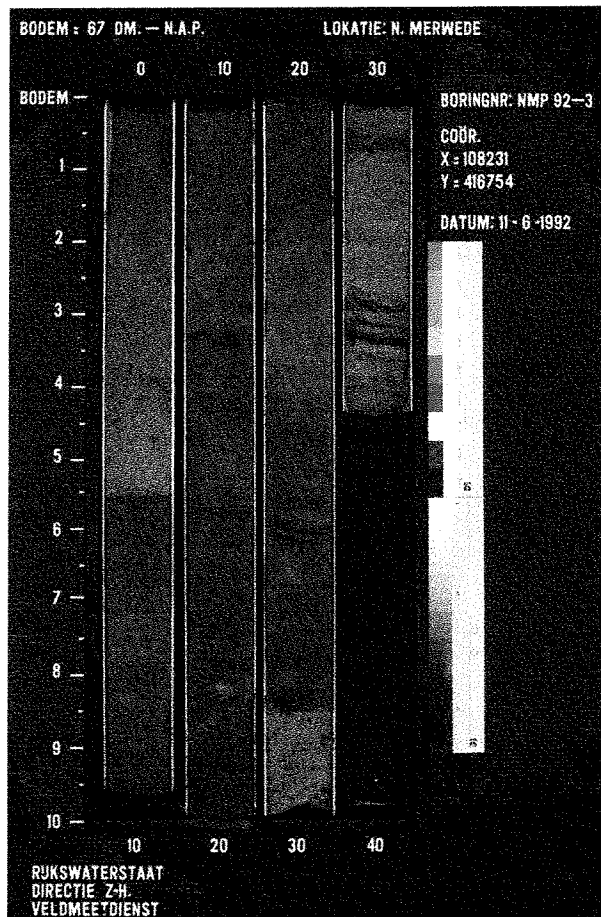




Zand-slibsegregatie

Modellering van zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede



M. van Ledden

Oktober 1998

Zand-slibsegregatie

Modellering van zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede

Afstudeerrapport

**M. van Ledden
Oktober 1998**

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Rivierwaterbouwkunde

Prof.dr.ir. H.J. de Vriend
Dr.ir. Z.B. Wang
Drs. E.J. Houwing

Inhoudsopgave

Lijst met figuren

Lijst met tabellen

Samenvatting

1. Inleiding	1-1
1.1 Zand-slibsegregatie	1-1
1.2 Doelstelling	1-3
1.3 Kader onderzoek	1-3
1.4 Beperkingen	1-4
1.5 Opzet rapport	1-4
2. Beschrijving zand-slibsegregatie	2-1
2.1 Inleiding	2-1
2.2 Beschrijving gedrag zandbodems	2-2
2.3 Beschrijving gedrag slibbodem	2-3
2.4 Mengsels van cohesief en niet-cohesief materiaal	2-4
2.5 Modellen zand-slibsegregatie	2-5
2.5.1 Vuistregel	2-5
2.5.2 LHEC	2-6
2.5.3 2DH Zandslib-model met interactie	2-9
3. De Nieuwe Merwede	3-1
3.1 Inleiding	3-1
3.2 Gebiedsbeschrijving	3-1
3.3 Waterbeweging	3-4
3.4 Sedimenttransport	3-5
3.4.1 Zandtransport	3-5
3.4.2 Slibtransport	3-7
3.5 Morfologische ontwikkeling	3-8
3.5.1 Gegevens	3-8
3.5.2 km 961.2 - 964	3-10
3.5.3 km 964 - km 968.5	3-12
3.5.4 km 968.5 - 975.0	3-14
3.5.5 km 975 - km 979.8	3-18
4. Modelbeschrijving	4-1
4.1 Modelaanpak	4-1
4.2 Waterbeweging	4-2
4.2.1 2DH-vergelijkingen	4-2
4.2.2 Parameters	4-3
4.2.3 Spiraalstroming	4-4
4.2.4 Windgolven	4-7
4.3 Randvoorwaarden waterbeweging	4-9
4.3.1 Bodemtopografie	4-9
4.3.2 Randvoorwaarden 2DH-model	4-10
4.4 Sedimenttransport	4-11
4.4.1 2DH-vergelijking	4-11
4.4.2 Dispersie-coëfficiënten	4-11
4.4.3 Bronterm zand	4-12
4.4.4 Bronterm slib	4-17

4.5 Sedimentrandvoorwaarden	4-19
4.5.1 Zandrandvoorwaarde	4-19
4.5.2 Slibrandvoorwaarde.....	4-20
5. Simulaties.....	5-1
5.1 Numerieke parameters	5-1
5.2 Gevoeligheidsonderzoek waterbeweging	5-1
5.2.1 Viscositeit	5-2
5.2.2 Ruwheid.....	5-3
5.3 Calibratie sedimenttransportmodel	5-5
5.3.1 Zandtransport.....	5-5
5.3.2 Slibtransport.....	5-8
5.4 Verificatie	5-12
5.5 Gevoeligheidsonderzoek.....	5-14
5.5.1 Zandtransport.....	5-14
5.5.2 Slibtransport.....	5-16
6. Resultaten	6-1
6.1 Waterbewegingsberekeningen	6-1
6.2 Sedimenttransportberekeningen.....	6-2
6.2.1 Zand.....	6-2
6.2.2 Slib.....	6-6
7. Verklaringen zand-slibstructuren	7-1
7.1 Traject km 961 - km 968	7-1
7.1.1 Horizontale segregatie	7-1
7.1.2 Verticale segregatie.....	7-4
7.2 Traject km 968 - km 975	7-4
7.2.1 Horizontale segregatie	7-4
7.2.2 Verticale segregatie.....	7-6
7.3 Traject km 975 - km 979	7-9
7.3.1 Horizontale segregatie	7-9
7.3.2 Verticale segregatie.....	7-11
8. Conclusies	8-1
8.1 Zand-slibmodellering.....	8-1
8.2 Verklaringen zand-slibstructuren.....	8-2
8.3 Gedragkennis Nieuwe Merwede	8-2
8.4 Verwachtingen	8-3
8.5 Aanbevelingen	8-4
Literatuur	
Appendix A. Schatters	A-1
Appendix A.1 Maximum Likelihood.....	A-2
Appendix A.2 Methode der Momenten	A-4
Appendix A.3 Kleinste Kwardraten Methode.....	A-6

Appendix B	B-1
Appendix B.1 Bodemprofiel 1970.....	B-3
Appendix B.2 Bodemprofiel 1993.....	B-5
Appendix B.3 Verschilkaart 1970 - 1993	B-7
Appendix B.4 Verschilkaart 1993 - 1994	B-9
Appendix B.5 Baggergegevens.....	B-11
Appendix C	C-1
Appendix C.1 3-D waterbewegingsvergelijkingen.....	C-1
Appendix C.2 2-DH waterbewegingsvergelijkingen	C-2
Appendix C.3 Viskeuze term - turbulente term	C-7
Appendix C.4 Turbulente term - advection term	C-8
Appendix C.5 Coriolis-term - turbulente term.....	C-9
Appendix D	D-1
Appendix D.1 Golfhoogte en -periode	D-1
Appendix D.2 Diepwatercriterium.....	D-3
Appendix D.3 Horizontale snelheidsamplitude	D-4
Appendix E	E-1
Appendix E.1 Randvoorwaarden 1D-model.....	E-1
Appendix E.2 Resultaten 1D-berekeningen 1993.....	E-2
Appendix E.3 Resultaten 1D-berekening 1970	E-8
Appendix F. Gevoeligheid waterbeweging	F-1
Appendix F.1 Viscositeit	F-1
Appendix F.2 Ruwheid.....	F-5
Appendix G. Resultaten calibratie	G-1
Appendix G.1 Zandtransport	G-1
Appendix G.2 Slibtransport.....	G-3
Appendix H. Snelheidsvelden	H-1
Appendix H.1 $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	H-1
Appendix H.2 $Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$	H-7
Appendix H.3 $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	H-13
Appendix H.4 $Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$	H-19

Lijst met figuren

Figuur 1-1 Horizontale segregatie in de Nieuwe Merwede (bodemmonsters 1992)	1-1
Figuur 1-2 Boring in de geul van de Nieuwe Merwede (juni 1992).....	1-2
Figuur 2-1 Morfologische loop.....	2-1
Figuur 2-2 Bronterm als $\tau_e > \tau_d$	2-6
Figuur 2-3 Bronterm als $\tau_e < \tau_d$	2-7
Figuur 2-4 LHEC vs. Slibpercentage bij Bovenrijnafvoer $Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$	2-8
Figuur 3-1 Stroomsnelheid Werkendam (km 961)	3-3
Figuur 3-2 Stroomsnelheid Anna Jacominaplaat (km 979)	3-3
Figuur 3-3 Verschilkaart 1970 - 1993.....	3-11
Figuur 3-4 Verschilkaart 1970 - 1993.....	3-13
Figuur 3-5 Verschilkaart 1970 - 1993.....	3-16
Figuur 3-6 Verschilkaart 1970 - 1993.....	3-19
Figuur 4-1 Dwarsraai	4-9
Figuur 4-2 Coëfficiënt voor de bronterm \bar{f}	4-15
Figuur 4-3 Concentratie vs. Bovenrijnafvoer Lobith (1973 - 1978).....	4-21
Figuur 4-4 Percentage $< 63 \mu \text{ m}$ vs. Bovenrijnafvoer.....	4-21
Figuur 5-1 Waterstanden bij verschillende viscositeit.....	5-2
Figuur 5-2 Debiet bij verschillende viscositeit	5-2
Figuur 5-3 Waterstand bij verschillende ruwheid.....	5-4
Figuur 5-4 Debiet bij verschillende ruwheid	5-4
Figuur 6-1 Bodemverandering zand 1993	6-3
Figuur 6-2 Klasse-indeling zand 1993	6-4
Figuur 6-3 Klasse-indeling 1970	6-5
Figuur 6-4 Slibbodem 1993	6-7
Figuur 6-5 Slibbodem 1970	6-8
Figuur 6-6 Klasseindeling slibsedimentatie 1993.....	6-9
Figuur 6-7 Klasseindeling slibsedimentatie 1970.....	6-10
Figuur 6-8 Slibsedimentatie in kribvak (km 978).....	6-10

Figuur 7-1 Klasse-indeling zand km 961 - 968 (1993).....	7-1
Figuur 7-2 Klasse-indeling slib km 961 - 968 (1993).....	7-2
Figuur 7-3 Slibsedimentatie rond een krib.....	7-3
Figuur 7-4 Klasse-indeling zand km 968 - 975 (1993).....	7-4
Figuur 7-5 Klasse-indeling slib km 968 - 975 (1993).....	7-5
Figuur 7-6 Klasse-indeling zand km 968 - 975 (1970).....	7-6
Figuur 7-7 Klasse-indeling slib km 968 - 975 (1970).....	7-7
Figuur 7-8 Bodemverandering bij 1200 en 2200 m ³ /s.....	7-7
Figuur 7-9 Bodemverandering bij 3000 en 6000 m ³ /s.....	7-8
Figuur 7-10 Klasse-indeling zand km 975 - 979 (1993).....	7-9
Figuur 7-11 Klasse-indeling slib km 975 - 979 (1993).....	7-10
Figuur 7-12 Klasse-indeling zand km 975 - 979 (1970).....	7-11
Figuur 7-13 Klasse-indeling slib km 975 -979 (1970).....	7-12
Figuur 7-14 Bodemverandering bij 1200 en 2200 m ³ /s.....	7-13
Figuur 7-15 Bodemverandering bij 3000 en 6000 m ³ /s.....	7-13

Lijst met tabellen

Tabel 2-1 Situaties voor LHEC.....	2-7
Tabel 3-1 Waterbeweging voor en na sluiting	3-1
Tabel 3-2 Stroomsnelheden bij Werkendam (km 961).....	3-2
Tabel 3-3 Stroomsnelheden bij Anna Jacominplaat (km 979).....	3-2
Tabel 3-4 Parameters kansverdeling Bovenrijnafvoer.....	3-4
Tabel 3-5 Afvoer Nieuwe Merwede	3-5
Tabel 3-6 Bodem- en suspensietransport.....	3-6
Tabel 3-7 Slibconcentraties.....	3-7
Tabel 3-8 Sedimentbalans Nieuwe Merwede	3-9
Tabel 3-9 Bodemverandering (RWS, 1990)	3-10
Tabel 3-10 Boringen (RWS, 1992).....	3-10
Tabel 3-11 Bodemmonsters (Wang, 1996).....	3-10
Tabel 3-12 Valbommonsters (RWS, 1992).....	3-10
Tabel 3-13 Bodemverandering (RWS, 1990)	3-12
Tabel 3-14 Boringen (RWS, 1992).....	3-12
Tabel 3-15 Bodemmonsters traject (Wang, 1996).....	3-12
Tabel 3-16 Valbommonsters (RWS, 1992).....	3-12
Tabel 3-17 Boringen (RWS, 1992).....	3-14
Tabel 3-18 Bodemverandering (UvU, 1993)	3-15
Tabel 3-19 Bodemmonsters (Wang, 1996).....	3-15
Tabel 3-20 Valbommonsters (RWS, 1992).....	3-15
Tabel 3-21 Bodemverandering (UvU, 1993)	3-18
Tabel 3-22 Boringen (RWS, 1992).....	3-18
Tabel 3-23 Bodemmonsters (Wang, 1996).....	3-19
Tabel 4-1 Invloed spiraalstroming op waterbeweging.....	4-6
Tabel 4-2 Invloed spiraalstroming op sedimenttransport	4-6
Tabel 4-3 Invloed van windgolven	4-7
Tabel 4-4 Snelheidsamplitude aan de bodem	4-8
Tabel 4-5 Zwevende stofconcentratie en slibconcentratie	4-22
Tabel 5-1 Bodem- en suspensietransport per getijperiode.....	5-5
Tabel 5-2 Kansen representatieve afvoeren	5-6
Tabel 5-3 Jaarlijks zandtransport (*10 ⁹ kg)	5-6
Tabel 5-4 Percentage suspensietransport	5-7
Tabel 5-5 Aandeel in het jaarlijks transport (10 ⁹ kg).....	5-8
Tabel 5-6 Jaarlijkse slibvracht	5-9
Tabel 5-7 Slibrandvoorwaarde Nieuwe Merwede	5-9
Tabel 5-8 Slibtransport 1993	5-10
Tabel 5-9 Aangepaste resultaten slibtransport 1993	5-11
Tabel 5-10 Jaarlijks slibtransport bij verschillende kritische sedimentatiesnelheid.....	5-11
Tabel 5-11 Slibtransport 1970	5-12
Tabel 5-12 Bodemveranderingen 1994-1993	5-12

Tabel 5-13 Zandtransport 1993	5-13
Tabel 5-14 Vergelijking lodingen vs. Modelresultaten	5-13
Tabel 5-15 Kansverdeling	5-14
Tabel 5-16 Vergelijking lodingen vs. Modelresultaten	5-14
Tabel 5-17 Transporten per getijperiode (m ³).....	5-15
Tabel 5-18 Sedimentatie- en erosie (m ³ /getijperiode).....	5-15
Tabel 5-19 Gevoeligheidsanalyse slib	5-16
Tabel 5-20 Transporten per getijperiode (*10 ³ kg/getijperiode).....	5-16
Tabel 6-1 Zandtransport 1993	6-2
Tabel 6-2 Zandtransport 1970	6-2
Tabel 6-3 Klasse-indeling zandtransport	6-4
Tabel 6-4 Slibtransport 1993	6-6
Tabel 6-5 Slibtransport 1970	6-6
Tabel 6-6 Klasse-indeling slibsedimentatie	6-9

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de resultaten van de studie "*Modellering van zand-slibsegregatie in de Nieuwe Merwede*", uitgevoerd voor het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Modellen zijn belangrijke hulpmiddelen om effecten van menselijke ingrepen en natuurlijke veranderingen in rivieren en estuaria te kwantificeren. In de huidige modellen wordt over het algemeen alleen zand of alleen slib gemodelleerd, omdat één van beide geen rol van betekenis speelt in de morfologische ontwikkeling van het systeem. De benedenrivieren en estuaria zijn echter systemen waar zowel zand als slib de morfologische ontwikkeling bepalen. In die systemen kan sprake kan zijn van een ruimtelijke verdeling van zand en slib. Dit fenomeen wordt zand-slibsegregatie genoemd.

Het voorspellen en verklaren van zand-slibstructuren vormt nog steeds een onopgelost probleem. Kennis omtrent dit fenomeen is echter belangrijk voor het ontwikkelen en verbeteren van zand-slibmodellen. Deze modellen kunnen gebruikt worden om de respons van delen van rivieren en estuaria, waarin zand en slib een belangrijke rol spelen, te kwantificeren.

Doel van deze studie is het ontwikkelen van een sedimenttransportmodel voor de Nieuwe Merwede waarin de achterliggende processen zoveel mogelijk deterministisch beschreven worden om zand-slibsegregatie in rivieren en estuaria te verklaren.

Als studiegebied heeft het RIZA gekozen voor de Nieuwe Merwede, een riviertak in het Noordelijk Deltabekken. De bovenstroomse rand ligt bij Werkendam (km 961) en de benedenstroomse rand bij Anna Jacominaplaats (km 979). Op dit traject heeft na de sluiting van het Haringvliet (1970) veel sedimentatie van zand en slib plaatsgevonden. Uit bodemonsters en boringen blijkt dat er sprake is van zowel horizontale als verticale zand-slibstructuren.

Zo blijkt dat in 1992 de toplaag in de Nieuwe Merwede erg zandig was. In de geul wordt sporadisch slib teruggevonden tussen 5 en 15%. In de kribvakken is het slibpercentage over het algemeen hoger dan in de geul (30 - 70%). Op sommige lokaties in de kribvakken worden ook zeer lage slibpercentages waargenomen.

Ook in de vertikaal komen variaties in zand- en slibafzettingen voor. Uit de boringen blijkt dat in het benedenstroomse gedeelte van de Nieuwe Merwede na de sluiting van het Haringvliet (1970) flinke sliblagen zijn afgezet. In deze sliblagen komen dunne zandlagen voor. Deze sliblaag is afgedekt met een zandlaag die de toplaag vormde in 1992.

In dit onderzoek wordt geprobeerd de horizontale en verticale structuren middels een modelstudie te reproduceren. Hiervoor is gebruik gemaakt van een twee-dimensionaal horizontaal (2DH-) suspensietransport model voor zand en slib, uitgaande van respectievelijk een volledige zandbodem en een volledige slibbodem op de Nieuwe Merwede. Er is onder vier verschillende bovenafvoeren gerekend met een bodemschematisatie van 1970 en 1993. De vier bovenafvoeren worden representatief geacht voor de beschrijving van de totale kansverdeling. De simulaties zijn uitgevoerd met het waterbewegingsmodel WAQUA en het sedimenttransportmodel DELWAQ.

Bij de calibratie van de zandrandvoorwaarde is gebleken dat het jaarlijks zandaanbod ($0.4 \cdot 10^9$ kg/jaar) op bovenrand van de Nieuwe Merwede goed beschreven wordt met de vereenvoudigde vergelijking van Van Rijn (1984) met een korreldiameter van $300 \mu\text{m}$. Tevens blijkt dat ongeveer 85% van het totale, jaarlijkse transport in suspensie getransporteerd wordt. Omdat bodemtransport van zand een ondergeschikte rol speelt, is dit niet gemodelleerd. Tenslotte blijkt een sterke invloed van de hoge afvoeren op het jaarlijkse aanbod. Een Bovenrijnafvoer van $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ representeert een kansinterval van 6% (op jaarbasis), terwijl door deze afvoer ongeveer 80% van het totale, jaarlijkse zandaanbod aangevoerd wordt.

Bij het slibmodel is gebleken dat calibratie van de verschillende parameters vrijwel onmogelijk was. Onder hogere afvoeren treedt erosie op in het bovenstroomse gedeelte terwijl uit de metingen blijkt dat daar nauwelijks slib ligt. Omdat uit metingen blijkt dat de Nieuwe Merwede hoofdzakelijk zandig is, is alleen gekeken naar sedimentatie van slib, waarmee bodemveranderingen in de Nieuwe Merwede alleen kwalitatief in de tijd beschreven worden.

Bij verificatie is gebleken dat het model voor 1993 de gemeten bodemveranderingen in de periode 1993-1994 op de Nieuwe Merwede voor het bovenstroomse traject en het middendeel kwalitatief goed beschrijft (**Tabel 1**). De niet gevonden overeenkomst met het benedenstroomse traject wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat alleen is gekeken naar slibsedimentatie. Lokale sliberosie onder hogere afvoeren is niet meegenomen.

Traject	Loding 1993 - 1994	Modelresultaten		
		Zand	Slib	Totaal
Bovenstrooms	+10.6	+10.8	+0.3	+11.1
Middendeel	+5.4	+4.0	+0.7	+4.7
Benedenstrooms	+3.2	+3.7	+2.7	+6.4

Tabel 1 Bodemverandering op jaarbasis (cm/jaar)

Uit het zandmodel voor 1993 blijkt dat op jaarbasis in de gehele Nieuwe Merwede forse zandsedimentatie plaatsvindt. Ongeveer 94% van het zandaanbod blijft achter in het systeem. Onder bovenafvoeren van 2200 en $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ vindt transport en sedimentatie van zand plaats op het bovenstroomse traject en in het middendeel. In het benedenstroomse gedeelte vindt alleen bij hoge afvoeren ($Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$) transport en sedimentatie van zand plaats. Het transport blijft beperkt tot de geul, in de kribvakken treedt nauwelijks zandtransport op.

Het slibmodel voor 1993 geeft aan dat slibsedimentatie bij lage afvoer in de geul vrijwel verwaarloosbaar is ($< 1 \text{ cm/jaar}$ op jaarbasis). Alleen bij de benedenstroomse rand wordt slibsedimentatie in de geul groter (tot 10 cm/jaar) en treedt ook onder gemiddelde bovenafvoer ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$) sedimentatie van slib op. In de kribvakken blijkt dat op sommige plaatsen slibsedimentatie onder alle afvoeren kan optreden. Er zijn echter ook lokaties in de kribvakken waar onder geen enkele afvoer slibsedimentatie optreedt.

Op basis van deze modelresultaten kan de waargenomen grootschalige horizontale segregatie in de Nieuwe Merwede (1992) als volgt verklaard worden. Het lage slibpercentage in de geul ($< 15\%$) wordt veroorzaakt door de te hoge stroomsnelheden onder de alle afvoeren. Hierdoor is slibsedimentatie in de geul niet mogelijk.

Hogere slibpercentages in de kribvakken worden veroorzaakt door de lagere stroomsnelheden en het optreden van slibsedimentatie onder alle afvoeren. Verder wordt in een kribvak zelf ook variatie in het slibpercentage gevonden. Deze lokale variatie is niet alleen het gevolg van de lokale hydrodynamische conditie, maar zeker ook van de lokale geometrie. Lage slibpercentages worden gevonden in gebieden die zijn afgeschermd door een krib of die te ver van de geul af liggen. In beide gevallen vindt geen aanvoer van slib plaats.

Uit het zandmodel voor 1970 blijkt dat het zandtransport in het benedenstroomse gedeelte en het middendeel alleen onder hoge afvoer ($Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$) plaatsvindt. Op het bovenstroomse gedeelte en vindt onder bovenafvoeren van 2200 en 3000 m^3/s zandtransport plaats. Op jaarbasis is voor 1970 sprake van zandsedimentatie over het gehele traject. Ongeveer 94% van het zandaanbod sedimenteert in de Nieuwe Merwede. Het slibmodel geeft flinke slibsedimentatie onder lage en gemiddelde bovenafvoer op het benedenstroomse gedeelte ($\approx 10 - 15 \text{ cm/jaar}$).

Op basis van deze modelresultaten kan geconcludeerd worden dat de gevonden verticale zand-slibstructuren (slibafzettingen met dunne zandlagen) in het benedenstroomse gedeelte het gevolg zijn geweest van afvoervariatie. Grote slibafzettingen zijn opgetreden gedurende lage en gemiddelde Bovenrijnafvoer, terwijl tijdens hoge afvoer ($6000 \text{ m}^3/\text{s}$) sprake dunne zandlagen zijn afgezet.

In dit rapport is aangetoond dat het goed mogelijk is de grootschalige zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede, *een rivier met een dominante bovenafvoer en schijngetij*, te verklaren. De resultaten van het model komen kwalitatief en soms kwantitatief goed overeen met de resultaten verkregen uit boringen, bodemmonsters en lodingen. Het voorspellen van zand-slibstructuren is van belang om de gedragskennis van gebieden in rivieren en estuaria, waar zowel zand als slib een rol spelen, uit te breiden.

1. Inleiding

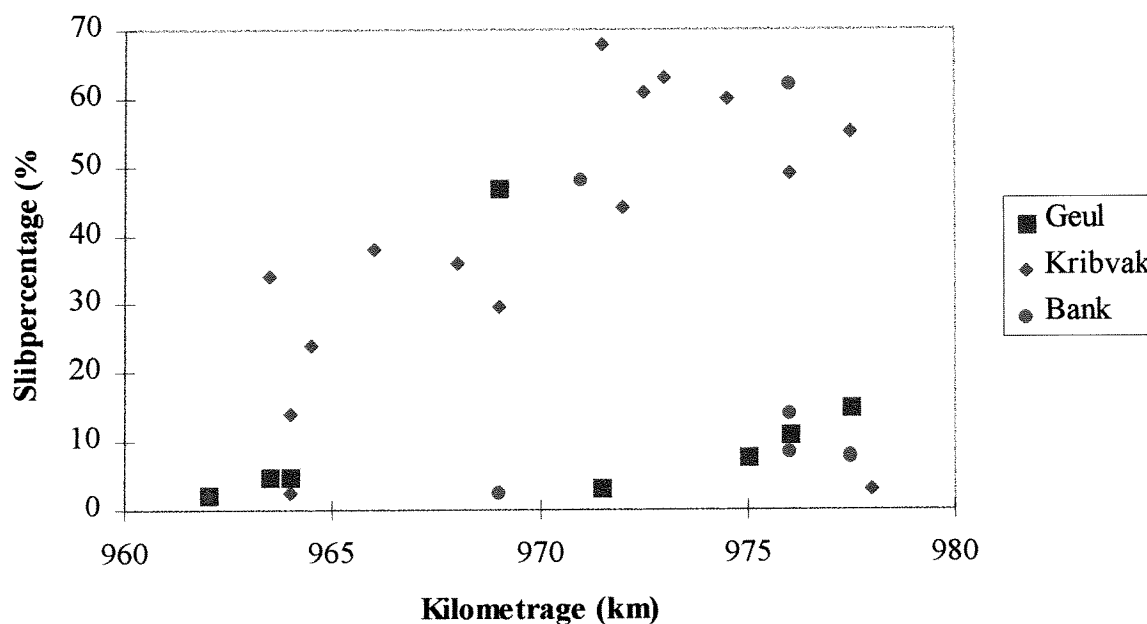
1.1 Zand-slibsegregatie

Modellen zijn belangrijke hulpmiddelen om effecten van menselijke ingrepen en natuurlijke veranderingen in rivieren en estuaria te kwantificeren. Voorbeelden van menselijke ingrepen zijn baggerwerkzaamheden, het afsluiten van een geul of het aanleggen van een nevengeul. Zeespiegelrijzing of veranderingen in het afvoerregime als gevolg van klimaatveranderingen zijn voorbeelden van natuurlijke veranderingen.

In de huidige modellen wordt over het algemeen alleen zand of alleen slib gemodelleerd. In veel gevallen is dit gerechtvaardigd, omdat één van beide voor de morfologische ontwikkeling van het systeem geen rol van betekenis speelt. Op de bovenrivieren worden zandmodellen gebruikt om de bodemontwikkeling te voorspellen. Slib wordt niet meegenomen in de modellering, omdat sedimentatie van slib nauwelijks voorkomt en de bodem bijna geheel uit zand bestaat.

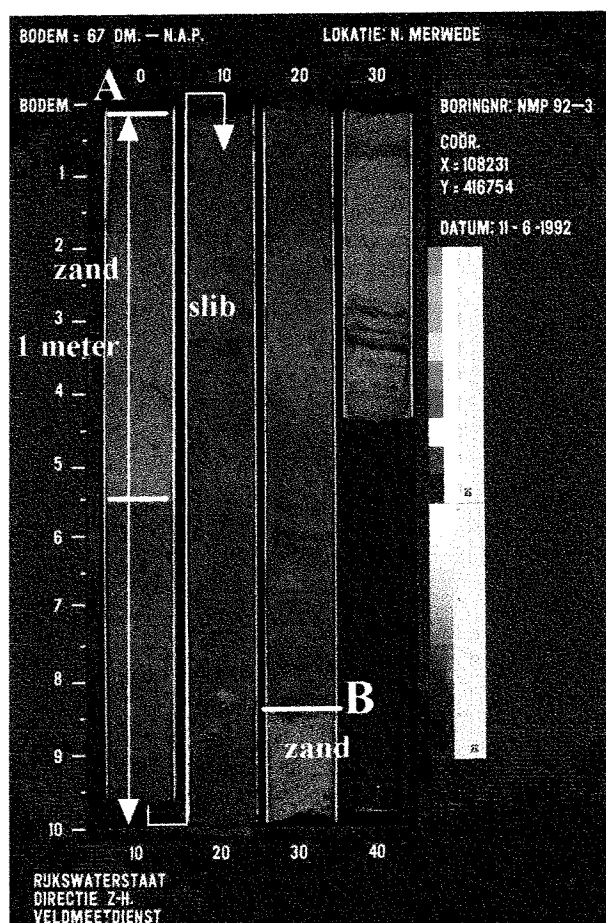
Benedenrivieren en estuaria zijn echter systemen waar zowel zand als slib de morfologische ontwikkeling bepalen en waar sprake kan zijn van een ruimtelijke verdeling van zand en slib in de bodem. Dit laatste fenomeen wordt zand-slibsegregatie genoemd.

In **Figuur 1-1** is een voorbeeld gegeven van horizontale segregatie in de toplaag van de Nieuwe Merwede. Hoge slibpercentages treden vooral op in de kribvakken, terwijl de geul hoofdzakelijk uit zand bestaat.



Figuur 1-1 Horizontale segregatie in de Nieuwe Merwede (bodemmonsters 1992)

Ook in verticale richting kan sprake zijn van segregatie. In **Figuur 1-2** is hiervan een voorbeeld gegeven. In deze boring, die gezet is in de geul van de Nieuwe Merwede (juni 1992), ligt de rivierbodem bij **A**. Daaronder ligt eerst 55 centimeter zand en vervolgens ongeveer 2.4 meter slib bovenop een grove zandlaag (**B**). Uit **Figuur 1-2** kan opgemaakt worden dat op de bewuste boorlokatie zand en slib beide een belangrijke rol hebben gespeeld in de morfologische ontwikkeling van het systeem.



Figuur 1-2 Boring in de geul van de Nieuwe Merwede (juni 1992)

Het verklaren en voorspellen van de horizontale en verticale zand-slibstructuren vormt nog steeds een onopgelost probleem. Kennis omtrent dit fenomeen is belangrijk voor het ontwikkelen en verbeteren van zand-slibmodellen. Deze modellen kunnen gebruikt worden om de respons van delen van rivieren en estuaria, waarin zand en slib een belangrijke rol spelen, te kwantificeren.

Een belangrijke toepassing van zand-slibmodellen is het voorspellen van het slibpercentage in de bodem. Het al dan niet voorkomen van slib is een belangrijk gegeven vanuit ecologisch oogpunt. Enerzijds is slib een drager van nutriënten en derhalve zijn sedimentatiegebieden van slib voedselbronnen voor verschillende soorten. Anderzijds hechten vervuilende stoffen zich aan slib (en nauwelijks aan zand), zodat deze gebieden soms ook sterk vervuild kunnen zijn.

Voor het RIZA ligt op dit moment een belangrijke toepassing in de Integrale Verkenning Benedenrivieren (IVB). Hierin wordt getracht een beslissingsondersteunend systeem (BOS) te maken voor het Noordelijk Deltabekken. Op het gebied van de morfologieontwikkeling is echter een groot gebrek aan kennis, met name bij aanwezigheid van zowel zand als slib. Ook het kwantificeren van veranderingen in de bodemsamenstelling en -ontwikkeling ten gevolge van de veranderingen in het spuibeheer van de Haringvlietsluizen is een belangrijke toepassing van de kennis omtrent zand-slibbodems.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is:

het maken van een sedimenttransportmodel voor de Nieuwe Merwede waarin de achterliggende processen zoveel mogelijk deterministisch beschreven worden om zand-slibsegregatie in rivieren en estuaria te verklaren en te voorspellen.

Belangrijke onderzoeksvragen zijn:

- Is het mogelijk om met behulp van een sedimenttransportmodel de waargenomen zand-slibstructuren te modelleren?
- Kunnen met behulp van het model verklaringen gegeven worden voor de waargenomen structuren?
- Wat zijn de beperkingen van het model? Welke metingen en/of studies zouden verricht moeten worden om de geldigheid te verbeteren?

1.3 Kader onderzoek

Het kader van deze studie wordt gevormd door het grootschalig onderzoek naar zand-slibsegregatie bij het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA). Een belangrijke motief voor dit onderzoek wordt gevormd door het feit dat het tot op heden niet mogelijk is de morfologische ontwikkeling van watersystemen waarin zowel zand als slib een belangrijke rol spelen, kwantitatief te voorspellen.

In het onderzoek van het RIZA is de Nieuwe Merwede als studiegebied gekozen. Sinds de sluiting van het Haringvliet in 1970 is in dit gebied veel zand en slib gesedimenteerd. In 1992 zijn boringen verricht en met behulp van kennis over de waterbeweging is geprobeerd de waargenomen verticale afzettingen van zand en slib in de boringen kwalitatief te verklaren (Kuijper, 1995). Daarnaast zijn bodemmonsters van de toplaag genomen die door Wang (1997) zijn gebruikt om met behulp van een lokale parameter (LHEC) de horizontale bodemsamenstelling te voorspellen. Na vergelijking met de bodemmonsters is geconcludeerd dat LHEC voor de Nieuwe Merwede een goed onderscheidingsvermogen geeft tussen gebieden waarbij de toplaag uit meer en uit minder dan 10% slib is samengesteld.

Een logische stap in dit onderzoek is de ontwikkeling van een twee-dimensionaal, horizontaal sedimenttransportmodel waarin de achterliggende processen zoveel mogelijk deterministisch en kwantitatief beschreven worden. Deze stap vormt het onderwerp van deze studie, getiteld "**Modellering van zand-slibsegregatie in de Nieuwe Merwede**". In deze studie is gebruik gemaakt van de numerieke modellen WAQUA en DELWAQ. Deze modellen worden bij het RIZA veel toegepast voor waterbeweging- en sedimenttransportsimulaties.

1.4 Beperkingen

Een belangrijke beperking in deze studie is dat een sedimenttransportmodel gemaakt wordt waarin alleen de waterbeweging en het (initiële) sedimenttransport berekend wordt. De terugkoppeling van de bodemveranderingen op de waterbeweging vindt niet plaats (morfodynamica). De reden hiervoor is dat lange termijn morfologische simulaties met proces-gebaseerde modellen nog nauwelijks mogelijk is (Wang, 1996).

Hoewel kwalitatief bekend is dat bij de aanwezigheid van zand in een slibbodem (of omgekeerd) het erosie- en consolidatiegedrag sterk wordt beïnvloed (Torfs, 1995), bestaan voor erosie en consolidatie nog nauwelijks bruikbare formuleringen. Daarom is in eerste instantie gekozen voor een gescheiden aanpak van zand en slib.

1.5 Opzet rapport

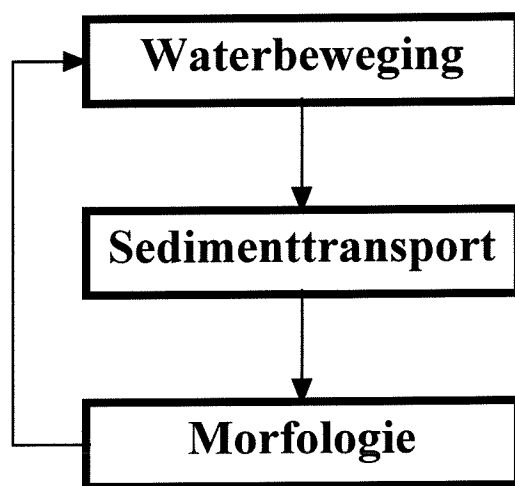
In *hoofdstuk 2* wordt eerst een kort literatuuroverzicht gegeven van de fysische beschrijving en modellering van zand- en slibtransport. Tevens worden de bestaande modellen voor zand-slibsegregatie besproken. Vervolgens komt in *hoofdstuk 3* de Nieuwe Merwede aan de orde. Hierbij wordt een algemene indruk gegeven van de veranderende waterbeweging en het sedimenttransport na de sluiting van het Haringvliet. Tevens wordt aan de hand van de boringen en de bodemmonsters van 1992 een indruk gegeven van de horizontale en verticale zandslib-structuren in de Nieuwe Merwede. In *hoofdstuk 4* wordt met de huidige kennis van het zand- en slibtransport (*hoofdstuk 2*) en de omstandigheden op de Nieuwe Merwede (*hoofdstuk 3*) de keuzes en vereenvoudigingen voor de modelleeraanpak besproken. In dit hoofdstuk worden alle gebruikte vergelijkingen, randvoorwaarden en parameters toegelicht. Vervolgens wordt in *hoofdstuk 5* het model gecalibreerd en geverifieerd aan de hand van de literatuurgegevens van de Nieuwe Merwede (*hoofdstuk 3*). In *hoofdstuk 6* worden de resultaten gegeven van de waterbewegings- en sedimenttransportberekeningen. Vervolgens worden in *hoofdstuk 7* - aan de hand van de modelresultaten - verklaringen gegeven voor de waargenomen zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede. Tenslotte worden in *hoofdstuk 8* de conclusies getrokken uit deze studie en worden aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

2. Beschrijving zand-slibsegregatie

2.1 Inleiding

Rivieren voeren naast water ook sediment af. In de benedenlopen van de Nederlandse rivieren kan het sediment grofweg onderverdeeld worden in een zandfractie (0.063 - 2 mm) en een slibfractie (< 0.063 mm). Dit onderscheid wordt gemaakt omdat slibdeeltjes cohesieve eigenschappen bezitten. Hierdoor gedraagt slib zich in de waterkolom en de bodem duidelijk anders dan zand. Voorbeelden hiervan zijn de variatie in de valsnelheid door flocculatie en het erosie- en consolidatiegedrag.

In rivieren bestaat een relatie tussen de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologische ontwikkeling, waarbij een feedback-mechanisme kan optreden (**Figuur 2-1**).



Figuur 2-1 Morfologische loop

De waterbeweging leidt tot een netto sedimenttransport, waarbij een bepaalde morfologische ontwikkeling van het systeem hoort. De morfologie stuurt op zijn beurt de waterbeweging en daarmee ook het sedimenttransport. Een verandering in één van deze componenten heeft tot gevolg dat ook de andere componenten beïnvloed worden. Deze wisselwerking tussen waterbeweging, sedimenttransport en morfologische ontwikkeling wordt morfodynamica (of 'de morfologische loop') genoemd.

Op het gebied van het sedimentatie- en erosiegedrag van rivieren en estuaria zijn veel studies verricht. In eerste instantie was het onderzoek vooral gericht op niet-cohesief sediment (zand). Pas later is onderzoek gedaan naar het gedrag van slibbodems. Recentelijk zijn ook mengsels van zand en slib in het onderzoek betrokken.

In dit hoofdstuk wordt eerst een overzicht gegeven over de gedragskennis van zand-, slib- en zand-slibbodems. Dit overzicht beperkt zich tot het noemen van belangrijke concepten en resultaten en geeft een globale orde van grootte van parameters die bepalend zijn voor zand-slibsegregatie. Dit overzicht wordt enerzijds gebruikt om voor het studiegebied aan te geven welke (sub-)processen verwaarloosd kunnen worden. Anderzijds wordt een indruk verkregen van de hiaten in de kennis. Hiervoor kunnen aanbevelingen gedaan worden voor nader onderzoek. Voor gedetailleerde informatie wordt verwezen naar handboeken over rivieren en estuaria (Janssen, 1979 en Van Rijn, 1993). Tenslotte wordt een overzicht gegeven van de uit de literatuur bekende zand-slibmodellen.

2.2 Beschrijving gedrag zandbodems

Voor het modelleren van het gedrag van zandbodems is het begin van beweging een belangrijke parameter. Shields (1936) gaf de relatie tussen de kritieke bodemschuifspanning en het begin van beweging voor (niet-cohesieve) sedimentdeeltjes. Bij overschrijding van deze kritieke schuifspanning begint het zandtransport. Bij een korreldiameter d_{50} van ongeveer $300 \mu\text{m}$ en een waterdiepte van 5 meter ligt de kritische, diepte-gemiddelde snelheid globaal op 0.35 m/s .

Nadat de kritieke schuifspanning is overschreden, rollen en springen de zandkorrels over de bodem, het bodemtransport. Belangrijke bodemtransportformules onder deze omstandigheden zijn afgeleid door Meyer-Peter-Müller (1948), Kalinske-Frijlink (1952) en Van Rijn (1984). Over het algemeen wordt aangenomen dat het bodemtransport alleen afhankelijk is van de lokale, hydraulische condities en de sedimentparameters en dat deze formuleringen derhalve ook toepasbaar zijn voor niet-stationaire, niet-uniforme situaties.

Wanneer de stroomsnelheid toeneemt, komen de deeltjes voor langere tijd los van de bodem en worden meegevoerd in het water, het suspensietransport. Voor het begin van suspensietransport wordt vaak $u_* / w_s = 1$ aangehouden. In het bovengenoemde voorbeeld ligt het begin van suspensietransport globaal bij 0.55 m/s . Suspensietransport past zich - in tegenstelling tot bodemtransport - niet direct aan de lokale, hydraulische condities aan. Hierdoor moet advectie en diffusie ook in rekening gebracht worden.

In een uniforme, stationaire situatie is bij zand sprake van een evenwichtsconcentratie in de waterkolom. Dit betekent dat de sedimentatie en erosie van zand elkaar in evenwicht houden. Anders gezegd, de uitwisseling van zand van de waterkolom naar de bodem en omgekeerd is gelijk.

Bij zandtransportberekening moet rekening gehouden worden met beddingvormen. Afhankelijk van de hydraulische conditie en de korreldiameter komen ribbels en/of zandduinen voor. De lengte van ribbels ligt in de orde van enkele tientallen centimeters, de hoogte in de orde van enkele centimeters. Voor duinen ligt de constante lengte in de orde van zevenmaal de waterdiepte. De hoogte is afhankelijk van de hydraulische condities, maar uit metingen blijkt dat de duinhoogte maximaal een vijfde van de waterdiepte is.

Deze beddingvormen hebben een belangrijke invloed op de bodemweerstand die de waterbeweging ondervindt. Het bepalen van de ruwheid onder verschillende, hydraulische condities heeft nog niet geleid tot bruikbare ruwheidsparameters. Vaak wordt gebruik gemaakt van een enkele ruwheidsparameter voor een groot gebied, bijvoorbeeld de Chézy-coëfficiënt. Deze coëfficiënt is onder andere afhankelijk van de ruwheidsmaat k_s . In afwezigheid van duinen en ribbels is de ruwheidsmaat alleen afhankelijk van de korreldiameter. Voor de korrelruwheid wordt globaal aangenomen dat $k_{s,c} \approx 3d_{90}$ en ligt in de

orde van 1 millimeter. Wanneer duinen en ribbels voorkomen, is de ruwheidsmaat $k_{s,d}$ ongeveer de helft van de duinhoogte (Van Rijn, 1993). Bij flinke stroomsnelheden ligt deze ruwheidsmaat in de orde van tientallen centimeters. Hierdoor kan de Chézy-coëfficiënt variëren van $80 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ bij alleen zandkorrels tot $40 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ bij grote zandduinen. In veel hydraulische modellen wordt de ruwheid gebruikt als afregelparaameter.

2.3 Beschrijving gedrag slibbodem

Het gedrag van slibbodems is duidelijk anders in vergelijking met zandbodems. Oorzaak hiervan is de aanwezigheid van cohesieve kleideeltjes ($< 0.002 \text{ mm}$). Hierdoor krijgt slib cohesieve eigenschappen.

In een slibbodem treedt consolidatie op. Consolidatie is een proces waarin de dichtheid van de bodem onder invloed van het eigen gewicht toeneemt door uittreding van het poriënwater. De erosiesterkte van de bodem neemt hierdoor toe. De tijdschaal waarin dit proces plaatsvindt is in de orde van dagen tot weken, afhankelijk van de dikte van de afzetting, de doorlatendheid van de bodem en de initiële concentratie. Algemeen kan gesteld worden dat bij een toename in de initiële concentraties de consolidatietijd langer is, de uiteindelijke dichtheid hoger zal worden en de laagdikte groter is.

Bij overschrijding van een kritische erosieschuifspanning treedt erosie van een slibbodem op. De snelheid van dit erosieproces is vervolgens niet constant, maar neemt in de tijd vaak af. De oorzaak hiervan is dat de sterkte van de bodem, analoog aan de dichtheid, als functie van de diepte toeneemt (Parchure en Metha, 1985).

Een belangrijke formulering voor het erosieproces bij bodems met constante dichtheid over de diepte is van Partheniades (1963). Deze wordt veel toegepast in slibmodellen. In de vergelijking treedt erosie op bij overschrijding van de kritische erosieschuifspanning (τ_c), waarbij een eenmaal eroderende bodem een constante erosiesnelheid (M) heeft.

De kritische erosieschuifspanning τ_c en de erosiesnelheid M zijn van zeer veel parameters afhankelijk. Belangrijke parameters zijn in dit verband de slibsoort, de dichtheid en de consolidatiegraad van de bodem, het zoutgehalte, de zuurgraad en de temperatuur van het water, de aanwezigheid van organisch materiaal in de bodem en de aanwezigheid van zand (Winterwerp, 1989).

Uit de literatuur blijkt dat in veel gevallen de kwalitatieve invloed van bovenstaande parameters redelijk bekend is. Echter, kwantitatieve formuleringen voor erosie en consolidatie zijn nauwelijks beschikbaar. De erosiesnelheid M varieert van $1 \cdot 10^{-5}$ tot $1 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$. Voor slibbodems in Nederland ligt de kritische, diepte-gemiddelde erosiesnelheid van de toplaag (na 1 dag) in de orde van $20 \text{ cm}/\text{s}$, voor diepere lagen in de orde van $0.45 \text{ m}/\text{s}$ (1 dag) (Van Rijn, 1993).

Eenmaal in de waterkolom wordt slib vanwege de kleine korreldiameter in suspensie getransporteerd. Zowel advectie als diffusie spelen een belangrijke rol. Tijdens het transport kan flocculatie optreden. Flocculatie is de vorming van grote vlokken ('aggregaten') door de overheersing van aantrekkingskrachten tussen de individuele deeltjes.

De concentratie en de saliniteit zijn twee belangrijke parameters voor flocculatie. Voor de saliniteit geldt dat bij lage concentraties slib ($c < 1000$ mg/l) de valsnelheid wordt beïnvloed tot 10 %. Daarna is de valsnelheid ongeveer constant. Daarnaast geldt dat bij toename van de concentratie in een zoute omgeving de valsnelheid ook toeneemt voor lage slibconcentraties ($10 < c < 1000$ mg/l). Uit metingen van Krone (Krone, 1962) blijkt dat het effect van flocculatie bij lage concentraties ($c < 300$ mg/l) klein is. Dit wordt toegeschreven aan de kleine kans op botsingen van slibdeeltjes.

Sedimentatie van slib bij lage concentraties ($c < 300$ mg/l) treedt op wanneer een kritische schuifspanning voor sedimentatie wordt overschreden (Krone, 1962). Voor slibbodems in Nederland variëren metingen van de kritische schuifspanning voor sedimentatie van 0.03 tot 0.15 N/m². Globaal zijn de bijbehorende diepte-gemiddelde snelheden 0.10 en 0.20 m/s (Van Rijn, 1993).

Omdat de kritische erosiesnelheid in het algemeen groter is dan de kritische sedimentatiesnelheid is voor slib geen sprake van een situatie waarbij erosie en sedimentatie tegelijkertijd optreden. Derhalve bestaat voor slib - in tegenstelling tot zand - geen 'evenwichtsconcentratie'.

Verder is bij slibbodems geen sprake van grootschalige beddingvormen. De effectieve bodemruwheid ligt in de orde van 0.1 tot 1 mm. De Chezy-coëfficiënt is hierdoor vrij groot en varieert van 60 tot 100 m^{1/2}/s.

2.4 Mengsels van cohesief en niet-cohesief materiaal

Uit recent onderzoek blijkt dat het gedrag van zand-slibmengsels duidelijk afwijkt van het gedrag van zandbodems of slibbodems. Het onderzoek heeft zich vooral gericht op erosie onder uniforme, stationaire situaties.

Uit experimenten blijkt dat voor lage percentages fijn materiaal een zandbodem zich gedraagt als zuiver niet-cohesief. Bij een kritische hoeveelheid fijn materiaal verliezen de onderlinge zandkorrels het contact en gedraagt het mengsel zich als cohesief materiaal. De kritische hoeveelheid in een mengsel hangt af van de korreldiameter van het zand, het type cohesief materiaal, de kleifraction (< 2 µm) en de aanwezigheid van organisch materiaal. Verschillende onderzoekers vinden een kritische hoeveelheid van 10 à 15% (gewichtsperscentage). Volgens Torfs (Torfs, 1995) kan een volumepercentage van 5% aangehouden worden als kritische grens.

Kwalitatief kan gesteld worden dat bij toevoeging van een kleine hoeveelheid cohesief materiaal de kritische bodemschuifspanning van een zandbodem toeneemt, waarbij het cohesieve materiaal als een soort lijm fungeert tussen de grotere zandkorrels. Een mogelijk andere oorzaak voor de toename van de kritische bodemschuifspanning is het gladdere oppervlak, doordat de poriën tussen de zandkorrels opgevuld worden met fijn materiaal. Hierdoor neemt de ruwheid van het oppervlak af en neemt derhalve de kritische bodemschuifspanning toe (Torfs, 1995).

Bij verdere toename van de hoeveelheid cohesief materiaal wordt de kritische bodemschuifspanning voornamelijk bepaald door de samenstelling van het poriënwater. Een belangrijke parameter voor de samenstelling van het poriënwater is de Sodium Adsorption Ratio (SAR). Dit geeft de relatieve verhouding aan tussen enerzijds de Natrium-ionen en anderszijds de Calcium- en Magnesiumionen. Uit onderzoek blijkt dat bij toename van SAR de kritische bodemschuifspanning afneemt (Torfs, 1985). De binding van kleideeltjes door

wolken van positieve Calcium- en Magnesium-ionen is sterker dan in aanwezigheid van Natrium-ionen.

Uit onderzoek naar het gedrag van slibbodems met een kleine hoeveelheid zand is geconcludeerd dat de kritische bodemschuifspanning ook groter wordt (Williamson, 1993). In dit experiment nam de sedimentconcentratie ook toe. Migniot (1989) kwam echter tot de conclusie dat de kritische schuifspanning gelijk bleef tot aan een zandpercentage van 30% bij constante sedimentconcentratie. Mogelijke oorzaak van deze verschillende conclusies zou verklaard kunnen worden door de verschillen in de sedimentconcentratie.

Voor het transport van zand en slib wordt aangenomen dat bij lage concentraties gedurende het transport geen interactie plaatsvindt (Kuijper, 1995c).

Uit onderzoek van Torfs (1995) naar sedimentatie van zand en slib kwam naar voren dat de dichtheid van de gevormde bodem in verticale richting sterk varieerde. Op basis hiervan werd geconcludeerd dat bij lage slibconcentraties zandsegregatie optreedt. Door de grotere valsnelheid van zand wordt eerst een laagje zand (hoge dichtheid) afgezet en vervolgens een laagje slib (lage dichtheid). De sedimentatie van zand en slib kan bij deze concentraties als onafhankelijk beschouwd worden.

Bij hogere concentraties was sprake van 'hindered settling' en ontstonden op de bodem slibstructuren die het zand afvingen. De dichtheid van de gevormde bodem varieerde veel minder sterk dan bij lage concentraties. Er was sprake van een min of meer homogene bodem met zand en slib. Hieruit werd geconcludeerd dat in deze situatie tijdens het sedimentatieproces sprake was van onderlinge interactie.

Uit consolidatieproeven werd geconcludeerd dat bij materiaal met een zandfractie van 60-75% het consolidatiegedrag wordt bepaald door de verhouding van de verschillende fracties zand, slib en klei. Bij enkele procenten klei ($< 2 \mu\text{m}$) neemt de doorlatendheid al sterk af. Voor kleinere percentages zand ($< 60\%$) wordt het consolidatiegedrag in hoofdzaak bepaald door de kleifracie. Het effect van de aanwezigheid van zand lijkt in deze situaties van ondergeschikt belang (Van Kesteren, 1994).

Geconcludeerd kan worden dat uit het onderzoek naar zand-slibbodems kwalitatief is aangetoond dat de interactie van zand en slib bij erosie en consolidatie zeker niet verwaarloosd mag worden. Er zijn echter nog nauwelijks bruikbare, kwantitatieve relaties beschikbaar voor de beschrijving van erosie en consolidatie.

2.5 Modellen zand-slibsegregatie

2.5.1 Vuistregel

Het meest eenvoudige model voor het voorspellen van de aanwezigheid van slib in de bodem is de vuistregel:

"Hoe kalmer het water, hoe meer slib"

In rivieren met geen (of nauwelijks) getijinvloed is deze regel voor een kwalitatieve benadering toepasbaar. Voor kwantitatieve uitspraken (bijvoorbeeld uitspraken over het aanwezige percentage slib in de bodem) en voor getijgebieden, waarin de snelheden variëren en van richting kunnen veranderen, is een geavanceerder model noodzakelijk.

2.5.2 LHEC

Wang (1997) ontwikkelde voor de Nieuwe Merwede een empirisch model dat met behulp van een lokale, representatieve parameter (LHEC) de bodemsamenstelling kan voorspellen. LHEC is gedefinieerd als de lokale, gemiddelde evenwichtsconcentratie. Deze evenwichtsconcentratie kan berekend worden uit de lokale concentratievergelijking waarbij diffusie en advectie zijn weggelaten. Alleen de bronterm speelt nog een rol. De erosie- en sedimentatieformuleringen zijn gebruikt van respectievelijk Partheniades (1963) en Krone (1962), volgens:

$$\frac{\partial hc}{\partial t} = M \left[\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right] H \left[\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right] - c w_s \left[1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right] H \left[1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right] \tag{2.1}$$

waarin:

h = waterdiepte [m]

c = concentratie [kg/m³]

t = tijd [s]

M = erosiesnelheid [kg/(m²s)]

H = eenheidsstapfunctie [-]

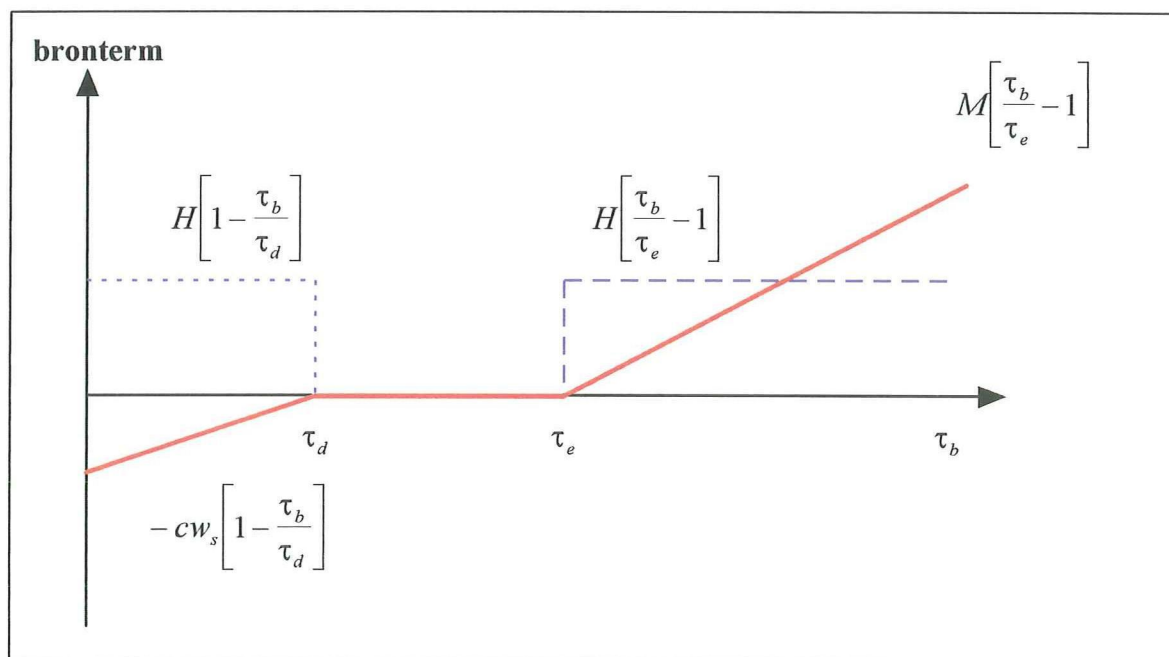
τ_b = bodemschuifspanning [N/m²]

τ_e = kritische erosieschuifspanning [N/m²]

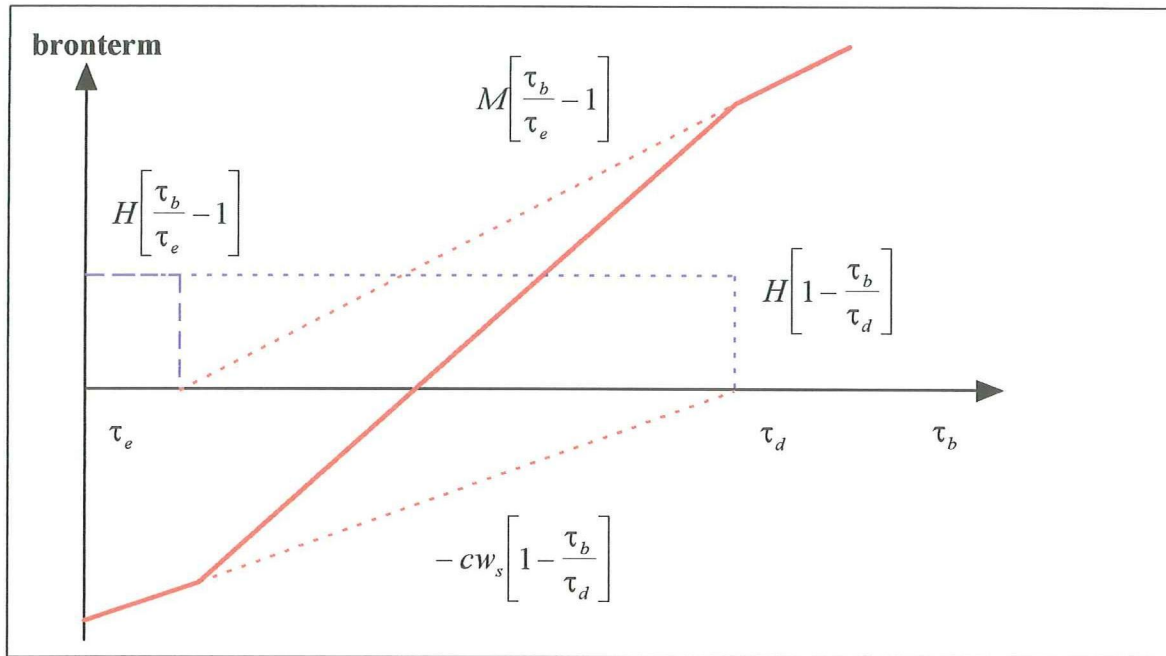
w_s = valsnelheid [m/s]

τ_d = kritische sedimentatieschuifspanning [N/m²]

In **Figuur 2-2** en **Figuur 2-3** is de bronterm weergegeven als functie van de bodemschuifspanning voor respectievelijk $\tau_e > \tau_d$ en $\tau_e < \tau_d$.



Figuur 2-2 Bronterm als $\tau_e > \tau_d$



Figuur 2-3 Bronterm als $\tau_e < \tau_d$

De lokale, gemiddelde evenwichtsconcentratie is dan gedefinieerd volgens:

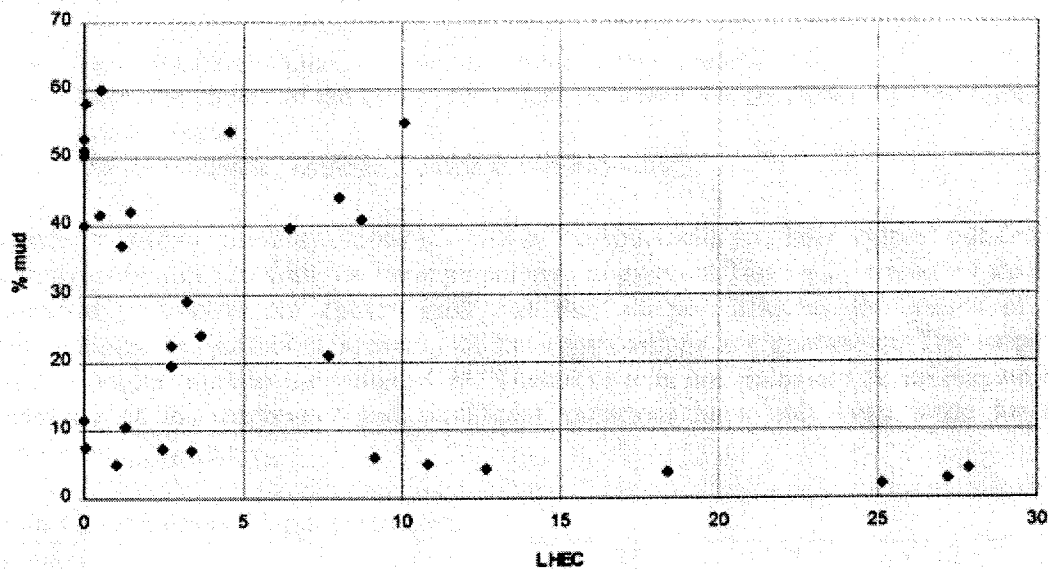
$$LHEC = \frac{1}{T} \int_0^T c(t) dt \quad (2.2)$$

Uit de literatuur blijkt dat τ_e over het algemeen groter is dan τ_d (Figuur 2-2). In dat geval zijn vier situaties te onderscheiden. Deze zijn weergegeven in Tabel 2-1.

Gebied	Situatie	LHEC
I	$\tau_b < \tau_d$ gedurende een bepaald gedeelte en $\tau_b < \tau_e$ gedurende de gehele getijperiode → soms sedimentatie; nooit erosie	0
II	$\tau_b > \tau_e$ gedurende een bepaald gedeelte en $\tau_b > \tau_d$ gedurende de gehele getijperiode → soms erosie; nooit sedimentatie	∞
III	$\tau_b < \tau_e$ en $\tau_b > \tau_d$ gedurende de gehele getijperiode → nooit sedimentatie; nooit erosie	onbepaald
IV	$\tau_b > \tau_e$ en $\tau_b < \tau_d$ gedurende een bepaald gedeelte van de getijperiode → zowel sedimentatie als erosie	$0 < LHEC < \infty$

Tabel 2-1 Situaties voor LHEC

De theorie, dat de ruimtelijke variatie van LHEC (gebied IV) een indicatie geeft van het slibpercentage in de bodem, is getest voor de Nieuwe Merwede. Berekeningen zijn uitgevoerd bij verschillende Bovenrijnafvoeren. In Figuur 2-4 is bij een afvoer van 2200 m³/s het slibpercentage van het bodemmonster uitgezet tegen de berekende grootte van LHEC op de monsterlokatie.



