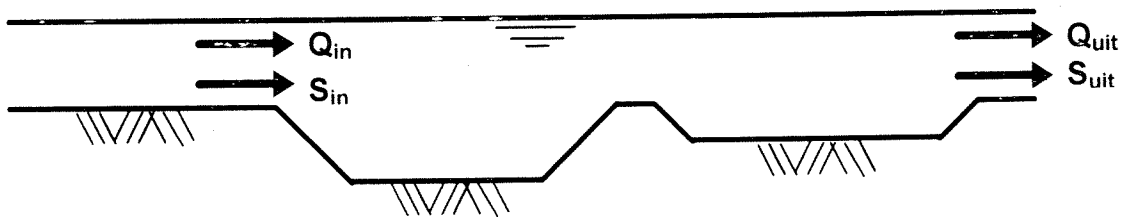

De morfologische effecten van baggergeulen in de Zandmaas



Arthur Balsters
Juli 1998

De morfologische effecten van baggergeulen in de Zandmaas

Juli 1998

Auteur: Arthur Balsters
Schoemakerstraat 266
2628 WL Delft
015-2617062

Afstudeercommissie: Prof.dr.ir. H.J. de Vriend
dr.ir. J.S. Ribberink
ir. H. Havinga
ir. E. van Velzen

Voorwoord

Dit rapport betekent de afsluiting van de afstudeeropdracht *De morfologische effecten van baggergeulen in de Zandmaas*. Het afstuderen heeft plaatsgevonden bij de vakgroep Waterbouwkunde aan de Faculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Theoretisch gezien zijn er mogelijk complexere problemen te bedenken dan in dit rapport aan de orde komt, maar praktisch gezien kwam dit probleem toch redelijk ver. De hoeveelheid data was enorm qua diversiteit en qua kwantiteit, en er moest met de nodige reserve mee worden omgegaan. Dit kan leerzaam zijn, omdat veel aspecten dan aan de orde komen. Er bestaat echter ook het gevaar dat onvoldoende op bepaalde aspecten kan worden ingegaan vanwege de tijd. Buiten de theoretische aspecten beschouw ik de nevenaspecten die met dataverwerking van doen hebben als een leerzame ervaring. Deze nevenaspecten waren:

- 1) enerzijds is men geneigd veel data te willen hebben, want dit geeft veel informatie; anderzijds betekent veel data veel werk en betekent niet persé veel informatie.
- 2) voor het beoordelen van en werken met data is inzicht in de gebruikte meetmethode van groot belang.
- 3) er is nog redelijk wat ruimte voor het ontwikkelen van methodieken om met de reeds gemeten data om te gaan.

Mogelijk dat in de bovenstaande opsomming een aantal aspecten vergeten zijn, maar dan nu ruimte voor een dankwoord. Allereerst bedank ik de examencommissie voor het doorlezen van dit enigszins breedomvattende en lijvige rapport. De examencommissie bestond uit :

Prof.dr.ir. H.J. de Vriend, hoofd van de afstudeercommissie
dr.ir. J.S. Ribberink, extern commissielid
ir. E.H. van Velzen, extern commissielid
ir. H. Havinga, dagelijks begeleider

Verder bedank ik het RIZA voor de geboden faciliteiten en daarbij speciaal de volgende personen voor het op weg helpen bij het project en voor later geboden hulp in de vorm van informatie, of grote bereidheid daartoe:

ir. Ard Wolters
ing. R. van der Veen
dr. W.B.M. ten Brinke

Tenslotte nog een woord van dank voor de medewerkers van de SOBEK-helpdesk bij het Waterloopkundig Laboratorium, voor de bereidwilligheid waarmee zij zich van hun taak kweten.

Arthur Balsters

Samenvatting

Naar aanleiding van de hoogwatergolf op de Maas in 1993 werd door de Minister van Verkeer en Waterstaat de Commissie Boertien II ingesteld, met als opdracht te adviseren op welke wijze de hoogwateroverlast in het Maasdal in de toekomst beperkt kan worden. Het advies luidde in hoofdzaak een verbreding van de Grensmaas en een verdieping van de Zandmaas. De verdieping van de Zandmaas zou ongeveer drie meter moeten bedragen over het traject Linne(km 68)-Megen(km191). Omdat er in Nederland geen ervaring is met rivierverdiepingen op dergelijke schaal, heeft men in eerste instantie twee proefbaggergeulen op het traject Gennep(km 155)-Grave(km 175) gecreëerd. Bij deze geulen voert men een monitoringsonderzoek uit. Geul 1 loopt van km 155-km 164 en geul 2 loopt van km 166-km 174. Bij Mook (km 165) is een spoorbrug aanwezig en lopen veel leidingen onder de rivier. Omdat men wilde voorkomen dat deze constructies gevaar zouden lopen, heeft men de rivier onverdiept gelaten van km 164 tot km 166. Bij het monitoren kwam naar voren dat bij km 156 veel erosie optrad als gevolg van het blootleggen van een fijne laag.

Zijn functie als rivierbeheerder brengt voor RWS o.a. de plicht met zich mee de hoogwateroverlast te beperken. Hiervoor is inzicht nodig in de toekomstige veranderingen in een rivier en inzicht in extreme situaties die zich in de rivier voordoen. Voor het debiet bij maatgevend hoogwater geldt $Q_{MHW} = 3826 \text{ m}^3/\text{s}$. Door de rivierverdieping is een waterstandsdeling bewerkstelligd. Als gevolg van de ingreep treden morfologische veranderingen op, zoals de sterke erosie bij de blootgelegde fijne laag. Door de morfologische veranderingen, worden de waterstanden beïnvloed. Met het oog op het beperken van de hoogwateroverlast is het van belang te weten hoe dit zich in de toekomst ontwikkelt. Verder is het, i.v.m. de veiligheid van de aanwezige spoorbrug en de onder de rivier lopende leidingen bij km 165 van belang te weten wat voor bodemveranderingen optreden. T.a.v. de spoorbrug had men de eis van een toelaatbare erosie van nul meter gesteld.

In het afstudeerwerk is aandacht besteedt aan het verwerven van inzicht in de optredende morfologische veranderingen met het oog op de veiligheid van de constructies en de gevolgen van deze veranderingen op de waterstand bij Q_{MHW} . Gekeken is aan de hand van het 1D-programma SOBEK, met een versie die rekent met uniform sediment, hoe de situatie verandert in de periode 1997-2017. De gevoeligheid van het model is ook onderzocht. Alvorens het model kon worden gecreëerd, moesten eerst de monitoringsgegevens worden geanalyseerd om de benodigde parameters en de optredende bodemveranderingen te bepalen. Onderscheid is daarom gemaakt in een deel *monitoringsgegevens* en *modellering van het gebied*.

monitoringsgegevens

Met Chézy-formule werden dagelijkse Chézy-waarden bepaald. Er bleek een grote spreiding in de gevonden waarden te zitten bij debieten beneden $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Verondersteld is dat bij deze debieten de vertragingseffecten te groot zijn door het stuwen in het gebied, en dat om deze reden de formule niet meer goed opgaat. Bij hogere debieten vond een kleinere waterstandsverhoging plaats en lag de waterdiepte dichter bij de evenwichtsdiepte. Gekozen is voor het gemiddelde van de berekende Chézy-waarden bij debieten hoger dan $400 \text{ m}^3/\text{s}$, hetgeen leidde tot een Chézy-waarde van ongeveer $41 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.

De korrelgrootten van het bodemmateriaal en het materiaal dat bij de sedimenttransportmetingen is opgevangen, is bepaald. Het bodemmateriaal bleek te onderscheiden in fijnkorrelig en grofkorrelig materiaal. Het opgevangen materiaal bij de transportmetingen kenmerkte zich doordat het fijnkorreliger was dan het bodemmateriaal. De gebruikte SOBEK-versie rekent met uniform sediment en gaat ervan uit dat het bodemmateriaal overeenkomt met het getransporteerde materiaal, wat hier duidelijk niet het geval is. Mogelijk kan deze problematiek ondervangen worden door het gebruik van een gegradeerd model, waarbij een onderscheid gemaakt wordt tussen het bodemmateriaal en het getransporteerde materiaal.

Een transportformule werd gevonden door de transportformule van Meyer-Peter & Müller te fitten op de dagtransporten die gemeten waren met Helley-Smithmetingen (bodemtransport) en AZTM-metingen (zwevend transport). Voor de formule was een correctiefactor van 3 nodig. Ten aanzien van de metingen viel op te merken dat het gemeten zwevend transport kwantitatief hoog was en de verhouding zwevend transport-bodemtransport ook hoog was. Verder week het gemeten fluxprofiel van het zwevend transport sterk af van een theoretische benadering van het fluxprofiel.

Uit bodempeilingen zijn de volgende grootschalige bodemveranderingen geschat:

- 1) 5000 m³ sedimentatie bij km 155
- 2) 15000 m³ erosie bij km 156
- 3) 4000 m³ sedimentatie op km 157, bij de instroom van de Niers in de Maas
- 4) instorten van de geulranden in geul 2

Op grond van een ordebeschouwing werd aangenomen dat de sedimentatie bij de instroom van de Niers afkomstig is van de bovenstroomse erosie in de Maas bij km 156. Honderd procent zekerheid hierover kan niet gegeven worden. Verder bleken de processen in geul 2 niet zo sterk als in geul 1, afgezien van het instorten van de geulranden, hetgeen niet van belang was voor het model.

Op grond van bodemboringen en optredende processen werd de volgende situatie vermoed: fijnkorrelig materiaal bij km 156 en grofkorrelig materiaal op de overige kilometers.

modellering van het gebied

Dit deel is gewijd aan het creëren van het SOBEK-model en de berekeningen ermee. Het model is hydraulisch geijkt op waterstanden, waarbij het zomerbed geijkt is door variatie met de Chézy-waarde en de rivierbodem, en het winterbed door variatie met de breedten van de uiterwaarden. Het model is morfologisch geijkt op het sedimentatiefront bij km 155 en de erosie bij km 156 via variatie van de korrelgrootte. Bij het morfologisch ijken deed zich het probleem voor dat bij de overgang van fijnkorrelig naar grofkorrelig bodemmateriaal de bodem omhoogrees. De oorzaak hiervan lag in SOBEK. Om dit probleem te ondervangen werd aangenomen dat het grofkorrelige materiaal als vaste laag reageerde, waar het fijnkorrelige sediment overheen werd getransporteerd. Omdat deze aanname wat afwijkt van de werkelijkheid en omdat is er nogal wat onzekerheid is betreffende de korrelgrootte van het bodemmateriaal op de diverse lokaties is gekozen is voor een scenario-aanpak. Naast berekeningen met het model wat verondersteld wordt de situatie het best te benaderen, scenario 1, zijn berekeningen uitgevoerd met twee andere scenario's; het geval dat alleen overal waar gebaggerd is een fijnkorrelige laag vrijkomt (scenario 2), en het geval dat benedenstrooms van het begin van geul 1 overal een fijnkorrelige laag aan de oppervlakte ligt (scenario 3).

Uit de runs die met de scenario's werden uitgevoerd, kwam naar voren dat de waterstandsveranderingen bij Q_{MHW} niet zo groot waren. De grootste waterstandsstijgingen en-dalingen lagen in de orde van een paar centimeter, hetgeen niet significant is gezien de gebruikelijke overhoogte die men bij dijken pleegt aan te houden, welke in de orde van een meter ligt. De bodemveranderingen lagen lokaal in de orde van een meter en waren dus wel vrij groot, vooral gezien de eis van een toegestane erosie van nul meter bij de spoorbrug.

De gevoeligheid van het model voor veranderingen in de Chézy-waarde en de korrelgrootte is onderzocht, door de Chézy-waarde en de korrelgrootte uit het monitoringsonderzoek in de scenario's in te vullen en de uitkomsten die dit gaf te vergelijken met de uitkomsten van scenario's met de Chézy-waarde en de korrelgrootten die via ijking waren gevonden. Op de waterstand bleek dit van betrekkelijk weinig invloed. In het uiterste geval trad een verschil van 10 cm tussen de modellen op. Morfologisch waren de verschillen wel zeer groot, vooral voor wat betreft de korrelgrootte kon het verschil meters bedragen. Geconcludeerd kon dus worden dat bij het berekenen van de waterstandsveranderingen bij Q_{MHW} het model vrij ongevoelig is voor veranderingen in de Chézy-waarde en de korrelgrootten, maar bij het berekenen van de bodemveranderingen zeer gevoelig.

eindresultaten

De volgende problemen traden op:

- SOBEK kon niet goed overweg met de sterk variërende korrelgrootten in het gebied en grote problemen ontstaan bij de overgang van fijnkorrelige naar grofkorrelige gebieden. Afpleistering valt te verwachten, maar de gebruikte SOBEK-versie met uniform sediment kan dit niet meenemen. Hierdoor zal erosie in het model verder doorzetten dan in werkelijkheid kan worden verwacht.
- het getransporteerde materiaal was veel fijnkorreliger dan het bodemmateriaal, en dus is het rekenen met een SOBEK-versie voor uniform sediment niet correct.

De volgende hoofdconclusie is getrokken:

Het probleem laat zich niet goed beschrijven met een model dat uitgaat van de aanname van uniform sediment, omdat de korrelgrootten in het gebied te sterk verschillen. Een proces als afpleistering kan niet worden meegenomen, terwijl dit wel relevant is. SOBEK-berekeningen met uniform sediment zijn dan ook niet geschikt voor het onderzochte probleem. De oplossing moet gezocht worden in gegradeerd rekenen.

T.a.v. de model uitkomsten zijn de volgende conclusies getrokken:

Voor de waterstanden bij Q_{MHW} zijn kleine veranderingen te verwachten a.g.v. de morfologische veranderingen en met betrekking tot de hoogwateroverlast zullen de effecten redelijk beperkt zijn. De morfologische veranderingen kunnen groot zijn, maar gezien de hoofdconclusie en gezien de gevoeligheid van de modeluitkomsten voor korrelgrootten en Chézy-waarde lijkt het niet verantwoord hier een uitspraak over te doen.

Tenslotte zijn de volgende aanbevelingen gedaan:

- onderzoek naar de mogelijkheden van gegradeerd rekenen voor de baggergeulen.
- onderzoek naar het nodige onderhoud van de geulen en aspecten die hiermee samenhangen.
- het verrichten van bodemboringen in geul 2 om een beeld te krijgen van het daar aanwezige materiaal.
- een gedegen geologisch onderzoek naar de vrijkomende lagen, met o.a. aandacht aan de ontstaansgeschiedenis.
- het nagaan van de herkomst van het materiaal dat sedimenteert bij de Niers, om uitsluitsel te geven op de vraag of het materiaal voornamelijk door de Niers wordt aangevoerd of dat het materiaal van het eroderende materiaal bij km 156 afkomstig is.
- controle van de betrouwbaarheid van de AZTM-metingen, met daarbij aandacht voor het hoge zwevende transport wat wordt waargenomen en het opmerkelijke fluxprofiel waarbij het transport in een vertikaal dicht bij de waterbodem weinig varieert t.o.v. het transport dicht bij de wateroppervlakte in de betreffende vertikaal.
- nader onderzoek naar de betrouwbaarheid van kuberingen uit DTM-bestanden, of naar geschikte werkwijzen om hiermee om te gaan. Bij dit onderzoek is aandacht voor de lodingen mogelijk van belang.

deel I: Inleiding, probleemaafbakening en probleemaanpak

1	Inleiding, probleemaafbakening en probleemaanpak	1
	1.1 Aanzet tot het eerste baggerbestek.....	1
	1.2 Het eerste baggerbestek.....	1
	1.3 Probleemaafbakening.....	2
	1.4 Probleemaanpak.....	3
	1.4.1 Modelvereisten.....	3
	1.4.2 Rapportopbouw.....	3

deel II: Monitoringsgegevens

2	Uitgevoerde metingen	5
	2.1 Inleiding.....	5
	2.2 Waterstandsmetingen.....	5
	2.3 Debietmetingen.....	5
	2.4 Korrelgrootten.....	6
	2.5 Sedimenttransport.....	6
	2.6 Bodempeilingen.....	9
3	Bepaling van de bodemruwheid	10
	3.1 Chézy-waarde.....	10
	3.2 Werkwijze berekening Chézy-waarde.....	11
	3.3 Eerste resultaten.....	12
	3.4 Gekozen Chézy-waarde.....	13
4	Bepaling van de korrelgrootte	14
	4.1 Inleiding.....	14
	4.2 Theoretische bepaling van een representatieve zeefkromme.....	14
	4.3. Materiaal Helley-Smithmetingen.....	16
	4.3.1 Gevolgde werkwijze.....	16
	4.3.2 Resultaten.....	16
	4.4 Materiaal bodemboringen.....	17
	4.4.1 Werkwijze.....	17
	4.4.2 Resultaten.....	18
	4.4.3 Controle.....	18
	4.5 Conclusie t.a.v. de gevolgde werkwijze.....	19
	4.5.1 Onderscheid bodemmateriaal.....	19
	4.5.2 Conclusie t.a.v. gegradeerd rekenen.....	19
5	Transportformule	20
	5.1 Inleiding.....	20
	5.2 Theoretisch sedimenttransport.....	20
	5.2.1 Sedimenttransportparameters.....	20
	5.2.2 Meyer-Peter & Müller.....	21
	5.2.3 Engelund-Hansen.....	21
	5.2.4 Van Rijn.....	21
	5.2.5 Berekend sedimenttransport vanuit de theorie.....	23
	5.3 Gemeten sedimenttransport.....	23
	5.4 Bodemtransport.....	24
	5.4.1 Meetgegevens.....	24

5.4.2 Aannames.....	24
5.4.3 Werkwijze.....	26
5.4.4 Resultaten.....	26
5.5 Zwevend transport.....	27
5.5.1 Theoretisch fluxprofiel.....	27
5.5.2 Metingen versus theoretische berekeningen.....	29
5.5.3 Werkwijze.....	31
5.5.4 Resultaten.....	31
5.6 Gemeten maximaal en minimaal transport over de gehele waterdiepte.....	31
5.7 Gevonden transportformule.....	33
5.8 Checken van de gevonden transportformule aan het sedimentatiefront.....	35
5.8.1 Inleiding.....	35
5.8.2 Theorie.....	35
5.8.3 Koppeling met de gevonden formule.....	36
5.8.4 Conclusie.....	37
5.9 Kritische kanttekening betreffende de resultaten van de AZTM-metingen.....	37
5.10 Commentaar t.a.v. de korrelkeuze.....	37
6 Nauwkeurighedsanalyse bodempeilingen.....	38
6.1 Inleiding.....	38
6.2 Fouten ten gevolge van de metingen.....	38
6.2.1 Uitvoering van de metingen.....	38
6.2.2 Factoren die de nauwkeurigheid van de echoloding beïnvloeden.....	38
6.2.3 Onnauwkeurigheid van een loding.....	40
6.3 Fouten ten gevolge van de dataverwerking.....	42
6.4 Schatting van de onnauwkeurigheden.....	43
6.4.1 Onnauwkeurigheid bij één profiel.....	43
6.4.2 Onnauwkeurigheid bij een verschilkaart.....	44
6.5 Conclusies.....	44
7 Waarnemingen in de peilgegevens.....	45
7.1 Inleiding.....	45
7.2 Lengteprofielen.....	45
7.3 Verschilkaarten.....	45
7.4 Dwarsprofiel.....	47
7.5 Kuberingen.....	48
7.5.1 Arc/info-kuberingen.....	48
7.5.2 Globale kuberingen.....	49
7.6 Sedimentatie bij de Niers.....	50
7.7 Conclusies vanuit de peilingen.....	51
8 Vermoedelijke bodemmateriaal in het gebied.....	52
8.1 Inleiding.....	52
8.2 lokale bodemmateriaal.....	52
8.3 Vermoedde aanwezige bodemmateriaal.....	54
deel III: Modelling van het gebied	
9 Gebiedsbeschrijving in het model.....	55
9.1 Inleiding.....	55
9.2 Geometrie van de dwarsprofielen.....	55
9.3 Hydraulische randvoorwaarden voor de termijnberekeningen.....	57

9.4	Chezy-waarde.....	59
9.5	Bodemmateriaal.....	59
9.6	Sedimenttransportformule.....	59
10	De gebruikte plaats- en tijdstap.....	60
10.1	Steady state.....	60
10.2	Hydraulische stapgrootten.....	60
10.3	Morfologische stapgrootten.....	60
11	De ijking van het model.....	62
11.1	Het ijken van de waterbeweging.....	62
11.1.1	IJkmethoediek.....	62
11.1.2	Hydraulische randvoorwaarden bij de ijking.....	62
11.1.3	IJkresultaten.....	63
11.2	Het ijken op de morfologische veranderingen.....	63
11.2.1	IJkmethoediek.....	63
11.2.2	Morfologische randvoorwaarde bij de ijking.....	64
11.2.3	Drempelvorming bij het ijken van het oorspronkelijke model.....	64
11.2.4	Fixed layer-aanname.....	65
11.2.5	Scenario 1.....	67
11.2.6	IJkresultaten.....	67
11.3	Het model.....	67
12	Modelberekeningen.....	68
12.1	Scenario-aanpak.....	68
12.2	Optredende veranderingen bij $Q_{MHWS'86}$ in de periode 1997-2017.....	70
12.3	Conclusies uit de scenario's.....	71
13	Gevoeligheid van het model t.a.v. de monitoringsgegevens.....	72
13.1	Verschillen tussen de ijkwaarden en de monitoringswaarden.....	72
13.2	Terugbrengen van de rekentijd.....	72
13.3	Invloed van de korreldiameter uit het monitoringsonderzoek.....	73
13.4	Invloed van de Chézy-waarde uit het monitoringsonderzoek.....	74
13.5	Conclusies uit het gevoeligheidsonderzoek.....	75
13.5.1	Gevoeligheid t.a.v. de korreldiameter.....	75
13.5.2	Gevoeligheid t.a.v. de Chézy-waarde.....	75
13.5.3	Conclusies naar het model.....	75
deel IV: Eindresultaten		
14	Kwalitatieve opmerkingen t.a.v. eventueel onderhoud.....	76
15	Afpleistering.....	77
16	Eindconclusies en aanbevelingen.....	78
16.1	Hoofdconclusie.....	78
16.2	Overige conclusies.....	78
16.3	Aanbevelingen.....	79

Lijst van bijlagen

- bijlage 1: a) en b) Schematisch overzicht gebied en plaatsen waar metingen zijn uitgevoerd
- bijlage 2: Afvoeren Venlo gemeten om 21.00 u, periode 1-12-1996 - 30-04-97
- bijlage 3: a) dwarsprofiel km 141,4
b) dwarsprofiel km 158,8
c) dwarsprofiel km 183,5
- bijlage 4: a) Chézy-waarden km 151 en km 157
b) Chézy-waarden km 172
- bijlage 5: Lokale gemiddelde D_0 - en D_{100} -waarden
- bijlage 6: Vanuit de formules berekende sedimenttransporten
- bijlage 7: Vanuit de transportmetingen berekende transporten
- bijlage 8: a) Sedimentatiefront bij geul 1 uit waarnemingen
b) Voortplanting sedimentatiefront in geul 1 volgens berekeningen
- bijlage 9: Aanwezige DTM-bestanden
- bijlage 10: Globale processen op de lengteprofielen
- bijlage 11: Lokale processen op de lengteprofielen
- bijlage 12: a) en b) Beschrijving van de waarnemingen uit de verschilkaarten
- bijlage 13: a) Verschilkaarten (km 155)
b) Verschilkaarten (km 156)
c) Verschilkaarten (km 157)
d) Verschilkaarten (km 162)
e) Verschilkaarten (km 172)
- bijlage 14: a) en b) KUBEER.AML / INTEGER.AML
- bijlage 15: Resultaten Arc/info kuberingen
- bijlage 16: Decadegemiddelde afvoeren periode 1-1-1991 - 30-12-1996
- bijlage 17: a) Resultaten hydraulische ijking op gemeten waterstanden
b) Resultaten hydraulische ijking ZWENDL-berekeningen
- bijlage 18: a), b), c), d) en e) Lijst van de modelprofielen
- bijlage 19: Lijst van de modeldoorsneden
- bijlage 20: Lijst overige modelwaarden
- bijlage 21: Extra modelgegevens betreffende de verschillende scenario's
- bijlage 22: Bodemligging in 2017
- bijlage 23: Waterstandsval in 2017 t.o.v. 1997 bij een debiet van 3826 m³/s
- bijlage 24: Verschillende tijdstappen
- bijlage 25: Bodemligging in 2017 bij aanname $D = D_{\text{monitoring}}$
- bijlage 26: Extra waterstandsval bij aanname $D = D_{\text{monitoring}}$
- bijlage 27: Bodemligging in 2017 bij $C = C_{\text{monitoring}}$
- bijlage 28: Waterstandsval in 2017 t.o.v. 1997 bij een debiet van 3826 m³/s bij aanname $C = C_{\text{monitoring}}$

Literatuurlijst

Belangrijkste symbolen

deel I

Inleiding, problemafakening en probleemaanpak

1 Inleiding, probleemstelling en probleemaanpak

1.1 Aanzet tot het eerste baggerbestek

Naar aanleiding van de hoogwatergolf op de Maas in december 1993 werd door de Minister van Verkeer en Waterstaat de Commissie Boertien II ingesteld, met als opdracht om te adviseren op welke wijze de hoogwateroverlast in het Maasdal in de toekomst kan worden beperkt. Op grond van een onderzoek van het Waterloopkundig Laboratorium in 1994 adviseerde de Commissie in hoofdzaak om het zomerbed van de Grensmaas te verbreden en dat van de Zandmaas te verdiepen. De verdieping van de Zandmaas zou ongeveer drie meter moeten bedragen over het traject van stuw Linne (km 68) tot aan Megen (km 191). Op grond van het Deltaplan Grote Rivieren dienen voor de Zandmaas uiterlijk in 2005 de rivieraanpassingswerken, gebaseerd op het advies van de Commissie Boertien II, uitgevoerd te zijn. Hiertoe zouden drie baggerbestekken worden opgesteld. In december 1995 is het eerste baggerbestek opgesteld, en twee verdere bestekken zijn voorzien in 1997 en 1998. Het eerste baggerbestek is tussen april en november 1996 gerealiseerd.

Reeds in een vroeg stadium werd onderkend dat er in Nederland geen ervaring is met het verdiepen van een rivier op dergelijke schaal; zowel qua uitvoering, als qua inzicht in de effecten van de ingreep. Daarom is het initiatief genomen om, vooruitlopend op de resultaten van de Trajectnota/MER, het eerste baggerbestek te realiseren en een monitoringsonderzoek uit te voeren.

De voor dit rapport belangrijke doelstellingen uit het eerste baggerbestek van de Zandmaas zijn:

- Er moet compensatie worden geboden voor de opstuwende werking van enkele kades die reeds aanwezig zijn, of die zullen worden aangelegd.
- Het inzicht in de rivierkundige processen die een rol spelen bij de rivierverdieping moet worden vergroot.

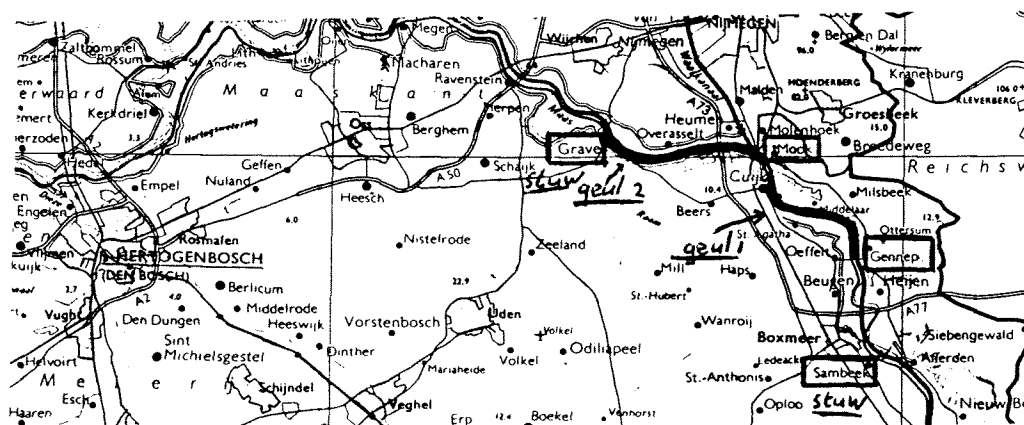
1.2 Het eerste baggerbestek

Voor het eerste baggerbestek viel de keuze op het riviertraject Gennep (km 155)-Grave (km 174), omdat dit traject voldoet aan een aantal selectiecriteria betreffende MER-eisen en risico's voor al bestaande constructies.

Deze selectiecriteria waren:

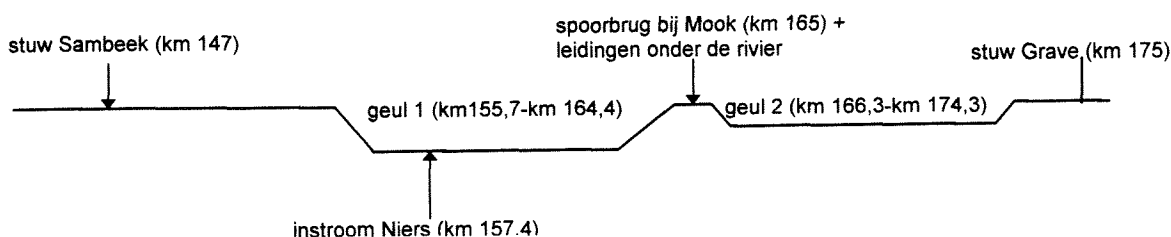
- geen kabels en leidingen in het traject
- oppervlakte minder dan 100 ha, gezien de MER eisen.
- geen onderlinge beïnvloeding tussen de gebaggerde stukken, gezien de MER eisen.
- geleidelijke overgang van het verdiepte deel naar het oude rivierregime stroomafwaarts.
- de spoorbrug bij Mook wordt ongemoeid gelaten.

Zo kwam men tot de volgende trajectkeuze: een ± 3 m diepe baggergeul van Gennep tot Mook (km 155,7-km164,3) en een $\pm 1,5$ m diepe baggergeul van Mook tot Grave(km 166,3-km 174,2). Tussen de geulen is een paar kilometer rivierbodem niet verdiept i.v.m. de spoorbrug bij Mook en leidingen onder de rivier. Het gebied valt binnen het stuwpand Sambeek-Grave (km 147-km 175).



figuur 1.1: lokatie geulen

Bij km 157 mondt de rivier de Niers uit in de Zandmaas en op km 165 bij Mook ligt er een spoorbrug over de rivier en lopen veel kabels en leidingen onder de rivier door. Stroomafwaarts van de spoorbrug is het Maas-Waalkanaal op de Zandmaas aangesloten. Beide waterwegen worden gescheiden door de sluisen van Molenhoek.



figuur 1.2: gebiedsschematisatie

Gezien de doelstelling van het vergroten van inzicht in de optredende rivierprocessen is er een monitoringsplan opgesteld, waarin de te verrichten metingen en onderzoeken beschreven staan. De coördinatie hiervan valt onder de Directie Limburg.

Het bovenstaande (1.1 en 1.2) is een samenvatting van de belangrijkste punten uit enkele rapporten van Rijkswaterstaat omtrent de redenen van het uitvoeren van de baggerproeven in de Zandmaas [14], [15],[16].

1.3 Problemafbackening

Probleemstelling:

Zijn functie als rivierbeheerder brengt voor RWS o.a. de plicht met zich mee hoogwateroverlast te beperken. Hiervoor is inzicht nodig in de toekomstige veranderingen die in een rivier plaatsvinden en inzicht in de extreme situaties die zich in de rivier voordoen nodig.

Voor het hedendaagse debiet bij maatgevende hoogwater (MHW) geldt $Q_{MHW} = 3826 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit komt overeen met een beschermingsniveau tussen de $1^*/850$ jaar en de $1^*/1250$ jaar voor het gebied.

Een van die maatregelen om de hoogwateroverlast te beperken is het verdiepen van de Zandmaas door te baggeren. Door deze rivierverdieping worden lagere waterstanden bewerkstelligd. Aangezien men bij RWS weinig ervaring heeft met de gevolgen van rivierverdiepingen, heeft men een monitoringsplan opgesteld, om het inzicht in de rivierkundige processen en effecten te vergroten.

Deels in het kader van dit monitoringsplan zijn in de Zandmaas in het riviervak Gennep-Grave twee geulen gebaggerd. Bij een van de geulen leek veel erosie op te treden, als gevolg van het blootleggen van een fijnkorrelige zandlaag. Voor RWS is het van belang om te weten wat de morfologische consequenties hiervan zijn.

Door de morfologische veranderingen verandert de waterstand. Met het oog op het veiligheidsaspect is het voor RWS van belang te weten hoe deze zich in de toekomst ontwikkelt t.o.v. de hedendaagse waterstand bij MHW.

Verder is het, i.v.m. de veiligheid van de aanwezige spoorbrug en de onder de rivier lopende leidingen van belang te weten hoe de bodem zich ontwikkelt. Voor de constructies had men als eis 0 m erosie gesteld.

Doelstelling:

Dit afstudeerwerk is gericht op het verwerven van inzicht in de optredende morfologische processen in de geulen als gevolg van het blootleggen van de fijnkorrelige zandlaag en de gevolgen hiervan op termijn voor wat betreft de waterstand behorende bij Q_{MHW} . Uitgaande van het actuele beschermingsniveau voor het gebied (tussen de $1^*/850$ jaar en $1^*/1250$ jaar) bedraagt dit debiet $3826 \text{ m}^3/\text{s}$.

Gepoogd wordt inzicht te verwerven in de rivierbodemontwikkelingen in de twee baggergeulen en het tussenliggende onverdiepte stuk, ervan uitgaande dat men de situatie op zijn beloop laat gaan en er geen tussentijds onderhoud plaatsvindt. Aan de hand van een model met het 1D-programma SOBEK, met een versie die rekent met uniform sediment, worden voorspellingen gedaan hoe de situatie in de geulen gedurende een periode van 20 jaar zou kunnen veranderen.

Gelet wordt daarbij op de bodemveranderingen bij de constructies in het gebied.

Aandachtspunten van het onderzoek:

- Met een SOBEK-model van het gebied worden voorspellingen gedaan hoe de waterstand bij $Q_{MHW} = 3826 \text{ m}^3/\text{s}$ zou kunnen veranderen in 20 jaar.
- Aan de hand van het model wordt gekeken hoe de bodemsituatie kan veranderen, ervan uitgaande dat er geen onderhoud werd uitgevoerd en uitgaande van een onbeschermde drempel bij de constructies.
- Er wordt een gevoeligheidsanalyse gedaan.

Uitgangspunten:

- de gegevens uit het monitoringsonderzoek zullen als meest representatief worden verondersteld i.g.v. meerdere gegevens of afwijkingen van bestaande theorieën, tenzij er goede redenen zijn aan te nemen dat er fouten in deze gegevens zitten.
- uitgegaan wordt van de huidige situatie over langere tijd, waarbij toekomstige, exogene ontwikkelingen die wel invloed op de situatie kunnen uitoefenen, niet worden beschouwd. Een belangrijke aanname die hieruit voortvloeit, is dat het sedimentaanbod afhankelijk is van de stroomcondities in het gebied en niet van de bovenstroomse factoren.
- De numerieke aspecten zullen niet onderzocht worden, het zwaartepunt ligt op de morfologische aspecten.
- aangenomen wordt dat de meetgegevens waarop de invoer van het model gebaseerd is, geen afwijkende verschijnselen vertonen t.o.v. de ontwikkelingen over langere periode.
- Naar effecten die bovenstrooms en benedenstrooms van de geulen optreden wordt geen onderzoek gedaan.
- Eveneens worden de gevolgen op de situatie in de geulen van de eventuele bovenstroomse en benedenstroomse veranderingen niet onderzocht.

1.4 Probleemaanpak

1.4.1 Modelvereisten

Zoals in de doelstelling vermeld staat, zal met een SOBEK-model gewerkt worden. Voor het maken van het model dienen de volgende punten te worden doorlopen:

- 1) van het gebied moeten de hydraulische en morfologische parameters worden bepaald om het gebied te kunnen beschrijven. Hierbij moeten de Chezy-waarde, een transportformule, de korrelgrootte van het bodemmateriaal, de bodemligging en de bodemgeometrie van het gebied bepaald worden.
- 2) met de bij 1) vermelde gegevens wordt een model van het gebied gemaakt.
- 3) het model zal hydraulisch en morfologisch geijkt moeten worden aan de hand van hydraulische en morfologische ijkreeksen. Hiertoe worden waargenomen waterstanden en bodemveranderingen in het gebied gebruikt.
- 4) met het model zullen voorspellingen voor de lange termijn worden gedaan. Hiervoor zijn hydraulische en morfologische randvoorwaarden voor een lange termijnberekening voor het gebied bepaald.
- 5) met het model worden voorspellingen gedaan en hieruit worden conclusies getrokken.

1.4.2 Rapportopbouw

In de opbouw van het rapport is niet exact van de bovenstaande volgorde uitgegaan. De beschreven punten zijn wel onderzocht, maar het rapport is opgesplitst in de volgende delen:

inleiding, probleemaafbakening en probleemaanpak; monitoringsgegevens; modellering van het gebied en eindresultaten.

Hieronder volgt een toelichting op de delen: *monitoringsgegevens; modellering van het gebied en eindresultaten.*

monitoringsgegevens

In het gebied wordt een monitoringsonderzoek uitgevoerd en aan hand van gegevens die hierbij zijn vrijgekomen van de periode december '96 - juli '97, zijn de hydraulische en de morfologische parameters en de optredende morfologische processen in het gebied bepaald.

In dit deel is aandacht besteed aan de volgende aspecten van het gebied:

- het bepalen van de Chézy-waarde.
- het bepalen van de representatieve korrelgrootten van het bodemmateriaal.
- het opstellen van een transportformule voor het gebied.
- het onderzoeken van de optredende morfologische processen in de periode december '96 - juli '97.

De aspecten zijn onderzocht met het oog op het model, maar zijn hier nog niet direct aan gekoppeld. Het betreft een algemene beschrijving van de hydraulische en morfologische parameters en waargenomen veranderingen het gebied.

Om deze reden zijn de bodemligging en bodemgeometrie niet in dit deel meegenomen, maar in het deel *gebiedsmodellering*. Deze laatste zijn te direct aan een model gekoppeld om als een algemene beschrijving voor het gebied op te kunnen vatten.

De structuur van het deel *monitoringsgegevens* komt los over a.g.v. de grote diversiteit aan data die onderzocht moest worden en door de onderlinge verwevenheid van sommige hoofdstukken. Verder bleken een aantal zijdelingse stappen zoals een nauwkeurighedsanalyse van de bodempeilingen; het wat dieper ingaan op het zwevend transport en een ordebeschouwing van het mogelijke sedimenttransport door de Niers noodzakelijk, hetgeen het volgen van de hoofdlijn ook niet direct vereenvoudigd voor de lezer.

Ter verduidelijking van het doel van een hoofdstuk wordt hierop in de inleiding van het hoofdstuk ingegaan.

modellering van het gebied

Dit deel is puur op de modelaspecten gericht en heeft ook een duidelijkere structuur voor de lezer. De volgende aspecten komen aan bod:

- het gebied wordt geschematiseerd tot een SOBEM-model.
- aan de hand van baggerprofielen worden representatieve bodemprofielen voor het model bepaald.
- het model wordt hydraulisch en morfologisch geijkt.
- met het geproduceerde model wordt gepoogd aan de hand van verschillende scenario's inzicht te krijgen in de waterstandsveranderingen en de bodemveranderingen.
- gekeken wordt naar de verschillen die optreden a.g.v. het vervangen van parameters uit het geijkte model door de waarden die voor de desbetreffende parameters in het monitoringsonderzoek zijn gevonden. Het betreft hier de Chézy-waarde en de representatieve korrelgrootten.
- conclusies welke uit de modelresultaten worden getrokken

eindresultaten

In dit deel staan de eindconclusies en de aanbevelingen vermeld en worden enige kwalitatieve opmerkingen geplaatst bij aspecten die niet onderzocht zijn maar wel verband houden met de onderzochte problematiek.

deel II

Monitoringsgegevens

deel II: monitoringsgegevens

2 Uitgevoerde metingen

2.1 inleiding

Vooraf aan de analyse van de monitoringsgegevens worden in dit hoofdstuk de in het gebied uitgevoerde metingen en de daarbij gebruikte meetmethode beschreven. Per meting worden respectievelijk beschreven:

- 1) de meetmethode en de nauwkeurigheid ervan
- 2) de lokatie en het tijdstip van de metingen

2.2 Waterstandsmetingen

meetmethode:

De permanente peilschalen bestaan uit een vlotter met een datalogger en de tijdelijk peilschalen bestaan uit een drukopnemer, een datalogger en een peilschaalbord. De onnauwkeurigheid ligt in de orde van 1 a 2 cm.

uitvoering:

Op de volgende lokaties zijn om de 10 minuten metingen verricht:

- bovenstrooms van de stuw bij Sambeek km 141
- benedenstrooms van de stuw bij Sambeek km 148
- Gennep km 155
- tijdelijk meting km 159,3
- Mook km 166
- tijdelijk metng km 168,8
- bovenstrooms van de stuw bij Grave km 175

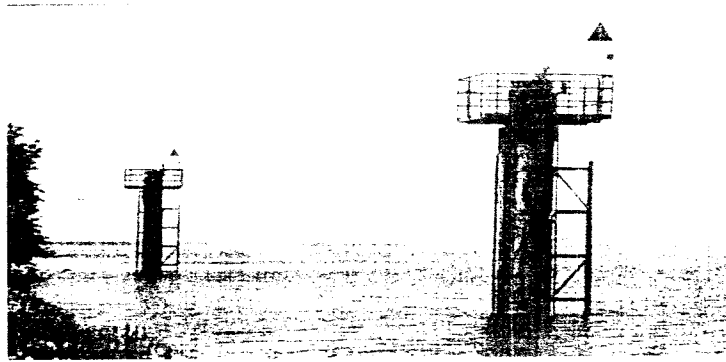
zie bijlage 1a: lokaties waterstandsmetingen

2.3 Debietmetingen

meetmethode:

De in dit rapport gebruikte debieten zijn middels ADM-metingen (Akoestische Debiet Meting) bepaald. Het meetprincipe van de ADM-metingen is de looptijdverschilmethode [27],[28]. Gelijktijdig worden in tegenovergestelde richting twee pulsen schuin naar de overkant van de waterloop gezonden. Daar worden de pulsen ontvangen en de looptijd gemeten. In stilstaand water is de looptijd van de beide pulsen gelijk. Door de stroomsnelheid van het water wordt één van de pulsen versneld en één van de pulsen vertraagd. Uit het verschil in looptijd wordt de watersnelheid bepaald. De transducers zenden een signaal uit op ongeveer een derde van de waterdiepte vanaf de bodem, omdat hier ongeveer de gemiddelde stroomsnelheid van het water gemeten wordt. Bij waterstandsvariaties bevindt het signaal zich op relatief verschillende hoogten binnen het profiel, hetgeen gecompenseerd wordt d.m.v. coëfficiënten. De realiteitswaarde van de signalen wordt gecontroleerd en i.g.v. een onwaarschijnlijke waarde geeft de debietmeter een foutcode aan.

