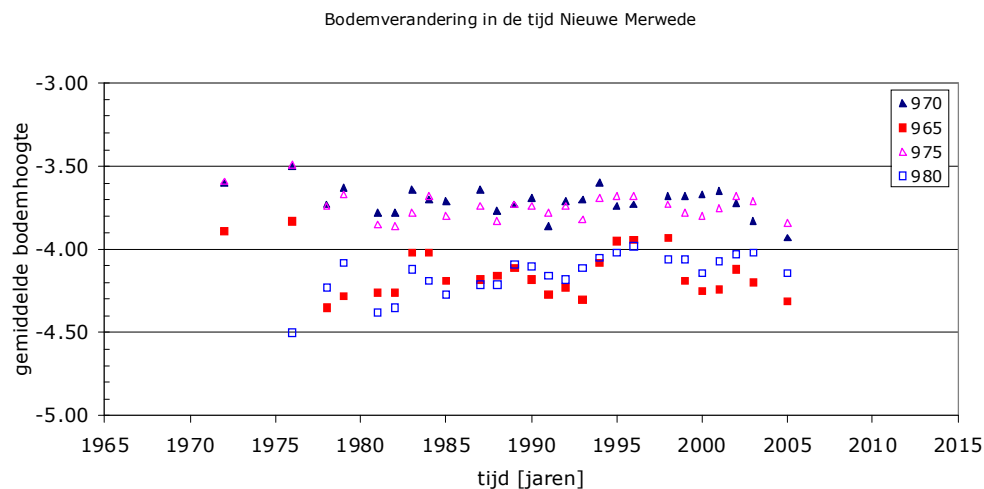
Figuur 2-8. Ontwikkeling van bodemlengteprofiel van Waal en Merwedes in periode 1976-2005.



Figuur 2-9. Verloop van bodemligging op verschillende locaties van de Waal en de Boven Merwede in periode 1970-2005.



Figuur 2-10. Verloop van bodemligging op verschillende locaties van de Beneden Merwede in periode 1970-2005.



Figuur 2-11. Verloop van bodemligging op verschillende locaties van de Nieuwe Merwede in periode 1970-2005.

Veranderingen in bodemligging hebben hun weerslag op de waterstanden. Bij de opdrachtverlening heeft Rijkswaterstaat RIZA hierover de gegevens in Tabel 2-4 verstrekt. Er blijkt uit dat de waterstanden dalen, zij het minder snel dan de bodemligging. Dat betekent dat ook de waterdiepten toenemen. In het kader van de opdracht is gepoogd om nog meer waterstandsgegevens te analyseren om een beeld te krijgen van dalende trends in de periode voorafgaand aan 1970. Tabel 2-5 geeft een overzicht van de gegevens die hiervoor gebruikt zijn.

Tabel 2-4. Veranderingen in waterstanden op Beneden-Waal en Boven Merwede in de periode 1970-2000.

Meetstation	Waterstandsaling (mm/jaar)			Toename in getijverschil (mm/jaar)
	Gemiddelde waterstand	Hoogwaterstand	Laagwaterstand	
Herwijnen	6,5	5,5	8,0	4,0
Vuren	6,5	5,5	8,0	4,0
Werkendam	1,9	0,4	1,3	0,9

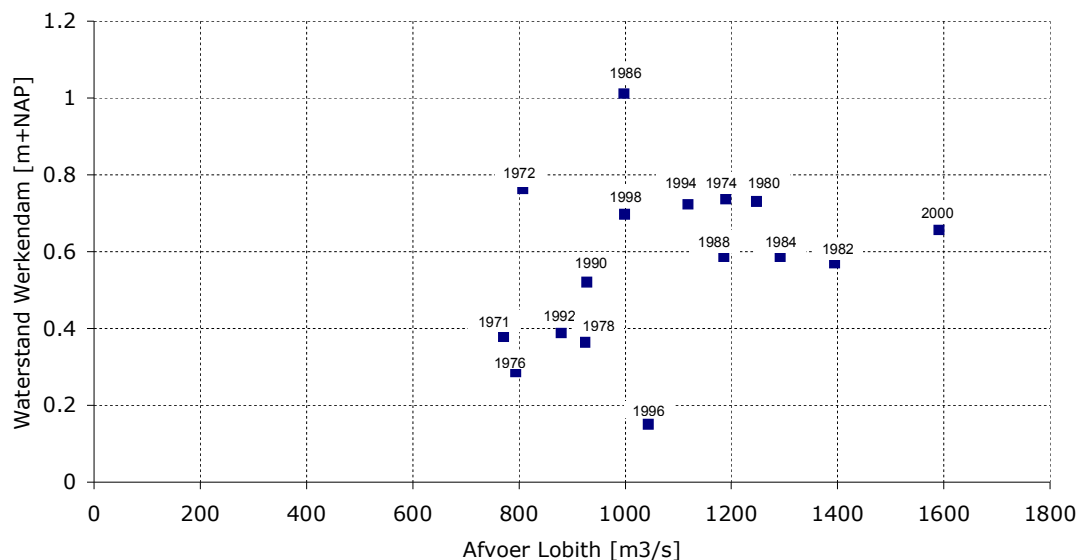
Tabel 2-5. Gegevens gebruikt voor aanvullende analyse van langjarige veranderingen in waterstanden.

Meetstation	Periode	Type gegevens
Gorinchem	01.01.1782 - 31.12.1883	waterstanden
Gorinchem	01.01.1971 - 01.07.1983	waterstanden
Lobith	01.01.1979 - 02.11.2006	waterstanden
Lobith	01.01.1901 - 31.12.2000	afvoeren
Sliedrecht	01.01.1971 - 02.01.1978	waterstanden
Werkendam	01.11.1970 - 06.11.2006	waterstanden

Analyse van veranderingen in waterstanden is alleen goed mogelijk als er waterstanden beschikbaar zijn over een voldoende lange periode en er informatie beschikbaar is over de afvoeren op de tijdstippen van de waterstandsmetingen. Afvoergegevens zijn alleen voor Lobith beschikbaar. Relateert men deze aan waterstanden verder benedenstrooms, dan moet rekening worden gehouden met de looptijd tussen Lobith en de beschouwde locatie.