Figuur 2-4 LHEC vs. Slibpercentage bij Bovenrijnafvoer $Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$

Na berekeningen en vergelijking met velddata zijn de volgende conclusies getrokken:

- LHEC kan zandige gebieden ($< 10\%$ slib) onderscheiden van de meer slibrijke gebieden.
- Het is nog niet mogelijk om een kwantitatieve relatie tussen de waarde van LHEC en het slibgehalte te definiëren.
- Voor de Nieuwe Merwede geven verschillende afvoeren hetzelfde beeld van LHEC. Dit komt overeen met de conclusie dat het stroombeeld op de Nieuwe Merwede onder verschillende afvoeren gelijk is, ook al nemen de snelheden bij hogere afvoeren toe.
- De belangrijkste parameters in het model zijn de kritische schuifspanning voor erosie en sedimentatie. LHEC is alleen toepasbaar wanneer de kritische schuifspanning voor erosie heel klein gekozen wordt en die voor sedimentatie heel groot. De gekozen parameterinstelling is $\tau_e = 0.01 \text{ N/m}^2$ en $\tau_d = 1.5 \text{ N/m}^2$ (Figuur 2-3).
- Uit het model blijkt dat het grootste gedeelte van de Nieuwe Merwede zandig is, alleen de benedenstroomse zijde en in de kribvakken is de bodem slibrijk.

Naar aanleiding van dit onderzoek kan het volgende worden opgemerkt:

- Na analyse van de benedenstroomse randvoorwaarde voor het waterbewegingsmodel blijkt dat voor de berekeningen van de waterbeweging de verkeerde randvoorwaarden zijn gebruikt. De waterstanden bij de afvoeren 2000 , 2200 en $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn te hoog. De snelheden aan de benedenstroomse zijde zullen bij deze afvoeren te laag zijn ingeschat. Het is onduidelijk welke invloed deze fout op de resultaten heeft.
- Voor de berekening van LHEC is het noodzakelijk dat de kritische schuifspanning voor sedimentatie groot is en de kritische schuifspanning voor erosie laag is omdat alleen dan LHEC voor alle roosterpunten een waarde tussen 0 en ∞ krijgt. Echter, uit metingen voor slibbodems blijkt dat in de meeste gevallen de kritische erosieschuifspanning (veel) groter is dan de kritische schuifspanning voor sedimentatie. Het probleem is dat bij toepassing van deze waarden LHEC voor veel punten onbepaald of 0 is, aangezien

de stroomsnelheid, zeker bij hogere afvoeren, nauwelijks varieert gedurende de getijperiode.

2.5.3 2DH Zandslib-model met interactie

Door Chesher en Ockenden is een 2DH zandslib-model ontwikkeld (Chesher en Ockenden, 1997). In dit model zijn onderzoeksresultaten toegepast die de interactie tussen zand en slib beschrijven.

De interactie tussen zand en slib is als volgt gemodelleerd:

- **Kritische schuifspanning voor erosie**

De kritieke schuifspanning voor erosie τ_e van de bodem is een functie van de tijd en het percentage zand in de bodem en wordt beschreven volgens:

$$\tau_e = K\rho_d^L \quad (2.3)$$

waarin:

τ_e = kritische erosieschuifspanning [N/m²]

K, L = coëfficiënten [-]

ρ_d = f(% zand, tijd) [kg/m³]

- **Erosie**

De erosie van de slibbodem S is beschreven volgens de (aangepaste) vergelijking van Partheniades:

$$S = m_e [\tau_e - \tau_b] \quad (2.4)$$

waarin:

S = erosie term [kg/(m²s)]

m_e = f(% zand) [s/m]

τ_e = kritische erosieschuifspanning [N/m²]

τ_b = bodemschuifspanning [N/m²]

- **Toepassing 'The Mersey Estuary'**

Vervolgens zijn bovenstaande vergelijkingen toegepast in een 2DH-model voor 'The Mersey Estuary' bij Liverpool, Engeland. In dit estuarium is sprake van horizontale segregatie van zand en slib. Eerst is - zonder interactie - de initiële situatie bepaald door gebieden te onderscheiden waar slib of zand of niets ('harde bodem') sedimenteert. De berekende initiële situatie gaf een goed beeld van de werkelijke situatie.

Vervolgens is - met interactie - voor een getijperiode het zand- en slibtransport berekend. Uit de resultaten zijn de volgende conclusies getrokken:

- met interactie nemen de concentraties en erosie van zand en slib sterk af
- met interactie vindt getij-gemiddeld transport plaats van slib in zeewaartse richting; zonder interactie is het slibtransport juist landinwaarts transport plaats. Dit wordt veroorzaakt door de afname van de slibconcentratie gedurende de vloedperiode.

Naar aanleiding van dit onderzoek worden een aantal opmerkingen geplaatst:

- Het model geeft aan dat de interactie van zand en slib een belangrijk gevolg heeft voor het transport van zand en slib en de erosie van de zand-slibbodem. Over de interactie bestaat in de literatuur nog veel onduidelijkheid. Aangezien de bruikbaarheid van de modelresultaten staat of valt met de juistheid van de beschreven interactie is praktische toepassing hiervan op dit moment nog dubieus.
- In dit model is uitgegaan van een constante afvoer. Echter, in gebieden waar de variatie van de rivierafvoer een belangrijke rol speelt, kan dit effect zeker niet verwaarloosd worden.

3. De Nieuwe Merwede

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de Nieuwe Merwede besproken. Eerst wordt een gebiedsbeschrijving gegeven en wordt globaal aangegeven welke veranderingen in de waterbeweging zijn opgetreden ten gevolge van de sluiting van het Haringvliet (3.2). Vervolgens worden alle literatuurgegevens met betrekking tot de waterbeweging (3.3) en het sedimenttransport (3.4) genoemd. Deze gegevens worden gebruikt voor de modelopzet (hoofdstuk 4), de calibratie en de verificatie van het model (hoofdstuk 5). Tenslotte wordt een beeld geschetst van de morfologische veranderingen en de gevormde zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede (3.5). Dit beeld wordt gebruikt om met de modelresultaten uitspraken te doen over oorzaken van de gevormde zand-slibstructuren (hoofdstuk 7). Achterin het rapport is een kaart opgenomen van de Nieuwe Merwede, die gebruikt kan worden bij het lezen van dit rapport. Hier zijn alle namen en kilometeraanduidingen op aangegeven.

3.2 Gebiedsbeschrijving

De Nieuwe Merwede is een riviertak tussen de Boven-Merwede en het Hollandsch Diep. Het bovenstroomse splitsingspunt is gelegen nabij Werkendam (km 961). Hier splitst de Boven-Merwede zich in de Nieuwe Merwede en de Beneden-Merwede. De breedte varieert van 350 meter aan de bovenstroomse zijde tot 500 meter aan de benedenstroomse zijde. De rivier is 18 kilometer lang en vormt een S-bocht met een minimale bochtstraal van ongeveer 4000 meter. Bij Anna Jacominaplaat (km 979) komt de Nieuwe Merwede samen met de Amer uit in het Hollandsch Diep. Het Hollandsch Diep stond tot 1970 via het Haringvliet in open verbinding met de Noordzee (zie kaart Nieuwe Merwede).

Na de stormvloedramp van 1953 is het Deltaplan ontwikkeld. Dit plan hield de afsluiting van de grote zeegaten in om het achterliggende land te beschermen tegen grote overstromingen. In 1969 is de Volkerakdam gereedgekomen en in november 1970 is ook het Haringvliet afgesloten. Naast de stormvloedkerende functie worden de Haringvlietsluizen ook gebruikt als waterbeheersingsinstrument. Door de Haringvlietsluizen bij lage afvoeren te sluiten wordt de zoutindringing in de Nieuwe Waterweg tegengegaan. In de zeventiger jaren heeft men door ervaring het lozingsprogramma van deze sluisen aangepast. Sinds 1984 is er sprake van het Lozingsprogramma Haringvlietsluizen, het zogenaamde LPH-'84. In dit lozingsprogramma ligt de sluisopening bij een gegeven Bovenrijnafvoer vast en wordt geen rekening gehouden met de getijcyclus op de Noordzee.

De afsluiting van het Haringvliet heeft de waterstanden en de afvoerverdeling in het Noordelijk Deltabekken aanzienlijk gewijzigd. In **Tabel 3-1** is bij gemiddeld getij en gemiddelde Bovenrijnafvoer (2200 m³/s) de waarden van het eb- en vloedvolume, het getijgemiddeld debiet, de minimale en maximale stroomsnelheid en de amplitude gegeven voor en direct na de sluiting van het Haringvliet (Haring, 1977).

	Voor sluiting		Na sluiting	
	km 961	km 979	km 961	km 979
Ebvolume (*10 ⁶ m ³)	37	54	40	40
Vloedvolume (*10 ⁶ m ³)	3	20	0	0
Getijgemiddeld debiet (m ³ /s)	761	761	895	895
Maximale stroomsnelheid (m/s) ¹	+0.85	+0.70	+0.65	+0.30
Minimale stroomsnelheid (m/s) ¹	+0.10	-0.40	+0.45	+0.15
Amplitude (m)	0.4	0.55	0.15	0.12

¹ Deze stroomsnelheden voor en na de sluiting zijn berekend bij een bovenafvoer van 2300 m³/s i.p.v. 2200 m³/s.

Tabel 3-1 Waterbeweging voor en na sluiting

Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat het getij op de Nieuwe Merwede nagenoeg verdwenen is. Voor 1970 trad bij gemiddelde afvoer nog (bijna) kentering op ter plaatse van de bovenstroomse rand. Na de sluiting treedt alleen bij zeer lage afvoeren ($Q_{br} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$) nog kentering op bij de benedenstroomse rand. Ook de getijamplitude is sterk afgenomen. Tevens blijkt dat de getijgemiddelde afvoer is toegenomen.

Een belangrijke parameter voor sedimenttransport is de stroomsnelheid. In de **Tabel 3-2** en **Tabel 3-3** is derhalve bij verschillende afvoeren een overzicht gegeven van de (profielgemiddelde) maximale vloed- en ebsnelheden bij Werkendam en Anna Jacominaplaat bij verschillende Bovenrijnafvoeren (Haring, 1977).

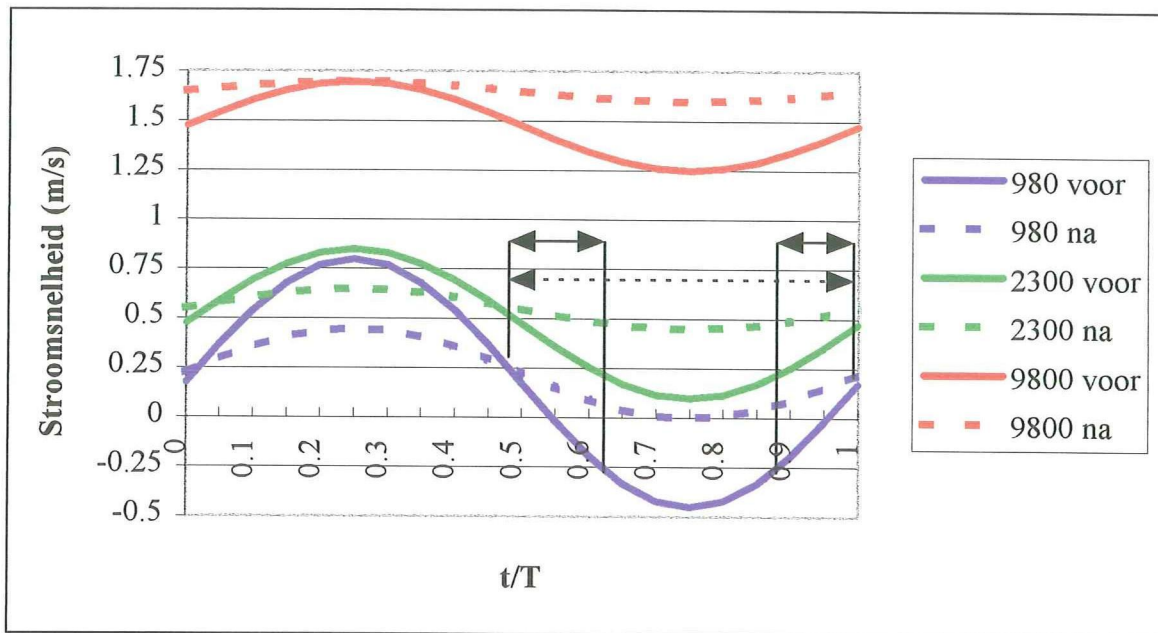
Bovenrijnafvoer (m ³ /s)	Werkendam (km 961)			
	Stroomsnelheid (m/s)			
	Voor de sluiting		Na de sluiting	
	Vloed	Eb	Vloed	Eb
980	-0.45	+0.80	0	+0.45
2300	+0.10	+0.85	+0.45	+0.65
9400	+1.25	+1.70	+1.60	+1.70

Tabel 3-2 Stroomsnelheden bij Werkendam (km 961)

Bovenrijnafvoer (m ³ /s)	Anna Jacominaplaat (km 979)			
	Stroomsnelheid (m/s)			
	Voor de sluiting		Na de sluiting	
	Vloed	Eb	Vloed	Eb
980	-0.55	+0.65	0	+0.15
2300	-0.40	+0.70	+0.15	+0.30
9400	+0.35	+1.15	+0.80	+1.15

Tabel 3-3 Stroomsnelheden bij Anna Jacominaplaat (km 979)

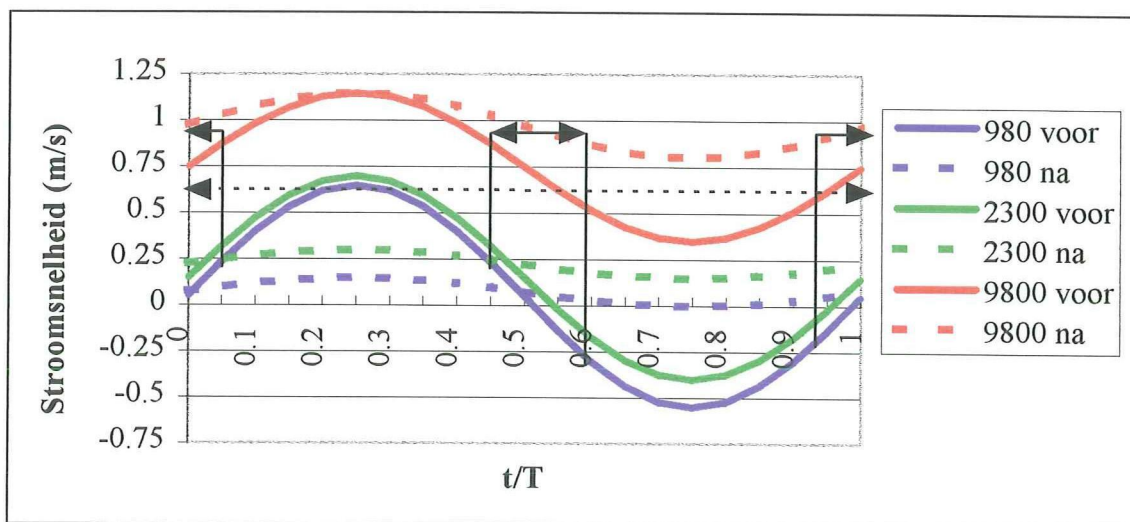
Ter verduidelijking is in **Figuur 3-1** - met behulp van bovenstaande waarden - de stroomsnelheid weergegeven als enkelvoudige, sinusvormige functie van de getijperiode.



Figuur 3-1 Stroomsnelheid Werkendam (km 961)

Naast de sterke reductie in de amplitude bij een lage en een gemiddelde Bovenrijnafvoer valt op, dat na de sluiting de stroomsnelheid bij lage afvoeren over een langer gedeelte van de getijperiode laag is (d.w.z kleiner dan 0.25 m/s). Bij hoge Bovenrijnafvoer is de stroomsnelheid nauwelijks veranderd. In **Figuur 3-1** is als voorbeeld het tijdsinterval aangegeven waarin de absolute stroomsnelheid kleiner is dan 0.25 m/s bij lage Bovenrijnafvoer, zowel voor (doorgetrokken lijnen) als na (gestippelde lijn) de sluiting van het Haringvliet.

In **Figuur 3-2** is de stroomsnelheid bij Anna Jacominaplaat weergegeven als functie van de getijperiode.



Figuur 3-2 Stroomsnelheid Anna Jacominaplaat (km 979)

Ook hier geldt - in nog sterkere mate - dat bij lage en gemiddelde afvoer de stroomsnelheid zeer sterk is afgenomen. Ook hier is het gedeelte van de getijperiode waarin de stroomsnelheid klein is, sterk toegenomen (doorgetrokken vs. gestippelde lijn).

Door de verandering in de waterbeweging op de Nieuwe Merwede is in de periode 1970-1993 veel sedimentatie opgetreden. Deze morfologische verandering is gepaard gegaan met de vorming van zand-slibstructuren, zowel horizontaal als verticaal. Ten gevolge van de grootschalige sedimentatie op de Nieuwe Merwede zijn veel baggerwerkzaamheden uitgevoerd (Kuijper, 1995). Enerzijds is gebaggerd in de geul om genoeg vaardiepte over te houden. Daarnaast is voor zandwinning in het bovenstroomse gedeelte bij Werkendam gebaggerd. Sinds 1993 wordt niet meer gebaggerd in de Nieuwe Merwede. Dit wordt deels veroorzaakt omdat veel minder (slib-)sedimentatie in het benedenstroomse gedeelte optreedt. Verder is in het bovenstroomse gedeelte de bodem sterk vervuild (klasse III), zodat de zandwinning is gestaakt (bron: Directie Zuid-Holland). De baggerwerkzaamheden bemoeilijken de interpretatie van de gegevens van de Nieuwe Merwede.

3.3 Waterbeweging

Sinds de sluiting van het Haringvliet wordt de Nieuwe Merwede gedomineerd door de Bovenrijnafvoer. De Bovenrijnafvoer Q_{br} is sinds 1970 dagelijks gemeten bij Lobith. Over het algemeen wordt voor rivierafvoeren een exponentiële kansverdeling aangenomen. De exponentiële kansverdeling is als volgt gedefinieerd:

$$P_Q(Q < Q_{br}) = 1 - e^{-\frac{Q_{br}-A}{B}} \quad (3.1)$$

waarin:

$$P_Q(Q < Q_{br}) = \text{kans dat de afvoer kleiner is dan } Q_{br} \text{ [-]}$$

$$Q_{br} = \text{Bovenrijnafvoer [m}^3\text{/s]}$$

$$A = \text{coëfficiënt [m}^3\text{/s]}$$

$$B = \text{coëfficiënt [m}^3\text{/s]}$$

De coëfficiënten A en B kunnen geschat worden uit de data. Verschillende mogelijkheden zijn hiervoor beschikbaar. Gekozen is voor drie mogelijkheden, Maximum Likelihood, Kleinste Kwadraten Methode en de Methode der Momenten (**Appendix A**). De uitkomsten voor de coëfficiënten A en B zijn in **Tabel 3-4** weergegeven.

Methode	Max. Likelihood	Methode der Momenten	Kleinste Kwadraten Methode
A	760	1046	1040
B	1480	1194	1200

Tabel 3-4 Parameters kansverdeling Bovenrijnafvoer

In deze studie wordt uitgegaan van $A = 1040 \text{ m}^3\text{/s}$ en $B = 1200 \text{ m}^3\text{/s}$.

In **Tabel 3-5** is voor vijf verschillende Bovenrijnafvoeren de getij-gemiddelde afvoer uit het 1D-model voor het Noordelijk Deltabekken (ZWENDL) weergegeven.

Bovenrijnafvoer [m ³ /s]	Afvoer Nieuwe Merwede [m ³ /s]
1200	608
2200	944
3000	1269
6000	2476
10000	3877

Tabel 3-5 Afvoer Nieuwe Merwede

De relatie tussen de Bovenrijnafvoer en de afvoer op de Nieuwe Merwede is vrijwel lineair:

$$Q_{nm} = \lambda Q_{br} \quad (3.2)$$

waarin:

Q_{nm} = afvoer Nieuwe Merwede [m³/s]

λ = coëfficiënt [= 0.4]

Q_{br} = Bovenrijnafvoer [m³/s]

Op de Nieuwe Merwede komen geen dichtheidsstromen voor (bron: RIZA). Het water is vrijwel zoet. In het operationele 2DH-model voor de Zuidrand van het Noordelijk Deltabekken wordt voor het water een dichtheid van 1005 kg/m³ toegepast.

3.4 Sedimenttransport

3.4.1 Zandtransport

- **Aanbod**

Sedimentaanbod in de Nieuwe Merwede vindt sinds de sluiting van het Haringvliet, alleen plaats vanuit de Boven-Merwede. Door de Boven-Merwede wordt ongeveer $0.6 \cdot 10^6$ m³ zand (inclusief poriën) getransporteerd. De jaarlijkse zandvracht vanuit de Boven-Merwede wordt echter hoofdzakelijk getransporteerd door de Nieuwe Merwede, vanwege de geometrie van het splitsingspunt. De verdeling van het zandtransport over de Beneden-Merwede en de Nieuwe Merwede is ongeveer lineair afhankelijk van de Bovenrijnafvoer (WL, 1988). Bij lage afvoeren ($Q_{br} = 1200$ m³/s) is de zandtransportverdeling tussen de Nieuwe Merwede en de Beneden-Merwede ongeveer 1,5 : 1. Bij hoge afvoeren ($Q_{br} = 6000$ m³/s) is deze verdeling ongeveer 7,5 : 1. Het jaarlijkse zandtransport op de Nieuwe Merwede is ongeveer $0.8 \cdot 10^9$ kg (Kuijper, 1995). Andere onderzoeken geven een jaarlijks zandtransport van $0.43 \cdot 10^9$ kg (Van Dreumel, 1995). Het laatstgenoemde transport is gebaseerd op een lange termijn sedimentbalans.

• Korreldiameter zand

Uit meetcampagnes is gebleken dat de gemiddelde korreldiameter d_{50} globaal 300 μm is op de Nieuwe Merwede (Kuijper, 1995). Bovenstrooms bij Werkendam blijkt de korreldiameter d_{50} iets grover te zijn, ongeveer 400 μm . Tevens blijkt dat de gradatie gering is. De verhouding d_{90}/d_{50} is ongeveer 1.5 à 1.75 (WL, 1988). Het is onduidelijk of de grootte van de korreldiameter bepaald is van de toplaag of van de bodem.

• Bodemtransport en suspensietransport

Op basis van deze korreldiameter en de stroomsnelheden in de Nieuwe Merwede kan globaal een afchatting gemaakt worden van het suspensie- en bodemtransport. In **Tabel 3-6** is voor de Nieuwe Merwede bij verschillende afvoeren globaal aan de hand van de getij-gemiddelde snelheid bij verschillende afvoeren, de schuifspanningssnelheid ($C = 55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) en de verhouding u_*/w_s ($d_{50} = 300 \mu\text{m}$) gegeven.

Bovenrijnafvoer [m^3/s]	Werkendam (km 961)		Anna Jacominaplaat (km 979)	
	u_* [m/s]	u_*/w_s [-]	u_* [m/s]	u_*/w_s [-]
980	0.2	0.26	0.1	0.13
2300	0.5	0.64	0.2	0.26
9800	1.65	2.14	1.0	1.3

Tabel 3-6 Bodem- en suspensietransport

Geconcludeerd kan worden dat voor de Nieuwe Merwede zowel suspensietransport als bodemtransport een belangrijke rol speelt. Bij lagere afvoeren overheerst het bodemtransport, bij hogere afvoeren zal het suspensietransport een steeds grotere rol van betekenis spelen. Mede gezien de grote variatie van de stroomsnelheden onder verschillende afvoeren zal de afvoervariatie een belangrijke rol spelen in het totale sedimenttransport op de Nieuwe Merwede.

• Beddingvormen

Uit metingen blijkt dat op de Nieuwe Merwede zandduinen kunnen voorkomen (WL, 1988). De hoogte varieert van 0.2 tot 0.8 meter en de lengte van 10 tot 30 meter. Opvallend is dat al bij 2200 m^3/s flinke zandduinen kunnen voorkomen. Voorspelling van deze duinhoogten en duinlengten met de vergelijkingen van Van Rijn levert echter geen bruikbare resultaten (WL, 1988).

• Zandconcentratie

In de periode 1973 - 1978 zijn 30 meetcampagnes van 2 dagen opgezet voor het meten van de zand- ($> 50 \mu\text{m}$) en slibconcentraties ($< 50 \mu\text{m}$) in de waterkolom, drie meter onder de waterspiegel. De beperkingen van dit onderzoek waren dat:

- alleen Bovenrijnafvoeren tussen 1080 en 5735 m^3/s zijn opgetreden,
- de watermonsters drie meter onder de waterspiegel zijn genomen,
- het tijdstip van bemonstering niet is gerelateerd aan de fase van het getij.

De tweede en derde beperking zullen vooral gelden voor gemeten zandconcentraties. De zandconcentraties kunnen alleen als indicatie gebruikt worden. Slib is vanwege de lage

valsnelheid over het algemeen uniform verdeeld over de verticaal. Daarnaast is - gezien de relatief grote uitzakkingstijd van slib - de fase van het getij minder relevant.

Bij de bovenstroomse zijde varieert de zandconcentratie bij Bovenafvoeren van 1000 tot 6000 m³/s van 20 tot 40 mg/l. Opvallend is sterke afname van de zandconcentratie net na Werkendam (km 961) onder alle afvoeren (Van Dreumel, 1995). Aan de benedenstroomse zijde varieert de zandconcentratie van 10 tot 30 mg/l bij Bovenrijnafvoeren van 1000 tot 6000 m³/s.

3.4.2 Slibtransport

- **Aanbod**

Naast zand wordt door de Waal $2.1 \cdot 10^6$ ton slib op jaarbasis aangeboden aan de Boven-Merwede. Het slib verdeelt zich ongeveer evenredig met de afvoer over de Nieuwe Merwede (55%) en de Beneden-Merwede (45%). Slibsedimentatie vindt niet plaats op de Boven-Merwede, ook niet direct na sluiting van het Haringvliet, omdat de stroomsnelheden daar te hoog zijn (WL, 1988). Het jaarlijkse slibtransport op de Nieuwe Merwede bedraagt ongeveer $1.3 \cdot 10^9$ ton (Van Dreumel, 1995).

- **Valsnelheid slib**

De valsnelheid op de Nieuwe Merwede is gemeten bij Kop van 't Land. De gemiddelde valsnelheid voor slib lag rond 0.5 mm/s (Collard, 1992).

- **Slibconcentratie**

Uit de metingen van 1973 - 1978 kan voor slib het volgende geconcludeerd worden:

- Rond de 6000 m³/s is de concentratie zo'n 50 mg/l.
- Bij lage afvoeren is er sprake van een grote variatie in de slibconcentratie. Tussen de 1000 en 2000 m³/s is de concentratie ongeveer 25 mg/l.

Ook Van Dreumel (1995) geeft op basis van deze metingen gemiddelde slibconcentraties over het lengtetraject van de Nieuwe Merwede onder verschillende afvoersituaties (Tabel 3-7).

Afvoer	Slibconcentratie Werkendam (mg/l)	Slibconcentratie Anna Jacominaplaat (mg/l)
< 3500 m ³ /s	38	21
800 - 6000 m ³ /s	40	30
> 3500 m ³ /s	60	60

Tabel 3-7 Slibconcentraties

Verder is opvallend dat de slibconcentratie een scherpe daling vertoont net voor de benedenstroomse rand onder de bovengenoemde afvoersituaties.

- **Overige slibparameters**

Voor de Nieuwe Merwede zijn voor de kritieke schuifspanning voor sedimentatie en erosie, de erosiesnelheid en consolidatie geen meetgegevens beschikbaar.

3.5 Morfologische ontwikkeling

3.5.1 Gegevens

Voor de Nieuwe Merwede zijn alle beschikbare gegevens van de morfologische ontwikkeling verzameld voor de periode 1970 - 1993. In deze paragraaf worden een aantal opmerkingen gemaakt bij deze gegevens. Vervolgens worden de gegevens gebruikt om een beeld van de morfologische ontwikkeling en de gevormde zand-slibstructuren te schetsen.

- **Lodingen**

In **Appendix B.1** en **B.2** is het bodemprofiel van respectievelijk 1970 en 1993 weergegeven. Tevens is een verschilkaart gemaakt (**Appendix B.3**). In **Appendix B.4** staat de verschilkaart tussen de lodingen van 1993 en 1994.

- **Eén-dimensionale bodemontwikkeling**

Een groot probleem bij de interpretatie van de lodingen zijn de baggerwerkzaamheden. In **Appendix B.5** zijn de baggergegevens samengevat. Om de natuurlijke bodemontwikkeling te bepalen moet de gemeten bodemligging gecorrigeerd worden. Door Rijkswaterstaat (1990) is een gecorrigeerde één-dimensionale, morfologische ontwikkeling van de Nieuwe Merwede bepaald voor de periode 1970-1989. De Nieuwe Merwede is hiertoe in drie vakken verdeeld. Ook de Universiteit van Utrecht (1993) heeft onderzoek gedaan naar de morfologische ontwikkeling van de Nieuwe Merwede en daarbij dezelfde aanpak gevolgd als het onderzoek van Rijkswaterstaat. De vakindeling en de periode is echter anders.

Naar aanleiding van deze onderzoeken worden een paar belangrijke opmerkingen geplaatst:

- Opvallend is dat in het onderzoek van de Universiteit van Utrecht de Nieuwe Merwede is opgesplitst in drie vakken met ongeveer gelijke oppervlakte. Er is geen rekening gehouden met de spreiding van de baggeractiviteiten. Wanneer de vakindeling wordt vergeleken met de baggeractiviteiten op de Nieuwe Merwede kan geconcludeerd worden dat voor vak 1 (km 961.2 - 969.1) de baggeractiviteiten over de periode 1970-1992 vooral geconcentreerd zijn tussen km 961.2 en 964.0 (**Appendix B.5**). Van de totale hoeveelheid baggerwerk in vak 1 is ongeveer 70% in dit traject gebaggerd. Voor de uitkomsten betekent dat de 'bodemverandering ten gevolge van baggeren' teveel wordt uitgesmeerd en daardoor te klein is over het traject km 961.2 - 964.0 en te groot is over het traject km 964.0 - 969.1. Voor de vakken 2 en 3 speelt dit probleem niet.
- Bij het onderzoek van Rijkswaterstaat is voor de bovenstroomse zijde de indeling correct. Vak 1 correspondeert met het traject km 961.2 - 964.0. Echter, de grenzen van vak 3 (km 969 - km 979.8) leveren het bovengenoemde probleem. De baggeractiviteiten zijn geconcentreerd in km 975 - km 979.8 (**Appendix B.5**). Ook hier wordt de bodemverandering ten gevolge van baggeren teveel uitgesmeerd, zelfs over gedeelten waar nauwelijks gebaggerd is.
- Opgemerkt moet worden dat voor beide onderzoeken de bodemveranderingen berekend zijn over het volledige breedte van de rivier. Zeker de baggeractiviteiten aan de benedenstroomse zijde waren gericht op het op diepte houden van de geul. Op de bank is (waarschijnlijk) vrijwel niet gebaggerd. Dit betekent dat met behulp van de gecorrigeerde bodemveranderingen zeker niet zomaar uitspraken gedaan kunnen worden over de ontwikkeling van de geul en de bank.
- Daarnaast wordt nog een belangrijke opmerking gedaan. In beide onderzoeken wordt

aangegeven aan dat het sterk te betwijfelen is of de gecorrigeerde bodemverandering ook inzicht geeft in de 'natuurlijke morfologie' bij afwezigheid van baggeractiviteiten. Baggeractiviteiten kunnen het sedimentatie- en erosieproces zodanig verstoren dat op plaatsen waar bijvoorbeeld sedimentatie zou optreden in een situatie zonder baggeractiviteiten juist erosie optreedt.

Geconcludeerd kan worden dat de gecorrigeerde bodemveranderingen hooguit een eerste indruk geven van het sedimentatie- en erosiepatroon over de Nieuwe Merwede. Vanwege de spreiding in de baggeractiviteiten wordt voor het bovenstroomse traject (km 961.2 - 969.0) gebruik gemaakt van de gegevens van Rijkswaterstaat (1990), voor het traject km 969 - 979.8 van de Universiteit van Utrecht (1993).

• Sedimentbalans

Door Van Dreumel (1990, 1995) en het Waterloopkundig Laboratorium (1988) is voor het gehele Noordelijk Deltabekken een sedimentbalans opgesteld voor de perioden 1971-1982 en 1982-1992. In **Tabel 3-8** is de sedimentbalans voor de Nieuwe Merwede weergegeven voor de periode 1971-1992 (gebaseerd op gegevens van Van Dreumel, 1990/1995 en WL, 1988). De hoeveelheden zand en slib geven zijn jaarlijkse gemiddelden in de desbetreffende periode. Het percentage geeft aan hoeveel sediment van de aangeboden hoeveelheid bij Werkendam in de betreffende periode sedimenteert.

Periode	Zand (*10 ⁶ ton/jaar)			Slib (*10 ⁶ ton/jaar)		
	Aanbod	Sedimentatie (+) Erosie (-)	Afvoer	Aanbod	Sedimentatie (+) Erosie (-)	Afvoer
1971-1982	0.55	+0.45 (82%)	0.09	1.43	+0.43 (30%)	1.00
1982-1992						
-bovenstrooms	0.44	+0.08 (18%)	0.36	1.31	+0.02 (2%)	1.29
-benedenstrooms	0.36	+0.01 (2%)	0.35	1.29	0.00 (0%)	1.29

Tabel 3-8 Sedimentbalans Nieuwe Merwede

• Bodemmonsters april 1992

In april 1992 zijn van de toplaag van de Nieuwe Merwede monsters genomen en geanalyseerd. In de analyse is onder andere de korrelgrootteverdeling bepaald. Door Wang (1997) is naar aanleiding van de meetresultaten geconcludeerd dat bij een aantal monsters de som van de verschillende fracties niet 100% bedroeg. Daarnaast bleek dat de som van de fracties < 2 µm, 2-16 µm en 16-63 µm niet gelijk is aan de fractie < 63 µm. Verder onderzoek naar de betrouwbaarheid van deze data is noodzakelijk.

• Boringen juni 1992

Naast de bodemmonsters zijn in juni 1992 ook boringen genomen in de Nieuwe Merwede. De boringen zijn vooral in het benedenstroomse deel gezet. Iedere boring is uitvoerig geanalyseerd en er is een foto en een beschrijving van de samenstelling en de laagdikte van iedere afzetting gemaakt (RWS, 1992).

Met behulp van de lodingen op elke lokatie het verschil berekend tussen het bodemniveau van 1970 en dat van 1992. Vervolgens is bekeken of het grensvlak van 1970 te onderscheiden is en zo ja, waarom. Tenslotte wordt kort het afzettingspatroon beschreven. Het blijkt dat bij de boringen 32 t/m 65 en 69 geen loding van 1970 bekend is. Deze boringen kunnen alleen gebruikt worden om een indicatie te krijgen van de samenstelling van de toplaag in 1992. Voor de bepaling van de afzettingen in de periode 1970-1992 zijn deze ongeschikt.

- **Valbommonsters juni 1992**

Tegelijkertijd zijn ook een aantal valbommonsters genomen van de toplaag van de Nieuwe Merwede. Van deze monsters is alleen bekend of deze uit zand of slib bestond. Het slibpercentage is niet bekend.

Op basis van de één-dimensionale ontwikkeling van RWS (1990) en UvU (1993) is de Nieuwe Merwede opgesplitst in vier secties. Bij elke sectie is een figuur gemaakt, waarin het lodingsverschil (1970-1993) is weergegeven. Tevens zijn de lokaties van de boringen, de bodemmonsters en de valbommonsters aangegeven en naast de figuur staan hiervan de gegevens. Op basis van deze gegevens kan per sectie het volgende geconcludeerd worden met betrekking tot de morfologische ontwikkeling en de gevormde zand-slibstructuren:

3.5.2 km 961.2 - 964

- **Gegevens**

Periode	Bodemverandering (cm/jaar)		
	Gemeten	Baggeractiviteiten	Gecorrigeerd
1970-1982	-0.9	-15.4	+14.5
1982-1989	-5.4	-21.4	+16.0

Tabel 3-9 Bodemverandering (RWS, 1990)

Boring	1993-1970	Diepte t.o.v. NAP (m)	Vlak 1970	Reden?	Afzetting (m)	Details
69	geen loding	-6.2				Toplaag grof zand

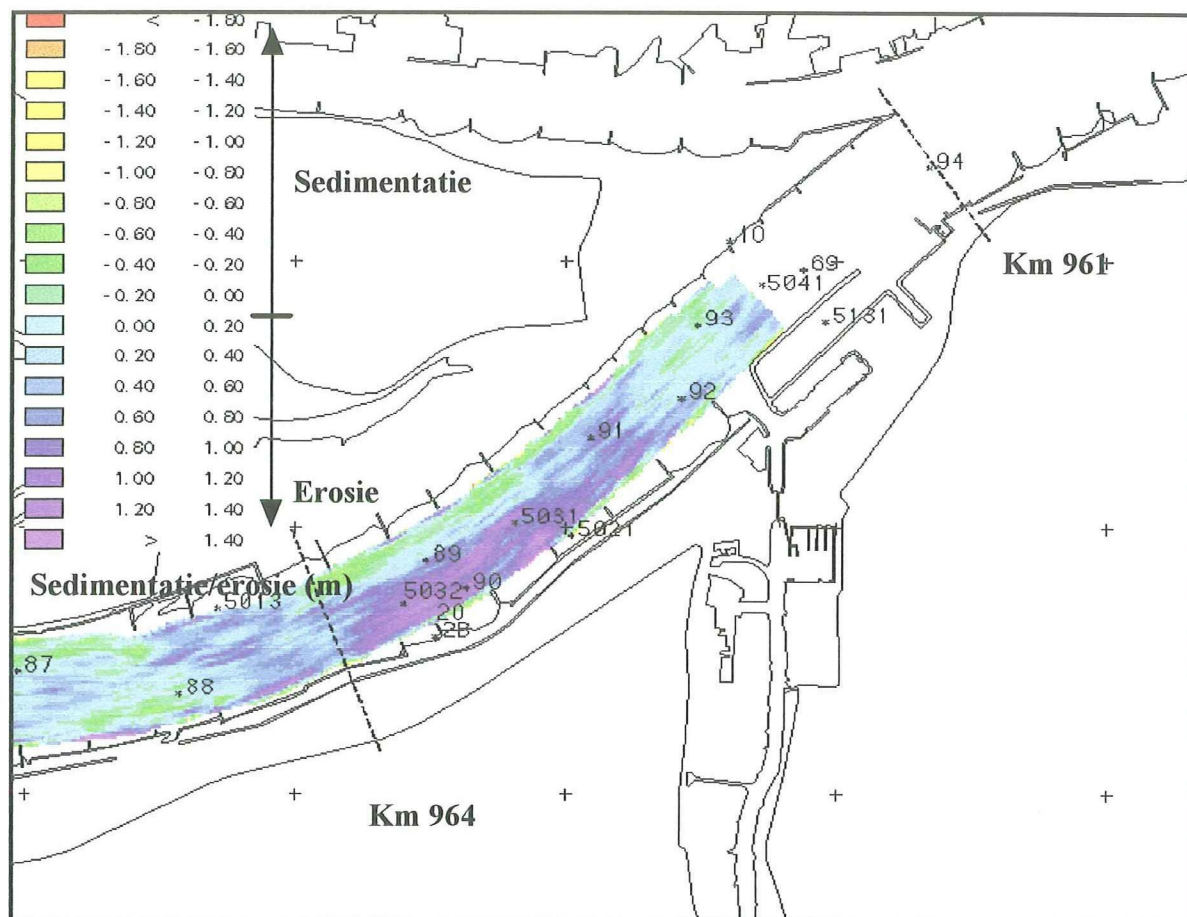
Tabel 3-10 Boringen (RWS, 1992)

Station	Diepte t.o.v. NAP (m)	Slibpercentage (%)	Fout (%)
NM5041	-5.0	2.4	0.3
NM5031	-5.2	4.8	2.7
NM5032	-4.8	4.8	4.3
NM10	+0.2	2.2	0.9
NM5021	-0.5	34	14.1
NM2B	-0.3	14	15.8
NM20	+0.1	2.6	4.5

Tabel 3-11 Bodemmonsters (Wang, 1996)

Lokatie	Beschrijving	Lokatie	Beschrijving
89	Matig grof zand	92	Matig grof zand
90	Matig grof zand	93	Slap slib
91	Matig grof zand	94	Matig grof zand

Tabel 3-12 Valbommonsters (RWS, 1992)



Figuur 3-3 Verschilkaart 1970 - 1993

• Beschrijving

Uit de één-dimensionale ontwikkeling van RWS (1990) blijkt dat op dit traject (km 961.2 - 964) gedurende de perioden 1970-1982 en 1982-1989 sprake is van netto erosie. Tevens blijkt dat dit veroorzaakt is door de forse baggeractiviteiten voor zandwinning. De verschilkaart 1993-1970 laat zien dat deze netto erosie vrijwel over de gehele breedte heeft plaatsgevonden, maar vooral is geconcentreerd bij het begin van de bocht. Een verdieping van meer dan een meter is daar geen uitzondering.

De gecorrigeerde bodemveranderingen geven aan dat hier veel sedimentatie zou hebben plaatsgevonden gedurende beide perioden, respectievelijk 15 en 16 cm/jaar. Mogelijk is de sedimentatie in de tweede periode versterkt door de intensieve zandwinning.

Op dit traject is één boring genomen (69). Er is geen diepteligging van 1970 bekend. Waarschijnlijk is hier ook sprake van verdieping ten gevolge van baggerwerkzaamheden. Uitspraken over verticale segregatie is op basis van deze loding niet mogelijk.

De valbommonsters 89-94 bestonden alle uit matig grof zand, uitgezonderd 93 (slap slib). De monsters 5031, 5032 en 5041 geven een laag slibpercentage, kleiner dan 5%. Ook de toplaag van boring 69 bestond uit matig grof zand. De monsters in de kribvakken geven slibpercentages, variërend van 2.2 tot 34%.

Geconcludeerd kan worden dat de geul in 1992 uit zand bestond. In de kribvakken lag het slibpercentage hoger, maar er zijn monsterlocaties in de kribvakken met zeer lage slibpercentages, bijvoorbeeld 10 en 20.

3.5.3 km 964 - km 968.5

- Gegevens

Periode	Bodemverandering (cm/jaar)		
	Gemeten	Baggeractiviteiten	Gecorrigeerd
1970-1982	-0.4	-4.8	+4.4
1982-1989	+0.4	-0.8	+1.2

Tabel 3-13 Bodemverandering (RWS, 1990)

Boring	1993-1970	Diepte t.o.v. NAP (m)	Vlak 1970	Reden?	Afzetting (m)	Details
63	geen loding	0.0				Toplaag slap slib (licht zandhoudend)
64	geen loding	-0.1				Toplaag slap slib
65	geen loding	-0.1				Toplaag slap slib

Tabel 3-14 Boringen (RWS, 1992)

Station	Diepte t.o.v. NAP (m)	Slibpercentage (%)	Fout (%)
NM5013	-0.4	24	9.0
NM5022	-0.1	38	17.1
NM5023	-0.2	36	6.1

Tabel 3-15 Bodemonsters traject (Wang, 1996)

Lokatie	Beschrijving	Lokatie	Beschrijving
82	Matig grof zand	86	Veen
83	Veen	87	Veen
84	Veen	88	Matig grof zand
85	Veen		

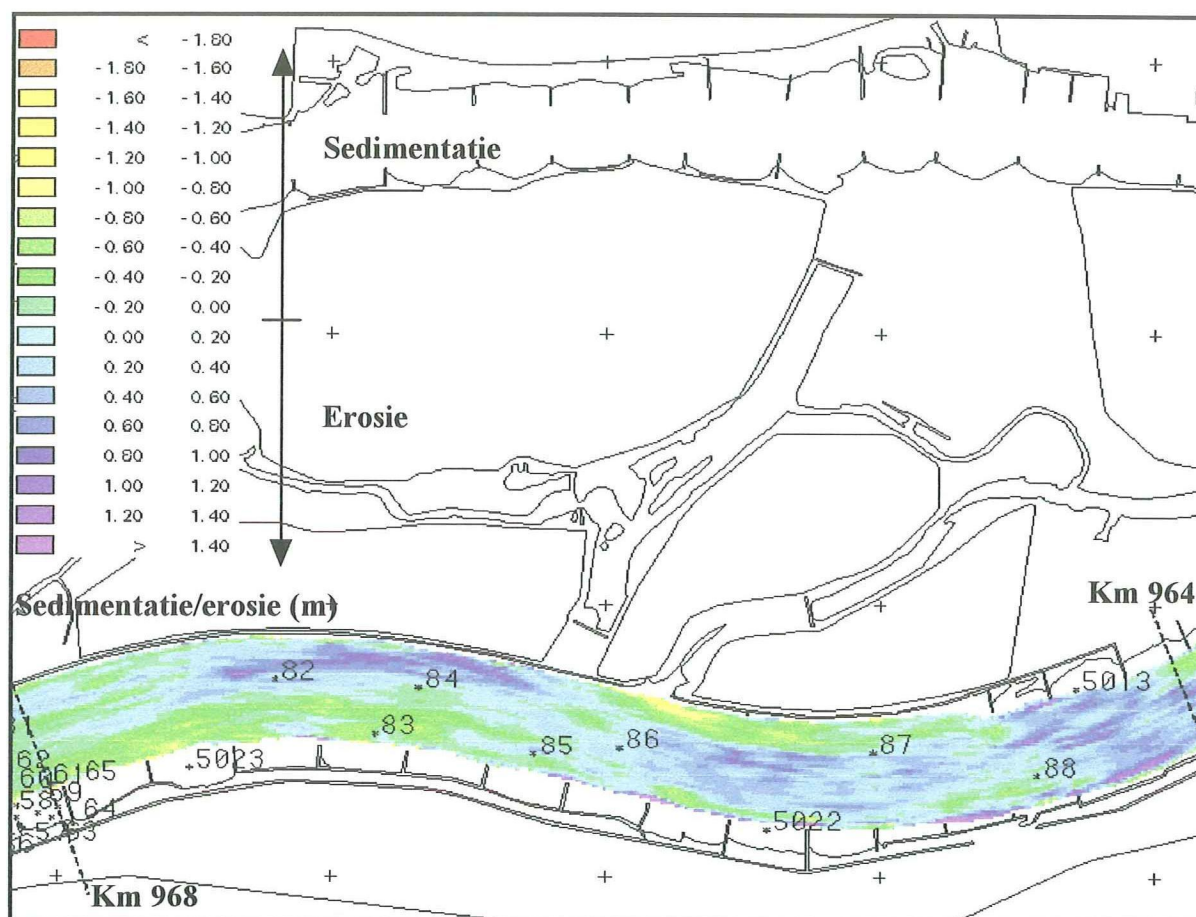
Tabel 3-16 Valbommonsters (RWS, 1992)

- Beschrijving

Op dit traject is in de eerste periode (1970-1982) netto erosie, terwijl de tweede periode (1982-1989) netto sedimentatie te zien geeft. De verschilkaarten wijzen op sedimentatie in de binnenbochten. In de geul is sprake van lichte erosie.

Uit de gecorrigeerde bodemveranderingen blijkt dat hier sedimentatie zou hebben plaatsgevonden, echter veel minder dan op het traject km 961.2 - 964. Op dit traject is gedurende beide perioden waarschijnlijk lokaal gebaggerd om de geul op diepte te houden. Mogelijk zijn de baggeractiviteiten bovenstrooms de oorzaak van de geringe gecorrigeerde sedimentatie in dit traject.

Op dit traject zijn alleen de boringen 63-65 beschikbaar in het kribvak bij km 964. Hiervan is geen loding van 1970 beschikbaar. Uitspraken over de verticale segregatie in dit traject is niet mogelijk.



Figuur 3-4 Verschilkaart 1970 - 1993

De valbommonsters 82 en 88 laten een toplaag van zand zien, maar bij 83-87 lag een (oude) veenlaag. De toplaag van boring 63 - 65 bestond uit slap slib. De monsters 5013, 5022 en 5023 in de kribvakken geven slibpercentages van 24, 38 en 36%. Geconcludeerd kan worden dat de geul uit zand bestond met gedeeltelijk een oude veenlaag. In de kribvakken is meer slib aanwezig.

Op basis van de sedimentbalans kan over het traject km 961 - km 968.5 ('bovenstroomse gedeelte') nog het volgende opgemerkt worden (Tabel 3-8). In de tweede periode (1982-1992) blijkt dat het meeste zand in het bovenstroomse traject sedimenteerde en er nauwelijks slibsedimentatie plaatsvond. Dit is in overeenstemming met de geschetste toplaag van 1992.

Over de verdeling van de zandsedimentatie in de periode 1971-1982 is niets bekend. Het lijkt aannemelijk dat ook gedurende de eerste periode het meeste zand in het bovenstroomse deel is gesedimenteerd. Sedimentatie van slib zal gedurende de eerste periode - mede gezien de lage snelheden bij lage en gemiddelde afvoeren - hoofdzakelijk hebben plaatsgevonden in het benedenstroomse gedeelte.

Opvallend is dat voor de periode 1981-1992 slibsedimentatie optreedt in het bovenstroomse gedeelte, maar niet in het benedenstroomse gedeelte. Deze sedimentatie zou veroorzaakt kunnen zijn door de baggeractiviteiten. Ook uit de vergelijking tussen de lodingen van 1970 en 1993 blijkt dat de Nieuwe Merwede in het bovenstroomse traject verdiept (!) is. Hierdoor zijn de snelheden gedaald en zou meer slib kunnen sedimenteren bij lage afvoeren. Geen sedimentatie van slib in het benedenstroomse traject betekent niet dat de Nieuwe Merwede op het benedenstroomse traject voor slib inmiddels op evenwicht is.

3.5.4 km 968.5 - 975.0

• Gegevens

Boring	1993-1970	Diepte (m)	Vlak '70	Reden?	Afzetting (m)	Details
18	+1.8	-2.8	Ja	500 mu	+1.8	Eerst slib (1.5 m), daarna zand (30 cm)
19	+1.9	-2.7	Ja	1000 mu	+1.7	Eerst slib met zandlenzen (1.2 m), daarna zand (50 cm)
20	+1.6	-2.3	Ja	500 mu	+1.5	Eerst slib (1.1 m), daarna zand (40 cm)
21	+1.3	-2.9	Ja	500 mu	+1.2	Eerst slib (1.1 m), daarna zand (10 cm)
22	+0.6	-5.0	Ja	755 mu	+0.4	Eerst slib (20 cm), daarna zand (20 cm)
23	+0.4	-4.8	Nee			Toplaag zand
24	+0.7	-3.3	Ja	500 mu	+0.5	Slibafzetting (50 cm)
25	+0.2	-4.5	Ja	500 mu	0.0	Toplaag zand
26	-0.2	-4.2	Nee			Toplaag zand
27	+0.5	-3.3	Ja	710 mu	+0.3	Slibafzetting (30 cm)
28	+0.4	-3.4	Ja	500 mu	+0.5	Slibafzetting (50 cm)
29	+0.5	-3.8	Ja	Veen	+0.6	Eerst slib (40 cm), daarna zand (20 cm)
30	+0.3	-2.9	Nee			Toplaag veen
31	+0.7	-3.9	Ja	Veen	+0.4	Eerst slib (15 cm), daarna zand (25 cm)
39	geen loding					Toplaag slib
40	geen loding					Toplaag slib
41	geen loding					Toplaag slib met zeer dun laagje zand
42	geen loding					Toplaag slib
43	geen loding					Toplaag slib
44	geen loding					Toplaag slib
45	geen loding					Toplaag slib
46	geen loding					Toplaag slib
47	geen loding					Toplaag slib
48	geen loding					Toplaag zandhoudend slib
49	geen loding					Toplaag slib
50	geen loding					Toplaag slib
51	geen loding					Toplaag zandhoudend slib
52	geen loding					Toplaag slib
53	geen loding					Toplaag slib
54	geen loding					Toplaag slib
55	geen loding					Toplaag slib
56	geen loding					Toplaag slib
57	geen loding					Toplaag zandhoudend slib
58	geen loding					Toplaag slib
59	geen loding					Toplaag slib
60	geen loding					Toplaag slib
61	geen loding					Toplaag slib
62	geen loding					Toplaag slib
66	+0.3	-4.8	Nee			Toplaag matig grof zand
67	+0.5	-7.0	Nee			Toplaag matig grof zand
68	+1.2	-5.0	Nee			Toplaag veen

Tabel 3-17 Boringen (RWS, 1992)

Periode	Bodemverandering (cm/jaar)		
	Gemeten	Baggeractiviteiten	Gecorrigeerd
1970-1976	+5.6	-2.3	+7.9
1976-1971	+0.4	-6.1	+6.5
1981-1992	+1.7	-1.4	+3.1

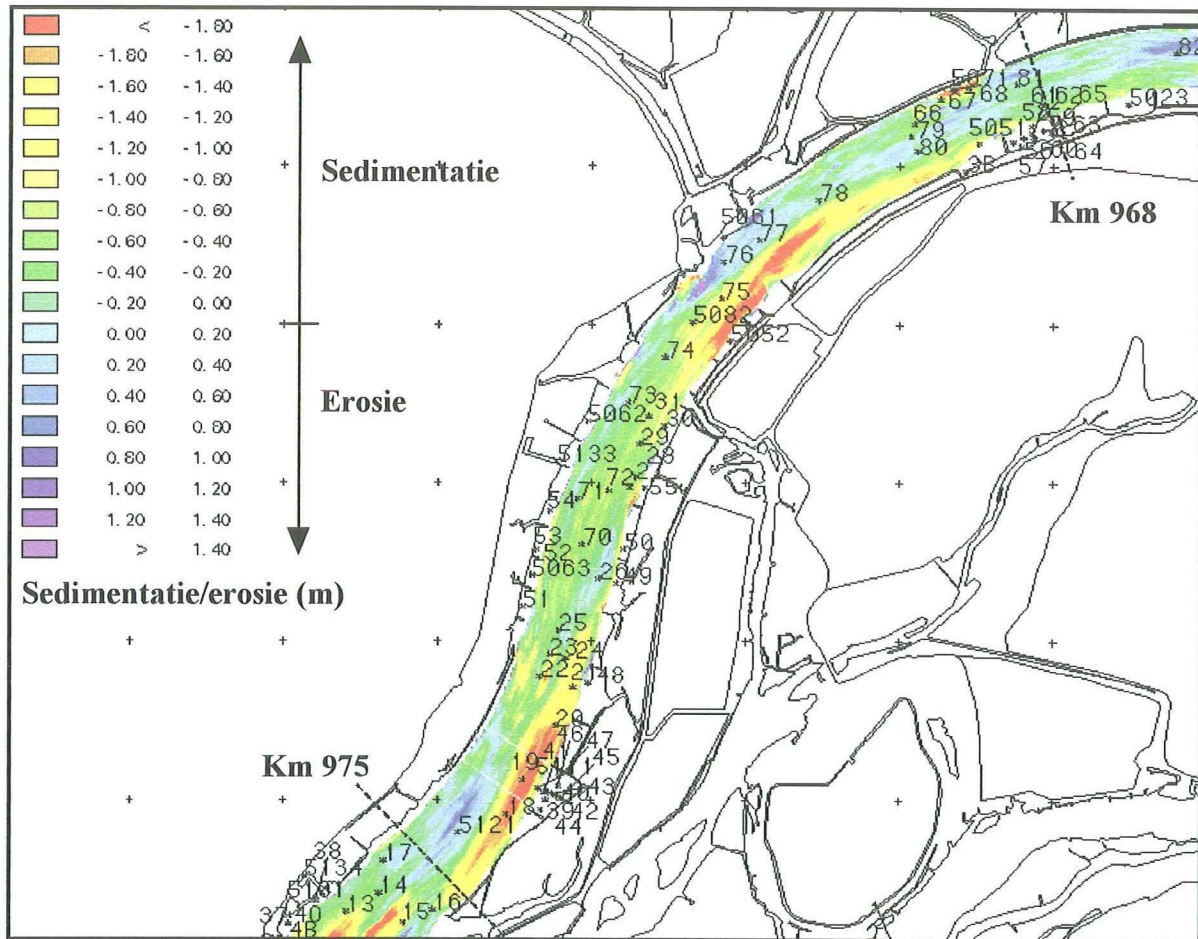
Tabel 3-18 Bodemverandering (UvU, 1993)

Station	Diepte t.o.v. NAP (m)	Slibpercentage (%)	Fout (%)
NM5071	-7.0	47	18.8
NM5082	-4.8	3.2	0.6
NM5121	-4.6	7.7	5.7
NM3B	-0.2	30	15.5
NM5052	-0.6	68	38.2
NM5062	-0.4	44	17.2
NM5133	-0.6	61	23.5
NM5063	-0.6	63	52.9
NM5111	-0.5	60	55.5
NM5051	-2.1	2.6	0.8
NM5061	-0.6	48	29.2

Tabel 3-19 Bodemmonsters (Wang, 1996)

Lokatie	Beschrijving	Lokatie	Beschrijving
70	Matig grof zand	76	Gecons. slib
71	Matig grof zand	77	Veen
72	Matig grof zand	78	Matig grof zand
73	Matig grof zand	79	Matig grof zand
74	Matig grof zand	80	Matig grof zand
75	Matig grof zand	81	Matig grof zand

Tabel 3-20 Valbommonsters (RWS, 1992)



Figuur 3-5 Verschilkaart 1970 - 1993

- **Beschrijving**

Tijdens de verschillende perioden is op dit traject sprake van netto sedimentatie, ondanks de baggeractiviteiten. Uit de verschilkaart blijkt dat deze sedimentatie vooral is opgetreden in de binnenbocht, op sommige plaatsen zelfs meer dan 2 meter. In de geul is sprake van lichte erosie. Deze is zichtbaar op diepte gehouden.

Op dit traject liggen in de binnenbocht de boringen 27 t/m 31. Uit boring 29 en 31 kan geconcludeerd worden dat sinds 1970 eerst een dunne sliblaag is afgezet met daaroverheen een zandlaag. Uit de boringen 27 en 28 blijkt dat daar alleen slib is afgezet. De afzettinglaag van slib ligt in de orde van 30 centimeter, die van zand ongeveer 20 centimeter. Uit de boringen 18 t/m 22 en 24 kan worden afgeleid dat eerst een flinke slibafzetting heeft plaatsgevonden tot 1.5 meter bij boring 18. Vervolgens is deze sliblaag afgedekt met een dunne laag zand. Geconcludeerd kan worden dat in de binnenbocht sprake is geweest van forse slibafzettingen, afgedekt met een laagje zand. In de geul zijn geen boringen gezet. Uitspraken over de verticale segregatie in de geul is derhalve niet mogelijk.

Uit de valbommonsters 71 t/m 81 blijkt dat de toplaag van de geul en de binnenbocht uit zand bestond in 1992, met een opmerkelijk klei- (77) en veenmonster (78) in de geul. Ook de monsters 5082 en 5121 laten lage slibpercentages zien. Opmerkelijk is het hoge slibpercentage bij 5071 in de geul (47%).

In de kribvakken bestond de toplaag uit slap slib (boringen 39 - 62), soms zandhoudend. Ook de monsters geven een hoog slibpercentage in de kribvakken, variërend van 40 tot 70%. Op ondiepe lokaties in de bochten zijn twee monsters genomen met een slibpercentage van 2.6 (5051) en 48% (5061). Geconcludeerd kan worden dat de toplaag van de geul in 1992 uit zand bestond. In de kribvakken lag het slibpercentage aanmerkelijk hoger.