Om met de meetwaarden te kunnen werken is een schatting nodig van de onnauwkeurigheid van de meetwaarden. Onder de onnauwkeurigheid worden een of meer waarden verstaan die de totale afwijking van de gemeten grootte t.o.v. de gezochte grootte kenmerken. Aan de hand van een aantal metingen wordt een betrouwbaarheidsinterval van de meetverwachting bepaald. Meestal wordt het 95%-betrouwbaarheidsinterval gebruikt. Dit interval bevat bij herhaalde bepaling van de proeven in 95% van de gevallen de meetverwachting. Bij een normale verdeling komt dit overeen met een boven- en een ondergrens die $2 \times \sigma$ van het gemiddelde afwijkt (σ = standaarddeviatie).



figuur 2.1: ADM-meter

uitvoering:

De afvoeren van de Maas zijn dagelijks gemeten op de volgende plaatsen gedurende de periode:

- Megen in '96-'97 (km 191)
 - Venlo in '96-'97 (km 109)
 - Lith '91-'97 (km 203)
- zie bijlage 1a: lokaties debietmetingen

2.4 Korrelgrootten

Er zijn zeefkrommen bepaald van twee typen metingen:

Helley-Smithmetingen

Met een Helley-Smithapparaat is materiaal opgevangen op de rivierbodem. Per meetdag werden in 5 langsraaien per langsraai over 350 m langs de rivieras 10 monsters getransporteerd bodemmateriaal opgevangen. Van deze 10 monsters samen werd de representatieve zeefkromme bepaald.
zie bijlage 1b: lokatie sedimenttransportmetingen

Bodemboringen

Verder zijn in het traject km 155 - km 164 grondboringen uitgevoerd voor en na het baggeren (in het kader van een onderzoek dat tot doel had vast te stellen in welke mate grind uit de toplagen en van de taluds na het baggeren achterblijft [6]). De boringen voor het baggeren vonden plaats tot een diepte van 2 m onder het theoretische baggerprofiel, de boringen na het baggeren tot een diepte van 2 m onder de waterbodem. De latere boringen werden uitgevoerd op plaatsen die ongeveer overeenkwamen met die van de eerste boringen.
Per boring is op een aantal diepten de zeefkromme bepaald van lagen van 50 cm dik.
zie bijlage 1b: lokaties bodemboringen

2.5 Sedimenttransport

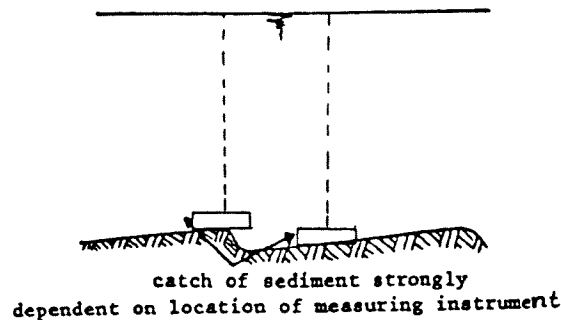
meetmethode:

Voor het meten van het sedimenttransport heeft men twee meetmethoden gebruikt; Helley-Smith metingen voor het transport vanaf de rivierbodem tot 7,5 cm erboven en AZTM/MEX-metingen voor het sediment- en slibtransport op diverse punten in een verticaal in de rivier, op diverse afstanden van de bodem. De meetgegevens van de Helley-Smithmetingen zijn te vinden in [5] en van de AZTM metingen in [14].

Helley-Smithmetingen

Bij de Helley-Smithmetingen wordt gedurende een bepaalde tijdsduur door een vierkante opening van 7,5 cm x 7,5 cm op de rivierbodem bewegend sediment opgevangen. Door op een aantal plaatsen in een dwarsprofiel het sediment op te vangen, probeert men een goed beeld van het transport door een raai te krijgen.

De onnauwkeurigheid van deze metingen is groot, mede doordat het gemeten bodemtransport afhankelijk is van het feit of op de betreffende lokatie op een ribbel of in een kuil gemeten wordt.



figuur 2.2: metingen op ribbels of in kuilen

Metingen voor het bodemtransport zijn er dan ook altijd op gebaseerd dat, om de invloed van ribbels en kuilen te kunnen verwaarlozen, over een bepaalde lengte, 350 m in het monitoringsonderzoek, van een langsvaart een aantal metingen verricht worden.

Binnen het onderzoek is het niet gelukt informatie betreffende de Helley-Smith te achterhalen.

Wat betreft de Helley-Smithmetingen op de Maas is er nog weinig ervaring opgedaan (negen meetdagen), en deze metingen lopen ver uiteen. Op advies van de coördinator van het onderzoek van de baggergeulen, het Bureau Maaswerken, is ervan uitgegaan dat de totale afwijking op $\pm 50\%$ kan worden gesteld.

Dit lijkt geen overdreven aanname, aangezien in het rapport Meettechnieken van M. Kleinhaus betreffende Helley-Smithmetingen op de Rijn geconcludeerd is dat minimaal 30 monsters per vaart moeten worden opgevangen, zodat gesteld kan worden dat het aantal monsters dat per vaart, per meetdag in de Maas opgevangen is, namelijk 10, aan de lage kant is.

AZTM/MEX-metingen

De AZTM/MEX-metingen zijn twee gescheiden systemen waarbij men met AZTM (Akoestische ZandTransportMeting) de concentratie van de deeltjes met een korrelgrootte groter dan $53 \mu\text{m}$ meet en MEX de deeltjes kleiner dan $53 \mu\text{m}$. Voor de beide systemen staat een zeefstelsel dat de deeltjes groter dan $53 \mu\text{m}$ en kleiner dan $53 \mu\text{m}$ scheidt. Het AZTM-apparaat meet tegelijkertijd akoestisch de stroomsnelheid van het water. In het meetrapport van de Meetdienst Zeeland [14] worden de AZTM-metingen als zandtransport-metingen beschouwd en de MEX-metingen als slibtransportmetingen.

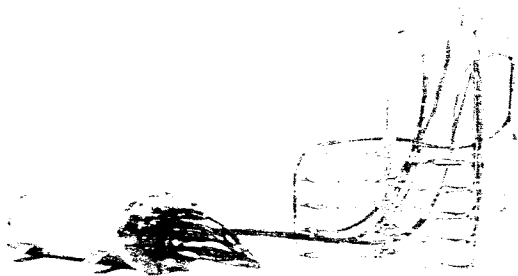
AZTM werkt op het principe van geluidssignalen die door het water worden gezonden [20],[26]. Onder invloed van de in het water aanwezige sedimentdeeltjes worden de signalen onder een hoek weerkaatst. Het weerkaatste deel wordt opgevangen en als een spanning weergegeven. Aan de hand van een ijkreeks kan vervolgens de concentratie van het sediment in het water worden bepaald.

De ijkreeks wordt als volgt opgesteld. Bij de pomp worden monsters opgevangen. De hoeveelheid droog materiaal hierin wordt na indroging door het WL bepaald. Hieruit probeert men een goede ijkreeks te bepalen, d.w.z. een continu, eenduidig verband, hetzij lineair, kwadratisch, etc..

Vaak is er veel scatter waarneembaar, als gevolg waarvan het zeer lastig is een goede ijkreeks op te stellen. Indien geen goede ijkreeks kan worden bepaald, wordt bij het WL een ijkreeks opgesteld waarbij men de meetomstandigheden probeert na te bootsen bij een korrelgrootte met een D_{50} van $150 \mu\text{m}$. Deze D_{50} komt normaal gesproken niet overeen met de D_{50} bij de metingen. Met behulp van coëfficiënten probeert men dit te compenseren in de ijkreeks.

Een probleem bij AZTM-metingen is dat sediment in "wolken" getransporteerd wordt en niet continu in dezelfde mate. Het is nog niet goed bekend hoeveel monsters nodig zijn om een representatief gemiddeld transport te kunnen bepalen.

Gelijktijdig wordt ook akoestisch de stroomsnelheid van het water bepaald.



figuur 2.3: AZTM-meter

Uit de monsters die bij de metingen in de Zandmaas zijn genomen, kon geen goede ijkreeks worden bepaald, vandaar dat men op het WL een ijkreeks heeft opgesteld.

Het WL garandeert bij laboratoriumomstandigheden een onnauwkeurigheid van $\pm 5\%$. Vanwege de terreinomstandigheden (korrelgrootte, stroompatroon etc.) en eventuele apparaatonnauwkeurigheden stelt men de betrouwbaarheid van metingen bij terreinomstandigheden op $\pm 15\%$.

De onnauwkeurigheid van de stroomsnelheidsmetingen ligt, volgens de specificaties van de producent op $\pm 2\%$. Dit betreft laboratoriumomstandigheden, vandaar dat voor de veiligheid aangenomen is dat de nauwkeurigheid $\pm 5\%$ bedraagt.

Via MEX-metingen worden de deeltjes kleiner dan $53 \mu\text{m}$ gemeten. Dit komt ongeveer overeen met de grootte van slibdeeltjes.

Deze methode is gebaseerd op de optische doorlatendheid van het monster.

Een aanname binnen deze scriptie is dat het hier alleen slib betreft. Dit wordt verder niet in deze scriptie meegenomen.

N.B.: er zijn twee ijkreeksen voor de AZTM-metingen waaruit gekozen kan worden, namelijk de ijkreeks van de pomponsters en de ijkreeks opgesteld uit de door het WL uitgevoerde proeven. In dit rapport is gewerkt met de laatstgenoemde ijkreeks, aangezien de meetwaarden gerelateerd aan de monsterwaarden twijfelachtige ijklijnen opleverden [14].

uitvoering:

Bij de Helley-Smithmetingen is op een aantal dagen over 5 korte langsraaien in de rivier, langs iedere langsraai 10 maal sediment opgevangen, gedurende een bepaalde tijdsduur.

Opvallend was dat er in dwarsraai 5 op km 141 alleen bladeren en geen sediment werd opgevangen. Hiervoor werd geen verklaring gevonden.

De AZTM-metingen leverden een concentratieprofiel op een bepaald tijdstip op, en dit in combinatie met het gemeten snelheidsprofiel dat synchroom hieraan gemeten was, leverde een flux op voor het zwevend transport. Omdat vlak bij de rivierbodem de gradienten van het stroomprofiel en het concentratieprofiel groot zijn, is de bemonsteringsdichtheid bij de bodem groter dan in de bovenste waterlagen. De onderste meting is op 20 cm boven de bodem genomen, de volgende meting op 50 cm boven de bodem en de hierboven genomen metingen op 1 m, 2m etc.

De metingen bij km 141,4 op de volgende dagen zijn in dit rapport gebruikt: 15-2-'97, 19-2-'97, 26-2-'97, 27-2-'97, 28-2-'97 en 1-3-'97

zie bijlage 1d: lokatie sedimenttransportmetingen

2.6 Bodempeilingen

meetmethode:

Het meten van de bodemhoogte is akoestisch gebeurd. Er is gewerkt met een single-beam echosounder en bij de metingen is geen heave-compensator gebruikt. De bijbehorende lokatie bij de metingen is bepaald met DGPS. Het ijkken is d.m.v. bar-checken is gedaan.

De nauwkeurigheid van peilingen ligt doorgaans in de orde van 1% van de diepte. Hier komen nog de positie-schommelingen die de transducer ondergaat t.g.v. de bootbewegingen bij.

uitvoering:

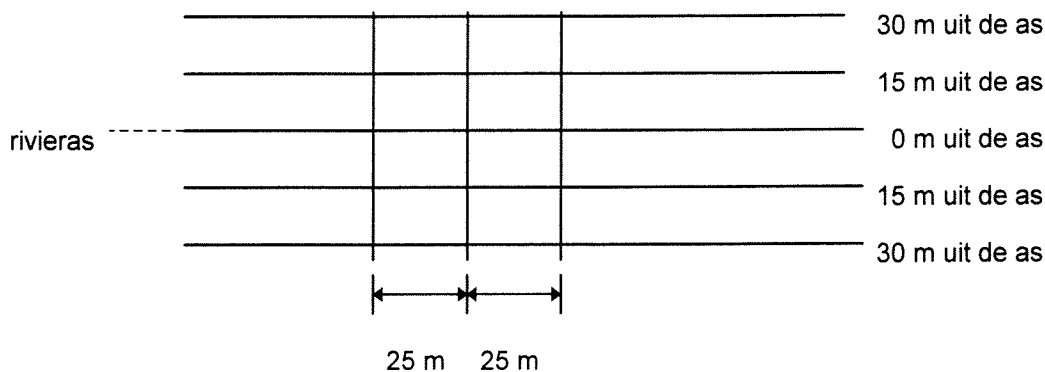
In mei 1995 heeft de meetdienst om de 100 m op het traject km 140 - km 190 peilingen in dwarsraaien uitgevoerd. Deze metingen dienden als referentiesituatie en werden eens in de 3 maanden uitgevoerd. Sinds de oplevering van het vak wordt door de Meetdienst Limburg maandelijks gepeild. De onverdiepte stukken voor en na de geulen worden eens per 4 maanden gepeild.

Bij de peilingen worden de volgende raai-afstanden aangehouden:

km 140 - km 150 : 100m

km 154 - km 175 : 25

km 175 - km 190 : 100 m



figuur 2.4: schematisatie bodempeilingsraster

N.B.: Navraag bij Maaswerken leerde dat bij de kaarten de dwarsraaien oorspronkelijk waren gedefinieerd op de metrische as van de rivier op een veelvoud van 100 meter. In het veld bleek echter, dat die dwarsraaien niet over de kilometer/hectometer paaltjes vielen, mede door bochtafsnijdingen etc.. De dwarsraaien zijn zodanig verschoven dat deze wel over de bewuste paaltjes vielen. Hierdoor slijdt bijv. de dwarsraai km 155.700 de lengte-as op km 155.630 en verschilt 70 meter. Daardoor kan men de langsraaien en de dwarsraaien niet zonder meer met elkaar vergelijken.

3 Bepaling van de bodemruwheid

3.1 De Chézy-waarde

Om de waterbeweging en het sedimenttransport in het model te beschrijven moet o.a. de bodemruwheid bekend zijn. In dit hoofdstuk wordt een Chézy-waarde voor het gebied bepaald [25]. Het gedrag van water in een open waterloop wordt door de massabalans en de impulsbalans beschreven. Hieruit kan de Chézy-waarde worden afgeleid.

massabalans:
$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

impulsbalans:
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A_s)}{\partial x} + g A_s \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 A_s R} = 0 \quad (3.2)$$

met:

- A_s : oppervlakte stroomprofiel
- B : bergende breedte waterloop
- C : Chézy-waarde
- g : versnelling t.g.v. zwaartekrachtversnelling
- h : waterstand
- Q : debiet
- R : hydraulische straal
- t : tijd
- x : coördinaat langs de as van de waterloop

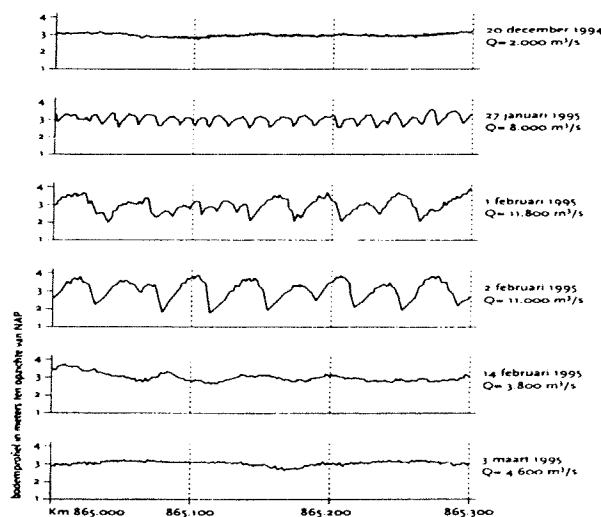
Voor rivieren is dit na enige ordebeschouwingen te vereenvoudigen tot de formule van Chézy:

$$C = \frac{u}{\sqrt{R \frac{\partial h}{\partial x}}} \quad (3.3)$$

met:

- u : stroomsnelheid in de x-richting

Met de debieten (bijlage 2), dwarsdoorsneden bijlage (bijlage 3a, b, en c) en waterstanden kan de Chézy-waarde berekend worden. Deze kan variëren afhankelijk van de bodem, de lokatie en de afvoeren.



figuur 3.1: beddingvormen op de Bovenrijn voor, tijdens en na een hoogwatergolf

Gekeken wordt of deze variaties te verwaarlozen zijn en een constante Chézy-waarde kan worden verondersteld.

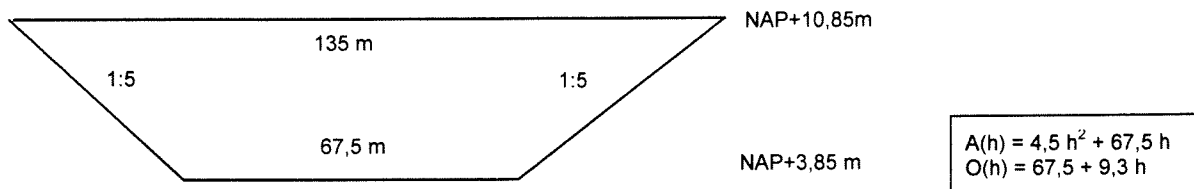
3.2 Werkwijze berekening Chézy-waarde

Via de formule van Chézy (3.3) zal volgens de onderstaande werkwijze de Chézy-waarde bepaald worden.

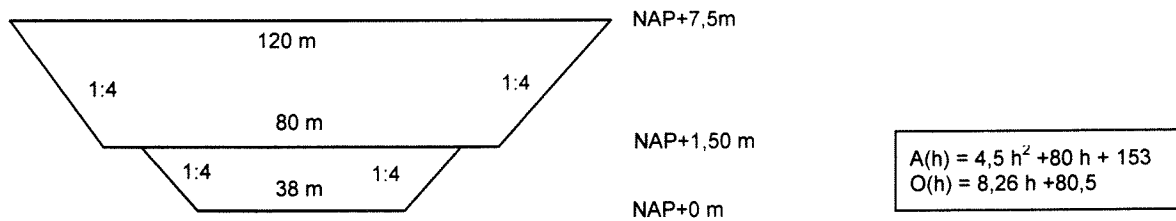
Eerst wordt de situatie geschematiseerd.

De Chézy-waarde wordt in drie representatieve profielen onderzocht, aangezien het gebied globaal in drie stukken valt op te splitsen:

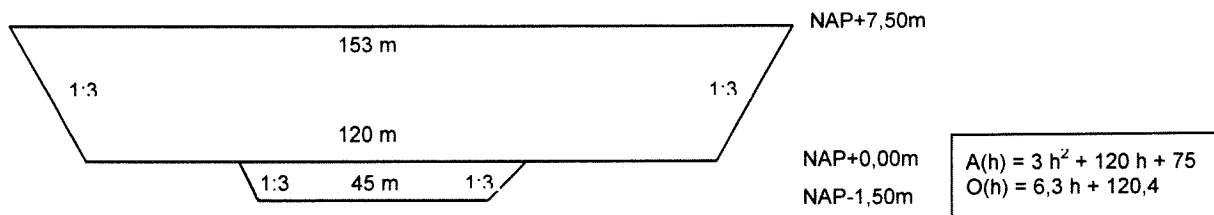
- 1) het niet-verdiepte stuk voor het baggertraject
- 2) de eerste baggergeul
- 3) de tweede baggergeul



figuur 3.2a: het niet-verdiepte stuk voor het baggertraject



figuur 3.2b: de eerste baggergeul



figuur 3.2c: de tweede baggergeul

met:

- A : oppervlakte dwarsprofiel
- h : waterstand
- O : hydraulische omtrek

De Chézy-waarde op km 151, km 157 en km 172 in de periode december 1996-april 1997 zijn berekend. Hierin kwamen periodes van hoge en lage afvoeren voor. Km 151 ligt in het in het onverdiepte riviertraject benedenstrooms van stuw Sambeek en bovenstrooms van de proefvakken, km 157 in het traject met geul 1 en km 172 in het traject met geul 2. Hiermee wordt een goed beeld van het gebied over de totale lengte verkregen. Op km 157 en km 172 is zowel met de tijdelijke peilmeters als met de vaste peilmeters gerekend. (zie bijlage 1a: gebiedsschematisatie)

In de onderzochte periode varieerden de afvoeren van minder dan 100 m³/s tot meer dan 1000 m³/s. De debieten zijn dagelijks gemeten om 21.00 uur. Rekening houdend met een voortplantingssnelheid van hoogwatergolven van 1,5 m/s, werd voor de berekening van de Chézy-waarden een tijdsvertraging in Q gebruikt, overeenkomend met de afstand van het betreffende profiel tot het punt van debietmeting (Venlo) gedeeld door 1,5 m/s.

In tabel 3.1 staan de lokaties waarvoor de Chézy-waarde bepaald is en de meetperiodes van de gebruikte waterstanden en het traject waarover het verhang bepaald is.

C-lokatie	meetperiode	verhangtrajectd
km 151	4.50 u	Sambeek ben.str. (km148)-Gennep (km155)
km 157 (1)	6.00 u	Gennep (km155)-Mook (km166)
km 157 (2)	6.00 u	Gennep (km155)-tijdelijke peilschaal (km159,3)
km 172 (1)	8.40 u	Mook (km166)-Grave bov.str. (km175)
km 172 (2)	8.40 u	tijdelijke peilschaal (km168,8)-Grave bov.str. (km175)

tabel 3.1: lokaties berekende Chézy-waarden

3.3 Eerste resultaten

In de grafieken in bijlage 4a en 4b staan de Chézy-waarden tegen het debiet uitgezet. Wat opvalt is de grote spreiding bij de lagere debieten. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de formule van Chézy ten onrechte is toegepast bij de lagere debieten.

In de formule wordt er van uitgegaan dat de vertragingstermen verwaarloosd mogen worden en dat er sprake is van een eenparige stroming. De waterstandsdiepte die hier bij hoort is de evenwichtsdiepte d_e . Deze bedraagt:

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{q^2}{C^2 i}} \quad (3.4)$$

met:

- C : Chézy-waarde
- d_e : evenwichtsdiepte
- i : bodemverhang
- q : debiet p.e.v. breedte

Door het stuwen wordt de waterstand kunstmatig verhoogd. Bij lagere debieten zal de gerealiseerde waterstandsverhoging groter zijn, dan bij de hogere debieten, aangezien in beide gevallen tot NAP+7,50 m wordt gestuwd. De beïnvloeding van de waterstand is dus groter bij lagere debieten. Tenzij de stuwen getrokken zijn, wat bij hoge afvoergolven en ijsgang gebeurt, ligt het stuwpeil op NAP+7,50 m.

Ter controle wordt hier het "evenwichts"debiet berekend bij het stuwpeil NAP+7,50 m. Indien ervan wordt uitgegaan dat de waterdiepte bij stuw Grave overeenkomt met de evenwichtsdiepte moet uit (3.4) blijken dat $d_e = d$. Net bovenstrooms van stuw Grave geldt:

- waterdiepte: $d \approx 7,5$ m.
- doorstroomoppervlak: $A_s \approx 1150$ m²
- bodemverhang: $i \approx 0,7 \times 10^{-4}$
- Chezy-waarde: $C \approx 41$ m^{1/2}/s

resultaten:

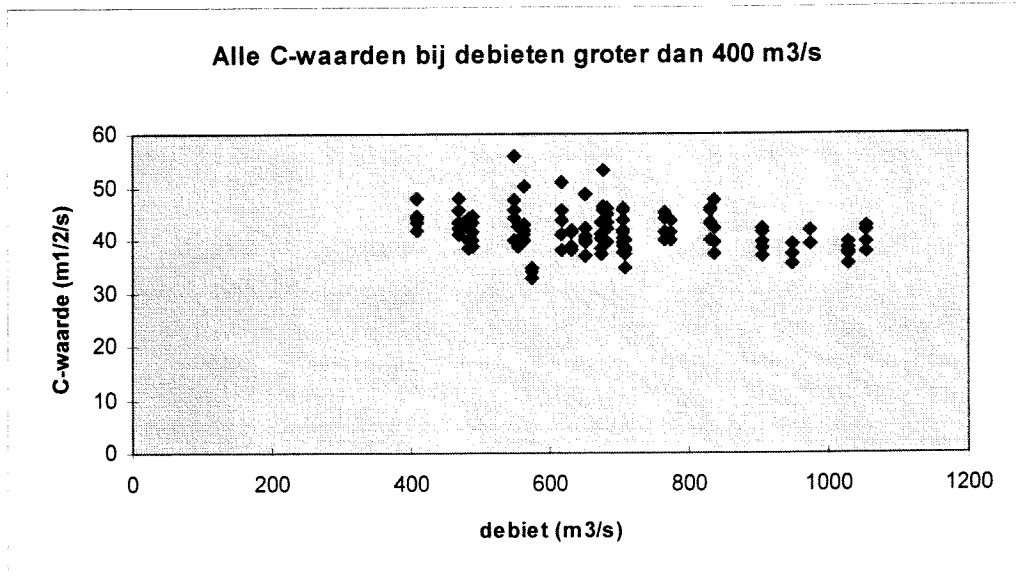
- bij Q = 400 m³/s: $d_e = 3,87$ m.
- bij Q = 1000 m³/s: $d_e = 7,12$ m.
- bij Q = 1200 m³/s: $d_e = 8,04$ m
- bij Q = 1100 m³/s: $d_e = 7,59$ m

conclusie:

Uit iteratie volgt dat uitgaande van een waterstand van 7,5 m bij Grave, deze waterstand in overeenstemming is met de evenwichtsdiepte bij een debiet van ongeveer de 1100 m³/s. Bij Q = 1000 m³/s ligt bij het stuwpeil al dicht bij het "evenwichts"debiet dan Q = 400 m³/s.

3.4 Gekozen Chézy-waarde

Uit de grafieken is duidelijk op te maken dat boven de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ de spreiding sterk is afgenomen. Aangenomen is dat bij deze debieten de Chézy formule geldig is. De gemiddelde Chézy-waarde van de vijf trajecten uitgaande van debieten groter $400 \text{ m}^3/\text{s}$ varieerde van $39 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ tot $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. De verschillen zijn redelijk klein en op grond hiervan wordt aangenomen dat een gemiddelde Chézy-waarde voor het gebied mag worden genomen. De gemiddelde Chézy-waarde bedraagt $41,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. In het onderzoek zal verder gewerkt worden met een Chézy-waarde van $41 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.



figuur 3.3: Chézy-waarden bij $Q > 400 \text{ m}^3/\text{s}$

De gemiddelde Chézy-waarde $\mu_C = 41,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en de standaarddeviatie van de Chézy-waarden $\sigma_C = 3,8 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ over de vijf onderzochte trajecten in de periode december 1996-april 1997.

4 Bepaling van de korrelgrootte

4.1 Inleiding

Er zijn zeefkrommen opgesteld voor de Helley-Smithmetingen [5] en de bodemboringen [6]. De zeefkrommen van het materiaal dat bij de Helley-Smithmetingen is opgevangen, worden beschouwd als maatgevend voor het getransporteerde materiaal bij de sedimenttransportmetingen. De hierbij gevonden korrelgrootten worden gebruikt bij het fitten van een transportformule voor het gebied in hoofdstuk 5, aangezien bij het fitten ook uitgegaan wordt van het bij de sedimenttransportmetingen opgevangen materiaal. De monsters van de bodemboringen beschrijven het bodemmateriaal in de baggervakken en worden als zodanig gebruikt.

Er is naar bestaande theoriën om een aantal zeefkrommen terug te brengen tot één zeefkromme gezocht. Door W. Sintniklaas (afstudeerwerk aan de TU Delft, 1997) en ir. H. Hauer is een methode ontwikkeld voor het probleem. Opgemerkt wordt dat de betreffende methodiek ontwikkeld is voor de zeefkrommen van stortstenen. In dit hoofdstuk wordt een korte beschrijving van de desbetreffende theorie gegeven, maar aangezien hier niet goed mee te werken viel, gezien de complexiteit van de betreffende theorie en het ontbreken van software is een toevlucht genomen tot het lineariseren van de zeefkrommen en een D_0 en een D_{100} te bepalen. Van de verzameling D_0 's en D_{100} 's zijn een gemiddelde D_0 en een gemiddelde D_{100} bepaald en hieruit is een gemiddelde gelinea-riseerde zeefkromme bepaald.

4.2 Theoretische bepaling van een representatieve zeefkromme

Het sedimenttransport is ondermeer afhankelijk van de korrelgrootten. Hiervan zijn een groot aantal zeefkrommen bepaald. Om ermee te kunnen werken, moet het aantal zeefkrommen worden teruggebracht. Hieronder volgt een theorie hiervoor.

Een zeefkromme wordt als volgt opgesteld:

- 1) een monster wordt gezeefd en de grootst doorgelaten korrelgrootte wordt als grens genomen.
- 2) vervolgens wordt het gewichtpercentage van het doorgelaten deel t.o.v. het totale monster bepaald.

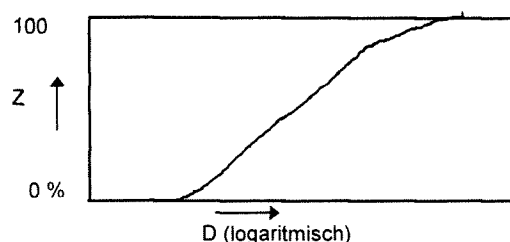
Wiskundig valt dit als volgt te beschrijven:

$$Z(D_x) = \frac{\int_0^{W_x} Wf(W)dW}{\int_0^{\infty} Wf(W)dW} \quad (4.1)$$

met:

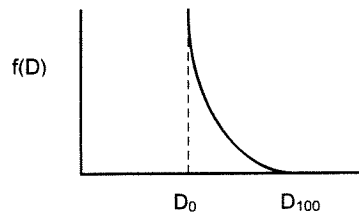
- D_x : korreldiameter die hoort bij de situatie dat x % van het totale gewicht van een bodemonmonster door de zeef valt
- W_x : gewicht van het door de zeef gevallen deel van een bodemonmonster, waarbij korrelgroottes tot D_x zijn doorgelaten
- $Z(D_x)$: gewichtpercentage met $D \leq D_x$

De vorm van deze kromme kan variëren, maar vertoont doorgaans een logaritmischnormale tendens.



figuur 4.1: zeefkromme

In de methode voor het bepalen van een gemiddelde zeefkromme van W.Sintrniklaas (1997) wordt globaal de volgende procedure gevolgd:
 Er dienen verdelingsfuncties van de korrelgrootten te worden bepaald uit de zeefkrommen.
 Men zet de zeefkrommen om in een verdelingsfunctie. Deze heeft globaal de onderstaande vorm.
 Hierin zijn D_0 en D_{100} geëxtrapoleerde grootheden uitgaande van linearisatie.



figuur 4.2:

De kleinere korrels komen in grotere aantallen voor dan de grotere korrels.
 Sterk vereenvoudigd, kan de verdelingsfunctie worden beschreven met de volgende formule:

$$f(D) = \frac{C}{D^4} \quad (4.2)$$

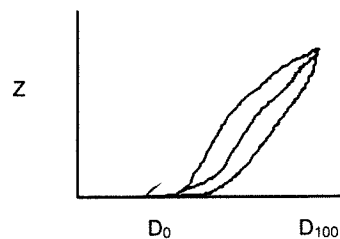
waarin C een constante is, afgeleid uit de totale integraal van de verdeling:

$$\int_{D_0}^{D_{100}} \frac{C}{D^4} dD = 1 \Rightarrow C - \text{waarde} \quad (4.3)$$

met:

- D_0 : kleinste korreldiameter van een zeefkromme na linearisatie
- D_{100} : grootste korreldiameter van een zeefkromme na linearisatie

De macht van D ligt in de buurt van 4, maar varieert afhankelijk van de zeefkromme volgens de onderstaande illustratie.



figuur 4.3:

Als de middelste curve met een 4-de macht overeenkomt, zal in het geval van de bollere curve de macht kleiner dan 4 zijn, en in het geval van de hollere curve de macht groter dan 4.

Om de gezamenlijke zeefkromme te bepalen, moet men de kansverdelingsfuncties van de diverse monsters verwerken tot een kansdichtheidsfunctie voor de som van deze kansverdelingsfuncties, en dit weer moeten omzetten naar een zeefkromme.

Dit is een bewerkelijke procedure die via computerberekeningen moet verlopen. Software hiervoor is nog niet ontwikkeld en valt buiten dit afstudeerproject. Op advies van ir.H.Hauer, een van de medeontwikkelaars van de bovenstaande methode, is gekozen voor een sterk vereenvoudigde aanpak waarin de de gemiddelde zeefkromme bepaald wordt uit de gelineariseerde zeefkrommen van de aanwezige zeefkrommen.

4.3 Materiaal Helley-Smithmetingen

4.3.1 Gevolgde werkwijze

Bepalend voor het getransporteerde materiaal zijn de stromingsomstandigheden. Deze verschillen per langstraai waarin gemeten is en binnen deze raaien zelf ook. Verder zijn de stromingsomstandigheden ook tijdsafhankelijk.

Dit leidt tot de volgende problematiek bij het bepalen van een representatieve curve. Een beperkt aantal metingen is genomen, op een beperkt aantal plaatsen, over een beperkt aantal dagen. Verder zijn deze metingen niet gelijkmatig over het traject verspreid en variëren de stromingsomstandigheden ten gevolge van de verschillende diepten. Aangenomen is dat de gemeten zeefkrommen aselechte trekkingen zijn voor een gemiddelde zeefkromme voor het getransporteerde materiaal.

De hier gevolgde methode om een representatieve zeefkromme te maken, is de curven te lineariseren en een D_0 en een D_{100} te bepalen via extrapolatie. In praktijk zal de D_0 veel kleiner en de D_{100} veel groter zijn dan deze geextrapoleerde waarden. Aangenomen wordt dat het niet-lineaire deel van de curven niet relevant is, aangezien dit slechts een klein deel van het gewichtspercentage vertegenwoordigt. Deze methode is niet te bewerkelijk en de afwijkingen in de staarten worden niet meegenomen. Verder is het verloop van de curve hierin nog ruw herkenbaar in.

Onder de D_0 wordt de korreldiameter verstaan die overeenkomt met het de korrelgrootte die niet onderschreden wordt, dus waarbij het gewichtspercentage nog net 0% is. De D_{100} is de diameter waarbij het gewichtspercentage van 100% wordt bereikt.

Bij het lineariseren zijn de volgende eisen gesteld:

- 1) de gelineariseerde curve mag nergens meer dan 10% van het gewichtspercentage van de werkelijke zeefkromme liggen.
- 2) de gelineariseerde curve moet de werkelijke zeefkromme snijden in het interval van de gewichtspercentages van 40% en 60%. In dit interval ligt de D_{50} , en deze D ligt in de buurt van het midden van het duidelijk logaritmische deel van de zeefkromme.
- 3) de zeefkrommen werden bij voorbaat al afgekapt bij 2,5% onder- en bovengrenzen om zo de extreme waarden te omzeilen.

Met in achtneming van de bovenstaande eisen konden alle zeefkrommen gelineariseerd worden, op twee na, welke afvielen doordat hun staarten een groot deel van het gewichtspercentage vormden (groter dan 10%). Deze twee curven zijn verder niet meegenomen.

Aan de hand van de gevonden curven zijn de gemiddelde D_0 en de gemiddelde D_{100} bepaald.

Tot dusverre is het variëren van de korrelgrootte over de breedte van een raai nog niet meegenomen. Aangenomen wordt dat de 5 samples tot een redelijke benadering leiden.

4.3.2 Resultaten

De bovenstaande werkwijze heeft tot de volgende D_0 en D_m geleid:

D_0 (in mm):	D_{100} (in mm):
0,188	1,89

De verdelingsfunctie van het gewichtspercentage tegen een bepaalde korreldiameter kan worden afgeleid. Na curve-fitting, uitgaande van $z = f(\ln D)$ werd de volgende functie gevonden:

$$D_x = e^{\frac{(x\% - 72,4)}{43,3}}$$

Aan de hand hiervan zijn de volgende waarden berekend voor het bij de bodemtransportmetingen opgevangen materiaal:

$$D_{90} = 1500 \text{ } \mu\text{m}$$

$$D_{84,1} = 1310 \text{ } \mu\text{m}$$

$$D_{15,9} = 271 \text{ } \mu\text{m}$$

$$D_{50} = 596 \text{ } \mu\text{m}$$

$$D_{35} = 422 \text{ } \mu\text{m}$$

$$D_g = \sqrt{(D_{84,1} D_{15,9})} = 596 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\sigma_g = 0,5 \times (D_{84,1}/D_{50} + D_{50}/D_{15,9}) = 2,2$$

$$D_m = \frac{\sum\{p_i D_i\}}{\sum p_i} = (\text{i.g.v. log-normale verdeling}) D_g \exp(0,5 \ln^2 \sigma_g) = 813 \text{ } \mu\text{m}$$

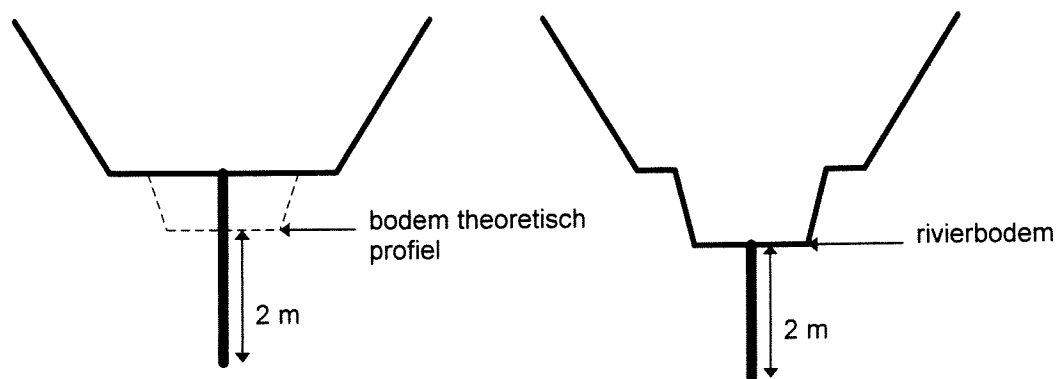
4.4 Materiaal bodemboringen

4.4.1 Werkwijze

In het baggervak zijn een aantal boringen uitgevoerd (bijlage 1b). Bij de boringen is volgende procedure gevolgd. Voordat de verdieping had plaatsgevonden, is op een aantal punten geboord tot 2 m onder het theoretisch vastgestelde baggerprofiel. (zie figuur 4.4)

Na de verdieping is op ongeveer dezelfde lokaties geboord tot 2 m onder de waterbodem.

Van de boormonsters zijn de zeefkrommen van lagen van 50 cm dik bepaald.



figuur 4.4: uitvoering bodemboringen

In dit rapport zijn van de aanwezige monsters de D_0 en de D_{100} bepaald zoals ook bij de Helley-Smithmetingen gedaan is van met elkaar overeenkomende zeefkrommen, voor wat betreft de lokatie, zijn de gemiddelde D_0 en D_{100} bepaald.