Een andere complicatie is dat slechts een deel van de afvoer bij Lobith ten goede komt aan de Waal en de Merwedes. Het andere deel wordt bij de Pannerdensch Kop afgesplitst naar het Pannerdensch Kanaal. De afvoerverdeling op de Pannerdensch Kop is in de loop der jaren veranderd, onder meer door de kanalisatie van de Nederrijn.

De waterstanden bij Gorinchem bestrijken weliswaar een lange periode, maar voor de periode 1782-1883 ontbreken de afvoergegevens. De resterende periode 1971-1983 is te kort voor een analyse. Hetzelfde geldt voor de waterstanden bij Sliedrecht in de periode 1971-1978. De reeks van Werkendam is voldoende lang en kan voor de periode tot 31 december 2000 gerelateerd worden aan afvoeren bij Lobith. Daarom is op basis van deze reeks voor elk even jaar binnen de periode 1971-2000 de waterstand bepaald bij de laagste afvoer die dat jaar bij Lobith is opgetreden. Het resultaat is weergegeven in Figuur 2-12. Daaruit blijkt dat er uit deze gegevens geen conclusies te verbinden zijn ten aanzien van bodemdaling bij Werkendam en omgeving.



Figuur 2-12. Waterstanden te Werkendam bij jaarlijkse laagste afvoeren te Lobith.

3 Analyse van morfologische reacties

3.1 Oorzaken van bodemdaling

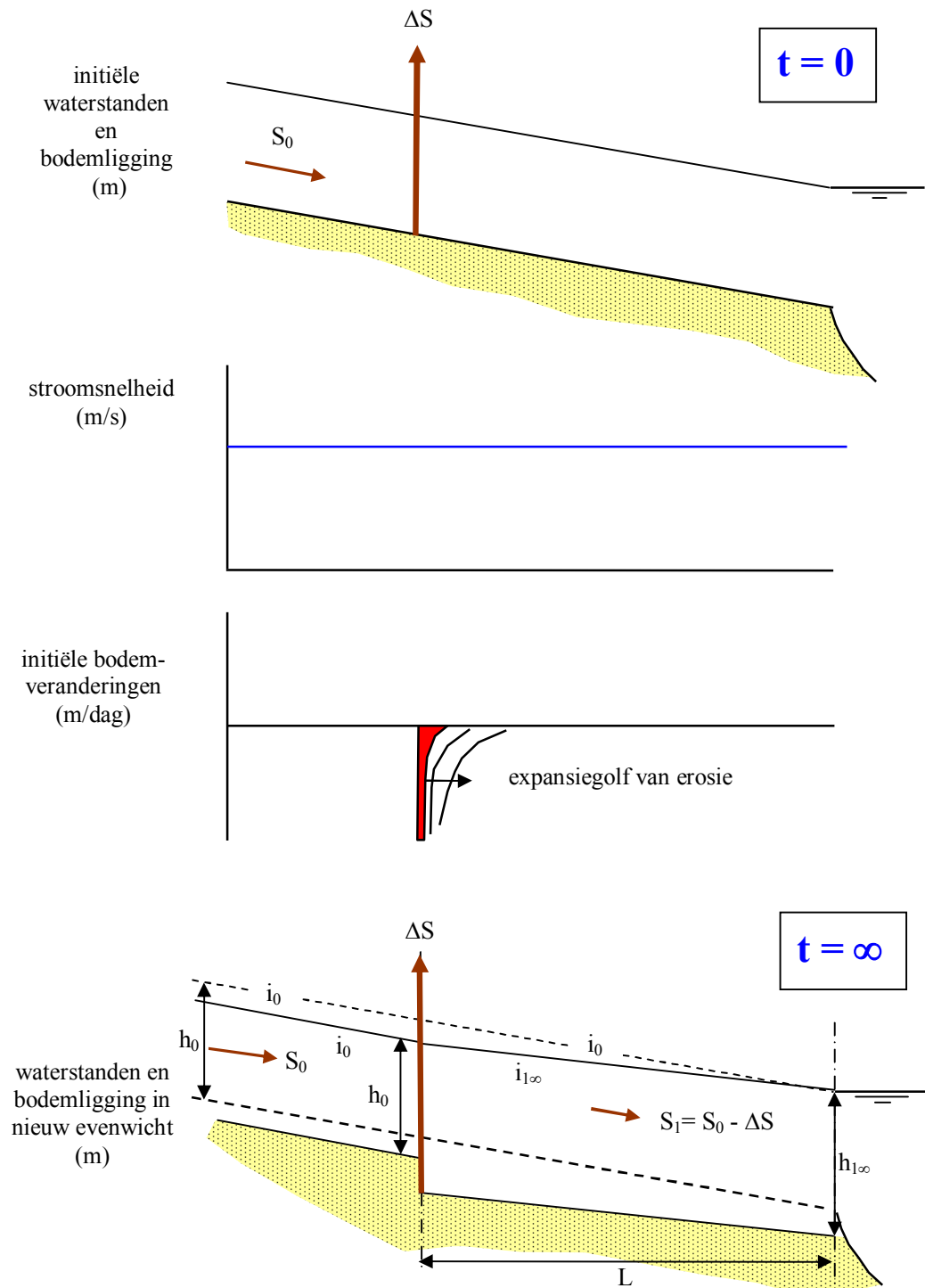
Verschillende factoren kunnen verantwoordelijk zijn voor de daling van de rivierbodem. Mogelijke factoren voor de Merwedes zijn zandwinning, normalisatie, verminderde zandvracht bovenstrooms, verdieping van het Rotterdamse havengebied en sterkere opwoeling van sediment door toegenomen intensiteit en vermogen van de scheepvaart. Omgekeerd heeft de afsluiting van het Haringvliet juist geleid tot aanzanding, het meest prominent in de Nieuwe Merwede. Bij al deze factoren geldt dat zich op een gegeven moment een nieuw evenwichts-bodemlengteprofiel instelt, waarna de bodem niet meer verandert. Ook voortzetting van de huidige zandwinning zal uiteindelijk tot een evenwicht leiden, zij het dat de bijbehorende bodemligging wellicht te laag is. Voor het vaststellen van het aandeel van elke factor afzonderlijk in de totale bodemdaling is daarom niet alleen de grootte van elk effect van belang, maar ook het verloop van elk effect in de tijd. Dit kan in theorie met een rekenmodel bepaald worden. De gegevens zijn echter te beperkt om een model ondubbelzinnig te ijken, zeker wanneer men bedenkt dat het gaat om een complex gebied dat zich met langdurige naijlingen aanpast aan verschillende natuurlijke veranderingen en ingrepen uit het verleden. Meerdere combinaties van parameter-instellingen kunnen leiden tot een even goede overeenstemming met metingen, zonder dat kan worden vastgesteld welke combinatie de juiste is. Verder is bekend dat de beschikbare baggergegevens onvolledig zijn. Onzekerheid is derhalve niet te vermijden.