3.5.5 km 975 - km 979.8

• Gegevens

Periode	Bodemverandering (cm/jaar)		
	Gemeten	Baggeractiviteiten	Gecorrigeerd
1970-1976	+11.0	-2.5	+13.5
1976-1971	+0.6	-4.8	+5.4
1981-1992	+1.1	-1.8	+2.9

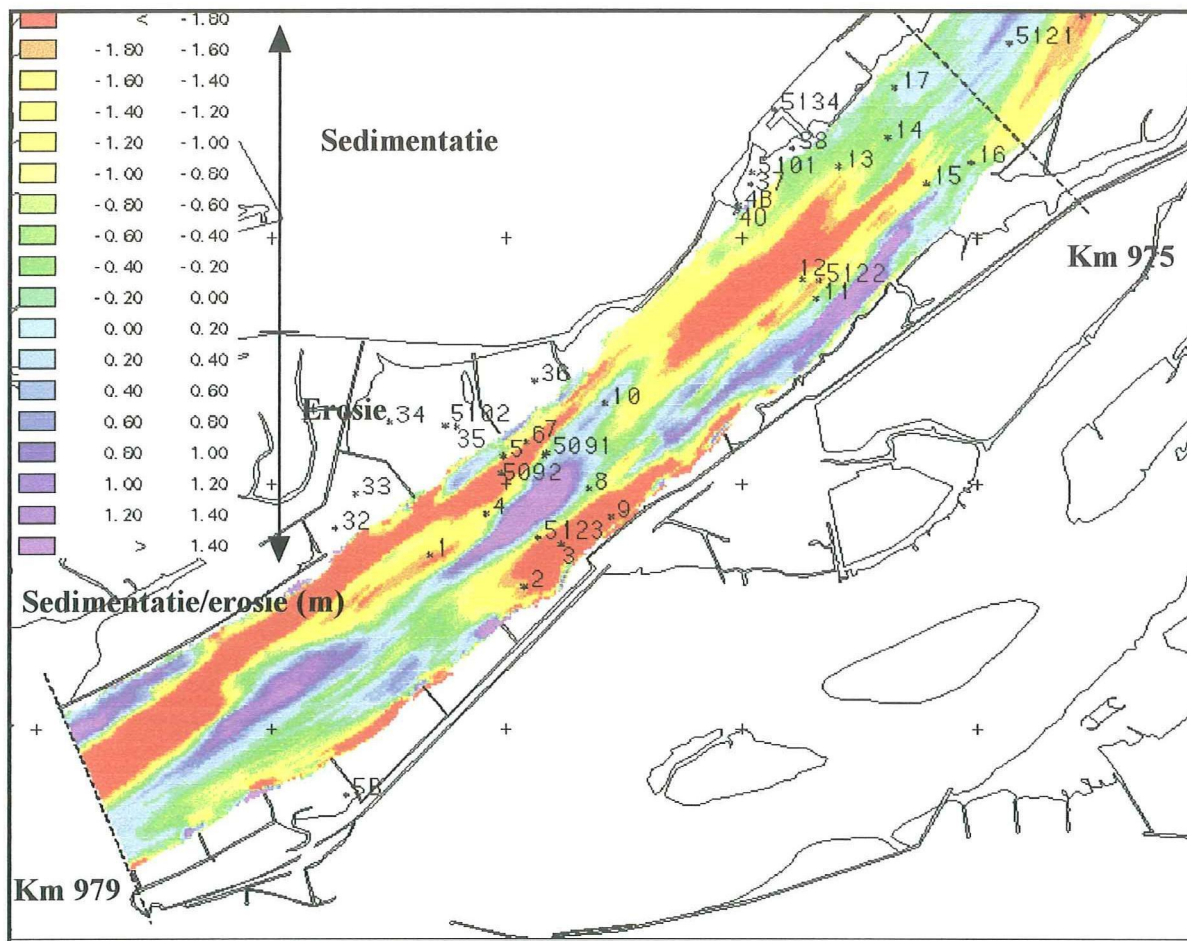
Tabel 3-21 Bodemverandering (UvU, 1993)

Boring	1993-1970	Diepte (m)	Vlak '70	Reden?	Afzetting (m)	Details
1	+1.6	-0.7	Ja	500 mu	1.8	Eerst slib met zandlenzen (1.6 m), daarna zand (20 cm)
2	+1.8	-6.2	Ja	500 mu	1.7	Eerst slib (1 m), daarna zand (60 cm)
3	+2.6	-6.7	Ja	500 mu	2.9	Eerst slib met zandlenzen (2.3 m), daarna zand (60 cm)
4	+1.2	-0.6	Ja	500 mu	1.1	Eerst slib (0.9 m), daarna zand (20 cm)
5	+0.9	-4.0	Nee			Toplaag slap slib
6	+1.6	-3.3	Ja	500 mu	1.5	Eerst slib met zandlenzen, daarna zand (30 cm), toplaag slib
7	+0.3	-1.0	Nee			Toplaag matig grof zand
8	+0.1	-5.6	Nee			Er is sprake van sterke gelaagdheid
9	+2.3	-7.5	Ja	500 mu	2.8	Eerst slib met zandlenzen (2.4 m), daarna zand (30 cm)
10	-0.4	-2.5	Nee			Toplaag matig grof zand
11	+0.3	-5.9	Nee			Toplaag matig grof zand
12	+1.2	-6.0	Ja	veen	+1.6	Eerst slib (1.4 m), daarna zand (20 cm)
13	+0.6	-1.8	Ja	500 mu	+0.6	Eerst slib (40 cm), daarna zand (20 cm)
14	+0.2	-3.0	Nee			Toplaag slibhoudend zand
15	+1.2	-5.5	Ja	500 mu	+1.2	Eerst slib (80 cm), daarna zand (40 cm)
16	+0.5	-3.9	Nee			Toplaag slap slib
17	+0.1	-3.0	Ja	500	0.0	Toplaag matig grof zand
32	geen lading	-1.6				Toplaag zandhoudend slib
33	geen lading	-1.3				Toplaag grof zand
34	geen lading	-3.3				Toplaag slap slib
35	geen lading	-4.5				Toplaag slibhoudend zand
36	geen lading	-1.0				Toplaag slibhoudend zand
37	geen lading	-0.7				Toplaag zandhoudend slib
38	geen lading	-0.7				Toplaag slibhoudend zand

Tabel 3-22 Boringen (RWS, 1992)

Station	Diepte t.o.v. NAP (m)	Slibpercentage (%)	Fout (%)
NM5134	-1.5	49	24.8
NM5102	-0.5	55	27.9
NM5B	-0.35	3.1	0.9
NM4B	-0.4	8.4	3.6
NM4O	-0.1	14.1	3.6
NM5091	-0.8	7.8	3.8
NM5092	-0.5	7.9	5.6
NM5122	-5.3	10.9	6.7
NM5123	-5.5	15	-1.0

Tabel 3-23 Bodemonsters (Wang, 1996)



Figuur 3-6 Verschilkaart 1970 - 1993

• **Beschrijving**

Over de gehele periode is - ondanks de baggerwerkzaamheden - sprake van netto sedimentatie. De grootste gecorrigeerde sedimentatie is direct na de sluiting in de periode 1970-1976 van gemiddeld 13,5 cm/jaar. Uit de verschilkaart blijkt dat de sedimentatie vooral heeft plaatsgevonden op de bank bij km 976 en soms lokaal in de geul. Tevens blijkt dat op sommige plaatsen flinke erosie is opgetreden.

Boring 15 ligt in de geul en geeft eerst een duidelijk afzetting van slib, afgedekt met matig grof zand. Boring 12, 9, 3 en 2 in de geul geven hetzelfde beeld. In meerdere boringen in de geul komen dunne zandlensjes voor in de dikke slibafzettingen. Boring 8 - op de overgang van geul naar bank - vertoont een sterke gelaagdheid. Boring 1, 4, 6 en 13 op de bank geven ook eerst een slibafzetting met een zandige toplaag. Bij de overige boringen is het vlak van 1970 niet te onderscheiden. Bij boring 10 is sprake van erosie, waarschijnlijk veroorzaakt door baggerwerkzaamheden. Op basis van deze boringen kan geconcludeerd worden dat in eerste instantie flinke slibafzettingen hebben plaatsgevonden, zowel in de geul als op de bank. Deze slibafzettingen zijn afgedekt met een laag zand. In de slibafzettingen is af en toe sprake van dunne zandafzettingen.

Uit de monsters in de geul en de boringen blijkt dat de toplaag zandig is, echter het slibpercentage is aanmerkelijk hoger dan in de voorgaande trajecten (7 - 15%). De toplaag van de boringen 32 - 38 in de kribvakken bestaan uit (slibhoudend) zand, uitgezonderd 34 en 37 (slib). Het slibpercentage bij de monsters 5134 en 5102 in de kribvakken is hoog, ongeveer 50%. Opvallend is het monster 5B met een zeer laag slibpercentage (3.1%). Uit de monsters en de toplaag van de boringen kan geconcludeerd worden dat het slibpercentage in de kribvakken veel hoger is dan in de geul. Er zijn echter ook plaatsen met zeer lage slibpercentages.

Uit de sedimentbalans voor het traject km 968.5 - km 979.8 ('benedenstroomse gedeelte') kan nog het volgende geconcludeerd worden (**Tabel 3-8**). Gezien de lage stroomsnelheden bij Anna Jacominaplaat gedurende een groot gedeelte van de getijperiode (**Tabel 3-3**), zal hoofdzakelijk slib gesedimenteerd zijn in het benedenstroomse traject, zeker bij lage en gemiddelde afvoeren.

Het is zeer opmerkelijk dat de balans voor zand en slib op het benedenstroomse gedeelte een evenwichtssituatie aangeeft voor de periode 1982-1992, terwijl uit de één-dimensionale ontwikkeling duidelijk blijkt dat nog flinke (gecorrigeerde) sedimentatie optreedt. De gegevens stemmen niet met elkaar overeen.

4. Modelbeschrijving

4.1 Modelaanpak

Op basis van de huidige kennis van de procesvergelijkingen (hoofdstuk 2) en het studiegebied (hoofdstuk 3) is gekozen voor de volgende modelleeraanpak:

2DH-modellering van het initiële sedimenttransport (A) voor zand en slib zonder interactie (B) in een getijperiode (C) bij vier verschillende Bovenrijnafvoeren (D) voor 1970 en 1993 (E).

op basis van de volgende overwegingen:

A. 2DH-modellering

- Door Wang (1996) is inmiddels aangegeven dat een 2DH-sedimenttransportmodel mogelijk is. Voor de Nieuwe Merwede is 2DH-modellering ook toepasbaar vanwege de afwezigheid van dichtheidsstromen. Bij 2DH-modellering wordt het 3D-verschijnsel spiraalstroming niet meegenomen. Kwalitatief wordt in 4.2.3 op deze beperking ingegaan.
- Over het algemeen kan de invloed van windgolven op de waterbeweging en het sedimenttransport in rivieren verwaarloosd worden. In 4.2.4 wordt deze verwaarlozing onderbouwd.

B. Zand en slib zonder interactie

- Aangezien de slib- en zandconcentraties in de Nieuwe Merwede laag zijn ($C < 100$ mg/l), kan het transport en de sedimentatie van zand en slib als onafhankelijk beschouwd worden.
- Uit de literatuur blijkt dat voor erosie en consolidatie de interactie tussen zand en slib belangrijk is. Gezien het feit dat hier nog nauwelijks kwantitatieve relaties bestaan, wordt geen interactie tussen zand en slib in de bodem meegenomen.
- De invloed van het flocculatieproces op de valsnelheid van slib hoeft niet gemodelleerd te worden vanwege de lage slibconcentraties in de Nieuwe Merwede ($c < 300$ mg/l) en de afwezigheid van zout. Ook 'hindered settling' speelt vanwege de lage zandconcentraties geen rol.
- Op de Nieuwe Merwede treedt onder alle afvoeren geen kentering op. Uit de literatuur blijkt dat het verschil tussen de (diepte-gemiddelde) kritische sedimentatiesnelheid van slib (0.15 m/s) en de kritische snelheid voor erosie/sedimentatie van zand (0.4 m/s) vrij groot is. Op basis hiervan zou op voorhand geconcludeerd kunnen worden dat zand-slibmengsels meer uitzondering dan regel zijn op de Nieuwe Merwede. De boringen ondersteunen deze conclusie, aangezien de meeste boorkernen duidelijke afwisseling van zand- en sliblagen laten zien.

C. Getijperiode

- Voor sedimenttransportmodellering bij stationaire bovenafvoer zijn de modeluitkomsten voor iedere getijperiode (na inspeeltijd) cyclisch.

D. Bovenrijnafvoeren

- Uit de Bovenrijnafvoeren in de periode 1970 - 1992 blijkt dat deze rivierafvoer grote variatie kan vertonen. Aangezien de stromingscondities onder verschillende afvoeren sterk kunnen verschillen, is ervoor gekozen om berekeningen uit te voeren bij vier verschillende Bovenrijnafvoeren ($Q_{br} = 1200, 2200, 3000$ en $6000 \text{ m}^3/\text{s}$).

E. 1970 en 1993

- De bodemmonsters dateren van juni 1992. Gekozen is voor een bodemschematisatie van 1993 vanwege de bestaande bodemschematisatie voor het 2DH-model. Aangezien de grootste afzettingen van zand en slib hebben plaatsgevonden in de periode 1970 - 1976, is ook gekozen voor het maken van een bodemschematisatie voor 1970.

In dit hoofdstuk worden de formuleringen voor de 2DH-modellering verder uitgewerkt. Aangegeven wordt welke formuleringen gebruikt zijn voor de beschrijving van de waterbeweging en het sedimenttransport. Tevens wordt in een aparte paragraaf voor beide aangegeven welke randvoorwaarden zijn gebruikt.

4.2 Waterbeweging

4.2.1 2DH-vergelijkingen

De diepte-gemiddelde massabalansvergelijking en impulsbalansvergelijkingen kunnen worden afgeleid uit de turbulente 3D-vergelijkingen van Navier-Stokes door integratie over de diepte (Appendix C).

- **Massabalans**

De 2DH-vergelijking voor massabalans is:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial H\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial H\bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

waarin:

ζ = waterniveau ten opzichte van referentievlak [m]

H = waterdiepte [m]

\bar{u}, \bar{v} = diepte-gemiddelde snelheid in x- en y-richting [m/s]

De termen $H\bar{u}$ en $H\bar{v}$ geven het debiet per eenheid van breedte in x- en y-richting.

- **Impulsbalans**

De impulsbalansvergelijkingen in x- en y-richting zijn - onder verwaarlozing van de windinvloed - als volgt:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - f \bar{v} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \bar{u} \frac{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 H} - \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) &= 0 \\
 \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + f \bar{u} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \bar{v} \frac{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 H} - \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

(1) (2) (2) (3) (4) (5) (6)

waarin:

\bar{u}, \bar{v} = diepte-gemiddelde snelheid in x- en y-richting [m/s]

ζ = waterniveau ten opzichte van referentievlak [m]

H = waterdiepte [m]

f = Coriolisparameter [1/s]

g = gravitatieversnelling [m/s²]

C = Chézy-coëfficiënt [m^{1/2}/s]

ν = eddy-viscositeit [m²/s]

De verschillende termen zijn respectievelijk:

1. lokale versnelling
2. advectione versnelling
3. coriolisversnelling
4. drukgradiënt
5. interactie tussen bodem en waterbeweging
6. interactie tussen turbulentie en waterbeweging

4.2.2 Parameters

In de 2DH-waterbewegingsvergelijkingen moeten de drie parameters, te weten de Chézy-coëfficiënt, de viscositeit en de Coriolisparameter, ingesteld worden.

- **Chézy-coëfficiënt C**

Voor de Chézy-coëfficiënt kunnen verschillende formuleringen worden toegepast. In het afgeregelde 2DH-model voor de Zuidrand van het Noordelijk Deltabekken is gebruik gemaakt van de diepte-afhankelijke formulering van Manning:

$$C = \frac{H^{\frac{1}{6}}}{n}$$

De Manning-coëfficiënt kan uitgedrukt worden in de ruwheidsmaat k_s :

$$n = 0.045 \left(k_s \right)^{\frac{1}{6}}$$

Op basis van de verschillende ruwheidsmaten voor zand en slib varieert de Chézy-coëfficiënt over de Nieuwe Merwede bij dezelfde afvoer (hoofdstuk 2). Daarnaast is in hoofdstuk 3 aangegeven dat de beddingvormen, en dus de ruwheidsmaten, onder verschillende afvoeren kunnen wijzigen.

Voor de korrelruwheid $k_{s,c}$ kan $3 d_{90}$ ($\approx 4,5 d_{50}$) worden gekozen. Voor de Nieuwe Merwede is dit ongeveer 0,0014 m. Daarnaast is de ruwheid het gevolg van bodemribbels en -duinen. Voor een eerste benadering kan voor deze beddingvormen als ruwheidsmaat de helft van de duin- of ribbelhoogte gebruikt worden. De beddingvormruwheid voor de geul $k_{s,d}$ ligt dan in de orde van enkele tientallen centimeters. Voor de banken en de kribvakken zal de ruwheid aanmerkelijk kleiner zijn vanwege de afwezigheid van zandduinen. Bij slibbodems ligt de effectieve ruwheid in de orde van 0.1 tot 1 millimeter (Van Rijn, 1993).

Bovenstaande maakt duidelijk dat toepassing van een enkele ruwheidsparameter voor een gebied met kribvakken, geulen en platen met zowel zandige als slibrijke gebieden niet juist is. Nader onderzoek zal moeten aantonen hoe de ruwheidsparameters verbeterd kunnen worden. Bij gebrek aan bruikbare resultaten voor het voorspellen van zandduinen is toch gekozen om bovenstaande effectieve ruwheid $k_s = 0.018$ m te handhaven voor de gehele Nieuwe Merwede.

- **Viscositeit ν**

De viscositeit in het 2DH-model voor de Zuidrand is $\nu = 1$ m²/s. Deze turbulente viscositeit is vele malen groter dan de moleculaire viscositeit ($\approx 1 \cdot 10^{-6}$ m²/s). De viscositeit is afhankelijk van de grootte van het rooster. Bij een kleinere roosterafstand wordt de viscositeit ook kleiner, omdat de verschillende turbulente processen dan nauwkeuriger gemodelleerd worden. Omdat het model voor de Nieuwe Merwede een kleinere roosterafstand heeft, is gekozen voor een $\nu = 0.2$ m²/s (Wang, 1997).

- **Coriolisparameter f**

De Coriolisparameter f is als volgt gedefinieerd:

$$f = 2\omega_a \sin\theta$$

waarin:

ω_a = hoeksnelheid aarde [= $7.27 \cdot 10^{-5}$ rad/s]

θ = breedtegraad op aarde (Noorderbreedte positief!) [°]

Voor de Nederlandse situatie geldt dat $\theta = 51.5^\circ$.

4.2.3 Spiraalstroming

De Nieuwe Merwede is een rivier met een aantal opeenvolgende, tegengestelde bochten. Dit patroon heeft tot gevolg dat een complexe 3D-stroming ontstaat. Door de toepassing van de 2DH-vergelijkingen wordt dit aspect verwaarloosd. In deze paragraaf wordt kort een indruk gegeven van de grootte van dit verschijnsel. Voor precieze details wordt verwezen naar Van Rijn (1993) en Janssen (1979). Tevens wordt ingegaan op het (kwalitatieve) belang van de spiraalstroming voor de waterbeweging en het sedimenttransport van zand en slib op de Nieuwe Merwede.

- **Beschrijving spiraalstroming**

In een oneindig door-spiralende bocht met een vaste bodem kan, onder verwaarlozing van de wrijving, met behulp van de 2DH-ondiepwatervergelijkingen bewezen worden dat de maximale stroomsnelheid in langsrichting in de binnenbocht optreedt. In de dwarsrichting is in deze situatie de snelheid gelijk aan 0, omdat axiaalsymmetrie verondersteld is. Onder deze omstandigheden loopt het waterspiegelniveau op van de binnenbocht naar de buitenbocht.

De snelheidsverdeling in de verticaal is niet uniform, maar verloopt logaritmisch over de waterdiepte. Door een constante drukgradiënt en een variërende centripetale versnelling over de verticaal, ontstaat secundaire stroming. Onderin de verticaal ($z < 0.4h$) is de stroomsnelheid in langsrichting kleiner dan de verticaal gemiddelde snelheid en is de secundaire stroming naar de binnenbocht gericht. Boven in de verticaal ($z > 0.4h$) is de stroomsnelheid groter dan de verticaal gemiddelde snelheid en is de stroming naar de buitenbocht gericht. Gecombineerd met de hoofdstroming in de langsrichting ontstaat in een bocht een spiraalvormig stroombeeld, de spiraalstroming. De secundaire stroming is over het algemeen zwak ten opzichte van de hoofdstroming in langsrichting en bedraagt over het algemeen niet meer dan enkele procenten. Een benadering voor de maximale snelheid v_{\max} in dwarsrichting is:

$$v_{\max} = 5 \frac{h}{R} \bar{u} \quad (4.3)$$

waarin:

h = de waterdiepte [m]

R = de straal van de bocht [m]

\bar{u} = de verticaal gemiddelde snelheid in langsrichting [m/s]

De stroomsnelheid in de dwarsrichting v is evenredig met de (verticaal gemiddelde) stroomsnelheid in langsrichting \bar{u} en de waterdiepte h en omgekeerd evenredig met de straal van de bocht R . Dit betekent dat de secundaire stroming sterker wordt naarmate de straal van een bocht kleiner wordt en de waterdiepte en de langssnelheid groter worden.

Door de secundaire stroming treedt ook een bodemschuifspanning in dwarsrichting op. Deze bodemschuifspanning in dwarsrichting $\tau_{b,r}$ is gelijk aan:

$$\tau_{b,r} = -\rho \frac{h}{R} \bar{u}^2 \left[\frac{2g}{(\kappa C)^2} - \frac{2g^{\frac{3}{2}}}{(\kappa C)^3} \right] \quad (4.4)$$

waarin:

h = waterdiepte [m]

R = straal van de bocht [m]

κ = Von Karman constante [= 0.4]

C = Chézy-coëfficiënt [$m^{1/2}/s$]

g = zwaartekrachtsversnelling [m/s^2]

De bodemschuifspanning in dwarsrichting is omgekeerd evenredig met de straal en evenredig met de waterdiepte. Deze bodemschuifspanning is altijd gericht naar het middelpunt van de bocht.

- **Waterbeweging Nieuwe Merwede**

Op de Nieuwe Merwede is de minimale bochtstraal $R = 4000$ meter. In **Tabel 4-1** is een indruk gegeven van de maximale dwarssnelheid in de Nieuwe Merwede ($R = 4000$ meter) onder verschillende Bovenrijnafvoeren.

Bovenrijnafvoer [m ³ /s]	Waterdiepte [m]	Diepte-gemiddelde langssnelheid [m/s]	Maximale dwarssnelheid [m/s]
1200	5	0.5	0.003
2200	6	0.7	0.005
3000	6.5	0.9	0.007
6000	7	1.2	0.011

Tabel 4-1 Invloed spiraalstroming op waterbeweging

Geconcludeerd kan worden dat bij hogere afvoeren - zowel door toename van de waterdiepte als de stroomsnelheid in langsrichting - de maximale dwarssnelheid toeneemt. Echter, de maximale dwarssnelheid blijft klein ten opzichte van de diepte-gemiddelde langssnelheid.

- **Sedimenttransport Nieuwe Merwede**

Door de secundaire stroming wordt het sedimenttransport beïnvloed. In **Tabel 4-2** is bij verschillende afvoeren een indruk gegeven van de bodemschuifspanning in langs- en dwarsrichting (Chézy-coëfficiënt $55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$; $R = 4000$ m) en de hoek die de totale schuifspanning maakt ten opzichte van de rivieras onder verschillende Bovenrijnafvoeren.

Bovenrijnafvoer [m ³ /s]	Waterdiepte [m]	Diepte-gemiddelde langssnelheid [m/s]	Bodemschuifspanning in langsrichting [N/m ²]	Bodemschuifspanning in dwarsrichting [N/m ²]	Hoek t.o.v. rivieras [°]
1200	5	0.5	0.81	0.011	0.8
2200	6	0.7	1.59	0.026	0.9
3000	6.5	0.9	2.63	0.046	1.0
6000	7	1.2	4.67	0.088	1.1

Tabel 4-2 Invloed spiraalstroming op sedimenttransport

Hieruit kan - net als bij de waterbeweging - geconcludeerd worden dat bij hogere afvoeren de gevolgen van spiraalstroming groter zijn. Verder blijkt dat de absolute bijdrage van de bodemschuifspanning in dwarsrichting aan de totale bodemschuifspanning (heel) klein is. Dit betekent dat spiraalstroming nauwelijks invloed heeft op het erosie- en sedimentatieproces van zand en slib, dat bepaald wordt door de totale schuifspanning.

Een belangrijker gevolg is dat het transport - zeker bij hogere afvoeren - niet correct beschreven wordt. Ten gevolge van de spiraalstroming is het transport in de onderste helft van de verticaal naar binnen gericht en in de bovenste helft naar buiten gericht.

Voor slib, dat uniform verdeeld is over de verticaal, heeft dit alleen tot gevolg dat het ook in dwarsrichting getransporteerd kan worden. Omdat de concentraties bovenin en onderin de verticaal niet verschillen, is het netto transport gelijk aan 0.

Bij zand echter, dat bij een korreldiameter van $300 \mu\text{m}$ en bovenstaande stroomsnelheden, vooral in de onderste helft van de verticaal zit, zal er een netto transport naar de binnenbocht kunnen optreden.

4.2.4 Windgolven

Naast spiraalstroming wordt het verschijnsel windgolven ook verwaarloosd in dit model. In deze paragraaf wordt kwalitatief aangetoond dat windgolven nauwelijks invloed hebben op de waterbeweging en het sedimenttransport in de Nieuwe Merwede.

• Verschijnsel windgolven

De wind veroorzaakt schuifspanningen aan het wateroppervlak. Hierdoor wordt windenergie overgedragen en in het water worden golven opgewekt. De golfhoogte en -periode zijn afhankelijk van de windsnelheid, de strijklengte, de waterdiepte en de tijdsduur van de wind. Uit observatie is gebleken dat de golfhoogte en -periode onder invloed van een stationair, uniform windveld in een bepaalde tijdsduur groeien naar een bepaalde, constante waarde. Na deze periode is sprake van een stationair golfbeeld. De golfhoogte en -periode veranderen niet meer in de tijd en het golfveld is 'volledig ontwikkeld'. De tijdsduur voor een volledig ontwikkeld golfveld is ongeveer gelijk aan de tijd die nodig is voor een golf om de strijklengte af te leggen.

Svendrup, Munk en Bretschneider (1957) hebben uit observaties voor een standaardwindveld relaties afgeleid voor de golfparameters H (golfhoogte) en T (golfperiode) onder invloed van de windparameter U_{10} (windsnelheid op 10 meter boven het wateroppervlak), F (strijklengte) en d (waterdiepte). De uitdrukkingen zijn gegeven in dimensieloze vorm. De gevonden uitdrukkingen zijn voor de golfhoogte en -periode (**Appendix D.1**).

Aan de hand van gegeven golfhoogte, -periode en waterdiepte kan met behulp van de lineaire golftheorie een benadering gegeven worden voor de optredende horizontale en verticale versnelling en snelheid aan de bodem en het oppervlak.

• Waterbeweging

In de Nieuwe Merwede zijn de afmetingen van de strijklengte voor de verschillende morfologische eenheden verschillend. In **Tabel 4-3** is een schatting gemaakt voor de diepte en de strijklengte. Vervolgens is bij Beaufort 7 ($U_{10} = 54$ km/uur) de golfhoogte en -periode berekend. Ook is aangegeven in welk tijdsbestek de volledig ontwikkelde situatie optreedt.

Morfologische eenheid	Diepte h (m)	Strijklengte F (m)	Golfhoogte (m)	Golfperiode (s)	T_{vol} (min)	H/gT^2 (-)	h/gT^2 (-)	kh (-)
Kribvak	0.5	250	0.16	0.69	4	0.03	0.11	4.19
Bank	2.5	2500	0.46	1.23	22	0.03	0.17	6.64
Geul	7.5	5000	0.71	1.53	35	0.03	0.33	12.89

Tabel 4-3 Invloed van windgolven

Uit de berekende golfhoogten en -perioden blijkt dat de lineaire golftheorie ($H/gT^2 < 0.001$ en $h/gT^2 > 0.05$) niet direkt kan worden toegepast vanwege de te grote steilheid van de golven. Verder blijkt uit het golfgetal kh dat voor iedere eenheid de diep-waterbenadering kan worden toegepast.

De maximale golfsteilheid H/L op diepwater is 0.142 ($H/gT^2 = 0.023$). De berekende golfhoogten kunnen dus niet optreden, maar zullen breken bij H_{max} . Tenslotte blijkt dat de tijdsduur voor het bereiken van een volledig ontwikkelde situatie kort is ten opzichte van veranderende weersituaties. De aanname van een volgroeide situatie is voor deze situatie terecht.

Als grens voor de toepassing van de diepwaterbenadering kan worden afgeleid dat geldt (**Appendix D.2**):

$$\frac{\tilde{d}}{\tilde{T}_\infty^2} \frac{1}{\tanh^2[k_2 \tilde{F}^{m_2}]} > \frac{3}{4\pi^2} \quad (4.5)$$

Geconcludeerd kan worden dat bij relatief grote verhouding van $\frac{\tilde{d}}{\tilde{F}}$ de diepwaterbenadering toegepast kan worden.

Voor de berekening van de snelheden aan de bodem en aan het oppervlak is een hogere orde golftheorie nodig. Het blijkt echter dat de afwijking van de snelheden ten opzichte van de lineaire golftheorie het grootst is nabij het oppervlak. Bij de bodem blijkt de lineaire golftheorie vrij goed te voldoen. Voor diepwater kan de horizontale snelheidsamplitude eenvoudig uitgedrukt worden in de fetchlengte, de windsnelheid en de golfperiode (**Appendix D.3**):

$$\frac{u(z = -h)}{U_{10}} = \frac{\tilde{T}_\infty \tanh[k_2 \tilde{F}^{m_2}]}{14} \frac{1}{\sinh \left[\frac{4\pi^2 \tilde{h}}{\tilde{T}_\infty^2 \tanh^2[k_2 \tilde{F}^{m_2}]} \right]} \quad (4.6)$$

In **Tabel 4-4** zijn de amplitude van de snelheden met behulp van de lineaire golftheorie berekend voor de morfologische eenheden. De maximale golfhoogte is berekend aan de hand van het diepwater-brekingscriterium en de golfperiode.

Morfologische eenheid	h (m)	T (s)	H _{max} (m)	L ₀ (m)	kh (-)	u(z = -h) (m/s)	u(z = 0) (m/s)	w(z = -h) (m/s)	w(z = 0) (m/s)
Kribvak	0.5	0.69	0.11	0.75	4.19	0.015	0.50	0	0.50
Bank	2.5	1.23	0.34	2.37	6.64	0.002	0.87	0	0.87
Geul	7.5	1.53	0.53	3.66	12.89	0.000	1.09	0	1.09

Tabel 4-4 Snelheidsamplitude aan de bodem

Geconcludeerd kan worden dat onder deze (extreme) omstandigheden de invloed van de windgolven op de bodem het grootst is in de kribvakken. De maximale snelheidsamplitude bij de bodem ligt in de orde van 1.5 cm/s.

Aangezien de kritische, diepte-gemiddelde sedimentatiesnelheid voor slib ongeveer 0.15 m/s is, is de schuifspanningsnelheid u_* (Chézy-coëfficiënt $C = 55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) ongeveer 0.8 cm/s. Voor de kribvakken en de banken zullen windgolven sedimentatie van slib zeker kunnen verhinderen. De kritische erosie-snelheid ligt in de orde van een 0.35 m/s. De kritische schuifspanning is dus ongeveer 0.02 m/s. Hieruit blijkt dat onder deze omstandigheden windgolven waarschijnlijk geen erosie kunnen veroorzaken in de kribvakken. Op de banken en in de geul spelen windgolven zeker geen rol van betekenis.

Voor zand (300 μ m) is de kritische erosie- en sedimentatiesnelheid ongeveer 0.4 m/s. Windgolven zullen het erosie- en sedimentatieproces niet beïnvloeden.

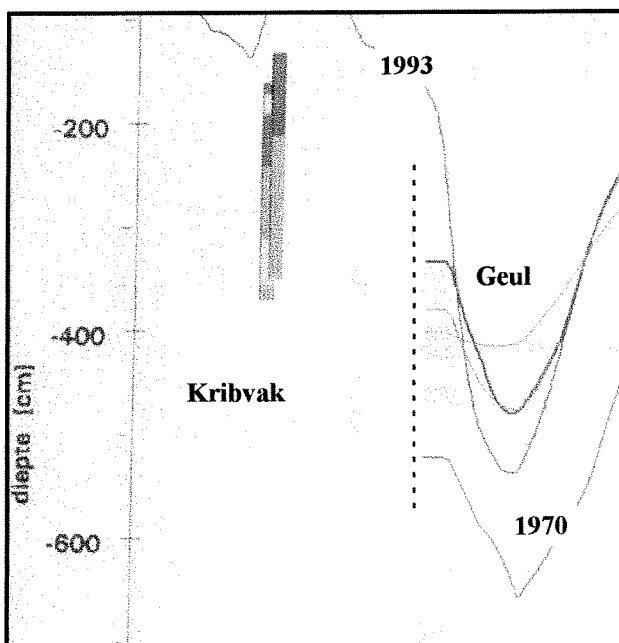
4.3 Randvoorwaarden waterbeweging

4.3.1 Bodemtopografie

Voor de Nieuwe Merwede zijn lodingen van 1970 beschikbaar (**Appendix B.1**). Deze lodingen zijn uitgevoerd in de geul. Voor de kribvakken bestaan geen gegevens van dit jaar. In 1993 zijn gegevens beschikbaar voor zowel de geulen als de kribvakken (**Appendix B.2**). Naast de lodingen in de geul zijn aparte metingen verricht om de diepte in de kribvakken te bepalen. Deze metingen en lodingen zijn gebruikt voor de bodemschematisatie van de Nieuwe Merwede.

Om berekeningen mogelijk te maken voor 1970 is ervoor gekozen eerst met behulp van de lodingen van 1970 de diepte op zoveel mogelijk punten van het rooster te bepalen. Voor de ontbrekende punten zijn vervolgens de gegevens gebruikt van 1993. Deze ontbrekende punten liggen hoofdzakelijk aan de randen van de geul en in de kribvakken. Ongeveer 17% van de bodemschematisatie van 1970 is opgevuld met deze gegevens.

Uit de lodingen zou geconcludeerd kunnen worden dat toch veel sedimentatie is opgetreden in de kribvakken. In **Figuur 4-1** is een voorbeeld opgenomen van een dwarsraai met lodingen en boringen van verschillende jaren.



Figuur 4-1 Dwarsraai

Bij het kribvak houden de lodingen van 1970 op. Aangezien de bodem van 1970 op de rand van het kribvak drie meter lager ligt, is het voorstelbaar dat ook in het kribvak (enige) sedimentatie is opgetreden. Een belangrijk gevolg hiervan zou kunnen zijn dat minder berging optreedt in de kribvakken. De gemodelleerde snelheden in de geul zullen hierdoor

worden. Daarnaast vindt minder uitwisseling van impuls plaats, omdat de diepte kleiner is. Hierdoor zullen de gemodelleerde snelheden in de geul ook groter worden.

4.3.2 Randvoorwaarden 2DH-model

Voor de 2DH-waterbewegingsberekeningen bij de representatieve afvoeren zijn twee randvoorwaarden nodig, één aan de bovenstreamse en één aan de benedenstreamse zijde. Aan de bovenstreamse zijde is gekozen voor het opleggen van een debiet (Werkendam), aan de benedenstreamse zijde voor het opleggen van een waterstand (Anna Jacominaplaat).

Om de randvoorwaarden voor de 2DH-waterbewegingsberekeningen te bepalen, zijn berekeningen gemaakt met het operationele 1D-model voor het Noordelijk Deltabekken van het RIZA. Voor dit model zijn twee schematisaties beschikbaar en afgeregeld op metingen, de 1D-schematisatie van 1976 en van 1993. Voor de waterbewegingsberekening van 1970 is ervoor gekozen de 1D-schematisatie van 1976 te gebruiken. Aangezien de grootste morfologische veranderingen hebben plaatsgevonden in de periode 1970-1976, zullen de randvoorwaarden voor de 2DH-berekeningen van 1970 minder betrouwbaar zijn dan de randvoorwaarden voor 1993. De opzet en resultaten van deze 1D-berekeningen voor 1993 en voor 1970 zijn gegeven in **Appendix E**.

De waterstandsrand uit het 1D-model kan direct worden toegepast in het 2DH-model. Het debiet echter moet verdeeld worden over de verschillende vakken in dwarsrichting. Voor de verdeling van het debiet over de verschillende vakken is aangenomen dat er geen snelheidscomponent in dwarsrichting is en dat de Manning-coëfficiënt voor alle vakken gelijk is. Het debiet in elke cel is dan:

$$Q_i = \frac{B_i H_i^{\frac{5}{3}}}{\sum_{j=1}^N B_j H_j^{\frac{5}{3}}} Q_{tot} \quad (4.7)$$

waarin:

B_i = breedte van cel [m]

H = waterdiepte van cel [m]

N = aantal cellen in dwarsrichting [-]

i, j = celnummer [-]

Q_i = debiet door cel i [m^3/s]

Q_{tot} = totaal debiet door dwarsdoorgang [m^3/s]

De waterstand ter plaatse van de debietrand varieert tijdens de getijperiode. Aangezien deze variatie gering is ten opzichte van de diepte, is voor de waterdiepte de getij-gemiddelde waterstand genomen.

4.4 Sedimenttransport

4.4.1 2DH-vergelijking

De 2DH-vergelijking voor suspensietransport kan door integratie over de diepte uit de 3D-concentratievergelijking worden afgeleid:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} - \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x^{2D} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) - \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y^{2D} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) - \bar{f} = 0 \quad (4.8)$$

(1) (2) (3) (4) (5) (6)

waarin:

\bar{c} = diepte-gemiddelde concentratie [kg/m³]

H = waterdiepte [m]

\bar{u}, \bar{v} = diepte-gemiddelde snelheid in x- en y-richting [m/s]

D_x^{2D}, D_y^{2D} = dispersie-coëfficiënten in x- en y-richting [m²/s]

\bar{f} = bronterm [kg/(m³s)]

De verschillende termen zijn respectievelijk:

1. lokale term
2. advectione term in x-richting
3. advectione term in y-richting
4. dispersieve term in x-richting
5. dispersieve term in y-richting
6. bronterm

In de 2DH-vergelijkingen moeten de dispersie-coëfficiënten en de bronterm voorgeschreven worden. De bronterm is voor zand en slib verschillend. In de volgende paragrafen komen de dispersiecoëfficiënten en de brontermen achtereenvolgens aan de orde.

4.4.2 Dispersie-coëfficiënten

Theoretisch is voor de dispersie-coëfficiënten in rechte kanalen gevonden (Taylor (1954) en Elder(1959)):

$$\begin{aligned} D_x^{2D} &= \alpha_x u_* H \\ D_y^{2D} &= \alpha_y u_* H \end{aligned} \quad (4.9)$$

waarin:

$\alpha_x = 10$ [-]

$\alpha_y = 0.1$ à 0.2 [-]

H = waterdiepte [m]

u_* = schuifspanningssnelheid in x-richting [m/s]

In deze vergelijkingen is de x-richting parallel aan het kanaal en staat de y-richting loodrecht op het kanaal. In meanderende rivieren is de uitwisseling in langs- en dwarsrichting groter ten gevolge van secundaire stroming, onregelmatige diepte en de aanwezigheid van obstakels, bijvoorbeeld kribben. Voor meanderende rivieren met strekdammen geeft Van Rijn (1993) voor $\alpha_y = 0.2$ à 2 . In langsrichting is α_x veel groter dan 10, bijvoorbeeld 50. Hier wordt voor $\alpha_x = 50$ en voor $\alpha_y = 1.0$ aangehouden.

Voor de Nieuwe Merwede worden deze waarden aangehouden. De dispersie-coëfficiënt wordt berekend aan de hand van de diepte-gemiddelde snelheid. Omschrijven levert voor de dispersie-coëfficiënten:

$$D_x^{2D} = 50 \frac{\sqrt{g}}{C} \bar{u}H \approx 3\bar{u}H \quad (4.10)$$

$$D_y^{2D} = 1.0 \frac{\sqrt{g}}{C} \bar{u}H \approx 0.06\bar{u}H$$

Naast fysische oorzaken is de dispersie-coëfficiënt ook afhankelijk van de grootte van het rekenrooster. Het blijkt dat bij kleinere cellen deze coëfficiënt ook kleiner wordt. Bij een kleinere roosterafstand wordt de stroming beter gemodelleerd en wordt het dispersie-proces direct meegenomen. Aangezien in het model de roosterafstand in dwarsrichting 25 meter en in langsrichting 100 meter is, is het de vraag of het gebruik van bovenstaande aanpak correct is. Anderzijds blijkt uit schaalanalyse dat dispersie in langsrichting bijna verwaarloosd kan worden ten opzichte van advectie in langsrichting. Alleen in dwarsrichting zal dispersie een belangrijke rol spelen.

4.4.3 Bronterm zand

• Diepte-geïntegreerde methode van Gallapatti

Voor de beschrijving van de bronterm voor het diepte-geïntegreerd suspensietransport van zand wordt gebruik gemaakt van de methode van Gallapatti (Galappatti, 1983). Deze methode is direct gebaseerd op de advectie-diffusievergelijking inclusief de randvoorwaarde bij de bodem. Een introductie op deze methode is gegeven door Ribberink (Ribberink, 1986).

De volgende aannamen zijn gemaakt:

- uniforme, niet-stationaire waterbeweging
- concentratie uniform in x-richting, maar een functie van t en de verticale coördinaat z
- de parameter $\delta = H/(w_s T) \ll 1$

Voor de Nieuwe Merwede is de parameter δ veel kleiner dan 1. Bij een waterdiepte van $H = 5$ meter, een valsnelheid $w_s = 0.044$ m/s ($d_{50} = 300$ μm) en een getijperiode $T = 44700$ s. is $\delta \approx 0.003$. Onder deze aannamen kan worden afgeleid dat de diepte-gemiddelde concentratie $\bar{c}(t)$ geschreven kan worden als:

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \frac{1}{T_A} [\bar{c}_e(t) - \bar{c}(t)] \quad (4.11)$$

waarin:

$\bar{c}_e(t)$ = evenwichtsconcentratie [-]

$\bar{c}(t)$ = concentratie [-]

T_A = aanpassingstijd [s]

H = waterdiepte [m]

Het rechterdeel is de bronterm \bar{f} . Met deze term wordt de uitwisseling van sediment tussen de bodem en de waterkolom beschreven. Uit de vergelijking kan geconcludeerd worden dat wanneer de concentratie in de vertikaal lager is dan de diepte-gemiddelde evenwichtsconcentratie, erosie optreedt ($d\bar{c}/dt > 0$). In het geval dat de diepte-gemiddelde concentratie hoger is dan de diepte-gemiddelde evenwichtsconcentratie $\bar{c}_e(t)$, dan treedt sedimentatie op ($d\bar{c}/dt < 0$).

T_A geeft een karakteristieke tijdschaal voor de aanpassing van het concentratieprofiel. Afhankelijk van de randvoorwaarde aan de bodem ($z = z_b$) gelden voor T_A de volgende uitdrukkingen:

$$c(z = z_b) = c_e(z = z_b) \quad (4.12)$$

$$T_A = \frac{\gamma_1}{\gamma_0} \frac{H}{w_s}$$

$$\left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=z_b} = \left. \frac{\partial c_e}{\partial z} \right|_{z=z_b} \quad (4.13)$$

$$T_A = \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_0} \frac{H}{w_s}$$

Deze tijdschaal is naast de coëfficiënt evenredig met H/w_s . Dit laatste stelt de valtijd van een korrel over een diepte H . Hieruit blijkt dat bij relatief ondiepe gebieden en grote valsnelheden de aanpassingstijd kort is. In die gevallen is sprake van een directe aanpassing van de concentratie aan de stroming.

Uit onderzoek blijkt dat bovengenoemde aanpak ook toepasbaar is voor niet-uniforme stroming. Voor een gegeven concentratie bij de bodem ($z = z_b$) is de uitdrukking voor de diepte-gemiddelde concentratie $\bar{c}(t)$:

$$\frac{\gamma_{21}}{\gamma_0} \frac{H}{w_s} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\gamma_{22}}{\gamma_0} \frac{\bar{u}H}{w_s} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \frac{\gamma_{22}}{\gamma_0} \frac{\bar{v}H}{w_s} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \bar{c}_e(x, y, t) - \bar{c}(x, y, t) \quad (4.14)$$

De rechterterm stelt weer de bronterm voor. Voor de termen aan de linkerkant verschijnen nu twee verschillende coëfficiënten γ_{21} en γ_{22} . De coëfficiënt γ_{21} is gelijk aan γ_1 in de uniforme situatie. Het blijkt dat het verschil tussen γ_{21} en γ_{22} klein is (Gallapatti, 1983).

Daarnaast is het alleen mogelijk binnen DELWAQ de bronterm \bar{f} expliciet voor te schrijven. Het is niet mogelijk de andere termen van de advectie-diffusievergelijking aan te passen. Derhalve wordt in deze studie uitgegaan van de parameters die zijn afgeleid voor een uniforme, niet-stationaire situatie met een gradiënt-type randvoorwaarde aan de bodem.

De volledige beschrijving van de bronterm voor de uniforme, niet-stationaire situatie is:

$$\bar{f} = \frac{\gamma_0}{\gamma_1 + 1} \frac{w_s}{H} [\bar{c}_e - \bar{c}] \quad (4.15)$$

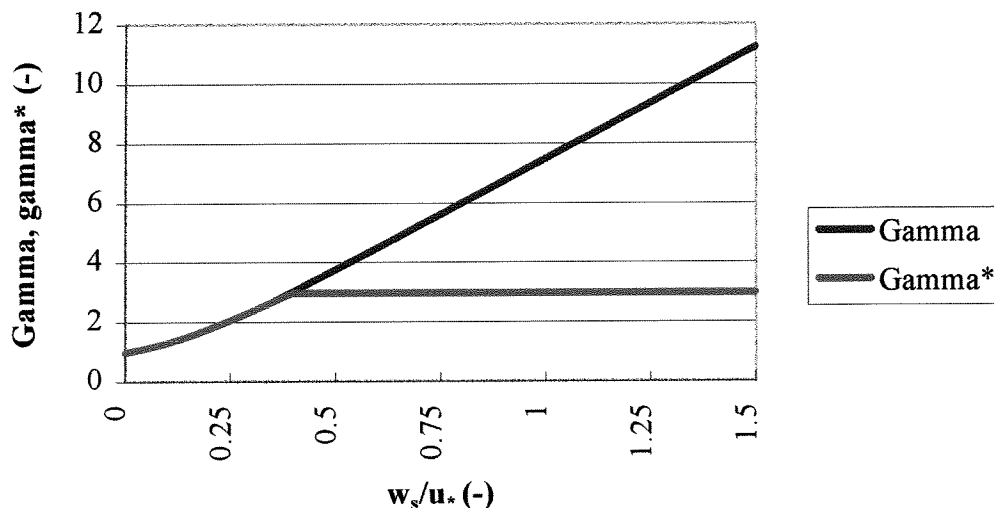
Achtereenvolgens komen aan de orde de coëfficiënt γ $\left(\gamma = \frac{\gamma_0}{\gamma_1 + 1} \right)$ voor de bronterm, de valsnelheid w_s en de diepte-gemiddelde evenwichtsconcentratie.

- **Coëfficiënt γ**

De coëfficiënten γ_0 en γ_1 zijn beide functies van w_s/u_* . Voor een constante diffusie-coëfficiënt ε_s zijn deze coëfficiënten analytisch bekend:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \frac{1}{\varepsilon^1(1-p)} \\ \gamma_1 &= \frac{\varepsilon^1(1-p^2) - 2p}{\varepsilon^1(1-p)^2} \\ \ln p &= \frac{-1}{\varepsilon^1} \\ \varepsilon^1 &= \beta \frac{u_*}{w_s} \end{aligned} \quad (4.16)$$

In **Figuur 4-2** is de coëfficiënt $\frac{\gamma_0}{\gamma_1 + 1}$ voor de bronterm \bar{f} als functie van w_s/u_* weergegeven.



Figuur 4-2 Coëfficiënt voor de bronterm \bar{f}

Voor grote waarden van w_s/u_* gaat de waarde naar oneindig. Dit betekent dat de aanpassingstijd T_A heel klein wordt. In het model zijn gebieden waar de totale snelheid U (en dus u_*) 0 kan worden. In de numerieke berekeningen leidt dit tot fouten. In het model is de coëfficiënt gemodelleerd volgens:

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{\gamma_1 + 1} \quad \text{voor } w_s/u_* < 0.4$$

$$\gamma = 3 \quad \text{voor } w_s/u_* > 0.4$$

Deze aanpassing is in de figuur aangeduid met γ^* .

- **Diepte-gemiddelde evenwichtsconcentratie \bar{c}_e**

De diepte-gemiddelde evenwichtsconcentratie kan berekend worden volgens de vereenvoudigde vergelijking van Van Rijn (aangeduid met $*$) en de vergelijking van Engelund-Hansen. De uitdrukkingen voor de diepte-gemiddelde evenwichtsconcentraties zijn als volgt:

Van Rijn*

Uit de vereenvoudigde vergelijking van Van Rijn kan de evenwichtsconcentratie worden afgeleid:

$$\bar{c}_e = 0.012\rho_s \left[\frac{\bar{u} - \bar{u}_{cr}}{((s-1)gd_{50})^{0.5}} \right]^{2.4} \frac{d_{50}}{h} \left(\frac{1}{D_*} \right)^{0.6} \quad (4.17)$$

$$D_* = d_{50} \left(\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\bar{u}_{cr} = 0.19(d_{50})^{0.1} \log \left(\frac{12H}{3d_{90}} \right)$$

waarin:

\bar{c}_e = evenwichtsconcentratie [kg/m³]

D_* = dimensieloze diameter [-]

s = relatieve dichtheid [= 1.65]

H = waterdiepte [m]

ρ_s = dichtheid zand [= 2650 kg/m³]

\bar{u} = diepte-gemiddelde stroomsnelheid [m/s]

ν = kinematische viscositeit [m²/s]

Voor de verhouding d_{90}/d_{50} is 1.5 aangehouden op basis van metingen in de Nieuwe Merwede.

Engelund-Hansen

De evenwichtsconcentratie op basis van de vergelijking van Engelund-Hansen ziet er als volgt uit:

$$\bar{c}_e = \frac{0.05\rho_s}{\Delta^2 C^3 \sqrt{g d_{50} h}} \bar{u}^4 \quad (4.18)$$

waarin:

\bar{c}_e = evenwichtsconcentratie [kg/m³]

Δ = relatieve dichtheid [-]

g = gravitatieversnelling [m/s²]

d_{50} = mediaan korreldiameter [m]

\bar{u} = diepte-gemiddelde snelheid [m/s]

C = Chézy-coëfficiënt [m^{1/2}/s]

- **Valsnelheid**

De valsnelheid w_s van een sedimentdeeltje in niet-stromend water kan voor zand ($100 < d < 1000 \mu m$) benaderd worden met de volgende formule (Van Rijn, 1993):

$$w_s = \frac{10\nu}{d} \left[\left(1 + \frac{0.01(s-1)gd^3}{18\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad (4.19)$$

waarin:

d = korreldiameter [m]

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} [=2.65]$$

ρ_s = dichtheid sediment [kg/m^3]

ρ = dichtheid water [kg/m^3]

ν = kinematische viscositeit water [m^2/s]

- **Bodemdichtheid**

Voor de bodemdichtheid van een zandbodem is gekozen voor $\rho_s = 1600 \text{ kg/m}^3$. Dit heeft geen consequenties voor de resultaten.

4.4.4 Bronterm slib

De bronterm \bar{f} voor het slibtransport bestaat uit twee delen, de erosie-term E en de sedimentatie-term D .

$$\bar{f} = \frac{1}{H} (E - D) \quad (4.20)$$

waarin:

\bar{f} = bronterm [$kg/(m^3s)$]

E = erosie-term [$kg/(m^2s)$]

D = sedimentatie-term [$kg/(m^2s)$]

H = waterdiepte [m]

• **Erosieterm E**

In de meeste slibmodellen wordt voor erosie de vergelijking van Partheniades toegepast.

$$\begin{aligned}
 E &= 0 & \tau_b &\leq \tau_e \\
 E &= M \left[\frac{\tau_b - \tau_e}{\tau_e} \right] & \tau_b &> \tau_e
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

waarin:

E = de erosie [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

M = erosieparameter [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

τ_e = kritische schuifspanning voor erosie [N/m^2]

τ_b = optredende schuifspanning [N/m^2]

• **Sedimentatieterm D**

Voor sedimentatie wordt gebruik gemaakt van de formulering van Krone voor concentraties kleiner dan 300 mg/l. Uit metingen blijkt dat onder alle afvoeren de concentratie slib lager is.

De formulering van Krone is als volgt:

$$\begin{aligned}
 D &= 0 & \tau_b &\geq \tau_d \\
 D &= \left[1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right] c w_s & \tau_b &< \tau_d
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

waarin:

D = depositie [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]

c = concentratie [kg/m^3]

w_s = valsnelheid [m/s]

τ_b = bodemschuifspanning [N/m^2]

τ_d = kritische bodemschuifspanning voor sedimentatie [N/m^2]

Uit bovenstaande vergelijking blijkt dat alleen sedimentatie optreedt als de bodemschuifspanning τ_b kleiner is dan de kritische bodemschuifspanning τ_d .

Vier parameters moeten ingesteld worden, te weten de valsnelheid w_s , de kritieke bodemschuifspanning voor sedimentatie τ_d , de kritische bodemschuifspanning voor erosie τ_e en de erosieparameter M .

Valsnelheid

Voor de valsnelheid is gebruik gemaakt van metingen op de Nieuwe Merwede. Daaruit bleek dat de valsnelheid ongeveer gelijk is aan $w_s = 0,5 \text{ mm}/\text{s}$.

Kritische erosieschuifspanning

Voor de kritische erosieschuifspanning wordt gebruik gemaakt van de literatuurwaarden voor de Maas. Daar bleek dat 1 dag na sedimentatie de kritische, diepte-gemiddelde erosiesnelheid ongeveer 0,35 m/s was (Van Rijn, 1993). Ook in andere gebieden is dit gemeten en dit komt overeen met los gepakt slib. De bijbehorende kritische erosieschuifspanning is (Chézy-coëfficiënt = 55 m^{1/2}/s) ongeveer 0,4 N/m².

Kritische sedimentatieschuifspanning

Ook voor de kritische sedimentatieschuifspanning wordt gebruik gemaakt van de literatuurwaarden voor de Maas (Van Rijn, 1993). De kritische, diepte-gemiddelde snelheid is ongeveer 0,15 m/s. Dit komt ongeveer overeen met een kritische sedimentatieschuifspanning van 0,07 N/m².

Erosieparameter

Voor de erosieparameter M is een arbitraire waarde gekozen van $1 \cdot 10^{-4}$ kg/(m²s), tussen de uitersten $1 \cdot 10^{-5}$ en $1 \cdot 10^{-3}$ kg/(m²s).

Bodemdichtheid

Voor de bodemdichtheid van een slibbodem is gekozen voor $\rho = 300$ kg/m³ (Van Rijn, 1993). Dit heeft geen consequenties voor de resultaten.

4.5 Sedimentrandvoorwaarden

Voor de Nieuwe Merwede is alleen aan de bovenstroomse rand een randvoorwaarde nodig voor de berekening van suspensief materiaal. De benedenrand is onder alle afvoeren een uitstroomrand en op deze rand wordt een zwakke randvoorwaarde opgelegd. Daarmee wordt bedoeld dat geen dispersie optreedt over de benedenstroomse rand $\left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = 0\right)$. Bij de bovenrand moet een concentratie opgelegd worden. In deze paragraaf is uiteengezet hoe de randvoorwaarde voor zand en slib onder de verschillende afvoeren bepaald is.

4.5.1 Zandrandvoorwaarde

Op de bovenrand wordt uitgegaan van een evenwichtsconcentratie. Deze evenwichtsconcentratie wordt gebruikt bij calibratie van het zandtransport. Aangezien het telkens opnieuw bepalen van de randconcentratie een tijdrovende aangelegenheid is, wordt voor de overige berekeningen niet de precieze evenwichtsconcentratie op de rand als randvoorwaarde gebruikt.

Een karakteristieke lengteschaal voor het aanpassingsproces van de zandconcentratie wordt gegeven door:

$$L = \frac{\bar{u}h}{w_s} \quad (4.23)$$

waarin:

L = aanpassingslengte [m]

h = waterdiepte [m]

w_s = valsnelheid [m/s]

\bar{u} = diepte-gemiddelde stroomsnelheid [m/s]

Deze lengteschaal kan gezien worden als een lengte waarin een sedimentdeeltje vanaf de waterspiegel naar de bodem valt bij een diepte-gemiddelde stroomsnelheid \bar{u} . De grootste aanpassingslengte wordt gevonden bij hoge afvoeren. Dan is zowel de diepte als de diepte-gemiddelde snelheid groter dan bij lage afvoeren. Bij 6000 m³/s is sprake van diepte-gemiddelde snelheid van ongeveer 1 m/s en een diepte van 7 meter. De aanpassingslengte bedraagt dan ongeveer 140 meter. De vaklengte aan de bovenstroomse zijde is ongeveer 70 meter.

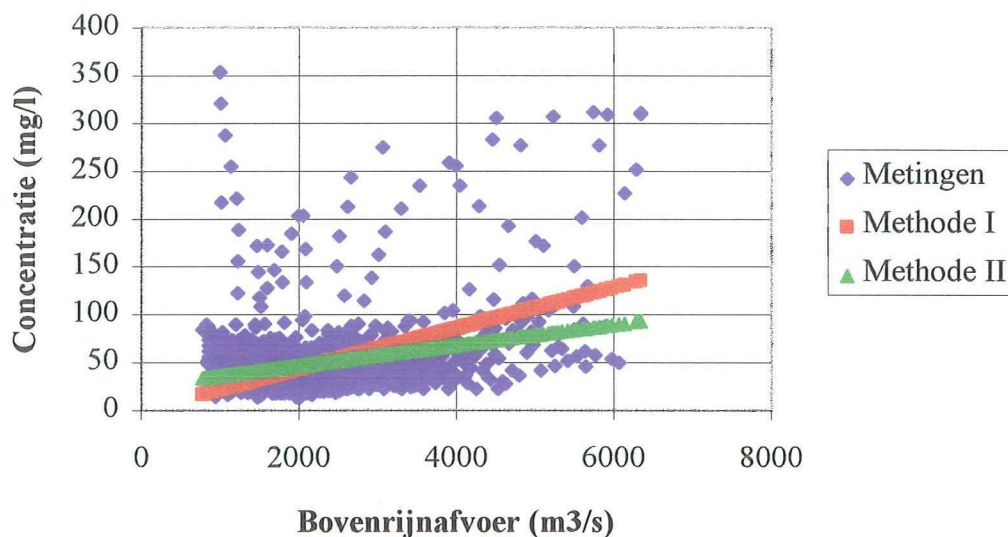
Geconcludeerd kan worden dat (maximaal) binnen drie vakken de invloed van de randvoorwaarde verdwenen is. Op de rand hoeft dus niet de precieze evenwichtsconcentratie opgelegd te worden. Dit houdt wel in dat de resultaten in deze eerste drie vakken geen juiste voorstelling opleveren.

4.5.2 Slibrandvoorwaarde

De randvoorwaarde voor het slibtransport is bepaald aan de hand van de dagelijks gemeten zwevende stof concentratie bij Lobith. Naast deze dagelijkse meting wordt ongeveer een keer per maand een korrelgrootteverdeling bepaald van het monster. Over het algemeen wordt ervan uitgegaan dat tussen Lobith en Vuren (km 955) geen sedimentatie van slib (< 63 µ) optreedt. Tevens wordt aangenomen dat slib zich evenredig met de afvoer verdeeld over de splitsingspunten. De concentratie slib voor en na een splitsingspunt blijft onder deze aanname gelijk.

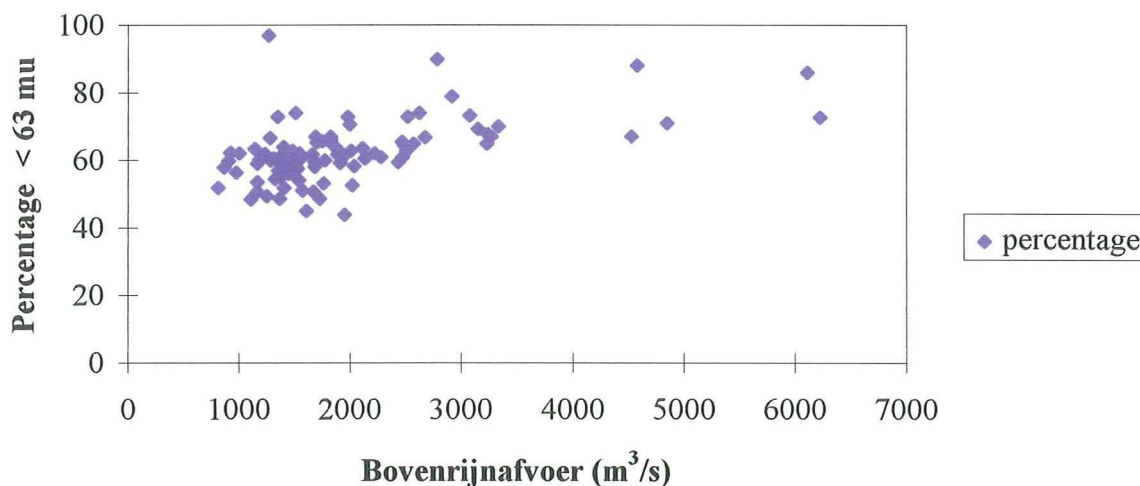
Op basis van de gemeten zwevende stofconcentraties (1970-1993) bij Lobith is met behulp van lineaire interpolatie een relatie gelegd tussen de Bovenrijnafvoer en de concentratie zwevende stof (C_{tot}). Hierbij zijn de twee mogelijke methoden gehanteerd. Bij Methode I is bij een Bovenrijnafvoer van 0 m³/s de concentratie ook gelijk aan 0. Bij Methode II is de concentratie bij die afvoer ongelijk aan 0.

Om een afweging tussen beide te maken is geïnterpoleerd voor de periode 1973 - 1978 omdat in deze periode ook metingen zijn verricht op de Nieuwe Merwede (3.3.2). In **Figuur 4-3** zijn de metingen en de resultaten van de beide interpolatiemethoden weergegeven.



Figuur 4-3 Concentratie vs. Bovenrijnafvoer Lobith (1973 - 1978)

Vervolgens is een relatie gelegd tussen het percentage $< 50 \mu\text{m}$ en de Bovenrijnafvoer, omdat deze fractie ook gemeten is in de periode 1973 - 1978. Deze relatie is gebaseerd op een maandelijks meetreeks vanaf 1988 - 1993. In **Figuur 4-4** zijn de metingen weergegeven.



Figuur 4-4 Percentage $< 63 \mu\text{m}$ vs. Bovenrijnafvoer

Aangenomen wordt dat onder alle afvoeren ongeveer 60% (gemiddeld percentage) van de gemeten zwevende stof concentratie kleiner is dan $50 \mu\text{m}$. Het blijkt overigens dat de fractie $< 63 \mu\text{m}$ ongeveer 62% van de totale zwevende stof concentratie is onder alle afvoeren.

In **Tabel 4-5** is voor vier karakteristieke afvoeren de totale zwevende stofconcentratie en de slibconcentratie ($< 50 \mu\text{m}$) weergegeven voor beide interpolatieprocedures:

Bovenrijnafvoer	Methode I ($Q_{br} = 0; c = 0$)		Methode II ($Q_{br} = 0; c \neq 0$)	
	Zwevende	Slibconcentratie	Zwevende	Slibconcentratie
1200	26	15	39	23
2200	47	28	49	30
3000	64	38	58	35
6000	128	77	90	54

Tabel 4-5 Zwevende stofconcentratie

De variatie in de slibconcentratie bij Methode I is veel groter dan bij Methode II. Na vergelijking met de meetresultaten (**Tabel 3-7**) blijkt dat vooral bij lage afvoeren Methode I te lage slibconcentraties geeft. Gekozen wordt voor Methode II.

Op basis van methode II is de relatie tussen de slibconcentratie en de Bovenrijnafvoer dan als volgt:

$$C_{slib} = \beta(\alpha Q_{br} + \gamma) \quad (4.24)$$

waarin:

C_{slib} = slibconcentratie [kg/m^3]

α = coëfficiënt [= $1.063 \cdot 10^{-5} \text{ kgs}/\text{m}^6$]

γ = coëfficiënt [= $26 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3$]

β = coëfficiënt voor percentage $< 63 \mu\text{m}$ [= 0.62]

Q_{br} = Bovenrijnafvoer [m^3/s]

5. Simulaties

5.1 Numerieke parameters

- **Waterbewegingsberekeningen**

Voor de 2DH-waterbewegings simulaties is gebruik gemaakt van WAQUA, het 2DH-waterbewegingsmodel van Rijkswaterstaat. Dit model lost de 2DH-vergelijkingen (4.1 en 4.2) op met behulp van een impliciet rekenschema. Hierdoor is voor stabiliteit geen eis aan de grootte van de rekenstap. Echter, het Courant-getal moet voldoende klein blijven om voldoende nauwkeurigheid te krijgen. Uit berekeningen blijkt dat een tijdstap van 2.5 minuut optimaal is (Wang, 1997). Omdat de resultaten nog gebruikt moeten worden voor sedimenttransportberekeningen is gekozen voor een tijdstap van 1 minuut. Deze rekenstap is aangehouden voor de simulaties. Bij deze tijdstap is het Courant-getal ongeveer 4.

- **Sedimenttransportberekeningen**

Voor de sedimenttransportberekeningen zijn aparte berekeningen gemaakt voor zand en slib met DELWAQ, het 2DH-sedimenttransportmodel van het RIZA. Dit model lost de 2DH-suspensievergelijking (4.3) op met behulp van een impliciet rekenschema. Ook hier is voor de stabiliteit geen eis aan de grootte van de rekenstap. Echter, de tijdstap voor de berekeningen moet kleiner zijn de getijperiode T en de tijdschaal H/w_s . Aangezien de diepte varieert is deze karakteristieke tijdschaal niet constant voor het modelgebied. Ook voor zand en slib is deze tijdschaal niet gelijk, aangezien de valsnelheid w_s verschillend is.