In dit rapport is gesteld dat materiaal met een $D_{100} > 10$ mm grof materiaal is en materiaal met een $D_{100} < 10$ mm fijn materiaal. Het materiaal viel grofweg te onderscheiden in materiaal met een $D_{100} < 1$ mm en materiaal met een $D_{100} > 20$ mm, vandaar dat aangenomen is om een tussenliggende korrelgrootte als grens te gebruiken tussen de termen fijn en grof.

Het materiaal is gesplitst in twee "klassen", fijn en grof, om het probleem te vereenvoudigen. Bij het latere morfologische iken en qua probleemstelling zou het probleem zeer complex worden, indien deze vereenvoudiging niet wordt toegepast en uitgegaan wordt van een groot aantal zeefkrommen. Door het materiaal niet op te splitsen in fijn en grof materiaal maar als een homogeen materiaal te behandelen, wordt daarentegen weer geen rekening gehouden met de probleemstelling waarin het vrijkomen van de fijnkorrelige laag centraal staat. Vandaar dat dit wel het minimaal benodigde onderscheid is.

4.4.2 Resultaten

In bijlage 5 staan de lokale gemiddelde D_0 - en D_{100} -waarden. Hierin is een duidelijke tendens waar te nemen. Van km 155 t/m km 160 bestaat meer dan de helft van de bodemonsters uit fijn materiaal, terwijl van km 161 t/m km 164 de monsters voornamelijk uit grof materiaal bestaan.

fijn materiaal:

D_0 (in mm):	D_{100} (in mm):
0,202	0,928

$$\Rightarrow D_x = e^{\frac{(x\%-105)}{65,6}}$$

$$D_{90} = 796 \mu\text{m}$$

$$D_{84,1} = 727 \mu\text{m}$$

$$D_{15,9} = 257 \mu\text{m}$$

$$D_{50} = 432 \mu\text{m}$$

$$D_{35} = 344 \mu\text{m}$$

$$D_g = \sqrt{(D_{84,1} D_{15,9})} = 432 \mu\text{m}$$

$$\sigma_g = 0,5 \times (D_{84,1}/D_{50} + D_{50}/D_{15,9}) = 1,68$$

$$D_m = \sum\{p_i D_i\} / \sum p_i = D_g \exp(0,5 \ln^2 \sigma_g) = 494 \mu\text{m}$$

grof materiaal:

D_0 (in mm):	D_{100} (in mm):
0,121	31,3

$$\Rightarrow D_x = e^{\frac{(x\%-38)}{18}}$$

$$D_{90} = 18 \text{ mm}$$

$$D_{84,1} = 13 \text{ mm}$$

$$D_{15,9} = 292 \mu\text{m}$$

$$D_{50} = 1,95 \text{ mm}$$

$$D_{35} = 846 \mu\text{m}$$

$$D_g = \sqrt{(D_{84,1} D_{15,9})} = 1,95 \text{ mm}$$

$$\sigma_g = 0,5 \times (D_{84,1}/D_{50} + D_{50}/D_{15,9}) = 6,67$$

$$D_m = \sum\{p_i D_i\} / \sum p_i = D_g \exp(0,5 \ln^2 \sigma_g) = 11,8 \text{ mm}$$

4.4.3 Controle

Wat in 4.4.2 meteen opvalt is dat bij het grovere materiaal een kleinere D_0 dan bij het fijnere materiaal wordt gevonden. Mogelijk komt dit door het interpoleren, aangezien het grovere materiaal een iets bredere spreiding had en om die reden waren de hellingen van de curven van het grovere materiaal wat flauwer. Vandaar dat het effect is bekeken op de karakteristieke korrelgrootheden van het grof-korreliger materiaal indien aangenomen wordt dat de D_0 van het grofkorreliger materiaal overeenkomt met dat van het fijnkorreliger materiaal:

controle:

D_0 (in mm):	D_{100} (in mm):
0,2	31,3

$$\Rightarrow D_x = e^{\frac{(x\%-31,8)}{19,8}}$$

$$D_{90} = 18,9 \text{ mm}$$

$$D_{84,1} = 14 \text{ mm}$$

$$D_{15,9} = 448 \mu\text{m}$$

$$D_{50} = 2,51 \text{ mm}$$

$$D_{35} = 1,18 \text{ mm}$$

$$D_g = \sqrt{(D_{84,1} D_{15,9})} = 2,5 \text{ mm}$$

$$\sigma_g = 0,5 \times (D_{84,1}/D_{50} + D_{50}/D_{15,9}) = 5,59$$

$$D_m = \sum\{p_i D_i\} / \sum p_i = D_g \exp(0,5 \ln^2 \sigma_g) = 11 \text{ mm}$$

Deze korrelgrootheden verschillen licht met de eerder berekende waarden van het grove materiaal. Op grond hiervan wordt de aanname geplaatst dat de afwijkingen in de karakteristieke korreldiameters t.g.v. het lineariseren, beperkt zijn.

4.5 Conclusie t.a.v. de gevolgde werkwijze

4.5.1 Onderscheid bodemmateriaal

In de gevolgde aanpak wordt onderscheid gemaakt tussen fijnkorrelig materiaal en grofkorrelig materiaal. Dit is een vrij ruwe aanpak om het probleem wat te vereenvoudigen.

Een andere aanpak is het verloop van de D_{16} , de D_{50} , de D_m , de D_{84} en de D_{90} tegen de lokatie uit te zetten. Voor de analyse van de monitoringsgegevens zou dit mogelijk iets meer inzicht hebben opgeleverd, bij het modelleren wordt het ijkken daarentegen weer lastiger, omdat meer onderscheid wordt gemaakt.

Omdat in de probleemstelling het belang van het verschil in korrelgrootte op de problematiek naar voren komt in het blootleggen van een fijne laag, is het nodig een onderscheid in fijn en grof bodemmateriaal mee te nemen. Om het model niet erg complex te maken is gekozen voor niet al te veel variatie.

Uit de gegevens van het bodemmateriaal bleek een grof onderscheid te maken in materiaal met een D_{90} van 1 mm en een D_{90} van 20 mm. Via de gevolgde werkwijze was gekozen te werken met een D_{100} van 10 mm als grens. De grootste D_{100} van het fijne materiaal bedroeg 4 mm, terwijl de gemiddelde D_{100} van het fijne materiaal ongeveer 1 mm was.

Van het grove materiaal bedroeg de kleinste D_{100} 10 mm, terwijl de gemiddelde D_{100} ongeveer 20 mm bedroeg.

4.5.2 Conclusie t.a.v. gegradeerd rekenen

Er zijn sedimenttransportmetingen uitgevoerd waarbij de korrelgrootte van het opgevangen sediment is vastgesteld. Dit materiaal wordt verondersteld een goede beschrijving van het getransporteerde materiaal te zijn. SOBEK gaat ervan uit dat het bodemmateriaal representatief is voor het getransporteerde materiaal en rekent met uniform sediment. Het opgevangen materiaal bij de Helley-Smithmetingen is veel fijner dan het bodemmateriaal in het gebied. De D_{90} van het opgevangen materiaal ligt in de orde van 1 mm, terwijl bij de D_{90} van het bodemmateriaal gedacht moet worden aan een grootte in de orde van 10 mm. Uniform sediment vormt dus geen goede beschrijving.

Een oplossing hiervoor zal gevonden moeten worden in gegradeerd rekenen. Aangezien binnen dit afstudeerproject geen programma voor gegradeerd rekenen ter beschikking staat, kan de bovenstaande conclusie niet worden meegenomen in de keuze voor een programma dat gegradeerd rekent.

5 Sedimenttransportformule

5.1 Inleiding

Voor het model is een sedimenttransportformule nodig. De sedimenttransportmetingen van vijf dagen bij km 141 zijn gebruikt om een transportformule te bepalen.

De globale opbouw van dit hoofdstuk is als volgt:

- 1) een beschrijving van de transportformules en berekeningen van het te verwachten sedimenttransport, op grond van de bestaande formules en van de hydraulische parameters in 5.2.
- 2) het bepalen van de dagtransporten uit de metingen in 5.3 t/m 5.6
- 3) het vergelijken van de berekeningen met de metingen om op grond hiervan een transportformule voor het gebied te bepalen in 5.7.
- 4) het checken van de gevonden formule aan een sedimentatiefront in 5.8.
- 5) enige kanttekeningen bij de gevonden resultaten in 5.9.

5.2 Theoretisch sedimenttransport

5.2.1 Sedimenttransportparameters

Een belangrijke grootte voor bodemtransport is de bodemschuifspanning τ_b [2]:

$$\tau_b = \rho u_*^2 = \rho g \frac{u^2}{C^2} \quad (5.1)$$

met:

C	: Chézy-waarde
g	: versnelling t.g.v. de zwaartekracht
u	: stroomsnelheid
u_*	: schuifspanningssnelheid
ρ	: dichtheid van water
τ_b	: bodemschuifspanning

Uitgaande van subkritische stroming wordt het transport s uitsluitend bepaald door de volgende variabelen $s=f(g, \rho, \eta, \rho_s, D, \tau_b)$.

Het transport kan ook dimensieloos worden uitgeschreven met de volgende onafhankelijke dimensieloze parameters:

1) de Shieldsparameter: $\theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (5.2)$

2) de parameter: $\frac{\rho}{\rho_s} \quad (5.3)$

3) het Reynoldsgetal voor de stroming rond een korrel in de grenslaag:

$$Re_* = \frac{u_* D}{\nu} \quad (5.4)$$

met:

D	: korreldiameter
ρ_s	: dichtheid van sediment
ν	: kinematische viscositeit

De formules waaruit gekozen moet worden, worden bepaald door de opties die SOBEK ter beschikking heeft. In SOBEK biedt de mogelijkheid tot het gebruik van de volgende formules: Engelund&Hansen, Meyer-Peter & Müller, Van Rijn, Ackers & White, Parker & Klingeman en een zogenaamde general user-adjustable formula. Gekozen is de volgende formules te testen:

Meyer-Peter & Müller [2], in het vervolg afgekort tot M-P&M. Deze formule gaat redelijk goed op bij relatief veel bodemtransport en blijkt vaak redelijk op te gaan voor de Nederlandse rivieren. Van Rijn [9], deze formule leidt eveneens tot redelijke resultaten voor de Nederlandse rivieren.

Engelund&Hansen [2], in het vervolg afgekort als E-H. Gezien de eenvoud van de formule, en gezien het belang van de formule i.g.v. een relatief hoog zwevend transport wordt deze formule meegenomen.

Hieronder volgt een beschrijving van de transportformules van M-P&M, E-H en Van Rijn. Bij Van Rijn is de iets vereenvoudigde versie van de formule toegepast, aangezien SOBEK gebruik maakt van deze versie, en de metingen hierop gefit dienen te worden.

5.2.2 Meyer-Peter & Müller:

M-P&M gaan uit van een dimensieloze schuifspanning van 0,047. Deze schuifspanning is geen maat voor het begin van beweging, omdat de formule niet tot het begin van beweging geëxtrapoleerd is. M-P&M stellen daar 0,03 voor. De representatieve korreldiameter waarvan in de formule gebruik wordt gemaakt is de D_m . Hieronder staat het dimensieloze vorm van de formule voor bulktransport, σ_b .

$$\text{MP\&M:} \quad \sigma_b = 13,3(\mu\theta - \theta_{cr})^{3/2} = 13,3(\mu\theta - 0,047)^{3/2} \quad (5.5)$$

$$\text{met:} \quad \theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gD} = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)gD_m} \quad (5.6)$$

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{90}}\right)^{3/2} \quad (5.7)$$

$$C_{90} = 26\left(\frac{R}{D_{90}}\right)^{1/6} \quad (5.8)$$

met:

- C_{90} : de Chézy coëfficiënt gerelateerd aan de D_{90}
- μ : ribbelfactor
- θ_{cr} : kritische waarde van θ
- σ_b : dimensieloze transportparameter met het transport in bulk

5.2.3 Engelund&Hansen:

E&H is een formule die doorgaans wordt gebruikt i.g.v. een sterk overheersend zwevend transport. Als representatieve korreldiameter wordt in deze formule de D_{50} gebruikt. De dimensieloze vorm van E&H voor bulktransport luidt:

$$\text{E-H:} \quad \sigma_b = 0,083C^2 \frac{\theta^{5/2}}{g} \quad (5.9)$$

$$\text{met:} \quad \theta = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)D_{50}} \quad (5.10)$$

5.2.4 Van Rijn:

Van Rijn [9, 10, 11] berekend het bed load transport en de suspended load transport los van elkaar. Het totaal transport wordt gevormd door de som van beide transporten. De formule geeft goede resultaten voor de Rijn en heeft een geldigheid voor een D_{50} van 100 μm tot 500 μm . In de literatuur werd geen dimensieloze formule van de vorm $\sigma = f(\theta)$ gevonden. Vandaar dat hieronder de dimensiedragende formule staat voor het berekenen van het volume vast stof met het bodemtransport q_b en het zwevende transport q_s in kg/sm .

Van Rijn bodemtransport:

$$q_b = 0,053 \rho_s D_{50} D_*^{-0,3} T^{2,1} \sqrt{(\Delta g D_{50})} \quad (\text{kg/sm}) \quad (5.11)$$

met:
$$T = \frac{\tau_b' - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} \quad (5.12)$$

$$D_* = D_{50} \left(\frac{\Delta g}{v^2} \right)^{1/3} \quad (5.13)$$

$$\tau_{b,cr} = \Psi (\rho_s - \rho) g D_{50} \quad (5.14)$$

Ψ wordt uit de grafiek van Van Rijn gehaald voor het begin van bewegen. Aangezien $D_* = 11.4$, geldt $\Psi = 0,04 D_*^{0,1} = 0,0314$

$$\tau_b = \rho g \left(\frac{u}{C'} \right)^2 \quad (5.15)$$

$$C' = 18 \log \left(\frac{12h}{3D_{90}} \right) \quad (5.16)$$

Van Rijn zwevend transport:

$$q_s = F u h c_a \quad (\text{kg/sm}) \quad (5.17)$$

$$c_a = \frac{0,035}{2,3} \rho_s \frac{D_{50}}{a} \frac{T^{1,5}}{D_*^{0,3}} \quad (5.18)$$

$$F = \frac{\left(\frac{a}{h} \right)^{Z'} - \left(\frac{a}{h} \right)^{1,2}}{\left(1 - \frac{a}{h} \right)^{Z'} (1,2 - Z')} \quad (5.19)$$

$$Z' = Z + \Psi \quad (5.20)$$

met de stratificatiecorrectie voor concentraties boven de 2.5 kg/m^3 :

$$\Psi = 2,5 \left(\frac{w_s}{u_*} \right)^{0,8} \left(\frac{c_a}{c_0} \right)^{0,4} \quad \text{voor } 0,01 \leq w_s/u_* \leq 1 \text{ en } 0,01 \leq a/h \leq 0,1 \quad (5.21)$$

w_s wordt bepaald met $D_s = (1 + 0.011(\sigma_s - 1)(T - 25))D_{50}$, en bij $T > 25$, $D_s = D_{50}$.
 $C_0 = 0.55$

$$Z = w_s (\beta_K u_*) \quad (\text{met } \beta_{\max} = 2) \quad (5.22)$$

Van Rijn geeft benaderende formules voor de bovenstaande formules. Deze zijn in SOBEK aanwezig en worden hieronder beschreven. Voor het bereik van deze benaderende formules geeft Van Rijn:

$1 \text{ m} \leq h \leq 20 \text{ m}$
 $0,5 \text{ m/s} \leq u \leq \text{m/s}$
 $100 \mu\text{m} \leq D_{50} \leq 2000 \mu\text{m}$

bodem transport:

$$q_b = 0,005 \rho_s \bar{u} h \left(\frac{\bar{u} - u_{cr}}{\sqrt{(s-1)gD_{50}}} \right)^{2,4} \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{1,2} \quad (\text{kg/sm}) \quad (5.23)$$

met: $u_{cr} = 0,19 D_{50}^{0,1} \log \left(\frac{12h}{3D_{90}} \right)$ voor $100 \mu\text{m} \leq D_{50} \leq 500 \mu\text{m}$ (5.24)

$u_{cr} = 8,50 D_{50}^{0,6} \log \left(\frac{12h}{3D_{90}} \right)$ voor $500 \mu\text{m} \leq D_{50} \leq 2000 \mu\text{m}$ (5.25)

zwevend transport:

$$q_s = 0,012 \rho_s \bar{u} h \left(\frac{\bar{u} - u_{cr}}{\sqrt{(s-1)gD_{50}}} \right)^{2,4} \left(\frac{D_{50}}{h} \right) \left(\frac{1}{D_*} \right)^{0,6} \quad (\text{kg/sm}) \quad (5.26)$$

5.2.5 Berekend sedimenttransport vanuit de theorie

Hieronder volgen de berekende waarden op km 141,4 op de dagen waarop transportmetingen zijn uitgevoerd. Voor de Chézy-waarden is uitgegaan van $C = 41 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en voor de toegepaste korrelgrootten van de korrelgrootten zoals deze uit de Helley-Smithmetingen bepaald zijn: $D_m = 813 \mu\text{m}$ en $D_{90} = 1,5 \text{ mm}$.

De rivierbreedte in het gebied bedraagt 135 m.

In bijlage 6 staan de dimensieloze transportparameters θ en σ en enkele tussenstappen.

datum	dagtransport (in m^3)		
	M-P&M	E-H	Van Rijn
15-2-1997	911 m^3	12290 m^3	12026 m^3
19-2-1997	85 m^3	1147 m^3	869 m^3
26-2-1997	590 m^3	7169 m^3	7337 m^3
27-2-1997	1338 m^3	20552 m^3	18522 m^3
1-3-1997	980 m^3	13451 m^3	12842 m^3

tabel 5.1: theoretisch berekende dagtransporten van de meetdagen

5.3 Gemeten sedimenttransport

Van de 5 dagen waarop sedimenttransportmetingen zijn uitgevoerd, wordt het dagelijkse transport berekend.

De terminologie bodemtransport en zwevend transport zal binnen dit hoofdstuk als volgt worden gebruikt: de resultaten van de Helley-Smithmetingen worden als bodemtransport beschouwd en de resultaten van de AZTM-metingen als zwevend transport.

De Helley-Smith vangt sediment op vanaf de rivierbodem tot 7,5 cm boven de bodem. Deze 7,5 cm is de hoogte van het apparaat.

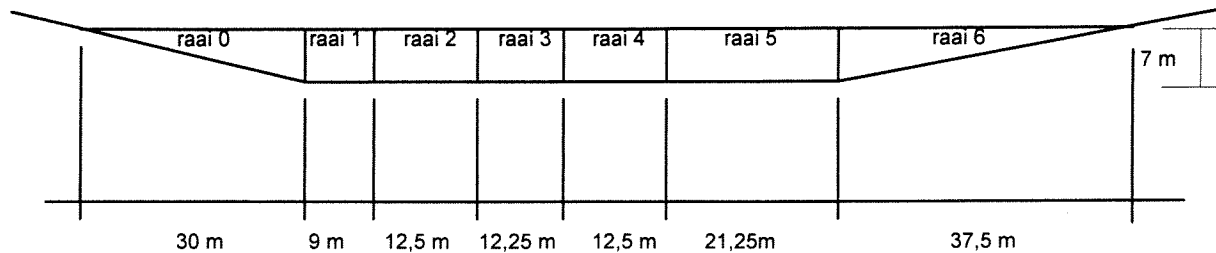
De diepstgenomen monsters van de AZTM-metingen worden genomen op 20 cm boven de bodem, maar worden representatief verondersteld tot de diepte waar de Helley-Smith sediment opvangt. Zo bestrijken bodemtransport en zwevend transport samen de hele rivierdiepte. Van Rijn [4] geeft criteria voor de hoogte boven de bodem waarboven het zwevend transport plaatsvindt; z_0 :

- 1) $z_0 = 0,01h$ tot $0,1h$
- 2) $z_0 = 0,5\Delta_b$
- 3) $z_0 = k_s$

met:

- h : waterdiepte
 Δ_b : hoogte van de bodemvorm
 k_s : hydraulische ruwheid

In de bijlage 3a staat het dwarsprofiel van de rivier op km 141,4. Hieronder is de onderverdeling van de dwarsraaien getekend, waarmee gerekend is bij de zandtransportberekeningen.



figuur 5.1: dwarsraaien bij het zandtransport

5.4 Bodemtransport

5.4.1 Meetgegevens

De Helley-Smith heeft een inlaatopening van 0,075m x 0,075m. Deze wordt voor de meting op een lokatie 10 keer gedurende enkele minuten op de bodem geplaatst. Als meetwaarde voor de hoeveelheid opgevangen sediment op een lokatie wordt het gemiddelde van 10 monsters gebruikt. Er zijn alleen metingen in de dwarsraaien 1,2,3,4 en 5 gedaan.

Op de dagen 15-2 en 19-2 ontbraken de metingen van raai 2 en raai 4. Uit bestudering van de snelheidsprofielen van de rivier en het bodemtransport bleek dat de spreiding van de gemeten bodemtransporten zeer groot was. Er viel geen duidelijk verband te leggen tussen het stroomprofiel en het bodemtransport ervan uitgaande dat hogere stroomsnelheden leiden tot een groter transport. Er is voor gekozen om d.m.v. lineaire interpolatie de ontbrekende data voor raai 2 (lineaire interpolatie uit raai 1 en raai 3) en raai 4 (lineaire interpolatie uit raai 3 en raai 5) aan te vullen.

De vangsten in raai 5 bestonden volgens het meetrapport uit bladeren. De hoeveelheid zand was steeds zeer laag. Een duidelijke reden hiervoor is niet aanwijsbaar zonder nader onderzoek in het gebied. Het stroomprofiel en het bovenstroomsgelegen stuk van de rivier bieden geen aanknopingspunt, aangezien de rivier en de stroomomstandigheden in raai 5 vrij identiek lijken met die in raai 1 en raai 2, gelet op de lokatie t.o.v. de rivieras, de bovenstroomse rivierloop, het verloop van de waterdiepte en het snelheidsprofiel.

5.4.2 Aannames

Zoals uit navraag bleek en gezien het geringe aantal metingen per raai, is de nauwkeurigheid van de Helley-Smithmetingen vrij laag, gezien het beperkte aantal metingen.

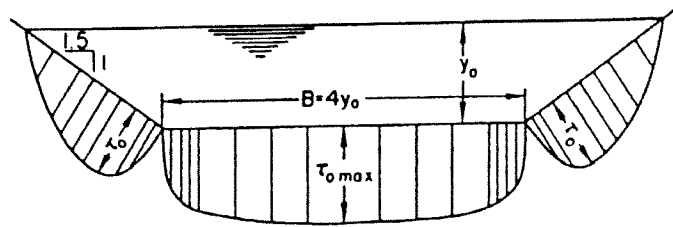
Voor raai 5 is met een positieve en een negatieve aanname gerekend.

Er is gerekend met de aanname dat het transport in raai 5 0 m³/dag bedroeg en met de aanname dat het transport in raai 5 op dat in raai 1+2 leek, aangezien de breedte en de lokatie van raai 5 t.o.v. de rivieras overeenkwam met die van raai 1+2.

Verder is aangenomen dat een monster representatief is voor de hele raai waarin het genomen is.

Het bodemtransport in raai 0 en raai 6 is in eerste instantie verwaarloosd op grond van de volgende beschouwingen. Het bodemtransport in raai 0 + raai 6 is vergeleken met het bodemtransport in raai 1 t/m raai 5. Deze vergelijking betreft het theoretisch transport zoals dat gevonden door het invullen van de gevonden en de aanwezige hydraulische gegevens in de transportformule van Meyer-Peter & Müller. (zie eventueel stukken over de transportformules en de rivierparameters)

In M-P&M zal i.p.v. u^2 de bodemschuifspanning τ_b/ρ worden ingevuld, aangezien in de theorie niets gevonden werd betreffende het snelheidsprofiel over de breedte van de rivier, maar wel wat over de verdeling van de bodemschuifspanning. Lane (1952) [12] beschrijft het schuifspanningsverloop over het dwarsprofiel van een kanaal als in figuur 5.2.



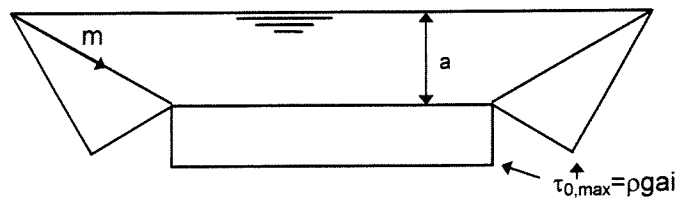
figuur 5.2: schematisatie van de bodemschuifspanning in een kanaal volgens Lane (1952)

met:

- B : bodembreedte
- y_0 : waterdiepte
- τ_0 : bodemschuifspanning
- $\tau_{0,max}$: maximale bodemschuifspanning

Met voor B is $2y_0$, $4y_0$ en $8y_0$ een $\tau_{0,max}$ van respectievelijk 0,89, 0,97 en 0,99 maal $\rho g h_i$. Voor de maximum waarden aan de zijkanten vindt hij respectievelijk maximale τ -waarden van 0,735, 0,750 en 0,760 maal $\rho g h_i$ op een hoogte van 0,1-0,2 van de diepte.

Binnen deze analyse is dit verloop als volgt vereenvoudigd.



figuur 5.3: gebruikte, vereenvoudigde schematisatie voor de bodemschuifspanning

Voor het transport in raai 1 t/m raai 5 geldt:

$$S_{tot} = B_{bodem} \times s_{M-P\&M}(\tau = \rho g h_i)$$

met:

- B_{bodem} : lengte van het bodemoppervlak over een dwarsprofiel
- $s_{M-P\&M}(\tau)$: transportformule van Meyer-Peter&Müller p.e.v. breedte als functie v.d. schuifspanning
- S_{tot} : sedimenttransport over de totale breedte

Het transport in raai 0 en het transport in raai 6 bedraagt:

$$S_{tot} = \int_0^m s_{M-P\&M}(\tau(m)) dm \quad (5.26)$$

met:

- m : coördinaat langs talud

De volgende waarden zijn ingevuld in de transportformules:

- $C = 41 \text{ m}^{1/2}/s$
- $h = 7 \text{ m}$
- $B_{bodem} = 70 \text{ m}$
- $i_{talud} = 1 : 5$
- $D_{90} = 1500 \mu\text{m}$
- $D_m = 813 \mu\text{m}$
- $i_{water} = 10^{-4}$

$$\tau_0 = \rho g h i = 1000(\text{kg/m}^3) \times 9,81(\text{m/s}^2) \times 7(\text{m}) \times 10^{-4} = 6,87 \text{ N/m}^2$$

$$C_{90} = 26(\text{m}^{1/2}/\text{s}) \times (R / D_{90})^{1/6} = 26(\text{m}^{1/2}/\text{s}) \times (5,2(\text{m}) / 1,5 \cdot 10^{-6}(\mu\text{m})) = 101 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

$$\mu = (C/C_{90})^{3/2} = (41(\text{m}^{1/2}/\text{s}) / 101(\text{m}^{1/2}/\text{s}))^{3/2} = 0,26$$

Hier komt uit:

bodemtransport in raai 1 t/m raai 5: $S_{\text{tot}} = 0,00227 \text{ m}^3/\text{s}$

bodemtransport in raai 0 + raai 6: $=S_{\text{tot}} = 0,00062 \text{ m}^3/\text{s}$

Uit deze uitkomsten blijkt dat in het middenstuk het bodemtransport ongeveer vier keer zo hoog is als het bodemtransport boven de taluds aan de zijkanten.

5.4.3 Werkwijze

Omdat het niet gelukt is informatie over de Helley-Smith te achterhalen, is voor een vereenvoudigde werkwijze gekozen. Vanuit de monsters is het dagtransport in een raai als volgt berekend: (duur van een dag in minuten / duur van een meting in minuten) x (breedte van de desbetreffende raai in meters / breedte van de Helley Smithmond in meters) x (gemiddelde hoeveelheid opgevangen sediment op een lokatie op een dag(in kg)).

Verder is rekening gehouden met de onnauwkeurigheid van de metingen.

In tabel 1 zijn de minimum dagtransporten afgebeeld. Hierbij is uitgegaan van de gemeten transporten - 50% van hun waarde en bij raai 5 een transport van 0 m³/dag.

In tabel 2 zijn de maximum dagtransporten afgebeeld. Hierbij is uitgegaan van de gemeten transporten + 50% van hun waarde en bij raai 5 een transport gelijk aan het transport in raai 1+2.

5.4.4 Resultaten

De combinatie van bovenstaande berekeningen en aannamen omgerekend naar bulktransport met $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$ en $\varepsilon = 0,4$ leiden tot de volgende uitkomsten:

datum	minimaal bodemdagtransport (in m ³)	maximaal bodemdagtransport (in m ³)
15-2-1997	120,3 m ³	473,1 m ³
19-2-1997	16,6 m ³	68,8 m ³
26-2-1997	70,6 m ³	254,5 m ³
27-2-1997	87,4 m ³	382,8 m ³
1-3-1997	138,3 m ³	584,2 m ³

tabel 5.2: waarden bodemdagtransport uit de metingen

In bijlage 7 staan de minimum en maximum dagtransporten per raai.

5.5 Zwevend transport

5.5.1 Theorie fluxprofiel

Het zwevend transport bestaat uit deeltjes die met de stroom meedrijven en soms de bodem raken. Dit transport wordt bepaald door de sedimentconcentratie en de stroomsnelheid van het water. Voor het transport door een waterkolom met een eenheidsbreedte geldt volgens Einstein (1950) [22]:

$$S_s = \int_{\delta_b}^h c(z)u(z)dz \quad (5.27)$$

met:

h	: waterstand
δ_b	: dikte van de bodemtransportlaag
z	: hoogte boven de waterbodem
c(z)	: gemiddelde concentratie op hoogte z boven de waterbodem
u(z)	: stroomsnelheid van het water op hoogte z boven de waterbodem

Om dit te berekenen, moeten het verloop van c(z) en van u(z) bekend zijn.

snelheidsprofiel:

Uitgaande van het Prandtl-Von Karman logaritmische snelheidsprofiel [22] geldt:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] \quad (5.28)$$

met:

$u^* = \frac{u\sqrt{g}}{C}$: schuifspanningssnelheid
$\kappa = 0,4$: Von Karman-constante
C	: Chézy-waarde
$z_0 \approx \frac{k}{30}$: hoogte t.o.v. de bodem met u = 0 m/s volgens het logaritmische profiel
k	: Nikuradse ruwheid

concentratieprofiel:

Bij een evenwichtssituatie, kan het concentratieverloop als volgt worden beschreven [22]:

$$w c(z) + \varepsilon_s(z) \frac{dc(z)}{dz} = 0 \quad (5.29)$$

met:

w	: valsnelheid van de sedimentdeeltjes
c(z)	: gemiddelde concentratie op hoogte z boven de waterbodem
$\varepsilon_s(z)$: diffusiecoëfficiënt voor sediment
z	: hoogte boven de waterbodem

De oplossing van deze differentiaalvergelijking is met c_a als referentieconcentratie op hoogte z = a:

$$c(z) = c_a \exp \left[-w \int_a^z \frac{dz}{\varepsilon_s(z)} \right] \quad (5.30)$$

Voor $\varepsilon_s(z)$ zijn verschillende theorieën ontwikkeld, waarvan er hier een paar volgen:

Coleman [1970]:

Coleman veronderstelde een constante $\varepsilon_s(z)$, dus: $\varepsilon_s(z) = \varepsilon_s$.

Dit leidt tot het volgende concentratieverloop:

$$c(z) = c_0 \exp\left[\frac{-Wz}{\varepsilon_s}\right] \quad (5.31)$$

met:

c_0 : bodemconcentratie op $z = 0$

Bhattacharya [1971]:

Bhattacharya veronderstelde een lineair verloop: $\varepsilon_s(z) = (z/h) \varepsilon_{s, \max}$.

Dit leidt tot het volgende concentratieverloop:

$$c(z) = c_a \left[\frac{h-a}{z} \right]^{(wh/\varepsilon_{s, \max})} \quad (5.32)$$

Rouse/Einstein [22]:

Zij veronderstellen een parabolisch veranderende diffusiecoëfficiënt: $\varepsilon_s(z) = 4 \varepsilon_{s, \max} \frac{z}{h} \left[\frac{h-z}{z} \right]$

Via deze aanname komt men tot het volgende concentratieverloop:

$$c(z) = c_a \left[\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right]^{z^*} \quad (5.32)$$

met: $z^* = \frac{w}{\kappa u^*} = \frac{hw}{4\varepsilon_{s, \max}} = \text{Rouse number}$

Veel recente $\varepsilon_s(z)$ -modellen zijn van de bovenstaande afgeleid. De meest gebruikte diffusiecoëfficiënt is die van Rouse/Einstein. Deze komt overeen met de diffusiecoëfficiënt voor vloeistof zoals bij het snelheidsprofiel. In dit rapport wordt gebruik gemaakt van de aanname van Rouse/Einstein.

fluxprofiel:

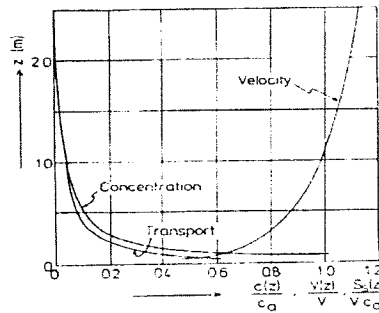
Volgens de theorie [22] valt zwevend transport in een waterkolom dus te vinden door het invullen van $u(z)$ en $c(z)$ in de integraal en deze integraal over de diepte op te lossen.

Dus:

$$S_s = \int_a^h c_a \left[\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right]^{z^*} \frac{u^*}{\kappa} \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] dz \quad (5.33)$$

Dit valt te herschrijven tot:

$$S_s = c_a \left[\frac{a}{h-a} \right]^{z^*} \frac{u^*}{\kappa} \int_a^h \left[\frac{h-z}{z} \right]^{z^*} \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] dz = \text{constante } K \times \int_a^h \left[\frac{h-z}{z} \right]^{z^*} \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] dz \quad (5.34)$$



figuur 5.4: voorbeeld dimensieloos concentratie-, snelheids-, en transportprofiel

(Einstein heeft hier een oplossingstabel gemaakt, met behulp waarvan men de oplossing van de integraal kan vinden indien over de hele diepte wordt geïntegreerd)

5.5.2 Metingen versus theoretische berekeningen

De flux op een bepaalde hoogte boven de bodem wordt gegeven door $c(z)u(z)$. Volgens de bovenstaande theorie valt dit te herschrijven tot een $K \times f(z)$, waarbij $f(z)$ valt op te vatten als een maat die het verschil aangeeft tussen de grootten van de fluxen op verschillende hoogten.

$$f(z) = \left[\frac{h-z}{z} \right]^{2z} \ln \left[\frac{z}{z_0} \right] \tag{5.35}$$

Indien in $f(z)$ de rivierparameters worden ingevuld en voor de rivier normale waarden voor stroomsnelheid, waterstand, etc, kan berekend worden hoeveel de fluxen over de diepte ongeveer met elkaar verschillen volgens de hierboven vermeldde theorie.

Gerekend wordt met de volgende waarden:

- $C = 41 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
- $R = 5,2 \text{ m}$
- $w = 0,1 \text{ m/s}$
- $h = 7 \text{ m}$
- $u = 1 \text{ m/s}$

$$u^* = \frac{u\sqrt{g}}{C} = \frac{1(\text{m/s})\sqrt{9,81(\text{m/s}^2)}}{41(\text{m}^{1/2}/\text{s})} = 0,076(\text{m/s})$$

$$C = 18 \log \left(\frac{12R}{k} \right) \Leftrightarrow 41(\text{m}^{1/2}/\text{s}) = 18 \log \left(\frac{12 \times 5,2}{k} \right) \Rightarrow k = 0,33\text{m}$$

$$z_0 = k / 30 = 0,33 (\text{m}) / 30 = 0,011 \text{ m/s}$$

$$z_* = \frac{w}{\kappa u_*} = \frac{0,1(\text{m/s})}{0,4 \times 0,076(\text{m/s})} = 3,3$$

Dit leidt tot de volgende waarden:

hoogte boven rivierbodembodem (in m)	f(z)-waarde	hoogte boven rivierbodembodem (in m)	f(z)-waarde	hoogte boven rivierbodembodem (in m)	f(z)-waarde
0,07	$7,13 \cdot 10^6$	1,5	358	4,5	$864 \cdot 10^{-3}$
0,2	$328 \cdot 10^3$	2	107	5	$298 \cdot 10^{-3}$
0,35	$57,4 \cdot 10^3$	2,5	37,7	5,5	$85,4 \cdot 10^{-3}$
0,5	$18,1 \cdot 10^3$	3	14,5	6	$17,0 \cdot 10^{-3}$
0,75	$4,62 \cdot 10^3$	3,5	5,76	6,5	$1,35 \cdot 10^{-3}$
1	$1,67 \cdot 10^3$	4	2,28	7	0

tabel 5.3: f(z)-waarden tegen de afstand tot de rivierbodembodem

De fluxen verschillen sterk over de diepten volgens deze berekeningen. De flux op 0,07m boven de bodem is ongeveer 9 orden groter dan de flux op 1 m onder het wateroppervlak. Dit is aan de hoge kant, en wordt mogelijk veroorzaakt door de keuze van één korrelgrootte.

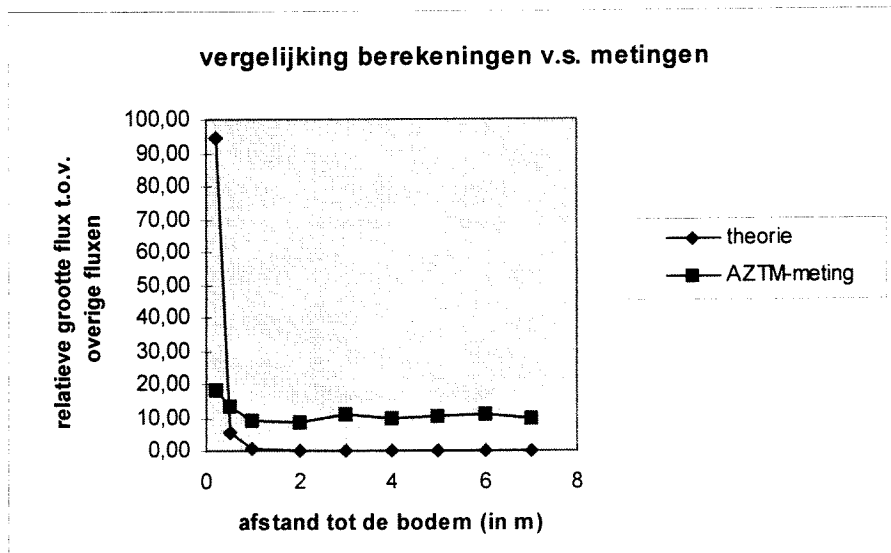
Bij de gemeten waarden varieerden de fluxen over de vertikaal nauwelijks. In de onderstaande tabel staan voor de AZTM-metingen hoe groot de dichtst bij het oppervlakte gemeten fluxen (6 m boven de bodem) procentueel zijn t.o.v. de diepst gemeten fluxen in de profielen (20 cm boven de bodem). Deze waarden komen bijna ook altijd overeen met het procentuele verschil tussen de kleinste en de grootste gemeten flux van een meting.

	15-02-1997	19-02-1997	26-02-1997	27-02-1997	01-03-1997
1.1	50%	124%	64%	66%	46%
1.2	81%	97%	71%	60%	82%
2.1	41%	g.g.	31%	44%	23%
2.2	48%	g.g.	39%	25%	11%
3.1	g.g.	91%	52%	8%	63%
3.2	g.g.	103%	52%	86%	37%
4.1	g.g.	g.g.	44%	42%	39%
4.2	g.g.	g.g.	40%	43%	33%
5.1	43%	73%	51%	22%	108%
5.2	43%	112%	26%	32%	20%

tabel 5.4: het percentage geeft de relatieve grootte van de flux bij het wateroppervlak t.o.v. de flux bij de rivierbodem uit de metingen weer.

g.g. = geen gegevens

Ter verduidelijking staat hieronder een grafiek waarin de relatieve grootte van een flux staat afgebeeld tegen de afstand tot de bodem. De metingen van 27-2-'97 op 5 m van de rivieras zijn gebruikt. De fluxen op 0,2 m, 0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m en 7 m zijn vergeleken. Zowel de gemeten fluxen als de berekende fluxen zijn genormeerd op de som van fluxen over de hele diepte. Hierdoor zijn zowel de fluxen van de metingen als van de berekeningen op een bepaalde diepte qua relatieve grootte te vergelijken. De som van de fluxen op 100 genormeerd is.



figuur 5.5: vergelijking flux uit theorie en uit metingen

Het verschil tussen de theorie en de metingen is groot. Aangenomen wordt dat de metingen de situatie correcter beschrijven dan de theorie en derhalve wordt verder gewerkt met de meetresultaten.