Op basis van ervaring wordt geschat dat zandwinning en normalisatie voornaamste factoren zijn. Omdat het een schatting betreft, kan op basis van deze studie geen uitspraak worden gedaan over het precieze aandeel van zandwinning en normalisatie in het totaal van factoren. Wel kan deze aanpak laten zien hoe lang het effect van normalisering kan doorwerken en wat het gevolg is van een verandering in de jaarlijkse hoeveelheden gewonnen zand.

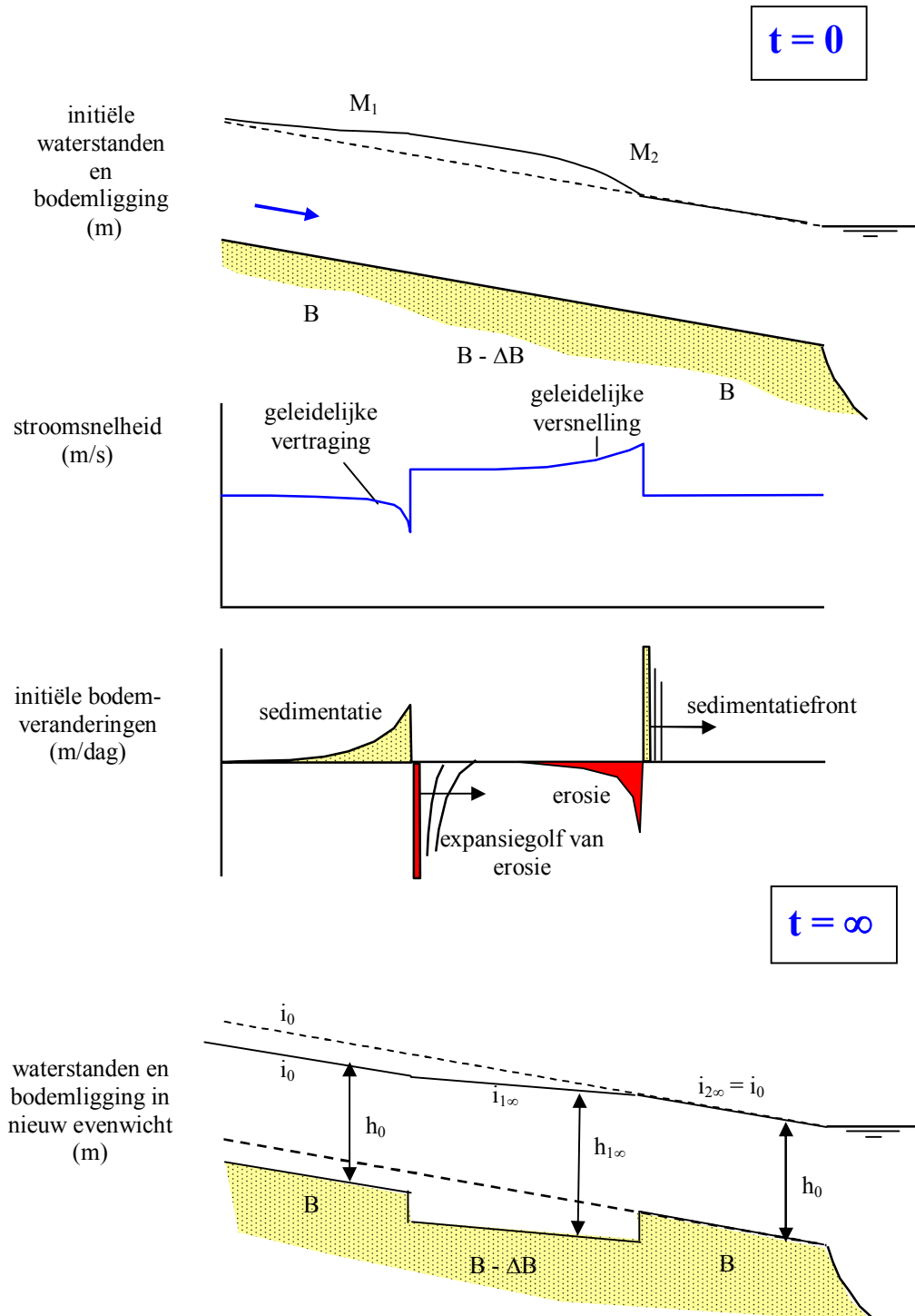
3.2 Initiële morfologische reactie en nieuw evenwicht

De Figuren 3-1 en 3-2 tonen kwalitatief de initiële en uiteindelijk bereikte morfologische reacties op zandwinning en normalisatie. De puntonttrekking van sediment in Figuur 3-1 heeft aanvankelijk geen invloed op de waterbeweging. Onmiddellijk benedenstrooms van het onttrekkingspunt erodeert de bodem om zand te leveren voor een sedimenttransport dat gelijk is aan de transportcapaciteit. De bodemdaling als gevolg van deze erosie leidt na enige tijd tot lagere waterstanden rond het onttrekkingspunt. Dat versnelt de toestroming van bovenstrooms, waardoor de bodem ook bovenstrooms erodeert. Op lange termijn ontstaat een traject met een flauwer verhang en een grotere waterdiepte benedenstrooms, waar de stroomsnelheden en de transportcapaciteit zover verkleind zijn dat ze overeenstemmen met de te transporteren zandvracht. Het flauwere verhang en de grotere waterdiepte houden in dat de bodem er is gedaald.

Stroomopwaarts blijft het karakter van de rivier ongewijzigd, maar ligt de rivier wel lager om aan te sluiten op de waterstanden in het traject benedenstrooms. Ook dat betekent dat de bodem is gedaald.



Figuur 3-1. Morfologische reactie op zandwinning.



Figuur 3-2. Morfologische reactie op versmalling van het zomerbed.