Bij een diepte van 5.0 meter (geul) is de tijdschaal voor zand 2 minuten, op ondiepe banken (1 meter) ongeveer 20 seconden. Sommige gedeelten vallen gedurende de getijperiode droog, hier is de minimale diepte 0.15 meter. Om de rekentijd te beperken, is gekozen voor een rekenstap van 30 seconden voor de zandberekeningen. Voor ondiepe gebieden is de valsnelheid zodanig aangepast dat de karakteristieke tijdschaal nooit groter werd dan de tijdstap. De inspeeltijd moet veel groter zijn dan de karakteristieke tijdschaal. Voor de inspeeltijd is gekozen voor 1 getijperiode (12 uur en 25 minuten).

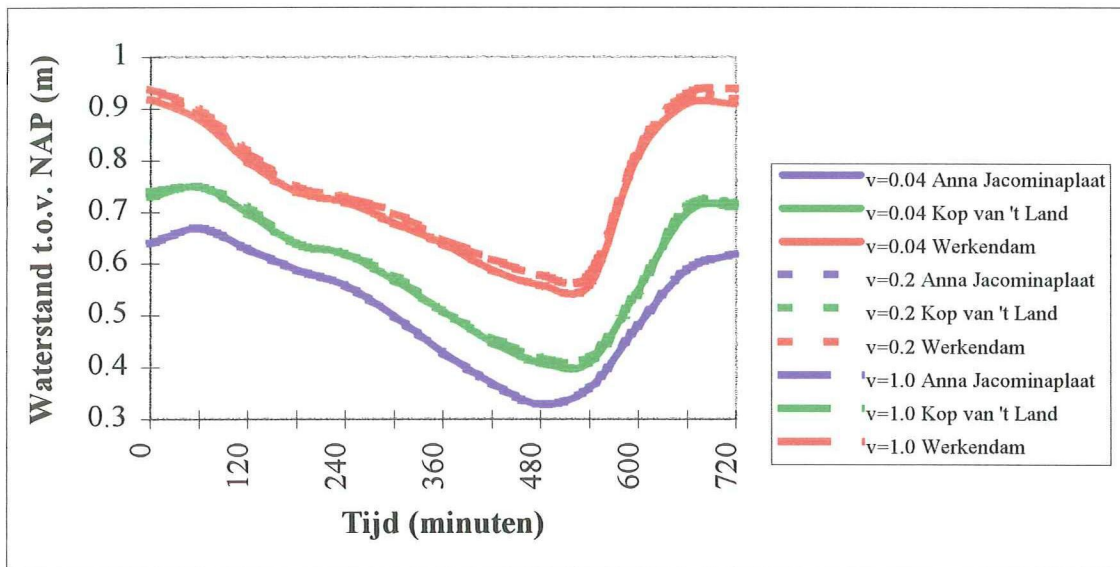
Aangezien de valsnelheid van slib veel kleiner is, mag de tijdstap veel groter zijn dan bij zand. Gekozen is voor 1 minuut. De karakteristieke tijdschaal in de geul is ongeveer 167 minuten. Ook hier is voor de inspeeltijd gekozen voor 1 getijperiode (12 uur en 25 minuten).

5.2 Gevoeligheidsonderzoek waterbeweging

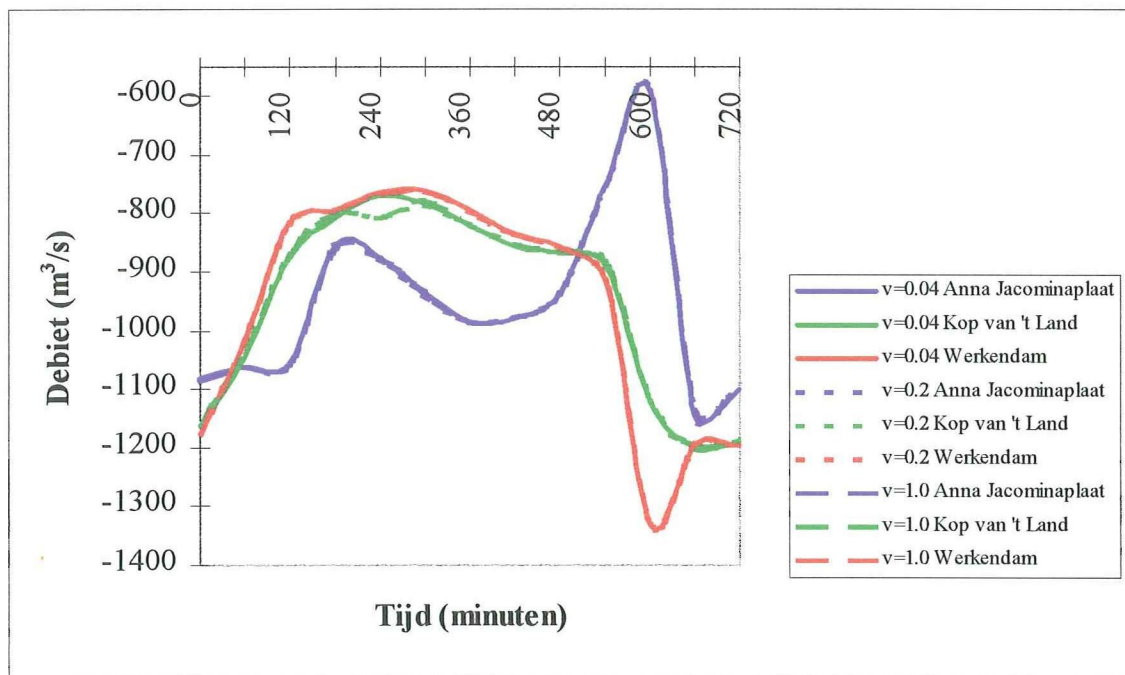
Door anderen (Wang, 1996) is het 2DH-model voor de Nieuwe Merwede al gebruikt en gecalibreerd. Derhalve is in dit onderzoek geen uitvoerig gevoeligheidsonderzoek gedaan naar de invloed van verschillende parameters. Er zijn alleen twee berekeningen uitgevoerd om een kwalitatief beeld te krijgen van de invloed van de bodemruwheid en de viscositeit. Voor 1993 is voor beide parameters bij een Bovenrijnafvoer van $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ de gevoeligheid van de resultaten onderzocht.

5.2.1 Viscositeit

De viscositeit is onderzocht door naast de standaardberekening met $v = 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ twee berekeningen uit te voeren met $v = 0.04 \text{ m}^2/\text{s}$ en $v = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$. In **Appendix F.1** is voor deze drie situaties het snelheidsprofiel bij gemiddelde afvoer weergegeven. Daarnaast is in **Figuur 5-1** en **Figuur 5-2** de waterstand en het debiet bij drie verschillende dwarsdoorsneden gegeven.



Figuur 5-1 Waterstanden bij verschillende viscositeit



Figuur 5-2 Debiet bij verschillende viscositeit

Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Variatie van de viscositeit heeft nauwelijks invloed op de snelheidsprofielen. Ook de debieten en de waterstanden zijn praktisch gelijk.
- De waterstanden verschillen aan de bovenstroomse zijde het meest. Dit wordt veroorzaakt door de constante waterstandsrand bij verschillende viscositeit aan de benedenstroomse zijde.
- Bij lagere viscositeit worden de waterstanden iets lager, bij een hogere viscositeit iets hoger. Dit komt omdat een hogere viscositeit meer uitwisseling van impuls veroorzaakt. Hierdoor zullen snelheidsverschillen tussen geul en banken/kribvakken meer worden vereffent. De stroomsnelheden in de geul worden hierdoor relatief lager en op de bank en de kribvakken juist hoger. Aan de benedenstroomse zijde is dit duidelijk te zien. Daar is de stroming bij lage viscositeit meer geconcentreerd in de geul. Door de afname van de stroomsnelheid in de geul en het gelijkblijvende debiet neemt de waterstand toe.

5.2.2 Ruwheid

Ook de ruwheid is onderzocht door naast de standaardberekening met $n = 0.023$ twee berekeningen met andere ruwheden uit te voeren. Van de Nieuwe Merwede is bekend dat in het bovenstroomse gedeelte zandduinen kunnen optreden, zelfs al bij gemiddelde afvoeren. Om een idee te krijgen van de invloed van deze zandduinen is geprobeerd een goede schatting te maken van de (hogere) Manning-coëfficiënt bij de aanwezigheid van duinen.

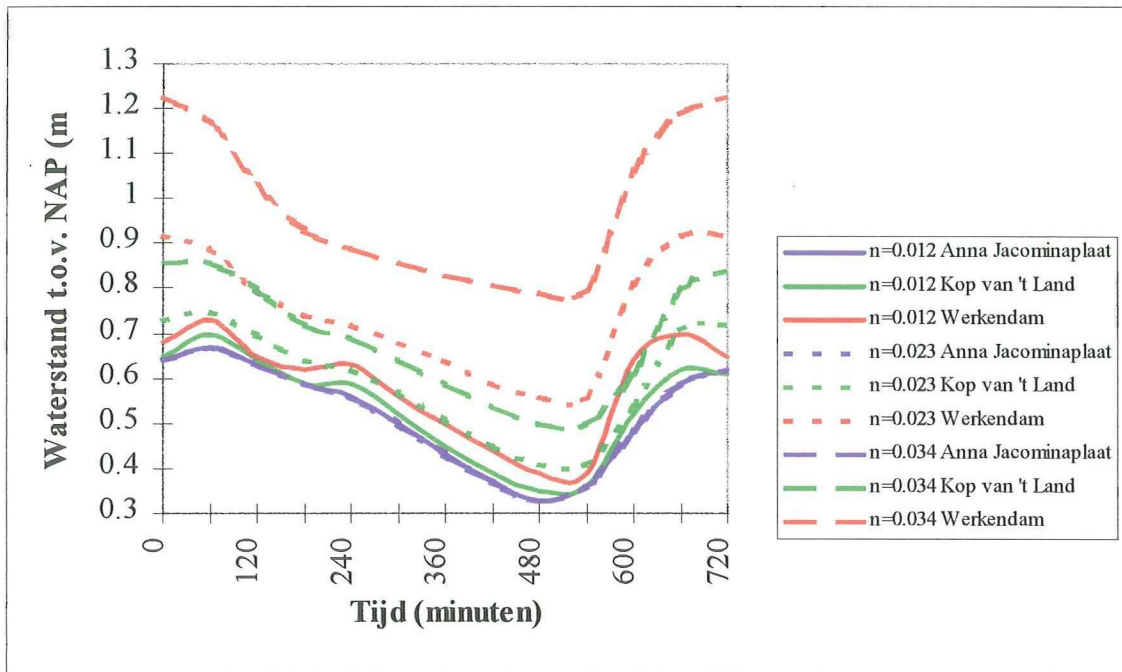
De hoogte van deze zandduinen is een belangrijke maat voor de ruwheid. Bij gemiddelde afvoer is de duinhoogte in de orde van 40 centimeter en de duinlengte ongeveer 20 meter. Bij deze afmetingen geeft Van Rijn voor de ruwheidsmaat $k_{s,d} \approx 0.12$ m. Ook ribbels zijn dan aanwezig. Uitgaande van $d_{50} = 300 \mu\text{m}$ is de ruwheidsmaat hiervan ongeveer $k_{s,r} \approx 0.06$ m (Van Rijn, 1993). De totale ruwheid $k_s \approx 0.18$ m. De relatie tussen de Manning-coëfficiënt en de effectieve ruwheid k_s is:

$$n = 0.045 k_s^{\frac{1}{6}}$$

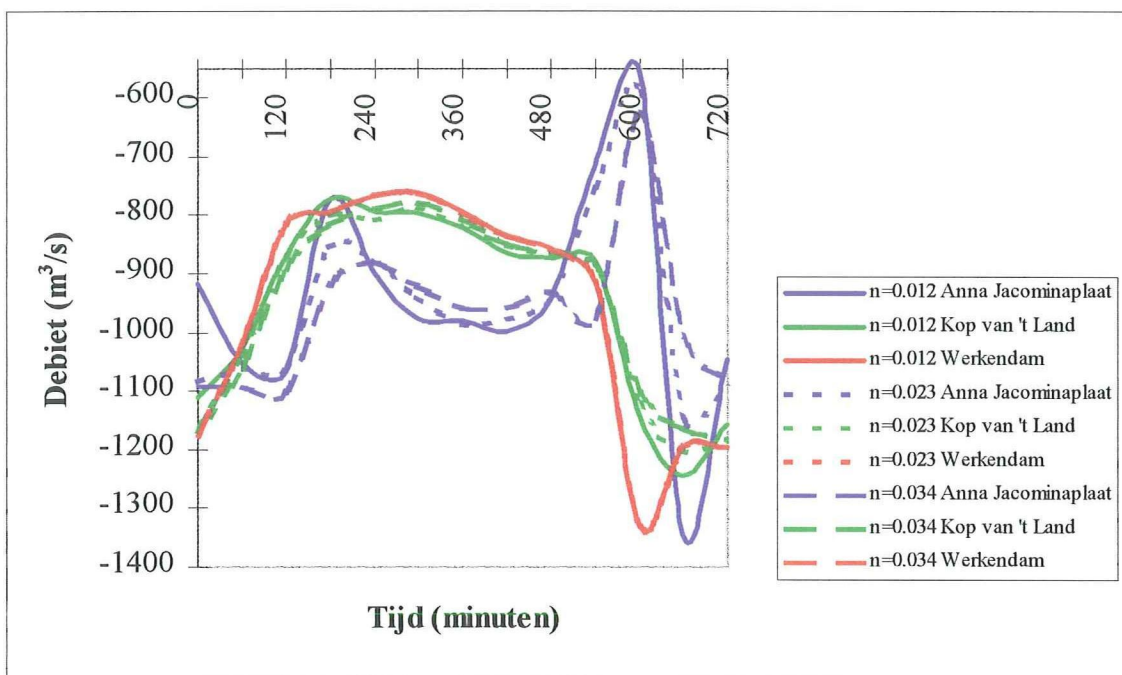
Dit levert bij aanwezigheid van zandduinen voor de Manning-coëfficiënt $n \approx 0.034$.

Tevens is een berekening uitgevoerd met een Manning-coëfficiënt $n = 0.012$ met een bijbehorende ruwheid $k_s \approx 0.004$ m. Bij deze ruwheidsmaat wordt de ruwheid alleen nog veroorzaakt door de korrels en niet meer door beddingvormen. De bodem bestaat dan uit fijn zand met een korreldiameter $d_{90} \approx 120 \mu\text{m}$.

In Appendix F.2 is bij de verschillende ruwheden het snelheidsprofiel weergegeven. Tevens is in **Figuur 5-3** en **Figuur 5-4** de waterstand en het debiet voor drie dwarsdoorsneden gegeven.



Figuur 5-3 Waterstand bij verschillende ruwheid



Figuur 5-4 Debiet bij verschillende ruwheid

Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Variatie in de ruwheid heeft nauwelijks invloed op de snelheidsprofielen.
- Bij verhoging van de ruwheid nemen de waterstanden aan de bovenstroomse zijde met ongeveer 30 centimeter toe. Aan de benedenstroomse zijde is dit effect veel minder omdat aan daar een vaste waterstand wordt opgelegd. Toename van de ruwheid verhoogt de weerstand die het water ondervindt. Hierdoor nemen de snelheden (licht) af en bij gelijkblijvend debiet nemen de waterstanden toe.
- De debieten door de dwarsdoorsneden veranderen nauwelijks.

Concluderend kan worden gesteld dat de ruwheid en de viscositeit nauwelijks invloed hebben op de berekende snelheidsprofielen. Alleen de waterstanden worden sterk beïnvloed bij variatie in de ruwheidsparameter. Het totale debiet door de dwarsdoorsnede wordt veel minder beïnvloed door de ruwheid. Voor de sedimenttransportberekeningen is verder onderzoek naar de ruwheid niet noodzakelijk.

5.3 Calibratie sedimenttransportmodel

5.3.1 Zandtransport

Het zandtransport wordt gecalibreerd aan de hand van de totale, jaarlijkse transport op de Nieuwe Merwede (3.3.1). Hierbij wordt uitgegaan van een totaal zandtransport van $0,43 \cdot 10^9$ kg/jaar (Van Dreumel, 1995), omdat dit transport bepaald is aan de hand van een lange termijn-beschouwing.

De korreldiameter is gebruikt voor calibratie. Op de Nieuwe Merwede komt zowel bodem- als suspensietransport voor. Echter, het aandeel van het suspensietransport is onbekend. Derhalve moet voor calibratie ook het bodemtransport meegenomen worden.

Op basis van de uitkomsten van de waterbeweging is voor de bovenstroomse rand voor ieder vak het (evenwichts-)bodem- en suspensietransport per getijperiode bepaald bij de vier representatieve Bovenrijnafvoeren. Toegepast zijn de formuleringen van Van Rijn, de vereenvoudigde formulering van Van Rijn en de vergelijking van Engelund-Hansen bij drie verschillende korreldiameters rond de gevonden d_{50} op de Nieuwe Merwede. Bij de bovenstroomse rand is de korreldiameter d_{50} ongeveer 400 μ m, verder benedenstrooms is dat ongeveer 300 μ m.

In **Tabel 5-1** zijn de resultaten voor $d_{50} = 300 \mu$ m weergegeven. De overige resultaten staan in **Appendix G.1**.

Q_{br} (m ³ /s)	Q_{nm} (m ³ /s)	Van Rijn		Van Rijn [*]		Engelund-Hansen [*]
		bodem (m ³)	suspensie (m ³)	bodem (m ³)	suspensie (m ³)	totaal (m ³)
1200	608	0.92	2.14	0.75	3.73	8.69
2200	944	5.3	16.64	4.89	24.64	32.74
3000	1269	21.07	79.13	22.14	112.33	100.53
6000	2469	240.38	1523.69	428.82	2705.66	1189.81

Tabel 5-1 Bodem- en suspensietransport per getijperiode

Omdat elke afvoer representatief is voor een afvoerinterval, kan vervolgens eenvoudig het jaarlijkse zandtransport berekend worden. In **Tabel 5-2** zijn de kansen van de verschillende afvoeren gegeven.

Ondergrens Q_o	Bovengrens Q_b (m^3/s)	Representatieve afvoer Q_{rep}	$P(Q_b)-P(Q_o)$
1040	1700	1200	0.423
1700	2600	2200	0.304
2600	4500	3000	0.217
4500	∞	6000	0.056

Tabel 5-2 Kansen representatieve afvoeren

De resultaten van het totale zandtransport op jaarbasis ($\cdot 10^9$ kg) voor de verschillende korreldiameters is als volgt (**Tabel 5-3**).

Korreldiameter	Van Rijn	Van Rijn*	Engelund-Hansen
200	0.38	0.52	0.29
300	0.24	0.40	0.19
400	0.21	0.30	0.14

Tabel 5-3 Jaarlijks zandtransport ($\cdot 10^9$ kg)

Uit de resultaten blijkt dat alleen de vereenvoudigde vergelijking van Van Rijn* het jaarlijks transport van $0.43 \cdot 10^9$ kg goed benadert bij $300 \mu m$. De vergelijking van Van Rijn geeft voor $d_{50} = 200 \mu m$ ook een redelijke benadering, de korreldiameter is echter wel twee keer zo klein als de metingen bij de bovenstroomse rand. Engelund-Hansen geeft een te lage schatting voor het totale jaarlijkse transport. Op basis van deze resultaten wordt gekozen voor de vereenvoudigde vergelijking van Van Rijn.

Vergeleken met de gemeten korreldiameter aan de bovenstroomse rand in de Nieuwe Merwede is een korreldiameter van $300 \mu m$ aan de lage kant. Echter, uit de literatuur blijkt dat vanwege het niet-uniforme karakter van het bodemmateriaal het materiaal in suspensie een kleinere korreldiameter heeft (Van Rijn, 1993). Globaal geldt voor de korreldiameter van het suspensietransport $d_s \approx 0.7 d_{50}$. Met een gevonden korreldiameter d_{50} van ongeveer $400 \mu m$ is het toepassen van $d_s = 300 \mu m$ voor het suspensietransport derhalve een goede benadering.

Naast calibratie kunnen nog twee belangrijke zaken uit de bovengenoemde resultaten afgeleid worden. Er kan een indruk verkregen worden van de verhouding tussen het suspensie- en het bodemtransport en het aandeel van een bepaalde afvoer in het totale jaarlijkse zandtransport kan bepaald worden.

- **Bodem- en suspensietransport**

In **Tabel 5-4** is het percentage suspensietransport bij verschillende afvoeren weergegeven ($d = 300 \mu\text{m}$):

Bovenrijnafvoer	Van Rijn	Van Rijn ^a
1200	70%	83%
2200	76%	83%
3000	79%	84%
6000	86%	86%

Tabel 5-4 Percentage suspensietransport

Hieruit blijkt dat het suspensietransport overheerst ten opzichte van het bodemtransport voor $d_{50} = 300 \mu\text{m}$. Het aandeel van het bodemtransport in het totale transport is veel kleiner en wordt in deze studie verder niet meegenomen.

De formulering van Van Rijn geeft een toename van het suspensietransport te zien bij hogere afvoeren (70-86%). Opvallend is dat de vereenvoudigde formulering van Van Rijn een vrijwel constant percentage suspensietransport (83-86%). Onderlinge vergelijking van beide (vereenvoudigde) vergelijkingen van Van Rijn levert:

$$\frac{q_{s,c}}{q_{s,c} + q_{b,c}} = \frac{1}{1 + 0.4167 \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0.2} D_*^{0.6}} \quad (5.1)$$

Aangezien d_{50} en D_* constant zijn is de verhouding alleen (licht) afhankelijk van de waterdiepte. De waterdiepte bij $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn respectievelijk 5.5 en 7.5 meter. De bovenstaande verhouding is voor beide afvoeren 83% en 84%. Voor hogere afvoeren is de waterdiepte groter en dit geeft dus iets meer suspensietransport.

Voor grotere korreldiameters is de fout met de vereenvoudigde vergelijkingen veel groter. Bij een korreldiameter van $400 \mu\text{m}$ varieert het percentage suspensief transport tussen de 48% ($Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$) en 80% ($Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$). De vereenvoudigde vergelijking geeft respectievelijk 80% en 81%.

- **Gewogen transport**

In **Tabel 5-5** is voor $d = 300 \mu\text{m}$ het totale transport op jaarbasis berekend voor de verschillende afvoeren. Tussen haakjes is aangegeven het aandeel van de afvoer in het totale, jaarlijkse zandtransport.

Bovenrijnafvoer	Van Rijn	Van Rijn ¹	Engelund-Hansen
1200	0.002 (1%)	0.004 (1%)	0.007 (4%)
2200	0.012 (5%)	0.017 (4%)	0.019 (10%)
3000	0.041 (17%)	0.054 (14%)	0.041 (21%)
6000	0.185 (77%)	0.328 (81%)	0.125 (85%)
Jaarlijks transport	0.24 (100%)	0.40 (100%)	0.19 (100%)

Tabel 5-5 Aandeel in het jaarlijks transport (10^9 kg)

Geconcludeerd kan worden dat de hoge afvoeren ($Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$) het overgrote deel van het totale jaarlijkse zandtransport bepalen.

5.3.2 Slibtransport

Bij het slibtransport moeten zowel de randvoorwaarde aan de bovenstroomse zijde als de parameters in het model gecalibreerd worden. Deze komen in achtereenvolgens aan de orde.

- **Bovenstroomse randvoorwaarde**

De bovenstroomse randvoorwaarde voor slib is gecalibreerd aan de hand van het jaarlijks slibtransport van $1.3 \cdot 10^9$ kg (3.3.2). De jaarlijkse slibvrucht op de Nieuwe Merwede $V_{slib, nm}$ kan op basis van de gegeven relaties in 4.5.2 berekend worden volgens:

$$V_{slib, nm} = \int_0^{1 \text{ jaar}} \int_A^\infty p_Q(Q_{br}) C_{slib}(Q_{br}) Q_{nm} dQ dt \quad (5.2)$$

waarin:

$p_Q(Q_{br})$ = kansdichtheidsfunctie van de Bovenrijnafvoer [s/m^3]

Q_{nm} = Afvoer Nieuwe Merwede [m^3/s]

Q_{br} = Bovenrijnafvoer [m^3/s]

C_{slib} = slibconcentratie [kg/m^3]

A = coëfficiënt [m^3/s]

B = coëfficiënt [m^3/s]

De uitwerking van bovenstaande uitdrukking staat in **Appendix G.2**. Het jaarlijks slibtransport is gegeven in **Tabel 5-6**:

Schattingsmethode	Jaarlijkse slibvracht
Maximum Likelihood	$1.04 \cdot 10^9$ kg/jaar
Methode der Momenten	$0.94 \cdot 10^9$ kg/jaar
Kleinste Kwardraten Methode	$0.94 \cdot 10^9$ kg/jaar

Tabel 5-6 Jaarlijkse slibvracht

Uit de gegevens van Van Dreumel blijkt dat de jaarlijkse slibvracht op de Nieuwe Merwede ongeveer $1.3 \cdot 10^9$ kg is. De bovenstaande benadering geeft een redelijke, maar te lage schatting voor de jaarlijkse slibvracht. Een keuze voor $\alpha = 1.455 \cdot 10^{-5}$ kgs/m⁶ en $\gamma = 32 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ geeft een betere benadering voor de slibvracht (**Appendix G.2**).

Voor de Nieuwe Merwede gelden op basis van bovenstaande overwegingen voor de verschillende afvoeren de volgende randconcentraties C_{slib} (**Tabel 5-7**). Tevens is aangegeven hoeveel sediment per getijperiode (S_{getij}) wordt aangeboden aan de bovenrand van de Nieuwe Merwede. Dit is berekend op basis van het getij-gemiddeld debiet dat wordt gebruikt als randvoorwaarde voor de waterbeweging en niet het debiet op basis van de lineaire relatie met de Bovenrijnafvoer. In de laatste kolom is het percentage aangegeven van het slibtransport op jaarbasis van de desbetreffende afvoer ten opzichte van het totale, jaarlijkse slibtransport.

Q_{br} [m ³ /s]	Q_{nm} [m ³ /s]	P [-]	C_{slib} [kg/m ³]	S_{getij} [10 ⁵ kg]	S_{jaar} [* 10 ⁹ kg]
1200	608	0.423	0.031	8.4	0.25 (19%)
2200	944	0.304	0.040	17	0.36 (27%)
3000	1269	0.217	0.047	27	0.41 (30%)
6000	2476	0.053	0.074	81	0.32 (24%)
				Totaal	1.34 (100%)

Tabel 5-7 Slibrandvoorwaarde Nieuwe Merwede

Uit de percentages in de laatste kolom kan geconcludeerd worden dat - in tegenstelling tot zand - geen duidelijke representatieve afvoer is aan te wijzen die het totale, jaarlijkse slibaanbod bepaalt.

• Parameters

Ook is calibratie nodig van vier slibparameters. Dat zijn de valsnelheid w_s , de kritische schuifspanning voor erosie τ_e , de kritische schuifspanning voor sedimentatie τ_d en de erosiesnelheid M . Voor calibratie is beschikbaar het jaarlijks slibtransport door de benedenstroomse rand. Van Dreumel geeft voor de periode 1971-1982 een afvoer van $1.00 \cdot 10^9$ kg/jaar en voor de periode 1982-1992 $1.29 \cdot 10^9$ kg/jaar.

Echter, in het slibmodel met een volledige slibbodem treedt op plaatsen waar in werkelijkheid waarschijnlijk geen slib aanwezig is (bijvoorbeeld in de geul) flinke sliberosie op. Hierdoor worden concentraties hoger dan in werkelijkheid en zal - wanneer de schuifspanning lager is dan de kritische sedimentatieschuifspanning - de sedimentatie veel groter zijn dan in werkelijkheid. De slibtransporten door de dwarsdoorsneden worden hierdoor niet goed gemodelleerd. Vanwege deze modelopzet is calibratie van de parameters moeilijk.

Uit de sedimentbalans van Van Dreumel (1995) blijkt dat in de periode 1970-1992 vooral sedimentatie belangrijk is geweest. Sliberosie heeft een minder belangrijke rol gespeeld. Uitgaande van een correct gemeten valsnelheid voor slib kan (waarschijnlijk) geconcludeerd worden dat de kritische sedimentatiesnelheid de belangrijkste parameter voor calibratie is. De gevonden waarden in de literatuur voor de erosieparameters worden zonder verdere calibratie toegepast (4.5.2).

Op basis van deze aannamen zijn voor calibratie alleen berekeningen uitgevoerd met het slibmodel bij verschillende kritische sedimentatiesnelheden voor 1993. Uit de literatuur was in een vergelijkbaar gebied voor de kritische, diepte-gemiddelde sedimentatiesnelheid gevonden 0.15 m/s. Er zijn derhalve voor 1993 berekeningen uitgevoerd met een kritische sedimentatiesnelheid van 0.075, 0.15 en 0.30 m/s.

In **Tabel 5-8** zijn de transporten door de verschillende dwarsdoorsneden bij een kritische sedimentatiesnelheid van 0.15 m/s gegeven voor 1993.

Bovenrijnafvoer	Slibberekening 1993 (*10 ³ kg/getijperiode)			
	km 961	km 968	km 973	km 979
1200	840	783	638	321
2200	1700	2750	2991	2643
3000	2700	8464	12325	12377
6000	8100	44084	84209	109388
Jaartransport (*10 ⁹ kg)	1.34			

Tabel 5-8 Slibtransport 1993

Omdat grote erosie optreedt bij hogere afvoeren kunnen de resultaten niet direct gebruikt worden voor calibratie. De berekende transporten zijn daarom bewerkt. Er is vanuit gegaan dat de Nieuwe Merwede zelf helemaal uit zand bestaat en dus geen slibbron kan zijn.

Bij een groter transport dan bij de voorgaande dwarsdoorsnede is blijkbaar veel slib geërodeerd uit de Nieuwe Merwede. In dat geval is het slibtransport aangehouden van de voorgaande doorsnede. Bij een lager transport door de dwarsdoorsnede is bekeken welk percentage slib van de voorgaande dwarsdoorsnede is gesedimenteerd. Vervolgens is dit percentage toegepast op het aangepaste slibtransport.

In **Tabel 5-9** zijn de resultaten van deze bewerking weergegeven. De hoeveelheid slib tussen haakjes is de hoeveelheid slib die sedimenteert in het traject voor de desbetreffende dwarsdoorsnede. Dus bijvoorbeeld bij $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ sedimenteert $33 \cdot 10^3 \text{ kg}$ per getijperiode in het traject km 961 - 968. In de laatste rij is ook het jaarlijks transport berekend.

Slibberekening 1993 (*10 ³ kg/getijperiode)				
Bovenrijnafvoer	km 961	km 968	km 973	km 979
1200	840	783 (+57)	638 (+145)	321 (+317)
2200	1700	1700	1700	1502 (+198)
3000	2700	2700	2700	2700
6000	8100	8100	8100	8100
Jaartransport (*10 ⁹ kg)	1.34	1.33	1.29	1.15

Tabel 5-9 Aangepaste resultaten slibtransport 1993

De aangepaste jaarlijkse transporten bij de andere kritische sedimentatiesnelheden zijn samengevat in **Tabel 5-10**.

Jaarlijks slibtransport 1993 (*10 ⁹ kg/jaar)				
$U_{cr,s}$	km 961	km 968	km 973	km 979
0.075	1.34	1.34	1.34	1.24
0.15	1.34	1.33	1.29	1.15
0.30	1.34	0.92	0.79	0.49

Tabel 5-10 Jaarlijks slibtransport bij verschillende kritische sedimentatiesnelheid

In het bovenstroomse gedeelte geeft de slibbalans van Van Dreumel voor de periode 1982-1992 een bijna evenwichtssituatie (**Tabel 3-8**) met een slibaanbod van $1,31 \cdot 10^9$ en een slibafvoer van $1,29 \cdot 10^9$ kg op jaarbasis.

Bij een kritische sedimentatiesnelheid van $U_{cr,s} = 0,15$ m/s is de afvoer van slib in het bovenstroomse gedeelte redelijk in overeenstemming met de waarde van Van Dreumel (1995). Bij een lagere kritische sedimentatiesnelheid treedt geen sedimentatie op, bij een hogere kritische sedimentatiesnelheid treedt in het bovenstroomse gedeelte waarschijnlijk te veel sedimentatie op.

Echter voor het benedenstroomse gedeelte klopt deze benadering niet. In de balans van Van Dreumel (1995) is sprake van een evenwichtssituatie, terwijl uit de modelresultaten volgt dat op dit gedeelte op jaarbasis nog steeds sedimentatie plaatsvindt. Om de modelresultaten op het benedenstroomse gedeelte in overeenstemming te brengen met de sedimentbalans zou de kritische sedimentatiesnelheid nog lager gekozen moeten worden.

Eenzijds ligt de oorzaak hiervan in de modelaanpak. Omdat alleen gekeken wordt naar sedimentatie wordt erosie van slib, met name onder hogere afvoeren, niet meegenomen. Dit zou het slibtransport op jaarbasis op evenwicht kunnen brengen. Anderzijds kan worden getwijfeld aan de juistheid van de balans van Van Dreumel (1995) voor het benedenstroomse traject in de periode 1981-1992 (**3.5**).

Vanwege de niet gevonden overeenstemming met de balans van Van Dreumel (1995) voor het benedenstroomse gedeelte is de berekening uitgevoerd voor 1970 ($U_{cr,s} = 0.15$ m/s). In **Tabel 5-11** zijn de resultaten weergegeven.

Bovenrijnafvoer	Slibberekening 1970 (*10 ³ kg/getijperiode)			
	km 961	km 968	km 973	km 979
1200	840	840	545 (+295)	133 (+412)
2200	1700	1700	1700	1235 (+465)
3000	2700	2700	2700	2542 (+158)
6000	8100	8100	8100	8100
Jaartransport (*10 ⁹ kg)	1.34	1.34	1.26	1.01

Tabel 5-11 Slibtransport 1970

De sedimentbalans geeft voor de periode 1971-1982 een slibafvoer aan de benedenstroomse rand van $1.0 \cdot 10^9$ kg/jaar. Geconcludeerd kan worden dat bij deze berekening de afvoer van slib veel meer in overeenstemming is met de sedimentbalans. Wel moet opgemerkt worden dat bij de modelresultaten alleen gekeken is naar sedimentatie, terwijl sliberosie onder hogere afvoeren zeker zou kunnen optreden.

Verder blijkt uit de modelresultaten van 1970 dat vooral sedimentatie optreedt in het laatste traject. Dit is ook gebleken uit concentratiemetingen in de periode 1973-1978. Er was sprake van een scherpe daling van de slibconcentratie net voor de benedenstroomse rand van de Nieuwe Merwede onder alle afvoeren.

Op basis van deze resultaten wordt gekozen voor een kritische sedimentatiesnelheid van 0.15 m/s.

5.4 Verificatie

Het model is geverifieerd aan de hand van lodinggegevens van 1993 en 1994 (**Appendix B4**). Uit de lodingen is berekend dat in de verschillende secties de volgende bodemveranderingen zijn opgetreden:

Sectie	Bodemverandering (cm)
961 - 968	+0.106
968 - 973	+0.054
973 - 979	+0.032

Tabel 5-12 Bodemveranderingen 1994-1993

De (aangepaste) modelresultaten voor het slibtransport door de verschillende dwarsdoorsneden zijn gegeven in **Tabel 5-9**. In **Tabel 5-12** zijn de modelresultaten van het zandtransport door de verschillende dwarsdoorsneden gegeven.

$d_{50} = 300 \mu\text{m}$	Zandtransport (Van Rijn ⁷)			
	Bovenrijnafvoer [m^3/s]	Bovenrand	[* $\text{m}^3/\text{getijperiode}$]	
km 968			km 973	km 979
1200	4	0	0	0
2200	25	0.6	0	0
3000	112	17	0.5	0
6000	2706	1455	837	149
Jaartransport (* 10^9 kg)	0.35	0.16	0.09	0.02

Tabel 5-13 Zandtransport 1993

Op basis van deze modelresultaten kan de gemiddelde bodemverandering bepaald worden per sectie. In **Tabel 5-14** is bij de verschillende afvoeren de grootte van de sedimentatie per getijperiode gegeven. De berekening is gebaseerd op de kansverdeling van de periode 1970-1992. Voor een geconsolideerde slibbodem is een dichtheid aangehouden van ongeveer 1300 kg/m^3 (Van Rijn, 1993). De lengte van elk traject is 6000 meter.

	Sedimentatie ($\text{m}^3/\text{getijperiode}$)					
	961-968		968-973		973-979	
	Zand	Slib	Zand	Slib	Zand	Slib
1200	+4	+44	0	+112	0	+244
2200	+24.4	0	+0.6	0	0	+152
3000	+95	0	+16.5	0	+0.5	0
6000	+1251	0	+618	0	+688	0
Sedimentatie (* $10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$)	+0.19	+0.01	+0.07	+0.03	+0.07	+0.11
Bodemverandering model (m/jaar)	+0.054	+0.006	+0.018	+0.014	+0.016	+0.037
Bodemverandering model (m/jaar)	+0.060		+0.032		+0.053	
Bodemverandering loding (m/jaar)	+0.106		+0.054		+0.032	

Tabel 5-14 Vergelijking lodingen vs. Modelresultaten

Het blijkt dat de tendens van de lodingen ook uit de modelresultaten volgt. Er is overal sprake van netto sedimentatie. Echter, de orde van grootte en de afname in benedenstroomse richting volgt niet uit het model.

Mogelijk is de aangenomen kansverdeling een oorzaak. Wanneer het jaar 1993 - 1994 wordt beschouwd kan geconcludeerd worden dat het een zeer nat jaar is geweest met een extreem hoge afvoeren ($Q_{br, \max} = 10\,940 \text{ m}^3/\text{s}$). De gemiddelde Bovenrijnafvoer was in deze periode $2844 \text{ m}^3/\text{s}$.

Uit de data van de Bovenrijnafvoeren is voor het jaar april 1993 tot april 1994 een nieuwe kansverdeling gemaakt. In **Tabel 5-15** zijn de kansen voor de afvoerintervallen voor de periode 1970- 1992 en voor 1993 - 1994 weergegeven.

Bovenrijnafvoer [m^3/s]	Kans 1970 - 1992	Kans 1993 - 1994
1200	0.423	0.242
2200	0.304	0.329
3000	0.217	0.300
6000	0.056	0.129

Tabel 5-15 Kansverdeling

Er is sprake van een duidelijke verschuiving naar de hogere afvoeren. De hoge afvoer van $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ heeft ongeveer 2.5 keer zoveel kansmassa. Op basis van deze kansverdeling zijn de bodemveranderingen uit de modelresultaten berekend. De resultaten zijn in **Tabel 5-16** weergegeven.

	961-968		968-973		973-979	
	Zand	Slib	Zand	Slib	Zand	Slib
1200	+4	+44	0	+112	0	+244
2200	+24.4	0	+0.6	0	0	+152
3000	+95	0	+16.5	0	+0.5	0
6000	+1251	0	+618	0	+688	0
Sedimentatie ($\cdot 10^6 \text{ m}^3$)	+0.37	+0.008	+0.16	+0.019	+0.17	+0.08
Bodemverandering model (m/jaar)	+0.108	+0.003	+0.04	+0.007	+0.037	+0.027
Bodemverandering model (m/jaar)	+0.111		+0.047		+0.064	
Bodemverandering loding (m/jaar)	+0.106		+0.054		+0.032	

Tabel 5-16 Vergelijking lodingen vs. Modelresultaten

De nieuwe resultaten sluiten beter aan bij de lodingen, zeker in de eerste twee secties. Voor het benedenstroomse traject is de gemodelleerde bodemverandering te groot. Dit wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt doordat alleen gekeken is naar slibsedimentatie. Deze slibsedimentatie draagt voor meer dan de helft bij aan de totale bodemverandering in deze sectie. Omdat onder de afvoeren $Q_{br} = 1200, 2200$ en $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ flinke slibsedimentatie optreedt, zal sliberosie gedurende nog hogere afvoeren zeker optreden.

5.5 Gevoeligheidsonderzoek

5.5.1 Zandtransport

Voor het zandtransport is gekeken naar de invloed van de korreldiameter op de transporten door de verschillende dwarsdoorsneden. Voor 1993 zijn berekeningen uitgevoerd met een korreldiameter van 200, 300 en $400 \mu\text{m}$.

In **Tabel 5-17** zijn de transporten door de dwarsdoorsneden gegeven. In **Tabel 5-18** zijn de bodemveranderingen voor de verschillende secties bepaald bij verschillende korreldiameters.

	Km 961			km 968			km 973			km 979		
	200	300	400	200	300	400	200	300	400	200	300	400
1200	5	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2200	35	25	20	0.9	0.6	0.5	0	0	0	0	0	0
3000	157	112	89	24	17	14	0.7	0.5	0.3	0	0	0
6000	3601	2706	1803	1996	1455	1158	1185	837	658	212	149	118
Jaar (10 ⁹ kg)	0.46	0.35	0.24	0.22	0.16	0.13	0.12	0.09	0.07	0.02	0.02	0.01

Tabel 5-17 Transporten per getijperiode (m³)

	Km 961 - 968			Km 968 - 973			Km 973 - 978		
	200	300	400	200	300	400	200	300	400
1200	+5	+4	+3	0	0	0	0	0	0
2200	+34.1	+24.4	+19.5	+0.9	+0.6	+0.5	0	0	0
3000	+133	+95	+75	+16.3	+13.5	+0.4	+0.7	+0.5	+0.3
6000	+1605	+1251	+645	+811	+618	+500	+973	+688	+540
Jaar (m)	+0.071	+0.054	+0.032	+0.024	+0.018	+0.015	+0.023	+0.016	+0.013

Tabel 5-18 Sedimentatie- en erosie (m³/getijperiode)

Uit **Tabel 5-17** kan geconcludeerd worden dat de verschillende korreldiameters dezelfde tendens weergeven op de Nieuwe Merwede. Bij lage afvoer is alleen transport bij de bovenstroomse rand. Bij hoge afvoeren treedt zandtransport op over de gehele Nieuwe Merwede.

Verder blijkt dat bij een grotere korreldiameter het absolute zandtransport afneemt. De belangrijkste oorzaak is dat de grootte van de evenwichtsconcentratie bij Van Rijn* afhankelijk is van de korreldiameter. Globaal kan gesteld worden dat de evenwichtsconcentratie omgekeerd evenredig is met de korreldiameter (4.17). Bij een grotere korreldiameter is de evenwichtsconcentratie lager en dus is het transport ook lager. De omgekeerde evenredigheid blijkt uit de transporten. Bij een twee keer zo grote korreldiameter zijn de transporten ongeveer twee keer zo klein zijn.

Anderzijds wordt de afname van het transport veroorzaakt door de iets grotere, kritische snelheid $\overline{u_{cr}}$ voor erosie/sedimentatie bij een grotere korreldiameter (4.17). Uit de vergelijking blijkt dat er is sprake van een lichte afhankelijkheid. De kritische snelheid $\overline{u_{cr}}$ is globaal evenredig met $d_{50}^{0.1}$. Het transport komt dus later op gang bij een grotere korreldiameter en dit geeft een lager transport.

Voor de resultaten van de zandberekeningen heeft dit de volgende consequenties:

- De tendens van afnemend transport in benedenstroomse richting wordt niet beïnvloed door de korreldiameter.
- De berekende bodemveranderingen per sectie worden berekend op basis van de bovengenoemde zandtransporten door de dwarsdoorsneden. Geconcludeerd kan worden dat de berekende bodemveranderingen dus ook ongeveer omgekeerd evenredig zijn met de korreldiameter.
- De scheiding tussen gebieden met erosie/sedimentatie en gebieden waar geen veranderingen optreden tijdens een getijperiode zullen onder de verschillende korreldiameters nauwelijks verschillen, omdat de kritische erosiesnelheid maar licht afhankelijk is van de korreldiameter.

5.5.2 Slibtransport

Er zijn acht berekeningen uitgevoerd om de gevoeligheid van de parameters te bekijken. In **Tabel 5-19** zijn de instellingen van de berekeningen gegeven.

Parameter	w_s (m/dag)	U_c (m/s)	U_{c_c} (m/s)	M (kg/(m ² dag))
Standaard	43	0.15	0.35	1
W86	86	0.15	0.35	1
W21.5	21.5	0.15	0.35	1
Us0.30	43	0.30	0.35	1
Us0.075	43	0.075	0.35	1
Ue0.70	43	0.15	0.70	1
Ue0.175	43	0.15	0.175	1
M2	43	0.15	0.35	2
M0.5	43	0.15	0.35	0.5

Tabel 5-19 Gevoeligheidsanalyse slib

In **Tabel 5-20** zijn de (aangepaste) transporten door de verschillende dwarsdoorsneden gegeven.

	km 961	km 968	km 973	km 979
Standaard	1700	1700	1700	1502
W86	1700	1700	1700	1447
W21.5	1700	1700	1700	1535
Us0.30	1700	1700	1560	598
Us0.075	1700	1700	1700	1589
Ue0.70	1700	1599	1418	1319
Ue0.175	1700	1700	1700	1700
M2	1700	1700	1700	1510
M0.5	1700	1700	1700	1493

Tabel 5-20 Transporten per getijperiode (*10³ kg/getijperiode)

Geconcludeerd kan worden dat vooral variatie in de kritische sedimentatiesnelheid het transport per getijperiode sterk beïnvloed. Bij een hogere kritische sedimentatiesnelheid treedt veel meer slibsedimentatie op en het transport door de benedenstroomse dwarsdoorsnede daalt sterk. De overige parameters hebben veel minder invloed op het transport door de dwarsdoorsneden. De berekende transporten wijken niet veel af van de resultaten van de standaardberekening.

6. Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten gepresenteerd van de waterbewegings- (6.1) en sedimenttransportberekeningen (6.2) die zijn uitgevoerd voor de Nieuwe Merwede. Deze berekeningen zijn gemaakt bij vier verschillende Bovenrijnafvoeren voor de jaren 1970 en 1993. De resultaten worden gebruikt om de horizontale en verticale zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede te verklaren (hoofdstuk 7).

6.1 Waterbewegingsberekeningen

Door Wang en Bruinsma (1997) is het stroompatroon onder verschillende afvoeren berekend en toegelicht met een bodemschematisatie van 1993. Belangrijke conclusies omtrent het stroompatroon op de Nieuwe Merwede voor 1993 worden hier herhaald:

- Het stroombeeld van de Nieuwe Merwede heeft grote overeenkomsten met dat van een rivierbocht op de bovenrivieren. Bij het begin van een bocht is de stroming geconcentreerd aan de binnenbocht en verschuift vervolgens naar de buitenbocht.
- Bij een afvoer is het stroombeeld bij maximaal en minimaal debiet gelijk, alleen de grootte van de stroomsnelheid verschilt. Het verschil tussen de maximale en minimale snelheid wordt kleiner als de gemiddelde afvoer groter wordt.
- Het stroombeeld bij verschillende afvoeren is ongeveer gelijk, alleen de grootte van de snelheid verandert.
- De kribben hebben een duidelijke invloed op het stroombeeld. Tussen de kribben is de stroomsnelheid veel kleiner door de aanwezigheid van de kribben.
- De invloed van het getij is beperkt. Er is geen sprake van omkering van de stromingsrichting, zelfs niet bij lage afvoeren.

In **Appendix H** zijn de snelheidsprofielen weergegeven bij maximaal en minimaal debiet tijdens de getijperiode voor vier verschillende afvoeren in 1970 en 1993. Vergelijking van 1993 ten opzichte van 1970 levert de volgende conclusies voor alle afvoeren:

- In het bovenstroomse traject (km 961 - 969) van Werkendam tot Kop van 't Land is het opvallend dat de stroomsnelheden zowel bij maximaal als minimaal debiet zijn afgenomen.
- In het benedenstroomse traject (km 971 - 979) van Kop van 't Land tot Anna Jacominaplaat zijn de stroomsnelheden zowel bij maximaal als bij minimaal debiet juist toegenomen.
- In het benedenstroomse traject was de stroming in 1993 sterker geconcentreerd in de geul en minder uniform verdeeld over de breedte.
- De invloed van het getij is in 1993 - net als in 1970 - beperkt. Er is geen sprake van omkering van de stromingsrichting, ook niet bij lage afvoeren.

6.2 Sedimenttransportberekeningen

6.2.1 Zand

- **Transport door dwarsdoorsnede**

In **Tabel 6-1** en **Tabel 6-2** zijn de resultaten van het zandtransport door de dwarsdoorsnede per getijperiode gegeven voor 1993 en 1970. Tevens is het jaarlijkse transport bepaald op basis van de kansverdeling van 1970-1992.

$d_{50} = 300 \mu\text{ m}$	Zandtransport (Van Rijn ³)			
		[m ³ /getijperiode]		
Bovenrijnafvoer [m ³ /s]	Bovenrand	km 968	km 973	km 979
1200	4	0	0	0
2200	25	0.6	0	0
3000	112	17	0.5	0
6000	2706	1455	837	149
Jaartransport (*10 ⁹ kg)	0.35	0.16	0.09	0.02

Tabel 6-1 Zandtransport 1993

$d_{50} = 300 \mu\text{ m}$	Zandtransport (Van Rijn ³)			
		[* 10 ³ kg/getijperiode]		
Bovenrijnafvoer [m ³ /s]	Bovenrand	km 968	km 973	km 979
1200	0.6	0	0	0
2200	9.8	0.4	0	0
3000	81	14	0	0
6000	6595	4604	1211	502
Jaartransport (*10 ⁹ kg)	0.73	0.49	0.13	0.05

Tabel 6-2 Zandtransport 1970

Uit de berekeningen van 1970 en 1993 kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Het jaarlijks zandtransport op de bovenrand van de Nieuwe Merwede was in 1970 veel groter dan in 1993.
- De berekeningen van 1970 en 1993 tonen aan dat op het bovenstroomse traject (km 961 - 968) forse sedimentatie van zand optreedt.
- Op het traject km 968 - 973 is voor beide jaren sprake van zandsedimentatie. Transport van zand vindt hoofdzakelijk plaats onder hoge Bovenrijnafvoer ($Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Zowel in 1970 als in 1993 vindt op het benedenstroomse traject (km 973 - km 979) van de Nieuwe Merwede alleen grootschalig zandtransport plaats onder hoge Bovenrijnafvoer ($Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$).

• **Bodemverandering op jaarbasis**

De bodemverandering op jaarbasis is bepaald volgens:

$$\Delta z_{\text{jaar}} = N \sum_{i=1}^4 P_i \Delta z_i \quad (6.1)$$

waarin:

Δz_{jaar} = bodemverandering op jaarbasis

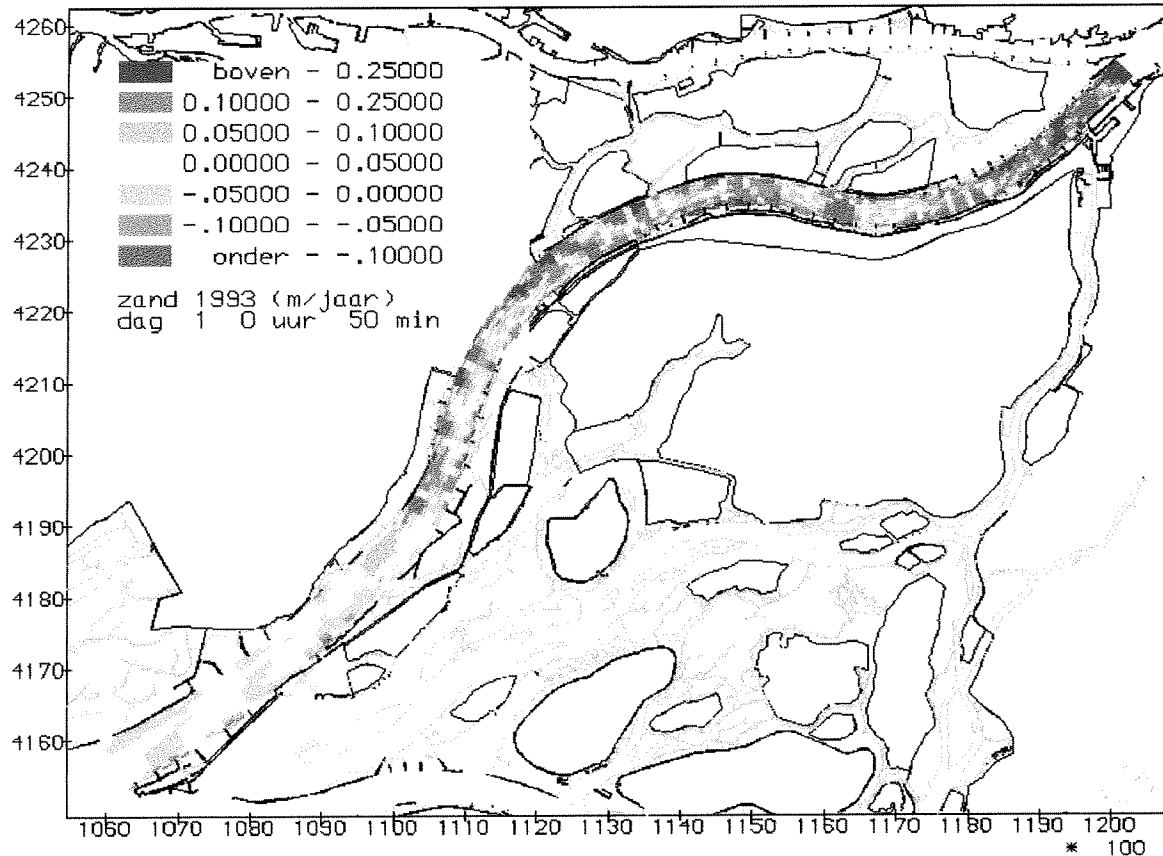
N = aantal getijperioden in een jaar

P_i = kans van de representatieve afvoer i

Δz_i = bodemverandering bij representatieve afvoer i

In **Figuur 6-1** is de bodemverandering op jaarbasis weergegeven voor ieder vak in de Nieuwe Merwede. Er ontstaat een zeer complex patroon van erosie- en sedimentatiegebieden in de geul en op de banken. De oorzaak van dit patroon ligt in de kleine aanpassingslengte van het zandtransport en steeds dezelfde bodemligging gedurende de getijperiode. Is een benedenstroomse vak dieper of ondieper in het initiële bodemprofiel, dan treedt daar sedimentatie respectievelijk erosie op in een bepaalde tijdstap. Hierdoor ontstaat een patchy-patroon, met afwisselend erosie- en sedimentatievakken.

Voor iedere afvoer is het sedimentatie- en erosiepatroon globaal gelijk, omdat voor iedere afvoer het snelheidsprofiel ongeveer gelijk is. Alleen de grootte van de snelheid verschilt. Omdat voor iedere afvoer met dezelfde bodemligging wordt gerekend wordt voor iedere afvoer op dezelfde plaatsen sedimentatie en erosie gevonden.



Figuur 6-1 Bodemverandering zand 1993

- **Horizontale verdeling zandtransport**

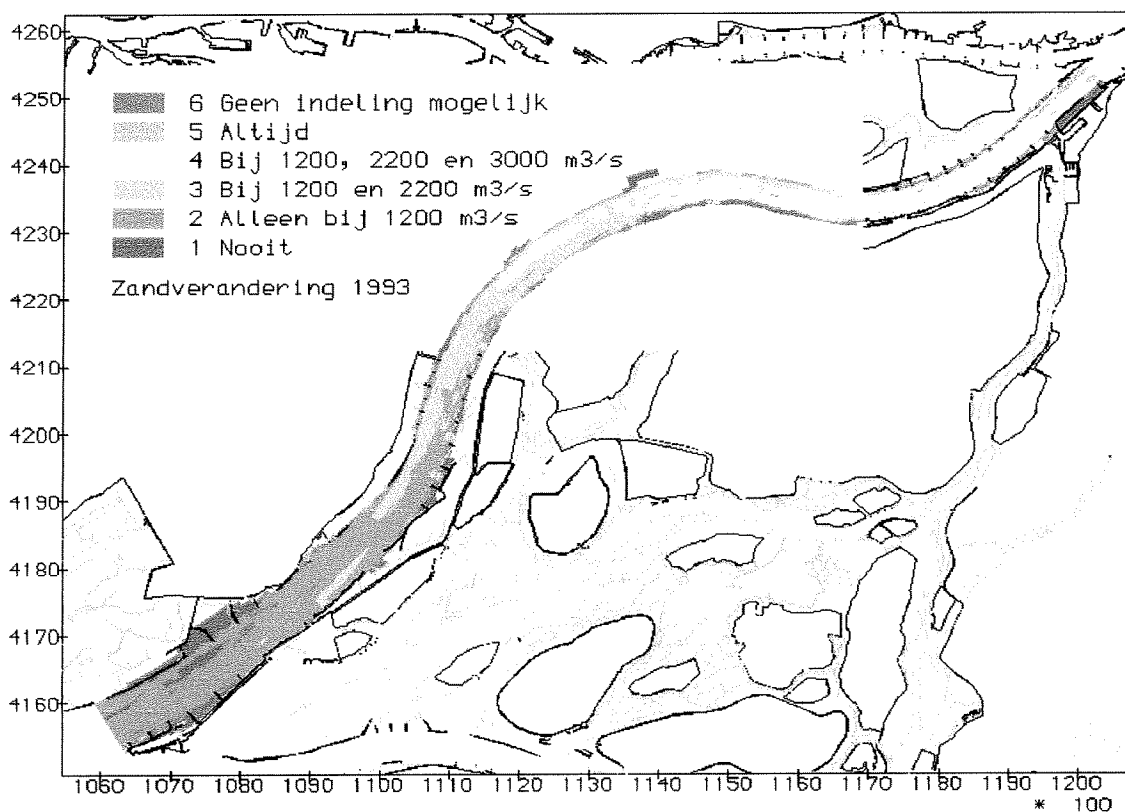
Om toch een beeld te krijgen van de horizontale verdeling van het zandtransport onder verschillende afvoeren is een indeling gemaakt op basis van de bodemverandering. Een bodemverandering (sedimentatie of erosie) in een bepaald gebied geeft een indicatie van de morfologische activiteit van het gebied. Is er gedurende alle afvoeren sprake van sedimentatie of erosie, dan is het gebied morfologisch zeer actief (Klasse 5).

De volgende indeling is gehanteerd (Tabel 6-3):

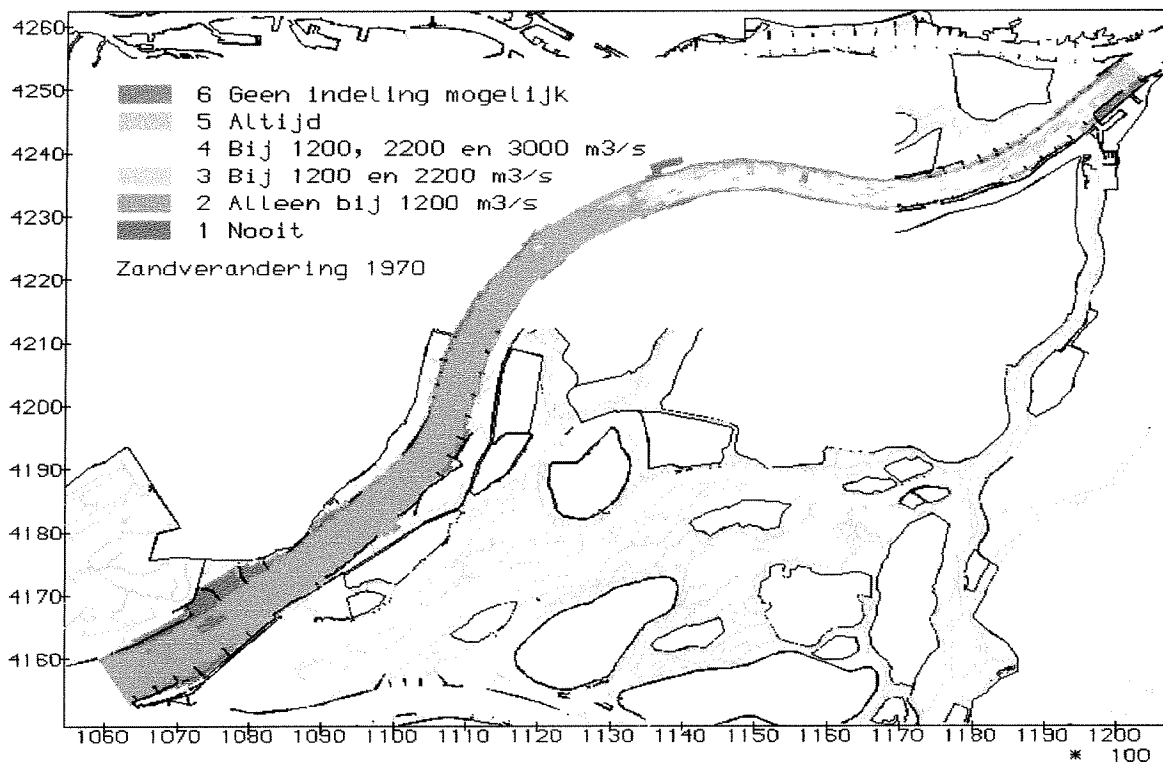
Situatie	Klasse
Nooit zandtransport	1
Alleen bij $Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$	2
Bij $Q_{br} = 3000$ en $6000 \text{ m}^3/\text{s}$	3
Bij $Q_{br} = 2200, 3000$ en $6000 \text{ m}^3/\text{s}$	4
Onder alle afvoeren zandtransport	5

Tabel 6-3 Klasse-indeling zandtransport

In **Figuur 6-2** en **Figuur 6-2** is voor 1993 en 1970 bovenstaande klasse-indeling weergegeven. Tevens is in de figuren aangegeven hoeveel vakken in de desbetreffende klasse voorkomen.



Figuur 6-2 Klasse-indeling zand 1993



Figuur 6-3 Klasse-indeling 1970

Bij vergelijking van de figuren voor 1993 en 1970 vallen een aantal zaken op:

- In het bovenstroomse traject is het gebied waarin onder alle afvoeren sedimentatie of erosie optreedt (Klasse 5) in 1970 aanmerkelijk groter dan in 1993.
- Onder een Bovenrijnafvoer van 2200 en 3000 m³/s ligt het front in 1970 ongeveer halverwege de Nieuwe Merwede, ongeveer bij Kop van 't Land (km 970). In 1993 ligt het front bij 3000 m³/s veel verder stroomafwaarts dan in 1970, globaal bij km 975.
- De gebieden waar nooit zandtransport optreedt, liggen in de kribvakken en op de bank aan de benedenstroomse rand.

Deze klasse-indeling wordt in **hoofdstuk 7** gebruikt voor de verklaring van de gevormde zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede.

6.2.2 Slib

• Transport door de dwarsdoorsnede

In **hoofdstuk 5** is aangegeven dat de resultaten van het slibtransport aangepast moeten worden, omdat op veel plaatsen slib erodeert waar in werkelijkheid geen slib ligt. In **Tabel 6-4** en **Tabel 6-5** zijn de resultaten gegeven van de (aangepaste) transporten door de dwarsdoorsneden voor 1970 en 1993. De getallen tussen haakjes geven de hoeveelheid gesedimenteerd materiaal aan in het bovenstrooms gelegen vak. Bijvoorbeeld +33 geeft aan dat onder een Bovenrijnafvoer van 1200 m³/s 33.000 kg slib sedimenteert op het traject 961 - 968 gedurende een getijperiode.