5.5.3 Werkwijze

Via de gecombineerde AZTM- en snelheidsmetingen [14] zijn de fluxen op een aantal niveaus bepaald. Gezien het redelijk grote aantal gemeten fluxen in een vertikaal is aangenomen dat voldoende rekening wordt gehouden met de variaties in het snelheidsprofiel en het concentratieprofiel. In raai 0 en raai 6 is niet gemeten. Het zwevend transport in deze raaien is vermoedelijk nog vrij hoog. Het doorstroomoppervlak van beide raaien tezamen bedraagt 50% van het doorstroomoppervlak van de andere raaien tezamen. Verondersteld wordt dat het fluxprofiel in raai 0 overeenkomt met dat van raai 1 en dat het fluxprofiel van raai 6 overeenkomt met dat van raai 5. Weer zijn de meetonnauwkeurigheden meegenomen waarbij de gemeten concentraties $\pm 15\%$ van hun waarden erbij kregen en de gemeten snelheden $\pm 5\%$ van hun waarden.

5.5.4 Resultaten

In bijlage 7 staat de minimum en maximum zwevend transport per raai in kilogram per seconde en in kubieke meter per dag. Hieronder volgt een tabel met het totaal minimum en maximum dagtransport. Het minimum transport is berekend, uitgaande van de minimum flux met $C_{rep}=C_{gemeten}-15\%$ en $U_{rep}=U_{gemeten}-5\%$. Het maximum transport is berekend, uitgaande van de maximum flux met $C_{rep}=C_{gemeten}+15\%$ en $U_{rep}=U_{gemeten}+5\%$. De transporten zijn in bulk met $\rho=2650 \text{ kg/m}^3$ en $\epsilon=0,6$.

datum	minimaal dagtransport in m ³	maximaal dagtransport in m ³
15-2-1997	3037 m ³	4545 m ³
19-2-1997	209 m ³	313 m ³
26-2-1997	1536 m ³	2299 m ³
27-2-1997	2745 m ³	410 m ³
1-3-1997	1364 m ³	2040 m ³

tabel 5.5: zwevend dagtransport op de meetdagen

In de onderstaande tabellen is het relatieve belang van het bodemtransport onderzocht i.v.m. de eerder gedane aanname bij de bodemtransportberekeningen dat het transport aan de zijkanten van de rivier verwaarloosbaar was. Verder geven tabel 5.6 en 5.7 ook inzicht in het relatieve belang in de extreme situaties maximum bodemtransport v.s. minimum zwevend transport en minimum bodemtransport v.s. maximum zwevend transport.

	15-2	19-2	26-2	27-2	1-3
maximum bodemdagtransport	473 m ³	69 m ³	255 m ³	383 m ³	584 m ³
minimum zwevend dagtransport	3037 m ³	209 m ³	1536 m ³	2745 m ³	1364 m ³
totaal dagtransport	3510 m ³	278 m ³	1791 m ³	3128 m ³	1948 m ³
(bodemtransport/ totale transport)x100%	13%	25%	14%	12%	30%

tabel 5.6: maximum bodemtransport v.s. minimum zwevend transport

	15-2	19-2	26-2	27-2	1-3
minimum bodemdagtransport	120 m ³	17 m ³	71 m ³	87 m ³	138 m ³
maximum zwevend dagtransport	4545 m ³	313 m ³	2299 m ³	4106 m ³	2040 m ³
totaal dagtransport	4665 m ³	330 m ³	2370 m ³	4193 m ³	2178 m ³
(bodemtransport/ transport)x100%	3%	5%	3%	2%	6%

tabel 5.7: minimum bodemtransport v.s. maximum zwevend transport

Het verwaarloosde bodemtransport aan de zijkanten bedraagt maximaal 25% van het totale bodemtransport. Op het totale transport bedraagt dit ten hoogste:

$$\frac{\text{bodemtransport} \cdot \text{zijkant}}{\text{totale} \cdot \text{transport}} = \frac{0,25 \times 584 (\text{m}^3)}{1,25 \times 584 (\text{m}^3) + 1364 (\text{m}^3)} = 7\%$$

5.6 Gemeten maximaal en minimaal transport over de gehele waterdiepte

Bij de metingen zijn de waarden voor een maximaal en een minimaal dagtransport berekend voor het bodemtransport en het zwevend transport. De ondergrens van de bandbreedte waartussen het totale dagtransport ligt is de som van het minimum bodemdagtransport en het minimum zwevend dagtransport. De bovengrens wordt gevormd door de som van het maximum bodemdagtransport en het maximum zwevend dagtransport. Hieronder volgen de minimum en de maximum dagtransportwaarden zoals gevonden uit de metingen.

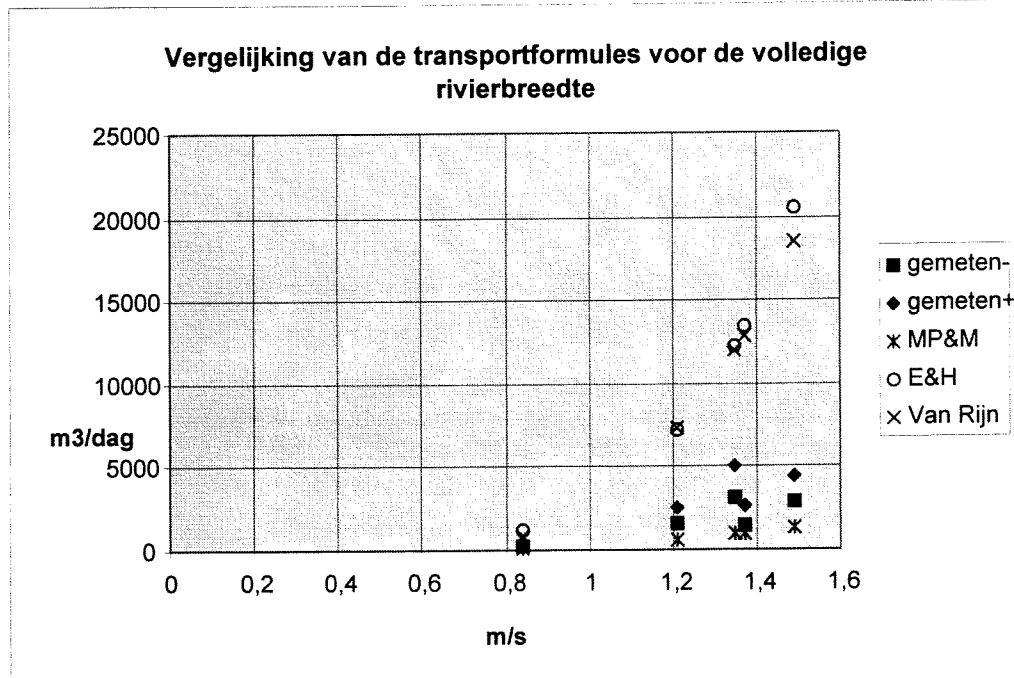
datum	minimaal dagtransport in m ³	maximaal dagtransport in m ³
15-2-1997	3157 m ³	5018 m ³
19-2-1997	226 m ³	382 m ³
26-2-1997	1607 m ³	2554 m ³
27-2-1997	2832 m ³	4489 m ³
1-3-1997	1502 m ³	2624 m ³

tabel 5.8: uit de metingen berekende transport over de totale waterdiepte

5.7 Gevonden transportformule

Aan de hand van een vergelijking van de transportformules en de gevonden sedimenttransporten uit de metingen moet een voor het gebied geldende transportformule worden bepaald. In dit hoofdstuk zal een transportformule voor het gebied bepaald worden door het fitten van de theoretische formules op de gevonden meetwaarden.

In de onderstaande grafiek zijn de waarden van de M-P&M, E&H, Van Rijn en de gemeten waarden uitgezet.



figuur 5.6: sedimenttransport uit de metingen v.s. sedimenttransport uit de theorie

gemeten- = minimum transport
gemeten+ = maximum transport

De gemeten waarden blijken zich te bevinden tussen de theoretische waarden van de gebruikte formules. MP&M geeft een onderschatting en E&H een overschatting.

Uit de bovenstaande grafiek is op te maken dat de meetwaarden het dichtst bij de waarden van MP&M liggen.

Verder valt op te maken dat de waarden van Van Rijn en van E&H weinig verschillen. Op grond van de eenvoudiger vorm krijgt E&H daarom de voorkeur.

N.B.: De waarden in de grafiek bij E&H en Van Rijn zijn aan de hoge kant. De reden hiervoor kan zijn dat in de formules de korrelgrootte van het materiaal dat bij de Helley-Smithrekeningen is opgevangen, is gebruikt. Dit materiaal is vrij fijn vergeleken met het bodemmateriaal. De D_{90} van het Helley-Smithmateriaal bedroeg 1,5 mm, tegenover de D_{90} van het bodemmateriaal dat in de orde van 10 mm ligt.

Gekozen wordt tussen M-P&M en E&H. M-P&M wordt vaak in verband gebracht met bodemtransport en E&H met een totaal transport waarbij het zwevend transport een belangrijk aandeel vormt in het totaal.

Een vuistregel voor de formulekeuze luidt [2]:

$$u/w_s > 1, \text{ dan E\&H.}$$

$$u/w_s < 1, \text{ dan M-P\&M}$$

De volgend beschrijving is ook te vinden [4]:

$u/w_s < 0,25$: bodemtransport overheerst.
$0,25 < u/w_s < 1$: bodemtransport en zwevend transport zijn beiden van belang
$u/w_s > 1$: zwevend transport overheerst.

Indien D_m (M-P&M) representatief wordt genomen, wordt een w_s van 0,1 m/s gevonden, en bij een representatieve waarde van D_{50} (E&H) een w_s van 0,08m/s. De u varieert in de orde 0,25 m/s tot 1,5 m/s. Dus u^* bedraagt 0,019 m/s -0,11ms. In de onderstaande tabel staan de waarden van u^*/w_s voor de representatieve waarden afgebeeld.

	$u^* = 0,019$ m/s	$u^* = 0,11$ m/s
$w_s = 0,08$ m/s	$u^*/w_s = 0,24$	$u^*/w_s = 1,4$
$w_s = 0,1$ m/s	$u^*/w_s = 0,19$	$u^*/w_s = 1,1$

tabel 5.9: verhouding schuifspanningssnelheid v.s. valsnelheid sediment in water

Hieruit volgt dat er geen eenduidig antwoord is op de keuze M-P&M of E&H.

Omdat in de grafiek de meetwaarden het dichtst bij MP&M ligt en het verloop van de meetwaarden ook meer op MP&M lijkt dan op E&H is gekozen voor MP&M.

Na het fitten werden de volgende functies gevonden:

Uitgaande van minimaal transport over de totale rivierbreedte: $\sigma_{\text{tot. breedte}} = 312 \times 13,3(0,255\theta - 0,047)^{1,5}$

Uitgaande van maximaal transport over de totale rivierbreedte: $\sigma_{\text{tot. breedte}} = 504 \times 13,3(0,255\theta - 0,047)^{1,5}$

Het deel achter eerste factor komt overeen met het dimensieloze transport van MP&M p.e.v. breedte. In de eerste factor zitten de rivierbreedte en een correctiefactor voor de formule. Bij een rivierbreedte van 135 m leidt dit tot een correctiefactor van 2,3-3,7.

5.8 Checken van de gevonden transportformule aan het sedimentatiefront

5.8.1 Inleiding

Vooruitlopend op hoofdstuk 7 wordt vermeld dat bij km 155 aan het begin van de geul een sedimentatiefront waarneembaar is. Uit de peilgegevens viel de omvang van dit front af te leiden. In bijlage 8a is het sedimentatiefront aan het begin van geul 1 zichtbaar.

Dit biedt de mogelijkheid analytisch te checken of de gevonden transportformule in overeenstemming kan zijn met het front. Alvorens deze check uit te voeren wordt eerst de theorie aangehaald waarmee analytisch de voortplantingssnelheid van een front kan worden berekend bij discontinuïteiten in de bodem, bij een één-dimensionele schematisatie van het probleem.

5.8.2 Theorie

De theorie is overgenomen uit het collegediktaat f10, River Engineering [23]. Uitgegaan wordt van de basisvergelijkingen voor de waterbeweging en de sedimentbeweging. Deze vergelijkingen luiden:

waterbeweging:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} = -g \frac{u|u|}{C^2 a} \quad (5.36)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} + u \frac{\partial a}{\partial x} + a \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (5.37)$$

sedimentbeweging:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} = 0 \quad (5.38)$$

$$s = f(u, \text{parameters}) \quad (5.39)$$

met:

- a : waterdiepte
- C : Chézy-waarde
- g : versnelling t.g.v. zwaartekracht
- s : sedimenttransport p.e.v. breedte
- t : tijd
- u : stroomsnelheid in x-richting
- x : coördinaat langs de as van de waterloop
- z : coördinaat van de hoogteligging van de bodem

Na linearisatie met de volgende termen $u = u_0 + u'$, $a = a_0 + a'$, $h = a_0 + \eta$ en $\eta = z + \zeta$, zijn deze vergelijkingen dit te herschrijven tot:

$$\alpha_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} + (1 - \alpha_0) \frac{\partial z}{\partial x} = A_0 (\eta - z) \quad (5.40)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + c_0 \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (5.41)$$

met: $\alpha_0 = 1 - Fr^2$, $A_0 = 3i_0/a_0$ en $c_0 = \left[\frac{df(u)/du}{a} \right]_0 u_0$.

In het diktaat staan de volgende drie gevallen beschreven:

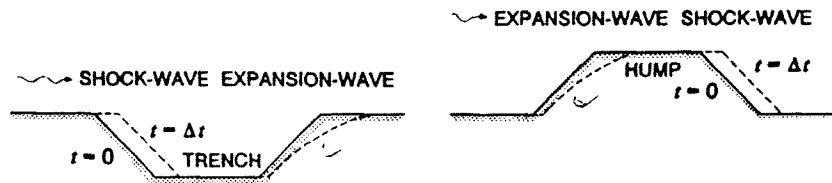
- 1) kleine waarden van x en t, waarbij de wrijvingsterm wordt verwaarloosd.
- 2) grote waarden voor x en t, waarbij de aanname $\partial u/\partial x = 0$ en $\partial a/\partial x = 0$ wordt gemaakt.
- 3) de herschrijving tot een tweede orde integraal.

In de tabel op de de volgende pagina staat overzichtelijk beschreven tot welke type vergelijkingen dit respectievelijk leidt.type	vergelijking	geldigheid
simple wave model	$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{c_0}{\alpha_0} \frac{\partial z}{\partial x} = 0$	kleine x en t
parabolic model	$\frac{\partial z}{\partial t} - K_0 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0$	grote x en t
hyperbolic model	$\frac{c_0}{\alpha_0 K_0} \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{c_0}{\alpha_0} \frac{\partial z}{\partial x} \right] = 0$	algemeen

tabel 5.10: één-dimensionale modellen (gelineariseerd)
met $K_0 = c_0 / A_0$

5.8.3 Koppeling met de gevonden formule

Het sedimentatiefront en het erosiefront van een baggergeul laten zich goed beschrijven door de simple wave equation [15] en gedraagt zich als een schokgolf.



figuur 5.7: voortplanting bodemverstorings

Af te leiden valt:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + c(a) \frac{\partial a}{\partial x} = 0 \tag{5.41}$$

met $c(a) = -\frac{ds}{da}$

Het verplaatsen van de fronten kan worden geschat en worden vergeleken met de lodingen. Er zijn langspiegels van het sedimentatiefront bij geul 1 van de dagen 6-2-'97, 19-3-'97, 22-4-'97 en 28-5-'97. Verder zijn de afvoeren tot 1-5-'97 beschikbaar. Het sedimentatiefront verplaatst zich gedurende de periode 19-3-'97 - 28-5-'97 nauwelijks en gedurende de periode 6-2-'97 - 19-3-'97 veel. De werkelijke voortgang van het front is vergeleken met de voortgang die uit de berekeningen volgt. Het erosiefront is niet bekeken, omdat dit door het flauwere talud van het geuleinde minder duidelijk is. De discontinuïteit aan het begin van geul 1 is het meest adrupt, waardoor de aanname van een kleine x en een kleine t hier het beste opgaat. Vanwege de beschikbare debieten (tot 1-5-'97) is gerekend voor de periode 6-2-'97 - 22-4-'97. De lengte van het sedimentatiefront is uit de lengteprofielen op -15 m, 0 m en +15 m uit de rivieras gehaald. Bij de profielen is per profiel de gemiddelde lengte geschat. Bij de vergelijking van de resultaten, wordt voor lengte van het front het kleinste en het grootste gemiddelde uit de drie doorsneden gepresenteerd.

Er is gerekend met de formule voor maximaal sedimenttransport en voor minimaal sedimenttransport. Verder is de volgende aanname geplaatst. Er ontbraken waterstanden voor een paar dagen. De afvoeren waren wel allemaal bekend. Het verwaarlozen van deze dagen bleek grote consequenties te hebben, aangezien het dagen met hoge afvoeren betrof. De ontbrekende waterstanden zijn aangevuld met de waterstanden van dagen rond het ontbrekende tijdstip, met een vergelijkbare afvoer. In bijlage 8b staan de rekenresultaten in een grafiek en tabel 5.11 zijn de meet- en rekenresultaten vergeleken.

periode	meetresultaten	berekeningen S_{min}	berekeningen S_{max}
6-2-'97 tot 22-4-'97	19 m	15 m	23 m
6-2-'97 tot 28-5-'97	19 m	15 m	23 m

tabel 5.11: voortplanting van het gemeten sedimentatiefront v.s. het berekende sedimentatiefront

Hieruit volgt de overeenstemming tussen de metingen en de berekeningen. In de periode 6-2-'97 tot 19-3-'97 gebeurt zowel in de metingen als in de berekeningen veel en in de periode 19-3-'97 tot 22-4-'97 gebeurt in de metingen en in de berekeningen weinig. In de berekeningen gebeurt al weinig vanaf 9-3-'97, maar hiervan ontbreken metingen. Uit de berekeningen bleek dat het front een paar decimeter per dag opschoof bij afvoeren van $450 \text{ m}^3/\text{s}$ à $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.8.4 Conclusie

Uit de resultaten komt naar voren dat de afstand waarover het gemeten front zich voortplant, zich tussen de waarden bevindt, die gevonden worden uit de berekeningen met de transportformules voor het minimale en het maximale zandtransport. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de afstand waarover het front zich verplaatst, moeilijk precies in te schatten is. Uit bijlage 8a valt dit te begrijpen. In het profiel op de rivieras verschilt de afgelegde afstand van 0 m tot 40 m en op 15 m uit de rivieras van 0 m tot 20 m. Wel kan worden gesteld dat de afgelegde afstand van het front redelijk overeenkomt met de berekende afstand.

Verder blijken de periode waarin veel gebeurt en de periode waarin weinig gebeurt in de waarnemingen redelijk in overeenstemming met de periode waarin veel gebeurt en de periode waarin weinig gebeurt in de berekeningen.

Dit lijkt te bevestigen dat de gevonden transportformule een redelijke benadering is van de werkelijke situatie.

5.9 Kritische kanttekening betreffende de resultaten van de AZTM-metingen

In het onderzoek is ervan uitgegaan dat de AZTM-metingen een correcter beeld van het zwevend transport weergegeven dan op grond van hydraulische beschouwingen wordt verwacht. Mogelijk is er toch iets met de meetgegevens aan de hand. Nachecken van de bron van de meetgegevens was niet goed mogelijk.

Twee punten moeten echter niet uit het oog verloren worden:

1) Uit figuur 5.5 viel goed op te maken dat het fluxprofiel uit een AZTM-meting sterk verschilt met het fluxprofiel zoals dat op grond van de theorie verwacht werd. Tegen deze achtergrond is het nodig een zekere voorzichtigheid in acht te nemen ten aanzien van de AZTM-metingen.

2) De verhouding (bodemtransport)/(zwevend transport) ligt vrij laag gezien de verhouding u^*/w_s . Het bodemtransport ligt in de orde van 10% van het zwevend transport. De hoeveelheid zwevend transport is aan de hoge kant.

Een verklaring voor beide punten zou kunnen zijn dat er ook slib is meegenomen bij de metingen. Dit vertoont een egaler concentratieverloop dan zand, hetgeen het waargenomen concentratieprofiel zou kunnen verklaren.

Bovendien zou het ook een verklaring kunnen geven voor de grote omvang van het zwevend transport. Nader onderzoek naar de betrouwbaarheid van de gegevens uit de AZTM-metingen wordt aanbevolen.

5.10 Commentaar ten aanzien van de korrelkeuze

In de transportformules is het opgevangen materiaal uit de Helley-Smith-metingen gebruikt, op grond van de veronderstelling dat dit een goed representatief beeld van het getransporteerde materiaal geeft. Bij de transportformules stelt men vaak dat het bodemmateriaal het representatieve materiaal is. Hier ontstaat dus het probleem dat er niet gegradeerd gerekend wordt. Bij aanname van één korrelklasse ontstaat te veel het beeld van wel of geen beweging van de korrels bij bepaalde stroomsnelheden.

6 Nauwkeurighedsanalyse bodempeilingen

6.1 Inleiding

Voor de morfologische ijking van het model zijn gegevens nodig van de optredende bodemveranderingen. Om deze veranderingen te bepalen zijn in het gebied maandelijks bodempeilingen uitgevoerd. Langs 5 langsraaien in de rivier; op de rivieras, op 15 m en op 30 m aan weerszijden van de rivieras, en op 800 dwarsraaien met een onderlinge afstand van 25 m van elkaar. De lodingen van de dwarsraaien liepen door tot NAP+5m.

Van de bodempeilingen van de gepeilde langsraaien en de gepeilde dwarsraaien zijn profielkaarten gemaakt.

Verder zijn met het programma DIGIPOL [31] de bodempeilingen geïnterpoleerd naar DTM-bestanden (DTM = Digitaal Terrein Model) met een grid van 2 m x 2 m. Deze DTM-bestanden zijn voor de volgende zaken gebruikt:

- met het programma BAGGIS [30] zijn met deze bestanden verschilkaarten gemaakt. Hierop zijn de bodemhoogteveranderingen uit een bepaalde periode waarneembaar.
- met Arc/info zijn met deze bestanden de hoeveelheden erosie/sedimentatie per kilometervlak berekend, wat in het vervolg van het rapport met kuberingen wordt aangeduid.

In hoofdstuk 7 zullen de bovengenoemde peilgegevens geïnterpreteerd worden. Alvorens dit te doen, wordt in hoofdstuk 6 aandacht gewijd aan de nauwkeurigheid van deze gegevens. Deze nauwkeurighedsanalyse bleek noodzakelijk na een eerste interpretatie van de meetgegevens. Voor een betere leesbaarheid van het rapport worden eerst de eventuele oorzaken van de onnauwkeurigheden in de gegevens vermeld, zodat in het verhaal de conclusies meteen op de beschrijvingen van waarnemingen kunnen volgen.

6.2 Fouten ten gevolge van de metingen

6.2.1 Uitvoering van de metingen

De lodingen zijn met single-beam echosounders uitgevoerd, welke zijn geijkt middels bar-checking. Hierbij wordt een balk op een bekende diepte onder de boot gehangen en aan de hand hiervan wordt geijkt. Op de rivier is dit een lastige procedure, vandaar dat dit stilliggend in een grindgat is gedaan. Na de bar-check is op dezelfde plaats over dezelfde vertikaal de voortplantingssnelheid met een CTS-probe (Conductivity Temperature Salinity) bepaald. Vervolgens is ook de diepte handmatig gemeten. Het eventuele verschil tussen de twee verschillen is in de instelling van het echolood ingebracht. De scheepsbewegingen stamp, heave en slinger zijn in de lodingen niet gecompenseerd. Wel is na scheepspassage gewacht tot de golfbeweging gestopt is. De duur van een meetcampagne bedroeg ongeveer 15 werkdagen.

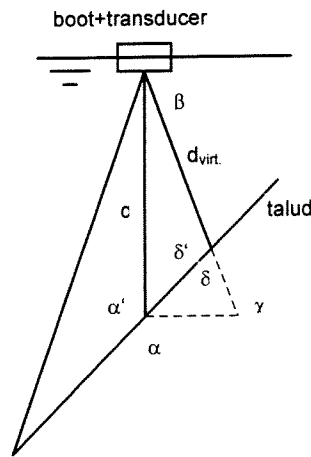
6.2.2 Factoren die de nauwkeurigheid van de echoloding beïnvloeden

De nauwkeurigheid van de lodingen wordt in hoge mate bepaald door de volgende factoren [8]:

a) bundelbreedte van de transducer

De grootte van het "belichte" bodemoppervlak houdt in sterke mate verband met de nauwkeurigheid waarmee de diepte van de bodem wordt weergegeven. De eerst ontvangen echopuls wordt gebruikt voor de diepteaflezing, de later terugkerende echo's bepalen alleen de lengte van de echoregistratie. M.a.w. de kortste afstand die de puls aflegt, wordt als de diepte geregistreerd.

Is de bodem vlak, dan zal de waterdiepte vrij nauwkeurig worden weergegeven. Indien de bodem echter een helling vertoont, dan treden er fouten op in de diepteaflezing, omdat de loodrecht naar beneden gezonden zendpuls nu niet meer de kortste looptijd heeft, maar verdwijnt in het spoor van de echo's die eerder binnenkomen. Hierdoor treedt een fout in de registratie op. De bundelbreedte van de echo sounder is dus van belang. Op de volgende pagina staat hoe de verhouding van de afwijking van de virtuele afwijking d_{virt} t.o.v. de werkelijke afstand loodrecht naar beneden kan worden berekend. Uit figuur 6.1 valt makkelijk te begrijpen dat het profiel bij een grotere bundelhoek verschuift.



figuur 6.1: schematisatie van een loding op een talud

Uit sinusregel volgt:

$$\frac{d}{d_{\text{virt.}}} = \frac{\sin \delta'}{\sin \alpha'} \quad (6.1)$$

α' en δ' zijn eenvoudig af te leiden als α en β bekend zijn.

b) scheepssnelheid tijdens het loden

Bij een hogere vaarsnelheid van het schip zal het aantal lodingen per eenheid van de afgelegde weg van het schip afnemen en dientengevolge zal de weergave van het bodemprofiel slechter worden.

c) invloed van de rivier op de registratie

Door de verticale beweging van het schip zal de gemeten waterdiepte boven een bodemprofiel veranderen.

d) voortplantingssnelheid van het geluid in het water

Voor een nauwkeurige dieptemeting is het noodzakelijk de akoestische snelheid als functie van de diepte te kennen.

Een empirische formule hiervoor is:

$$c = 1449 + 4,6t - 0,055t^2 + 0,0003t^3 + (1,39 - 0,012t)(S - 35) + 0,017d \quad (6.2)$$

met:

c = voortplantingssnelheid van de akoestische golf in m/s

t = temperatuur van het water in graden Celsius

S = zoutgehalet in gewichtsdelen per 1000

d = diepte beneden het wateroppervlak in m

Indien een te hoge of een te lage akoestische snelheid wordt berekend, zal dit leiden tot respectievelijk een te hoge of een te lage schatting van de diepte.

e) afstand tussen de zend- en ontvangstransducers

Afhankelijk van het fabrikaat van de transducer kan met een enkele transducer voor zowel zender als ontvanger worden gewerkt als met een aparte zendtransducer en een aparte ontvangstranducer.

f) horizontale positiebepaling

De positie van de boot wordt bepaald d.m.v. DGPS.

g) doordringend vermogen van de bundels

Het doordringend vermogen van golven met een lagere frequentie, en dus een langere golflengte, is groter dan die van golven met een hogere frequentie. Vooral i.g.v. slib speelt dit een belangrijke rol. Dit probleem speelt vooral bij havenbekkens en plaatsen met lage stroomsnelheden zoals meren.

h) invloed bootbeweging

6.2.3 Onnauwkeurigheid van een loding

Hierbij wordt onderscheid gemaakt in de onnauwkeurigheid van de *meetapparatuur* en van de *bootbeweging*.

meetapparatuur:

Bij de fouten die optreden a.g.v. het meetapparaat zelf bleken twee verschillende situaties van belang:

1) onnauwkeurigheid i.g.v. een vlakke bodem

Uit navraag bleek dat de peilnauwkeurigheid van een individuele meting voor het 95%-betrouwbaarheidsinterval de volgende grootten bedroeg: $\Delta z_{\text{meetinstrument}} = 8\text{cm}$, $\Delta x = 2\text{cm}$ en $\Delta y = 2\text{cm}$. De horizontale positie is niet zo belangrijk in dit geval.

De bovenstaande waarde Δz heeft betrekking op de peilnauwkeurigheid van het apparaat na ijken, aldus Bureau Maaswerken. Dit heeft een stochastisch karakter per ijking, maar gedurende een meting is het karakter systematisch.

Navraag bij enkele echosoundspecialisten leerde dat de peilnauwkeurigheid in dergelijke omstandigheden meestal in de orde van 1% ligt, hetgeen met deze Δz overeenkomt, aangezien de rivierdiepte ongeveer 7 m bedroeg.

2) onnauwkeurigheid i.g.v. een talud:

De onnauwkeurigheid die meespeelt bij een vlakke bodem, speelt hier ook mee.

Daarnaast wordt de bundelhoek hier ook belangrijk.

Bij navraag is naar voren gekomen dat er met twee typen transducers gemeten is, namelijk:

1) de Atlas Deso met een frequentie van 200 Khz en een bundelhoek van 7,8 graden. Hierbij zijn twee boten gebruikt, de Speurder (met separate zend- en ontvangtransducer) en de Jacoba 6. Uit verdere navraag bleek dat de technische referenties betreffende de bundelhoek van de Atlas Deso positief zijn. Deze ligt duidelijk boven de 10 graden, zelfs in de buurt van 15 graden is mogelijk.

2) de Simrad AE 500 met een frequentie van 700 Khz en een bundelhoek van 2,5 á 3 graden, aan boord van de Kaloo.

Hieronder volgt een schatting van deze fout, via de eerder naar voren gebrachte verhouding

$$\frac{d}{d_{\text{virt.}}} = \frac{\sin \delta'}{\sin \alpha'}$$

$$1) \beta_{\text{Atlas}} = 15^\circ / 2 = 7,5^\circ$$

$$2) \beta_{\text{Simrad}} = 3^\circ / 2 = 1,5^\circ$$

In beide gevallen:

$$O(d) = 7\text{m}$$

$$\alpha \approx 16 \text{ graden}$$

Daaruit valt af te leiden:

$$1) \alpha' = 74^\circ$$

$$\delta' = 98,5^\circ$$

$$\Rightarrow \frac{d}{d_{\text{virt.}}} = \frac{\sin 98,5}{\sin 74} = 1,03$$

$$2) \alpha' = 74$$

$$\delta' = 104,5$$

$$\Rightarrow \frac{d}{d_{\text{virt.}}} = \frac{\sin 104,5}{\sin 74} = 1,01$$

Er treedt dus een verschuiving van $(1,03-1,01) \times 700 = 14 \text{ cm}$ op van de waargenomen diepte, a.g.v. het gebruik van twee verschillende transducers. Bij steilere taludhoeken wordt deze waarde nog groter.

bootbeweging:

De bootbeweging was niet gecompenseerd bij de lodingen. Hier kunnen ook de nodige fouten binnensluipen.

De bar-check is bij stilstand gebeurd in rustig water. Indien de boot vaart, zal deze zakken. De verticale verplaatsing kan geschat worden met de methode van Schijf (1949) [3]. Deze methode is gebaseerd op behoud van energie en de continuïteitsvergelijking voor het water op twee bepaalde kanaaldoorsneden. Eigenlijk is deze methode vooral voor kanalen bedoeld hetgeen een beperkte verhouding grootspantdoorsnede/kanaaldoorsnede impliceert. De stroom heeft meer een een-dimensionaal karakter dan i.g.v. een veel bredere waterloop.

De methode valt wel gedeeltelijk aan te passen, maar hier gaat het meer om een ordeschatting van het verschijnsel. Bovendien zal deze aanname conservatief, aangezien het water makkelijker zal toestromen in een bredere vaarweg en derhalve de daling van het schip kleiner zal zijn.

De methode werkt als volgt: op twee kanaaldoorsneden wordt de continuïteitsvergelijking van de waterbeweging en de energiebalans in de vorm van de wet van Bernoulli toegepast.

De ene doorsnede ligt ver voor het schip en beschrijft de onverstoorde situatie. De andere doorsnede ligt ter plaatse van het grootspant van het schip.

De volgende vergelijkingen worden gevonden:

$$Q_1 = Q_2 = V \cdot A_c = (V + u_r) \cdot (A_c - A_s - B_s z) \quad (6.3)$$

$$H = h + \frac{V^2}{2g} = h - z + \frac{(V + u_r)^2}{2g} \quad (6.4)$$

met:

A_c = oppervlakte natte kanaaldoorsnede [m^2]

A_s = ondergedompeld grootspantoppervlak [m^2]

B_s = breedte van de waterspiegel [m]

g = versnelling van de zwaartekracht [m/s^2]

H = energiehoogte [m]

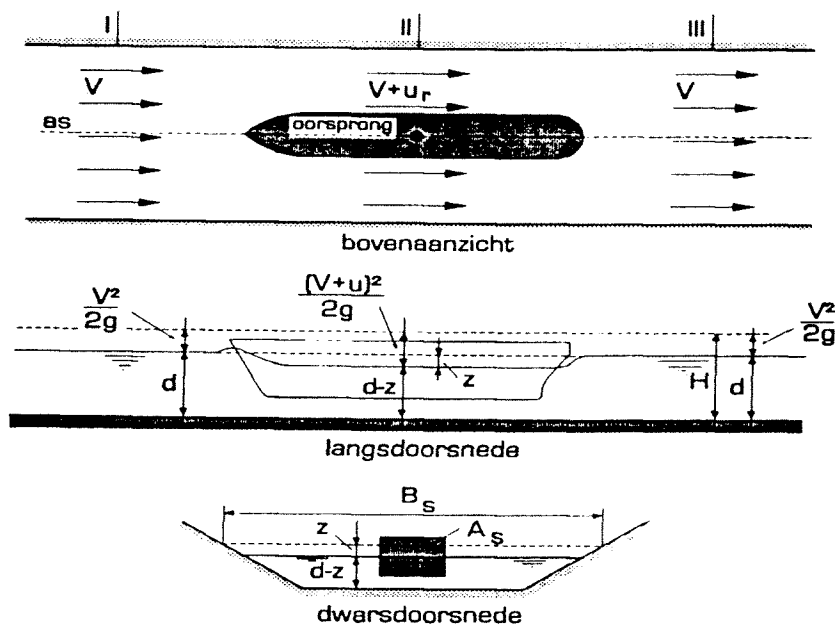
h = hoogte van de waterstand [m]

Q = debiet [m^3/s]

u_r = retourstroomsnelheid [m/s]

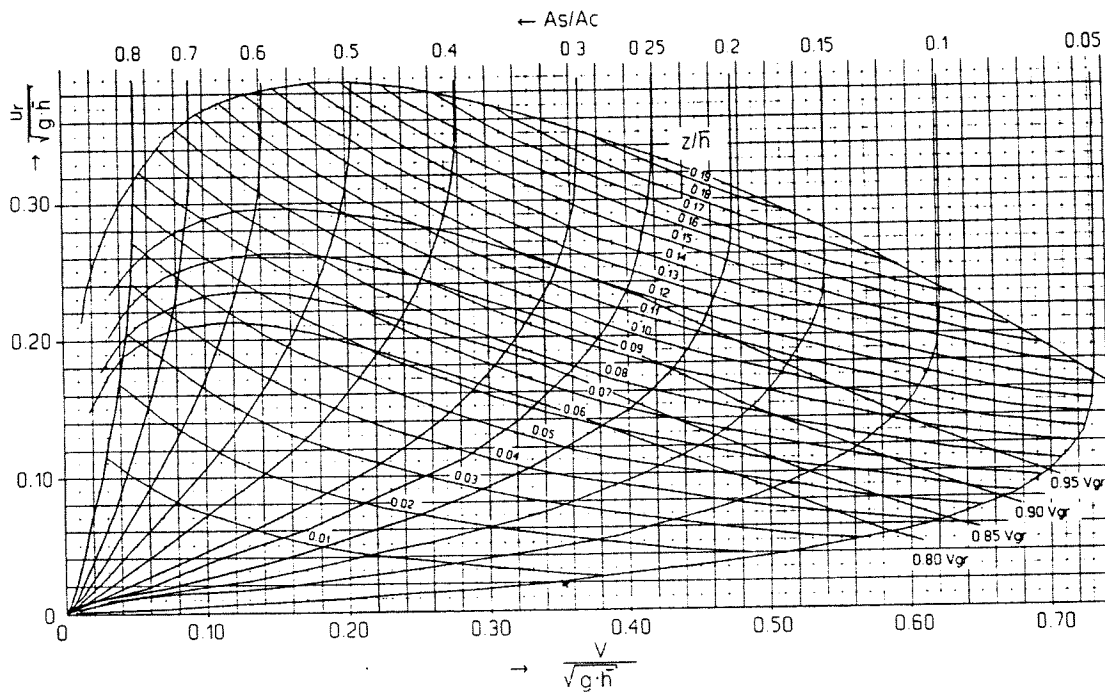
V = stroomsnelheid van het water (= vaarsnelheid) [m/s]

z = waterspiegeldaling ter plaatse van het grootspant [m]



figuur 6.2: waterbeweging rond een varend schip in een kanaal

Aan de hand van de vergelijkingen kan de volgende diagram worden opgezet.



figuur 6.3: diagram bij de methode van Schijf (1949)

Hieronder volgt een ordeschatting van de zakking van de waterstand indien de boot vaart.
 ondergedompeld grootspantoppervlak $A_s \approx 10 \text{ m}^2$
 oppervlakte doorstroomprofiel rivier $A_c \approx 600 \text{ m}^2$
 waterspiegelbreedte $B_s \approx 120 \text{ m}$
 grenssnelheid t.o.v. het water $V_{gr} \approx 5 \text{ m/s}$
 scheepsnelheid t.o.v. het water $V \approx 4 \text{ m/s}$

Met deze waarden komt de zakking van de waterspiegel rond de 10 á 15 cm.
 Verder zal het schip nog rollen en stampen. Deze slingerende bewegingen van het schip werken over een korte afstand en worden als stochastische afwijkingen beschouwd.
 Van deze bewegingen kan alleen de zakking van de waterspiegel een systematisch karakter hebben. Afhankelijk van de manier waarop het referentieniveau bepaald wordt en de plaats waar de transducer op het schip bevestigd is, kan de waargenomen diepte t.g.v. de zakking variëren.
 Onderzoek hiernaar zou veel energie vergen. Aangenomen wordt dat deze waarde kleiner is dan de zakking van de waterspiegel. In dit rapport wordt ervan uitgegaan dat er geldt $\Delta Z_{bootbeweging} \leq 5 \text{ cm}$.

6.3 Fouten ten gevolge van de dataverwerking

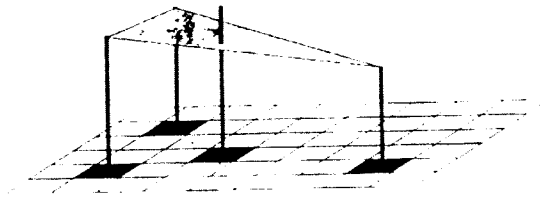
Door de bewerkingen die met de lodingsdata worden uitgevoerd, sluipen ook fouten in de gegevens. Via een interpolatiealgoritme zijn de lodingen met het programma DIGIPOL geïnterpoleerd en naar een DTM-bestand (Digitaal Terrein Model).

De langsprofielen waarover de lodingen zijn uitgevoerd liggen op 15 meter van elkaar, en de opeenvolgende dwarsprofielen op 25 meter van elkaar. Dit wordt omgezet naar bestanden met een gridgrootte van 2 m x 2 m.

Met DIGIPOL kan men dieptegegevens met een beperkte bodembedekking omzetten naar diepte-informatie op een puntenraster met een volledige bedekking, een zogenaamd grid. De dieptegegevens kunnen als volgt worden ingevoerd:

- 1) als raaien, lijnvormige series meetpunten op coördinaten die onafhankelijk zijn van het nog te maken raster.
- 2) als willekeurige (random) verdeelde punten.

In essentie komt de interpolatiemethode erop neer dat om ieder te berekenen dieptepunt een driehoek wordt opgespannen met als hoekpunten drie zorgvuldig gekozen nabuurlijnen. De dicht bijgelegen punten tellen zwaarder mee dan de verder gelegen punten. De hoogte waarop de verticale lijn door het te berekenen punt het opgespannen vlak doorsnijdt, is de toegekende diepte aan dat punt.



figuur 6.4: interpolatiemethode door digipol

In het kader van dit rapport wordt niet verder ingegaan op de mogelijke fouten die hier optreden. Aangenomen wordt dat deze fouten normaal verdeeld zijn en niet tot een systematische fout leiden.

6.4 Schatting van de onnauwkeurigheden

6.4.1 Onnauwkeurigheid bij één profiel

Zoals eerder vermeld is, is de optredende fout o.a. afhankelijk van de helling van de bodem. Daar in het gebied drie soorten omstandigheden voorkomen; een vlakke bodem, een flauw talud (aan het begin en aan het einde van een geul) en een steil talud (aan de zijkanten van een geul), is het nuttig te bekijken hoe groot de fouten per geval kunnen zijn. Aangezien de fouten in de bootbeweging, het meetinstrument en de bodemhelling onafhankelijk van elkaar zijn, wordt gerekend met de kwadatische fout-voortplanting.