Figuur 3-2 laat zien hoe een versmalling door normalisatie er aanvankelijk toe leidt dat de waterstanden stijgen en de waterdieptes toenemen. Door de toenemende waterdiepte juist bovenstrooms van de versmalling divergeren de stroomlijnen en vertraagt de stroming. Onmiddellijk na het begin van de versmalling stijgt de stroomsnelheid abrupt. Verder stroomafwaarts neemt de waterdiepte weer af. Daar convergeren de stroomlijnen en versnelt de stroming. Onmiddellijk na het einde van de versmalling daalt de stroomsnelheid abrupt. Het effect op het zandtransport laat zich rechtstreeks uit het verloop van de stroomsnelheden aflezen. Onder versnellende stroming erodeert de bodem, onder vertragende stroming zandt de bodem aan. Daar waar de stroming geleidelijk verandert, groeien de uitschuring en de aanzanding aanvankelijk zonder daarbij van plaats te veranderen. Bij de abrupte versnelling aan het begin van de versmalling breidt de erosie zich echter geleidelijk stroomafwaarts uit. Het front van de erosiegolf wordt daarbij steeds flauwer. Bij de abrupte vertraging aan het einde van de versmalling breidt een sedimentatiegolf zich geleidelijk stroomafwaarts uit. Daarvan blijft het front steil, in tegenstelling tot het front van de erosiegolf. Op lange termijn ontstaat een nieuw evenwicht met in het versmalde traject een flauwer verhang en een grotere waterdiepte. De stroomsnelheden en de transportcapaciteit zijn daar zover verkleind dat ze overeenstemmen met de te transporteren zandvracht. Het flauwere verhang en de grotere waterdiepte houden in dat de bodem is gedaald. Stroomopwaarts blijft het karakter van de rivier ongewijzigd, maar ligt de rivier wel lager om aan te sluiten op de waterstanden in het versmalde traject.

Net als zandwinning leidt ook normalisatie tot een lagere bodem bovenstrooms van de ingreep.

3.3 Vuistregel voor nieuw evenwicht

Figuur 3-1 laat zien dat de bodemdaling door zandwinning langs de gehele rivier optreedt, maar op de plaats van de zandwinning het grootst is. De op termijn bereikte totale daling op het winningspunt is te berekenen met een eendimensionale analytische methode (Jansen et al, 1979, Part 2, paragraaf 3.3.4). Uit deze methode volgt voor de totale daling als gevolg van normalisatie en zandwinning:

$$\Delta z_b = Li \left[\left(1 - \frac{\Delta S}{S} \right)^{3/b} \left(1 - \frac{\Delta B}{B} \right)^{1-3/b} - 1 \right] - h \left[\left(1 - \frac{\Delta S}{S} \right)^{-1/b} \left(1 - \frac{\Delta B}{B} \right)^{1/b-1} - 1 \right]$$

waarin

B	=	initiële breedte van het zomerbed (m)
b	=	niet-lineariteit van transportformule die het sedimenttransport voorspelt als functie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid (-). Voorwaarde: $b > 3$
h	=	initiële waterdiepte bij representatieve afvoer (m)
i	=	initieel bodemverhang (-)
L	=	afstand tussen locatie van zandwinning en riviermond (m)
S	=	jaarlijkse zandvracht (m^3/jaar)
ΔB	=	reductie van de breedte van het zomerbed (m)
ΔS	=	jaarlijkse winning van zand (m^3/jaar)
Δz_b	=	daling van de rivierbodem ter plaatse van het winningspunt (m)

Een getallenvoorbeeld verduidelijkt deze formule. Voor de Merwedes kan b op 5 gesteld worden, omdat de transportformule van Engelund & Hansen (1967) hier goed voldoet. Bij een zandwinning van 250 000 m³/jaar en een zandvracht van 580 000 m³/jaar bedraagt de relatieve onttrekking van zand $\Delta S / S = 0,43$. Voor een normalisatie die de breedte van 360 m terugbrengt naar 310 m, bedraagt de relatieve versmalling $\Delta B / B = 50/360 = 0,14$. Bij een initieel verhang van 0,11 m/km ($= 1,1 \cdot 10^{-4}$), een initiële waterdiepte van 4,82 m en een afstand van 20 km tot de riviermond, voorspelt de formule op het winningspunt op termijn een totale bodemdaling van 2,0 m.

3.4 Tijdschaal van morfologische aanpassing

De tijdschaal waarop het bodemlengteprofiel van een rivier zich aanpast kan geschat worden met de formule van de Vries (1975), die ook gegeven wordt door Jansen et al (1979, Part 2, paragraaf 3.4.3):

$$T = \frac{3L^2 Bi}{bS}$$

waarin

B	=	breedte van het zomerbed (m)
b	=	niet-lineariteit van transportformule die het sedimenttransport voorspelt als functie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid (-). Voorwaarde: $b > 3$
i	=	bodemverhang (-)
L	=	afstand tussen beschouwde locatie en riviermond (m)
S	=	jaarlijkse zandvracht (m ³ /jaar)
T	=	morfologische tijdschaal volgens de Vries (jaar)

De morfologische tijdschaal geeft aan hoe lang het duurt voordat zich op de beschouwde locatie 50% van de totale aanpassing van de bodem heeft voltrokken. De tijd om zich volledig aan te passen is overigens nog veel langer. Voor $B = 310$ m, $i = 0,11$ m/km ($= 1,1 \cdot 10^{-4}$), $b = 5$ en $S = 580\,000$ m³/jaar, geldt op een afstand van 20 km van de riviermond dat $T = 14$ jaar. Een totale aanpassing duurt daar dan enkele decennia. Op een afstand van 50 km van de riviermond geldt dat $T = 88$ jaar. Daar duurt een totale aanpassing dan enkele eeuwen.