Slibtransport (*10 ³ kg/getijperiode)				
Bovenrijnafvoer	km 961	km 968	km 973	km 979
1200	840	783 (+57)	638 (+145)	321 (+317)
2200	1700	1700	1700	1502 (+198)
3000	2700	2700	2700	2700
6000	8100	8100	8100	8100
Jaartransport (*10 ⁹ kg)	1.34	1.33	1.29	1.15

Tabel 6-4 Slibtransport 1993

Slibtransport (*10 ³ kg/getijperiode)				
Bovenrijnafvoer	km 961	km 968	km 973	km 979
1200	840	840	545 (+295)	133 (+412)
2200	1700	1700	1700	1235 (+465)
3000	2700	2700	2700	2542 (+158)
6000	8100	8100	8100	8100
Jaartransport (*10 ⁹ kg)	1.34	1.34	1.26	1.01

Tabel 6-5 Slibtransport 1970

Op basis van deze resultaten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

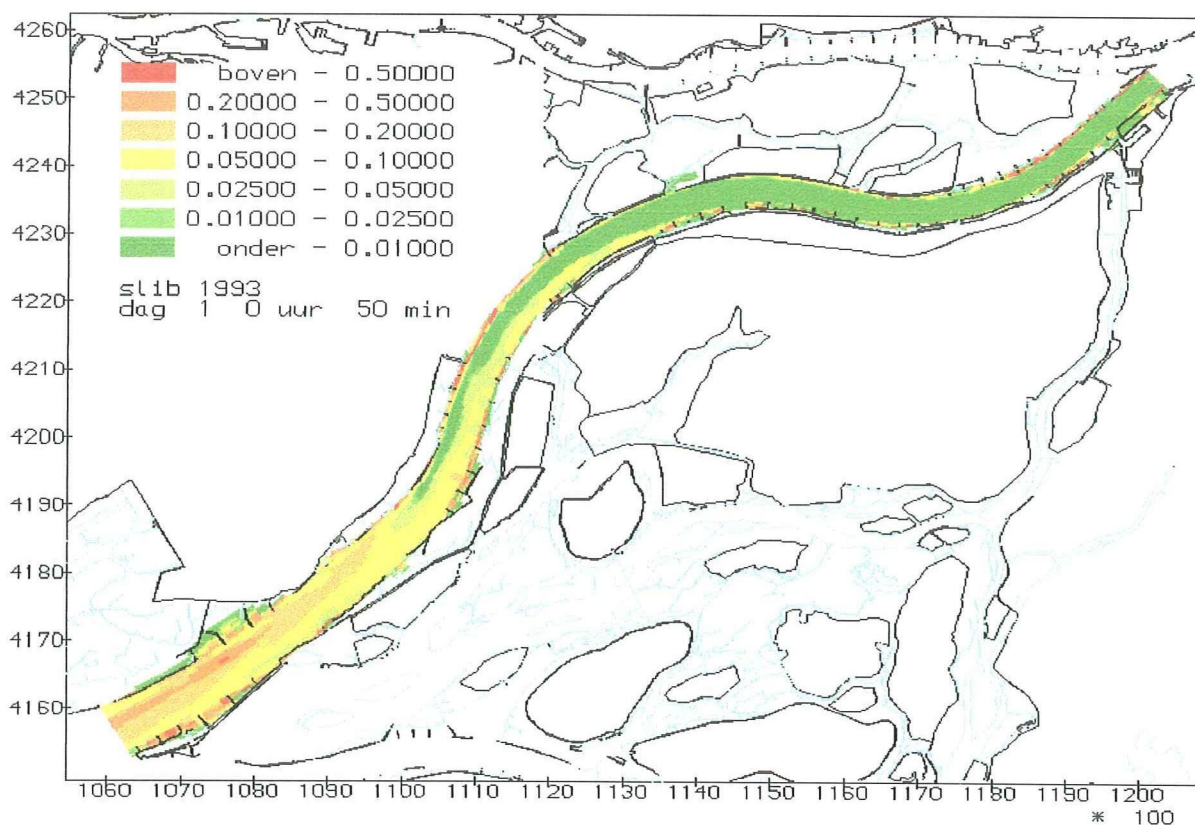
- Opvallend is dat in 1970 in het bovenstroomse traject geen slibsedimentatie optreedt, terwijl in 1993 onder lage afvoer wel slibsedimentatie optreedt.
- Op het traject km 968 - 973 treedt alleen bij lage afvoeren slibsedimentatie op. De netto hoeveelheid was in 1970 ongeveer een factor twee keer zo groot als in 1993.
- In het benedenstroomse traject treedt in 1970 tot en met 3000 m³/s netto slibsedimentatie op. De grootste sedimentatie treedt op bij lage afvoer. Voor 1993 treedt slibsedimentatie op tot 2200 m³/s. In 1970 sedimenteerde per getijperiode veel meer slib dan in 1993 onder de lage en gemiddelde Bovenrijnafvoer.

• Bodemverandering

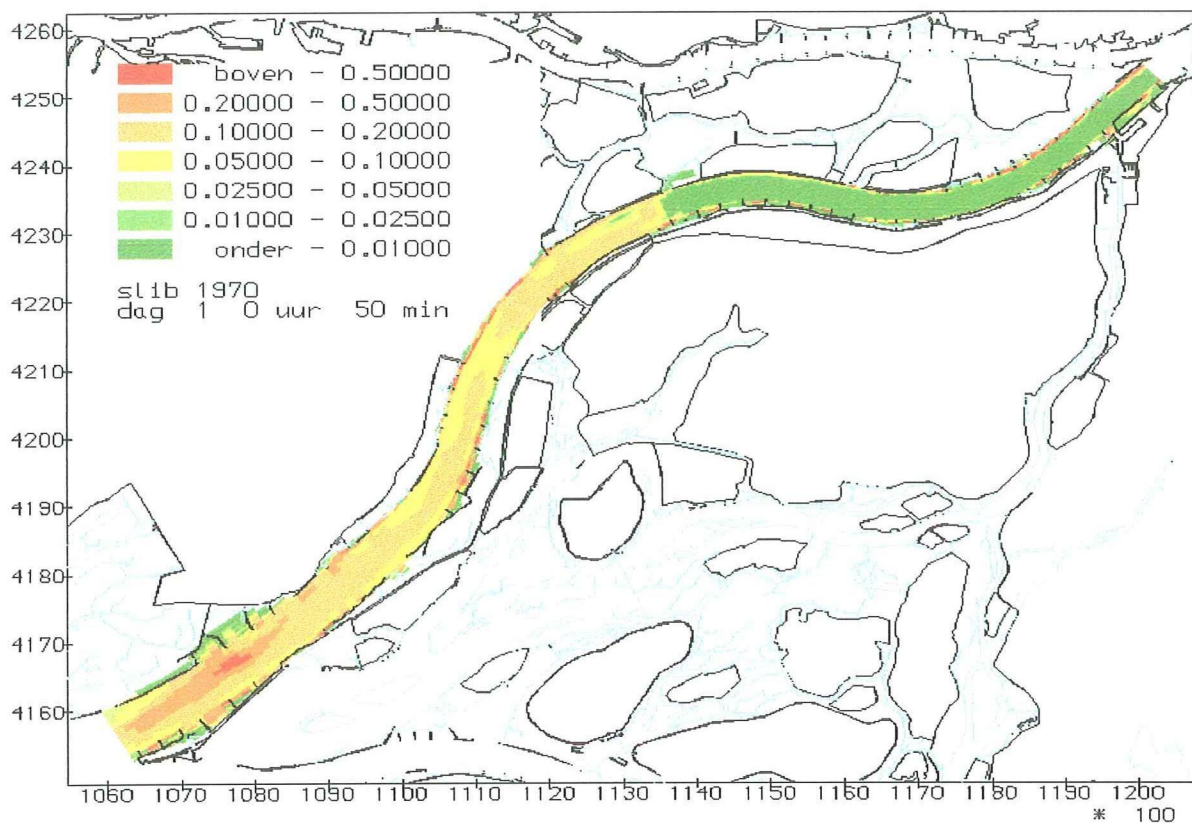
Het berekenen van de bodemverandering op jaarbasis voor dit slibmodel is weinig zinvol. Dit wordt veroorzaakt door de modelopzet. In dit model is uitgegaan van een slibbodem over het gehele gebied, terwijl uit de data al blijkt dat een groot gedeelte van de Nieuwe Merwede uit zand bestaat.

Wel is het interessant om de bodemverandering bij lage afvoer en gemiddelde afvoer te vergelijken, zeker omdat blijkt dat onder deze afvoer veel sedimentatie en weinig erosie van slib optreedt. Hierdoor zullen de modelresultaten een redelijke indruk geven van de werkelijke bodemveranderingen onder die afvoeren.

In **Figuur 6-4** en **Figuur 6-5** is de bodemverandering op jaarbasis weergegeven van de lage en de gemiddelde afvoer samen voor respectievelijk 1993 en 1970.



Figuur 6-4 Slibbodem 1993



Figuur 6-5 Slubbodem 1970

Vergelijking van beide figuren levert de volgende conclusies:

- In het slibmodel van 1970 is vanaf km 969 sprake van flinke slibsedimentatie op jaarbasis (> 1 cm). Er is sprake van zowel slibsedimentatie in de geul als op de bank aan de benedenstroomse rand.
- In het slibmodel van 1993 is in de geul tot km 975 sprake van nauwelijks slibsedimentatie (< 1 cm). Op het traject km 969 tot 975 treedt wel slibsedimentatie op in de binnenbocht. De grootte van de sedimentatie is echter veel kleiner dan in 1970.

• Slibsedimentatie

Om een beeld te krijgen van de horizontale verdeling van slibsedimentatie onder alle afvoeren is ervoor gekozen om een indeling te maken op basis een positieve bodemverandering. Deze positieve bodemverandering geeft een indicatie van een (netto) slibsedimentatie gedurende een getijperiode onder een bepaalde afvoer.

De volgende indeling is gehanteerd (Tabel 6-6):

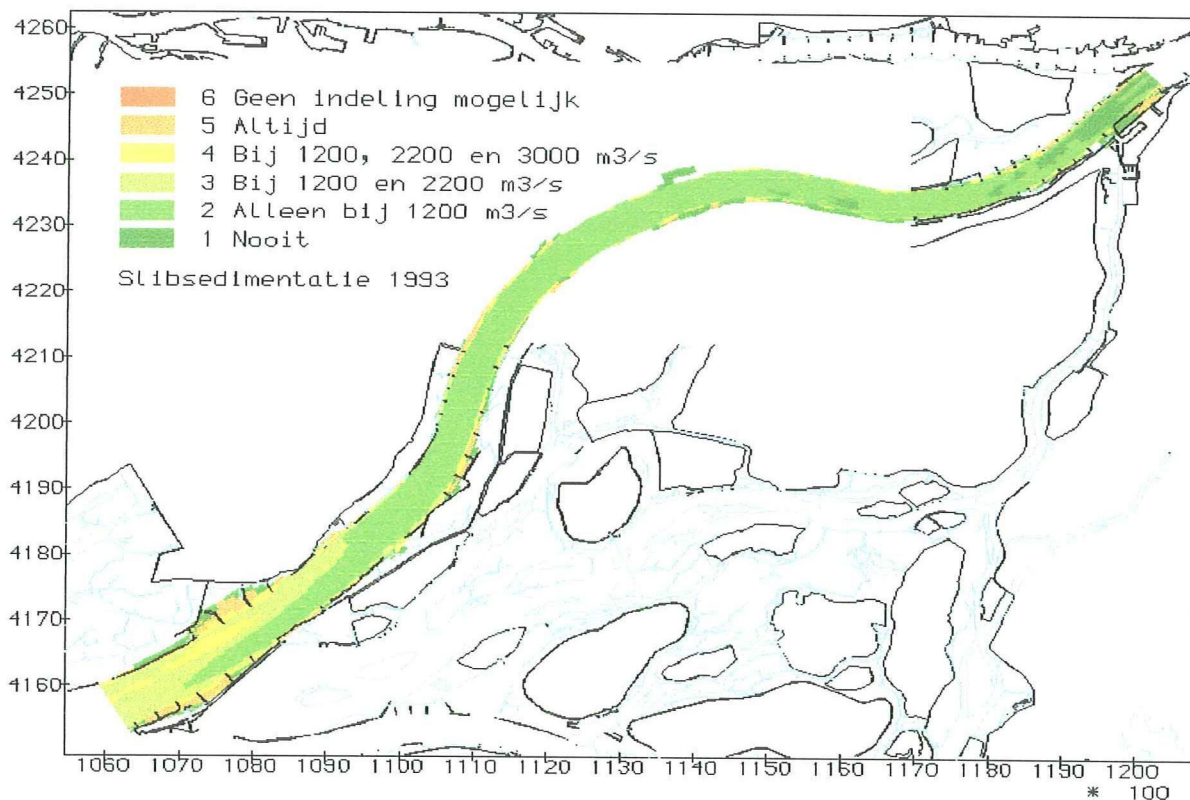
Situatie	Klasse
Nooit slibsedimentatie	1
Alleen bij $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$	2
Bij $Q_{br} = 1200$ en $2200 \text{ m}^3/\text{s}$	3
Bij $Q_{br} = 1200, 2200, 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	4
Onder alle afvoeren slibsedimentatie	5

Tabel 6-6 Klasse-indeling slibsedimentatie

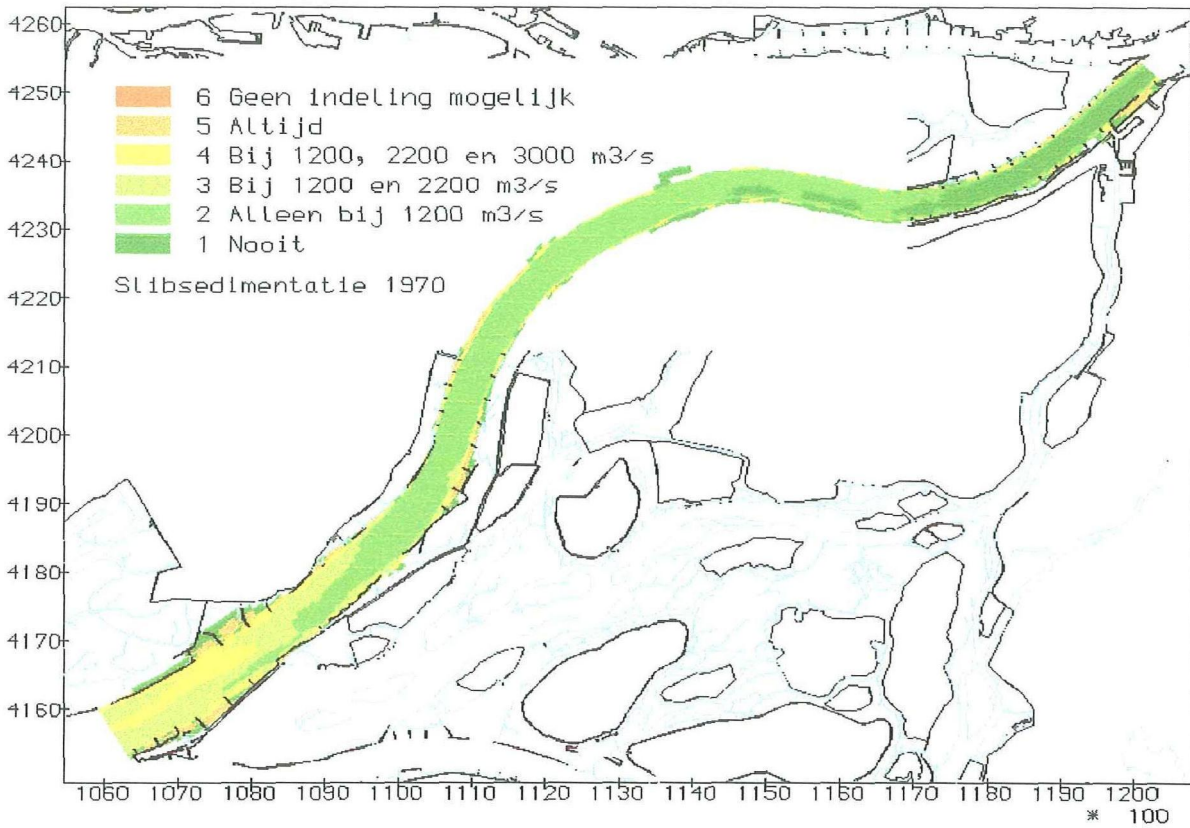
In **Figuur 6-6** en **Figuur 6-7** zijn voor 1993 en 1970 de resultaten weergegeven.

- Uit de figuren blijkt dat in het bovenstroomse gedeelte van de Nieuwe Merwede alleen slibsedimentatie optreedt onder lage afvoer. Voor 1993 is het gebied waar nooit slibsedimentatie optreedt kleiner dan in 1970.
- Verder blijkt dat in de geul praktisch alleen onder lage afvoer nog sedimentatie optreedt, zowel in 1970 als in 1993.
- Op de bank bij de benedenstroomse rand treedt tot en met $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ slibsedimentatie op.
- Achterin sommige kribvakken treedt nooit slibsedimentatie op. Verder blijkt dat bij hogere afvoeren het sedimentatiefront van slib dieper in het kribvak ligt (**Figuur 6-8**).

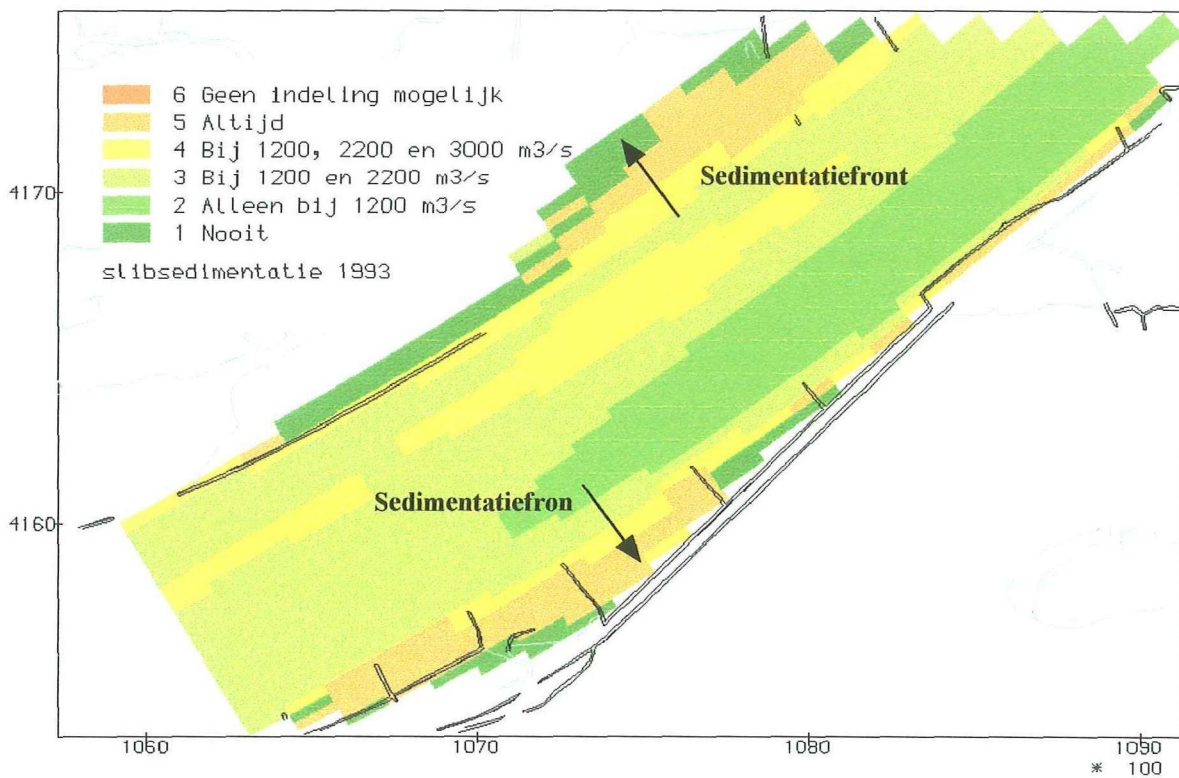
Deze klasse-indeling wordt in **hoofdstuk 7** gebruikt voor de verklaring van de gevormde zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede.



Figuur 6-6 Klasse-indeling slibsedimentatie 1993



Figuur 6-7 Klasse-indeling slibsedimentatie 1970



Figuur 6-8 Slibsedimentatie in kribvak (km 978)

7. Verklaringen zand-slibstructuren

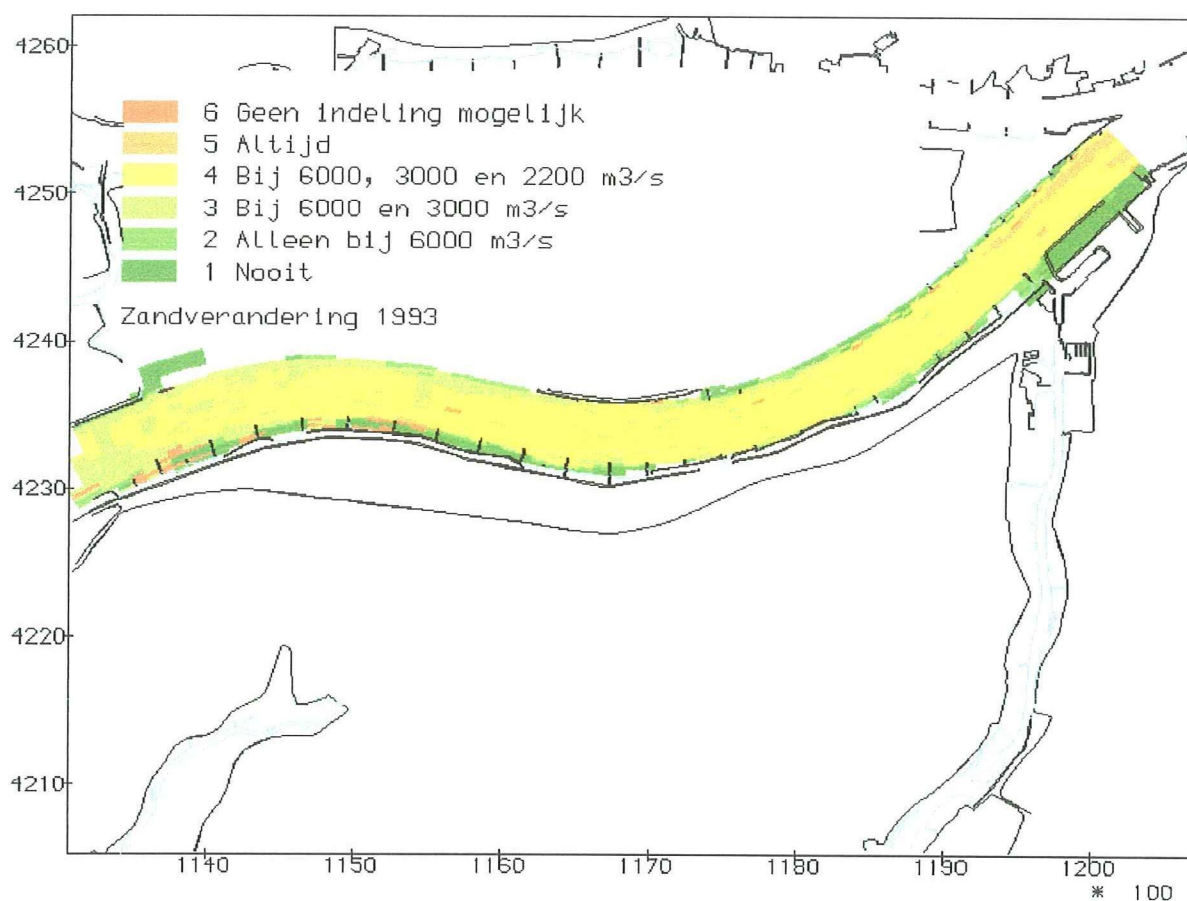
In hoofdstuk 3.5 is een beschrijving gegeven van de horizontale en verticale zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede aan de hand van lodingen, boringen en bodemmonsters. Daarnaast zijn in hoofdstuk 6 de resultaten gepresenteerd van de waterbewegings- en sedimenttransportberekeningen voor 1970 en 1993. Er is voor zand en slib een klasse-indeling gemaakt om een beeld te krijgen van het zandtransport en de slibsedimentatie onder de verschillende afvoeren. In dit hoofdstuk wordt getracht aan de hand van de modelresultaten verklaringen te vinden voor de gevonden horizontale en verticale zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede.

7.1 Traject km 961 - km 968

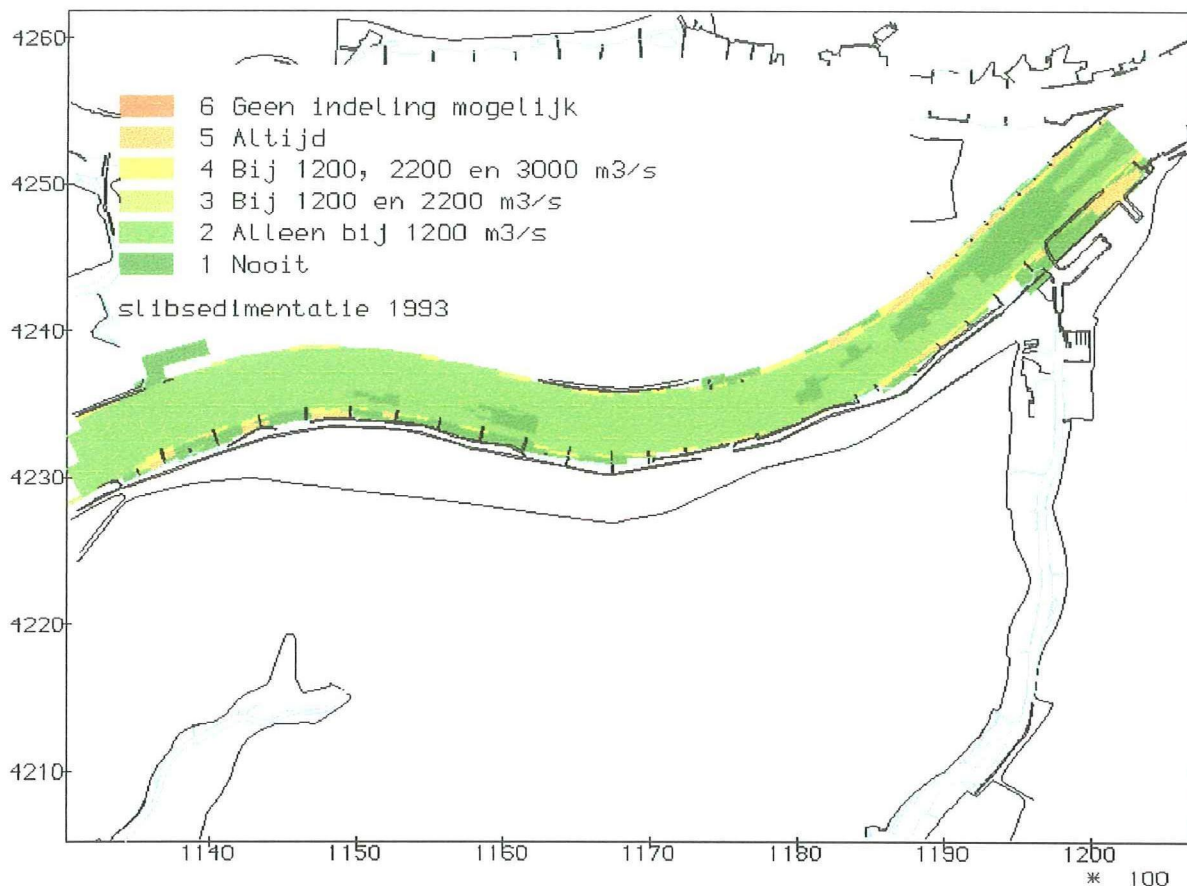
7.1.1 Horizontale segregatie

De gevonden horizontale zand-slibstructuur in 1992 op dit traject is een zandige geul met een laag slibpercentage ($< 5\%$; NM5031, NM5032 en NM5041). In de kribvakken is het slibpercentage hoger, globaal zo'n 10 tot 40%. Op sommige plaatsen is het slibpercentage in de kribvakken opvallend laag. Als voorbeeld kan genoemd worden monster NM10 (2.2%).

In Figuur 7-1 en Figuur 7-2 is de klasse-indeling voor zand en slib (1993) weergegeven.



Figuur 7-1 Klasse-indeling zand km 961 - 968 (1993)

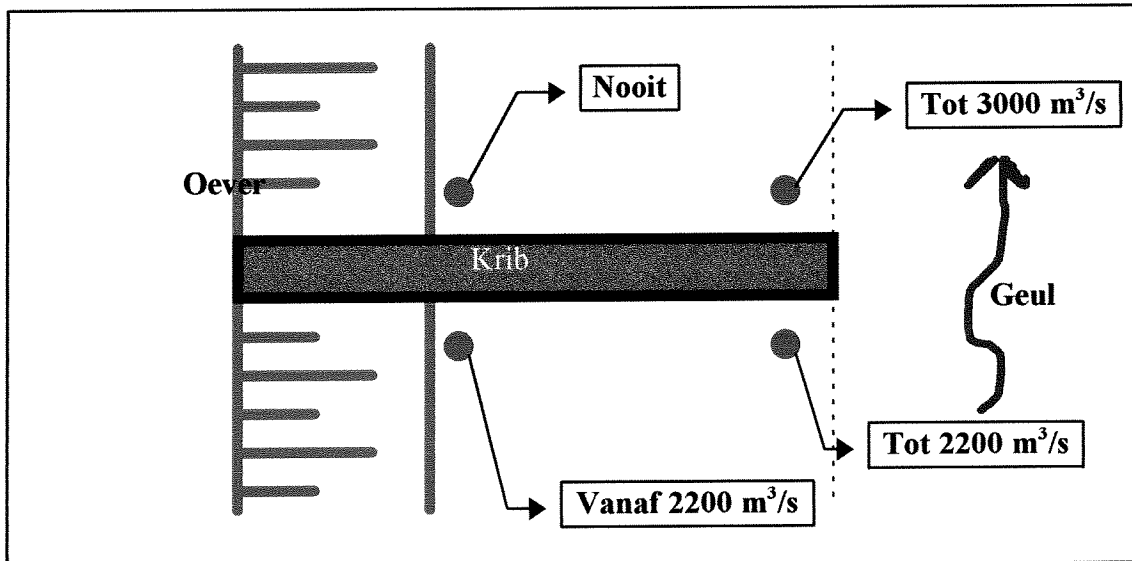


Figuur 7-2 Klasse-indeling slib km 961 - 968 (1993)

Uit de modelresultaten blijkt dat het lage slibpercentage in de geul wordt veroorzaakt door de te hoge stroomsnelheden onder alle afvoeren. Bij de bovenstroomse rand is een groot gebied waar onder geen enkele afvoer slibsedimentatie plaatsvindt. Verder stroomafwaarts treedt alleen onder lage afvoeren lichte slibsedimentatie op. Daarnaast is in het grootste gedeelte van de geul sprake van sedimentatie en erosie van zand bij afvoeren hoger dan 2200 m³/s.

In de kribvakken blijkt dat door de lagere stroomsnelheden op sommige plaatsen in de kribvakken - in tegenstelling tot de geul - wel slibsedimentatie onder alle afvoeren kan optreden. Daarnaast treedt zandtransport pas op onder hogere afvoeren ($Q_{br} > 3000$ m³/s). Verder blijkt dat bij hogere afvoeren slibsedimentatie en zandtransport dieper in het kribvak optreden (**Figuur 6-4** en **Figuur 6-9**). Dit wordt veroorzaakt door het feit dat bij hogere afvoeren transport in dwarsrichting toeneemt door een grotere advectie en dispersie. Advectie neemt toe door de hogere stroomsnelheden bij hogere afvoer. De dispersieve term neemt enerzijds toe door toename van de dispersie-coëfficiënt. De snelheid in langsricting neemt immers toe bij hogere afvoer en de dispersie-coëfficiënt is lineair afhankelijk van deze snelheid. Anderzijds is sprake van een grotere concentratie in de geul. Dit geeft een grotere concentratiegradiënt in dwarsrichting en dus een groter dispersief transport.

Tenslotte blijkt uit de resultaten een sterke invloed van de kribben op de lokatie van slibsedimentatie. In **Figuur 7-3** is hiervan een voorbeeld gegeven. Voor twee punten aan de bovenstroomse zijde en twee aan de benedenstroomse zijde van een krib is aangegeven onder welke afvoeren slibsedimentatie optreedt.



Figuur 7-3 Slibsedimentatie rond een krib

Vlakbij de oever is sprake van de volgende situatie:

Aan de bovenstroomse zijde treedt slibsedimentatie op vanaf $2200 \text{ m}^3/\text{s}$. Aan de benedenstroomse zijde treedt nooit slibsedimentatie op. Mogelijke oorzaak is dat aan de achterzijde van de krib de stroomsnelheden praktisch gelijk zijn aan 0. Hierdoor is de dispersie en advectie verwaarloosbaar en zal onder alle afvoeren geen aanvoer van slib optreden. Aan de voorzijde is wel aanvoer van slib en door de lage stroomsnelheden treedt daar flinke sedimentatie op.

Dichtbij de geul is sprake van de volgende situatie:

Onder alle afvoeren is de stroomsnelheid aan de voorzijde van de krib groter dan aan de achterzijde. De achterzijde wordt afgeschermd door de krib. Hierdoor treedt aan de voorzijde tot $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ en aan de achterzijde tot $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ slibsedimentatie op.

Op basis van deze modelresultaten kan het variërende slibpercentage (2.2 - 40%) in de kribvakken als volgt verklaard worden. De monsters NM5021, NM5022, NM5013 en NM5023 (24 - 38%) liggen ongeveer tussen de kribben op de overgang van geul naar kribvak. Door de lagere stroomsnelheden kan hier onder meerdere afvoeren slib sedimenteren. Het slibpercentage ligt hierdoor aanmerkelijk hoger dan in de geul.

De lage slibpercentages bij de monsters NM2B (14%), NM2O (2.6%) en NM1O (2.2%) wordt veroorzaakt door de positie ten opzichte van de geul en de krib. Uit de modelresultaten blijkt dat hier nooit slibsedimentatie en zandtransport plaatsvindt. Geconcludeerd kan worden dat het lage slibpercentage hier niet zozeer veroorzaakt wordt door de hydrodynamische omstandigheden, maar door de positie ten opzichte van de geul en de kribben.

7.1.2 Verticale segregatie

Omdat op dit traject uit de boringen geen duidelijkheid bestaat over de verticale structuur kunnen daarover met het model geen conclusies getrokken worden. Wel kunnen uit de modelresultaten van 1970 nog een aantal opmerkelijke zaken geconcludeerd worden.

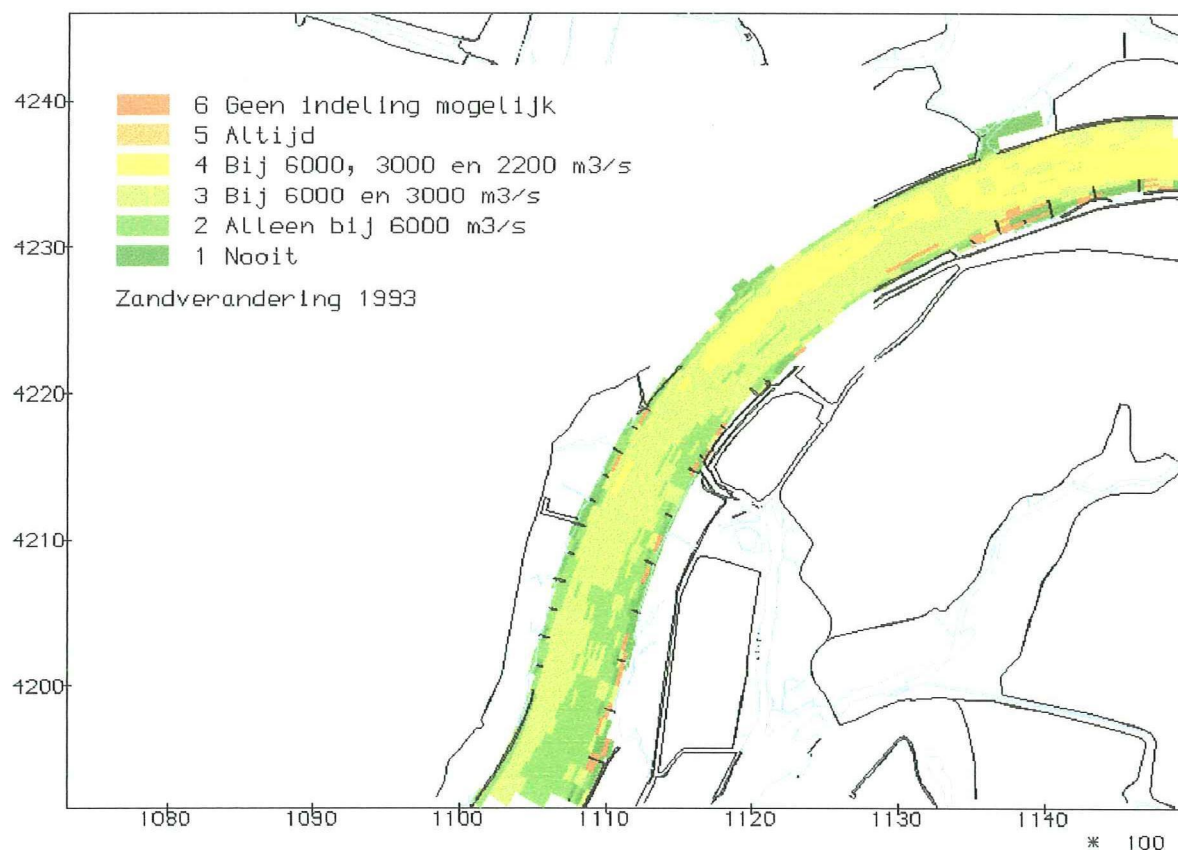
Uit de zandberekeningen blijkt dat het jaarlijks transport op de bovenrand is afgenomen (Tabel 6-1 en Tabel 6-2). Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door baggerwerkzaamheden bij het splitsingspunt. Door verdieping zijn de stroomsnelheden afgenomen en is de transportcapaciteit gedaald. Ook de gevonden slibsedimentatie op het traject km 961 - 968 bij lage afvoeren in 1993 (Tabel 6-4) is waarschijnlijk een gevolg van baggerwerkzaamheden.

7.2 Traject km 968 - km 975

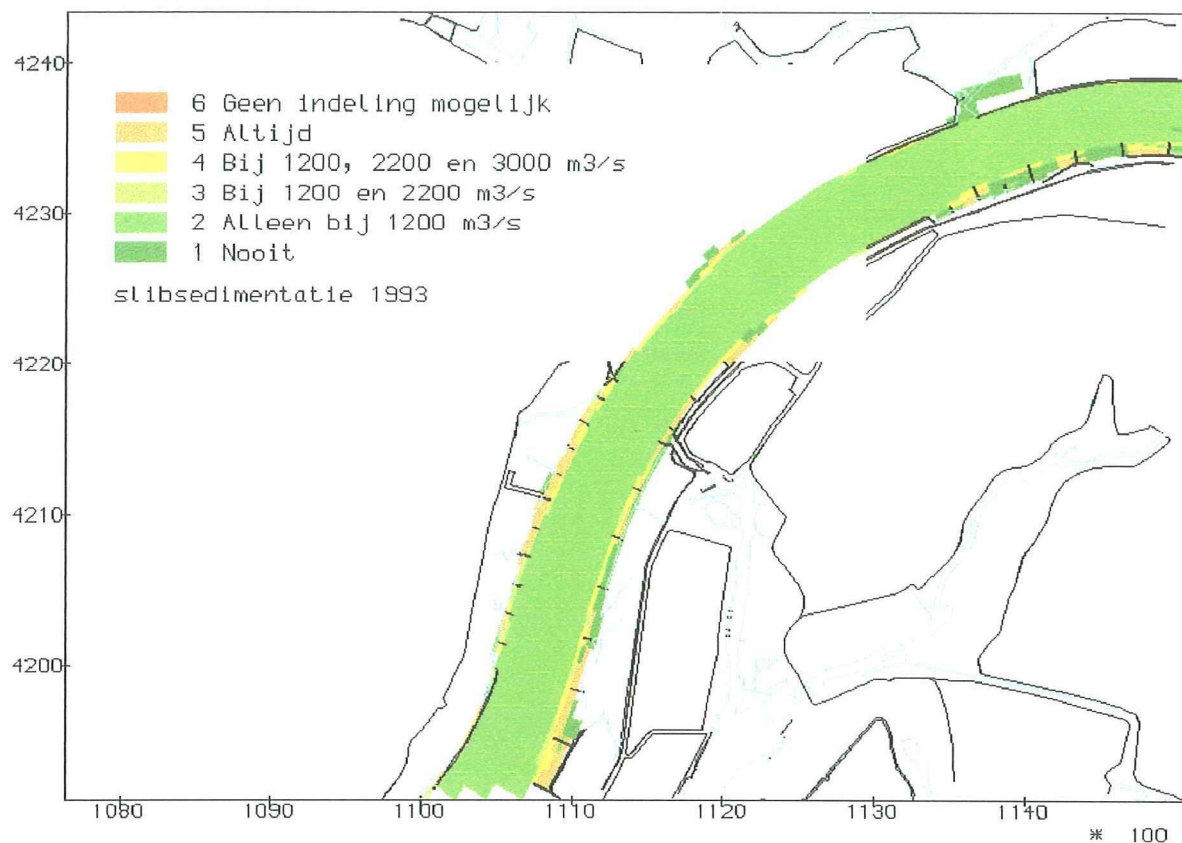
7.2.1 Horizontale segregatie

Uit de boringen en de monsters blijkt dat de geul (waarschijnlijk) zandig is, hoewel monster NM5071 een hoog slibpercentage laat zien (47%). Bij km 971 is het slibpercentage 3.2% en bij km 975.5 7.7%. Mogelijk is sprake van een toename van het slibpercentage in de geul in benedenstroomse richting. In de kribvakken is sprake van een hoger slibpercentage ten opzichte van het voorgaande traject, globaal 40 tot 70%.

In Figuur 7-4 en Figuur 7-5 is de klasse-indeling voor zand en slib (1993) weergegeven.



Figuur 7-4 Klasse-indeling zand km 968 - 975 (1993)



Figuur 7-5 Klasse-indeling slib km 968 - 975 (1993)

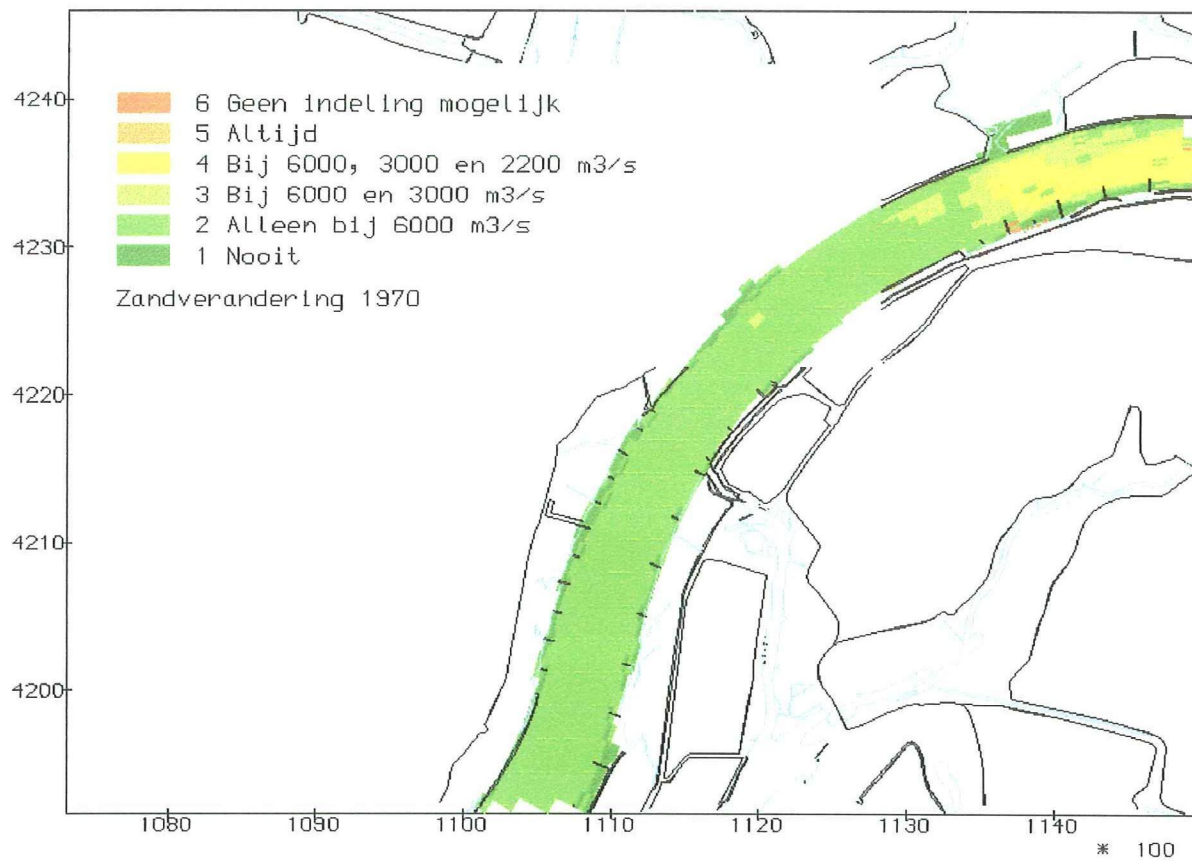
Ook in dit traject wordt het zandige karakter veroorzaakt door te hoge snelheden voor slibsedimentatie. Alleen bij lage afvoer is in de geul sprake van lichte slibsedimentatie. Uit de berekeningen blijkt dat tot km 974 in de geul op jaarbasis minder dan 1 centimeter slib sedimenteert onder lage afvoeren. Na km 974 neemt deze sedimentatie toe tot 5 centimeter bij km 975.5. Mogelijk is deze toename een verklaring voor de toename van het slibpercentage in de geul.

Uit de modelresultaten kan geconcludeerd worden dat in veel kribvakken slibsedimentatie optreedt bij debieten tot 6000 m³/s. Ook hier blijkt dat bij hogere afvoer slibsedimentatie dieper in het kribvak plaatsvindt. In veel kribvakken treedt onder alleen bij 6000 m³/s zandtransport op. Een mogelijke oorzaak van het hogere slibpercentage in de kribvakken kan zijn dat op dit traject alleen bij 6000 m³/s zandtransport optreedt in de kribvakken (NM5063, NM, terwijl op het bovenstroomse traject al onder $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ zandtransport kan optreden (NM5022, 5013) in de kribvakken.

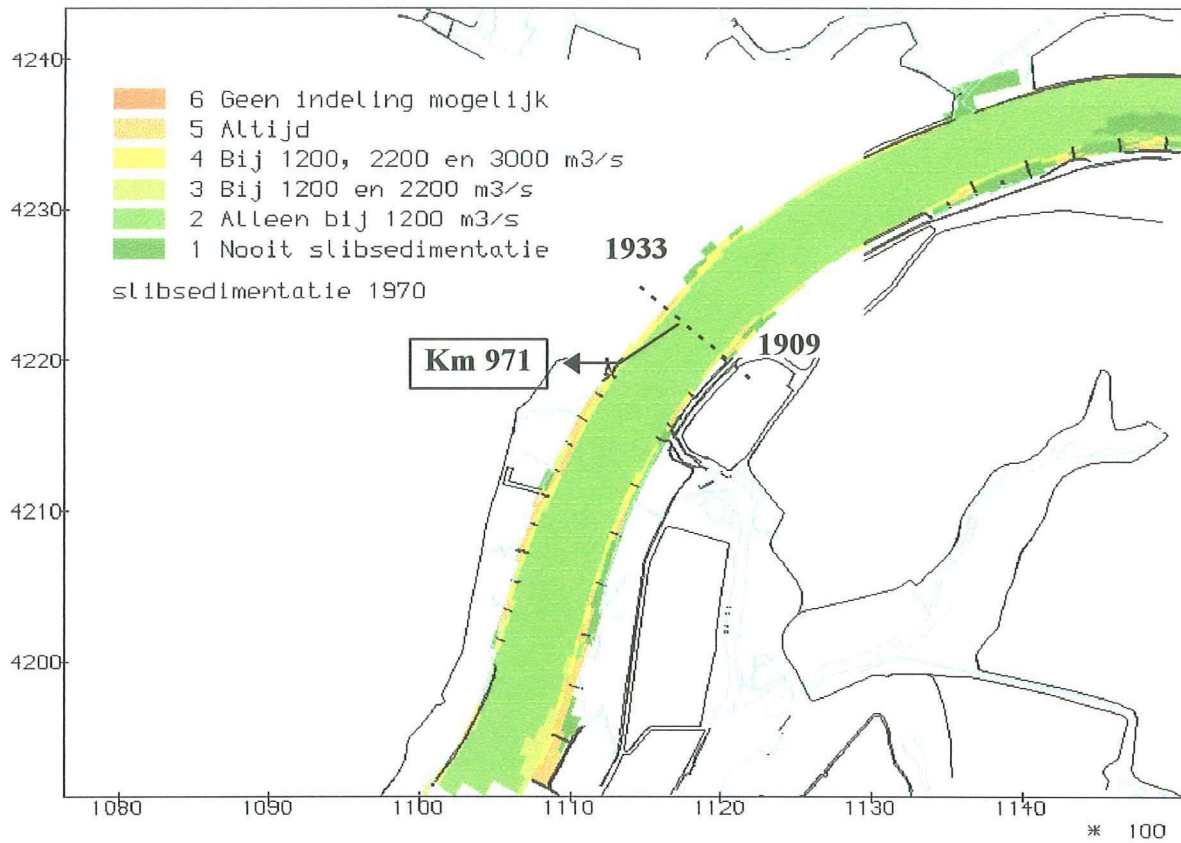
7.2.2 Verticale segregatie

Uit de boringen blijkt dat na de sluiting in de binnenbocht eerst veel slib is afgezet met mogelijk daaroverheen een dunne zandlaag. Over de verticale ontwikkeling van de buitenbocht is niets bekend.

In **Figuur 7-6** en **Figuur 7-7** is de klasse-indeling voor zand en slib in 1970 weergegeven.



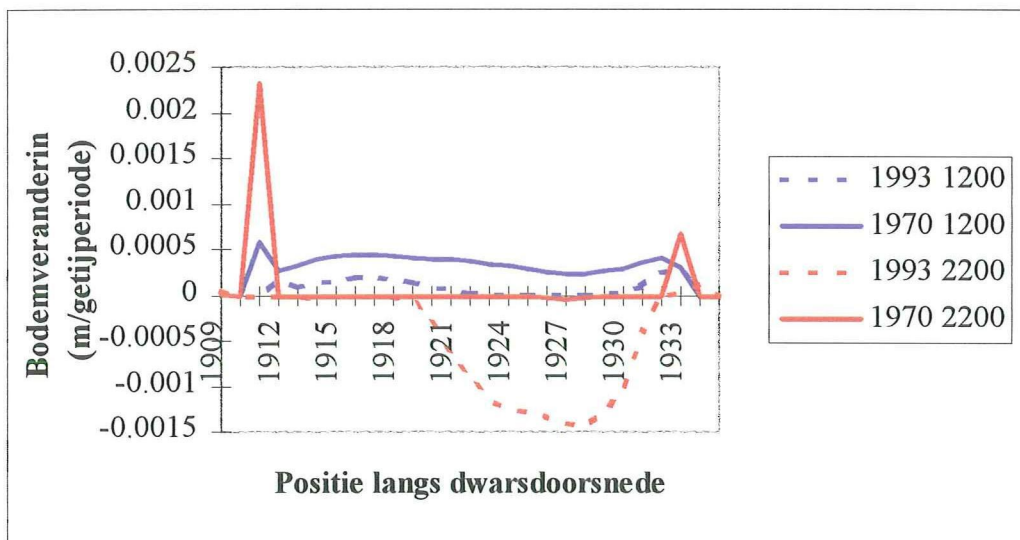
Figuur 7-6 Klasse-indeling zand km 968 - 975 (1970)



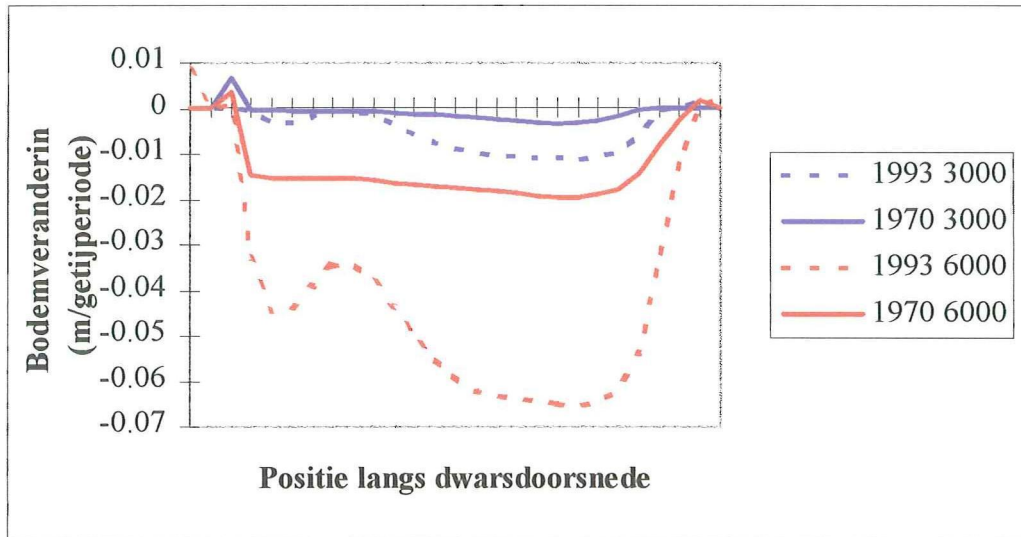
Figuur 7-7 Klasse-indeling silt km 968 - 975 (1970)

Uit het model van 1970 blijkt dat op dit traject in de binnenbocht alleen onder 6000 m³/s zandtransport optreedt en tot 1200 m³/s over de volle breedte slibsedimentatie plaatsvindt (Figuur 7-6 en 7-7).

Om meer in detail te kijken is een dwarsdoorsnede getekend voor 1970 en 1993 ongeveer ter plaatse van km 971 (Figuur 7-7). In deze dwarsdoorsnede is aangegeven hoeveel sedimentatie of erosie van silt optreedt gedurende de getijperiode onder de verschillende afvoeren (Figuur 7-8 en Figuur 7-9).



Figuur 7-8 Slibsedimentatie en -erosie bij 1200 en 2200 m³/s (km 971)



Figuur 7-9 Slibsedimentatie en -erosie bij 3000 en 6000 m³/s (km 971)

Uit de figuren blijkt dat de grote verschillen optreden bij afvoeren van 2200 en 3000 m³/s. In 1970 was onder deze afvoeren geen (of nauwelijks) sprake van erosie over de volle breedte (!), terwijl in 1993 bij 2200 m³/s al erosie optreedt in de buitenbocht en bij 3000 m³/s over de gehele breedte. Ook de grootte van de afzetting onder de lage afvoer ($Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$) verschilt aanzienlijk. In de geul wordt in 1993 nauwelijks meer slib afgezet terwijl in 1970 nog over de volle breedte sprake is een flinke afzetting. Ook uit **Figuur 6-4** en **6-5** kan voor dit traject geconcludeerd worden dat de sedimentatie op jaarbasis ten gevolge van de lage en gemiddelde afvoer in 1970 aanzienlijk groter was dan in 1993.

De gevonden verticale zand-slibstructuur kan hiermee als volgt verklaard worden. De forse slibafzettingen op de bank na de sluiting zijn veroorzaakt door de grote slibsedimentatie onder lage afvoer en de nauwelijks eroderende sliblaag bij 2200 en 3000 m³/s.

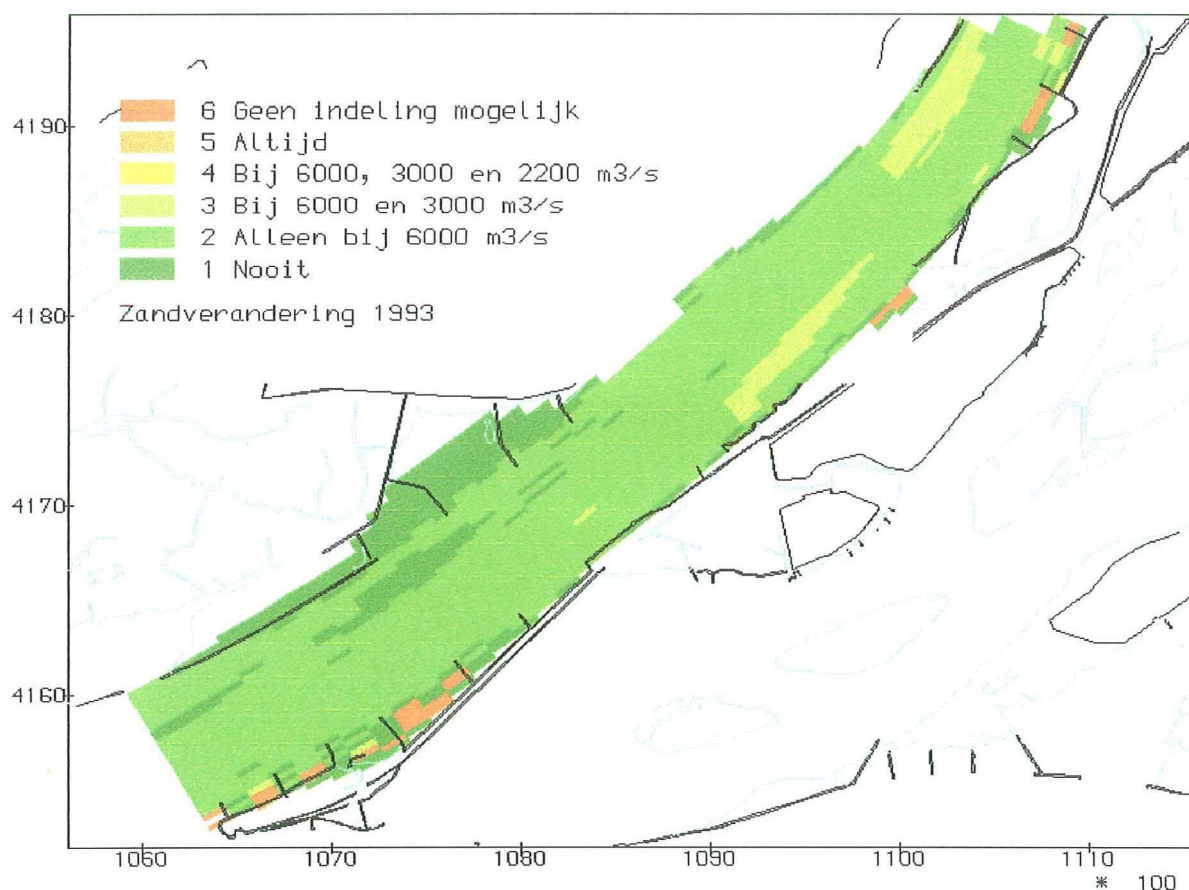
Mogelijk is de droge periode direct na de sluiting mede de oorzaak geweest van de dikke sliblagen in de boringen. Na de sluiting is sprake van een zeer droge periode. De eerste hoge afvoer na de sluiting dateert van kerst 1974 (!) met $Q_{br} = 5900 \text{ m}^3/\text{s}$. Tussen half juni 1971 en november 1972 was de Bovenrijnafvoer altijd (!) lager dan het lange-termijn gemiddelde $Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$.

7.3 Traject km 975 - km 979

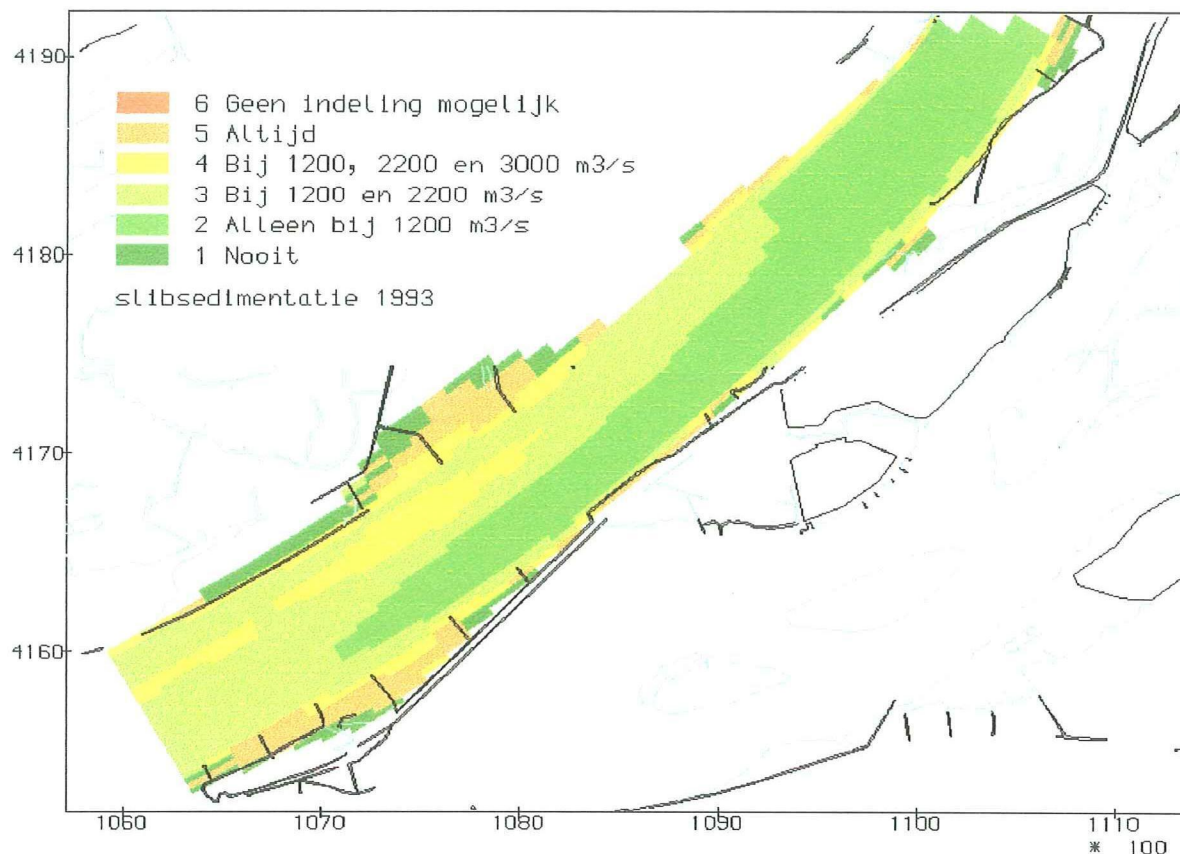
7.3.1 Horizontale segregatie

Uit de boringen en de monsters blijkt dat de Nieuwe Merwede in het benedenstroomse traject hoofdzakelijk zandig was in 1992. Het slibpercentage in de geul varieert van 8 tot 15% bij respectievelijk km 975.5 en km 977. Ook de bank aan de benedenstroomse rand is hoofdzakelijk zandig. In de kribvakken is het slibpercentage hoog (globaal 50%).

In **Figuur 7-10** en **Figuur 7-11** is de klasse-indeling voor zand en slib weergegeven.