Het onderscheid tussen flauw talud en steil talud zal als volgt benaderd worden:

- flauw talud: daling van ± 3 m per 100 m, dus $\alpha \approx 2^\circ$
- steil talud: daling van ± 1 m per 3,5 m, dus $\alpha \approx 16^\circ$

Hieronder volgen de gevallen.

a) vlakke bodem

$$\begin{aligned} \Delta Z_{\text{meetinstrument}} &\approx 8 \text{ cm} \\ \Delta Z_{\text{bootbeweging}} &\approx 5 \text{ cm} \\ \Delta Z_{\text{totaal}} &\leq \sqrt{8^2 + 5^2} \approx 10 \text{ cm} \end{aligned}$$

b) talud

$$\alpha \approx 2^\circ \Rightarrow \alpha' \approx 88^\circ \Rightarrow \delta' \approx 84,5^\circ \Rightarrow \Delta Z_{\text{helling}} \approx \left(\frac{d}{d_{\text{virt}}} - 1 \right) d = \left(\frac{\sin \delta'}{\sin \alpha'} - 1 \right) d \approx 0 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_{\text{meetinstrument}} &\approx 8 \text{ cm} \\ \Delta Z_{\text{bootbeweging}} &\approx 5 \text{ cm} \\ \Delta Z_{\text{helling}} &\approx 0 \text{ cm} \\ \Delta Z_{\text{totaal}} &\leq 0 + \sqrt{8^2 + 5^2} \approx 10 \text{ cm} \end{aligned}$$

Hieruit volgt dat de vervorming bij de fronten nauwelijks afwijkt, vergeleken met een vlakke bodem.

c) steil talud

$$\begin{aligned} \alpha \approx 15^\circ \Rightarrow \alpha' \approx 75^\circ \Rightarrow \delta' \approx 97,5^\circ \Rightarrow \Delta Z_{\text{helling}} &\approx 0,03 \times 7 \text{ cm} = 21 \text{ cm} \\ \Delta Z_{\text{meetinstrument}} &\approx 8 \text{ cm} \\ \Delta Z_{\text{bootbeweging}} &\approx 5 \text{ cm} \\ \Delta Z_{\text{helling}} &\approx -21 \text{ cm} \\ \Delta Z_{\text{totaal}} &\leq \sqrt{8^2 + 5^2 + 21^2} \approx 23 \text{ cm} \end{aligned}$$

6.4.2 Onnauwkeurigheid bij een verschilkaart

Bij de verschilkaarten worden twee metingen vergeleken. Van belang is nu het verschil in de verticale beweging van de gebruikte boten, het verschil in bundelhoek van de gebruikte transducers en het verschil in instrumentfout. Bekeken wordt tot hoe hoog deze fout ongeveer kan oplopen.

a) vlakke bodem

$$\begin{aligned}\Delta Z_{\text{meetinstrumenten}} &= \frac{8}{\sqrt{2}} = 6\text{cm} \\ \Delta Z_{\text{2 boten}} &= \frac{5}{\sqrt{2}} = 4\text{cm} \\ \Delta Z_{\text{transducerverschil}} &= 0\text{cm} \\ \Delta Z_{\text{totaal}} &= \sqrt{6^2 + 4^2} = 8\text{cm}\end{aligned}$$

b) flauw talud

zie a) vlakke bodem

c) steil talud

$$\begin{aligned}\Delta Z_{\text{2 meetinstrumenten}} &= \frac{8}{\sqrt{2}} = 6\text{cm} \\ \Delta Z_{\text{2 boten}} &= \frac{5}{\sqrt{2}} = 4\text{cm} \\ \Delta Z_{\text{2 transducers}} &= \frac{21}{\sqrt{2}} = 15\text{cm} \\ \Delta Z_{\text{totaal}} &= \sqrt{6^2 + 4^2 + 15^2} = 17\text{cm}\end{aligned}$$

6.5 Conclusies

De resultaten uit het nauwkeurigheidsonderzoek zijn een goede indicatie voor de mate van voorzichtigheid waarmee de bepaalde gegevens bestudeerd moeten worden. Op grond van het bovenstaande onderzoek wordt besloten voor wat betreft de bestudering van de verschilkaarten dat een verandering voor een bepaald geval als relevant wordt beschouwd indien deze groter is dan de in de onderstaande tabel vermelde grenswaarde.

bodemtoestand	grenswaarde
vlakke bodem / flauw talud	1 dm
steil talud	2 dm

Binnen perioden van lage afvoeren traden op de steile taluds zeer grote processen op, in opeenvolgende maanden.

7 Waarnemingen in de peilgegevens

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de waarnemingen uit de peilingen gepresenteerd en is gepoogd de lezer een zo goed mogelijk beeld van de optredende processen bij te brengen. In de bijlagen staan voor de volledigheid veel beschrijvingen van waarnemingen. Voor de lezer is het makkelijker zich te beperken tot het hoofdstuk en de bijlagen terzijde te schuiven, tenzij anders vermeld.

Van de maandelijkse peilingen uit de periode december '96 t/m juli '97 waren profielkaarten en DTM-bestanden beschikbaar. Er zijn profielkaarten van dwarsprofielen om de 25 m, vanaf km 155.200 t/m km 174.175 en van lengteprofielen op de rivieras en aan weerszijden hiervan op 15 m en 30 m, van km 155.800 t/m km 175.000.

van \ tot	januari	februari	maart	april	mei	juni/juli
december	x		x			x
januari		x				
februari			x			
maart				x		
april					x	
mei						x

tabel 7.1: geproduceerde verschilkaarten en kuberingen

	verschilkaarten van gemaakt
x	kuberingen van gemaakt

Van de aanwezige DTM-bestanden bijlage 9 zijn met Arc/info [29] en Baggis [30] verschilkaarten gemaakt. Hierin staan de bodemveranderingen die gedurende een periode in een kilometervak optreden.

Verder zijn de DTM-bestanden kuberingen uitgevoerd met Arc/info. Met deze kuberingen worden de volumieke veranderingen in een kilometervak berekend.

Daarnaast worden schattingen gedaan van de grootte van bepaalde processen via ruwe handmatige kuberingen vanuit de dwarsprofielen.

Tenslotte worden de waarnemingen samengevat om een goed totaalbeeld te krijgen van de waargenomen morfologische veranderingen in het gebied.

7.2 Lengteprofielen

De waarnemingen uit de lengteprofielen staan vermeld in bijlage 10 en 11.

7.3 Verschilkaarten

In bijlage 12a en 12b staan de waarnemingen uit de verschilkaarten beknopt genoteerd. Verder staan in bijlage 13 a t/m e de verschilkaarten, welke de aandacht van de lezer verdienen.

Er is gekozen voor kaarten die een zekere representativiteit bezitten en voor kaarten waarop een karakteristiek verschijnsel waarneembaar is. Voor zover mogelijk zijn de verschilkaarten getoond van de periode december-maart en van maart-juni/juli, aangezien dit de lezer een beeld geeft van het belang van de respectievelijke perioden.

bijlage 13a:

kenmerk: sedimentatiefront aan het begin van de geul
 februari-maart: zeer sterke sedimentatie aan het begin van de geul
 maart-juli: nauwelijks veranderingen in bodemligging

bijlage 13b:

kenmerk: sterke erosie bij km 156
februari-maart: zeer sterk erosiepatroon waarneembaar
maart-juli: nauwelijks veranderingen in bodemligging

bijlage 13c:

kenmerk: sedimentatie bij de Niers
december-maart: de sterke erosie komt overeen met de plaats waar de Niers de Maas instroomt
maart-juli: nauwelijks veranderingen in bodemligging

bijlage 13d:

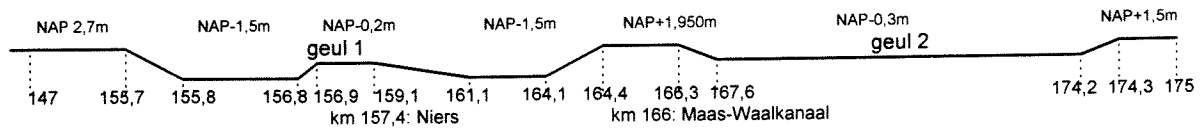
kenmerk: representatief patroon voor geul 1
december-maart: sterk wisselend patroon van matige tot grote veranderingen in bodemligging
maart-juli: kleine veranderingen in bodemligging

bijlage 13e:

kenmerk: representatief patroon voor geul 2 (instorten geulranden)
december-maart: doorgaans kleine veranderingen in bodemligging, behalve op de geulranden. Sterke erosie aan de top van het talud van de geul en sterke sedimentatie aan de voet van het talud van de geul
maart-juli: nauwelijks veranderingen in bodemligging

7.4 Dwarsprofiel

Hier volgt een schematisatie van de veranderingen gedurende de periode december '96-juni/juli '97, met erboven een overzichtskaartje van het gebied. De veranderingen in de periode maart-juni/juli waren klein vergeleken met die in de periode december-maart.



km	schematisatie veranderingen	opmerkingen
baggergeul 1		
155,200-156,175		zeer veel sedimentatie, periode: feb-jun/jul mei-jun/jul nauwelijks veranderingen
156,200-157,175		zeer veel erosie, periode: feb-jun/jul
157,200-158,175		km 157,400-km 157,525 zeer veel sedimentatie, t.p.v. de Niers
158,200-159,175		1), variërend erosie en sedimentatie. Bodem wordt egalier en bochtprofielen ontwikkelen zich.
159,200-160,175		zie 1), lokaal zeer veel sedimentatie
160,200-161,175		zie 1)
161,200-162,175		zie 1), lokaal veel sedimentatie, mogelijk door instorten
162,200-163,175		zie 1), zie ook bovenstaande opmerking
163,200-164,175		zie 1), zie ook bovenstaande opmerking
onverdiepte stuk		
164,200-165,175		2) het onverdiepte tussenstuk, weinig waarneembaar
165,200-166,175		zie 2)
baggergeul 2		
166,200-167,175		3) de tweede geul is nog niet overal duidelijk waarneembaar, lokaal wel.
167,200-168,175		zie 3)
168,200-169,175		4) het geultalud verflauwt zoals in de figuur, verder erosie in de geul en sedimentatie in het onverdiepte deel
169,200-170,175		zie 4)
170,200-171,175		zie 4)
171,200-172,175		zie 4)
172,200-173,175		zie 4)
173,200-174,175		zie 4)

tabel 7.2: schematisaties veranderingen in de dwarsprofielen

periode: december-juni/juli
de stippellijnen geven de verandering weer zoals die zich in de periode heeft voorgedaan

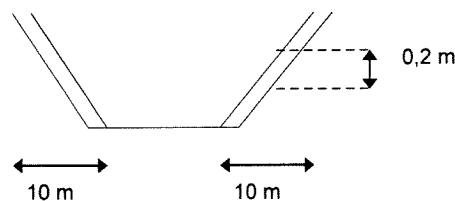
7.5 Kuberingen

7.5.1 Arc/info-kuberingen

De bij de Arc/info kuberingen gebruikte AML-files (een AML komt overeen met een programma) staan in bijlage 14a en 14b. Bij de kuberingen is de sommatie van de totale erosie en de sommatie van de totale sedimentatie per kilometervak berekend. Er is weinig inzicht in wat er op specifieke lokaties gebeurt, omdat de berekende grootheden niet aan één proces gerelateerd zijn, maar aan een traject waarop een aantal processen plaatsvinden.

Uit het onnauwkeurigheidsonderzoek bleek voor de schuine randen en de vlakke bodem een onnauwkeurigheid van resp. 2 dm en 1 dm. Indien deze waarden een zekere juistheid bezitten, zijn de volgende opmerkingen te plaatsen:

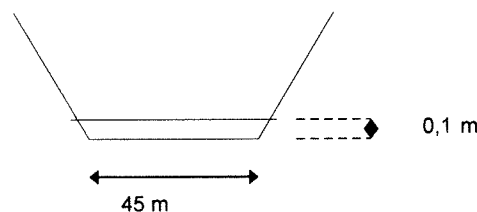
1) Als de schatting van de onnauwkeurigheid bij het vergelijken van de gegevens van 2 lodingen juist is, en er zich werkelijk een systematische fout voordoet, kan de grootte van de meetfout voor de geulranden per strekkende meter langs de rivieras $2 \times 10 \text{ (m)} \times 0,2 \text{ (m)} \times 1 \text{ (m')} = 4 \text{ m}^3/\text{m'}$ bedragen.



figuur 7.1: meetonnauwkeurigheid op een talud

Over 1 km (ongeveer de lengte van het traject van een DTM-bestand) houdt dat in dat afwijkingen van 4.000 m^3 niet onmogelijk lijken.

2) De meetfout bij vlakke bodems zou, volgens de aanname van een mogelijke systematische fout $45 \text{ (m)} \times 0,1 \text{ (m)} \times 1 \text{ (m')} = 4,5 \text{ m}^3/\text{m'}$ kunnen bedragen, wat voor 1 km zou kunnen leiden tot afwijkingen van bijv. 4.500 m^3 .



figuur 7.2: meetonnauwkeurigheid op een vlakke bodem

Uitgaande van het bovenstaande zou de meetfout in de orde van 10.000 m^3 per kilometer kunnen liggen, wat in de buurt komt van de orde van de gemeten processen in de grafieken in bijlage 15.

Nader onderzoek hiernaar zou belangrijke resultaten kunnen opleveren. De vergelijking van de verschilkaarten van een bepaald traject voor de verschillende periodes in combinatie met de gebruikte transducers uit de betreffende periodes zou mogelijk een licht op de zaak kunnen werpen. Als in een maand 1 alleen transducertype X gebruikt is en in maand 2 alleen transducertype Y is het interessant de verschilkaarten te vergelijken, met daarbij de nadruk op de taluds

Indien het bovenstaande juist mocht blijken, zou het nuttig kunnen zijn te kuberen per specifiek proces. De sedimentatie bij het sedimentatiefront in geul 1 in de periode februari-maart per meter langs de rivieras ligt in de orde van $40 \text{ (m)} \times 1,5 \text{ (m)} \times 1 \text{ (m')} = 60 \text{ m}^3/\text{m'}$. Hiertegen zou een meetfout van bijv. $10 \text{ m}^3/\text{m'}$ enigszins wegvallen.

7.5.2 Globale kuberingen

Omdat de Arc/info-kuberingen niet vertrouwd werden en om toch enig inzicht te krijgen in de orde van grootte van de optredende processen, zijn er vanuit de dwarsprofielen schattingen van de volumieke bodemveranderingen gemaakt. Bij de sterke lokale processen met grote bodemveranderingen is de grootte van de veranderingen geschat. Een schatting van de veranderingen op de geulwanden is achterwege gelaten, aangezien hier geen duidelijke processen optraden. Deze data zijn waarschijnlijk in hoge mate vervuild door peillonauwkeurigheden en het meten van deze veranderingen vanuit de kaarten is zeer lastig.

Bij het afschatten is de volgende werkwijze gevolgd:

Er is naar profielen gezocht met "significante" bodemveranderingen, waarbij met "significante" bedoeld wordt dat aandacht is besteed aan een proces indien over minstens 20 m breedte van het profiel bodemveranderingen groter dan 2 dm optreden.

Verder wordt gesteld dat de processen minimaal over 100 m moeten optreden. Indien achteraf mocht blijken dat bepaalde grote bodemvariaties optreden die niet binnen dit criterium vallen, bijvoorbeeld een lokale erosie van meer dan 2m diep over 50 m lengte, dan zou indien noodzakelijk van dit criterium kunnen worden afgeweken.

In geul 1 blijven na deze selectie een aantal lokale processen over. In geul 2 vindt over een groot deel van de geul sterke erosie aan de top van het baggertalud plaats en sterke sedimentatie aan de voet van het talud. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de geulranden instorten en het materiaal bijna recht naar beneden valt of een stuk verder stroomafwaarts wordt afgezet. Gezien de zwakke processen op de geulbodem en aan het begin en het einde van de geul wordt verondersteld dat het geërodeerde materiaal niet ver wordt afgezet. Het instorten van de randen is wel een redelijk sterk proces, maar kan niet in SOBEK gemodelleerd worden. Op het zicht lijkt het erop dat het stroomoppervlak nauwelijks wijzigt, de mate van erosie komt ongeveer overeen met de mate van sedimentatie. Binnen het model zal dit geen grote gevolgen hebben, tenzij het proces zich nog sterk doorzet en het profiel drastisch wijzigt. Aangenomen wordt dat er na verloop van tijd een redelijk stabiele situatie ontstaat die niet belangrijk verschilt van de huidige situatie. Het schatten van het instorten van het talud is arbeidsintensief en levert geen bruikbare informatie voor het model. Vandaar dat er hiervan is afgezien, derhalve blijven alleen een aantal processen in geul 1 over.

Een proces vindt over een meerdere profielen plaats. Het gestelde criterium dat een proces minimaal over 100 m moet plaatsvinden, impliceert automatisch dat er minimaal 3 à 4 profielen per proces zijn, gezien de afstand van 25 m tussen de op elkaar volgende dwarslodingen.

Per dwarsprofiel is om de 5 m de grootte van de "significante" bodemveranderingen gemeten. Hieruit is een gemiddelde verandering bepaald over de breedte waarover deze verandering plaatsvindt.

De afstand tussen de profielen bedraagt 25 m, derhalve wordt een profiel verondersteld representatief te zijn over een afstand van 25 m in de lengte van de rivier.

De breedte waarover het proces plaatsvindt bedraagt ongeveer de breedte waarover de "significante" veranderingen plaatsvinden.

Aan de hand hiervan kan het volume worden geschat. De grootte van een proces bedraagt de som van de uitkomsten van de profielen waarover het proces zich uitstrekt.

De bovenstaande werkwijze leidt tot de volgende schattingen:

lokatie v/d dwarsprofielen	proces	schatting van de volumieke veranderingen (in m ³)
km 155,725 - km 155,800	sedimentatie	5.000 m ³
km 156,400 - km 157,300	erosie	15.000 m ³
km 157,400 - km 157,525	sedimentatie	4.000 m ³
km 159,200 - km 159,375	erosie	2.000 m ³
km 160,000 - km 160,175	sedimentatie	1.500 m ³
km 161,925 - km 162,000	sedimentatie	1.000 m ³
km 162,275 - km 162,375	sedimentatie	1.500 m ³
km 162,825 - km 163,050	sedimentatie	2.000 m ³
km 164,075 - km 164,125	sedimentatie	1.500 m ³

tabel 7.3: volumieke veranderingen

7.6 Sedimentatie bij de Niers

In de gepresenteerde resultaten valt de sterke sedimentatie bij de Niers (km 157) op. Een voor de hand liggende verklaring is dat de Niers verantwoordelijk is voor de aanvoer van het neergeslagen sediment.

Een andere verklaring voor de herkomst van dit sediment is echter ook mogelijk. Uit de gepresenteerde resultaten blijkt ook dat bovenstrooms van de Niers, bij km 156, veel erosie plaatsvindt. Mogelijk dat het neergeslagen sediment hier zijn oorsprong heeft.

Het is daarom zinvol een beschouwing te doen naar de orde van grootte van de hoeveelheid sediment die door de Niers kan worden aangevoerd. Mogelijk dat op grond hiervan uitsluitel kan worden gegeven over de vraag of de hoeveelheid afgezet sediment door de Niers kan zijn aangevoerd.

Er wordt een ruime schatting gedaan.
Van de Niers zijn de onderstaande gegevens gevonden:

-De breedte van de Niers bedraagt 25 m.

-Er bestaat een verband tussen de laterale toestroming van de Niers en het debiet van de Maas bij Eijsden.

Over de periode 1953-1983 kan de decadegemiddelde afvoer van de Niers berekend worden met:

$$Q_{\text{niers}} = 5.3 + 0,016 \times Q_{\text{eijsden}} \quad (7.1)$$

Van de Niers zijn verder geen bruikbare gegevens gevonden, vandaar dat er een aantal aannamen is gedaan, zodanig dat voor de Niers een hoog sedimenttransport wordt berekend.

De volgende aannamen zijn gedaan:

- 1) De transportformule van de Niers lijkt op die van de Maas. Meyer-Peter&Mueller met een correctiefactor 3 geldt.
- 2) De korrelgrootte komt overeen met het fijnkorrelige materiaal uit de metingen.
 $D_m = 496 \mu\text{m}$
 $D_{90} = 796 \mu\text{m}$
- 3) De waterdiepte bedraagt 1 m.
- 4) De Chezy-waarde bedraagt $30 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.

Dit leidt tot een transport van de Niers van in de orde 1000 m^3 gedurende de periode december-mei. Volgens de metingen is in deze periode 4000 m^3 afgezet.

De berekeningen zijn gemaakt uitgaande van een hoog transport door de Niers. Op grond van het grote verschil tussen deze optimistische aanname en de gemeten sedimentatie wordt aangenomen dat de Niers niet de voornaamste oorzaak is van de optredende sedimentatie, maar dat de sterke erosie bij km 156, die in de bodempeilingen is waargenomen, verantwoordelijk is voor de sterke sedimentatie bij km 157.

Nader onderzoek wordt echter wel aanbevolen naar de herkomst van het afgezette sediment bij de Niers.

7.7 Waarnemingen vanuit de peilingen

Periode:

december-maart: zowel lokaal als over grotere afstand zijn sterke veranderingen in de bodemligging op de kaarten waarneembaar.

maart-juni/juli: geen duidelijke veranderingen waarneembaar. De sterke lokale processen zijn niet aanwezig en de processen over grotere afstand liggen in de orde van de nauwkeurigheid van de metingen.

Lokatie:

geul 1: veel verandering, zowel lokaal als over grotere afstand.

Ter plaatse van de fijne laag vindt sterke erosie te zijn.

Bij km 156 - km 157 treedt veel erosie op en ter plaatse van de Niers (km 157) veel sedimentatie.

Aangenomen is dat de sedimentatie bij de Niers afkomstig is van de erosie bij km 156.

Verder een vrij warrig patroon van vrij grote erosie en sedimentatie.

onverdiepte tussenstuk: geen significante processen waarneembaar.

geul 2: de geulwanden storten in. Verder zijn geen grpte veranderingen waarneembaar op het erosiefront aan het einde van de geul na. Dit is echter een orde zwakker dan het sedimentatiefront aan het begin van geul 1.

lokatie	beschrijving processen/waarnemingen
geul 1	
km 155	sedimentatiefront
km156	veel erosie
km 157	veel sedimentatie
km 158	sterk wisselend patroon van sterke sedimentatie en erosie
km 159	sterk wisselend patroon van sterke sedimentatie en erosie
km 160	sterk wisselend patroon van sterke sedimentatie en erosie
km 161	sterk wisselend patroon van sterke sedimentatie en erosie
km 162	sterk wisselend patroon van sterke sedimentatie en erosie
km163	sterk wisselend patroon van sterke sedimentatie en erosie.
onverdiept	
km 164	weinig waarneembaar
km 165	weinig waarneembaar
km 166	weinig waarneembaar
geul 2	
km 167	weinig waarneembaar
km 168	weinig waarneembaar
km 169	weinig waarneembaar, verzakking van het geualud
km 170	weinig waarneembaar, verzakking van het geualud
km 171	weinig waarneembaar, verzakking van het geualud
km 172	weinig waarneembaar, verzakking van het geualud
km 173	weinig waarneembaar, verzakking van het geualud
km 174	zeer zwak erosiefront, orde kleiner dan het sedimentatiefront aan het begin van geul 1

tabel 7.4: beschrijving waargenomen veranderingen

schattingen van de volumieke veranderingen van de significante processen			
lokatie	proces	orde van bodemverandering	periode
km 155,725 - km 155,800	sedimentatie	5000 m ³	februari-maart
km 156,400 - km 157,300	erosie	15000 m ³	februari-maarti
km 157,400 - km 157,525	sedimentatie	4000 m ³	december-maart
km 159,200 - km 159,375	erosie	2000 m ³	december-maart
km 160,000 - km 160,175	sedimentatie	1500 m ³	januari-maart
km 161,925 - km 162,000	sedimentatie	1000 m ³	januari-maart
km 162,275 - km 162,375	sedimentatie	1500 m ³	januari-maart
km 162,825 - km 163,050	sedimentatie	2000 m ³	januari-maart
km 164,075 - km 164,125	sedimentatie	1500 m ³	december-maart
km 167,875 - km 174,175	instorten randen	niet bepaald	
km 174	erosie	500 m ³	februari-maart

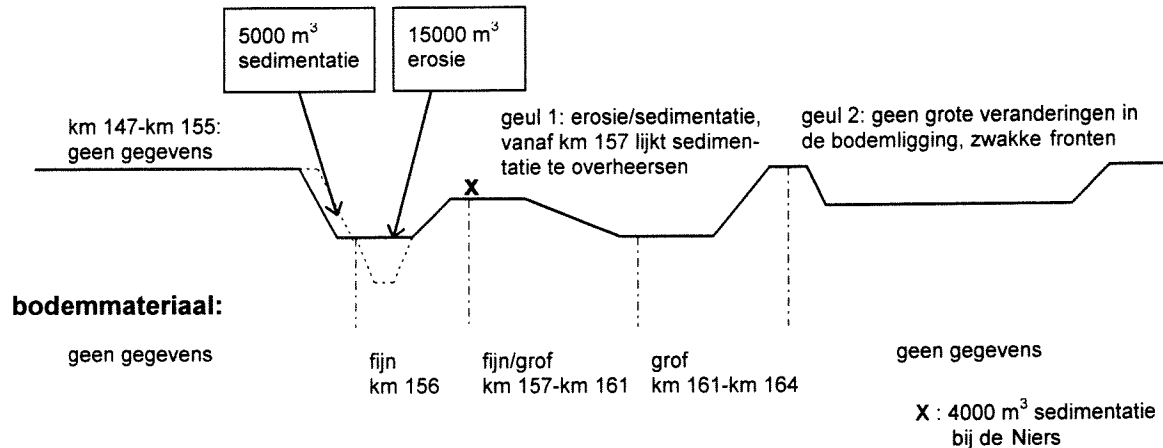
tabel 7.5: volumieke veranderingen

8 Vermoedelijke bodemmateriaal in het gebied

8.1 Inleiding

Op grond van de waargenomen bodemveranderingen en het bodemmateriaal uit de bodemboringen is het volgende beeld van het gebied naar voren gekomen:

bodemveranderingen:



figuur 8.1: bodemmateriaal en bodemveranderingen

Uit figuur 8.1 blijkt dat uit de monitoringsgegevens niet alle benodigde data naar voren komen. Het bodemmateriaal bovenstrooms van geul 1 en het bodemmateriaal in geul 2 is onbekend. Verder zijn er geen gegevens van de veranderingen bovenstrooms van geul 1. Door het koppelen van de waargenomen morfologische veranderingen, de korrelgrootten uit de bodemboringen en het al dan niet aanwezig zijn van een geul wordt geprobeerd een voorspelling te doen omtrent het aanwezige bodemmateriaal op de diverse trajecten. Het ontbreken van gegevens van de bodemveranderingen op km 147-km 155 is niet zo erg. Voor dit gebied zal er in het model worden uitgegaan van een gladde schematisatie en aangenomen wordt dat er zich in dit gebied, aangezien hier niet gebaggerd is, geen grote veranderingen voordoen.

Aangenomen wordt dat het grove materiaal het meest op het oorspronkelijke materiaal lijkt, omdat er een verdieping heeft plaatsgevonden en er zeer veel erosie bij de lokatie met fijnkorrelig materiaal (km 156) optreedt. Verder wordt aangenomen dat de onverdiepte situatie een evenwichtssituatie was, waarbij geen of nauwelijks bodemveranderingen optraden. Als ondanks de verdieping (lagere stroomsnelheden) ineens veel erosie plaatsvindt, lijkt het aannemelijk dat het blootgelegde materiaal fijner is dan het erboven weggebaggerde bodemmateriaal.

8.2 Lokale bodemmateriaal

Op de volgende pagina volgen de vermoedens omtrent het aanwezige bodemmateriaal. Door combinatie van genomen bodemmonsters, de waargenomen bodemveranderingen en de voorgeschiedenis (verdiept of onverdiept) wordt getracht een idee van het aanwezige bodemmateriaal te krijgen.

Er moet niet uit het oog verloren worden dat op deze manier geen inzicht wordt gekregen in het onderliggende materiaal, en dat aangenomen wordt dat de nu vermoedde bovenliggende laag zich verder naar beneden uitstrekt en er zich geen andere laag onder bevindt.

km 147 - km 155 (onverdiepte bovenstroomse stuk):

bodemmonsters:

Er zijn geen bodemmonsters genomen.

bodemveranderingen:

Op de verschilkaart van februari '97 t/m maart '97 is een front aanwezig, maar er treden geen andere verschijnselen op.

vermoeden:

Te veel onzekerheden voor een vermoeden op grond van het bovenstaande. Aangenomen wordt dat het materiaal grofkorrelig is op grond van de eerder geplaatste aanname dat het oorspronkelijke bovengelegen materiaal grofkorrelig is.

km 156 (geul 1):

bodemmonsters:

Er zijn alleen fijnkorrelige bodemmonsters aangetroffen.

bodemveranderingen:

Uit de verschilkaart van februari-maart en de dwarsprofielen blijkt dat van km 156,400 tot km 157,300 veel erosie optreedt.

vermoeden:

Er is een fijnkorrelige laag vrijgekomen door het wegbaggeren van een grofkorrelige bovenlaag.

km 157 t/m km 160 (geul 1):

bodemmonsters :

Er zijn zowel grofkorrelige bodemmonsters als fijnkorrelige bodemmonsters aangetroffen.

bodemveranderingen:

Afwisselend lokaal sterke erosie- en sedimentatieprocessen aanwezig. Sedimentatie lijkt te overheersen, wat er op zou kunnen duiden dat zich hier grover materiaal bevindt dan bij km 156.

vermoeden:

In het gebied is grofkorrelig bodemmateriaal aanwezig.

km 161 t/m km 163 (geul 1):

bodemmonsters:

Er zijn voornamelijk bodemmonsters met grofkorrelig materiaal aangetroffen.

bodemveranderingen:

Er is een gevarieerd patroon van sedimentatie/erosie waarneembaar, sedimentatie lijkt te overheersen.

vermoeden:

In het gebied is grofkorrelig bodemmateriaal aanwezig.

km 164 t/m km 166 (onverdiepte stuk):

bodemmonsters:

Er zijn geen bodemmonsters genomen.

bodemveranderingen:

Er zijn nauwelijks bodemveranderingen waargenomen.

vermoeden:

De oorspronkelijke, grofkorrelige laag ligt hier nog.

km 167 t/m km 175 (geul 2):*bodemmonsters:*

Er zijn geen bodemmonsters genomen.

bodemveranderingen:

De geulranden storten in, in de geul treedt lichte sedimentatie op en op de onverdiepte zijanten een lichte erosie.

vermoeden:

Op grond van het zwakke sedimentatie-en erosiefront en de kleine bodemveranderingen wordt een grofkorrelige bodem vermoedt.

8.3 Vermoede bodemmateriaal

Er zijn grote onzekerheden betreffende het bodemmateriaal. Om verder te kunnen werken wordt de situatie verondersteld, zoals deze uit de vermoedens naar voren komt (tabel 8.1).

De grote onzekerheid betreffende het bodemmateriaal lijkt de keuze om in het model diverse scenario's te onderzoeken, te rechtvaardigen.

traject	km147-km155	km156	km157-km160	km161-km163	km164-km166	km167-km175
bodem- materiaal	grofkorrelig	fijnkorrelig	grofkorrelig	grofkorrelig	grofkorrelig	grofkorrelig

tabel 8.1: vermoede bodemmateriaal

deel III

Modellering van het gebied

deel III: modellering van het gebied

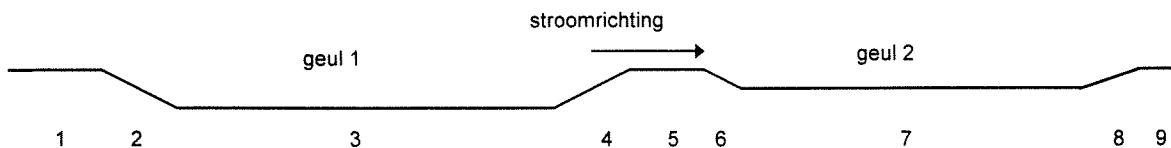
9 Gebiedsbeschrijving in het model

9.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de invoerdata voor het model om het gebied te beschrijven alvorens hydraulisch en morfologisch geijkt wordt. Behandeld worden respectievelijk de bodemgeometrie van de rivier, de bovenstroomse en benedenstroomse hydraulische randvoorwaarden in de tijd, de Chézy-waarde, het bodemmateriaal en de sedimenttransportformule.

9.2 Geometrie van de dwarsprofielen

De in het model gebruikte dwarsprofielen zijn als volgt bepaald. Gezien de naar morfologie betrekkelijk kleine afstanden waarover de bodemveranderingen optreden, kan niet worden volstaan met één representatief profiel in een zogenaamde gladde schematisering van het gebied. Globaal geschematiseerd is de situatie in het zomerbed ongeveer als volgt: twee geulen, waarvan geul 1 iets dieper is dan geul 2. Hieronder staat de schematisatie van het langspanprofiel.



figuur 9.1: grove bodemschematisatie voor het traject

In deze schematisatie zijn negen gebieden te onderscheiden. Vermoedelijk ligt het aantal benodigde dwarsprofielen voor de beschrijving van het zomerbed ook in die buurt.

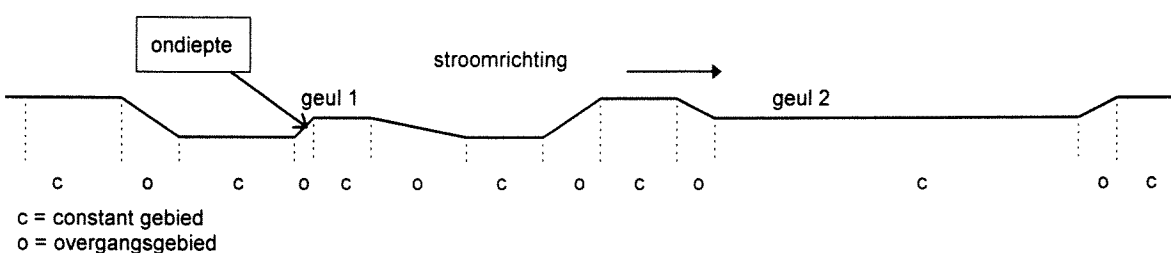
Indien het winterbed wordt bekeken zijn er ook nog belangrijke variaties in de breedte. Het winterbed is gebruikt om het model mee te ijken, vandaar dit niet is meegenomen, maar als een vrijheidsgraad voor het hydraulisch ijken is beschouwd.

Eerst is er per traject van 500 m een dwarsprofiel genomen, wat er representatief uitziet voor de overige dwarsprofielen binnen die 500 m, waarbij met "representatief" wordt bedoeld dat het redelijk op de overige profielen lijkt. Op deze manier worden voor het traject km 155-km 175 eenenveertig profielen geselecteerd. Daarna is dit aantal nog eens teruggebracht tot zoveel profielen als minimaal noodzakelijk leek voor een redelijke gebiedsbeschrijving. Naast elkaar gelegen representatieve dwarsprofielen, die niet sterk van elkaar verschillen zijn tot één "gemiddeld profiel" geschematiseerd. Via deze manier bleek het traject te karakteriseren in de volgende twee soorten gebieden.

Ten eerste waren er gebieden waarin het profiel over lange afstand weinig varieerde en het bodemverhang redelijk overeenkwam met het natuurlijke bodemverhang van de rivier. Voor deze gebieden wordt de terminologie "constant gebied" ingevoerd.

Ten tweede waren er gebieden waarin het bodemverhang duidelijk varieerde van het natuurlijk bodemverhang, in dit rapport verder aangeduid als "overgangsgebied".

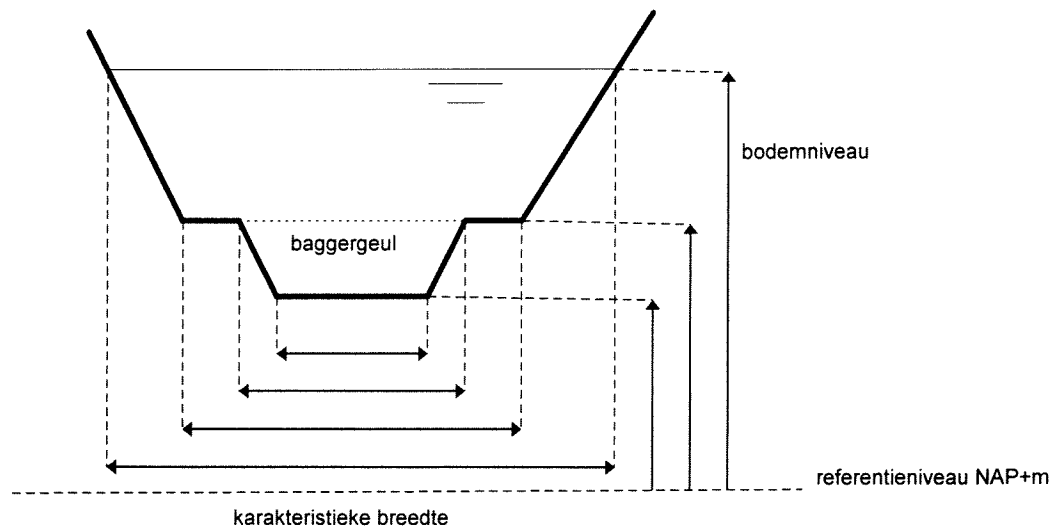
Uit bestudering van de lodingsgegevens bleek dat er in geul 1 een relatief ondiep stuk aanwezig is van km 157 tot km 161. In de onderstaande schematisatie van het langspanprofiel komt dit overeen met de ondiepte middenin geul 1 (het constant gebied + de overgangsgebieden).



figuur 9.2: gebiedsindeling in constante gebieden en overgangsgebieden

Voor de constante gebieden is een gemiddeld profiel bepaald uit de aanwezige representatieve dwarsprofielen van het gebied. Dit is gedaan door middeling van de breedten en van de bijbehorende bodemniveaus van de karakteristieke punten uit de representatieve dwarsprofielen in een constant gebied.

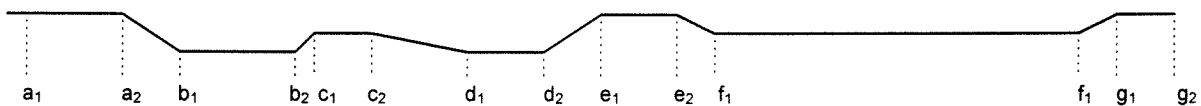
Ter verduidelijking volgt hier een voorbeeldbeschrijving van de werkwijze. In een constant gebied van 3 km zijn zes representatieve profielen aanwezig (om de 500 m een profiel) die niet sterk van elkaar verschillen. Een dwarsprofiel laat zich grofweg karakteriseren door de breedte en het bodemniveau van de onverdiepte en de verdiepte delen van het profiel. In de onderstaande figuur staan deze karakteristieke breedten en diepten verduidelijkt.



figuur 9.3: karakteristieke breedten in een dwarsprofiel

Van overeenkomstige karakteristieke breedten en niveaus van de zes profielen is het gemiddelde bepaald, en aan de hand hiervan is een gemiddeld profiel voor het hele traject (hier dus 3 km) bepaald. Aangenomen wordt dat dit dwarsprofiel in het midden van het betreffende gebied ligt. Aan het begin van het gebied en aan het einde van het gebied wordt het dwarsprofiel bepaald, uitgaande van het gemiddeld profiel met doorberekening van het bodemverhang van het gebied. Door het extrapoleren van de dwarsprofielen naar de randen van de constante gebieden hoeven geen profielen voor de overgangsgebieden worden opgegeven. SOBEK interpoleert hier profielen uitgaande van het dwarsprofiel op de benedenstroomse rand van het bovenstroomse, constante gebied en van het dwarsprofiel op de bovenstroomse rand van het benedenstroomse, constante gebied.

In het onderstaande geschematiseerde langspatiefiel staan de coderingen van de ingevoerde dwarsprofielen. De indices 1 en 2 hebben respectievelijk betrekking op het bovenstroomse en het benedenstroomse dwarsprofiel van een constant gebied.



figuur 9.4: coderingen dwarsprofielen

Later bleek het nodig het aantal dwarsprofielen in het model iets uit te breiden in verband met de overgangen tussen fijnkorrelige en grofkorrelige gebieden.

In bijlage 18 met de beschrijvingen van de dwarsprofielen zijn de indices aangepast. De letters van de coderingen behoeven niet te worden aangepast en zijn gelijk gehouden. De cijfers zijn oplopend in stroomafwaartse richting. In bijlage 18 staan bijvoorbeeld de dwarsprofielen b_1 t/m b_4 . b_1 komt overeen met het meest bovenstroomse dwarsprofiel met codering b , b_4 met het meest benedenstroomse dwarsprofiel met codering b en b_2 en b_3 met tussenliggende dwarsprofielen die nodig bleken om de verandering van het bodemmateriaal te kunnen beschrijven binnen het model.