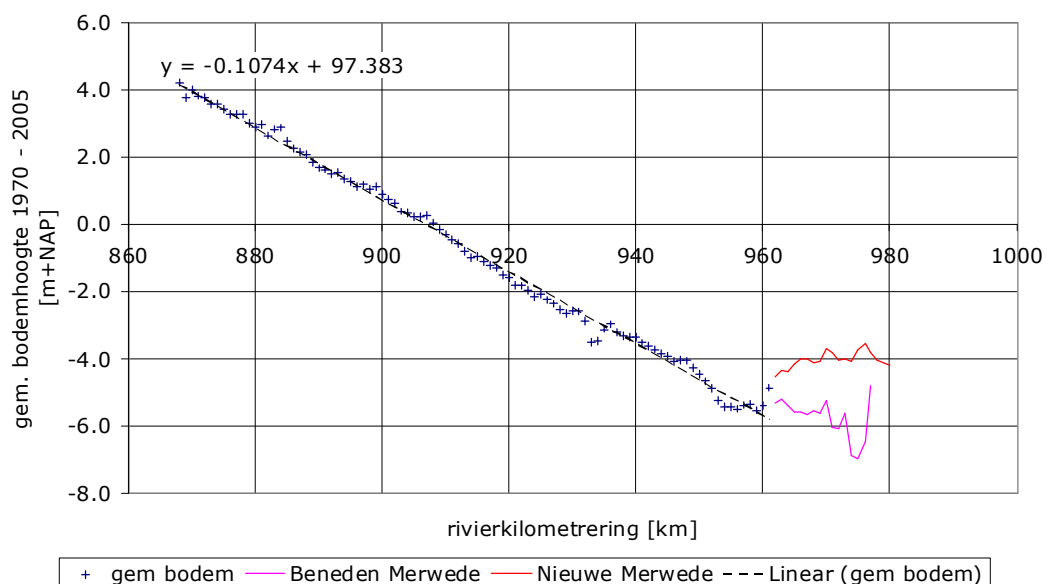
3.5 Sterk geschematiseerde SOBEK-berekeningen

Omdat het nieuwe SOBEK-model van de Pannerdensche Kop tot Hoek van Holland pas in een laat stadium beschikbaar kwam, is eerst een sterk vereenvoudigd SOBEK-model gebruikt. Dit model bestaat uit een enkele 90 km lange riviertak die de Waal en de Boven-Merwede voorstelt tussen km 870 en km 960. De initiële instellingen staan in Tabel 3-1. Bij het laten inspelen van het model zijn deze nog enigszins gewijzigd. Voor het sediment is de transportformule van Engelund & Hansen (1967) gebruikt.

Tabel 3-1. Basisinstellingen van sterk geschematiseerd SOBEK-model.

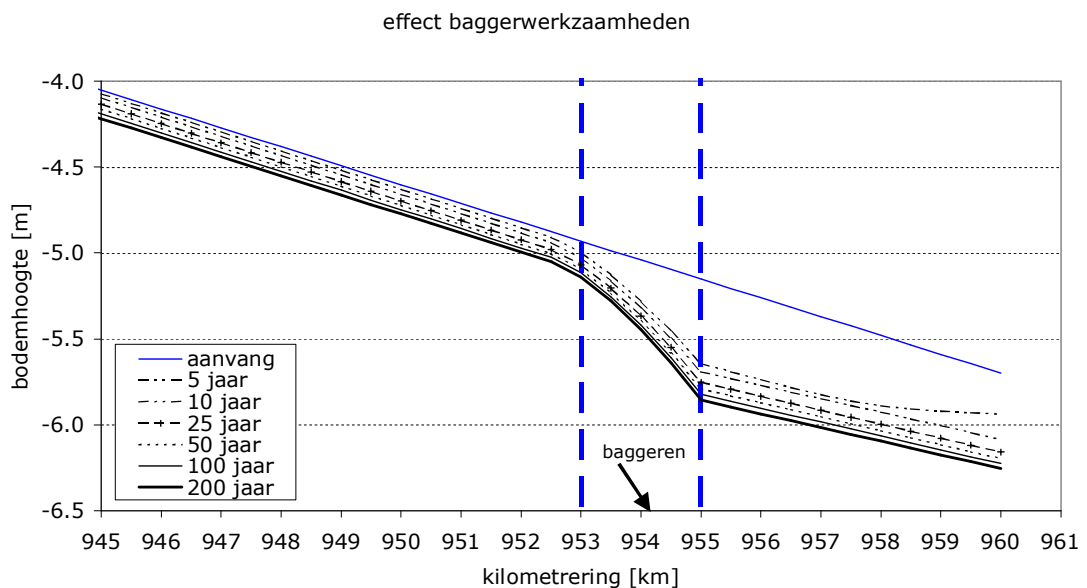
Grootheid	Symbool	Waarde	Eenheid	Toelichting
Zomerbedbreedte	B	360	m	Situatie na 1 ^e normalisatie van de Waal (1867-1890)
Mediane sediment-korrelgrootte	D ₅₀	1,0	mm	Volgens Zeekant (1983) varieert D ₅₀ van circa 1 mm bij Dodewaard tot circa 0,9 mm bij Zaltbommel
Afvoer	Q	1600	m ³ /s	Voorwaarde op bovenrand. Constante afvoer die representatief is voor het jaarlijkse afvoerverloop
Zandvracht	S	580 000	m ³ /jaar	Voorwaarde op bovenrand. Bron: ten Brinke (2004)
Hydraulische ruwheid van het zomerbed	C	40	m ^{1/2} /s	Volgens Zeekant (1983) ligt de C-waarde tussen St. Andries en Zaltbommel nabij 40 m ^{1/2} /s
Initieel bodemverhang	i	0,11	m/km	Trendlijn van gemiddelde bodemligging in periode 1970-2005, zie Figuur 3-3
Evenwichtswaterdiepte	h	4,82	m	$h = \left(\frac{Q}{BC\sqrt{i}} \right)^{3/2}$
Evenwichts-stroomsnelheid	u	0,92	m/s	$u = \frac{Q}{Bh} = C\sqrt{hi}$
Initiële bodemhoogte	z _b	+4,20	m+NAP	Bovenrand km 870
		-5,70	m+NAP	Benedenrand km 960
Initiële waterstand	z _w	-0,88	m+NAP	Benedenrand km 960. $z_w = z_b + h$
Plaatsstap	Δx	500	m	Op het 90 km lange traject zijn er dus 181 rekenroosterpunten