Figuur 7-10 Klasse-indeling zand km 975 - 979 (1993)



Figuur 7-11 Klasse-indeling slib km 975 - 979 (1993)

Op basis van het model kan geconcludeerd worden dat het lage slibpercentage wordt veroorzaakt door de te hoge stroomsnelheden in de geul. Alleen bij lage afvoer is sprake van slibsedimentatie. Uit **Figuur 6-4** blijkt dat de sedimentatie op jaarbasis onder lage afvoer toeneemt in benedenstroomse richting. Dit is mogelijk een verklaring voor de toename in het slibpercentage in de geul.

Op de bank aan de benedenstroomse rand komen gebieden voor met slibsedimentatie tot $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Zandtransport treedt in dit traject alleen op bij $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ in de (sommige gedeelten van) de geulen bij $Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$ op de bank.

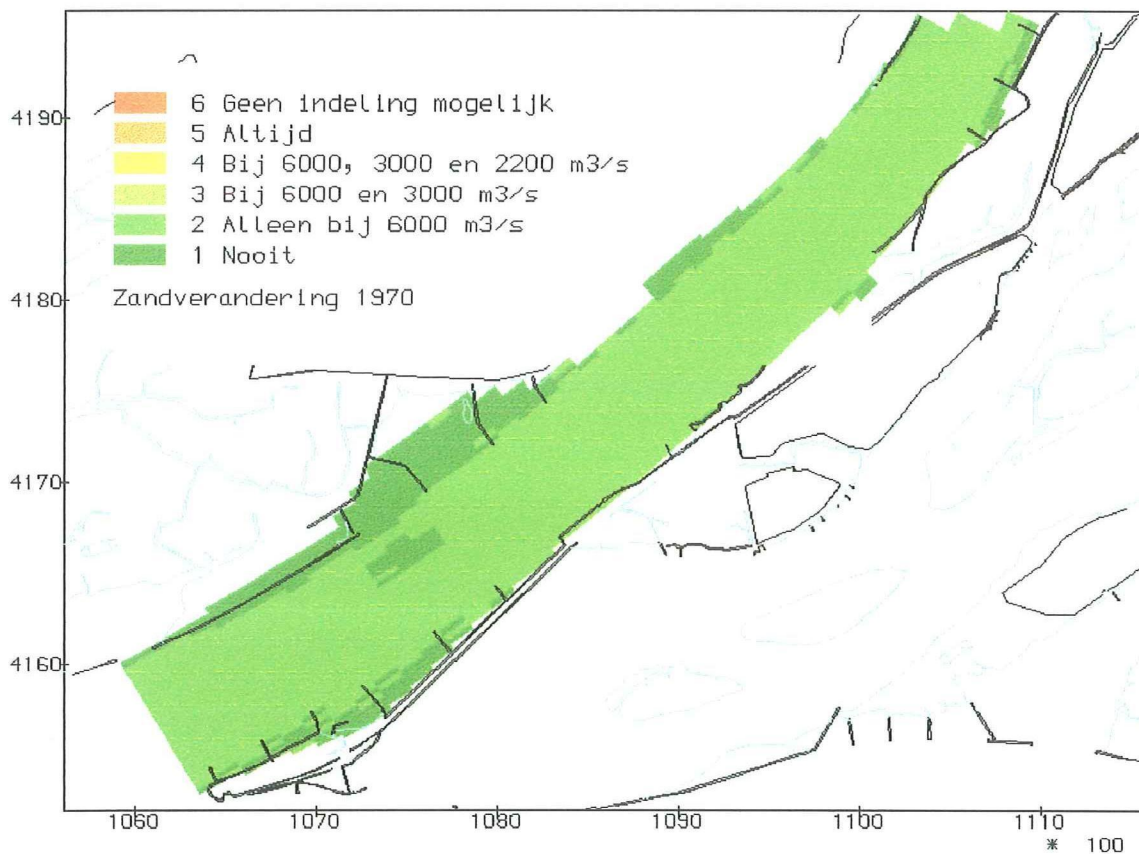
Uit de bodemmonsters en de boringen blijkt echter dat beide hoofdzakelijk zandafzettingen laten zien in de toplaag van de benedenstroomse bank met daaronder dikke slibafzettingen. Mogelijk is de hoge afvoer van kerst 1991 ($5900 \text{ m}^3/\text{s}$) en de afwezigheid van een langdurige droge periode mede de oorzaak geweest van een laag slibpercentage op de benedenstroomse bank.

In de kribvakken treedt flinke slibsedimentatie op. Ook hier is weer sprake van sedimentatie verder van geul bij hogere afvoeren, net als in de bovenstroomse trajecten. Net als bij de monsters NM10 en NM2B wordt het lage slibpercentage ter plaatse van NM5B (3%) waarschijnlijk veroorzaakt door de lokatie ten opzichte van de geul en de ligging ten opzichte van de krib.

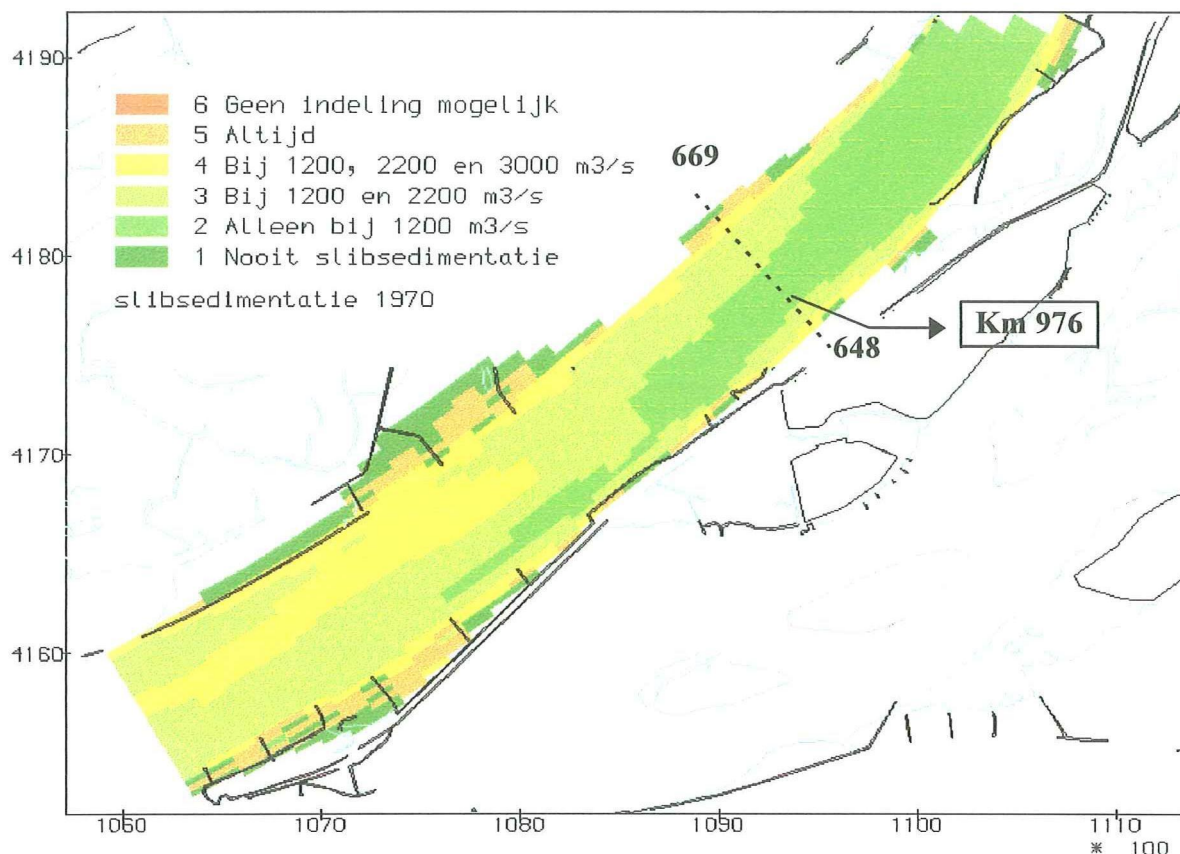
7.3.2 Verticale segregatie

Uit de boringen blijkt dat zowel in de geul als op de bank eerst een flinke sliblaag is afgezet. In deze sliblagen komen dunne zandlenzen voor. Daarna zijn deze sliblagen afgedekt met een dunne laag zand van enkele tientallen centimeters. Dit vormde de toplaag in 1992.

In **Figuur 7-12** en **Figuur 7-13** is de klasse-indeling voor 1970 weergegeven voor zand en slib.



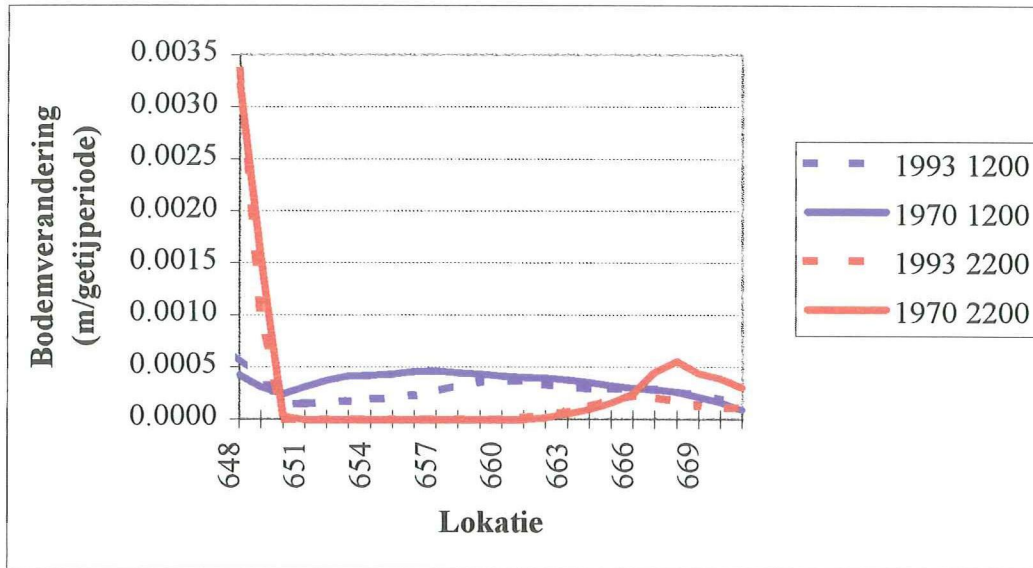
Figuur 7-12 Klasse-indeling zand km 975 - 979 (1970)



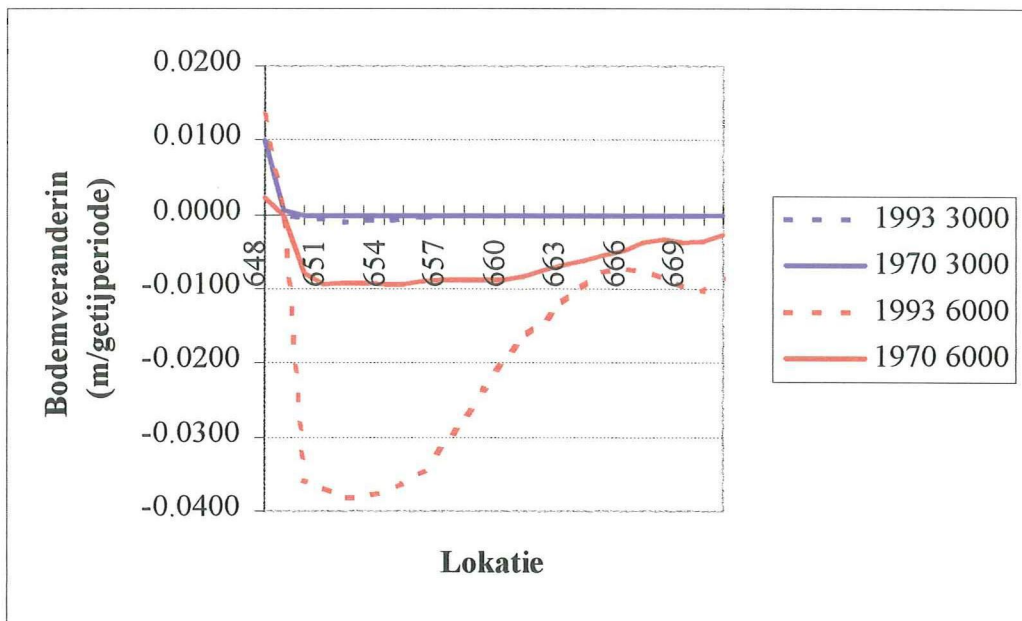
Figuur 7-13 Klasse-indeling slib km 975 -979 (1970)

Ook op dit traject blijkt uit het model van 1970 dat alleen onder hoge afvoer ($Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$) zandtransport optreedt. Tevens blijkt dat onder lage afvoeren en gemiddelde afvoeren slibsedimentatie over de volle breedte plaatsvindt van km 977. Op de bank bij de benedenstroomse rand treedt zelfs tot $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ slibsedimentatie op.

Om meer in detail te kijken is een dwarsdoorsnede getekend voor 1970 en 1993 ongeveer ter plaatse van km 976 (Figuur 7-13). In deze dwarsdoorsnede is aangegeven hoeveel sedimentatie of erosie van slib optreedt gedurende de getijperiode onder de verschillende afvoeren (Figuur 7-14 en Figuur 7-15).



Figuur 7-14 Slibsedimentatie en -erosie bij 1200 en 2200 m³/s (km 976)



Figuur 7-15 Slibsedimentatie en -erosie bij 3000 en 6000 m³/s (km 976)

Uit de figuren kan geconcludeerd worden dat bij 3000 m³/s in 1993 wel en in 1970 geen sliberosie optreedt. Verder blijkt dat in 1993 bij 6000 m³/s veel meer sliberosie optreedt dan in 1970.

Uit de modelresultaten kan geconcludeerd worden dat de flinke slibafzettingen met af en toe een zandlens in dit traject een gevolg is geweest van de afvoervariatie. Gedurende een gedeelte van het jaar is sprake geweest van slibafzettingen in de geul bij lage afvoeren en op de benedenstroomse bank tot 3000 m³/s. Bij hoge afvoeren is dit (misschien na erosie) afgedekt met een laagje zand.

De zandige toplaag in 1992 is mogelijk het gevolg van de hoge afvoer van kerst 1991 ($Q_{br} = 5900 \text{ m}^3/\text{s}$) en de afwezigheid een langdurige periode met lage afvoeren tussen kerst 1991 en juni 1992.

8. Conclusies

In dit rapport is aangetoond dat het goed mogelijk is de grootschalige zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede, *een rivier met een dominante bovenafvoer en schijngetij*, te verklaren. De resultaten van het model komen kwalitatief en soms kwantitatief goed overeen met de boringen, de bodemmonsters en de lodingen. Het voorspellen van deze zand-slibstructuren is van belang om de gedragskennis van gebieden in rivieren en estuaria, waar zowel zand en slib een rol spelen, uit te breiden.

Op de onderzoeksvragen (1.2) kunnen de volgende antwoorden gegeven worden:

8.1 Zand-slibmodellering

Uit dit onderzoek blijkt dat het mogelijk is om met behulp van een *2DH-sedimenttransportmodel* voor zand en slib *zonder onderlinge interactie* de waargenomen zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede, zowel horizontaal als verticaal, *kwalitatief* te modelleren.

Echter, er is geen sprake van een enkele sedimenttransportberekening. De oorzaak hiervan ligt enerzijds in het feit dat de waterbeweging op de Nieuwe Merwede sterk afhankelijk is van de Bovenrijnafvoer. Om meer inzicht te krijgen in de invloed van deze afvoervariatie op het sedimenttransport is gekozen voor vier representatieve afvoersituaties.

Anderzijds bleek uit de literatuur dat voor het consolidatie- en erosiegedrag van zand-slibmengsels nog nauwelijks bruikbare formules zijn. Op basis daarvan zijn voor zand en voor slib aparte berekeningen gemaakt voor de Nieuwe Merwede waarbij respectievelijk een volledige zandbodem en een volledige slibbodem gebruikt is.

Uit de resultaten van de zandberekening kan geconcludeerd worden dat het jaarlijks transport van zand op de bovenrand van de Nieuwe Merwede goed overeenkomst met de gevonden waarde in de literatuur. Tevens is gebleken dat het zandmodel - bij opsplitsing van de Nieuwe Merwede in drie secties - goed de gemeten sedimentatietendens beschrijft.

Uit de resultaten van de slibberekening bleek dat de transporten door de verschillende dwarsdoorsneden bij hogere afvoeren in benedenstroomse richting sterk toenamen. Dit wordt veroorzaakt door uit te gaan van een volledige slibbodem. Bij hogere afvoeren treedt veel erosie op in het bovenstroomse traject, terwijl uit de monsters en de boringen blijkt dat daar waarschijnlijk nauwelijks slib ligt, de Nieuwe Merwede is hoofdzakelijk zandig. Door uit te gaan van een volledige slibbodem is het onmogelijk om met dit model kwantitatieve uitspraken te doen, met name voor slib.

8.2 Verklaringen zand-slibstructuren

Uit dit onderzoek komen de volgende verklaringen naar voren omtrent zand-slibsegregatie in gebieden met dominante bovenafvoer en schijngetij:

Sedimenteigenschappen

- Een belangrijke verklaring voor zand-slibsegregatie is het grote verschil in dieptegemiddelde, kritische sedimentatiesnelheid van zand (0.40 m/s) en slib (0.15 m/s). Dit grote verschil wordt veroorzaakt door het verschil in korreldiameter. Het gevolg is dat onder een gegeven bovenafvoer nauwelijks gebieden bestaan waar zowel zandtransport (sedimentatie/erosie) als slibsedimentatie optreedt. De boringen met duidelijk afwisselende zand- en sliblagen en nauwelijks gemengde zand-sliblagen in de geul van de Nieuwe Merwede ondersteunen deze conclusie.

Hydrodynamische omstandigheden

- Uit de berekeningen voor verschillende bovenafvoeren blijkt dat de afvoervariatie een belangrijke, zo niet overheersende rol, heeft gespeeld in de vorming van de waargenomen zand-slibstructuren in de Nieuwe Merwede. De boringen in het benedenstroomse gedeelte met dikke sliblagen en zandlenzen wijzen erop dat gedurende langere tijd slibsedimentatie kan plaatsvinden, waarna bij een hoge afvoer een laagje zand wordt afgezet.

Obstakels

- Het blijkt dat kribben een belangrijke invloed kunnen hebben op het afzettingspatroon van slib. Voor gebieden aan de bovenstroomse kant van een krib kan onder alle afvoeren sprake zijn van slibsedimentatie, terwijl juist aan de benedenstroomse kant nooit sedimentatie van slib optreedt. Daarnaast blijkt dat bij hogere afvoeren het slibsedimentatiefront dieper in het kribvak komt. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door een grotere advectie en dispersie ten gevolge van de toename in de stroomsnelheden. Dit verklaart mogelijk waarom sommige monsters - ondanks de geringe waterbeweging - een zeer laag slibpercentage hebben. Deze liggen gewoonweg te ver van de geul en zowel slib als zand is onder alle afvoeren inmiddels gesedimenteerd voordat deze gebieden bereikt worden.

8.3 Gedragkennis Nieuwe Merwede

Uit dit onderzoek volgen een aantal belangrijke conclusies met betrekking tot de gedragkennis van de Nieuwe Merwede en het Noordelijk Deltabekken. Deze kennis kan mogelijk gebruikt worden door het RIZA bij andere studies.

• Literatuurgegevens

De zandgegevens uit de sedimentbalans van Van Dreumel (1995) voor de periode (1982 - 1992) zijn waarschijnlijk onjuist voor de Nieuwe Merwede. Zowel uit de één-dimensionale ontwikkeling van Rijkswaterstaat (RWS, 1990) en de Universiteit van Utrecht (1993) als de modelresultaten blijkt dat de Nieuwe Merwede voor 1993 niet op evenwicht was. Ook de lodingsverschillen tussen 1993 en 1994 wijzen op een netto sedimentatie.

Dit heeft daarnaast tot gevolg dat de zandgegevens van Van Dreumel (1995) voor gebieden benedenstrooms van de Nieuwe Merwede, zoals het Hollandsch Diep en het Haringvliet waarschijnlijk ook onjuist zijn.

In de literatuur wordt door Kuijper (1995) en Van Dreumel (1995) voor de Nieuwe Merwede een jaarlijks zandtransport genoemd van 0.8 en $0.4 \cdot 10^9$ kg/jaar. Uit de modelresultaten blijkt dat het al dan niet optreden van hoge afvoeren op de Nieuwe Merwede het jaarlijks zandtransport drastisch kunnen beïnvloeden. Uit de modelresultaten blijkt dat voor het relatief natte jaar 1993 het jaarlijks transport ongeveer $0.8 \cdot 10^9$ kg is, terwijl voor een gemiddeld hydrologisch jaar over de periode 1970-1992 het jaarlijks transport ongeveer $0.4 \cdot 10^9$ kg is.

- **Waterbeweging**

Voor het 2DH-model van de Nieuwe Merwede is gebruik gemaakt van de - voor het gehele gebied geldende - ruwheidsparameter van het 2DH-model voor de Zuidrand. Uit berekeningen blijkt dat de ruwheid grote invloed heeft op de waterstanden. Echter, het is niet aannemelijk dat de geul met beddingvormen (zandduinen, ribbels) en de slibrijke platen en de kribvakken (geen beddingvormen) dezelfde ruwheid hebben. Daarnaast kan de ruwheid onder verschillende afvoeren variëren door variaties in de afmetingen van de beddingvormen. Voorspellingen van de waterstanden met behulp van dit soort modellen vormen een belangrijk onderdeel in de strijd tegen de hoge rivierafvoeren. Met behulp van berekeningen worden maatgevende waterstanden bepaald voor de benodigde dijkhoogten langs de benedenrivieren. Gezien de sterke variatie van de waterstanden is meer onderzoek naar de ruwheidsparameters noodzakelijk om de waterstanden beter te voorspellen.

- **Zandtransport**

Uit de modelresultaten blijkt dat het jaarlijks zandtransport op de Nieuwe Merwede goed beschreven wordt met de vereenvoudigde vergelijkingen van Van Rijn. Daarnaast blijkt dat het suspensietransport overheerst ten opzichte van het bodemtransport. Globaal wordt 85% van het totale, jaarlijkse transport getransporteerd in suspensie.

Alleen bij hoge afvoeren ($Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$) is sprake van zandtransport over de benedenstroomse rand van de Nieuwe Merwede. Tot minimaal $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ kan zandtransport op het Hollandsch Diep verwaarloosd worden.

- **Slibtransport**

Voor een lange-termijn benadering kan gebruik gemaakt worden van het bepaalde verband tussen de slibconcentratie en de Bovenrijnafvoer bij Lobith. Deze vergelijking geeft in combinatie met een lange-termijn exponentiële kansverdeling voor de Bovenrijnafvoer een goede schatting voor het jaarlijks slibtransport bij Lobith. Onder de aanname dat het slib zich evenredig verdeelt met de afvoer kan deze vergelijking eenvoudig toegepast worden voor andere riviertakken in het Noordelijk Deltabekken.

8.4 Verwachtingen

Op basis van de modelresultaten verwacht ik dat - gezien de grote invloed van de afvoervariatie op het sedimentatiepatroon - de tijdsafhankelijke sterkte-ontwikkeling van de slibbodem mogelijk een zeer belangrijke parameter is. Gedurende lange, droge perioden bijvoorbeeld kan de slibbodem consolideren, waardoor de kritische, diepte-gemiddelde erosiesnelheid fors kan toenemen. Door deze toename treedt bij hogere afvoeren mogelijk geen of veel minder erosie van de slibbodem op.

Verder wijzen de verschillen tussen geul en kribvakken erop, dat zand-slibsegregatie in de geul hoofdzakelijk hydrodynamische oorzaken heeft, terwijl segregatie in de kribvakken mogelijk door de afstand tot de geul en de ligging ten opzichte van de kribben bepaald wordt. Mogelijk ligt hier de oorzaak van de niet gevonden correlatie tussen de waterdiepte en het slibpercentage op de Nieuwe Merwede - in tegenstelling tot de Westerschelde (Wang, 1997). Toepassing van een gecombineerd zand-slibmodel voor een estuarium is mogelijk eenvoudiger, aangezien geen rekening gehouden hoeft te worden met afvoervariatie. Hierdoor is slechts voor een sedimenttransportmodel slechts een berekening nodig. Aan de andere kant zullen andere processen het model ingewikkelder maken. Te denken valt hierbij aan de invloed van windgolven en het optreden van flocculatie door de aanwezigheid van zout.

8.5 Aanbevelingen

Fysische processen

- Het is noodzakelijk de kennis van het (tijdsafhankelijke) erosie- en consolidatiegedrag van slibbodems en zand-slibbodems te vergroten en om bruikbare erosie- en consolidatieformuleringen af te leiden voor zand-slibmodellen.
- In deze studie is onderzoek gedaan naar de vorming van zand-slibstructuren in gebieden met een dominante bovenafvoer en schijngetij. Voor een meer algemeen model zal het onderzoek uitgebreid moeten worden in de richting van getijgebieden met mogelijk invloed van windgolven. Een onderzoeksgebied is bijvoorbeeld de Westerschelde.

Modellering

- Aangezien de sedimenttransportberekeningen voor zand en slib onder verschillende afvoeren niet leidt tot een kwantitatieve voorspelling van het slibpercentage in de bodem en de berekeningen veel tijd kosten is dit model niet geschikt voor het voorspellen van slibpercentages in de bodem. Wel kan het model verder uitgebreid worden om meer inzicht te krijgen in de oorzaken van de waargenomen zand-slibstructuren. Mogelijkheden hiervoor zijn:
 - onderzoek naar de mogelijkheid of het slib- en zandtransport berekend kan worden op basis van getij-gemiddelde grootheden. Dit levert een grote besparing in de rekentijd;
 - integratie van zand en slib in een model met een bruikbare erosieformulering;
 - toepassing van een bodemmodule met een tijdsafhankelijke sterkteontwikkeling van de zand-slibbodem;
 - toepassing van meerdere fracties voor zand.
- Daarnaast is het zinvol om LHEC verder te ontwikkelen om hiermee een eenvoudig gereedschap te hebben voor de voorspelling van het slibpercentage. Hierbij moet gelet worden op de volgende punten:
 - voor de berekening van LHEC zijn onjuiste waterstandsrandvoorwaarden bij afvoeren hoger dan $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ gebruikt;
 - LHEC moet alleen toegepast worden voor de geul en niet in kribvakken. Voor de gebieden in de kribvakken is deze methode ongeschikt omdat uit de modelresultaten blijkt dat hier de kribben slibaanvoer kunnen blokkeren en op sommige plaatsen lage slibpercentages veroorzaken;
 - Mogelijk kan een relatie gevonden worden tussen een 'jaargemiddelde' LHEC en het gemeten slibpercentage in de bodem.

- Tenslotte lijkt het zinvol om de waterbeweging en het sedimenttransport in kribvakken meer in detail te bekijken. Uit de modelresultaten volgt dat mogelijk de afstand tot de geul, de geometrie en de afvoervariatie belangrijke parameters zijn voor het slibpercentage. Het moet mogelijk zijn om met een fijnmazig rooster de oorzaken van zand-slibsegregatie in kribvakken beter te begrijpen.

Metingen

- Uit de berekeningen blijkt dat het bovenstroomse gedeelte van de Nieuwe Merwede hoofdzakelijk zandig is; alleen bij lage afvoer sedimenteert hier slib. Deze conclusie wordt gesteund door de sedimentbalans van Van Dreumel (1992). Vooral in het benedenstroomse traject is sprake van slibsedimentatie. Bij het bemonsteren van de Nieuwe Merwede is het derhalve niet zinvol om veel monsters te nemen op het bovenstroomse traject. De bemonstering moet zich concentreren op het benedenstroomse gedeelte.
- Tevens blijkt dat de kribben mogelijk een belangrijke rol spelen in de aanwezige zand-slibstructuur in het kribvak. Het lijkt daarom meer zinvol om in een kribvak in detail het slibpercentage van de toplaag te bepalen dan in meerdere kribvakken een monsters te nemen. Met deze monsters zou het model voor een kribvak geverifieerd kunnen worden.
- Uit de berekeningen blijkt een sterke afhankelijkheid van zandtransport en slibsedimentatie van de Bovenrijnafvoer. Om deze conclusie te onderbouwen is bemonstering na een langdurige droge periode (globaal afvoeren kleiner dan 2200 m³/s) en bemonstering direct na een hoge afvoer een idee.

DELWAQ

Het is aan te bevelen om eenvoudige opties te programmeren om het gebruik van DELWAQ te vereenvoudigen. Gedacht kan worden aan het presenteren van de concentraties op bepaalde punten gedurende de getijperiode, het berekenen van een getij-gemiddeld transport door een dwarsdoorsnede, de bodemontwikkeling tijdens de getijperiode, etc.

Literatuur

Battjes, prof.dr.ir. J.A., *Korte Golven*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Delft

Battjes, prof.dr.ir. J.A., *Windgolven*, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Delft

Boogaard, H.F.P. van den, Kuijper, C., 1995, *Statistical Analysis of Mud and Sand beds*, Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics, Nederland

Chesher, T.J., Ockenden, C., 1997, *Numerical modelling of mud and sand mixtures*, 4th Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference, INTERCOH '94, Wallingford, England

Dollee, A.W., Winterwerp, J.C. (red.), 1989, *Slibonderzoek*, Rijkswaterstaat, Waterloopkundig laboratorium, Nederland

Dreumel, P. van, Dekker, A., 1990, *Bodemontwikkeling Noordelijk Deltabekken, Sedimentatie/Erosie*, Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland, afd. Analyse Rivier- en Grondwatersystemen.

Dreumel, P.F. van, 1995, *Slib- en zandbeweging in het Noordelijke Deltabekken in de periode 1982- 1992*, Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland, afd. Watersysteemkennis, Nederland

Dreumel, P.F. van (red.), 1997, *Zuidrand Noordelijke Deltabekken sediment- en stroommeting tijdens hoge afvoer van Rijn en Maas januari/februari 1995*, Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland, afd. Watersysteemkennis, Nederland

Dyer, K.R., 1986, *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*, John Wiley & Sons, Chichester.

Haring, J.C., 1977, *De geschiedenis van de ontwikkeling van de waterbeweging en het profiel van de rivieren in het Noordelijk Deltabekken over de perioden 1870 - 1970 - 1976*, Deel I - De periode 1870 - 1970, Directie Waterhuishouding en waterbeweging, Rijkswaterstaat

Haring, J.C., 1978, *De geschiedenis van de ontwikkeling van de waterbeweging en het profiel van de rivieren in het Noordelijk Deltabekken over de perioden 1870 - 1970 - 1976*, Deel II - De periode 1970 - 1976 Supplement, Directie Waterhuishouding en waterbeweging, Rijkswaterstaat

Jansen, P.Ph. (ed.), 1979, *Principles of River Engineering, the non-tidal alluvial river*, Delftsche Uitgevers Maatschappij, Delft, Nederland

Kuijper, C., 1995, *Natural sand-mud beds, analysis of field measurements on the Nieuwe Merwede*, Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics, Nederland

Kuijper, C., 1995, *Natural Sand-Mud Beds, Definition Study with emphasis on the Nieuwe Merwede*, Delft Hydraulics, Nederland

Kuijper, C., 1995b, *Effect of sand on mud properties*, Waterloopkundig Laboratorium, Delft

Kuijper, C., 1995c, *Assessment of criteria for modelling of natural sand-mud beds*, Z743.50, Delft Hydraulics, Delft

Rijkswaterstaat, 1987, *Waterbeheersing Noordelijk Deltabekken m.b.v. lozingsprogramma Haringvlietsluizen (LPH -'84) verticale en horizontale waterbeweging, deel II: rekenresultaten; grafische presentatie*, Directie Benedenrivieren, afdeling kennis en Informatie Watersystemen

Rijn, L.C. van, 1993, *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, Aqua publications, Amsterdam

Torfs, H., 1995, *Erosion of mud/sand mixtures*, Katholieke Universiteit Leuven, faculteit der Toegepaste Wetenschappen, Departement Burgelijke Bouwkunde, Laboratorium voor Hydraulica

Wang, Z.B., 1996, *Basic theory for predicting bed composition, Cohesive Sediments (rep. 51)*, Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics

Wang, Z.B., 1996, *LHEC, A model for predicting mud content in the bed, pilot application in the Nieuwe Merwede*, Cohesive Sediments (rep. 53), Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics.

Waterloopkundig Laboratorium, 1991, *Integrale zand-slib modellering voor het Noordelijk Deltabekken*, Inventarisatie en voorstel modelopzet, Waterloopkundig Laboratorium Z71-11, Nederland

Waterloopkundig Laboratorium, 1988, *Morfologisch onderzoek Noordelijk Deltabekken*, Morfologische modellering, Deel I Inleiding en samenvatting

Waterloopkundig Laboratorium, 1988, *Morfologisch Onderzoek Noordelijk Deltabekken*, Case-study Werkendam, Delft, Nederland

Winterwerp, J.W., 1989, *Flow induced erosion of cohesive beds (report 25), A literature survey*, Rijkswaterstaat, Delft Hydraulics, Nederland

Nawoord

Dit afstudeerwerk vormt het einde van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit van Delft. Ik denk met veel plezier terug aan dit project en de samenwerking met de volgende personen:

In de eerste plaats wil ik drs. Erik-Jan Houwing hartelijk bedanken voor de mogelijkheid die hij mij geboden heeft om het afstudeeronderzoek uit te voeren bij het RIZA in Dordrecht. Ook de begeleiding is bijzonder waardevol geweest en ik denk hier met veel plezier aan terug. Het veldwerk op de Nieuwe Merwede (september 1998) was een mooi slot van mijn afstudeeronderzoek!

Daarnaast wil ik ing. Johan van Zetten bedanken voor zijn hulp bij de computermodellen WAQUA en DELWAQ. De overige werknemers van het RIZA wil ik graag bedanken voor de praktische adviezen.

Tenslotte wil ik prof.dr.ir. H.J. De Vriend en dr. Z.B. Wang (TU Delft) bedanken voor hun inzet om dit afstudeerproject tot een goed einde te brengen.

Appendix A. Schatters

Met behulp van schattingsmethoden kunnen de coëfficiënten van de kansverdeling worden geschat. Voor rivierafvoeren wordt over het algemeen een exponentiële kansverdeling aangenomen.

$$P_{\underline{Q}}(Q_{br}) = 1 - e^{-\frac{Q_{br}-A}{B}} \quad (\text{A.1})$$

waarin:

$P_{\underline{Q}}(Q_{br})$ = kans dat de afvoer kleiner is dan Q_{br} [-]

Q_{br} = Bovenrijnafvoer [m^3/s]

A = coëfficiënt [m^3/s]

B = coëfficiënt [m^3/s]

De bijbehorende kansdichtheidsfunctie is als volgt:

$$p_{\underline{Q}}(Q_{br}) = \frac{1}{B} e^{-\frac{Q_{br}-A}{B}} \quad (\text{A.2})$$

waarin:

$p_{\underline{Q}}(Q_{br})$ = kansdichtheid van afvoer Q_{br} [s/m^3]

De beschikbare dataset van rivierafvoeren vanaf 1970 – 1993 is een verzameling $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$.

Appendix A.1 Maximum Likelihood

Een dataset $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ wordt opgevat als n realisaties van onafhankelijke, continue stochasten X_1, X_2, \dots, X_n met dezelfde kansdichtheidsfunctie p . In de verdere behandeling van de Maximum Likelihood Methode is gekozen voor een kansdichtheidsfunctie met twee parameters A en B , omdat de exponentiele kansverdeling twee parameters heeft. De methode kan voor een willekeurig aantal parameters toegepast worden.

De likelihoodfunctie is de waarde van de simultane kansdichtheid in de data. Vanwege (vooronderstelde) onafhankelijkheid is de likelihoodfunctie dan gedefinieerd als :

$$\ell(A, B | x_1, x_2, \dots, x_n) = p(x_1 | A, B) \times p(x_2 | A, B) \times \dots \times p(x_n | A, B) = \prod_{i=1}^n p(x_i | A, B) \quad (\text{A.3})$$

waarin:

$\ell(A, B | x_1, x_2, \dots, x_n)$ = likelihoodfunctie
 $p(x_i | A, B)$ = kansdichtheid x_i

Op plaatsen waar $\ell(A, B | x_1, x_2, \dots, x_n)$ maximaal is, zijn A en B het meest aannemelijk op grond van de dataset. Vaak is het handig om niet de likelihoodfunctie te bekijken maar de loglikelihoodfunctie $L(A, B)$. De functie $L(A, B)$ heeft op precies dezelfde plaatsen een maximum als $\ell(A, B | x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Deze is gedefinieerd als:

$$L(A, B | x_1, x_2, \dots, x_n) = \log \ell(A, B | x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$L(A, B | x_1, x_2, \dots, x_n) = \log p(x_1 | A, B) + \log p(x_2 | A, B) + \dots + \log p(x_n | A, B) = \sum_{i=1}^n \log p(x_i | A, B) \quad (\text{A.4})$$

De maxima van L zijn te vinden door L te differentieren naar A en B en beide afgeleides gelijk te stellen aan 0.

$$\frac{\partial L(A, B | x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial A} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial [\log p(x_i | A, B)]}{\partial A} = 0$$

$$\frac{\partial L(A, B | x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial B} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial [\log p(x_i | A, B)]}{\partial B} = 0$$

levert twee vergelijkingen met twee onbekenden A en B en is oplosbaar.

Voor een exponentiële kansverdeling met bijbehorende kansdichtheidsfunctie zijn bovenstaande vergelijkingen als volgt:

$$\ln p(x_i | A, B) = \ln \left[\frac{1}{B} e^{-\frac{Q_i - A}{B}} \right] = -\ln B - \left[\frac{Q_i - A}{B} \right]$$

$$L(A, B | Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = -n \ln B - \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{B} - \frac{nA}{B} \rightarrow A = Q_{(1)} \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\partial L(A, B | Q_1, Q_2, \dots, Q_n)}{\partial B} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \ln p(Q_i | A, B)}{\partial B} = \sum_{i=1}^n \left[-\frac{1}{B} + \frac{Q_i - A}{B^2} \right] = 0$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} - A = \overline{Q_i} - Q_{(1)} \quad (\text{A.6})$$

Uit de loglikelihoodfunctie L blijkt dat, ongeacht de waarde voor B , de likelihood als functie van A stijgend is tussen $-\infty$ en de kleinste waarde van Q uit de dataset, $Q_{(1)}$. Voor $A = Q_{(1)}$ treedt voor L een randmaximum op.

Uit de dataset voor de Bovenrijnafvoer volgt dat $A = 780 \text{ m}^3/\text{s}$ en $B = 1490 \text{ m}^3/\text{s}$. Het is echter zeer discutabel of de dagelijks gemeten rivierafvoeren stochastisch onafhankelijk zijn, aangezien hoogwaters meerdere dagen kunnen duren. Beter zou zijn om bijvoorbeeld de afvoer van iedere eerste dag van de maand te nemen.

Appendix A.2 Methode der Momenten

Deze methode benadert de theoretische momenten van de continue kansdichtheidsfunctie met behulp van de discrete waarden uit de dataset. Voor het schatten van een kansdichtheidsfunctie met twee onbekende parameters zijn twee momenten van de kansverdeling nodig. Meestal worden de eerste twee momenten gekozen.

Het k -de moment van een continue kansdichtheidsfunctie $p_x(x)$ is gedefinieerd als volgt:

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_1)^k p_x(x) dx \quad (\text{A.7})$$

$$\mu_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x p_x(x) dx$$

Het eerste en tweede moment van de kansdichtheidsfunctie worden respectievelijk de verwachtingswaarde en de variantie genoemd. Voor een exponentiële kansdichtheidsfunctie zijn de eerste twee momenten uitgedrukt in de parameters A en B :

$$\mu_1 = \frac{1}{B} \int_A^{\infty} x e^{-\frac{x-A}{B}} dx = A + B \quad (\text{A.8})$$

$$\mu_2 = \frac{1}{B} \int_A^{\infty} (x - \mu_1)^2 e^{-\frac{x-A}{B}} dx = B^2 \quad (\text{A.9})$$

Het m -de moment van een dataset $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ is:

$$m_k = \sum_{i=1}^n p_i [x_i - m_1]^k \quad (\text{A.10})$$

$$m_1 = \sum_{i=1}^n p_i x_i$$

Wanneer wordt uitgegaan een kans $p_i = 1/n$ kunnen de eerste twee momenten als volgt uitgedrukt worden in termen van de dataset $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$:

$$m_1 = \sum_{i=1}^n p_i x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}_i \quad (\text{A.11})$$

$$m_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}_i]^2$$

Gelijkstelling van de momenten van de continue kansdichtheidsfunctie en de momenten van de discrete verzameling levert voor de parameters A en B :

$$\mu_2 = m_2 \rightarrow B = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}_i]^2} \quad (\text{A.12})$$

$$\mu_1 = m_1 \rightarrow A + B = \bar{x}_i \rightarrow A = \bar{x}_i - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}_i]^2} \quad (\text{A.13})$$

Uit de dataset voor de Bovenrijnafvoer volgt dat $A = 1046 \text{ m}^3/\text{s}$ en $B = 1194 \text{ m}^3/\text{s}$.

Appendix A.3 Kleinste Kwardraten Methode

Deze methode is gebaseerd op het minimaliseren van het kwardraat van de afstand tussen de gegevens van de dataset en de aangenomen kansverdeling. In formulevorm:

$$F = \min \sum_{i=1}^n [(px_i + q) - y_i]^2 \quad (\text{A.14})$$

De kwardratische fout F moet geminimaliseerd worden. Door F te differentiëren naar de coëfficiënten p en q worden de minima van F gevonden door de afgeleides gelijk aan 0 te stellen. Dit levert:

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i^2 - 2y_i px_i + (px_i)^2 + 2qpx_i + q^2 - 2qy_i)$$

$$\frac{\partial F}{\partial p} = \sum_{i=1}^n (-y_i x_i + px_i^2 + qx_i) = 0 \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{\partial F}{\partial q} = \sum_{i=1}^n (+px_i + q - y_i) = 0 \quad (\text{A.16})$$

Voor rivierafvoeren wordt een exponentiele kansverdeling aangenomen. De discrete kansverdeling behorende bij de dataset kan als volgt worden geschreven:

$$P_{\underline{Q}}(Q_i) = \frac{i}{N + 1} \quad (\text{A.17})$$

Gelijkstellen en transformatie levert:

$$P_{\underline{Q}}(Q) = P_{\underline{Q}}(Q_i)$$

$$\ln P_{\underline{Q}}(Q) = \ln P_{\underline{Q}}(Q_i)$$

$$\ln \left[\frac{i}{N + 1} \right] = \frac{1}{B} Q_i - \frac{A}{B}$$

Bovenstaande vergelijking is een lineair verband tussen Q_i en i . Vervolgens wordt het linkerlid gelijk te stellen aan y_i en het rechterlid aan $px_i + q$.

Dit levert:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i}$$

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{p}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$p = \frac{1}{B}$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i} \quad (\text{A.18})$$

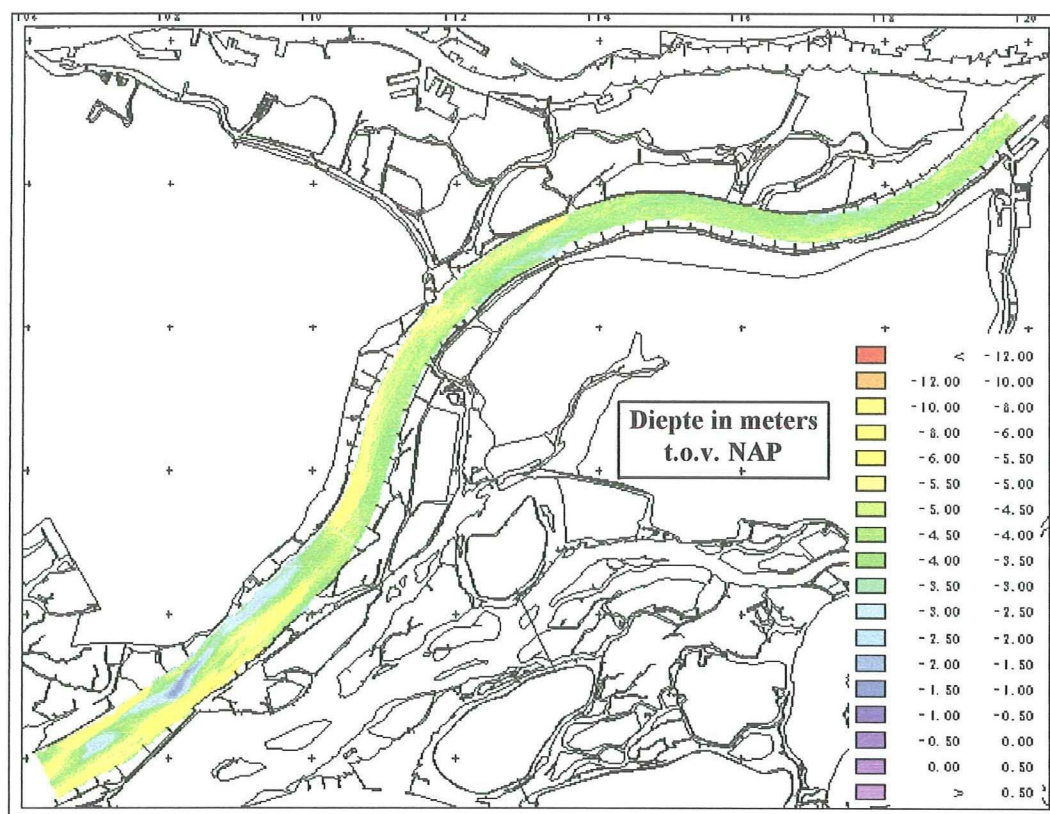
$$q = -\frac{A}{B}$$

$$A = -\frac{B}{n} \sum_{i=1}^n y_i + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{A.19})$$

Uit de dataset voor de Bovenrijnafvoer volgt dat $A = 1040 \text{ m}^3/\text{s}$ en $B = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$.

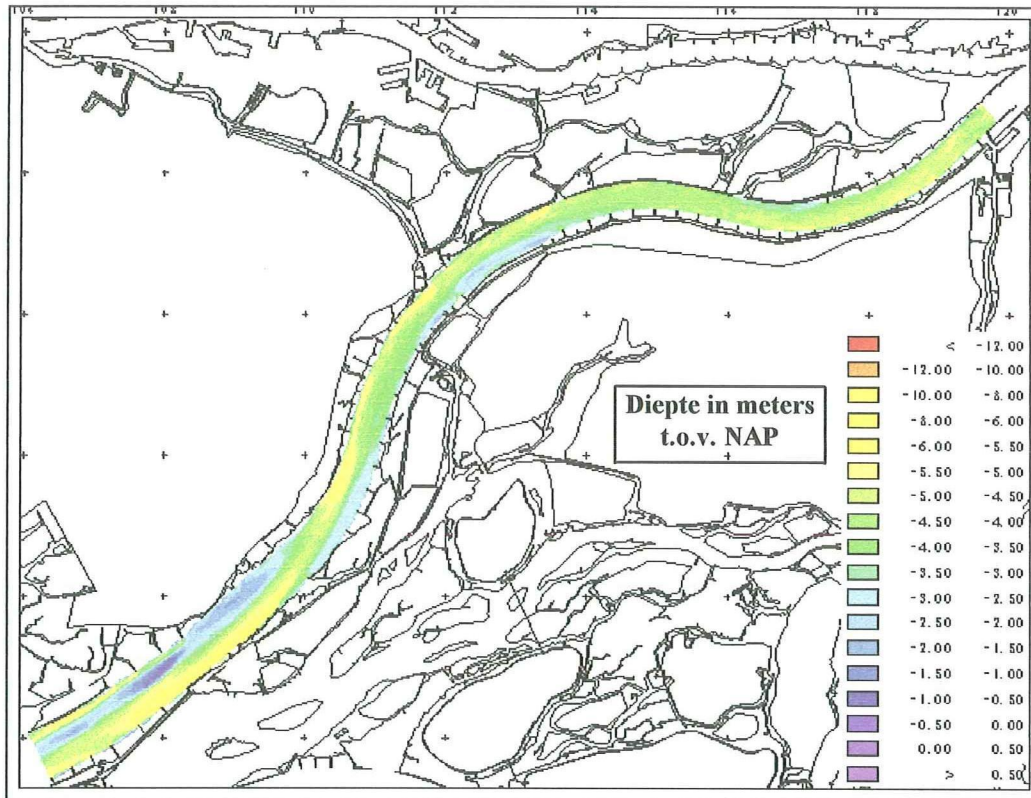
Appendix B.

Appendix B.1 Bodemprofiel 1970



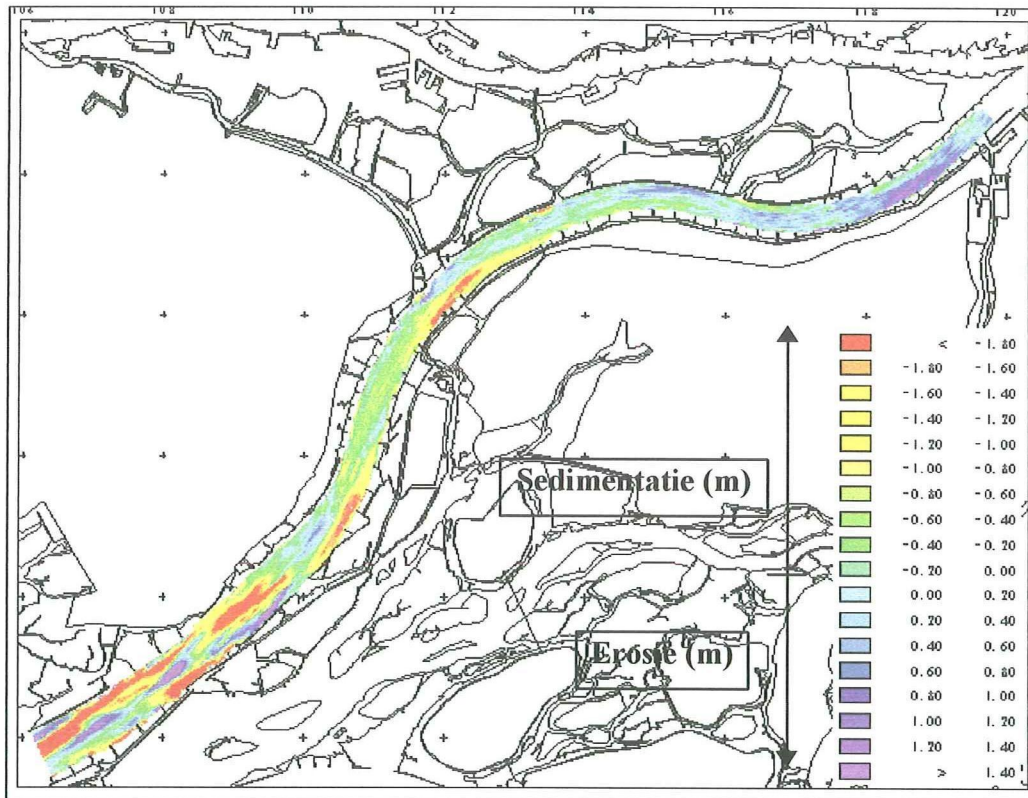
Figuur B-1 Dieptekaart 1970

Appendix B.2 Bodemprofiel 1993



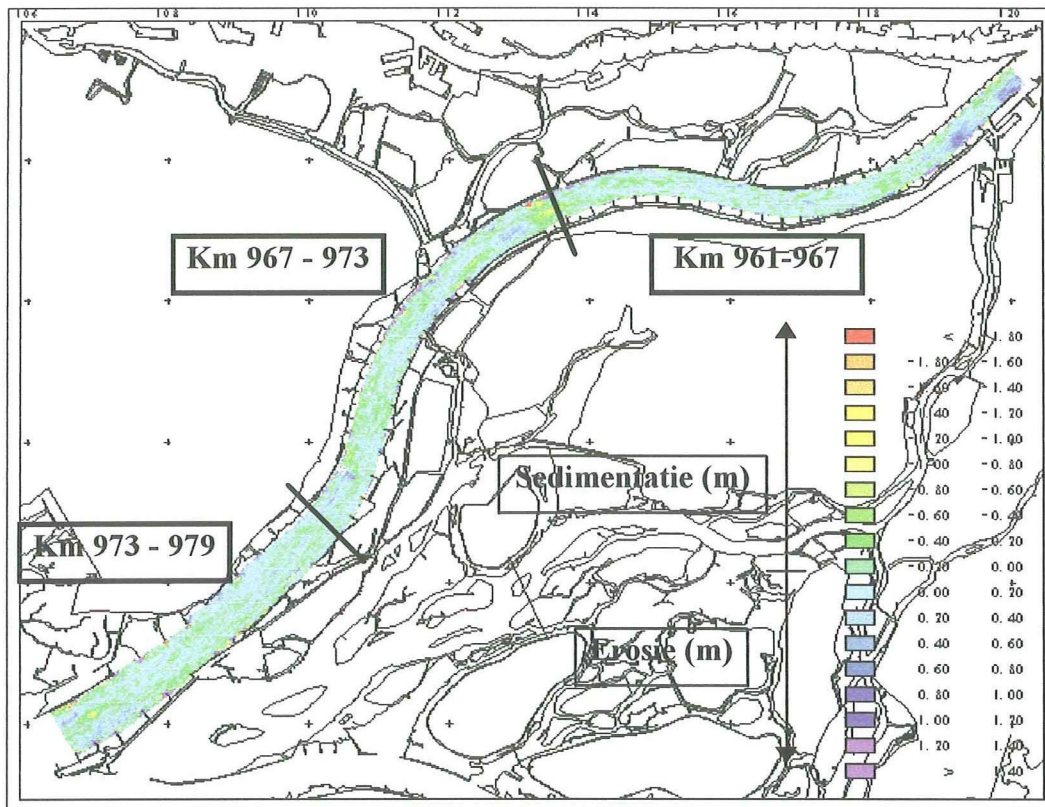
Figuur B-2 Dieptekaart 1993

Appendix B.3 Verschilkaart 1970 - 1993



Figuur B-3 Verschilkaart 1993 - 1970

Appendix B.4 Verschilkaart 1993 - 1994



Figuur B-4 Verschilkaart 1994 - 1993

Appendix B.5 Baggergegevens

Baggeractiviteiten Nieuwe Merwede 1970-1992									
Kilometrage Begin	Eind	1971-1982		1982-1992		Breedte (m) vaartgeul	Bodemverandering (cm/jaar)		Totale verandering (m)
		1971-1982	1982-1992	1971-1982	1982-1992		1971-1982	1982-1992	
961.2	961.5	541797	227431	769228	347	43	19	7.4	
961.5	962	352395	322154	674549	350	17	16	3.9	
962	962.5	345169	322154	667323	354	16	16	3.8	
962.5	963	222643	158209.5	380852.5	357	10	8	2.1	
963	963.5	149511	158209.5	307720.5	361	7	8	1.7	
963.5	964	137631	21268	158899	365	6	1	0.9	
964	964.5	150228	10314	160542	368	7	0	0.9	
964.5	965	186130	3012	189142	372	8	0	1.0	
965	965.5	228548	3012	231560	376	10	0	1.2	
965.5	966	127280	11261.5	138541.5	379	6	1	0.7	
966	966.5	93627	11261.5	104888.5	383	4	1	0.5	
966.5	967	99965	38916	138881	387	4	2	0.7	
967	967.5	116406	38916	153322	391	5	2	0.8	
967.5	968	111091	3012	114103	395	5	0	0.6	
968	968.5	90899	3012	93911	399	4	0	0.5	
968.5	969	121023	3012	124035	403	5	0	0.6	
969	969.5	88159	3012	91171	407	4	0	0.4	
969.5	970	18946	24997.5	43943.5	411	1	1	0.2	
970	970.5	17685	24997.5	42682.5	415	1	1	0.2	
970.5	971	54172	23599.5	77771.5	419	2	1	0.4	
971	971.5	50390	23599.5	73989.5	424	2	1	0.3	
971.5	972	9636	4646	14282	428	0	0	0.1	
972	972.5	0	4646	4646	432	0	0	0.0	
972.5	973	0	5887.5	5887.5	436	0	0	0.0	
973	973.5	0	5887.5	5887.5	441	0	0	0.0	
973.5	974	0	2697	2697	445	0	0	0.0	
974	974.5	18233	2697	20930	450	1	0	0.1	
974.5	975	67181	2697	69878	454	2	0	0.3	
975	975.5	71278	2697	73975	459	3	0	0.3	
975.5	976	341991	17585.5	359576.5	463	12	1	1.6	
976	976.5	298894	17585.5	316479.5	468	11	1	1.4	
976.5	977	309552	17585.5	327137.5	473	11	1	1.4	
977	977.5	263810	17585.5	281395.5	478	9	1	1.2	
977.5	978	218068	2697	220765	482	8	0	0.9	
978	978.5	220840	2697	223537	487	8	0	0.9	
978.5	979	484267	2697	486964	492	16	0	2.0	
979	979.5	344179	2697	346876	497	12	0	1.4	
979.5	979.8	469767	42990	512757	500	26	3	3.4	
Totaal		6421391	1591336	8012727					

Appendix C.

Appendix C.1 3-D waterbewegingsvergelijkingen

De 3-dimensionale waterbewegingsvergelijkingen worden afgeleid door de massabalans en de impulsbalans voor een controlevolume op te stellen. Uit deze vergelijkingen volgen de continuïteitsvergelijking en de Navier-Stokes vergelijking onder voorwaarde dat:

- het vloeistofdeeltje een constante dichtheid heeft, dus $\frac{D\rho}{Dt} = 0$. De vloeistof moet bij benadering onsamendrukbaar zijn en verwaarloosbare uitzetting vertonen bij verandering van concentratie aan opgeloste stoffen.
- de dynamische viscositeit $\eta = \rho\nu$ onafhankelijk is van de plaats.

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] = 0 \quad (\text{C.1})$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} - \eta \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] = \sum F_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} - \eta \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] = \sum F_y$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} - \eta \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] = \sum F_z$$

waarin:

u = de snelheidscomponent in de x-richting

v = de snelheidscomponent in de y-richting

w = de snelheidscomponent in de z-richting

p = druk

η = de dynamische viscositeit

ρ = de dichtheid

$\sum F_i$ = de uitwendige krachten in x, y of z-richting

De krachten die uitgeoefend worden op een vloeistofelementje zijn de zwaartekracht, Corioliskracht en krachten ten gevolge van windgolven. De zwaartekracht werkt in de z-richting, de Corioliskracht werkt in x, y en z-richting. De Corioliscomponent in de z-richting is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de zwaartekracht, zodat deze in het vervolg weggelaten wordt.

Het stelsel met 4 vergelijkingen en 4 onbekenden, te weten de stroomsnelheden u , v , w en de druk p is in principe oplosbaar met behulp van randvoorwaarden. Echter, het stelsel van vergelijkingen wordt boven zekere waarden van Reynolds instabiel en er moet rekening gehouden worden met het optreden van turbulentie. Dit betekent dat de snelheid en de druk fluctueren rond hun gemiddelde waarde. Deze fluctuaties zijn voor de verschillende richtingen van dezelfde orde van grootte en de snelheidscomponenten kunnen beschreven worden door een gemiddelde en een fluctuatieterm:

$$U = \bar{u} + u', V = \bar{v} + v', W = \bar{w} + w', p = \bar{p} + p'$$

Herschrijven van de continuïteitsvergelijking en de impulsvergelijking levert:

$$\left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right] = 0 \quad (\text{C.2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{w})}{\partial z} + \frac{\partial(\rho\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{u}'v')}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{u}'w')}{\partial z} + \frac{\partial\bar{p}}{\partial x} - \eta \left[\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial z^2} \right] &= \rho\Omega\bar{v} \\ \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\bar{w})}{\partial z} + \frac{\partial(\rho\bar{u}'v')}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{v}'w')}{\partial z} + \frac{\partial\bar{p}}{\partial y} - \eta \left[\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\bar{v}}{\partial z^2} \right] &= -\rho\Omega\bar{u} \\ \frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}\bar{w})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\bar{w})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{w}^2)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho\bar{u}'w')}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}'w')}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{w}^2)}{\partial z} + \frac{\partial\bar{p}}{\partial z} - \eta \left[\frac{\partial^2\bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\bar{w}}{\partial z^2} \right] &= -\rho g \end{aligned}$$

waarin:

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ = (turbulente gemiddelde) snelheid in x, y en z-richting

u', v', w' = turbulente fluctuaties in x, y en z-richting

\bar{p} = (turbulente gemiddelde) druk

g = zwaartekrachtsversnelling [=9.81 m/s²]

$\Omega = 2\omega_a \sin\theta$

ω_a = hoeksnelheid aarde

θ = breedtegraad op aarde (Noorderbreedte positief!)

η = dynamische viscositeit

De turbulente overstreping worden in het vervolg van deze Appendix weggelaten.

Appendix C.2 2-DH waterbewegingsvergelijkingen

De 2DH-waterbewegingsvergelijking kunnen afgeleid worden uit de turbulente 3D-vergelijkingen (C.2) door integratie over de diepte. Dit kan onder voorwaarde dat de versnellingen in z-richting veel kleiner zijn dan de zwaartekrachtsversnelling. Onder deze aanname reduceert de impulsbalansvergelijking in z-richting tot:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

waarin:

p = druk [N/m^2]

g = zwaartekrachtsversnelling [m^2/s]

ρ = de dichtheid

Integratie over de diepte levert:

$$p = -\rho g z \quad (\text{C.3})$$

Dit is de hydrostatische drukverdeling.

Aan de bodem ($z = z_b$) en aan het wateroppervlak ($z = \zeta$) gelden de volgende randvoorwaarden:

$$u \frac{\partial z_b}{\partial x} + v \frac{\partial z_b}{\partial y} - w = 0 \quad (\mathbf{z} = \mathbf{z}_b) \quad (\text{C.4})$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} - w = 0 \quad (\mathbf{z} = \zeta) \quad (\text{C.5})$$

waarin:

u, v, w = (turbulentie-gemiddelde) snelheden in x-, y- en z-richting [m/s]

ζ = waterniveau ten opzichte van referentievlak [m]

z_b = bodemniveau ten opzichte van referentievlak [m]

- **Massabalans**

De 3D-massabalans luidt:

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] = 0$$

Integreren over de diepte:

$$\int_{z_b}^{\zeta} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] dz = 0$$

Omdat ζ en z_b functies zijn van $(x, y$ en $t)$ kan de regel van Leibnitz worden toegepast:

$$\int_{a(x)}^{b(x)} \frac{\partial f}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{a(x)}^{b(x)} f(x, z) dz - f(x, b) \frac{db}{dx} + f(x, a) \frac{da}{dx}$$

Dit levert:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\zeta} u dz - u(x, \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + u(x, z_b) \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\zeta} v dz - v(y, \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + v(y, z_b) \frac{\partial z_b}{\partial y} + w(\zeta) - w(z_b) = 0$$

Herschrijven levert:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\zeta} v dz - \left[u(x, \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v(y, \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - w(\zeta) \right] + \left[u(x, z_b) \frac{\partial z_b}{\partial x} + v(y, z_b) \frac{\partial z_b}{\partial y} - w(z_b) \right] = 0$$

De diepte-gemiddelde snelheid \bar{u} en \bar{v} worden gedefinieerd volgens:

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{\zeta} u dz \quad \bar{v} = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{\zeta} v dz$$

waarin:

\bar{u} , \bar{v} = diepte-gemiddelde snelheden in x- en y-richting [m/s]

H = waterdiepte [m]

Per definitie geldt voor de waterdiepte H :

$$H = \zeta - z_b$$

Invullen van de randvoorwaarden en toepassen van bovenstaande definities voor de diepte-gemiddelde snelheid levert:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial H \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{v}}{\partial y} = 0 \tag{C.6}$$

Dit is de diepte-gemiddelde vergelijking voor de massabalans.