Binnen SOBEK is bij het invoeren van de profielen de optie "tabulate description" gebruikt. Met deze optie worden van een profiel een aantal hoogten en bijbehorende breedten ingevoerd. Gekozen is voor de bodemhoogte van de baggergeul, de oorspronkelijke bodemhoogte van de rivier, NAP+4m, NAP+5m en NAP+10m.

Een probleem ontstaat voor de breedte boven NAP+5m, aangezien de lodingskaarten van de dwarsprofielen doorlopen tot NAP+5m. Uit de waterstand bij Q_{MHW} bleek dat het profiel ongeveer bekend moet zijn tot NAP+14m. Dit maakt het nodig via extrapolatie de baggerprofielen aan te vullen tot voor het model volledige profielen. Het zomerbed loopt ongeveer door tot NAP+10m, daarboven ligt het winterbed. De peilingsprofielen zijn tot NAP+10m geëxtrapoleerd met een talud van 3:10, wat overeenkomt met de al aanwezige helling van het talud van de onverdiepte bodem tot NAP+5m. De breedte van het winterbed zal gebruikt worden om het model hydraulisch op te ijken. Uit stafkaarten is bekend dat de breedte van het winterbed varieerde van 500 m tot 1500 m.

9.3 Hydraulische randvoorwaarden voor de termijnberekeningen

aanwezige afvoergegevens

Binnen het model zijn hydraulische randvoorwaarden nodig. Beschikbaar zijn de debieten en waterstanden uit metingen van begin'91 tot begin'97, en de resultaten van ZWENDL-berekeningen van de volgende perioden:

01-01-1991 t/m 28-02-1991
 01-11-1991 t/m 31-01-1992
 01-12-1992 t/m 28-02-1993
 01-11-1993 t/m 31-01-1994
 01-12-1994 t/m 28-02-1995
 24-05-1996 t/m 01-01-1997

De ZWENDL-berekeningen bieden het voordeel dat zij de debieten bij Sambeek en de overeenkomende waterstanden op een bepaald tijdstip weergeven, terwijl bij de meetgegevens het debiet een stuk bovenstrooms (Venlo) of benedenstrooms (Lith) moet worden genomen.

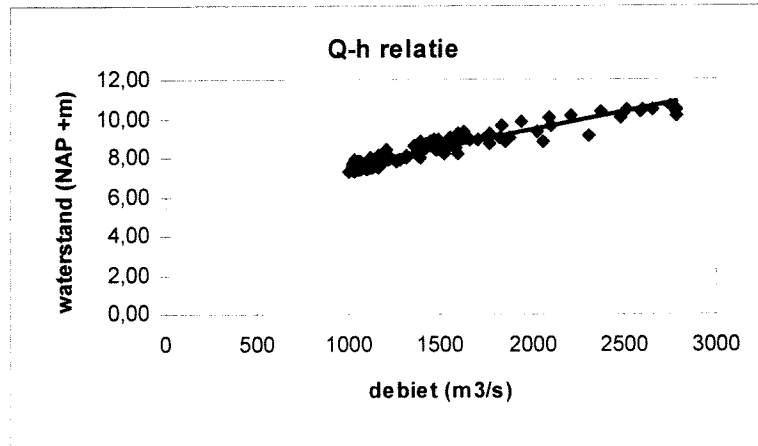
bovenstroomse hydraulische randvoorwaarde bij de lange termijnberekeningen

Voor de lange termijnberekeningen is gekozen voor de debieten uit ZWENDL, aangevuld met de debieten van Venlo, wanneer de ZWENDL-debieten ontbraken. Wanneer de debieten bij Venlo ook ontbraken (de ADM-meter bij Venlo is vrij recent geplaatst) zijn de debieten bij Lith gebruikt. De reeks loopt van 01-01-1991 tot 01-01-1997. Van deze reeks zijn de gemiddelde afvoeren over 10 dagen bepaald, de zogenaamde decadegemiddelde afvoeren (zie bijlage 16). Deze reeks is een paar keer herhaald om een afvoerreeks tot 2017 te creëren.

benedenstroomse hydraulische randvoorwaarde bij de lange termijnberekeningen

Bij de lange termijnberekeningen wordt als benedenstroomse randvoorwaarde een Q-h-relatie bij stuw Grave (km 175) opgelegd. In het stuwprogramma van de Maas is het stuwpeil bij Grave vastgelegd op NAP+7,50m. Bij hoge afvoeren en ijsgang wordt de stuw gestreken. Navraag bij de stuwbeheerder leerde dat het strijken van de stuw bij afvoeren van $\pm 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ gebeurt. Bestudering van de afvoeren in de periode '91-'97 lijkt dit te bevestigen. De waterstanden kwamen alleen bij afvoeren boven de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ duidelijk boven de NAP+7,50m. Bij de lagere afvoeren lag de waterstand rond het stuwpeil. Aangenomen wordt dat bij $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ de stuwen opengaan. In werkelijkheid ligt de situatie iets complexer dan deze aanname. De snelheid van het stijgen van de waterspiegel en de verwachte afvoeren spelen hierbij ook een rol. Aangezien voor de toekomstvoorspellingen met decadegemiddelde afvoeren wordt gewerkt, behoeft het stuwprogramma niet precies gedefinieerd te worden, daar de decadevoeren ook geen precies beeld van de dagafvoeren geven. De Q-h-relatie is als volgt opgesteld aan de hand van de reeks gegevens van '91-'97 en de ZWENDL-gegevens.

- 1) tot $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ geldt: $h = \text{NAP} + 7,50\text{m}$.
- 2) van $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ tot $Q = 2800 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt middels curve-fitting met de kleinste kwadratenmethode een Q-h-relatie bepaald.
 Aan dit deel worden twee eisen gesteld:
 - 1) bij $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ moet de gevonden waterstand bij het stuwpeil aansluiten.
 - 2) de relatie moet eenduidig zijn. De functie moet continu stijgen bij hogere afvoeren.
 De onderstaande curve werd gevonden.



figuur 9.5: gefitte Q-h-relatie

De vergelijking van de gefitte curve luidt:

$$h = 0,0018 Q + 5,7 \tag{9.1}$$

met:

- h : waterstand (in m)
- Q : debiet Q (in m^3/s)
- coëfficiënt 0,0018 (in s/m^2)
- coëfficiënt 5,7 (in m)

De door ZWENDL berekende waterstanden bij $Q = 3079 \text{ m}^3/\text{s}$ en bij $Q = 3826 \text{ m}^3/\text{s}$ zijn als randvoorwaarde gebruikt bij deze afvoeren.

In SOBEK wordt de Q-h-relatie als tabel ingevoerd. Uit de bovenstaande vergelijking kwam tabel 9.1.

Q (in m^3/s)	h (in m)	Q (in m^3/s)	h (in m)	Q (in m^3/s)	h (in m)	Q (in m^3/s)	h (in m)
0	7,50	1400	8,22	1900	9,12	2400	10,02
1000	7,50	1500	8,40	2000	9,30	2500	10,20
1100	7,68	1600	8,58	2100	9,48	2600	10,38
1200	7,86	1700	8,76	2200	9,66	2700	10,56
1300	8,04	1800	8,94	2300	9,84	2800	10,74

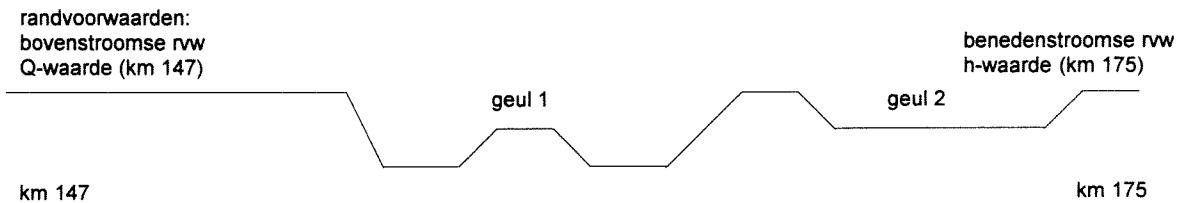
tabel 9.1: ingevoerde Q-h-relatie

Dit wordt aangevuld voor de afvoeren met een referentieperiode van $T = 250$ jaar en $T = 1250$ jaar uit tabel 9.2.

referentie periode T (in jaar)	Q (in m^3/s)	h (in m)
250	3079	10,86
1250	3826	11,62

tabel 9.2: aanvulling Q-h-relatie

De randvoorwaarden zijn in de onderstaande figuur samengevat.



figuur 9.6: hydraulische randvoorwaarden

Gebruikt worden de volgende Q-waarden en h-waarden:

Q-waarde: decade-gemiddelde afvoeren uit periode 1991-1997, herhaald van 1997 tot 2017

h-waarde: Q-h-relatie opgesteld uit gegevens 1991-1997.

9.4 Chézy-waarde

Binnen het model is over het hele traject een constante Chézy-waarde gebruikt. In eerste instantie is $C = 41 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ uit het monitoringsonderzoek aangenomen. Tijdens het hydraulisch ijken zal de Chézy-waarde gebruikt worden om het model mee fijn te stellen.

9.5 Bodemmateriaal

Uit het monitoringsonderzoek volgden de volgende aannamen:

traject:	type korreldiameter	korrelgrootte:
km 147 t/m km 155:	D ₃₅ D ₅₀ D ₉₀ D _m	846 µm 1,95 mm 18 mm 11,8 mm
km 156:	D ₃₅ D ₅₀ D ₉₀ D _m	344 µm 432 µm 796 µm 494 µm
km 157 t/m km 175:	D ₃₅ D ₅₀ D ₉₀ D _m	846 µm 1,95 mm 18 mm 11,8 mm

tabel 9.3: lokale korrelgrootten uit het monitoringsonderzoek

De korrelgrootte zal gebruikt worden om het model morfologisch mee te ijken.

Bij Meyer-Peter & Müller zijn alleen de D_m en de D₉₀ van belang.

9.6 Sedimenttransportformule

In het deel "monitoringsgegevens" is een transportformule voor het gebied bepaald; Meyer-Peter & Müller met een correctiecoëfficiënt van 2,3-3,7. Er werd in dat stadium nog van uitgegaan dat dit vrijheid gaf bij het morfologisch ijken. Duidelijk werd echter dat de onzekerheden in korrelgrootte erg groot zijn. Op grond hiervan is met de korrelgrootte geijkt en is als correctiecoëfficiënt voor de transportformule de gemiddelde correctiecoëfficiënt, 3, gebruikt.

10 De gebruikte plaats- en tijdstap

10.1 Steady state

De berekeningen zijn uitgevoerd met de optie "steady state". Het model rekent dan naar een hydraulisch, stationaire toestand.

Hydraulisch doet de gekozen tijdstap er dan niet toe, voor zover het Courantgetal aangaat. Er wordt steeds geïtereerd naar de stationaire situatie.

Bij de morfologische berekeningen zou het Courantgetal normaal gesproken wel een rol spelen. In SOBEK wordt dit echter ondervangen, om instabiliteiten in de berekeningen te voorkomen. Er is een optie ingebouwd die, indien het Courantgetal groter dan één wordt, automatisch de gekozen tijdstap aanpast naar een grootte waarbij het Courantgetal kleiner dan één wordt.

Het Courantgetal speelt in SOBEK alleen een rol indien voor de optie "unsteady flow" wordt gekozen. Aangezien deze optie niet gebruikt is, behoeft er geen aandacht meer aan het Courantgetal te worden besteed in het rapport.

10.2 Hydraulische stapgrootten

hydraulische tijdstap

Voor de hydraulische berekeningen gaat SOBEK uit van het Preissmann box schema. Dit is een impliciet schema en is onvoorwaardelijk stabiel voor wat betreft de gekozen stapgrootte.

Gekozen is voor een tijdstap van 1 uur. Deze keuze is bij het hydraulisch ijken niet van belang, aangezien bij het ijken niet uitgegaan is van een tijdreeks, maar van het doorrekenen naar een stationaire toestand met opgelegde, constante randvoorwaarden; bovenstrooms het debiet en benedenstrooms de waterstand.

Uitgegaan wordt van een initiële voorwaarde, bijvoorbeeld overal een waterdiepte van 7 m, welke dan na het uitvoeren van een run aangepast is aan de stationaire toestand. Door een verkeerde keuze van de initiële voorwaarde kan het probleem ontstaan dat het model instabiel wordt. In zo'n geval wordt de berekening afgebroken. Uitgaande van een bepaalde waterdiepte voor het hele traject, bleek het mogelijk bij de ijkreeksen initiële voorwaarden te vinden waarbij het model niet vastliep.

Problemen kunnen dus ontstaan indien de initiële situatie sterk verschilt van de stationaire situatie. Dit kan ook in een tijdreeks waarin het debiet tussen twee opeenvolgende tijdstappen sterk varieert. De debietvariatie tussen twee opeenvolgende decade-afvoeren varieert in sommige gevallen sterk, bijv. van $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij sterke overgangen wordt de berekening afgebroken. Om deze reden moet gekozen worden voor een kleinere tijdstap. SOBEK interpoleert dan lineair voor de tussenliggende tijden. Indien de tijdstap van 10 dagen naar 5 dagen wordt teruggebracht in het voorbeeld van $1400 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 400 \text{ m}^3/\text{s}$, verandert de reeks in $1400 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 900 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow 400 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit bleek, zoals viel te verwachten, de stabiliteit van het model te verhogen.

hydraulische plaatsstap

Voor de hydraulische plaatsstap wordt een grootte van 100 m gekozen. Deze keuze komt voort uit de keuze voor een morfologische plaatsstap van 100 m (zie 10.3).

10.3 Morfologische stapgrootten

morfologische tijdstap

De morfologische berekeningen verlopen via het Lax-Wendorffschema. Hierbij is het Courantgetal normaal gesproken wel van belang, maar zoals eerder vermeld is, verkleint SOBEK automatisch de tijdstap om instabiliteiten in het model te voorkomen.

Bij het berekenen van de veranderingen in het profiel over 20 jaar is gekozen voor een tijdstap van 1 uur.

morfologische plaatsstap

Binnen het model is het sedimenttransport direct afhankelijk van de lokale, hydraulische stroomcondities. De stapgrootte moet klein genoeg zijn om de relevante processen waar te kunnen nemen. Verschijnselen als sedimentatiefronten traden op over afstanden van 100 m. Ook met betrekking tot de trajecten waarin de korrelgrootte varieert, is 100 m een geschikte lengte. Op grond hiervan is gekozen voor een plaatsstap van 100 m. Er moet nog wel worden opgelet dat de plaatsstap groter dan 0,5 % van de lengte van een branch is, gezien de eis die SOBEK zelf hieraan stelt. Aan deze eis werd voldaan.

11 De ijking van het model

11.1 Het ijken van de waterbeweging

11.1.1 IJkmethoediek

Bij het ijken van de waterbeweging zijn twee ijkreeksen gebruikt. De eerste reeks bestaat uit een aantal meetwaarden uit de periode december '96-april '97 en de tweede uit waarden van een ZWENDL-schematisatie [16] van RWS/RIZA voor de actuele geometrie (d.w.z. met baggergeulen).

meetwaarden

De reeks met de meetwaarden loopt tot 1000 m³/s. Deze afvoer komt overeen met een vol zomerbed. Gekozen is voor 5 waterstanden in hydraulisch rustige perioden met relatief kleine schommelingen van de waterstand en het debiet t.o.v. de dag voor en de dag na de meting. De reden hiervoor is dat gerekend met de optie "steady state". Aangenomen wordt dat de hydraulische omstandigheden gedurende perioden met zwakke fluctuaties het best de stationaire situatie benaderen.

Ter controle zijn een paar extra dagen bekeken na ijking van de reeks. $Q \cong 500$ m³/s bleek buiten de gebruikte ijkdag maar op een paar andere dagen op te treden. Dit betrof dagen gedurende perioden met zeer sterke fluctuaties, in de orde van 300 m³/s/dag. Aangenomen wordt dat de aanname van stationaire omstandigheden hierop niet meer van toepassing was.

ZWENDL-waarden

Met de ZWENDL-reeks wordt geijkt voor hoogwatergolven met een herhalingsijd $T = 10$ jaar, $T = 50$ jaar, $T = 90$ jaar, $T = 250$ jaar en $T = 1250$ jaar.

Bij het ijken van het zomerbed is met de hoogteligging van de bodem gevarieerd en met de Chézy-waarde. Bij het ijken van het winterbed is met de breedte van de uiterwaarden gevarieerd

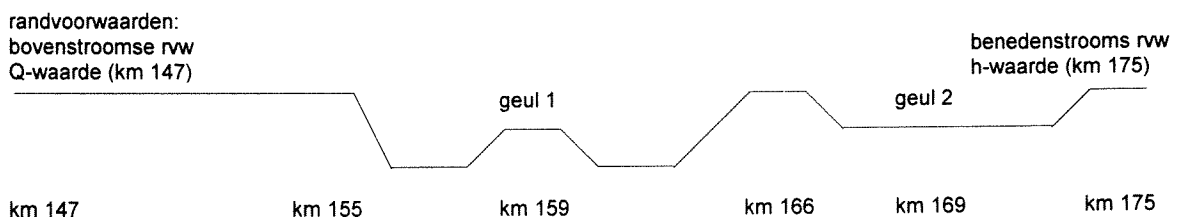
11.1.2 Hydraulische randvoorwaarden bij de ijking

bovenstroomse randvoorwaarde

Als bovenstroomse hydraulische ijkrandvoorwaarde wordt het debiet gebruikt. Bij de ijkreeksen zal gebruik worden gemaakt van de afvoer van een aantal dagen in de periode december '96-april '97 en van de extreme afvoeren van de ZWENDL-berekeningen [16]. De ZWENDL-berekeningen voor extreme afvoeren zijn gebruikt als aanvulling. In deze ZWENDL-berekeningen wordt uitgegaan van de nieuwe bodemgeometrie, welke gecreëerd is door het baggeren. Sinds de realisatie van de baggergeulen hebben zich nog hoge afvoeren groter dan 1000 m³/s voorgedaan. De ZWENDL-berekeningen vormen een aanvulling voor de hogere afvoeren.

benedenstroomse randvoorwaarde

Bij het ijken is de waterstand bij de stuw Grave gebruikt. Deze bedraagt NAP+7,50 m. Bij de berekeningen met extreem hoge afvoeren wordt de waterstand uit de ZWENDL-berekeningen [16] op km 175 als benedenstroomse randvoorwaarde opgelegd.



figuur 11.1: lokatie van de bij het ijken gebruikte waterstanden

11.1.3 IJkresultaten

Het bleek nodig de Chézy-waarde van $41 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ tot $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ te verhogen. Verder bleken kleine aanpassingen in de diepte van het zomerbed en in de breedte van de uiterwaarden noodzakelijk. In de bijlage 17a en 17b staan tabellen met de ijkreeksen en de berekende waarden. De controlereeks blijkt redelijk te voldoen.

11.2 Het ijken op de morfologische veranderingen

11.2.1 IJkmethode

Na de hydraulische ijking is het model morfologisch geijkt. Hiervoor is de informatie van de bodemveranderingen uit de bodempeilingen gebruikt; het sedimentatiefront van 5000 m^3 bij km 155 (begin van geul 1) en de sterke erosie 15000 m^3 in de periode december'96-april'97. In de periode april'97-juli'97 vonden nauwelijks veranderingen plaats.

Er wordt weer van bovenstrooms naar benedenstrooms gewerkt.

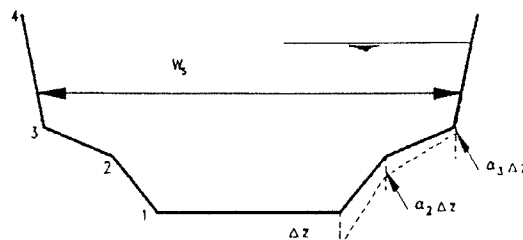
Er kan geijkt worden door te variëren met:

- 1) de correctiecoëfficiënt voor de gevonden transportformule
- 2) de sedimenttransporterende breedte
- 3) de korrelgrootten

Gekozen is alleen in de korrelgrootte te variëren, gezien de onzekerheid hierover.

SOBEK biedt niet de optie tot kuberen. De uitvoer die gebruikt wordt bij het ijken, is de bodemverandering Δz . Uit het dwarsprofiel en de wijze waarop SOBEK de Δz bepaalt, kan bij een bekende Δz bepaald worden hoeveel erosie of sedimentatie in een dwarsprofiel optreedt.

SOBEK biedt de optie de bodemveranderingen Δz in een dwarsprofiel over de hele breedte gelijk te verdelen, en de optie de bodemveranderingen evenredig met de waterdiepte te laten plaatsvinden. Het gelijk verdelen kan leiden tot instabiliteitsproblemen in het model, vandaar dat gekozen is voor een proportionele verdeling. Hieronder volgt de schematisatie van de verdelingsfactoren bij de proportionele verdeling [36].



figuur 11.2: verdelingsfactoren

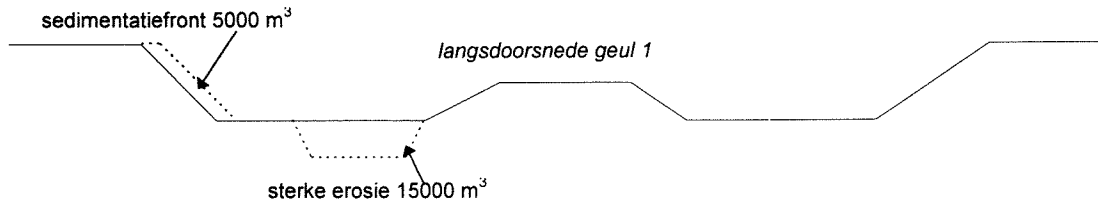
$$\alpha_1 = 1 \quad (11.1)$$

$$\alpha_i = \frac{(z_s - z_i)}{(z_s - z_b)} \quad ; [i = 2, 3, \dots, k] \quad (11.2)$$

met:

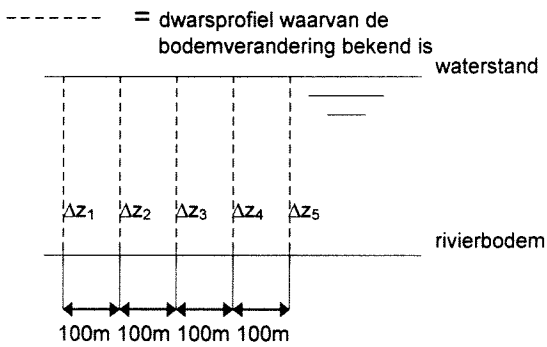
- z_s : level op waterspiegelbreedte
- z_b : level op bodembreedte
- z_i : level i

De te ijken bodemveranderingen liggen in het begin van geul 1. Het profiel waarin het sedimentatiefront oprad, lag in de profielen die in bijlage 18 overeenkomen met description a en b en het overgangsgebied tussen a en b. De sterke erosie lag in een profiel in bijlage 18 overeenkomend met description b.

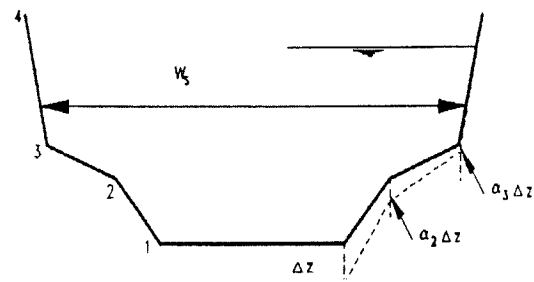


figuur 11.3: veranderingen waarop morfologisch geijkt is

De bodemgeometrie van een dwarsprofiel is bekend en aan de hand van de verdelingscoëfficiënt α en van de bodemverandering Δz kan berekend worden hoe groot de bodemverandering op andere niveaus in het profiel is. Uit de berekeningen zijn de optredende bodemveranderingen Δz bekend voor dwarsprofielen om de 100 m. Op grond hiervan wordt aangenomen dat de Δz -waarden gelden voor een traject van 100 m.



figuur 11.4a: langsprofiel rivier



figuur 11.4b: dwarsprofiel rivier

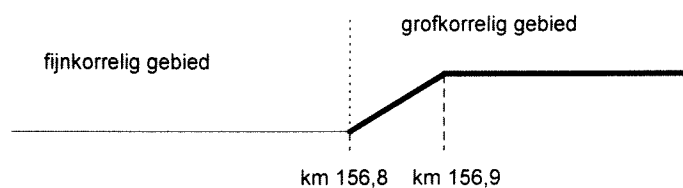
De hoeveelheid neerslaand materiaal bij het sedimentatiefront wordt als volgt geschat. Gekeken wordt in welke dwarsprofielen het sedimentatiefront ligt. Van deze dwarsprofielen wordt per dwarsprofiel de oppervlakteverandering bepaald aan de hand van de Δz en dit wordt vermenigvuldigd met 100 m. Dit is de afstand tussen twee naast elkaar gelegen Δz -waarden. Tenslotte worden de berekende volumes gesommeerd en wordt de volumieke inhoud van het sedimentatiefront gevonden.

11.2.2 Morfologische randvoorwaarde

Als morfologische randvoorwaarde wordt de bodemligging op de rand van het model op km 147 constant gehouden.

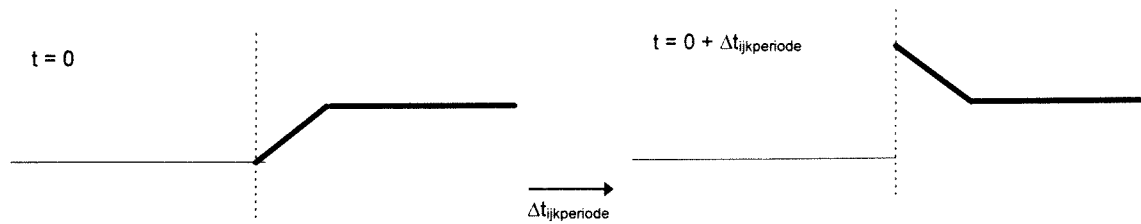
11.2.3 Drempelvorming bij het ijken van het oorspronkelijke model

Na de eerste runs bij het morfologisch ijken, uitgaande van het bodemmateriaal uit het monitoringsonderzoek, bleek bij km 157 een probleem op te treden bij de overgang van het gebied met een fijnkorrelige bodemlaag naar het gebied met een grofkorrelige bodemlaag.



figuur 11.5: rivierbodem, overgangsgebied fijnkorrelig-grofkorrelig bodemmateriaal

De bodem kwam net over de grens met het grofkorrelige materiaal steil omhoog, gedurende het doorlopen van de ijkperiode (zie figuur 11.6).



figuur 11.6: verandering rivierbodembodem in het model in de tijd bij de overgang fijnkorrelig-grofkorrelig bodemmateriaal

Dit valt als volgt te verklaren. De overgang van fijnkorrelig materiaal naar grofkorrelig materiaal, is in het model als lokatiegebonden, interne randvoorwaarde op te vatten. Indien deze randvoorwaarde bijv. op km 157 is opgelegd, blijft deze in de tijd ook op km 157, hoewel als gevolg van de tijdsafhankelijke processen in werkelijkheid het bodemmateriaal verandert.

In het model wordt het fijne materiaal als volumieke hoeveelheid over de grens tussen fijn en grof materiaal heen getild en geldt daarna als grof materiaal en komt niet of bij veel hogere stroomsnelheden weer in beweging. Het transport in het model wordt dus kleiner dan in werkelijkheid het geval zal zijn.

Het bleek dat het grofkorrelige materiaal zoals dat uit de analyse van de monitoringsgegevens naar voren is gekomen, zelfs bij debieten van $2800 \text{ m}^3/\text{s}$ in het model niet in beweging komt.

Gesteld kan worden dat SOBEK problemen geeft bij de overgangen van fijnkorrelig naar grofkorrelig materiaal, en dat deze problemen groter worden naarmate er een grotere korrelgrootteverandering optreedt. Dit probleem is niet van fysische aard, maar valt te wijten aan de beperkingen binnen SOBEK.

Binnen het onderzoek moet een oplossing voor dit probleem worden gevonden, aangezien het in het model optredende verschijnsel tot een grote afwijking t.o.v. de te verwachten situatie leidt. Aan het begin van de ijkreeks ligt de bodem aan het einde van geul 1 op NAP-2m en na het doorlopen van de ijkperiode op NAP+2m. Er vormt zich dus een metershoge drempel, die mogelijk nog hoger wordt bij een langere tijdreeks.

Wat in de praktijk zal gebeuren is dat het benedenstrooms afgezette, fijnkorrelige materiaal natuurlijk fijn blijft en makkelijk verder getransporteerd wordt door de stroom i.p.v. dat het niet meer of veel minder snel in beweging komt.

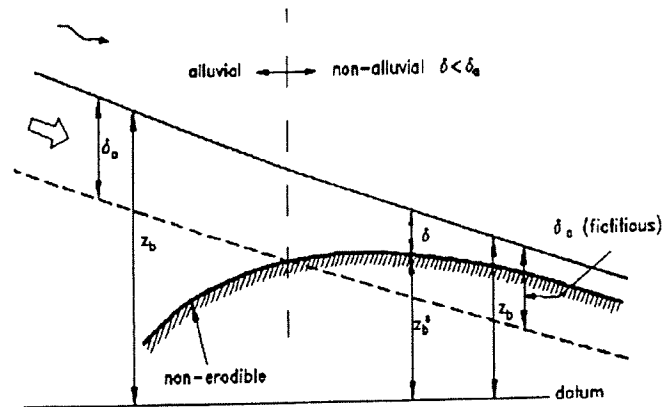
11.2.4 Fixed layer-aanname

Binnen de ruimte die SOBEK biedt, wordt er naar een geschikte aanname voor het bovenstaande probleem betreffende de overgang van het fijnkorrelige naar het grofkorrelig bodemmateriaal gezocht. In hoofdstuk 8 is aangenomen dat alleen bij km 156 een fijnkorrelige laag vrijkwam.

De bodemveranderingen in de beginkilometers van geul 1 waren veel groter dan in de rest van geul 1 en in geul 2 waren op het instorten van de geulranden na, geen grote bodemveranderingen te vinden. Aangenomen wordt dat de grofkorrelige laag vanaf km 157 t/m km 175 zich niet verplaatst, en dat het bij km 156 geërodeerde materiaal wel hierover wordt getransporteerd. Er wordt dus de aanname gedaan dat het bodemmateriaal van km 157 t/m 175 zo ruw is dat de verplaatsing hiervan niet significant is voor het model.

SOBEK kan dit probleem aan met de optie "fixed layer". Het geërodeerde fijne materiaal belandt boven de vaste laag, maar blijft zijn eigenschappen behouden en wordt doorgetransporteerd over deze laag. Voor de vaste laag moet een diepteligging worden ingevoerd. De diepte hiervan wordt verondersteld het niveau van de bodemligging in december'96 te zijn.

De in SOBEK gebruikte schematisatie van de "fixed layer" is beschreven door Struiksmas (1985). Hier volgt de beschrijving van de methode zoals die in de Technical References van SOBEK [36] beschreven is.



figuur 11.7: schematisatie fixed layer Struiksma (1985)

Voor de alluviale bodem vindt het transport plaats in de transportlaag.

$$\delta_a = \alpha_a d \quad (11.3)$$

met:

- δ_a : dikte van de transportlaag
- α_a : alluviale laag-factor
- d : waterdiepte

Als de sediment beweging beïnvloedt wordt door een vaste laag, wordt de transportlaag:

$$\delta = z_b - z_b^* \quad (11.4)$$

met:

- δ : laagdikte
- z_b : bodemdikte
- z_b^* : level van de vaste bodemlaag

Indien het sediment de vaste laag voelt, treedt er een reductie op in het transport. De transportformule wordt nu:

$$s^* = \psi \left(\frac{\delta}{\delta_a} \right) s \quad (11.5)$$

met:

- s : transportformule p.e.v. breedte
- s^* : gereduceerd sedimenttransport
- ψ : reductiefunctie

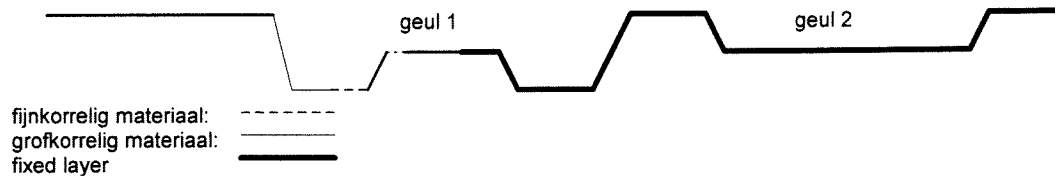
Gekozen is voor de lineaire reductiefunctie.

$$\psi \left(\frac{\delta}{\delta_a} \right) = \frac{\delta}{\delta_a} \quad (11.6)$$

Indien het grofkorrelige materiaal als fixed layer geschematiseerd wordt, moet de α_a worden bepaald. Van Rijn geeft voor de dikte van de transportlaag op de bodem $\frac{1}{2}$ x de bodemvormhoogte. Uitgaande van een ribbelhoogte in de orde van 1 m leidt dit tot $\alpha_a = \delta_a / d = 0,5 \times 1 \text{ (m)} / 7 \text{ (m)} = 0,07$. Voor α_a wordt een waarde van 0,1 in het model ingevoerd.

11.2.5 Scenario 1

Op grond van de waarnemingen uit de monitoringsgegevens en op grond van de beperkingen binnen SOBEK wordt verondersteld dat de werkelijke situatie het best benaderd wordt in het SOBEK-model uitgaande van de volgende schematisatie:



figuur 11.8: bodemligging en bodemmateriaal

Deze schematisatie wordt scenario 1 genoemd in de rest van het rapport. In hoofdstuk 12 volgen nog twee scenario's.

11.2.6 IJkresultaten

Eerst is op het grofkorrelige materiaal bij het sedimentatiefront geijkt. Aangenomen is op grond van het ontbreken van sterke erosie direct na het sedimentatiefront op de verschilkaarten en in de baggerprofielen, dat in het begin van de geul grof bodemmateriaal aanwezig is. Na het ijken op het sedimentatiefront, is er op de erosie bij km 156 geijkt. Dit leidde tot de volgende korrelgrootten.

	$D_{m,metingen}$ (in m)	$D_{m,ijking}$ (in m)	$D_{90,metingen}$ (in m)	$D_{90,ijking}$ (in m)
grofkorrelig	0,0118	0,00639	0,018	0,018
fijnkorrelig	0,000494	0,000305	0,000796	0,0045

tabel 11.1: resultaten morfologische ijking

11.3 Model

In bijlage 18 t/m 20 staan de gegevens van het model na ijking.

12 Modelberekeningen

12.1 Scenario-aanpak

In hoofdstuk 11 staat het scenario 1 beschreven. Dit scenario wordt verondersteld de werkelijke situatie het best te benaderen in het SOBEK-model.

Binnen het model bestaat grote onzekerheid over de lokatie van het fijnkorrelige en het grofkorrelige bodemmateriaal in geul 1 en in geul 2. Nagegaan wordt het geval waarbij ervan wordt uitgegaan dat overal waar gebaggerd is, de fijne laag wordt blootgelegd. Dit wordt scenario 2 genoemd. In dit scenario kan geen erosie optreden op de trajecten met "fixed layer" en zal het onverdiepte tussenstuk als een drempel aanwezig blijven.

Door te werken met de optie "fixed layer" wordt een grofkorrelige bodem vervangen door een vaste bodem, wat afwijkt van de werkelijkheid. Verondersteld werd dat het grove materiaal zo grof is dat het niet wegspoelt.

Interessant is het om na te gaan wat er in het tegenovergestelde geval gebeurt. I.p.v. een vaste laag wordt er van een fijnkorrelige laag uitgegaan op de plaatsen waar in scenario 1 de "fixed layer" was toegepast. Dit fijnkorrelige materiaal spoelt makkelijk weg. Dit wordt scenario 3 genoemd.

Scenario 3 is het enige scenario waarbij het bodemniveau op het onverdiepte tussenstuk kan dalen. Te verwachten valt dat de optredende erosie op het tussenstuk groter is dan in praktijk, aangezien in dit gebied waarschijnlijk de bovenlaag door grofkorrelig materiaal wordt gevormd.

De scenario's verschillen vanaf km 157,4 met elkaar. Scenario 1 is het extreme geval met overal een vaste bodemlaag, scenario 3 is het extreme geval met overal een heel fijnkorrelige bodem en scenario 2 is een soort overgangsscenario welke om twee redenen is meegenomen.

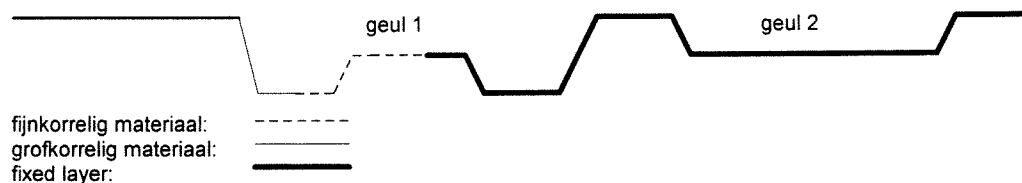
Ten eerste is de aanname van het vrijkomen van een fijne laag waar gebaggerd is en het aan de oppervlakte blijven van de grove laag waar niet gebaggerd is, een vrij reëel scenario.

Ten tweede verschilt scenario 2 heel essentieel van de overige scenario's. T.o.v. scenario 1 door de fijne laag over een veel langer traject en t.o.v. scenario 3 door het verschil bij het onverdiepte tussenstuk wat als drempel aanwezig zal blijven en mogelijk veel invloed heeft op de waterstand.

Hieronder volgt de schematisering van de drie scenario's.

scenario 1

Op grond van de veronderstelde situatie, zoals al beschreven in hoofdstuk 11



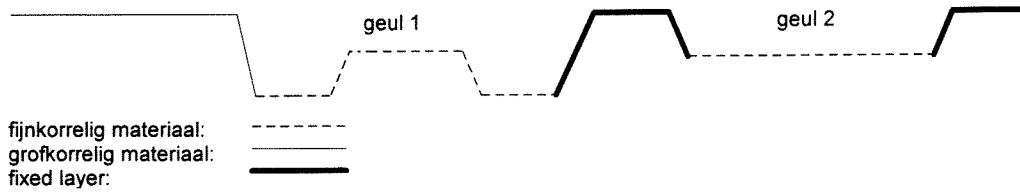
figuur 12.1: bodemmateriaal bij scenario 1

traject	bodem	D_m (in m)	D_{90} (in m)
km 147 - km 156,4	non-fixed layer	0,00639	0,018
km 156,4 - km 157,4	non-fixed layer	0,00305	0,0045
km 157,4 - km 175	fixed layer	0,00305	0,0045

tabel 12.1: bodemmateriaal bij scenario 1

scenario 2

Overal waar gebaggerd is, is een fijnkorrelige laag blootgelegd, en waar niet gebaggerd is blijft het oude materiaal aan de oppervlakte. Het oude grofkorrelige materiaal wat zich benedenstrooms van fijnkorrelig materiaal bevindt, wordt geschematiseerd als een fixed layer.



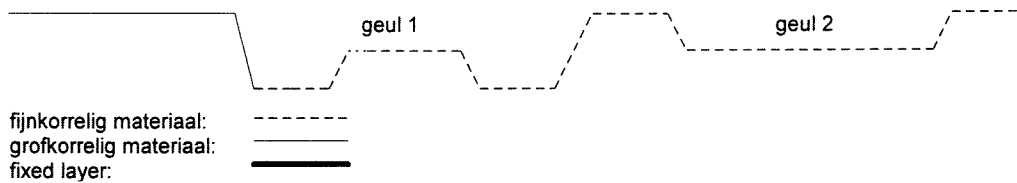
figuur 12.2: bodemmateriaal bij scenario 2

traject	bodem	D_m (in m)	D_{90} (in m)
km 147 - km 155,8	non-fixed layer	0,00639	0,018
km 155,8 - km 164	non-fixed layer	0,00305	0,0045
km 164 - km 167,5	fixed layer	0,00305	0,0045
km 167,5 - km 174,1	non-fixed layer	0,00305	0,0045
km 174,1 - km 175	fixed layer	0,00305	0,0045

tabel 12.2: bodemmateriaal bij scenario 2

scenario 3

De lagen reageren niet als fixed layer en er komt vanaf het begin van de geul overal fijnkorrelig materiaal vrij. Hierbij moet tevens in gedachten worden gehouden dat in SOBEK het eerder omschreven probleem van de drempelvorming optreedt indien op het onverdiepte tussenstuk en na geul 2 hetzelfde grofkorrelige materiaal als aan het begin van het model wordt ingevoerd.



figuur 12.3: bodemmateriaal bij scenario 3

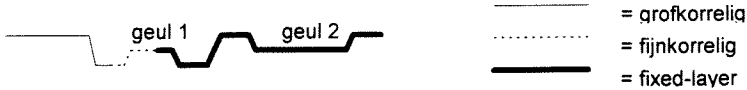
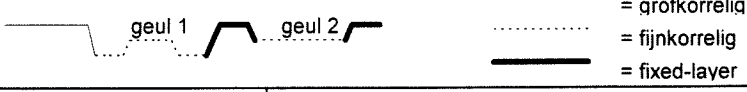
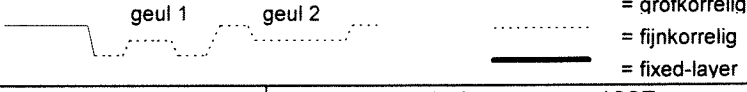
traject	bodem	D_m (in m)	D_{90} (in m)
km 147 - km 155,8	non-fixed layer	0,00639	0,018
km 155,8 - km 175	non-fixed layer	0,00305	0,0045

tabel 12.3: bodemmateriaal bij scenario 3

De onderling afwijkende modelinvoer van de respectievelijke scenario's is in bijlage 21 te vinden.