Waal en Merweden



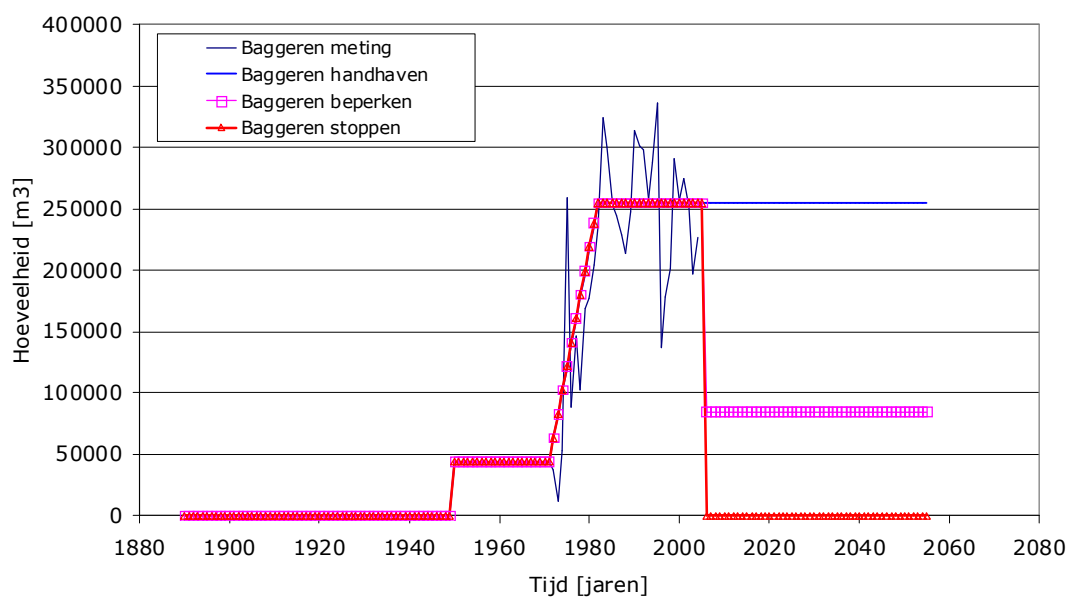
Figuur 3-3. Trend van de over 1975 tot 2005 gemiddelde bodemligging van Waal en Boven Merwede ter bepaling van het gemiddelde verhang.

Het SOBEK-model is eerst voor een periode van 100 jaar ingespeeld om er zeker van te zijn dat de referentiesituatie een rivier in evenwicht is. Daarbij vertoonde het bodemniveau aan de bovenrand nog een stijging van 1 mm en aan de benedenrand een daling van 1 mm. Figuur 3-4 toont de resultaten van een berekening met dit model als tussen km 953 en km 955 jaarlijks 250 000 m³ zand gewonnen wordt. De figuur lijkt kwalitatief op Figuur 3-1, met dien verstande dat de puntonttrekking in Figuur 3-1 leidt tot een steile bodemsprong, terwijl het onttrekken uit een traject in Figuur 3-4 leidt tot een meer geleidelijke overgang tussen de hogere bodem bovenstrooms en de diepere bodem benedenstrooms. De sterke verdieping in het traject stroomafwaarts wordt grotendeels al binnen de eerste vijf jaar gerealiseerd. Daarna zet de daling echter nog lang door.

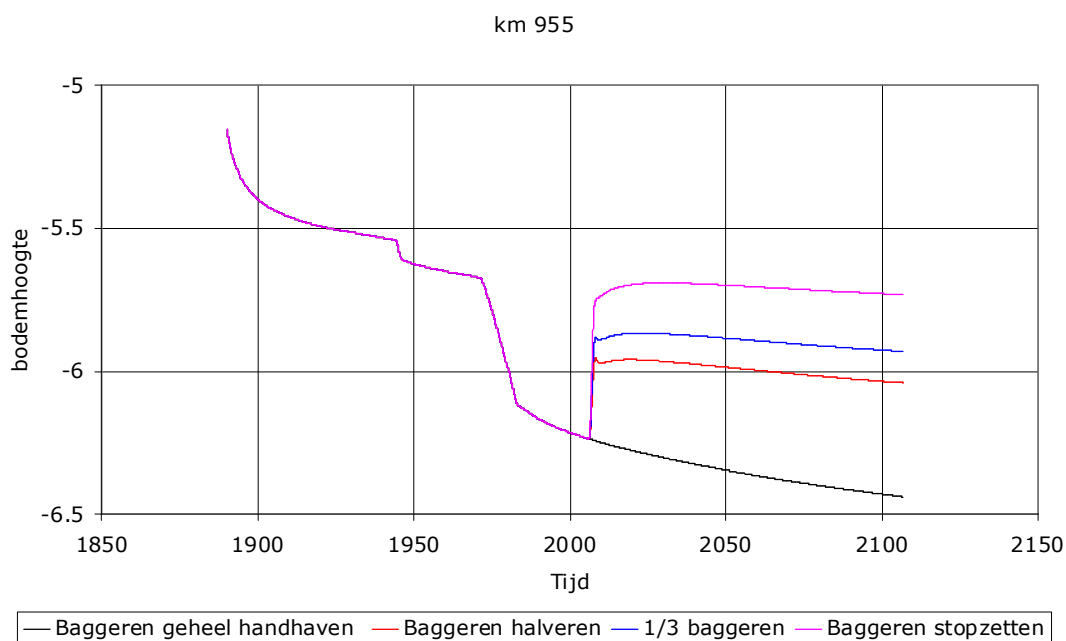


Figuur 3-4. Bodemontwikkeling bij een zandwinning van 250 000 m³/jaar.