• **Impulsbalans x-richting**

In **Appendix C.3** is aangegeven dat de turbulente termen in x-richting en y-richting verwaarloosd kunnen worden ten opzichte van de advectieve termen. De impulsbalans in x-richting is dan:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} - \rho f v + \frac{\partial(\rho u' w')}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} - \eta \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] = 0 \quad (\text{C.7})$$

waarin:

f = Coriolisparameter [1/s]

η = moleculaire viscositeit [kg/(ms)]

Aangenomen wordt dat de dichtheid constant is in tijd en ruimte. Tevens wordt de windinvloed verwaarloosd. De schuifspanning aan het wateroppervlak is dan 0.

Integreren van de impulsbalans in x-richting over de diepte levert dan achtereenvolgens voor de termen uit **vergelijking C.7**:

$$\begin{aligned} \int_{z_b}^{\zeta} \frac{\partial u}{\partial t} dz &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_b}^{\zeta} u dz - u(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial H \bar{u}}{\partial t} - u(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial t} \\ \int_{z_b}^{\zeta} \frac{\partial u^2}{\partial x} dz &= \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\zeta} u^2 dz - u^2(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + u^2(z_b) \frac{\partial z_b}{\partial x} = \frac{\partial \alpha_1 H \bar{u}^2}{\partial x} - u^2(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + u^2(z_b) \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ \int_{z_b}^{\zeta} \frac{\partial uv}{\partial y} dz &= \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\zeta} uv dz - uv(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + uv(z_b) \frac{\partial z_b}{\partial y} = \frac{\partial \alpha_2 H \bar{u} \bar{v}}{\partial y} - uv(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + uv(z_b) \frac{\partial z_b}{\partial y} \\ \int_{z_b}^{\zeta} \frac{\partial uw}{\partial z} dz &= uw(\zeta) - uw(z_b) \\ \int_{z_b}^{\zeta} -fv dz &= -f \int_{z_b}^{\zeta} v dz = -f H \bar{v} \\ \int_{z_b}^{\zeta} \frac{\partial(u' w')}{\partial z} dz &= \frac{1}{\rho} \int_{z_b}^{\zeta} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz = \frac{1}{\rho} [\tau_{xz}(\zeta) - \tau_{xz}(z_b)] = \frac{1}{\rho} \tau_{xb} \\ g \int_{z_b}^{\zeta} \frac{\partial(\zeta - z)}{\partial x} dz &= g \int_{z_b}^{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} dz = g \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\zeta} \zeta dz - g \zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \zeta \frac{\partial z_b}{\partial x} = g H \frac{\partial \zeta}{\partial x} \end{aligned}$$

Herschrijven van de eerste vier termen levert:

$$\frac{\partial H\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_1 H\bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_2 H\bar{u}\bar{v}}{\partial y} - u(z_s) \left[\frac{\partial z_s}{\partial t} + u(z_s) \frac{\partial z_s}{\partial x} + v(z_s) \frac{\partial z_s}{\partial y} - w(z_s) \right] + \left[u(z_b) \frac{\partial z_b}{\partial x} + v(z_b) \frac{\partial z_b}{\partial y} - w(z_b) \right]$$

Uit de randvoorwaarden blijkt dat de laatste twee termen tussen haken beide 0 zijn. Onder de aanname dat α_1 en α_2 gelijk zijn aan 1:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial H\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_1 H\bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_2 H\bar{u}\bar{v}}{\partial y} \\ & H \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + H\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + H\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + u \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial H\bar{v}}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

De laatste term tussen haken is de diepte-gemiddelde massabalans en deze is gelijk aan 0.

De bodemschuifspanning τ_{xb} kan uitgedrukt worden in de diepte-gemiddelde snelheden volgens:

$$\tau_{xb} = -\rho g u \frac{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2}$$

Invullen van deze uitdrukking in combinatie met **vergelijking C.8** en de gevonden diepte-gemiddelde viscositeits- en Coriolisterm levert voor de impulsbalans in x-richting na deling door de waterdiepte H:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - f\bar{v} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g\bar{u} \frac{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 H} - v \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (\text{C.9})$$

De diepte-gemiddelde impulsbalans in y-richting kan op precies dezelfde wijze worden afgeleid. Deze luidt:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + f\bar{u} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g\bar{v} \frac{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 H} - v \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (\text{C.10})$$

Appendix C.3 Viskeuze term - turbulente term

Met behulp van schaling kan de verhouding tussen de viskeuze term en de turbulente term bepaald worden. Wanneer aangenomen wordt dat

- de waterdiepte h een maat is voor de verticale lengteschaal
- de snelheidsfluctuaties ongeveer $1/10$ van de stroomsnelheid in x-richting is
- de waterdiepte H in een estuarium van de orde 10 meter is
- de snelheid u van de orde 1 m/s is
- de kinematische viscositeit voor water 10^{-6} m²/s is

is de verhouding tussen de viskeuze term en de turbulente term voor de x-richting:

$$\frac{\eta \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}}{\frac{\partial (\rho u' w')}{\partial z}} = 100 \frac{\nu}{uH} = 10^{-5}$$

Hieruit blijkt dat de viskeuze term volledig verwaarloosbaar is ten opzichte van de turbulente term in x-richting. Voor de y-richting en de z-richting is deze verhouding nog kleiner omdat de gemiddelde snelheden veel kleiner zijn.

Appendix C.4 Turbulente term - advectieve term

Met behulp van schaling kan de verhouding tussen de term en advectieve term bepaald worden. Wanneer aangenomen wordt dat de snelheidsfluctuaties ongeveer 1/10 van de stroomsnelheid in x-richting is de verhouding tussen de turbulente term en de advectieve term voor de x-richting:

$$\frac{\frac{\partial (\rho \overline{u'^2})}{\partial x}}{\frac{\partial (\rho \overline{u^2})}{\partial x}} = \frac{\rho \left[\frac{1}{10} \overline{u} \right]^2}{\rho \overline{u^2}} = 10^{-2}$$

Hieruit blijkt dat de turbulente term verwaarloosbaar is ten opzichte van de advectieve term in x-richting. Voor de y-richting geldt hetzelfde.

Appendix C.5 Coriolis-term - turbulente term

De hoeksnelheid van de aarde $\omega_a = 7.3 \cdot 10^{-5}$ rad/s. Voor de Nederlandse situatie ($\theta = 50^\circ$) geldt dat $f = 2\omega_a \sin\theta = 1.1 \cdot 10^{-4}$ s⁻¹. Wanneer wordt uitgegaan van de aannamen genoemd bij **Appendix C3** is de verhouding tussen de Coriolis-term en de turbulente term in y-richting:

$$\frac{fH\bar{u}}{v'w'} = 10^{-1}$$

In x-richting is deze verhouding:

$$\frac{fH\bar{v}}{u'w'}$$

Deze verhouding is aanmerkelijk kleiner dan de verhouding voor de y-richting omdat de gemiddelde snelheid \bar{v} veel kleiner is dan \bar{u} . Geconcludeerd kan worden dat voor beide richting de Coriolis-term verwaarloosd kan worden.

Appendix D.

Appendix D.1 Golfhoogte en -periode

De uitdrukkingen voor de dimensieloze golfhoogte en -periode zijn:

$$\tilde{H}_d = \tilde{H}_\infty \tanh[k_3 \tilde{d}^{m_3}] \left[\frac{k_1 \tilde{F}^{m_1}}{\tanh[k_3 \tilde{d}^{m_3}]} \right] \quad (\text{D.1})$$

$$\tilde{T}_d = \tilde{T}_\infty \tanh[k_4 \tilde{d}^{m_4}] \left[\frac{k_2 \tilde{F}^{m_2}}{\tanh[k_4 \tilde{d}^{m_4}]} \right] \quad (\text{D.2})$$

waarin:

$k_1..k_4$ = coëfficiënten [-]

$m_1..m_4$ = coëfficiënten [-]

\tilde{T}_d = volgroeide golfperiode bij gegeven diepte en fetch [-]

\tilde{H}_d = volgroeide golfhoogte bij gegeven diepte en fetch [-]

De grootte van de verschillende dimensieloze coëfficiënten zijn uit metingen afgeleid.

De golfperiode en de golfhoogte zijn geschaald met de zwaartekrachtsversnelling g en de windsnelheid U_{10} . De relaties tussen de schaalparameters \tilde{H} , \tilde{F} , \tilde{d} en \tilde{T} en de parameters H , F , d en T is als volgt:

$$\tilde{H} = \frac{gH}{U_{10}^2}, \quad \tilde{d} = \frac{gd}{U_{10}^2}, \quad \tilde{F} = \frac{gF}{U_{10}^2}, \quad \tilde{T} = \frac{gT}{U_{10}}$$

waarin:

g = zwaartekrachtsversnelling [= 9.81 m/s²]

U_{10} = windsnelheid op $z = 10$ meter boven het wateroppervlak

De horizontale snelheidsamplitude \hat{u} en de verticale snelheidsamplitude \hat{w} aan de bodem ($z = -h$) en het oppervlak ($z = 0$) worden gegeven door:

$$\hat{u}(z = -h) = \frac{\omega H}{2} \frac{1}{\sinh[kh]}, \quad \hat{u}(z = 0) = \frac{\omega H \cosh[kh]}{2 \sinh[kh]}, \quad \hat{w}(z = -h) = 0, \quad \hat{w}(z = 0) = \frac{\omega H}{2}$$

waarin:

\hat{u} = horizontale snelheidsamplitude [m/s]

\hat{w} = verticale snelheidsamplitude [m/s]

$\omega = 2\pi / T$ = hoekversnelling [rad/s]

T = golfperiode [s]

H = golfhoogte [m]

$k = 2\pi / L$ = golfgetal [-]

L = golflengte [m]

Hierin speelt de factor kh , dat is de verhouding tussen waterdiepte en golflengte (d/L), een belangrijke rol. Het blijkt dat voor $kh \gg 1$ (z.g. diep water) de snelheidsamplituden \hat{u} en \hat{w} aan elkaar gelijk zijn. Tevens is in dat geval snelheid nabij de bodem (praktisch) gelijk aan 0. In het geval van $kh \ll 1$ (ondiep water) is de snelheidsamplitude \hat{u} bij benadering constant over de verticaal en de snelheidsamplitude \hat{w} is bij benadering lineair. Voor $kh = O(1)$ is sprake van een overgangsituatie. Als praktische grenzen voor beide benaderingen wordt voor diep water $kh > 3$ en voor ondiep water $kh < 1/20$ aangehouden.

Appendix D.2 Diepwatercriterium

Voor diepwater geldt dat voor het golfgetal kh :

$$kh > 3$$

Herschrijven met behulp van de diepwatergolflengte L_0 :

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$$

$$\frac{2\pi}{L_0} h > 3$$

$$\frac{h}{gT^2} > \frac{3}{4\pi^2}$$

Herschrijven van de diepte h en de golfperiode T in dimensieloze vorm levert:

$$h = \frac{\tilde{h} U_{10}^2}{g}$$

$$T = \frac{\tilde{T} U_{10}}{g}$$

$$\frac{\tilde{h}}{\tilde{T}^2} > \frac{3}{4\pi^2}$$

Op diepwater is de golfperiode alleen een functie van de fetchlengte en de windsnelheid. Bretschneider heeft hiervoor de volgende relatie afgeleid:

$$\tilde{T} = \tilde{T}_\infty \tanh[k_2 \tilde{F}^{m_2}]$$

Invullen in bovenstaande relatie levert het diepwatercriterium:

$$\frac{\tilde{d}}{\tilde{T}_\infty^2} \frac{1}{\tanh^2[k_2 \tilde{F}^{m_2}]} > \frac{3}{4\pi^2} \quad (\text{D.3})$$

Hiermee is bij gegeven windsnelheid U_{10} , strijklengte F en waterdiepte d een criterium gegeven voor het toepassen van de diepwatervergelijkingen.

Appendix D.3 Horizontale snelheidsamplitude

Uit de lineaire golftheorie is een uitdrukking voor de horizontale snelheidsamplitude \hat{u} bij de bodem ($z = -h$) bekend:

$$\hat{u}(z = -h) = \frac{\omega H}{2} \frac{1}{\sinh[kh]} \quad (\text{D.4})$$

waarin:

H = golfhoogte [m]

kh = golfgetal [-]

\hat{u} = snelheidsamplitude [m/s]

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ = hoekfrequentie [rad/s]

Op diepwater geldt als brekingscriterium:

$$\frac{H}{L_o} < \frac{1}{7}$$

$$H_{\max} = \frac{1}{7} \frac{gT^2}{2\pi}$$

Invullen van bovenstaande relaties in de uitdrukking voor de snelheidsamplitude aan de bodem levert:

$$\hat{u}(z = -h) = \frac{gT}{14} \frac{1}{\sinh\left[\frac{4\pi^2 h}{gT^2}\right]}$$

Herschrijven in dimensieloze vorm levert:

$$\hat{u}(z = -h) = \frac{\tilde{T}U_{10}}{14} \frac{1}{\sinh\left[\frac{4\pi^2 \tilde{h}}{\tilde{T}^2}\right]} \quad (\text{D.5})$$

Op diepwater is de golfperiode alleen een functie van de fetchlengte en de windsnelheid. Bretschneider heeft hiervoor de volgende relatie afgeleid:

$$\tilde{T} = \tilde{T}_\infty \tanh[k_2 \tilde{F}^{m_2}]$$

Invullen in de uitdrukking voor de snelheidsamplitude levert:

$$\frac{\hat{u}(z = -h)}{U_{10}} = \frac{\tilde{T}_\infty \tanh[k_2 \tilde{F}^{m_2}]}{14} \frac{1}{\sinh \left[\frac{4\pi^2 \tilde{h}}{\tilde{T}_\infty^2 \tanh^2[k_2 \tilde{F}^{m_2}]} \right]} \quad (\text{D.6})$$

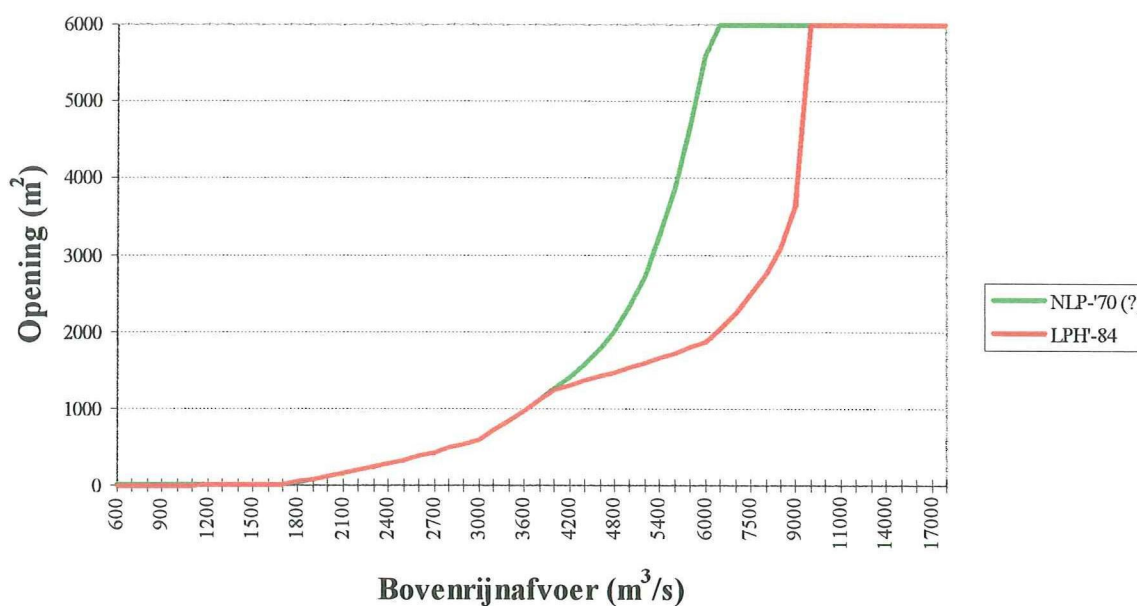
Appendix E. 1D-berekeningen

Appendix E.1 Randvoorwaarden 1D-model

Voor de berekeningen van het 1D-model zijn ook randvoorwaarden nodig. Aan de boven stroomse zijde moet de afvoer gegeven worden bij de drie riviertakken Waal, Lek en Maas, aan de benedenstroomse zijde de waterstand bij Hoek van Holland en de Haringvlietsluizen. Deze randvoorwaarden zijn zonder verder onderzoek overgenomen van het RIZA. In de berekeningen is uitgegaan van een windstille situatie.

Er is voor gekozen doortij, gemiddeld getij en springtij bij verschillende afvoeren door te rekenen om de gevoeligheid van de randvoorwaarden te bepalen. Dit is alleen gedaan voor 1993, omdat gegevens voor doortij en springtij voor 1970 ontbreken. Voor de benedenstroomse waterstandsranden van het 1D-model zijn de randvoorwaarden bij de verschillende getijsituaties aangeleverd door het RIZA zowel voor 1993 als voor 1970.

Naast de randvoorwaarden is ook de sluisopening van de Haringvlietsluizen van belang voor de waterbeweging van het Noordelijk Deltabekken. Na de sluiting van het Haringvliet in 1970 werd in eerste instantie het lozingsprogramma NLP-'70 gehanteerd. Vanwege te hoge snelheden in sommige riviertakken (scheepvaartproblemen) heeft men al vrij snel door ervaring dit lozingsprogramma aangepast. In 1984 is het beheer vastgelegd in het Lozingsprogramma Haringvlietsluizen, het zogenaamde LPH-'84. Hierin ligt bij gegeven Bovenrijnafvoer de opening van de Haringvlietsluizen vast. Deze opening is onafhankelijk van de getijsituatie op de Noordzee. In **Figuur E-1** is de opening van de Haringvlietsluizen bij verschillende Bovenrijnafvoer voor de beide lozingsprogramma's weergegeven.

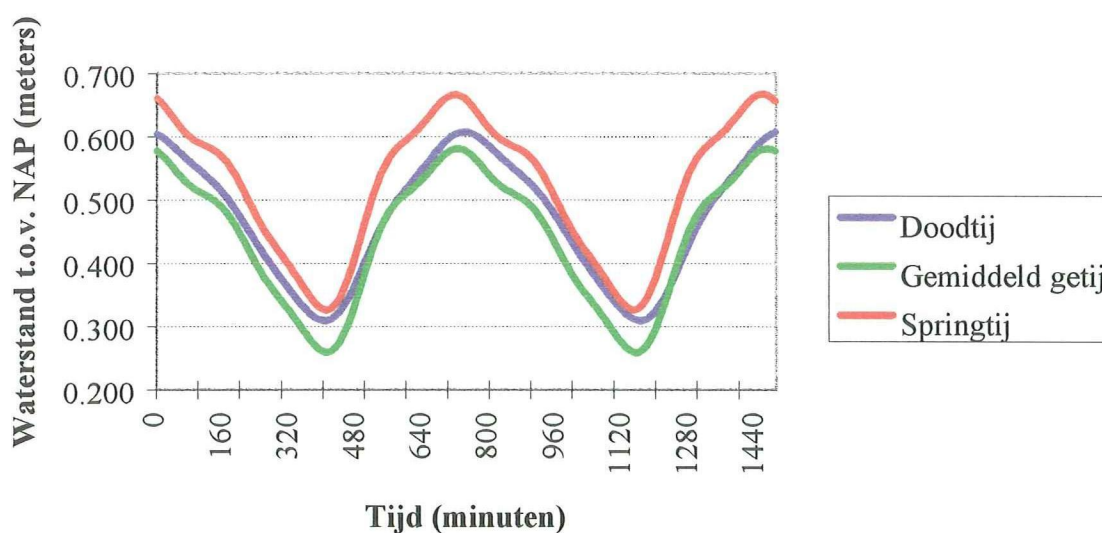


Figuur E-1 Spuibeheer Haringvlietsluizen

Geconcludeerd kan worden dat bij afvoeren lager dan $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ nauwelijks veranderingen zijn opgetreden. Voor afvoeren hoger dan $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ is het beheer aangepast door de sluisen minder snel te openen. Voor deze studie wordt uitgegaan van LPH-'84. In de ZWENDL-handleiding is voor het lozingsprogramma LPH-'84 de opening gegeven voor verschillende Bovenrijnafvoeren.

Appendix E.2 Resultaten 1D-berekeningen 1993

In **Figuur E-2** is de waterstand bij Anna Jacominaplaat bij een Bovenrijnafvoer van $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ en drie verschillende getijomstandigheden weergegeven. In **Tabel E-1** zijn de gemiddelde waterstand en de amplituden van de twee belangrijkste componenten M_2 en M_4 gegeven.



Figuur E-2 Waterstand Anna Jacominaplaat ($Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Component	doodtij [cm]	gemiddeld getij [cm]	springtij [cm]
Middenstand	47.2	44.2	51.9
M_2	13.8	14.4	15.1
M_4	1.8	2.9	1.1

Tabel E-1 Waterstandscomponenten bij verschillende getijsituaties ($Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Geconcludeerd kan worden dat de M_2 -component overheerst. Verder blijkt uit de amplituden van de M_2 -component dat de afwisseling van getij nauwelijks invloed heeft op de grootte van de amplitude bij de benedenstroomse rand van de Nieuwe Merwede bij een Bovenrijnafvoer van $1200 \text{ m}^3/\text{s}$.

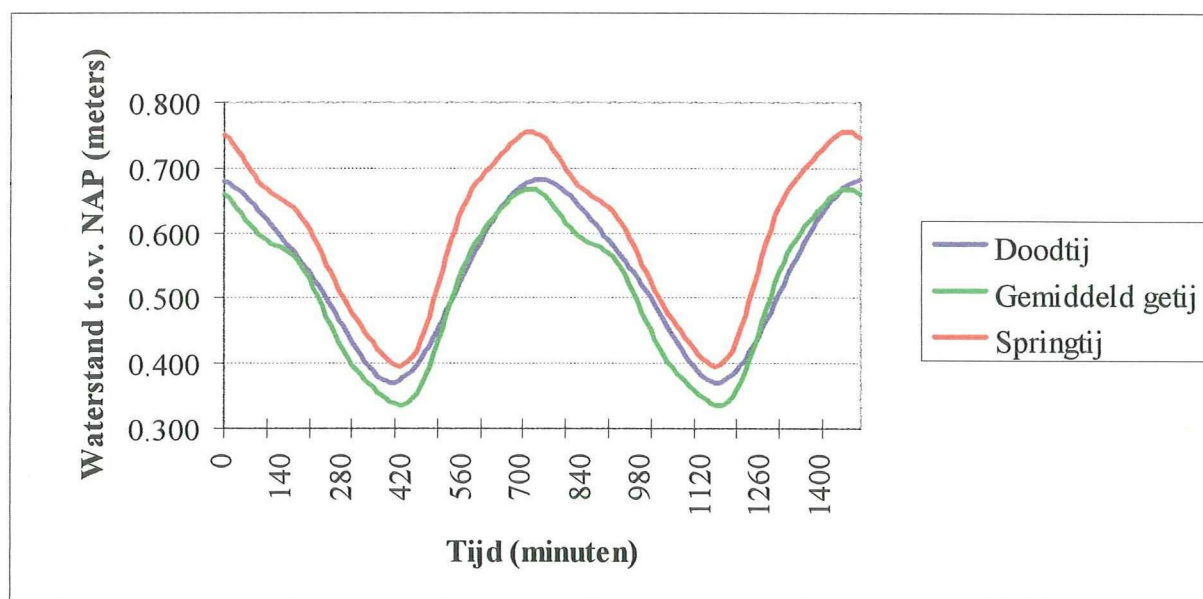
Verder is de variatie in de middenstand opvallend. Door de afwisseling van de getijomstandigheden vindt berging plaats in het systeem. Een verhoging van de middenstand betekent volumevermeerdering, een verlaging volumevermindering.

Het volume water in de Nieuwe Merwede verandert in de cyclus als volgt:

- doodtij → gemiddeld getij : vermindering
- gemiddeld getij → springtij : vergroting
- springtij → gemiddeld getij : vermindering
- gemiddeld getij → doodtij : vergroting

Omdat de opening van de Haringvlietsluizen vastligt bij de gegeven Bovenrijnafvoer ligt de oorzaak van de middenstandsvariatie in het feit dat meer of minder water geloosd kan worden ten gevolge van de variatie in het verval en tijdsduur van de lozing bij de verschillende getijomstandigheden.

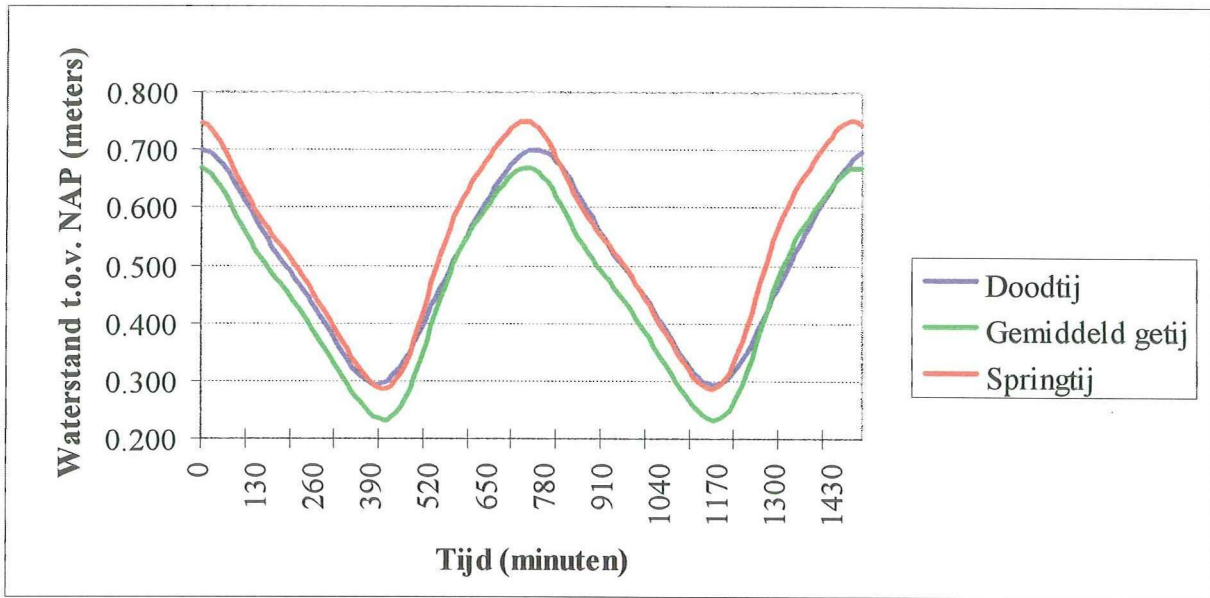
In **Figuur E-3** en **Figuur E-4** is respectievelijk de waterstand bij Anna Jacominplaat bij een Bovenrijnafvoer van 2200 m³/s en 3000 m³/s en drie verschillende getijomstandigheden weergegeven. In **Tabel E-2** en **E-3** zijn de gemiddelde waterstand en de amplituden van de twee belangrijkste componenten M₂ en M₄ gegeven. Net als bij een Bovenrijnafvoer van 1200 m³/s overheerst de M₂-component en is de variatie in de middenstand opvallend.



Figuur E-3 Waterstand Anna Jacominaplaat ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Component	doodtij /cm/	gemiddeld getij /cm/	springtij /cm/
Middenstand	53.8	51.6	59.4
M ₂	14.8	15.5	16.3
M ₄	1.8	3.1	3.6

Tabel E-2 Waterstandscomponenten bij verschillende getijsituaties ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$)

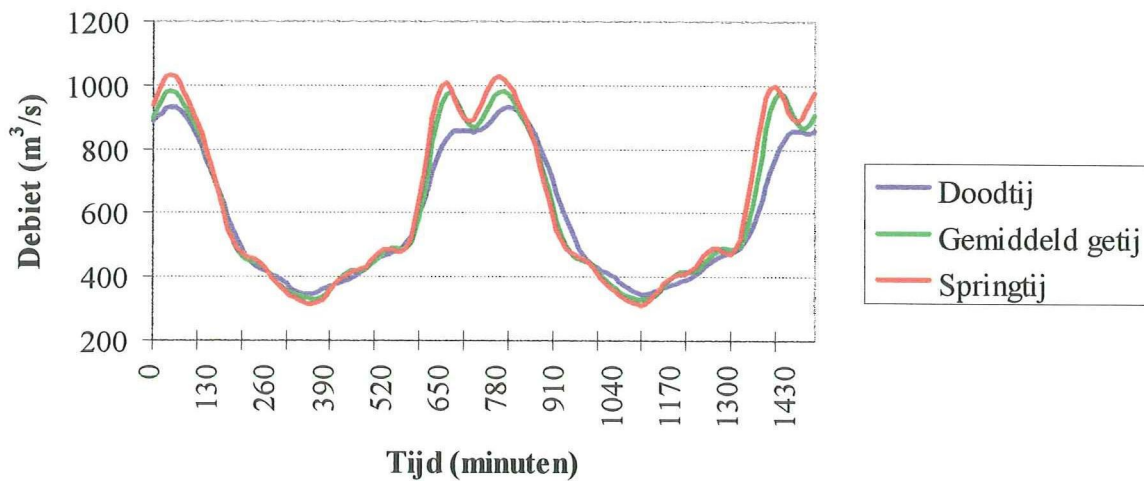


Figuur E-4 Waterstand Anna Jacominaplaat ($Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$)

Component	doodtij [cm]	gemiddeld getij [cm]	springtij [cm]
Middenstand	53.8	51.6	59.4
M_2	14.8	15.5	16.3
M_4	1.8	3.1	3.6

Tabel E-3 Waterstandscomponenten bij verschillende getijsituaties ($Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$)

In **Figuur E-5** is het debiet bij Werkendam bij verschillende getijsituaties gegeven bij een Bovenrijnafvoer van $1200 \text{ m}^3/\text{s}$. In **Tabel E-4** zijn de verschillende componenten gegeven bij verschillende getijsituaties.



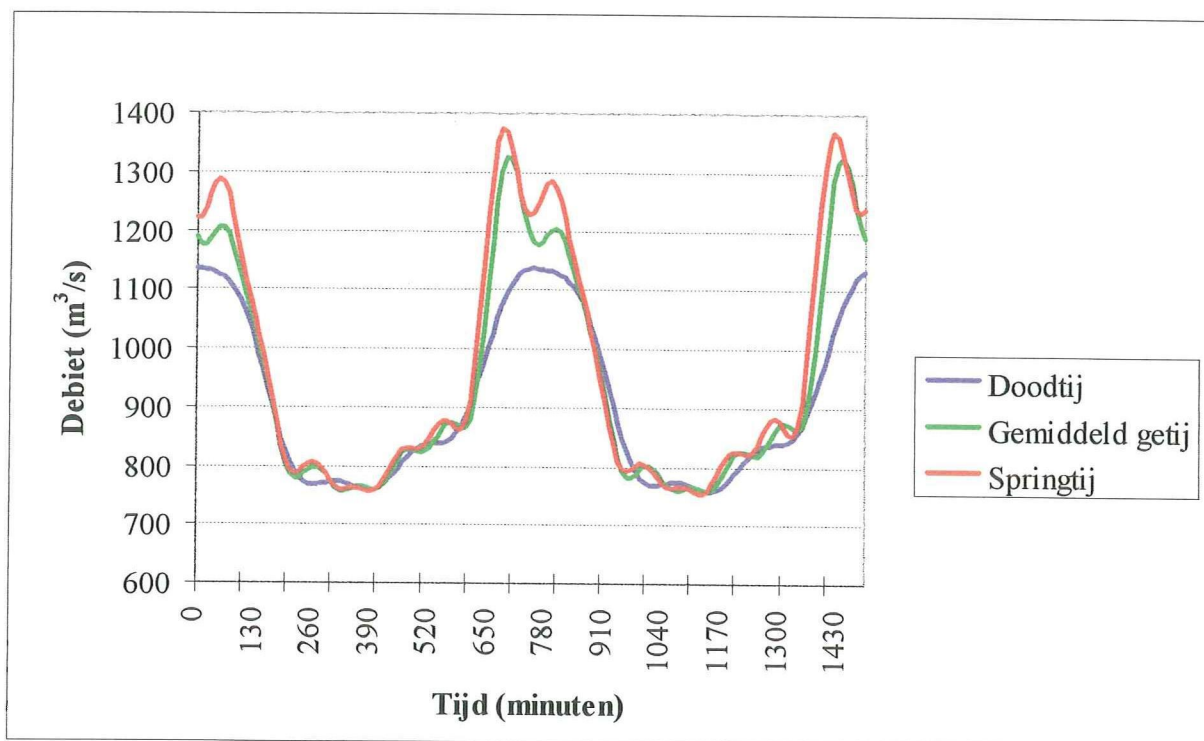
Figuur E-5 Debiet Werkendam ($Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Component	doodtij [m^3/s]	gemiddeld getij [m^3/s]	springtij [m^3/s]
Middenstand	598.25	607.68	619.2
M_2	287.9	315.77	338.19
M_4	54.37	67.15	69.7
M_6	15.77	16.39	13.54
M_8	30.77	52.57	59.43

Tabel E-4 Debietcomponenten bij verschillende getijsituaties ($Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$)

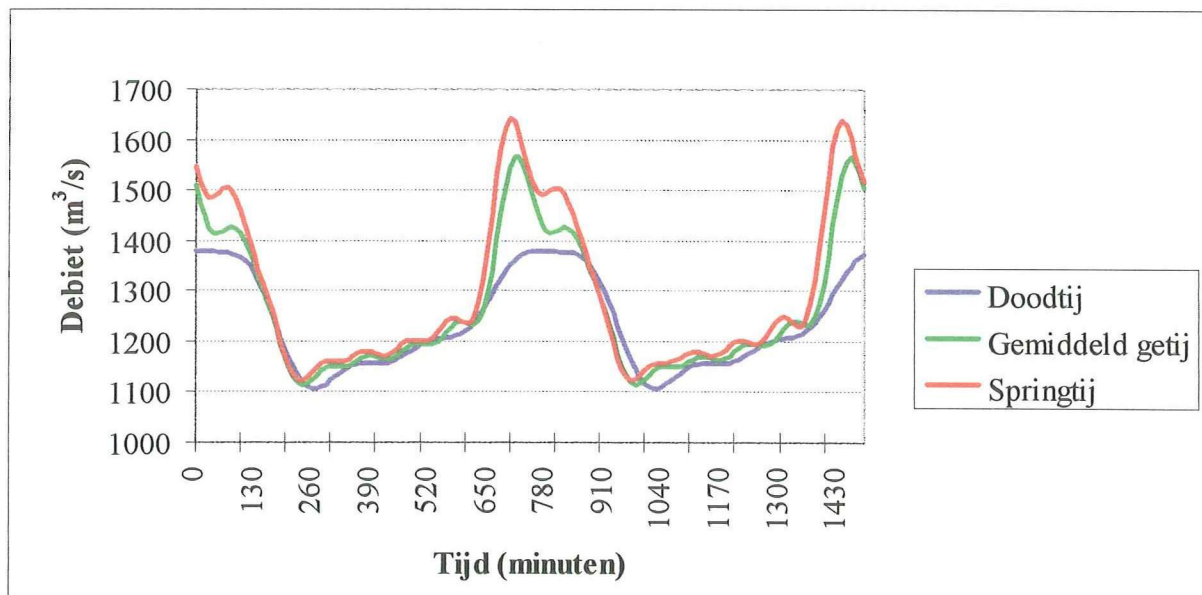
Voor gemiddeld getij en springtij is de debietrand qua verloop nagenoeg identiek. Bij springtij is het debiet iets groter, vanwege het grotere verval over de Haringvlietsluizen. De debietrand bij doodtij wijkt nogal af. Het zijn vooral de hogere orde componenten die deze afwijking veroorzaken. Ook de fase van de verschillende componenten speelt hierin een rol. Het gemiddelde en de M_2 -component zijn voor doodtij ongeveer $20 \text{ m}^3/\text{s}$ lager dan voor gemiddeld getij.

In Figuur E-6 en E-7 is het debiet bij Werkendam voor verschillende getijsituaties gegeven voor respectievelijk $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ en $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. In Tabel E-5 en E-6 zijn de componenten gegeven.



Figuur E-6 Debiet Werkendam ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Component	doodtij [m^3/s]	gemiddeld getij [m^3/s]	springtij [m^3/s]
Middenstand	913.99	944.11	965.94
M_2	189.64	238.53	267.2
M_4	54.96	80.92	89.7
M_6	3.16	21.85	21.03
M_8	21.4	44.84	48.44

Tabel E-5 Debietcomponenten bij verschillende getijsituaties ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$)Figuur E-7 Debiet Werkendam ($Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$)

Component	doodtij [m^3/s]	gemiddeld getij [m^3/s]	springtij [m^3/s]
Middenstand	1240	1268.73	1296.57
M_2	122.76	162.89	193.06
M_4	45.36	71.37	86.52
M_6	11.67	11.68	14.51
M_8	16.4	35.89	39.9

Tabel E-6 Debietcomponenten bij verschillende getijsituaties ($Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$)

Net als bij $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ is de debietrand bij springtij en gemiddeld getij ongeveer gelijk, terwijl de rand bij doodtij sterk afwijkt. Het verschil zit vooral in de hogere componenten.

Uit de waterbeweging voor de Nieuwe Merwede kan geconcludeerd worden dat:

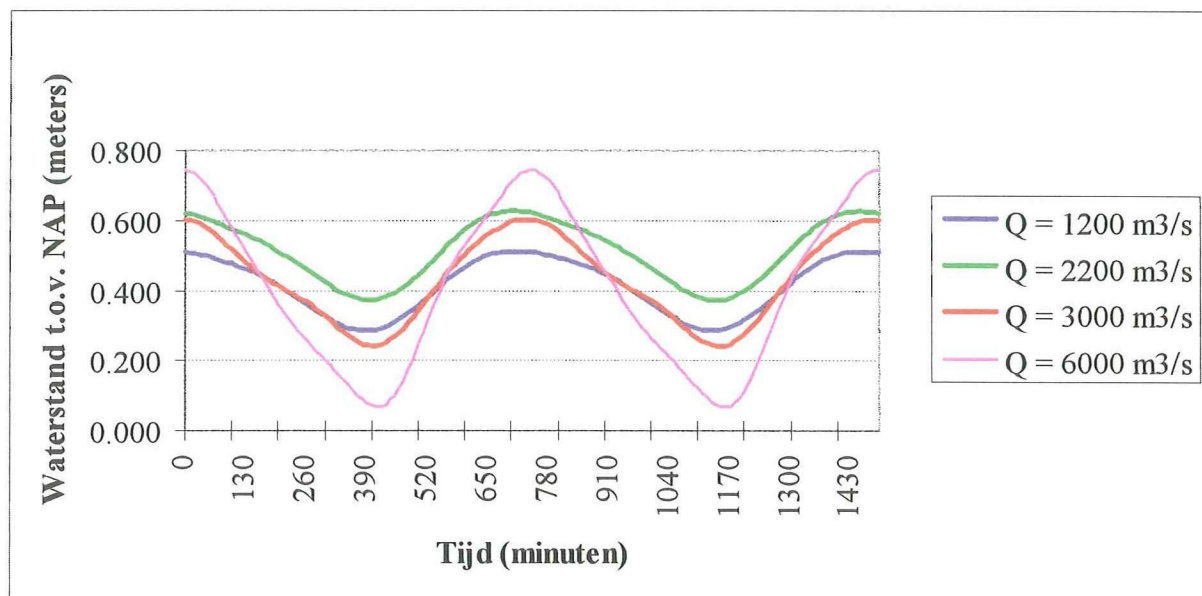
- de afwisseling in de getijcyclus in combinatie met het lozingsbeheer bij de Haringvlietsluizen de oorzaak is van een lagere middenstand bij gemiddeld getij in relatie tot doodtij. In de periode van doodtij naar gemiddeld getij wordt de lozingsduur en het verval groter waardoor volumevermindering en dus middenstandsval optreedt.
- de waterstandsrand onder verschillende getijomstandigheden bij verschillende afvoeren vrijwel hetzelfde beeld geven, namelijk dat de M_2 -component overheerst en nauwelijks varieert onder verschillende getijomstandigheden.

- de debietrand bij springtij en gemiddeld getij nagenoeg identiek zijn, maar dat de doortij situatie een ander beeld geeft. De variatie zit vooral in de hogere orde componenten.

Veelal wordt voor sedimenttransportberekeningen vaak een getij tussen gemiddeld getij en springtij wordt genomen. Uit de resultaten van 1993 blijkt dat de randen voor springtij en gemiddeld getij hetzelfde beeld geven. Tevens zijn voor 1970 geen gegevens voor springtij en doortij beschikbaar. Voor 1970 wordt derhalve uitgegaan van een gemiddeld getijsituatie. Tenslotte wordt opgemerkt dat de doortij situatie toch een belangrijke rol zou kunnen spelen voor het sedimenttransport. In een doortij situatie is de afvoer op de Nieuwe Merwede altijd lager is dan bij gemiddeld getij. De gemiddelde waterstand bij Anna Jacominaplaat is bij doortij altijd hoger dan bij gemiddeld getij. Dit betekent dat de snelheden ter plaatse relatief laag zullen zijn in vergelijking met gemiddeld getij. Afhankelijk van de kritische erosie- en sedimentatiesnelheid voor slib kan dit betekenen dat relatief meer sedimentatie en relatief minder erosie optreedt.

Appendix E.3 Resultaten 1D-berekening 1970

In **Figuur E-8** voor verschillende Bovenrijnafvoeren de waterstand bij Anna Jacominaplaat weergegeven. In **Tabel E-7** zijn de belangrijkste componenten gegeven.



Figuur E-8 Waterstand Anna Jacominaplaat

Component	1200 m ³ /s [cm]	2200 m ³ /s [cm]	3000 m ³ /s [cm]	6000 m ³ /s [cm]
Middenstand	41.28	51.19	43.2	40.72
M ₂	11.16	12.25	16.78	31.21
M ₄	1.74	2.1	2.44	3.1

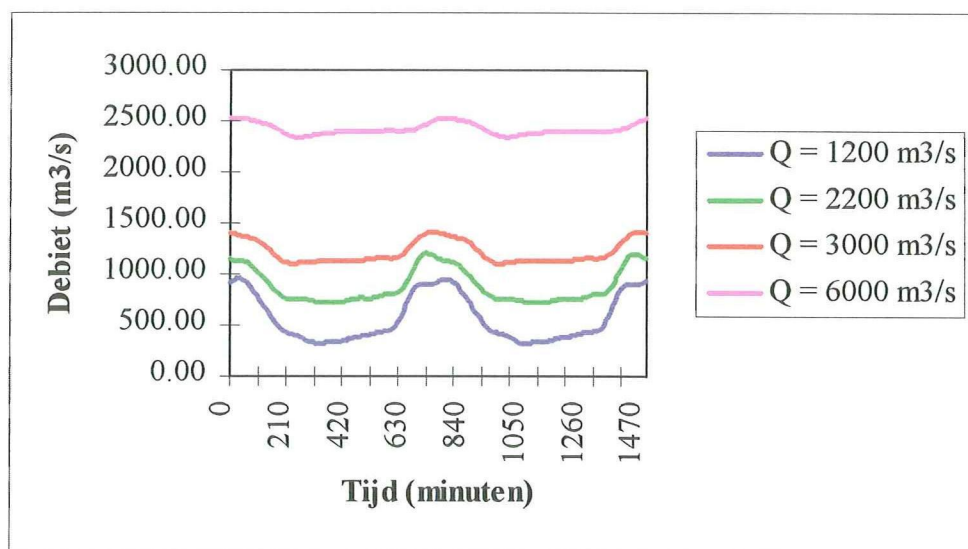
Tabel E-7 Waterstandscomponenten bij verschillende afvoeren

Vergelijking met de resultaten van 1993 bij gemiddeld getij levert de volgende conclusies op:

- De getijamplitude van de M₂-component is onder alle afvoeren hoger, variërend van 2 tot 4 centimeter.
- De middenstand is - uitgezonderd 2200 m³/s - gestegen.

De toename van de middenstand is het gevolg van morfologische veranderingen in het systeem. Vooral in de periode 1970-1981 heeft opvulling plaatsgevonden van het Noordelijk Deltabekken ten gevolge van de afsluiting van het Haringvliet. Hierdoor zijn de gemiddelde waterstanden gestegen. De toename van de getijslag wordt veroorzaakt door een grotere getijslag op de Noordzee bij gemiddeld getij. Daarnaast zouden ook morfologische veranderingen in het Noordelijke Deltabekken hiertoe hebben bijgedragen.

In **Figuur E-9** is de debietrand bij verschillende afvoeren weergegeven. Tevens is in **Tabel E-8** de verschillende componenten van de debietrand gegeven voor zowel 1970 als 1993.



Figuur E-9 Debiet Werkendam onder verschillende afvoeren

Component	1200 m ³ /s [m ³ /s]	2200 m ³ /s [m ³ /s]	3000 m ³ /s [m ³ /s]	6000 m ³ /s [m ³ /s]
Middenstand	568.78	886.21	1220.26	2429.21
M ₂	301.6	209.64	133.11	59.75
M ₄	94.55	86.18	64.93	44.53
M ₆	15.05	25.35	8.34	9.27
M ₈	25.75	23.21	18.34	5.5

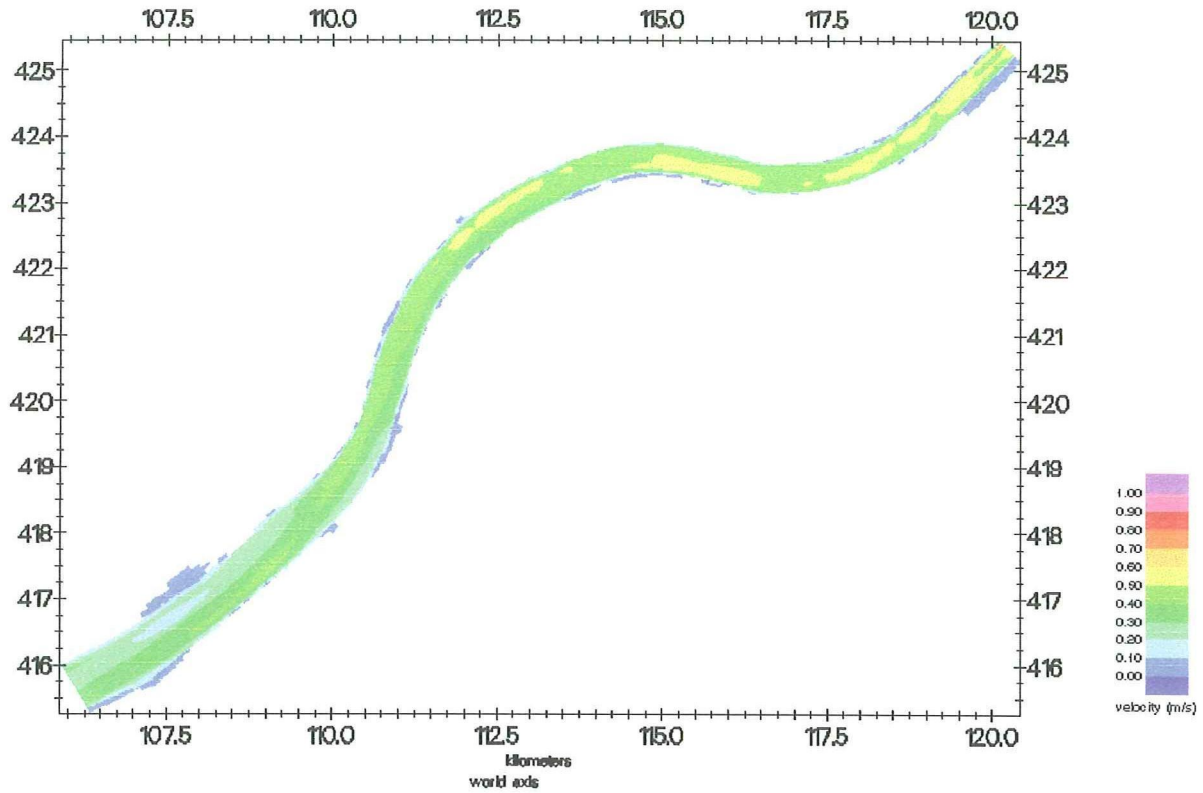
Tabel E-8 Debietcomponenten bij verschillende afvoeren

Wanneer de debieten van 1970 en 1993 vergeleken worden kan geconcludeerd worden dat onder alle afvoeren is het gemiddelde debiet toegenomen met globaal 50 m³/s.

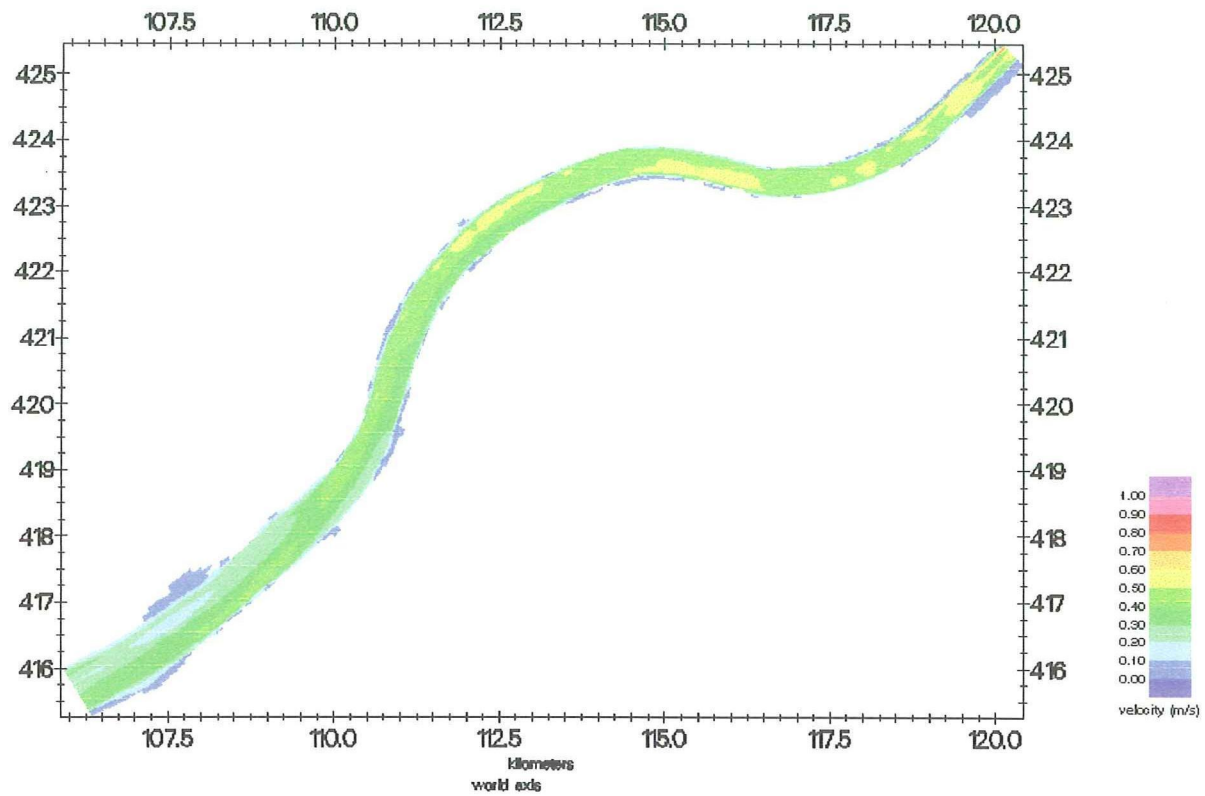
Mede door de toename van de getijslag op de Noordzee is de gemiddelde afvoer over de Nieuwe Merwede toegenomen. Ook de baggerwerkzaamheden kunnen een oorzaak zijn. De Nieuwe Merwede is aan de bovenstroomse zijde netto verdiept waardoor de gemiddelde afvoer toegenomen kan zijn.

Appendix F. Gevoeligheid waterbeweging

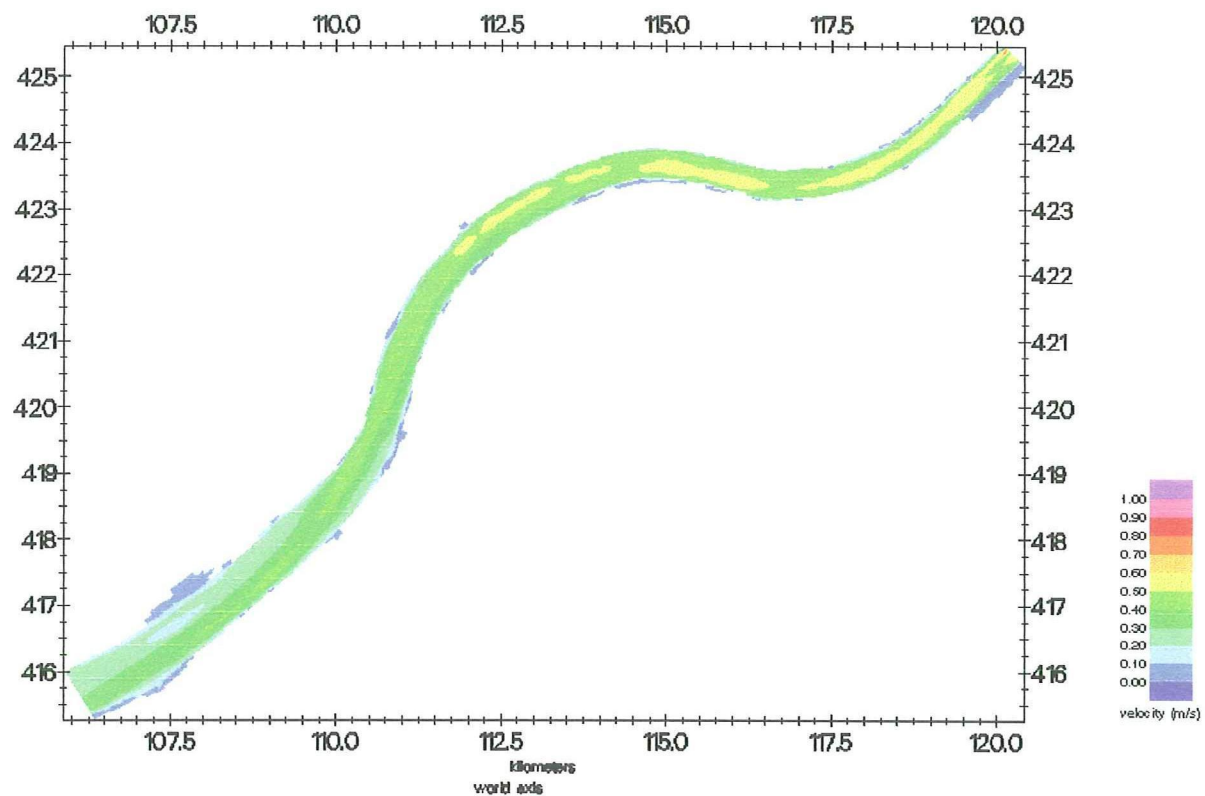
Appendix F.1 Viscositeit



Figuur F-1 Snelheidsveld $\nu = 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 0.023$)

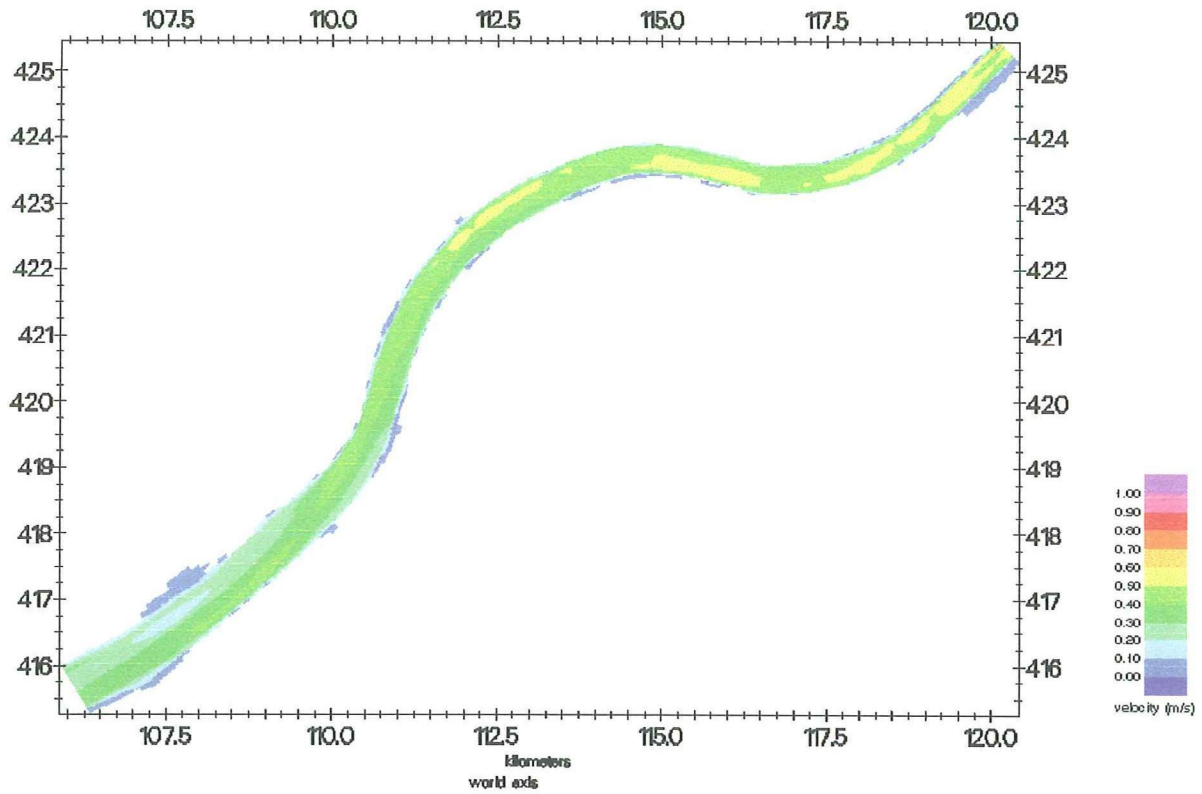


Figuur F-2 Snelheidsveld $\nu = 0.04 \text{ m}^2/\text{s}$ ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 0.023$)

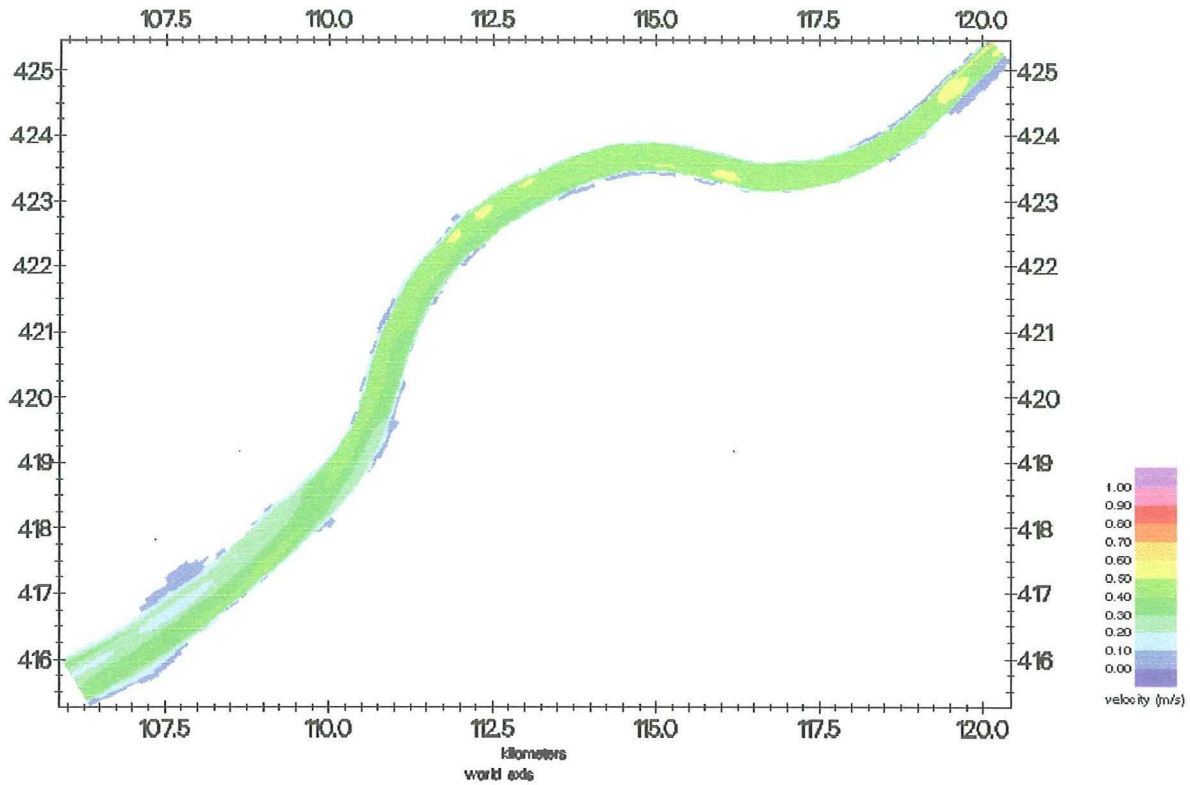


Figuur F-3 Snelheidsveld $\nu = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 0.023$)

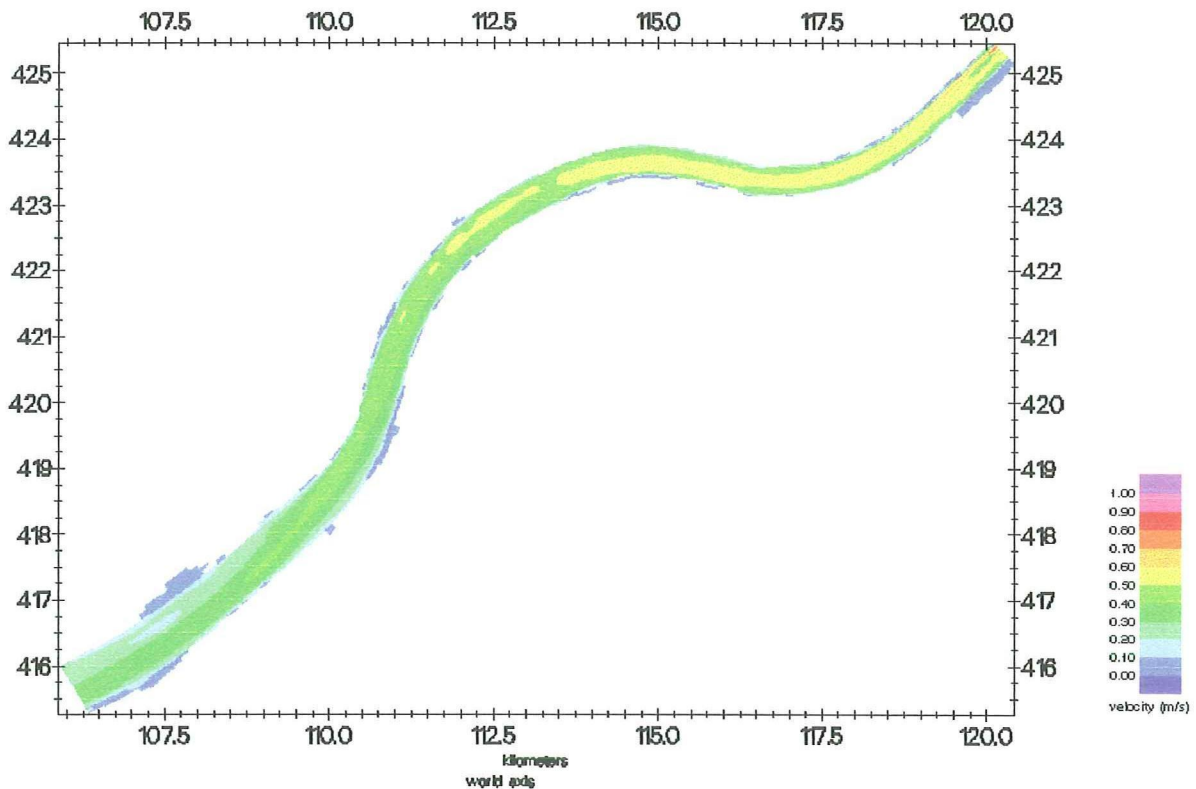
Appendix F.2 Ruwheid



Figuur F-4 Snelheidsveld $n = 0.023$ ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, $\nu = 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$)