12.2 Optredende veranderingen bij $Q_{MHWS'86}$ in de periode 1997-2017:

In bijlagen 22 en 23 zijn de resultaten van de berekeningen te zien. Hieronder volgt een beschrijving van de hoofdpunten.

<p><i>scenario 1</i></p> 	
<p>grootste lokale waterstandsveranderingen t.o.v. 1997 in het stuwpand:</p> <p>-waterstandsstijging tot 2 cm -waterstandsval tot 2 cm</p>	<p>bodemveranderingen t.o.v. 1997:</p> <p>geul 1: -sedimentatie tot 1 m -erosie tot 2 m</p> <p>tussenstuk: -nauwelijks variatie</p> <p>geul 2: -sedimentatie tot 0,4 m</p>
<p><i>scenario 2</i></p> 	
<p>grootste lokale waterstandsveranderingen t.o.v. 1997 in het stuwpand:</p> <p>-waterstandsstijging tot 1 cm -waterstandsval tot 4 cm</p>	<p>bodemveranderingen t.o.v. 1997:</p> <p>geul 1: -erosie tot 1,5 m</p> <p>tussenstuk: -sedimentatie tot 0,4 m</p> <p>geul 2: -erosie tot 1,3 m</p>
<p><i>scenario 3</i></p> 	
<p>grootste lokale waterstandsveranderingen t.o.v. 1997 in het stuwpand:</p> <p>-waterstandsstijging tot 2 cm -waterstandsval tot 7 cm</p>	<p>bodemveranderingen t.o.v. 1997:</p> <p>geul 1: -erosie tot 1,5 m</p> <p>tussenstuk: -erosie tot 1,2 m</p> <p>geul 2: -sedimentatie tot 0,7 m</p>

Resultaten:

waterstanden: in de 3 scenario's ligt de waterstands verandering beneden de 10 cm.

bodemligging: t.o.v. de oorspronkelijke situatie is erosie tot 2 m en sedimentatie tot 1 m opgetreden.

n.b.: bij scenario 3 zware erosie bij het tussenstuk

12.3 Conclusies uit de scenario's

onderlinge vergelijking scenario's

Scenario 1 kenmerkt zich door relatief kleine veranderingen t.o.v. van de andere twee scenario's, zowel hydraulisch als morfologisch. Er is een sedimentatiefront zichtbaar en de ondiepte in geul 1 heeft zich in benedenstroomse richting verplaatst tot het bovenstroomse stuk van deze relatieve ondiepte de "fixed layer" heeft bereikt.

Scenario 2 kenmerkt zich door de invloed van het onverdiepte tussenstuk. Hier treedt een waterstandsval op. Verder karakteriseert scenario 2 zich door erosie in geul 2, doordat geen sediment wordt aangevoerd van de vaste laag op het onverdiepte tussenstuk en er blijkbaar meer wordt afgevoerd uit geul 2 dan er uit geul 1 aankomt.

Scenario 3 kenmerkt zich door erosie over een lang traject wat leidt tot in een waterstandsval. Dit is een gunstige ontwikkeling met het oog op hoogwaterbestrijding. Alleen aan het einde van geul 2 is nog sedimentatie opgetreden a.g.v. het bovenstroomse aangevoerde materiaal, maar te verwachten valt dat hier op termijn ook verdieping plaatsvindt. Verder vindt in scenario 3 erosie plaats op het onverdiepte tussenstuk in de orde van een meter, hetgeen van belang is met betrekking tot de gestelde eis van een toelaatbare erosie van 0 m bij de spoorbrug.

invloed op de waterstand

De maximale lokale stijging van de waterstand bij Q_{MHW} treedt op in scenario 1 en in scenario 3, namelijk 2 cm.

De maximale lokale daling van de waterstand bij Q_{MHW} treedt op in scenario 3, namelijk 7 cm.

Met het oog op de bestrijding van de hoogwateroverlast is waterstandsstijging van belang.

De waterstandsstijging is klein t.o.v. de normale overhoogte voor winterkaden. Op grond van de scenario's lijkt het dan ook waarschijnlijk dat er geen hoogwaterproblemen te verwachten zijn bij Q_{MHW} t.g.v. de veranderende waterstand veroorzaakt door de opgetreden morfologische veranderingen in de periode 1997-2017.

invloed op de bodemligging

De maximale erosie bedraagt 2 m en de maximale sedimentatie 1 m.

Voor het tussenstuk bedraagt de maximale erosie 1,2 m in scenario 3. Dit is ontoelaatbaar gezien de gestelde eis van toegestane erosie bij de constructies van 0 m en op grond hiervan is bodembescherming noodzakelijk.

onverdiepte gebied bovenstrooms van de geulen

In het onverdiepte gebied bovenstrooms van de geulen is een vrij grote bodemdaling van ongeveer 0,5 m opgetreden. In de ijkreeks, 5 maanden met daarin een periode van hoge afvoeren, trad gedurende de ijkperiode een daling van ongeveer een millimeter op. Waarschijnlijk hebben de hoge afvoeren die buiten de ijkperiode vielen een grote rol gespeeld.

13 Gevoeligheid van het model t.o.v. de monitoringsgegevens

13.1 Verschillen tussen de ijkwaarden en de monitoringswaarden

Bij het ijken van het model zijn de korrelgrootten en de bodemruwheid veranderd t.o.v. de korrelgrootten en de ruwheid uit het monitoringsonderzoek (zie tabel 13.1 en 13.2).

	$D_{m,metingen}$ (in m)	$D_{m,ijking}$ (in m)	$D_{90,metingen}$ (in m)	$D_{90,ijking}$ (in m)
grofkorrelig	0,0118	0,00639	0,018	0,018
fijnkorrelig	0,000494	0,000305	0,000796	0,0045

tabel 13.1: korrelgrootten uit monitoren en uit ijken

$C_{metingen}$ (in $m^{1/2}/s$)	C_{ijking} (in $m^{1/2}/s$)
41	45

tabel 13.2: Chézy-waarde uit monitoren en uit ijken

Wat opvalt is het verschil in grootte tussen de meetwaarden uit de monitoringsgegevens en de ijkwaarden. Vandaar dat dit gevoeligheidsonderzoek gericht is op het vergelijken van de resultaten uitgaande van de meetwaarden en van de ijkwaarden.

Eerst is de geijkte korrelgrootte van het fijne materiaal vervangen door de monitoringwaarde, en gekeken naar het verschil in bodemligging in 2017. Verder is bekeken wat voor extra waterstandsvaling in 2017 wordt bewerkstelligd t.o.v. de waterstand in 2017 bij het geijkte model.

Daarna is de geijkte Chézy-waarde van $45 m^{1/2}/s$ vervangen door een Chézy-waarde van $40 m^{1/2}/s$. Voor de korrelgrootten worden de geijkte waarden ingevuld. Gekeken is naar de bodemligging in 2017 en hoe deze t.o.v. het geijkte geval is. Wat betreft de waterstandsveranderingen is eerst de waterstand bekeken wat de waterstand in het geijkte model in 1997 bedroeg, maar met een $C = 40 m^{1/2}/s$. Dit is gedaan, omdat door het vervangen van de Chézy-waarde van $45 m^{1/2}/s$ door $40 m^{1/2}/s$ de waterstand al in de beginsituatie stijgt zonder dat dit door een optredende morfologische verandering is gebeurd. Vandaar dat de waterstandsvalingen in 2017 zijn berekend t.o.v. de waterstand in 1997, waarbij bij beiden uitgegaan was van $C = 40 m^{1/2}/s$.

13.2 Terugbrengen van de rekentijd

Met tijdstappen van 1 uur duurt het maken van een run voor een periode van 20 jaar ongeveer een dag. Om de rekentijd te verkorten is de lengte van de tijdstap vergroot, wat gezien het gebruik van decadegemiddelde afvoeren bij de lange termijnberekeningen een voor de hand liggende stap was. Omdat met decadegemiddelde afvoeren wordt gerekend, moet de gekozen tijdstap nog wel kleiner dan 10 dagen zijn. Verder mogen de hydraulische fluctuaties tussen 2 opeenvolgende rekenstappen niet te groot zijn omdat dan, zoals in 10.2.1 vermeld was, het model dan instabiel kan worden. Een tijdstap van 2 dagen bleek stabiel en ligt binnen 10 dagen.

De optredende bodemveranderingen over 20 jaar bij de oorspronkelijke scenario's met een tijdstap van 1 uur zijn vergeleken met de bodemveranderingen over 20 jaar bij de oorspronkelijke scenario's met een tijdstap van 2 dagen. Hiertussen bleek geen verschil. (zie bijlage 24)

De maximale verschillen waren bij scenario 1 7 cm, bij scenario 2 9 cm en bij scenario 3 8 cm.

In de meeste gevallen bedroeg het verschil 0 cm en afwijkingen van 1 cm kwamen relatief ook nog veel voor. Deze extra bodemveranderingen vallen in het niet bij de optredende bodemveranderingen, aangezien deze laatsten in de orde van een meter liggen. Op grond hiervan is geconcludeerd dat er geen bezwaren zijn tegen het terugbrengen van de stapgrootte naar 2 dagen.

Door de tijdstap zover terug te brengen, daalt de rekentijd voor een run voor een periode van 20 jaar tot minder dan een uur en kunnen binnen korte tijd meer runs worden gemaakt.

Bij de verdere runs in dit hoofdstuk is steeds een tijdstapgrootte van 2 dagen gebruikt.

13.3 Invloed van de korreldiameter uit het onderzoek

In bijlagen 25 en 26 zijn de resultaten van de berekeningen te zien.

<p>scenario 1</p>	
<p>grootste lokale waterstandsveranderingen t.o.v. het geijkte model in 2017 in het stuwband:</p> <p>-waterstandsstijging tot 1 cm -waterstandsval tot 2 cm</p>	<p>bodemveranderingen t.o.v. het geijkte model in 2017:</p> <p>geul 1: -erosie tot 6,6 m</p> <p>tussenstuk: -nauwelijks variatie</p> <p>geul 2: -nauwelijks variatie</p>
<p>scenario 2</p>	
<p>grootste lokale waterstandsveranderingen t.o.v. het geijkte model in 2017 in het stuwband:</p> <p>-waterstandsstijging tot 3 cm -waterstandsval tot 3 cm</p>	<p>bodemveranderingen t.o.v. het geijkte model in 2017:</p> <p>geul 1: -erosie tot 5 m</p> <p>tussenstuk: nauwelijks variatie</p> <p>geul 2: -erosie tot 0,8 m -sedimentatie tot 1,8 m</p>
<p>scenario 3</p>	
<p>grootste lokale waterstandsveranderingen t.o.v. het geijkte model in 2017 in het stuwband:</p> <p>-waterstandsstijging tot 3 m -waterstandsval tot 3 cm</p>	<p>bodemveranderingen t.o.v. het geijkte model in 2017:</p> <p>geul 1: -erosie tot 4,6 m</p> <p>tussenstuk: -sedimentatie tot 0,6 m -erosie tot 0,5 m</p> <p>geul 2: -sedimentatie tot 1 m -erosie tot 0,4 m</p>

Resultaten:

waterstanden: de variatie in de waterstanden in 2017 t.o.v. de resultaten uit het geijkte model bedraagt 3 cm.

bodemligging: een extra erosie tot 6,6 m en een extra sedimentatie tot 1,8 m in 2017 treedt op t.o.v. de resultaten uit het geijkte model.

13.4 Invloed van de Chezy-waarde uit het onderzoek

In bijlagen 27 en 28 zijn de resultaten van de berekeningen te zien.

<p><i>scenario 1</i></p> <p style="text-align: right;"> </p>	
<p>grootste lokale waterstandsveranderingen t.o.v. 1997 in het stuwpand:</p> <p>-waterstandsstijging tot 2 cm -waterstandsval tot 1 cm</p>	<p>bodemveranderingen t.o.v. het geijkte model in 2017:</p> <p>geul 1: -erosie tot 1,5 m</p> <p>tussenstuk: -nauwelijks variatie</p> <p>geul 2: -nauwelijks variatie</p>
<p><i>scenario 2</i></p> <p style="text-align: right;"> </p>	
<p>grootste lokale waterstandsveranderingen t.o.v. 1997 in het stuwpand:</p> <p>-waterstandsstijging tot 2 cm -waterstandsval tot 6 cm</p>	<p>bodemveranderingen t.o.v. het geijkte model in 2017:</p> <p>geul 1: -sedimentatie tot 0,4 m -erosie tot 0,4 m</p> <p>tussenstuk: -nauwelijks variatie</p> <p>geul 2: -erosie tot 1,5 m</p>
<p><i>scenario 3</i></p> <p style="text-align: right;"> </p>	
<p>grootste lokale waterstandsveranderingen t.o.v. 1997 in het stuwpand:</p> <p>-waterstandsval tot 10 cm</p>	<p>bodemveranderingen vergeleken met het geijkte model in 2017:</p> <p>geul 1: -nauwelijks variatie</p> <p>tussenstuk: -erosie tot 0,9 m</p> <p>geul 2: -erosie tot 1 m</p>

Resultaten:

waterstanden: een variatie in de waterstanden tot 10 cm t.o.v. de waterstanden in 1997 bij $C = 40 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ treedt op.

bodemligging: t.o.v. de resultaten van het geijkte model in 2017 treedt extra erosie op tot 1,5 m en extra sedimentatie tot 0,4 m.

13.5 Conclusies uit het gevoeligheidsonderzoek

13.5.1 Gevoeligheid t.a.v. de korreldiameter

invloed op de waterstand

De invloed op de waterstand in de scenario's is gering; waterstandsvariaties t.o.v. de oorspronkelijk scenario's t/m 3 cm.

invloed op de bodemligging

De invloed op de bodemligging is zeer groot. Een extra erosie tot 6,6 m wordt gevonden bovenop een maximale erosie van 2 m bij de geijkte modellen.

13.5.2 Gevoeligheid t.a.v. de Chezy-waarde

invloed op de waterstand

Gekeken is wat het verschil is tussen de waterstand in het oorspronkelijke model bij $C = 40 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ in 1997 en de waterstand bij $C = 40 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ in 2017.

Dit leidde tot een verschil van 10 cm, wat groter is dan bij $C = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, maar nog steeds betrekkelijk gering is gezien de normale waakhoogten en overhoogten van kaden.

invloed op de bodemligging

De invloed op de bodemligging uit zich in een maximale extra erosie tot 1,5 m bij een erosie van 2 m in de geijkte modellen.

13.5.3 Conclusies naar het model

De invloed op de waterstand bij Q_{MHW} is in beide gevallen gering; tot 10 cm. Geconcludeerd wordt dat de scenario's vrij ongevoelig zijn voor wat betreft de waterstanden.

De invloed op de veranderingen in de bodemgeometrie is bij variabele Chézy-waarden groot; 1,5 m extra erosie tegenover de optredende erosie van 2 m.

Bij de korrelgrootten is de invloed op de veranderingen nog groter; tot 6,6 m. Uitgaande van de gestelde eis voor toegestane erosie, 0 m erosie bij de constructies, is de grootte van de mogelijke bodemveranderingen significant

Gezien de grootte van de optredende bodemveranderingen die hierdoor veroorzaakt kunnen worden (in de orde van meters), is het niet verantwoord dit aspect terzijde te schuiven. T.a.v. de aanbevelingen wordt dan ook opgemerkt dat het nemen van meer bodemmonsters nodig lijkt. Meer zekerheid is nodig omtrent de korrelgrootten van het aanwezige bodemmateriaal en de trajecten waarop een bepaalde korrelgrootte van toepassing is.

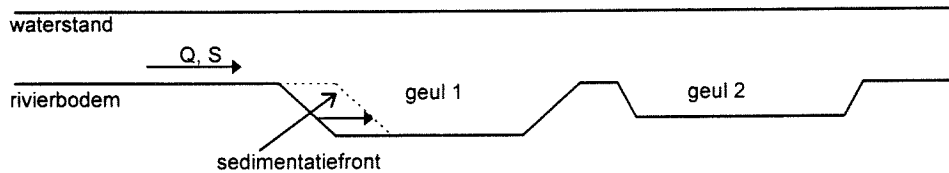
deel IV

Eindresultaten

deel IV: eindresultaten

14 Kwalitatieve opmerkingen t.a.v. eventueel onderhoud

In het onderzoek is uitgegaan van de situatie dat men geen onderhoud aan de geulen pleegt. Indien dit wel gebeurt, is het misschien mogelijk om op lange termijn een nieuwe evenwichtssituatie met een gewenste bodemligging te realiseren, waarbij het bodemmateriaal zich aan deze situatie heeft aangepast (met betrekking tot de fijne laag, etc.) en aan het begin van de geulen een deel van het sediment opvangen wordt. In de onderstaande beschouwing wordt aangenomen dat er benedenstrooms een geschikte evenwichtssituatie is ontstaan en alleen bovenstrooms onderhoud nodig is in de vorm van het weghalen van het neergeslagen materiaal van het sedimentatiefront bij geul 1.



figuur 14.1: sedimentatiefront

Geprobeerd is met het model van scenario 1 hier wat over te zeggen, door te proberen na verloop van een periode van 5 jaar het sedimentatiefront in geul te verwijderen. Dit bleek op korte termijn niet eenvoudig, gezien het feit dat een SOBEK-model eigenlijk alleen geschikt is voor het specifieke probleem waarvoor het ontworpen is, en verder weinig flexibel is. Vandaar dat hier verder geen aandacht is besteed, behalve dat hieronder een paar kwalitatieve opmerkingen zijn geplaatst.

Het periodiek verwijderen van het sedimentatiefront is op te vatten als een lokale sedimentonttrekking. Indien een lokale onttrekking bij een onverstoorde, niet verdiepte rivier uitgevoerd wordt, valt uit de basisvergelijkingen voor de beweging van water en sediment af te leiden hoe de benedenstroomse waterdiepte en het bodemverhang veranderen [24].

basisvergelijkingen voor beweging:

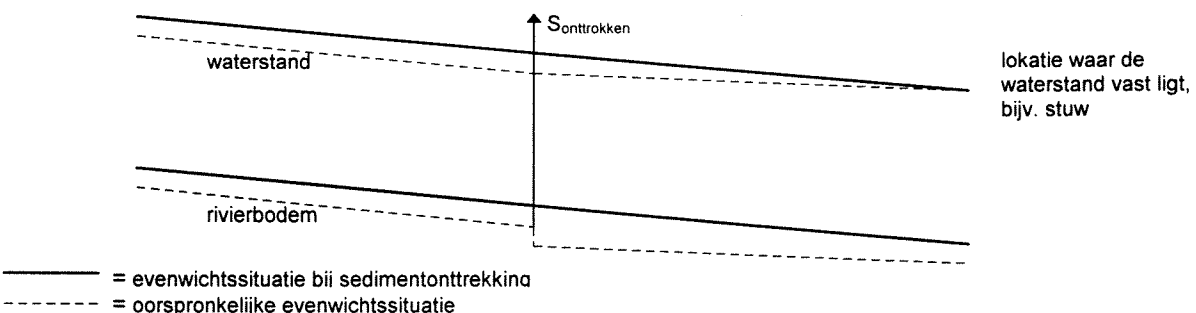
$$\text{water:} \quad Q = CBa^{3/2}i^{1/2} \quad (14.1)$$

$$\text{sediment:} \quad S = Bmu^n \quad (14.2)$$

hieruit valt af te leiden:

$$\text{waterdiepte:} \quad \frac{a_1}{a_0} = \left[1 - \frac{S_{\text{ontrokken}}}{S_0} \right]^{-1/n} \quad (14.3)$$

$$\text{boderverhang:} \quad \frac{i_1}{i_0} = \left[1 - \frac{\Delta S}{S_0} \right]^{3/n} \quad (14.4)$$



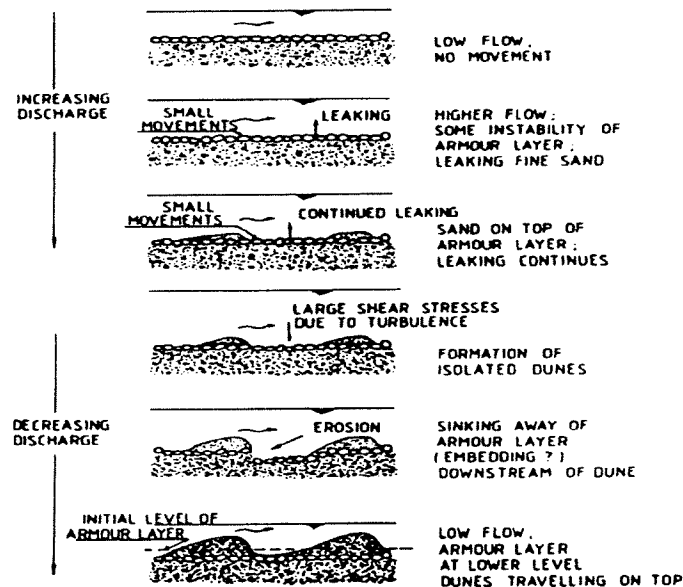
figuur 14.2: lokale sedimentonttrekking

In een dergelijke situatie moet de benedenstroomse waterdiepte toenemen en het verhang afnemen in de vorm van een autonome bodemdaling. Dit zou in een dergelijke situatie dus op het onderzochte traject kunnen optreden.

15 Afpleistering

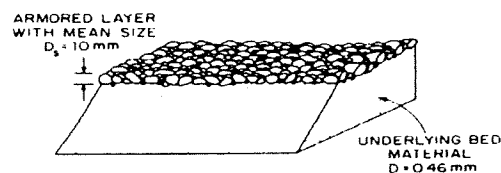
Een aspect wat niet het model kon worden meegenomen is afpleistering. Afpleistering is het proces waarbij het grofkorreliger bodemmateriaal op de bodem achterblijft t.o.v. het fijnkorreliger materiaal wat getransporteerd wordt. Het bodemmateriaal vormt dan niet meer direct een goede beschrijving voor het getransporteerde materiaal.

In de Maas speelt een dergelijk proces een rol. Door Klaassen (1990) [11] is waargenomen dat in de Maas gedurende de perioden met lage afvoeren een afpleisteringslaag wordt gevormd. Tijdens perioden met hoge afvoeren kan deze laag opengeboken worden en tijdens perioden met lage afvoeren kan de laag zich weer herstellen.



figuur 15.1: schematisatie van het openbreken van de afpleisteringslaag bij een hoogwater, volgens Klaassen (1990)

Door afpleistering kan de laag op de bodem van de rivier sterk variëren met het oorspronkelijke materiaal. Als voorbeeld hiervan staat hieronder de schematische voorstelling van afpleisteringslaag bij Gavins Point Dam in de Missouri.



figuur 15.2: schematische voorstelling afpleisteringslaag bij Gavins Point Dam

Het lijkt niet onwaarschijnlijk dat een dergelijk proces zich ook in de Maas zal voordoen op de lokaties met de fijnkorrelige bodem, en dat de erosie niet zover doorgaat als uit de berekeningen blijkt. Het materiaal uit de bodemboringen vormt geen goede beschrijving zijn voor zo'n afpleisteringslaag.

Verder is in het rapport is al naar voren gekomen dat het opgevangen materiaal bij de sedimenttransportmetingen veel fijner is dan het grove bodemmateriaal in de rivier dat uit de bodemboringen naar voren kwam. Indien verondersteld wordt dat het grove materiaal redelijk overeenkomt met het oorspronkelijke bodemmateriaal, betekent dit dat het bodemmateriaal niet direct een goede beschrijving vormt voor het getransporteerde materiaal.

Het rekenen met een model waarin van uniform sediment op een traject wordt uitgegaan, zoals het geproduceerde SOBEK-model, is eigenlijk vooral geschikt voor situaties waarbij het materiaal in de rivier zich ook als uniform materiaal gedraagt en waarin liefst niet al te sterke tijdseffecten een rol spelen, hetgeen hier niet het geval is.

Hieruit blijkt dat de aanname van uniform sediment geen goede schematisatie vormt. Het materiaal zal opgesplitst moeten worden in meerdere klassen en er zal gegradeerd gerekend moeten worden.

16 Eindconclusies en aanbevelingen

16.1 Hoofdconclusie

De volgende problemen traden op:

- Serieuze problemen ontstaan in het model bij de overgang van bovenstrooms fijnkorrelig materiaal naar benedenstrooms grofkorrelig materiaal op het traject km 156-km 157. SOBEK gaat met dit soort overgangen om als met een interne randvoorwaarde, en getransporteerd sediment kan van korrelgrootte veranderen, doordat het over deze overgangen wordt getild. Indien grofkorrelig materiaal in een gebied belandt met een fijnkorrelige bodem, geldt het als fijnkorrelig, en omgekeerd. Bij het onderzochte probleem kwam dit duidelijk naar voren door drempelvorming in grofkorrelig gebied benedenstrooms van fijnkorrelig gebied. Het omgekeerde zal ook plaatsvinden. Grofkorrelig materiaal dat in een gebied met fijnkorrelig materiaal belandt zal als fijnkorrelig gelden en sneller getransporteerd worden in het model, dan in werkelijkheid, en zal tot sterkere erosie leiden. Er zal geen afpleistering kunnen plaatsvinden, wat de erosie remt. Hierbij moet worden opgemerkt dat in de Maas wel afpleistering is waargenomen. Gezien de waargenomen grote verschillen in fijnkorrelig en grofkorrelig materiaal in het onderzochte gebied is het bovenstaande een groot probleem.
- Bij de sedimentvangsten bij de transportmetingen bleek het opgevangen materiaal van het bodemtransport erg fijn vergeleken met het bodemmateriaal in het gebied. Voor het opgevangen materiaal gold $D_{90} \approx 1,5$ mm en een $D_m \approx 0,8$ mm tegenover het aanwezige bodemmateriaal met $D_{90} \approx 18$ mm en $D_m \approx 11,8$ mm. Hieruit blijkt dat de aanname van uniform sediment niet goed opgaat. SOBEK rekent met uniform sediment en gaat ervan uit dat het getransporteerde materiaal gelijk is aan het bodemmateriaal, hetgeen hier niet het geval is.

Geconcludeerd wordt dat het probleem zich niet goed laat beschrijven met een model dat uitgaat van de aanname van uniform sediment, omdat de korrelgrootten in het gebied te sterk verschillen. Een proces als afpleistering kan niet worden meegenomen, terwijl dit wel relevant is. SOBEK-berekeningen met uniform sediment zijn dan ook niet geschikt voor het onderzochte probleem. De oplossing moet gezocht worden in gegradeerd rekenen.

16.2 Overige conclusies

Vanuit het model worden de volgende conclusies getrokken:

conclusie t.a.v. de waterstand

Gekeken is wat de consequentie van de veranderde bodemgeometrie in de periode 1997-2017 voor de waterstand bij $Q_{MHW} = 3826$ m³/s. De verandering van de waterstand in 2017 t.o.v. 1997 in het model is kleiner dan 10 cm. Deze waarde blijkt bovendien vrij ongevoelig te zijn voor variaties in de Chézy-waarde en de korrelgrootte.

Gezien de gebruikelijke overhoogte bij dijken is dit probleem niet al te groot.

Geconcludeerd wordt dat er weinig veranderingen in de waterstanden zijn te verwachten voor wat betreft Q_{MHW} en dat dit vermoedelijk niet tot grote problemen zal leiden.

conclusies t.a.v. de bodemveranderingen

De variaties in de bodemligging kunnen groot zijn. Met betrekking tot de veiligheid van de aanwezige spoorbrug en de aanwezige leidingen onder de rivier op het traject km 164-km 166 is voorzichtigheid geboden. Op grond van de berekeningen lijken lokale erosieprocessen in de geulen in de orde van meters niet onmogelijk t.p.v. het fijnkorrelige bodemmateriaal. Gezien de eis aan toegestane erosie die men stelde van 0 m erosie bij de constructies, is dit ontoelaatbaar en lijkt bodembescherming bij de constructies noodzakelijk.

Een duidelijke uitspraak over de optredende erosie is onverantwoord gezien de hoofdconclusie van het rapport, de grote onzekerheden over het aanwezige bodemmateriaal in geul 2 en de grote gevoeligheid van het model ten aanzien van de gevonden ijkwaarden voor de korrelgrootte en de Chézy-waarde vergeleken met de gevonden korrelgrootte en Chézy-waarde uit de gegevens van het monitoringsonderzoek.

16.3 Aanbevelingen

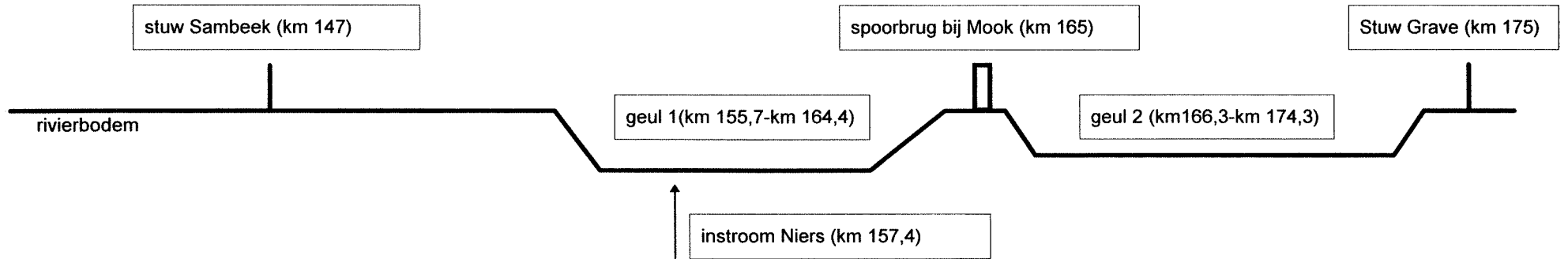
Nader onderzoek betreffende de volgende aspecten wordt aanbevolen:

- Gezien de hoofdconclusie wordt aanbevolen onderzoek te doen naar de mogelijkheden van gegradeerd rekenen voor de baggergeulen.
- Onderzoek naar het nodige onderhoud van de geulen en de hydraulische en morfologische consequenties hiervan. Aandachtspunten zijn wat er moet gebeuren met het sediment dat vrijkomt bij het baggeren en of dit bijvoorbeeld benedenstrooms van de geulen weer in de rivier moet worden teruggebracht.
- Er moeten bodemboringen in geul 2 verricht worden om een beeld te krijgen van het daar aanwezige materiaal op de bodem en in de onderliggende lagen.
- Er moet een gedegen onderzoek komen naar de vrijkomende lagen. Hierbij valt te denken aan aandacht voor de ontstaansgeschiedenis van de betreffende lagen. Nuttig is het te weten of de fijne laag bijvoorbeeld een alluviale, een fluviale of een eolische ontstaansgeschiedenis heeft, omdat men hieruit inzicht opdoet waar deze laag zich nog meer kan bevinden.
- De herkomst van het materiaal dat bij de Niers sedimenteert moet worden nagegaan. Het zou van de Niers afkomstig kunnen zijn, maar het zou ook bovenstrooms zijn oorsprong kunnen hebben, namelijk het geërodeerde materiaal bij km 156. Mogelijk dat stuweffecten van de instroom van de Niers een rol spelen bij het samenvallen van de lokatie met sterke sedimentatie met de plaats waar de Niers de Maas instroomt.
- Aandacht moet worden geschonken aan het hoge zwevende transport en het fluxprofiel zoals dat uit de AZTM-metingen naar voren komt. Allereerst is de verhouding bodemtransport : zwevend transport bij de sedimenttransportmetingen klein gezien de verhouding $u_* : w_s$, door het hoge zwevende transport. Verder is het fluxprofiel opmerkelijk. De afname van onder naar boven in dit profiel bedraagt ongeveer 50%. Bij de eenvoudige beschouwing in het onderzoek kwam een factor 10^{-7} naar voren. Dit is mogelijk weer veel te laag, maar het betrof hier een eenvoudige ordebeschouwing. Bij een onderzoek valt te denken aan de volgende zaken:
 - 1) Gezien het hoge zwevende transport in absolute zin en het flauwe fluxprofiel is er mogelijk een meetfout of een fout in de gegevensmanipulatie opgetreden.
 - 2) De rol van de ondergrens van de gekozen korrelgrootte van het materiaal dat men bij de metingen nog meeneemt, namelijk $53 \mu\text{m}$.
 - 3) Onderzoek in het winterbed naar het daar neerslaande materiaal. Mogelijk dat hier veel zwevend transport neerslaat wat zou kunnen verklaren waar dit materiaal blijft.
- Nader onderzoek naar de betrouwbaarheid van kuberingen uit DTM-bestanden, of naar geschikte werkwijzen om hiermee om te gaan. Bij het laatste valt bijvoorbeeld te denken aan het gebruik van kuberingen over langere periode of kuberingen waarin aandacht wordt geschonken aan lokale processen. Inzicht in de grootte van de onnauwkeurigheid t.o.v. de gemeten grootte zou zeer nuttig kunnen zijn. Aandacht voor de gebruikte meetmethoden en gevolgde meetprocedures bij de lodingen waaruit de DTM's zijn afgeleid, zou mogelijk tot inzicht kunnen leiden in de onnauwkeurigheid van de kuberingen.

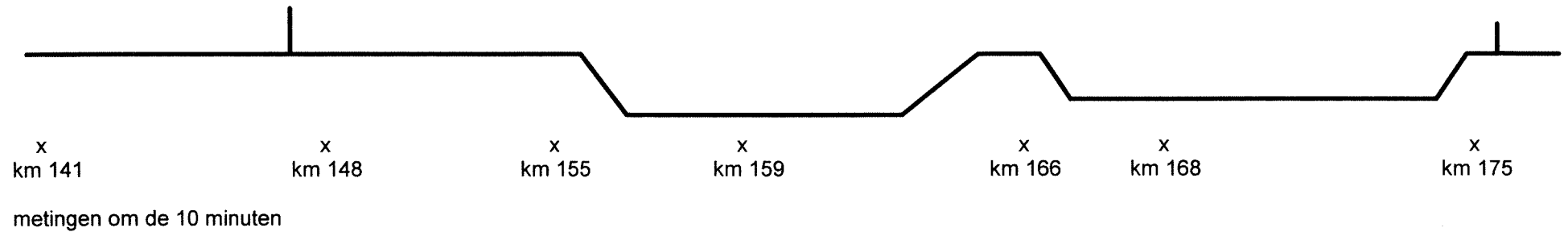
Bijlagen

Bijlage 1a: Schematisch overzicht gebied en plaatsen waar metingen zijn uitgevoerd

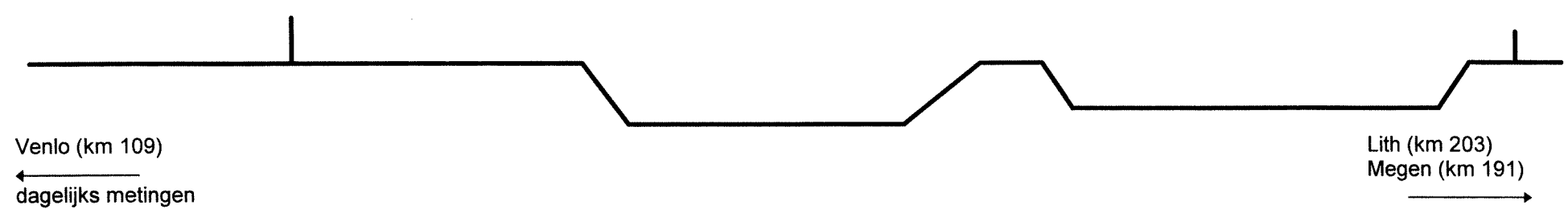
gebiedsschematisatie:



lokaties waterstandsmetingen:

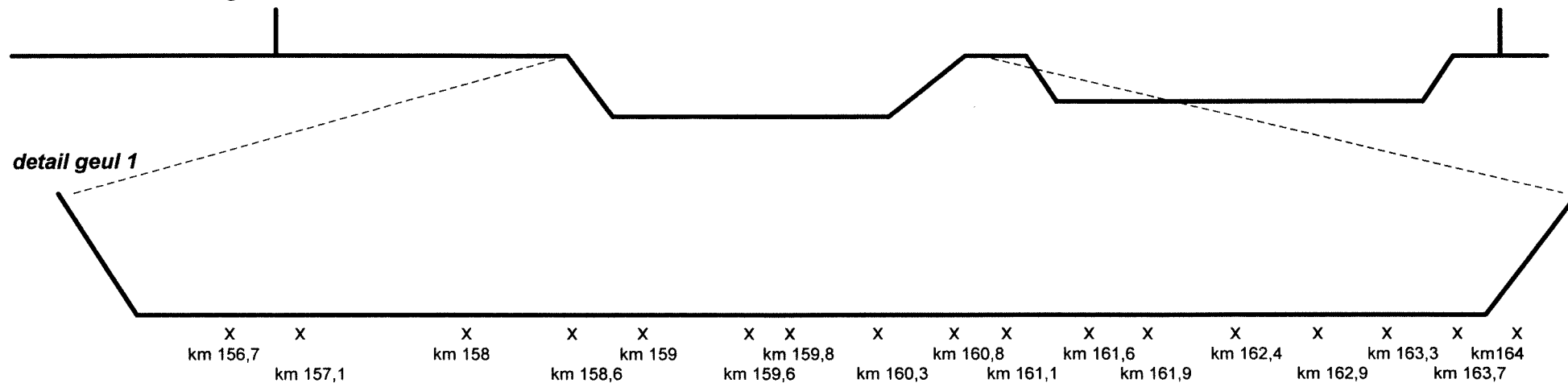


lokaties debietmetingen:



Bijlage 1b: Schematisch overzicht gebied en plaatsen waar metingen zijn uitgevoerd

lokaties bodemboringen:

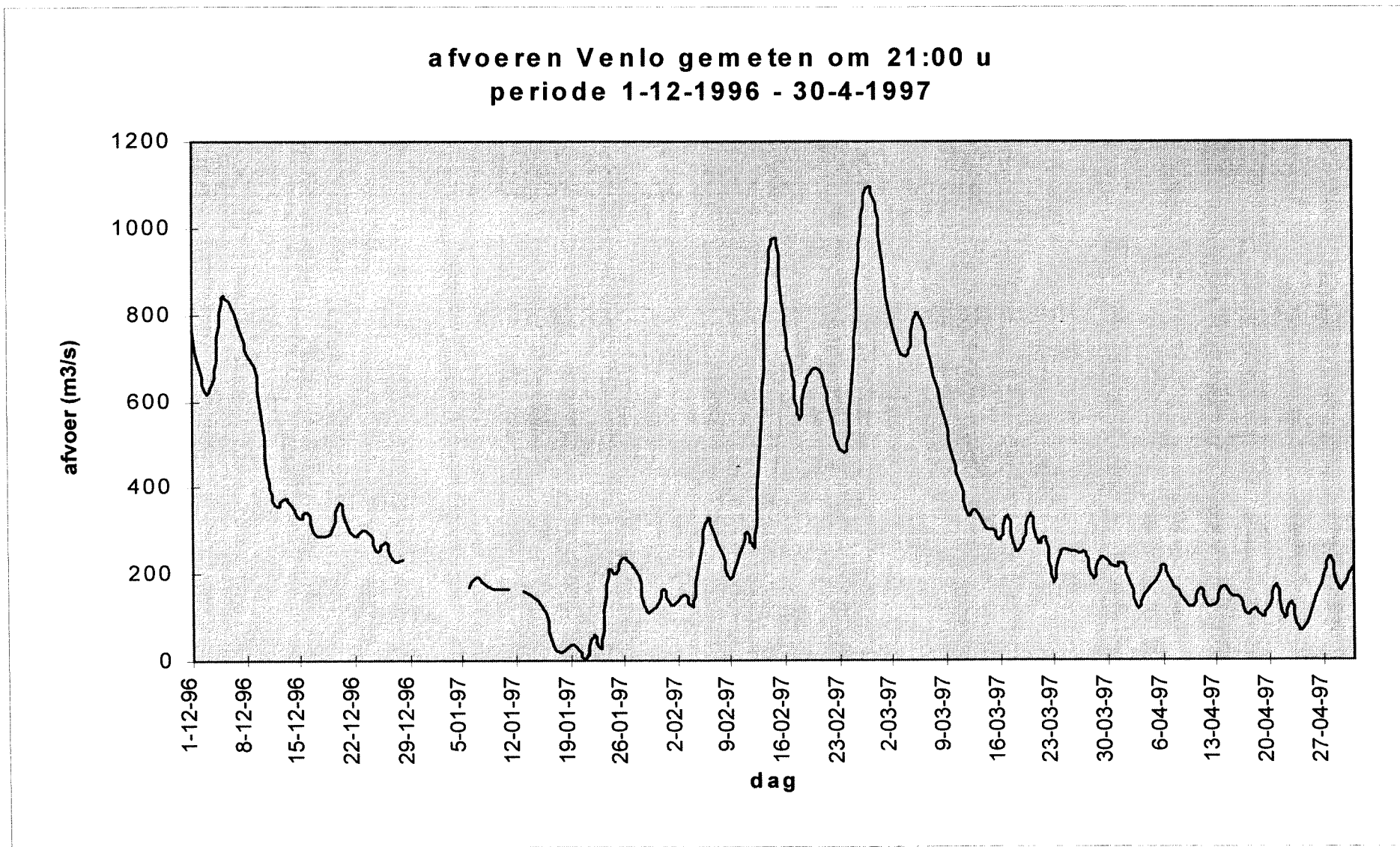


lokatie transportmetingen:



meetdagen: 15-2-'97
19-2-'97
26-2-'97
27-2-'97
28-2-'97
1-2-'97

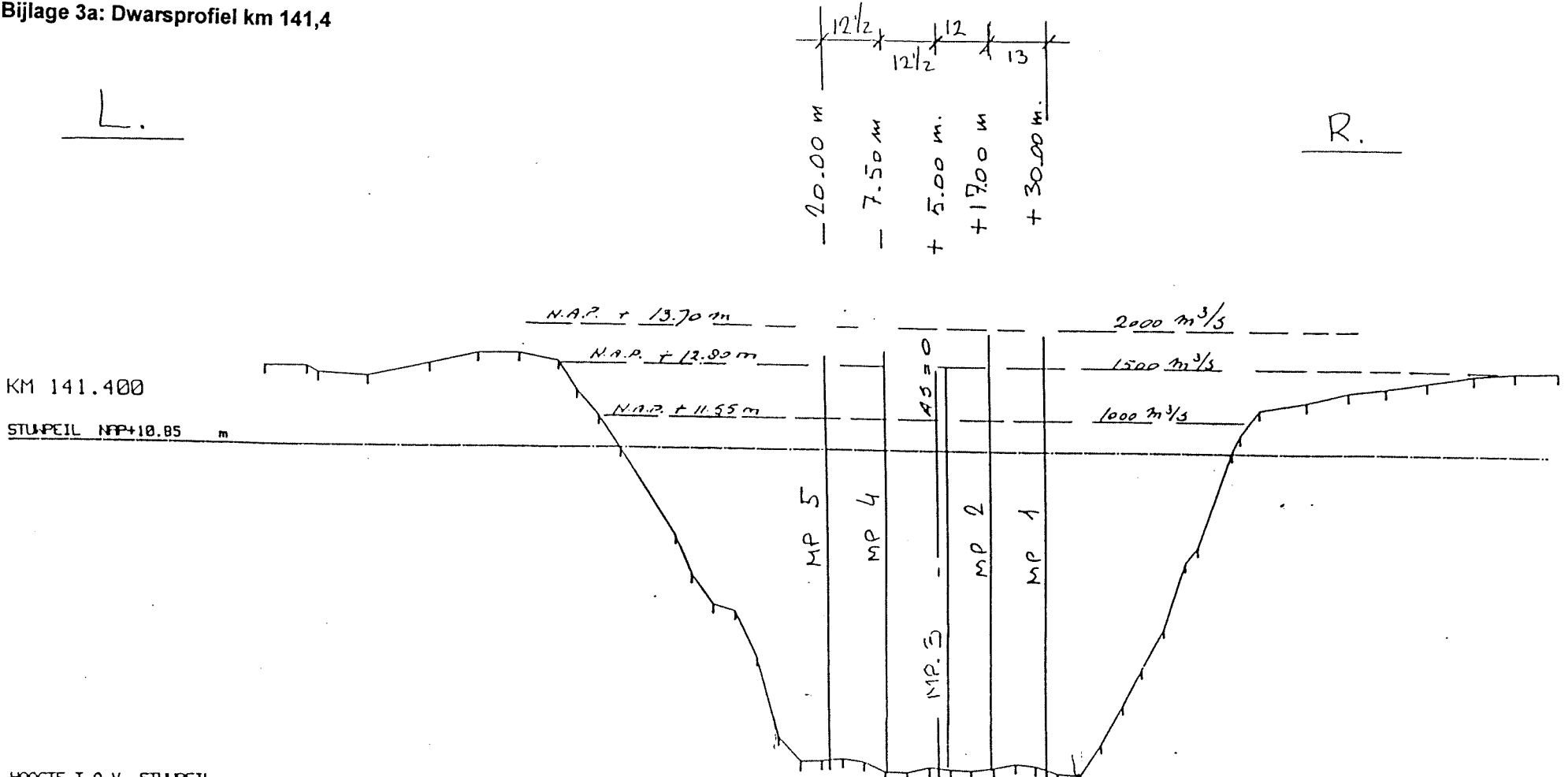
Bijlage 2: Afvoeren Venlo gemeten om 21.00 u, periode 1-12-1996 - 30-4-1997



Bijlage 3a: Dwarsprofiel km 141,4

L.