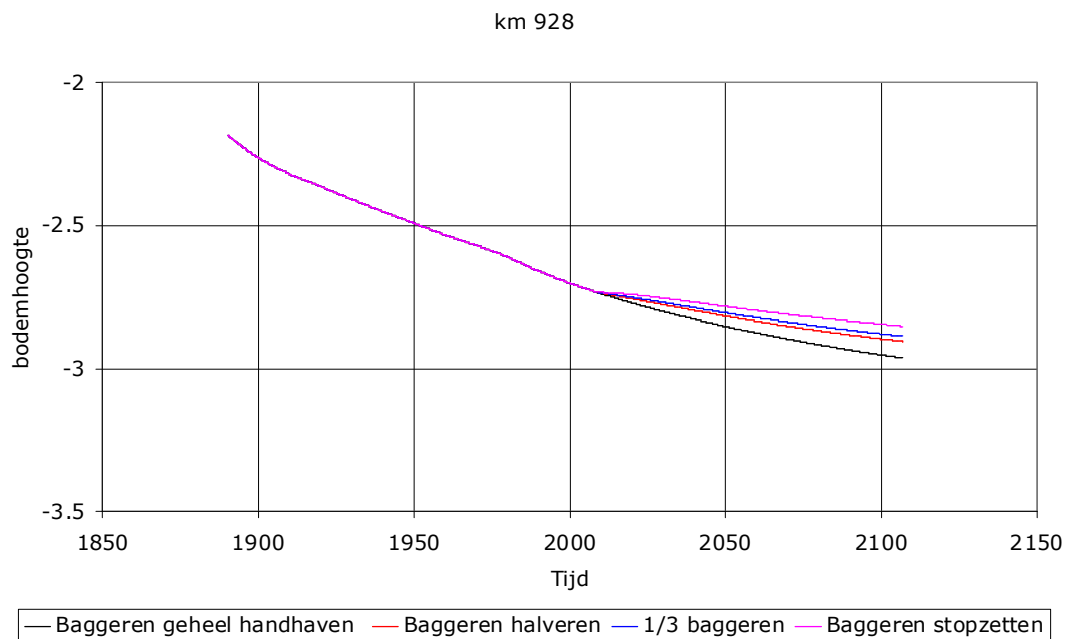
Na de afregeling van het model en enkele eerste oriënterende berekeningen, zijn verschillende berekeningen gemaakt van de bodemontwikkeling sinds 1890, waarbij de breedte overeenkomstig de tweede normalisatie is teruggebracht van 360 m naar 310 m. De jaarlijkse hoeveelheden sedimentonttrekking door baggeren zijn geschematiseerd als in Figuur 3-5. In deze figuur zijn tevens drie scenario's voor de toekomstige zandwinning aangegeven: handhaving op het huidige niveau, reductie tot 1/3 van het huidige niveau en volledige stopzetting. Naast deze scenario's is ook het scenario doorgerekend waarin de zandwinning ten opzichte van het huidige niveau gehalveerd wordt. De resultaten voor de locatie van de grootste bodemdaling (km 955) en de vaste laag bij St. Andries (km 928) zijn weergegeven in Figuren 3-6 en 3-7. Opvallend is dat door de normalisatie zelfs volledige stopzetting van de zandwinning binnen de periode tot 2080 geen halt toeroept aan de bodemdaling. Stroomafwaarts leidt vermindering van de zandwinning wel eerst tot een aanzienlijke verhoging van de bodem. Stroomopwaarts leidt stopzetting van de zandwinning ertoe dat de bodem bij St. Andries in 2060 ongeveer 0,1 m hoger ligt dan in het geval van voortzetting van de winning op het huidige niveau.



Figuur 3-5. Randvoorwaarden voor sedimentonttrekking.



Figuur 3.6. Verloop van bodemligging op locatie van grootste bodemdaling (km 955).



Figuur 3-7. Verloop van bodemdaling ter plaatse van de vaste laag bij St. Andries (km 928).

3.6 Berekening met model van Pannerdensche Kop tot Hoek van Holland

Al langere tijd bestaat er voor waterbeweging en waterkwaliteit een eendimensionaal model van de Rijn-Maasmonding op basis van het softwarepakket SOBEK. Dit pakket biedt ook de mogelijkheid om morfologische veranderingen te berekenen, maar tot voor kort kon dit alleen op basis van formuleringen voor zandtransport onder de aanname dat transport overal gelijk is aan de lokale capaciteit van de stroming om zand te transporteren. De formuleringen golden niet voor slib en konden ook geen naijleffecten reproduceren die optreden als sedimenttransport zich met een zekere vertraging aanpast aan veranderingen in de stroming. In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA hebben Mosselman et al (2005) de bouwstenen aangegeven die nodig zijn om het SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding ook geschikt te maken voor de berekening van morfologische veranderingen als gevolg van slibtransport. Hiervoor werden een korte-termijnspoor en een lange-termijnspoor voorgesteld. Het korte-termijnspoor betreft de inbouw van nieuwe sedimenttransportcapaciteitformules van Van Rijn, die een uitbreiding naar slib inhouden van Van Rijn's oude zandtransportformules. Het lange-termijnspoor betreft het bouwen van een koppeling met het waterkwaliteitsmodel DELWAQ op een zodanige manier dat erosie en sedimentatie van de bodem bepaald kunnen worden uit met DELWAQ berekende resuspensie en sedimentatie van slib. Voor beide sporen heeft Rijkswaterstaat RIZA in de loop van 2006 de verdere ontwikkeling opgedragen aan WL | Delft Hydraulics: het korte-termijnspoor in de opdracht RI-4623 "Modellering morfologie van Pannerdensche Kop tot Hoek van Holland" en het lange-termijnspoor in de opdracht RI-4645 "Morfologisch SOBEK-model Rijn-Maasmonding". De eerstgenoemde opdracht behelste tevens een uitbreiding met de Waal om zo het hele gebied van de Pannerdensche Kop tot Hoek van Holland te bestrijken.

Aanvankelijk werd verwacht dat het korte-termijnspoor in 2006 zou kunnen worden afgerond en dat het resulterende model gebruikt zou kunnen worden binnen de huidige studie naar de effecten van zandwinning op de Merwedes. Het model zou dan afgeregeld worden op de sedimentbalans van Snippen et al (2005). Bij de uitvoering traden echter zoveel problemen aan het licht, dat tijdige oplevering van een betrouwbaar model niet mogelijk bleek. De periode van uitvoering is verlengd en op dit moment is het nog niet verantwoord om conclusies te baseren op het SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding.

4 Conclusies en aanbevelingen

Berekeningen met een sterk vereenvoudigd SOBEK-model geven aan dat zelfs volledige stopzetting van de zandwinning binnen de periode tot 2080 geen halt toeroept aan de bodemdaling. Daardoor valt geen volume zand vast te stellen dat jaarlijks kan worden gebaggerd op de Boven Merwede en de Beneden Merwede zonder dat significante effecten optreden ten aanzien van waterstanden in het gebied en de afvoerverdeling op de Merwedespilting.

Stroomafwaarts van het winpunt leidt vermindering van de zandwinning wel eerst tot een aanzienlijke verhoging van de bodem. Stroomopwaarts leidt stopzetting van de zandwinning ertoe dat de bodem bij St. Andries in 2060 ongeveer 0,1 m hoger ligt dan in het geval van voortzetting van de winning op het huidige niveau.