Figuur F-5 Snelheidsveld $n = 0.034$ ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, $\nu = 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$)



Figuur F-6 Snelheidsveld $n = 0.012$ ($Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, $\nu = 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$)

Appendix G. Resultaten calibratie

Appendix G.1 Zandtransport

D=100 mu	d ₅₀ P	Q ₉₅	Van Rijn (m ³ /jelperiode)		Gewogen transport (m ³)	Bodemtransport (m ³)	Van Rijn* (m ³ /jelperiode)	Gewogen transport (m ³)	Totaal transport (m ³)	Engelund-Hansen (m ³ /jelperiode)	
			Bodemtransport (m ³)	Suspensie-transport (m ³)						Gewogen transport (m ³)	Gewogen transport (m ³)
Q ₉₅	0.423	608	0.24	47.87	14357.37	0.79	9.52	3078.79	28.06	7777.03	
1200	0.423	608	1.38	244.97	82037.57	5.14	62.43	14481.84	98.22	21085.54	
2200	0.304	944	6.54	854.76	131706.96	23.1	282.47	48781.00	301.69	48171.89	
3000	0.217	1289	63.96	6394.13	254752.35	438.28	5605.62	238783.54	3569.44	141922.11	
6000	0.056	2479									
			Jaarlijkse zandvracht (~10 ⁻⁹ kg)		1.20			0.30			0.22
								0.80			0.57
D=200 mu	d ₅₀ P	Q ₉₅	Van Rijn (m ³ /jelperiode)		Gewogen transport (m ³)	Bodemtransport (m ³)	Van Rijn* (m ³ /jelperiode)	Gewogen transport (m ³)	Totaal transport (m ³)	Engelund-Hansen (m ³ /jelperiode)	
Q ₉₅	0.423	608	0.75	7.12						2348.63	0.76
1200	0.423	608	4.12	42.67	10035.19	4.95	34.55	8471.68	49.11	10532.77	
2200	0.304	944	15.96	172.91	28914.91	22.4	157.23	27500.32	150.79	23085.08	
3000	0.217	1289	168.13	2386.9	100944.61	431.51	3900.75	159207.29	1784.72	70511.05	
6000	0.056	2479									
			Jaarlijkse zandvracht (~10 ⁻⁶ m ³)		0.14			0.20			0.11
								0.52			0.29
D=300 mu	d ₅₀ P	Q ₉₅	Van Rijn (m ³ /jelperiode)		Gewogen transport (m ³)	Bodemtransport (m ³)	Van Rijn* (m ³ /jelperiode)	Gewogen transport (m ³)	Totaal transport (m ³)	Engelund-Hansen (m ³ /jelperiode)	
Q ₉₅	0.423	608	0.92	2.14						913.19	0.75
1200	0.423	608	5.3	16.84	4705.54	4.89	24.64	6333.39	32.74	7021.85	
2200	0.304	944	21.07	79.13	15340.04	22.14	112.33	20596.58	100.53	15390.58	
3000	0.217	1289	240.38	1523.69	88695.21	428.82	2705.66	123837.62	1189.81	47907.24	
6000	0.056	2479									
			Jaarlijkse zandvracht (~10 ⁻⁶ m ³)		0.09			0.15			0.07
								0.40			0.19
D=400 mu	d ₅₀ P	Q ₉₅	Van Rijn (m ³ /jelperiode)		Gewogen transport (m ³)	Bodemtransport (m ³)	Van Rijn* (m ³ /jelperiode)	Gewogen transport (m ³)	Totaal transport (m ³)	Engelund-Hansen (m ³ /jelperiode)	
Q ₉₅	0.423	608	1.08	1.00						620.73	0.74
1200	0.423	608	6.33	9.06	3300.74	4.86	19.48	5215.98	24.55	5285.31	
2200	0.304	944	25.71	86.77	11891.61	22.02	86.77	16951.31	75.4	11543.30	
3000	0.217	1289	310.3	1274.59	62916.13	427.54	1803.75	88134.47	882.36	32555.53	
6000	0.056	2479									
			Jaarlijkse zandvracht (~10 ⁻⁶ m ³)		0.06			0.11			0.05
								0.30			0.14

Tabel G-1 Calibratie zandtransport

Appendix G.2 Slibtransport

Voor de Nieuwe Merwede gelden de volgende relaties (4.5.2):

$$C_{tot} = \alpha Q_{br} + \gamma$$

$$C_{slib} = \beta C_{tot}$$

$$p_Q(Q) = \frac{1}{B} e^{-\frac{Q_{br}-A}{B}}$$

$$Q_{nm} = \lambda Q_{br}$$

waarin:

C_{tot} = concentratie zwevende stof [kg/m³]

C_{slib} = concentratie slib [kg/m³]

α = coëfficiënt [= 1.063 * 10⁻⁵ kgm⁶/s]

α = coëfficiënt [= 26 * 10⁻³ kg/m³]

β = coëfficiënt [= 0.62]

λ = coëfficiënt [= 0.4]

$p_Q(Q)$ = kansdichtheidsfunctie [s/m³]

Q_{nm} = Afvoer Nieuwe Merwede [m³/s]

Q_{br} = Bovenrijnafvoer [m³/s]

De jaarlijkse slibvracht op de Nieuwe Merwede wordt als volgt berekend:

$$V_{slib} = \int_0^{1 \text{ jaar}} \int_{\lambda A}^{\infty} p_Q(Q_{nm}) c_{slib}(Q_{nm}) Q_{nm} dQ dt \quad (\text{G.1})$$

Invullen van de gegeven relaties levert:

$$\begin{aligned} V_{slib} &= \beta T \int_A^{\infty} \frac{1}{\lambda B} e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} \left(\frac{\alpha}{\lambda} Q_{nm}^2 + \gamma Q_{nm} \right) dQ_{nm} \\ V_{slib} &= \frac{\alpha}{\lambda} \beta T \left[- \left[Q_{nm}^2 e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} \right] + \int_{\lambda A}^{\infty} 2Q_{nm} e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} dQ_{nm} \right] + \gamma \beta T \left[- \left[Q_{nm} e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} \right] + \int_{\lambda A}^{\infty} e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} dQ_{nm} \right] \\ V_{slib} &= \frac{\alpha}{\lambda} \beta T \left[- Q_{nm}^2 e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} - 2Q_{nm} \lambda B e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} + \int_{\lambda A}^{\infty} e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} dQ_{nm} \right] + \gamma \beta T \left[- Q_{nm} e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} - B \lambda e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} \right] \\ V_{slib} &= \frac{\alpha}{\lambda} \beta T \left[- Q_{nm}^2 - 2Q_{nm} \lambda B e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} + \int_{\lambda A}^{\infty} e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} dQ_{nm} \right] + \gamma \beta T \left[- Q_{nm} e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} - \lambda B e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} \right] \\ V_{slib} &= \frac{\alpha}{\lambda} \alpha \beta T \left[- Q_{nm}^2 - 2Q_{nm} \lambda B - 2(\lambda B)^2 \right] e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} \Big|_{\lambda A}^{\infty} + \gamma \beta T \left[- Q_{nm} - \lambda B \right] e^{-\frac{Q_{nm}-\lambda A}{\lambda B}} \Big|_{\lambda A}^{\infty} \\ V_{slib} &= \frac{\alpha}{\lambda} \alpha \beta T \left[+ (\lambda A)^2 + 2\lambda A \lambda B + 2(\lambda B)^2 \right] + \gamma \beta T \left[+ \lambda (A + B) \right] \\ V_{slib} &= \lambda \beta T \left[\alpha (A^2 + 2AB + 2B^2) + \gamma (A + B) \right] \end{aligned} \quad (\text{G.2})$$

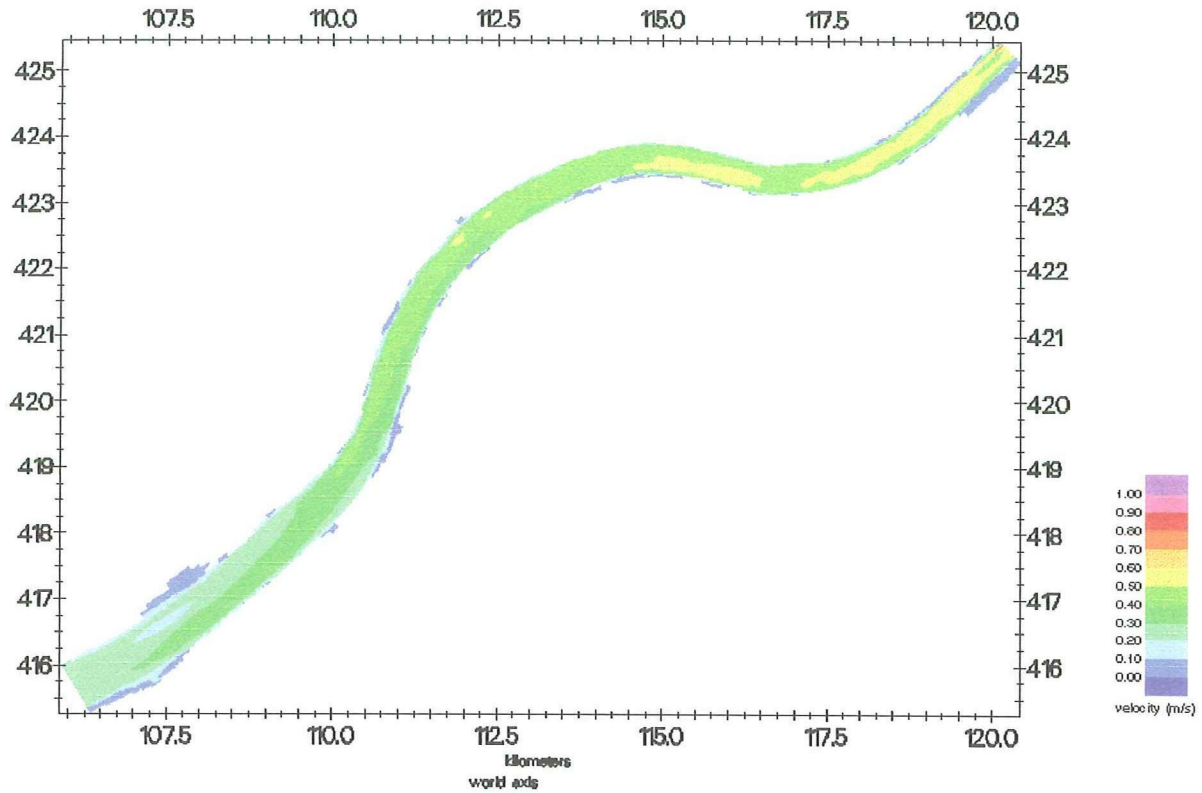
Invullen levert voor de verschillende schattingsmethoden (**Tabel G-2**):

Schattingsmethode	Jaarlijkse slibvracht ($\alpha = 1.063 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^6/\text{s};$ $\gamma = 26 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$)	Jaarlijkse slibvracht ($\alpha = 1.455 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^6/\text{s}; \gamma$ $\gamma = 32 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$)
Max. Likelihood	$1.04 \cdot 10^9 \text{ kg/jaar}$	$1.41 \cdot 10^9 \text{ kg/jaar}$
Methode der Momenten	$0.94 \cdot 10^9 \text{ kg/jaar}$	$1.27 \cdot 10^9 \text{ kg/jaar}$
Kleinste Kwardraten Methode	$0.94 \cdot 10^9 \text{ kg/jaar}$	$1.28 \cdot 10^9 \text{ kg/jaar}$

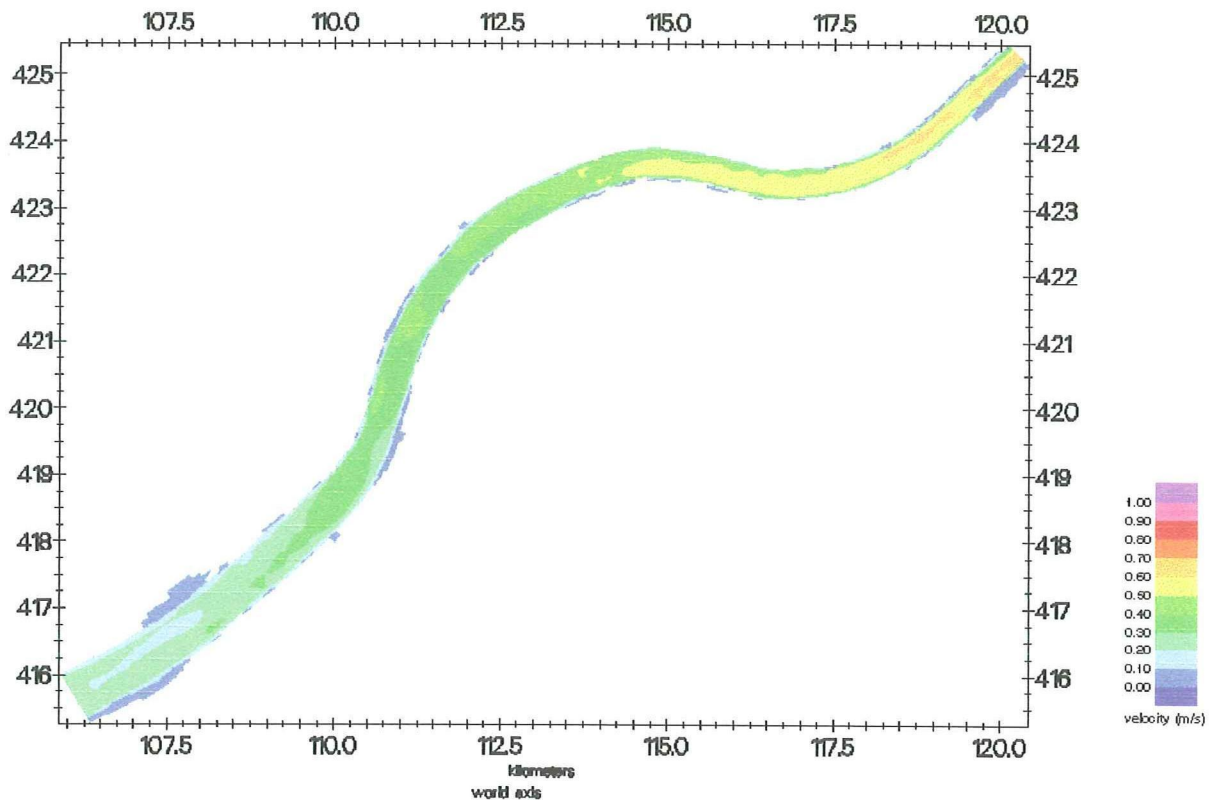
Tabel G-2 **Jaarlijks slibtransport op de Nieuwe Merwede**

Appendix H. Snelheidsvelden

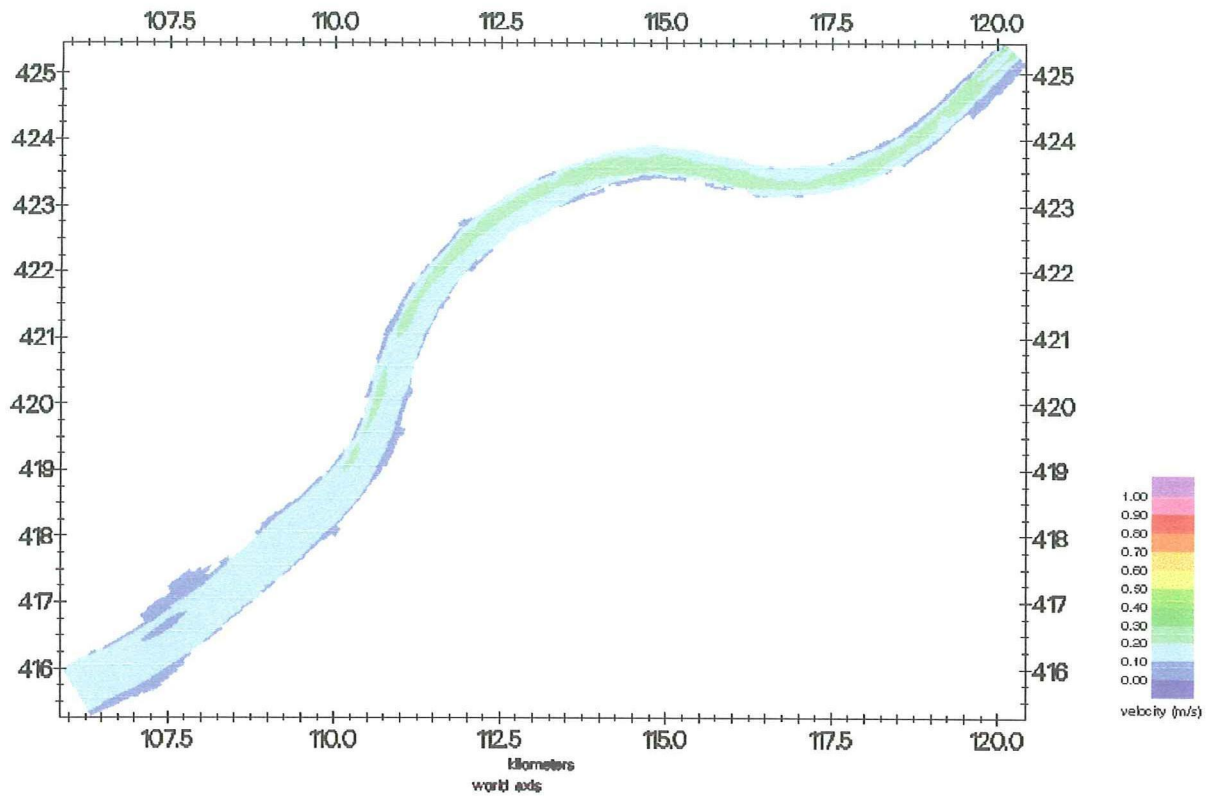
Appendix H.1 $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$



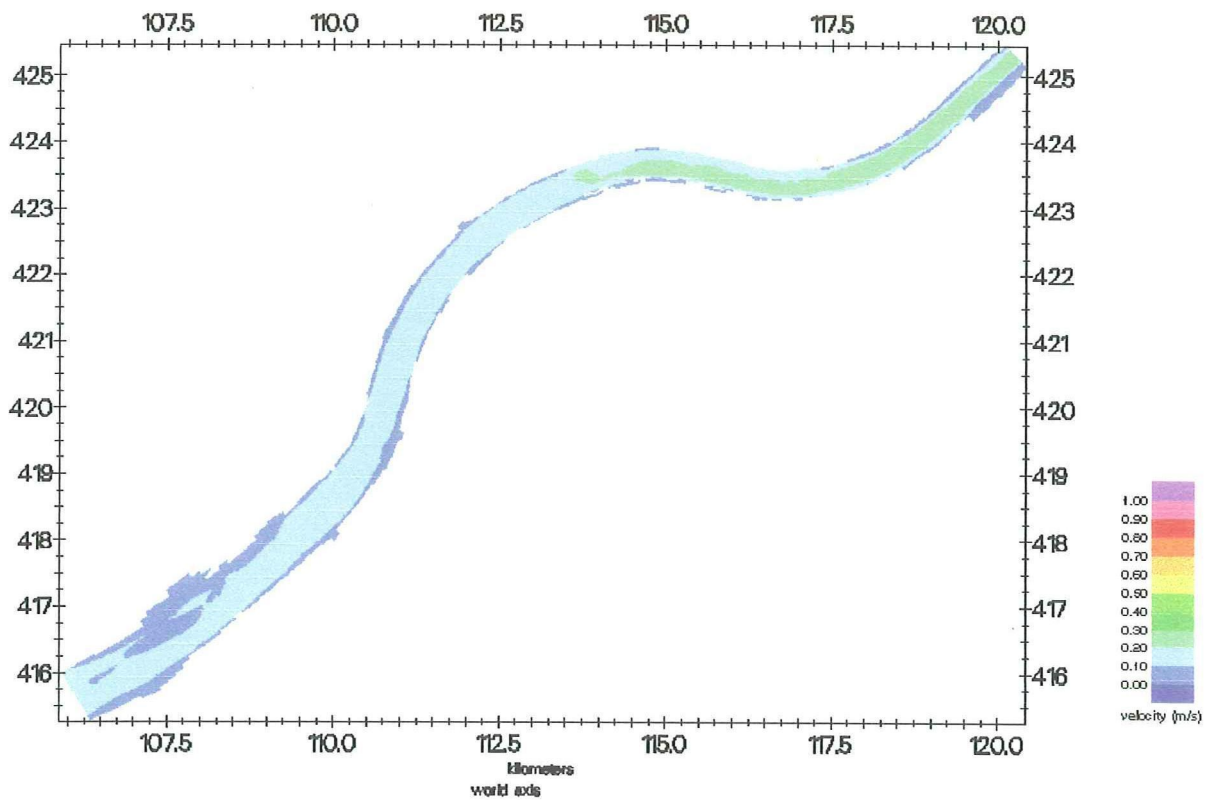
Figuur H-1 Snelheidsveld $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$, 1993, maximaal debiet



Figuur H-2 Snelheidsveld $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$, 1970, maximaal debiet

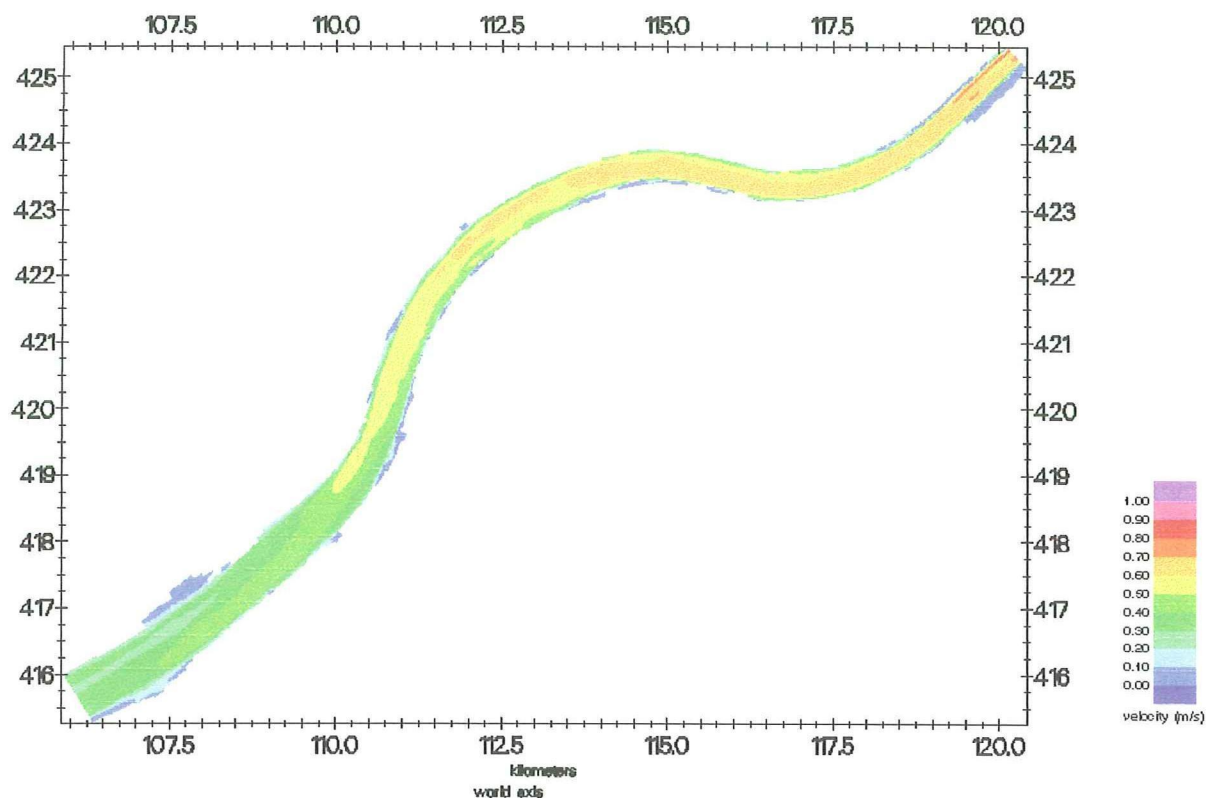


Figuur H-3 Snelheidsveld $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$, 1993, minimaal debiet

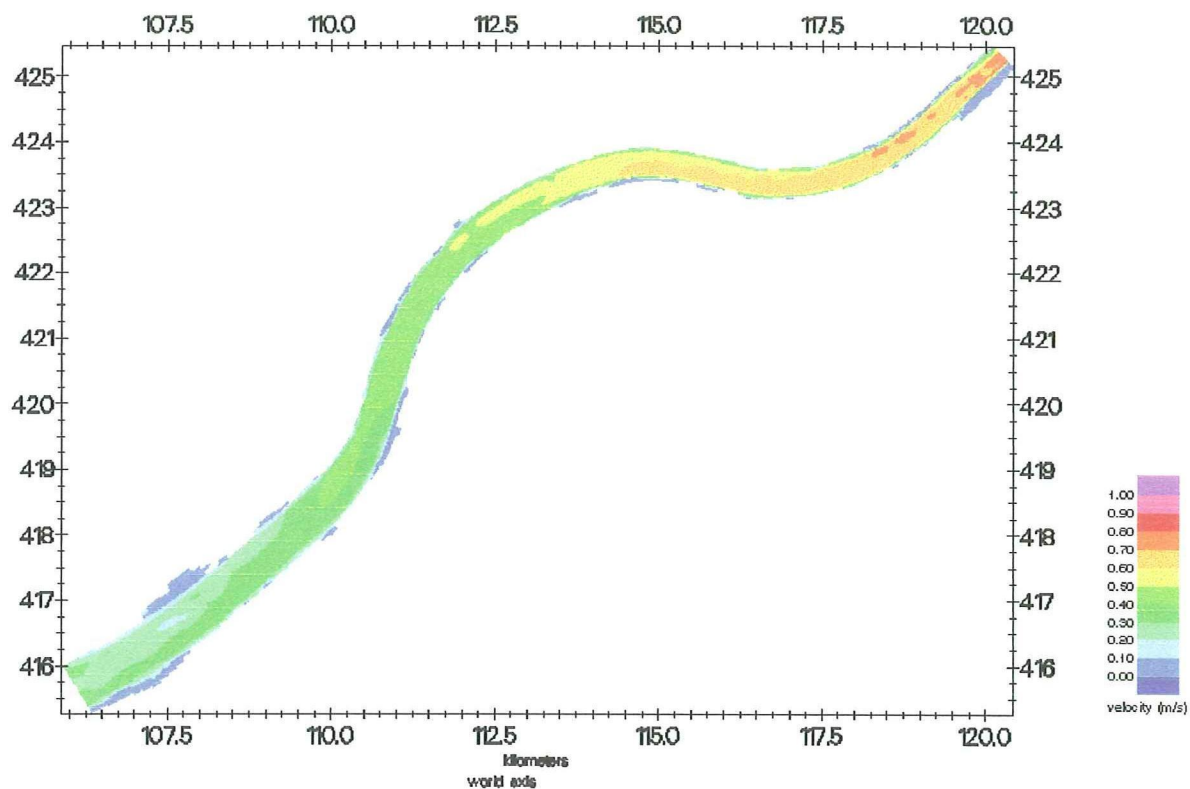


Figuur H-4 Snelheidsveld $Q_{br} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$, 1970, minimaal debiet

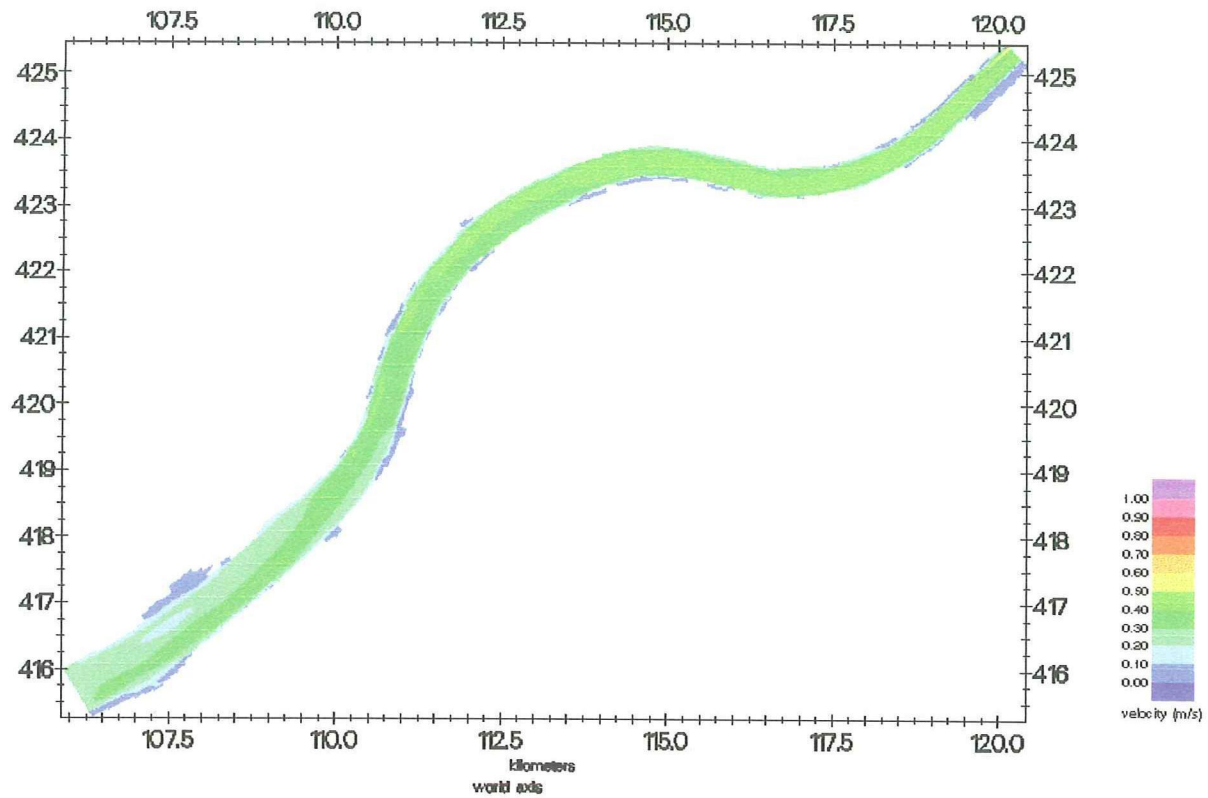
Appendix H.2 $Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$



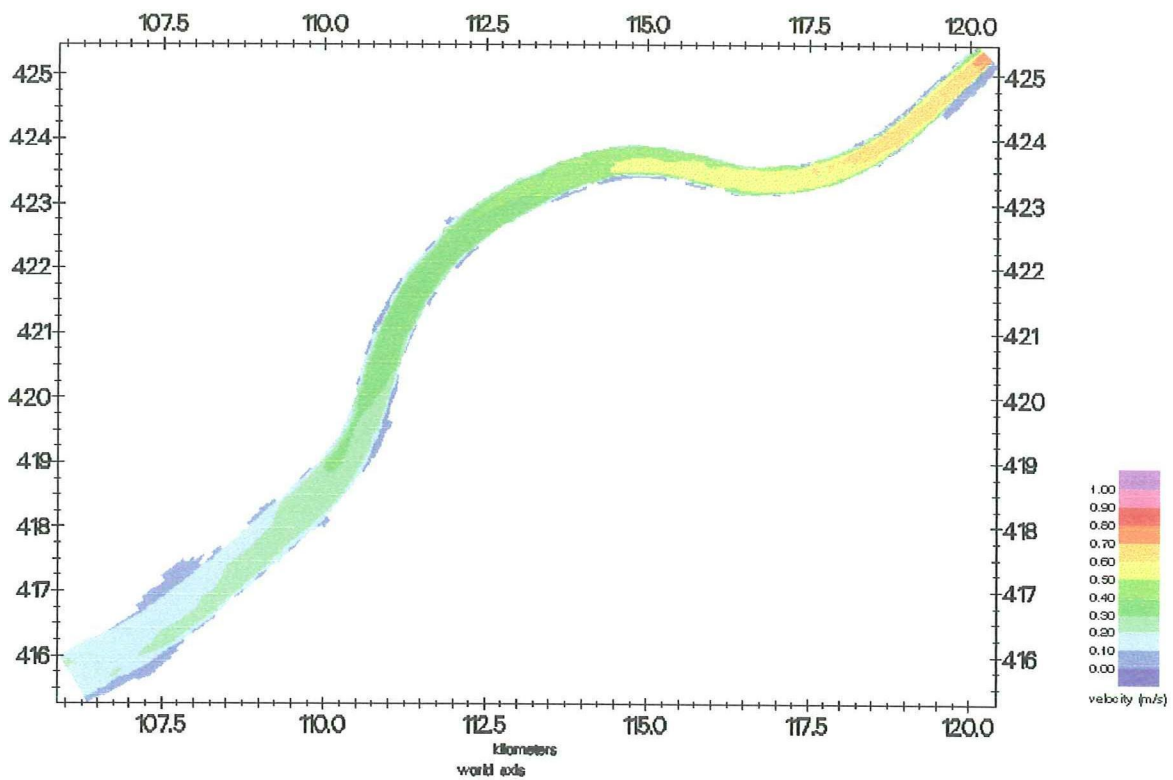
Figuur H-5 Snelheidsveld $Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, 1993, maximaal debiet



Figuur H-6 Snelheidsveld $Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, 1970, maximaal debiet

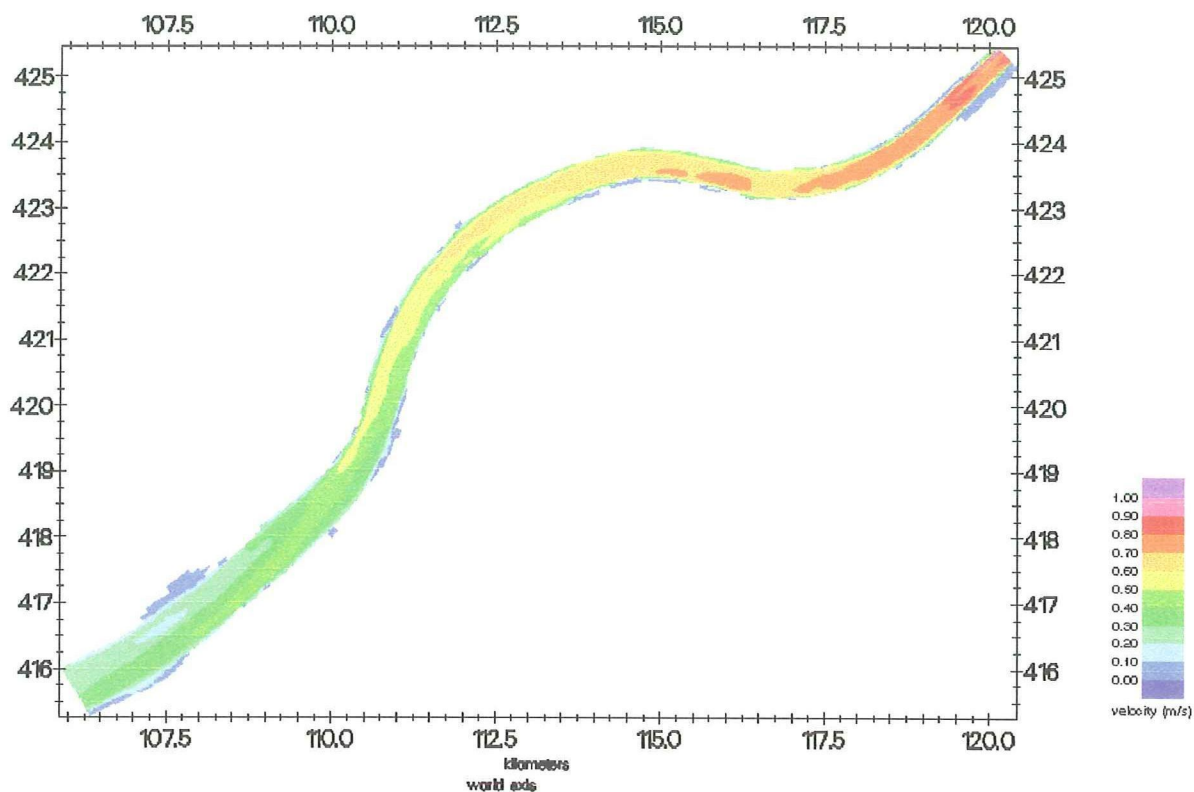


Figuur H-7 Snelheidsveld $Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, 1993, minimaal debiet

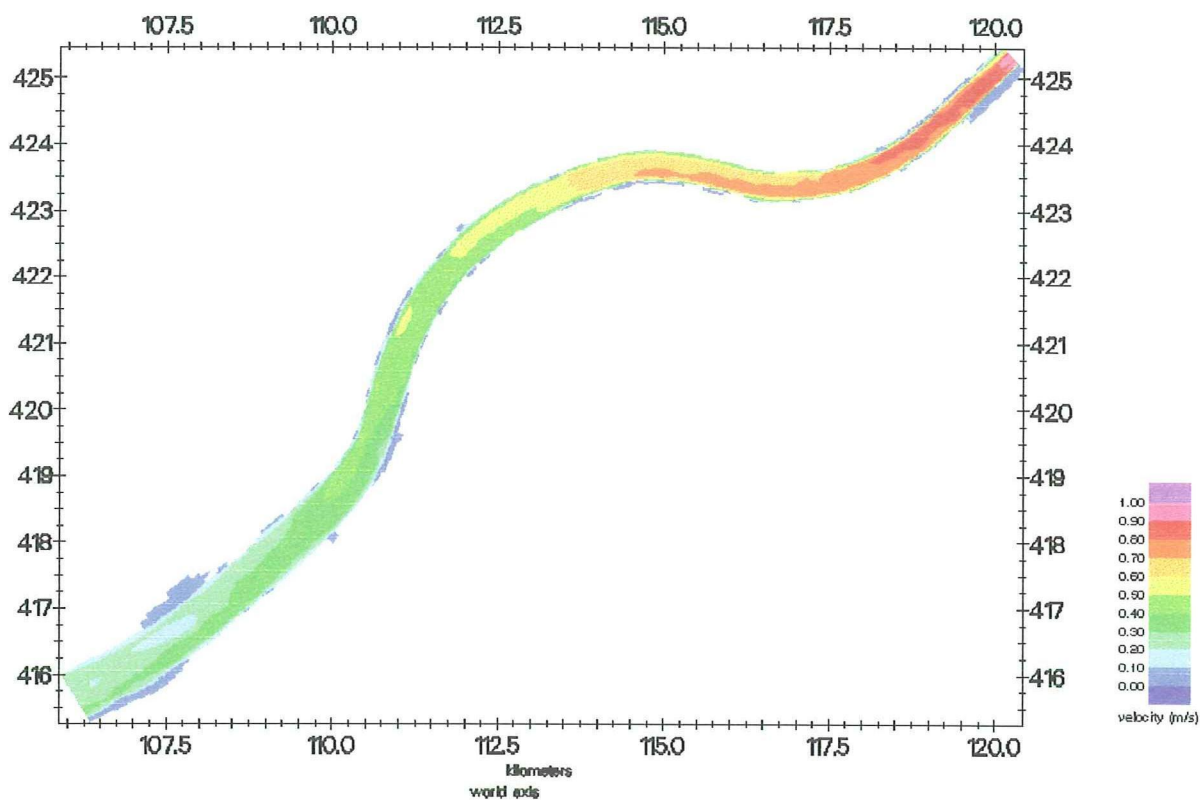


Figuur H-8 Snelheidsveld $Q_{br} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, 1970, minimaal debiet

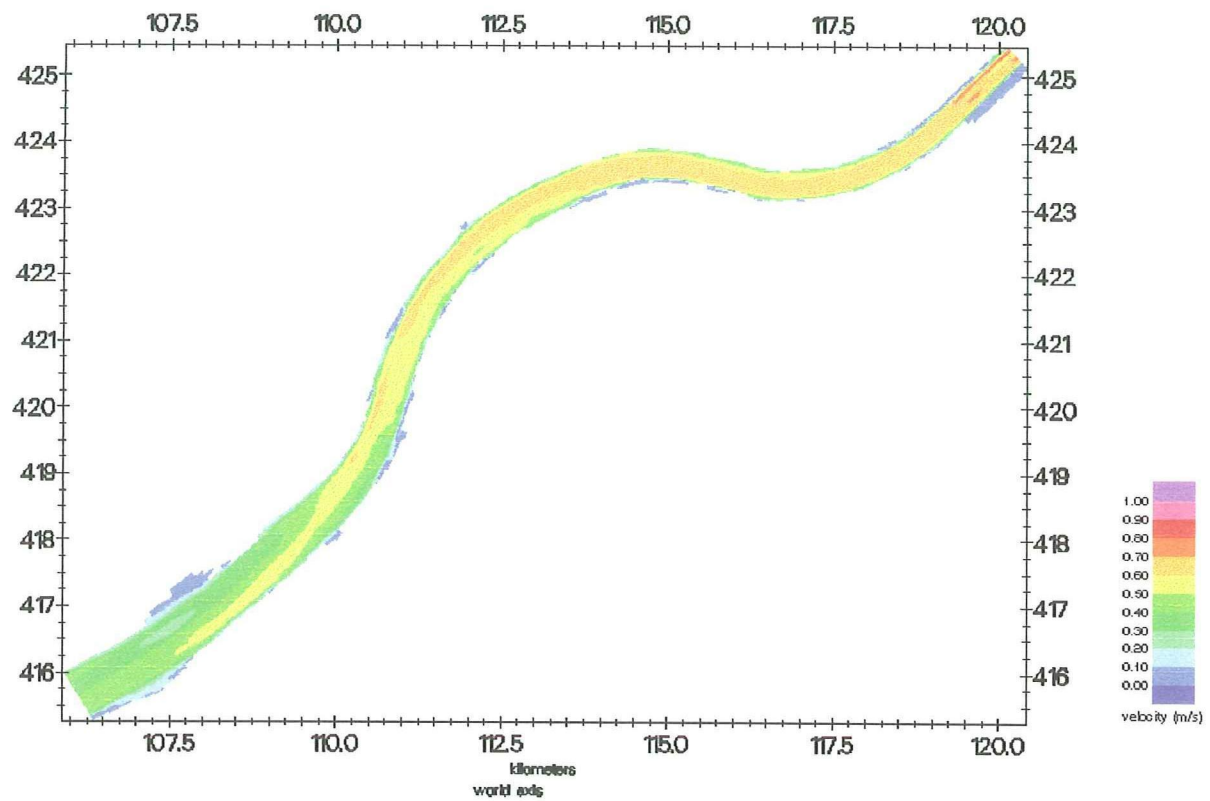
Appendix H.3 $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$



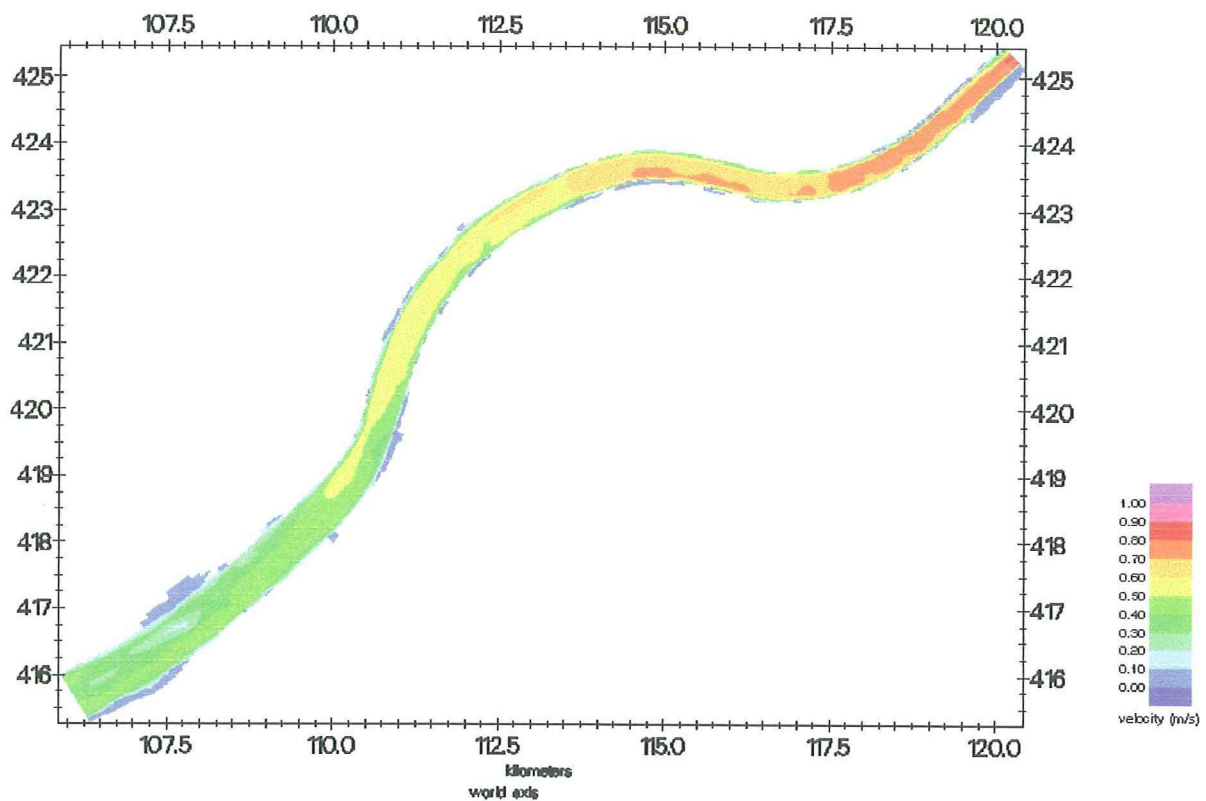
Figuur H-9 Snelheidsveld $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, 1993, maximaal debiet



Figuur H-10 Snelheidsveld $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, 1970, maximaal debiet

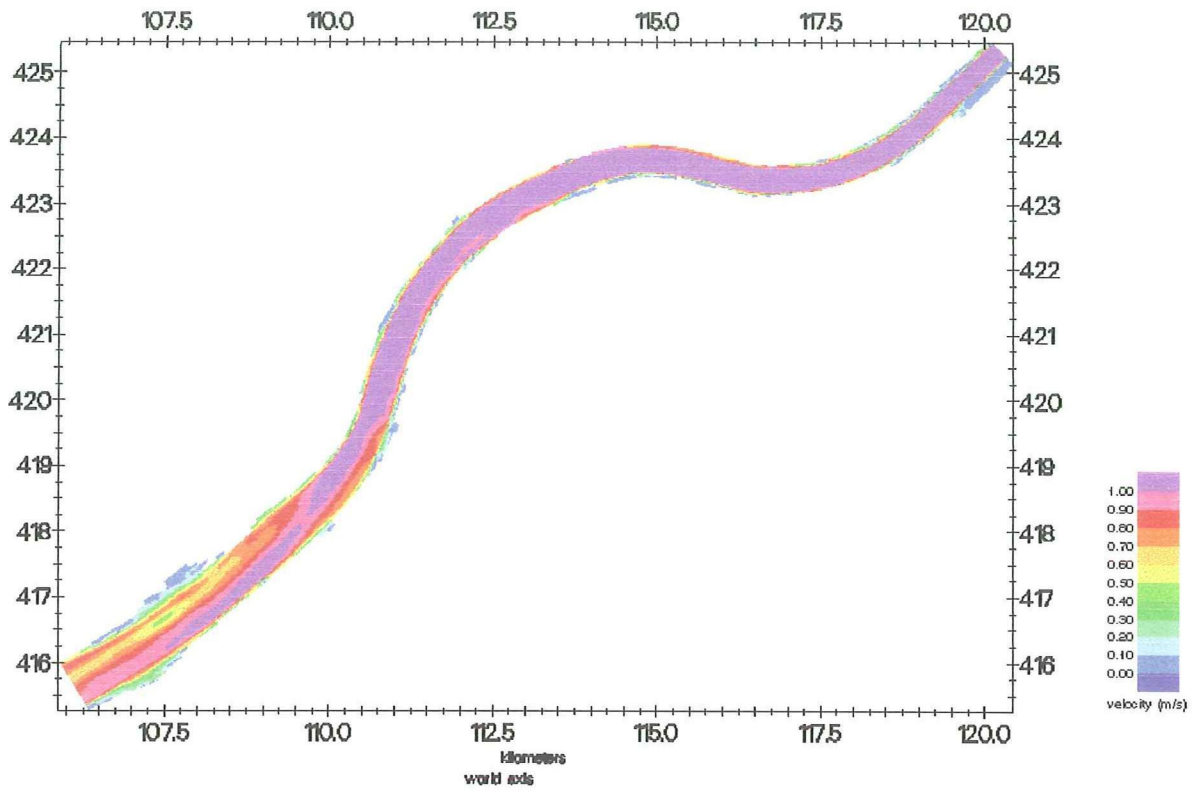


Figuur H-11 Snelheidsveld $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, 1993, minimaal debiet

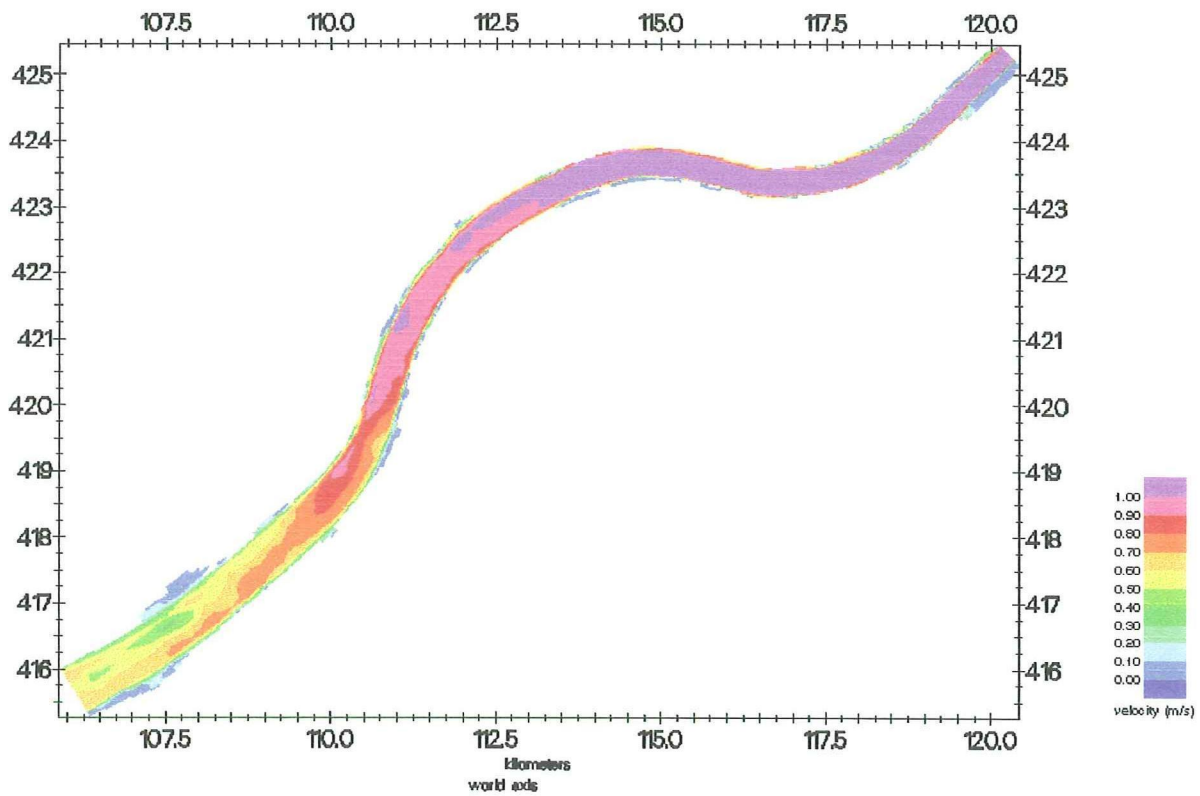


Figuur H-12 Snelheidsveld $Q_{br} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, 1970, minimaal debiet

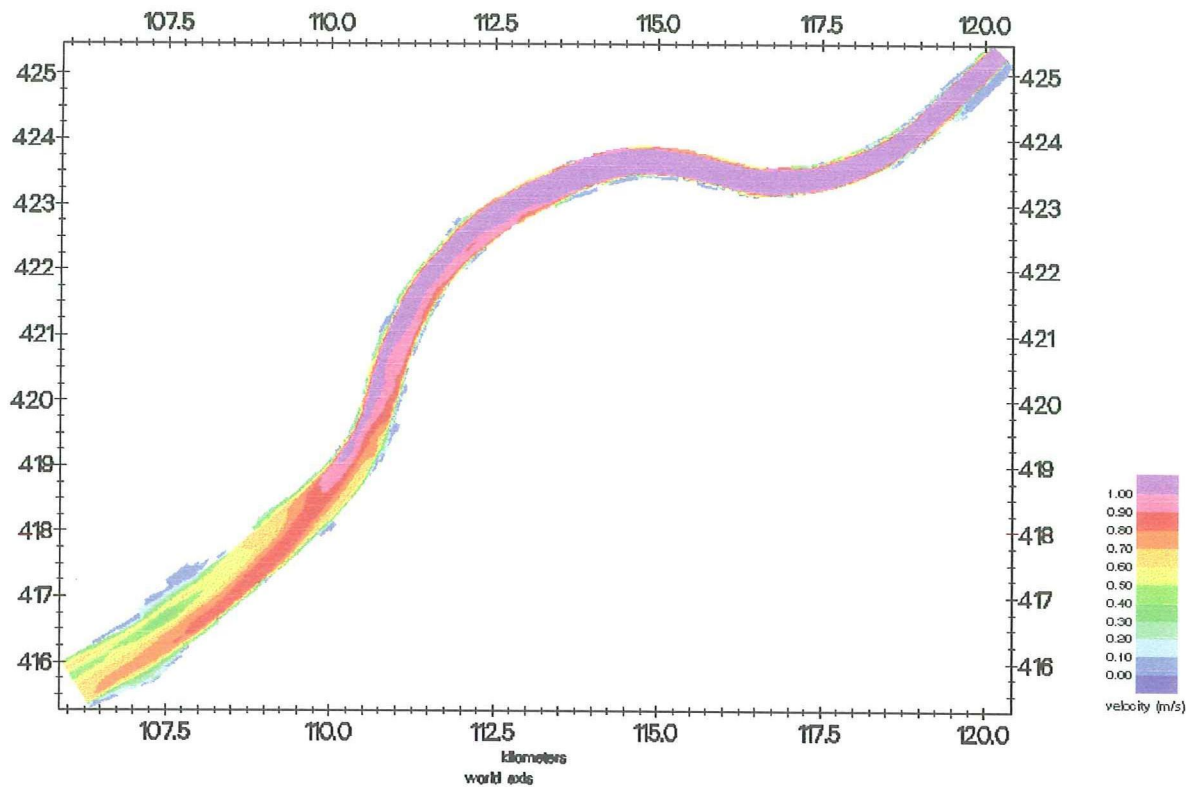
Appendix H.4 $Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$



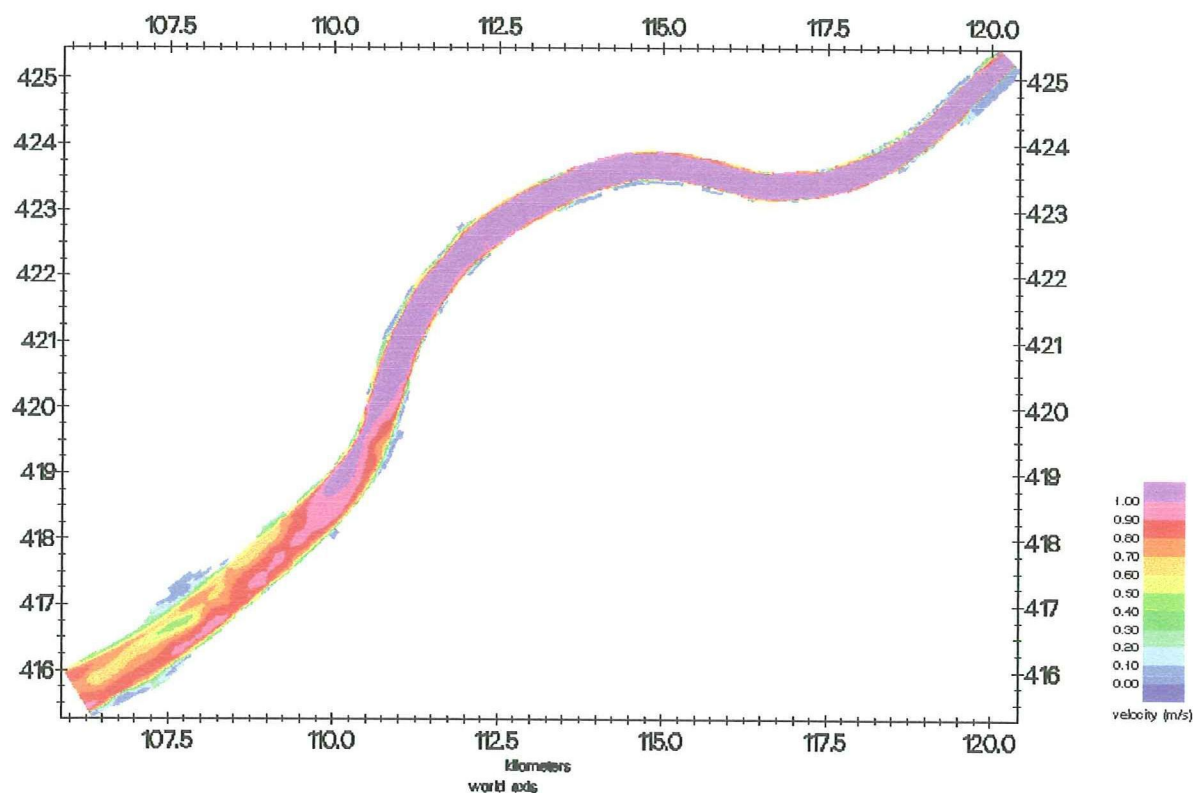
Figuur H-13 Snelheidsveld $Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$, 1993, maximaal debiet



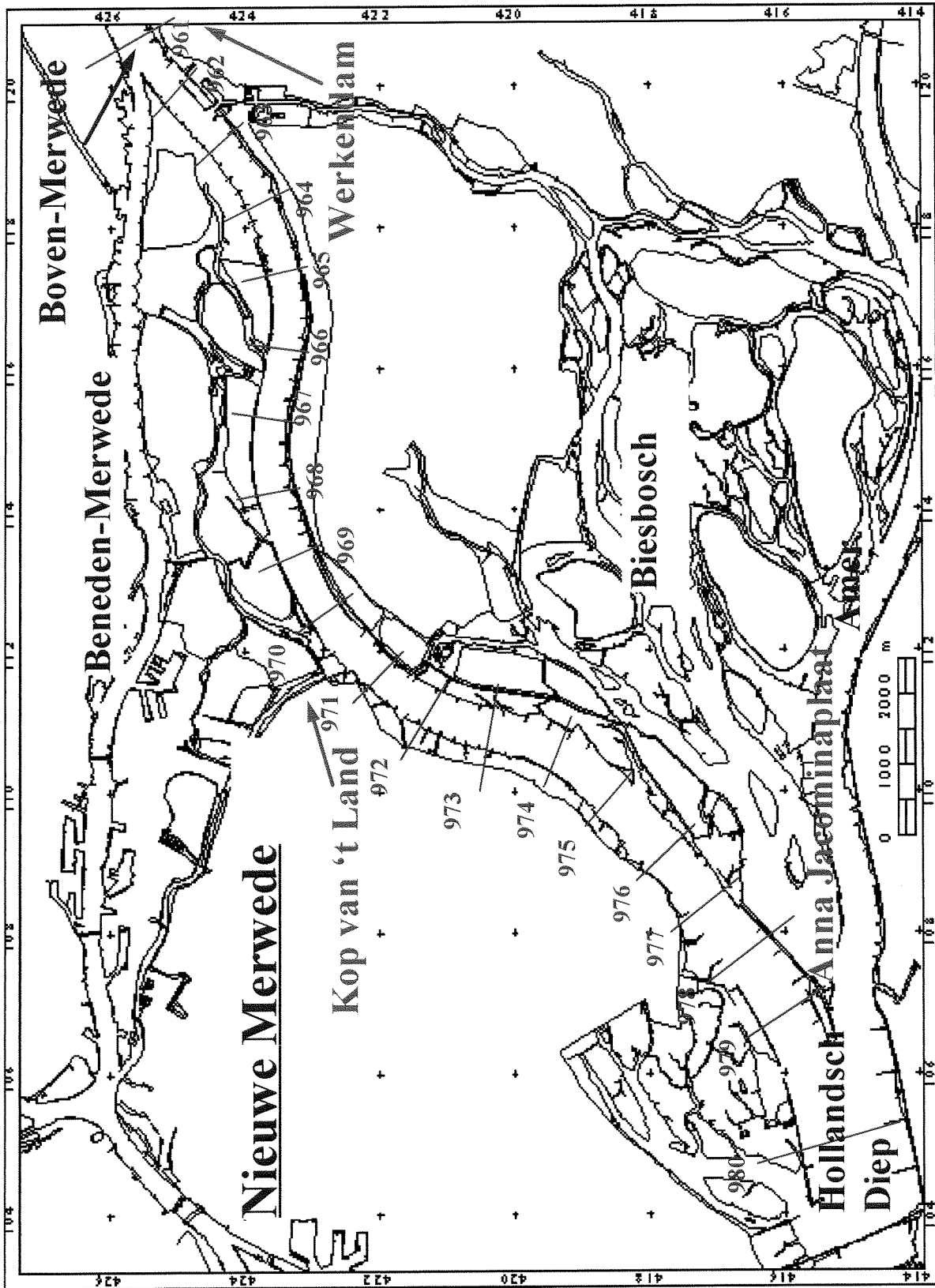
Figuur H-14 Snelheidsveld $Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$, 1970, maximaal debiet



Figuur H-15 Snelheidsveld $Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$, 1993, minimaal debiet



Figuur H-16 Snelheidsveld $Q_{br} = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$, 1970, minimaal debiet



Nieuwe Merwede

rijks waterstaat

riza
wst