Aanvankelijk was het de bedoeling om binnen deze opdracht ook berekeningen uit te voeren met het morfologische SOBEK-model van Rijn-Maasmonding en Waal dat sinds de zomer van 2006 ontwikkeld wordt. Bij deze ontwikkeling traden echter zoveel problemen aan het licht, dat tijdige oplevering van een betrouwbaar model niet mogelijk bleek. Vooral nog kunnen daarom alleen conclusies getrokken worden uit de berekeningen met het sterk vereenvoudigde model. Daarmee is slechts globaal bekend wat de effecten zijn geweest van het tot 2005 gevoerde zandwinbeleid.

Ondanks het gebrek aan een precieze kwantificering, bevestigt deze studie dat reductie van de zandwinning positief bijdraagt aan het tegengaan van de bodemdaling. Aanbevolen wordt om daarom toch nu al de zandwinning te reduceren en het effect van deze reductie nauwgezet te monitoren. Overigens is het mogelijk om effecten van zandwinning te compenseren door stroomafwaarts zand te suppleren dat minder geschikt is voor industriële toepassingen.

Aanbevolen wordt verder om de ontwikkeling van het SOBEK-model voort te zetten met een realistischer planning dan tot dusverre gehanteerd is. Daarbij is het spoor met DELWAQ te verkiezen boven het spoor met de nieuwe sedimenttransportformules van Van Rijn, omdat er geen verschil van betekenis meer is tussen de termijnen waarop het werk langs ieder van deze sporen gerealiseerd kan worden. Ook wordt aanbevolen om de zandwinners nauw bij deze ontwikkeling te betrekken, zodat ze op de hoogte blijven en waar mogelijk nog aanvullende gegevens kunnen toeleveren omtrent zandwinning in het verleden. Hun kennis over baggerwerken en processen in het gebied vormt een waardevolle bron van aanvullende informatie voor de modellering.

Tenslotte wordt aanbevolen om de speelruimte vast te stellen voor de toelaatbare bodemdaling bij St. Andries tot 2060. Een voor de hand liggend criterium zou er kunnen zijn dat de waterdiepte aan de benedenrand van de vaste laag bij OLR groter of gelijk is aan de in het project Toekomstvisie Waal beoogde vaardiepte van 2,80 m. Daarnaast kunnen andere criteria beschouwd worden, zoals bijvoorbeeld ten aanzien van de stabiliteit van kribben en dijken. Op deze manier kan eenduidig de benodigde reductie van de zandwinning worden bepaald.

Daartoe kunnen berekeningen gemaakt worden zodra het SOBEK-model van Rijn-Maasmonding en Waal voldoende is uitontwikkeld om met vertrouwen conclusies te baseren op de resultaten.

5 Literatuurverwijzingen

- Beekman, A.A. (1932), Nederland als Polderland (beschrijving van den eigenaardigen toestand der belangrijkste helft van ons land), Zutphen, W.J. Thieme & Cie, derde druk.
- Blaeu, I. (1665), Atlas Maior; Belgica Regia & Belgica Foederata. Herdruk van atlas uit collectie Oostenrijkse Nationale Bibliotheek, Wenen, Benedikt Taschen.
- Brinke, W.B.M. ten (2004), De beteugelde rivier; Bovenrijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn-Lek en IJssel in vorm. Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuurwetenschap & Techniek, Deel 81, ISBN 907698865X.
- Engelund, F. & E. Hansen (1967), A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Jansen, P.Ph., L. van Bendegom, J. van den Berg, M. de Vries & A. Zanen (1979), Principles of river engineering; The non-tidal alluvial river. Pitman, London, Heruitgave Delftse Uitgevers Maatschappij, 1994, ISBN 90 6562 146 6.
- Meulen, F. van der (2007), Persoonlijke mededeling, Rotterdam, 5 april 2007.
- Mosselman, E., J. Crebas, J. Icke, K. Sloff & Z.B. Wang (2005), Bouwstenen voor nieuw morfologisch SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding. Rapport Q4083.00, WL | Delft Hydraulics.
- Praamsma, J.M. (1986), De regulatie en kanalisatie van de grote rivieren in Nederland sinds de 19e eeuw. Scriptie ten behoeve van het doctoraal examen Sociale Geografie, Universiteit Utrecht.
- Putten, C. van (2006), De economische waarde van rivierzand in het Benedenrivierengebied. Nederlandse Vereniging van Zandwinners, www.bgbsgb.nl, Haarlem, juli 2006.
- Roodnat, W. (2006), De Sint Elizabethsvloed; Hoe het water geschiedenis schreef. Verhalen van Dordrecht deel 7, Uitgeverij De Stroombaan, ISBN 978-90-76496-28-3.
- Snippen, E., A. Fioole, H. Geelen, A. Kamsteeg, A. van Spijk & T. Visser (2005), Sediment in (be)weging; Sedimentbalans Rijn-Maasmonding periode 1990-2000. Rapport 2005.023, Rijkswaterstaat Zuid-Holland, september 2005.
- Vermeer, K. & E. Mosselman (2005), Morfologische effecten in de Rijn-Maasmonding; Achtergronddocument bij de PKB Ruimte voor de rivier. Rapport PR1026, HKV Lijn in Water & WL | Delft Hydraulics (WL: Q4041).
- Vries, M. de (1975), A morphological time-scale for rivers. Proceedings 16th Congress IAHR, São Paulo (ook Delft Hydr. Lab. Publ. No.147).
- Vuren, S. van & C.J. Sloff (2006), Verbetering 1-D Rijntakkenmodel vanaf Andernach. Rapport Q4130, WL | Delft Hydraulics.
- Vuren, S. van (2006), Persoonlijke mededeling, 14 december 2006.
- Wolters-Noordhoff Atlasproducties (redactie, 1990), Grote historische atlas van Nederland; Zuid-Nederland 1838-1857. ISBN 9001 96233 5, gebaseerd op Topografische en militaire kaart van het Koninkrijk der Nederlanden, schaal 1:50.000.
- Zeekant, J. (1983), Enkele hydraulische en morfologische parameters van de Nederlandse Rijntakken. Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost, Nota 83.12, TOW nr. A35.