R.



STUWPEIL NFP+10.85 m

HOOGTE T.O.V. STUWPEIL

AFSTAND UIT HET NULPUNT

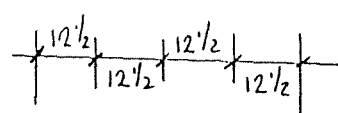
-156.819	+1.750
-146.920	+1.735
-144.262	+1.610
-132.620	+1.540
-119.050	+1.040
-106.504	+2.000
-96.876	+2.000
-87.702	+1.915
-83.500	+1.270
-78.458	+0.633
-73.565	-0.000
-61.214	-1.961
-57.473	-2.823
-52.514	-3.505
-47.535	-3.653
-42.500	-4.654
-37.640	-6.461
-32.530	-7.000
-27.500	-6.957
-22.511	-6.955
-17.530	-7.061
-12.624	-7.237
-7.542	-7.243
-2.305	-7.121
+2.489	-7.174
+7.201	-7.195
+12.604	-7.133
+17.711	-7.003
+22.330	-7.073
+27.370	-7.237
+32.572	-7.274
+37.551	-6.557
+42.863	-5.652
+47.424	-4.877
+52.630	-3.957
+57.864	-2.463
+60.007	-2.100
+63.360	+0.000
+71.414	+0.400
+76.110	+0.860
+87.155	+1.140
+97.240	+1.360
+106.020	+1.450
+115.555	+1.600
+126.362	+1.760
+135.064	+1.870
+146.105	+1.063

GET	DECON	GET	SOFFEL X.Y
KUNSTMAATSTAF	DIR. LINDERS	YED. 200	11.1000
Maas			11.1000
Polling 1995			12071111.10
IWI0141.400			26-711-26
Datafile: comasie9500a1			
Opgenomen: 01-Jun-78			

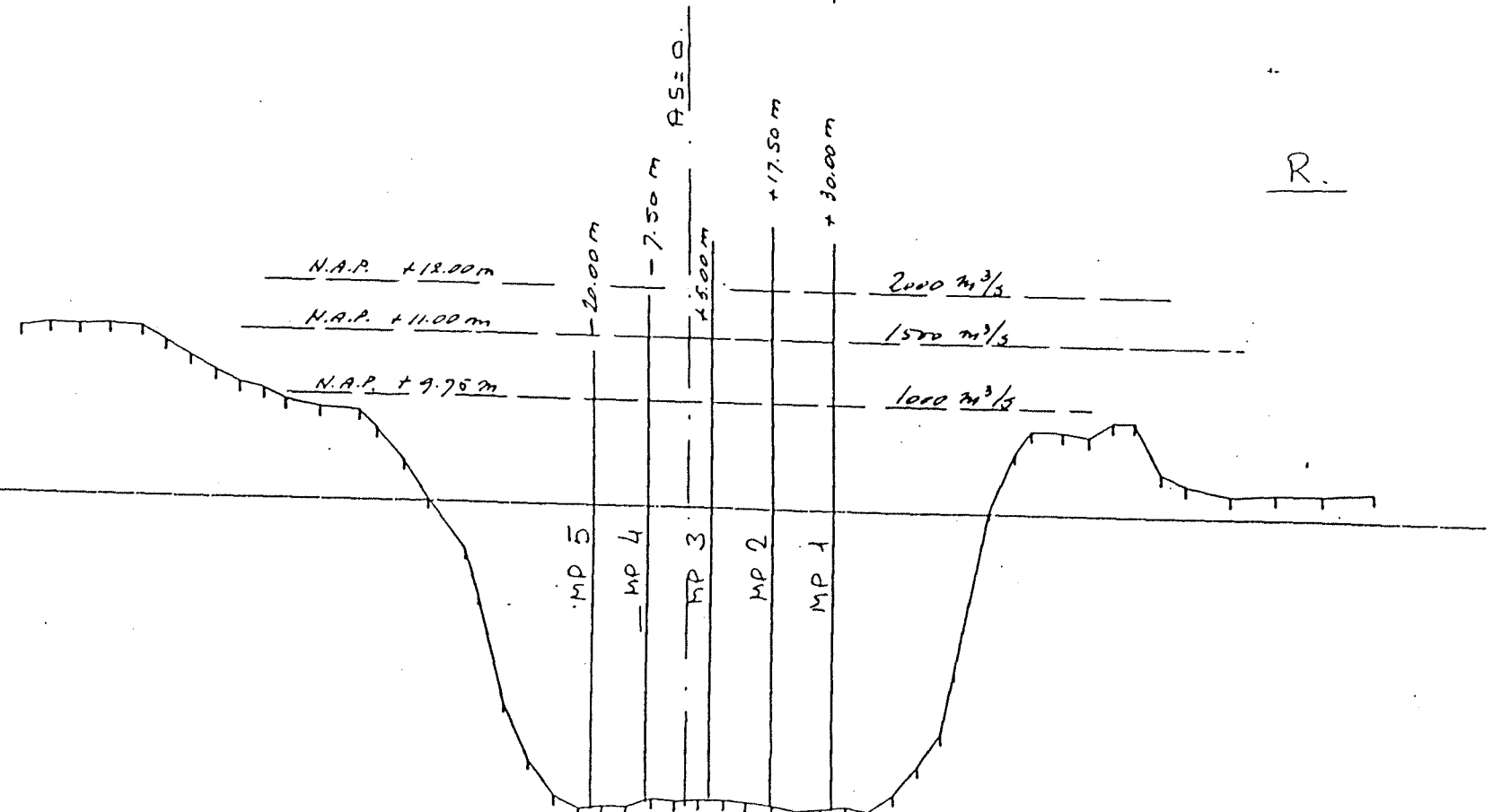
Bijlage 3b: Dwarsprofiel km 158,8

L.

R.



KM 158.800
 STUPEIL NFP+7.60 m

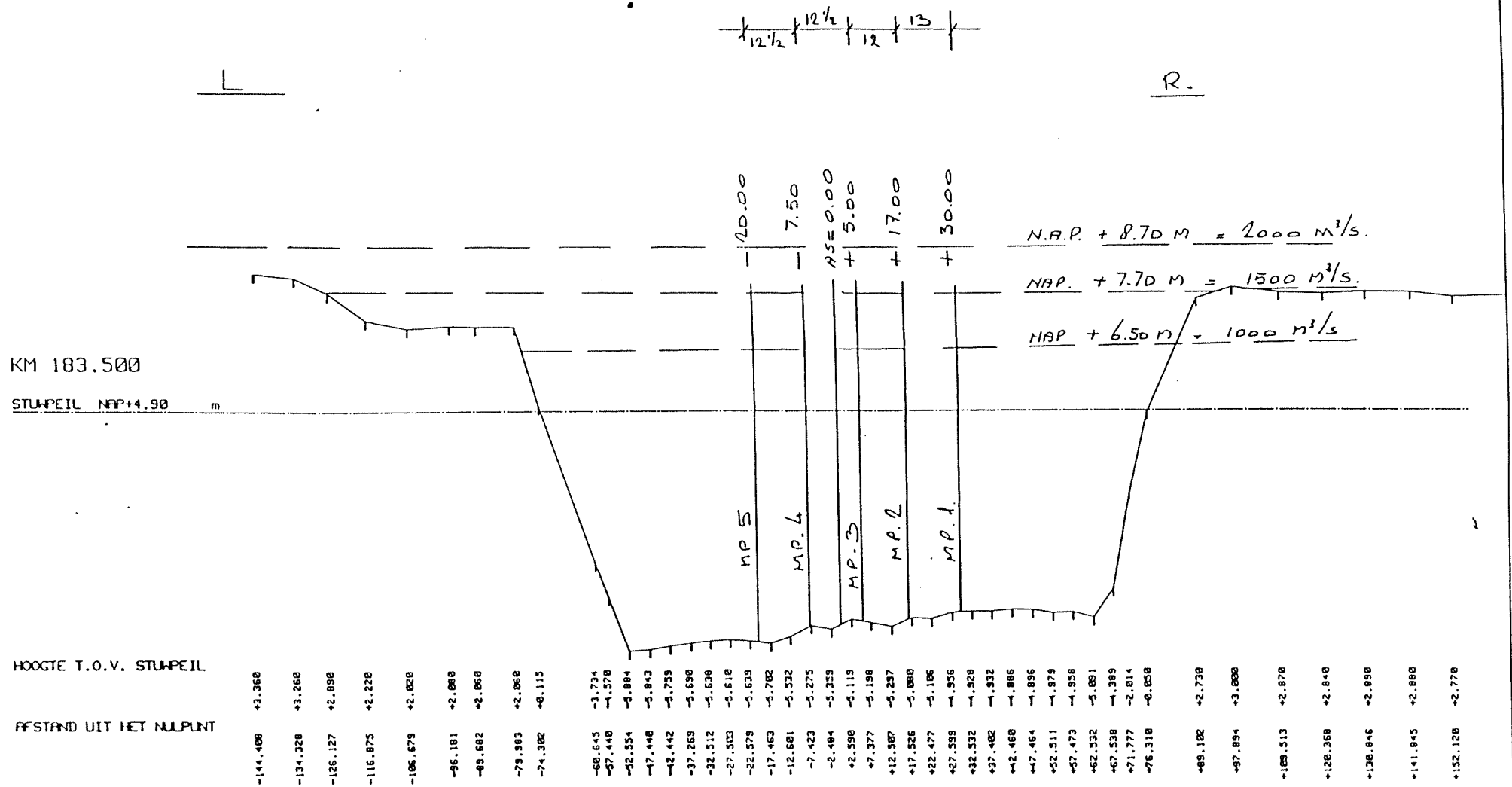


HOOGTE T.O.V. STUPEIL
 AFSTAND UIT HET NULPUNT

-136.488	+3.258
-138.447	+3.348
-124.491	+3.328
-118.351	+3.358
-111.781	+3.318
-106.968	+3.848
-102.811	+2.768
-96.856	+2.488
-91.966	+2.268
-86.967	+2.158
-82.372	+1.848
-75.265	+1.812
-67.846	+1.768
-63.364	+1.485
-57.866	+8.777
-53.815	+8.808
-43.378	+8.937
-42.689	-1.833
-37.412	-3.932
-32.438	-5.848
-27.284	-5.754
-22.158	-6.813
-17.427	-8.943
-12.438	-9.852
-7.283	-9.781
-2.528	-9.828
+2.388	-9.759
+7.633	-9.797
+12.134	-9.821
+17.629	-9.888
+22.575	-9.971
+27.578	-9.929
+32.661	-9.868
+37.322	-9.952
+42.446	-9.688
+47.588	-9.819
+52.467	-1.378
+55.357	-3.111
+62.488	+8.083
+67.732	+1.285
+71.152	+1.668
+77.478	+1.645
+82.878	+1.558
+87.895	+1.845
+92.294	+1.857
+97.698	+8.858
+102.791	+8.838
+111.857	+8.433
+121.848	+8.488
+138.485	+8.488
+141.858	+8.568

GET	BELOON	ASZ
RIJNSMIDDELAARDE	DIR. LIDENING	700. 00
Maas Polling 1995 1w10158.800		
Datafile: comasif9504af Opgenomen: 81-jun-78		
SOFTW. X.Y.Z.	11.198	11.198
FORIYH. 10		

Bijlage 3c: Dwarsprofiel km 183,5

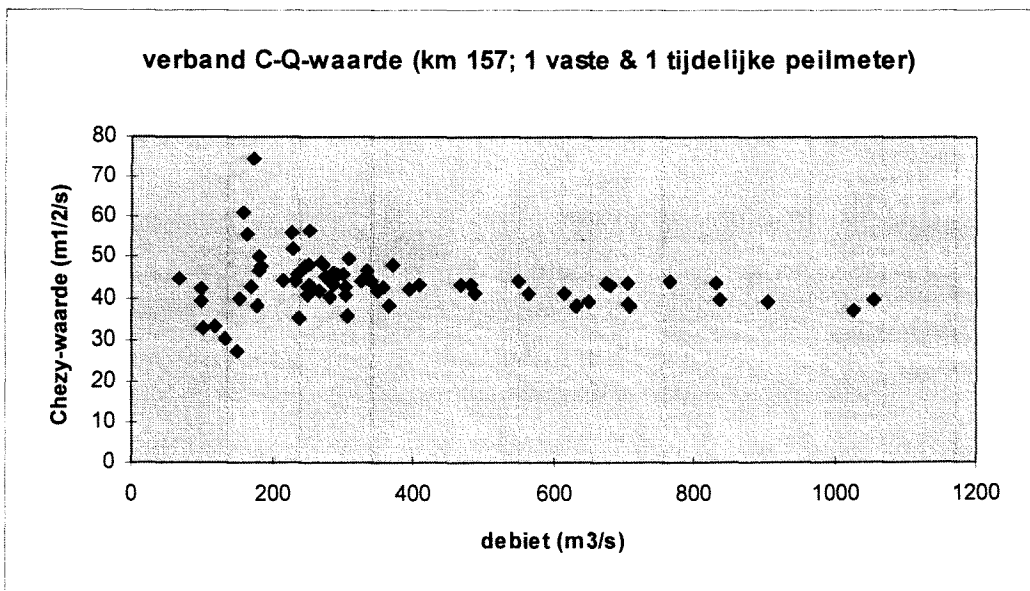
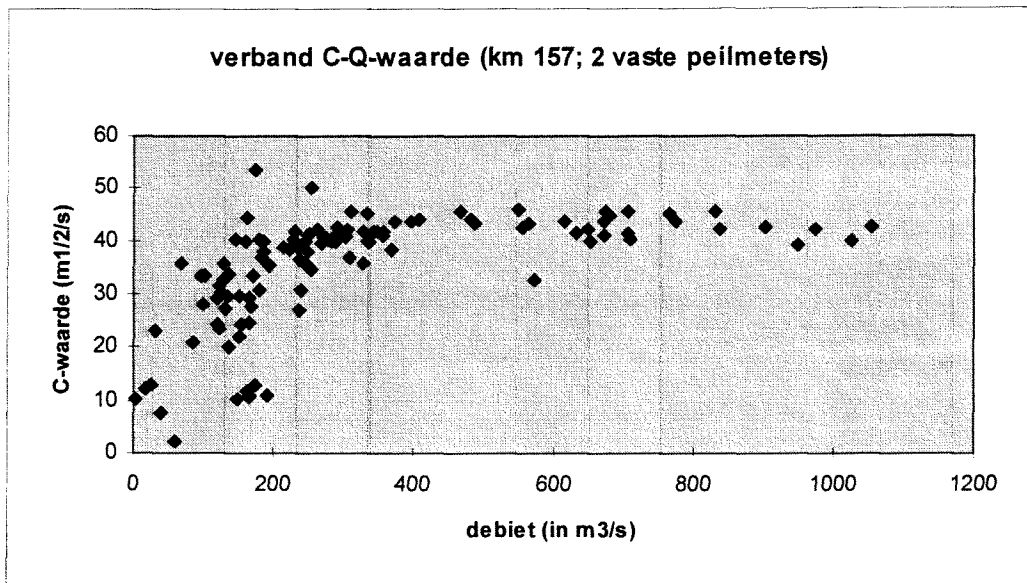
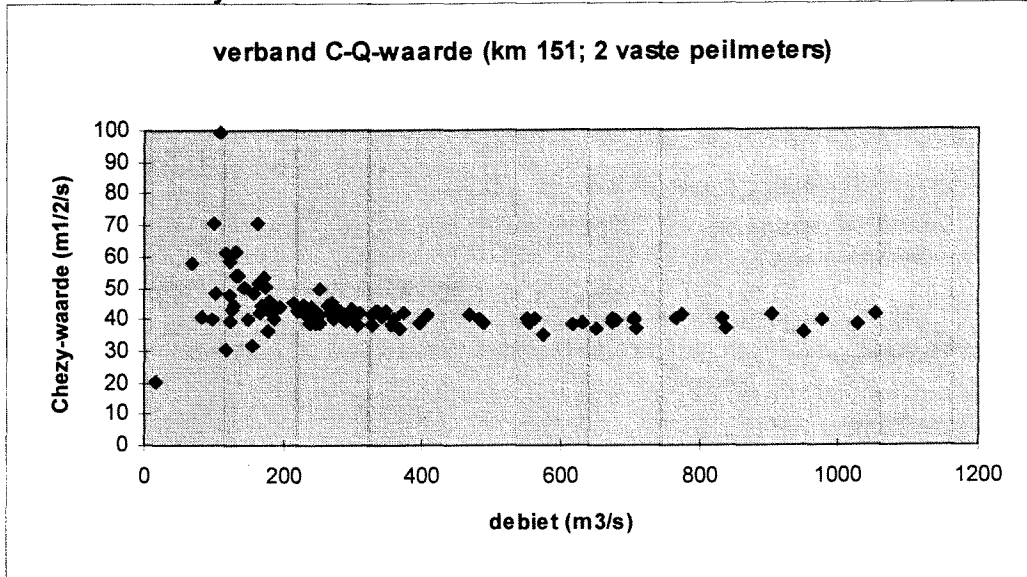


HOOGTE T.O.V. STUWPEIL
AFSTAND UIT HET NULPUNT

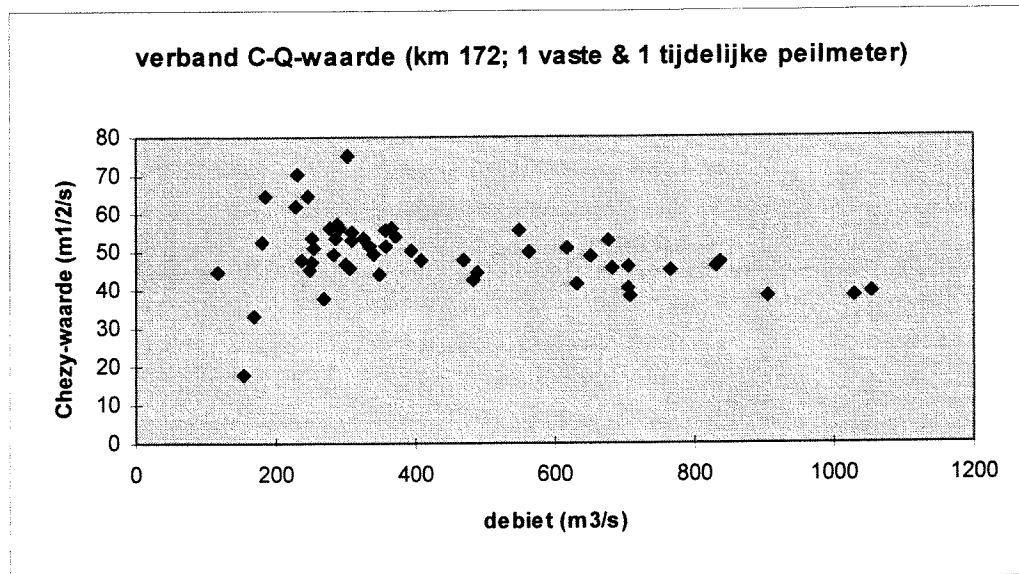
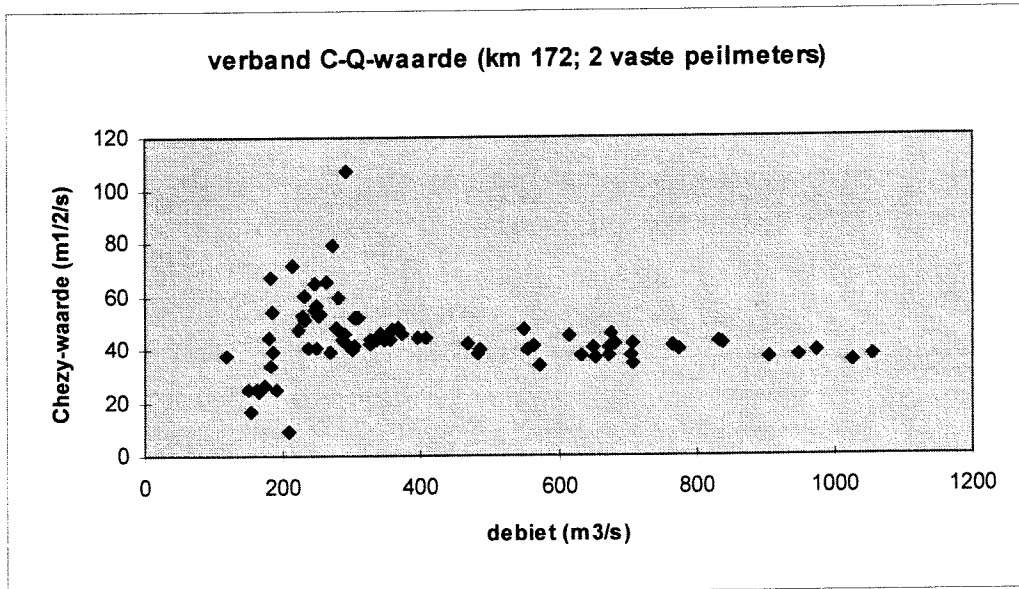
-144.408	+3.360
-134.328	+3.260
-126.127	+2.890
-116.875	+2.220
-106.679	+2.020
-96.181	+2.060
-89.682	+2.060
-79.983	+2.060
-74.382	+0.115
-60.645	-3.734
-57.448	-4.378
-52.554	-5.884
-47.448	-5.843
-42.442	-5.759
-37.269	-5.690
-32.512	-5.638
-27.503	-5.618
-22.379	-5.639
-17.463	-5.782
-12.681	-5.532
-7.423	-5.275
-2.484	-5.359
+2.598	-5.119
+7.377	-5.198
+12.587	-5.287
+17.526	-5.088
+22.477	-5.186
+27.599	-4.956
+32.532	-4.928
+37.482	-4.932
+42.468	-4.886
+47.464	-4.896
+52.511	-4.979
+57.473	-4.958
+62.532	-5.001
+67.598	-4.989
+71.777	-2.814
+76.318	-0.858
+89.182	+2.738
+97.894	+3.088
+109.513	+2.878
+120.368	+2.848
+130.846	+2.898
+141.845	+2.888
+152.128	+2.778

GET	DECON	GEZ	Maas	SOFFEL 2.Y.1
RIJKSWATERSTAAT			Pelling 1995	11.1000
DIV. LUSSEMB.			10183.500	11.100
VD. RW			Datafile: comaaslg9502a1	YORPFI 10
			Opgenomen: 01-jun-78	21-10-96

Bijlage 4a: Lokale Chézy-waarden



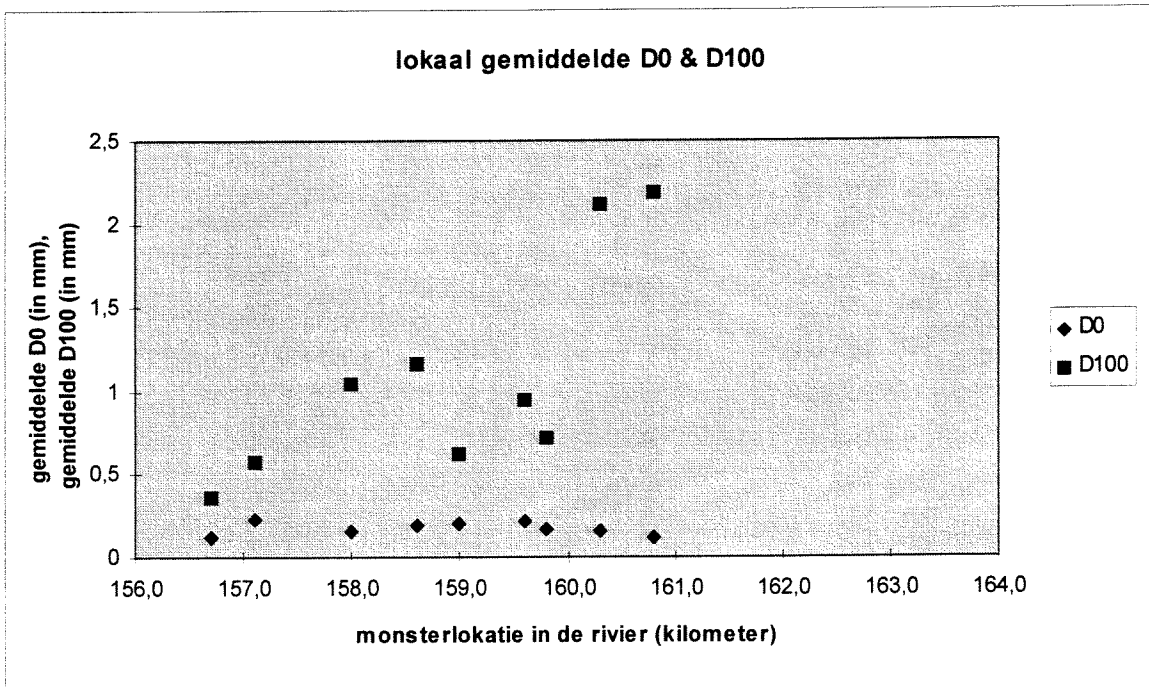
Bijlage 4b: Lokale Chézy-waarden



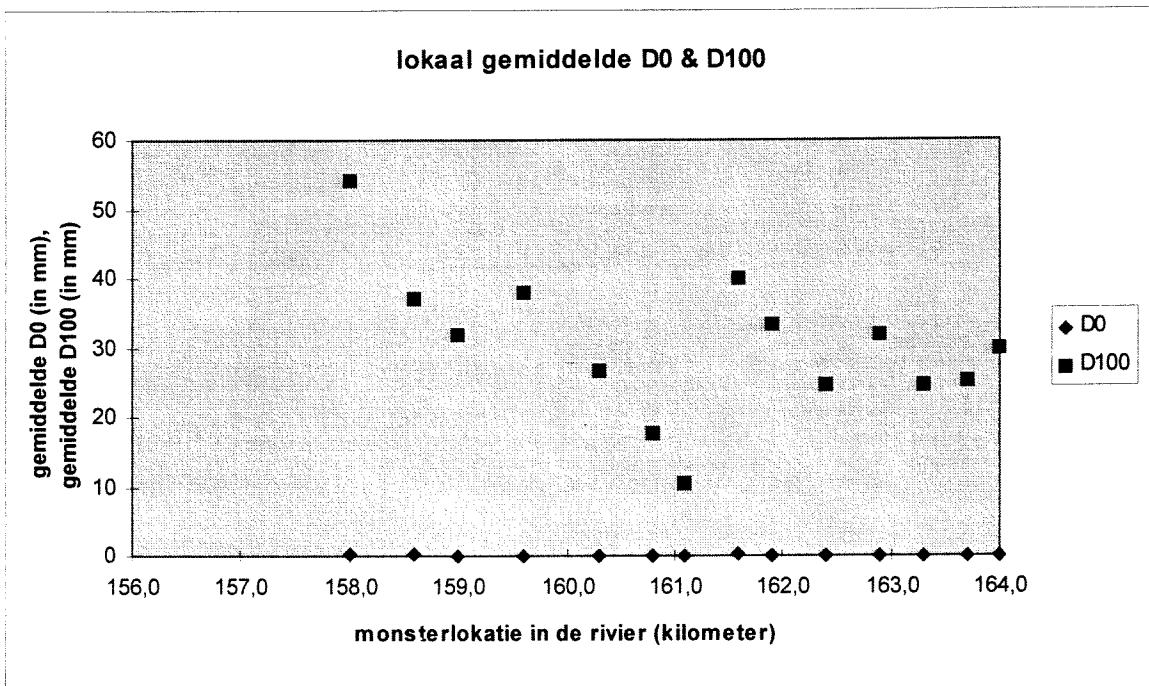
De gemiddelde Chezy-waarde μ_C en de standaarddeviatie van de Chezy-waarde σ_C voor de periode december 1996 - april 1997.

	μ_C (in $m^{1/2}/s$)	σ_C (in $m^{1/2}/s$)
km 151 (2 vaste peilmeters)	39,2	1,8
km 157 (1 vaste & 1 tijdelijke peilmeter)	42,6	2,7
km 157 (2 vaste peilmeters)	41,3	2,3
km 172 (2 vaste peilmeters)	40,2	3,4
km 172 (1 vaste & 1 tijdelijke peilmeter)	45,5	5,0

Bijlage 5: Lokale gemiddelde D₀- en D₁₀₀-waarden

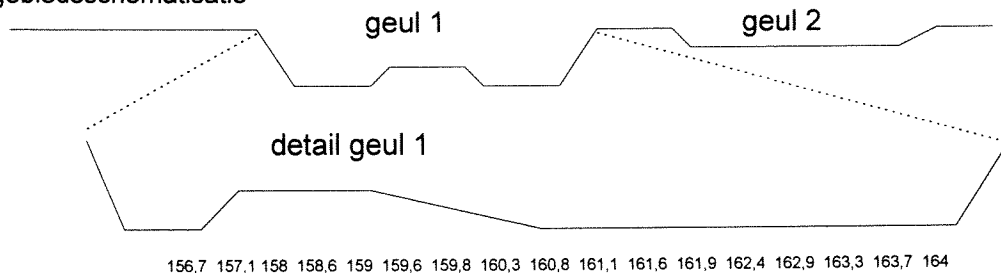


fijnkorrelige materiaal: D₁₀₀ < 8 mm



grofkorrelige materiaal D₁₀₀ > 8 mm

gebiedsschematisatie



Bijlage 6: Vanuit de formules berekende sedimenttransporten

M-P&M:

datum	u (m/s)	τ_b (kg/ms ²)	θ	C_{90} (m ^{1/2} /s)	μ	σ	S (m ³)
15-2	1,35	10,6	0,805	102	0,255	0,837	911
19-2	0,84	4,11	0,312	102	0,255	0,0781	85
26-2	1,21	8,54	0,649	102	0,255	0,542	590
27-2	1,49	13	0,988	102	0,255	1,23	1338
1-3	1,37	11	0,836	102	0,255	0,901	980

E-H:

datum	θ	σ	S (m ³)
15-2	1,10	18,0	12290
19-2	0,426	1,68	1147
26-2	0,885	10,5	7169
27-2	1,35	13	20552
1-3	1,14	19,7	13451

Van Rijn:

datum	D* (m)	u_{cr} (m/s)	s_b (m ² /s)	s_s (m ² /s)	S (m ³)
15-2	12,5	0,41	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$7,99 \cdot 10^{-4}$	12026
19-2	12,5	0,41	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$5,23 \cdot 10^{-5}$	869
26-2	12,5	0,41	$1,42 \cdot 10^{-4}$	$4,87 \cdot 10^{-4}$	7337
27-2	12,5	0,41	$3,58 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	18522
1-2	12,5	0,41	$2,48 \cdot 10^{-4}$	$8,53 \cdot 10^{-4}$	12842

Bijlage 7: Vanuit de transportmetingen berekende transporten**berekende bodemtransporten uit de Helley-Smithtransportmetingen**minimum dagtransporten in m³

	15-2	19-2	26-2	27-2	1-3
raai 1	7,4	1,9	6,1	15,9	26,7
raai 2	30,2	4,5	8,3	24,5	30,1
raai 3	52	6,4	13,7	23,1	32,7
raai 4	30,7	3,8	42,5	23,9	48,8
raai 5-	0	0	0	0	0
totaal-	120,3	16,6	70,6	87,4	138,3

maximum dagtransporten m³

	15-2	19-2	26-2	27-2	1-3
raai 1	22,1	5,7	18,3	47,6	80
raai 2	90,5	13,4	24,9	73,4	90,2
raai 3	156	19,2	41,1	69,2	98
raai 4	92	11,4	127	71,6	146
raai 5+	112,5	19,1	43,2	121	170
totaal+	473,1	68,8	254,5	382,8	584,2

berekende zwevende transporten uit de AZTM-metingen

minimum flux in kg/s

	15-2	19-2	26-2	27-2	1-3
raai 0	6,06	0,52	2,03	5,23	3,65
raai 1	3,10	0,27	1,10	2,65	1,93
raai 2	7,35	0,64	4,62	8,85	3,48
raai 3	7,35	0,64	2,14	5,42	2,76
raai 4	7,35	0,64	4,77	8,96	2,82
raai 5	13,8	0,57	7,66	10,70	5,73
raai 6	10,9	0,82	5,95	8,73	4,75
totaal-	55,91	3,86	28,27	50,54	25,12

minimum dagtransport in m³

totaaldagtransport-	3037	209	1536	2745	1364
---------------------	------	-----	------	------	------

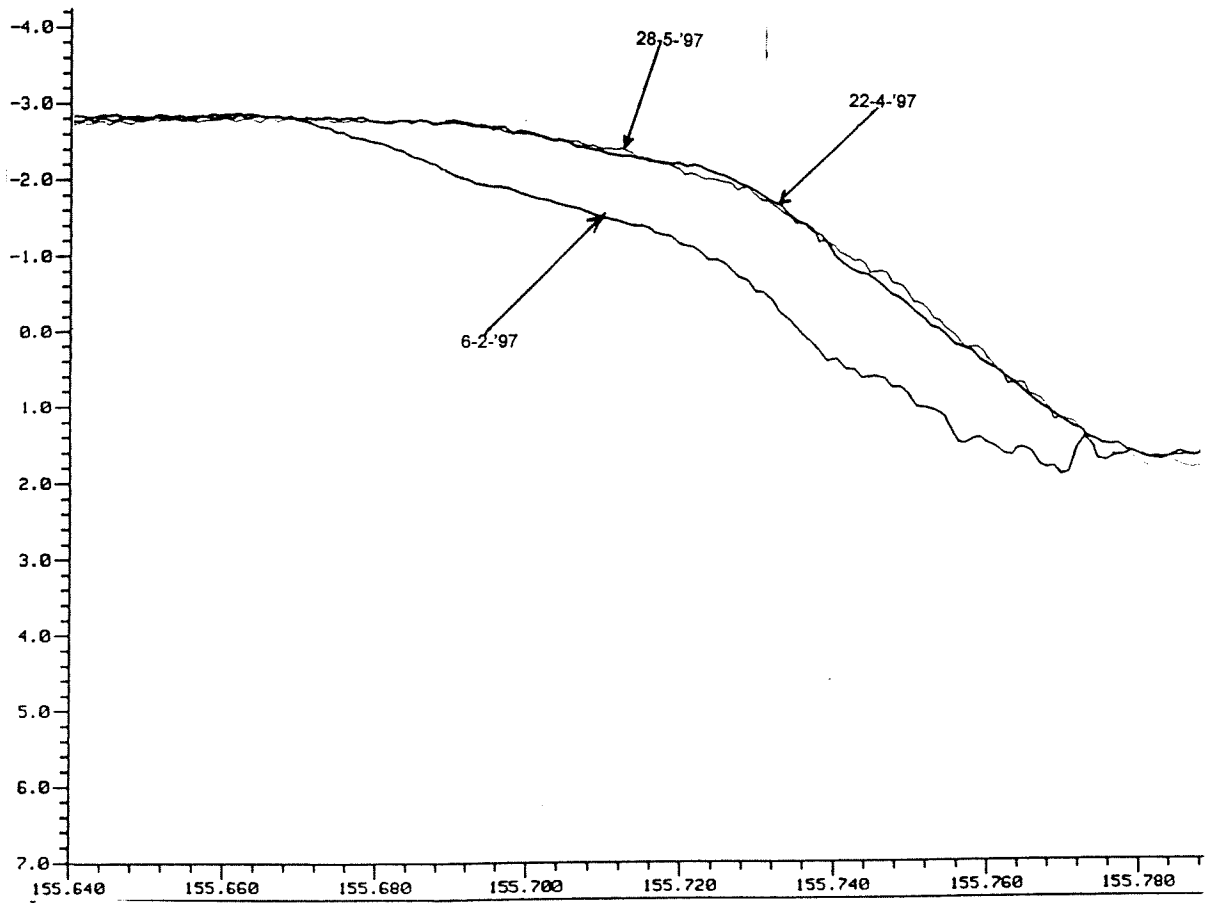
maximum flux in kg/s

	15-2	19-2	26-2	27-2	1-3
raai 0	9,06	0,78	3,03	7,83	5,45
raai 1	4,63	0,4	1,65	3,96	2,89
raai 2	11,00	0,96	6,91	13,2	5,2
raai 3	11,00	0,96	3,2	8,1	4,13
raai 4	11,00	0,96	7,14	13,4	4,22
raai 5	20,70	0,86	11,5	16	8,56
raai 6	16,30	0,87	8,9	13,1	7,11
totaal+	83,69	5,77	42,33	75,59	37,56

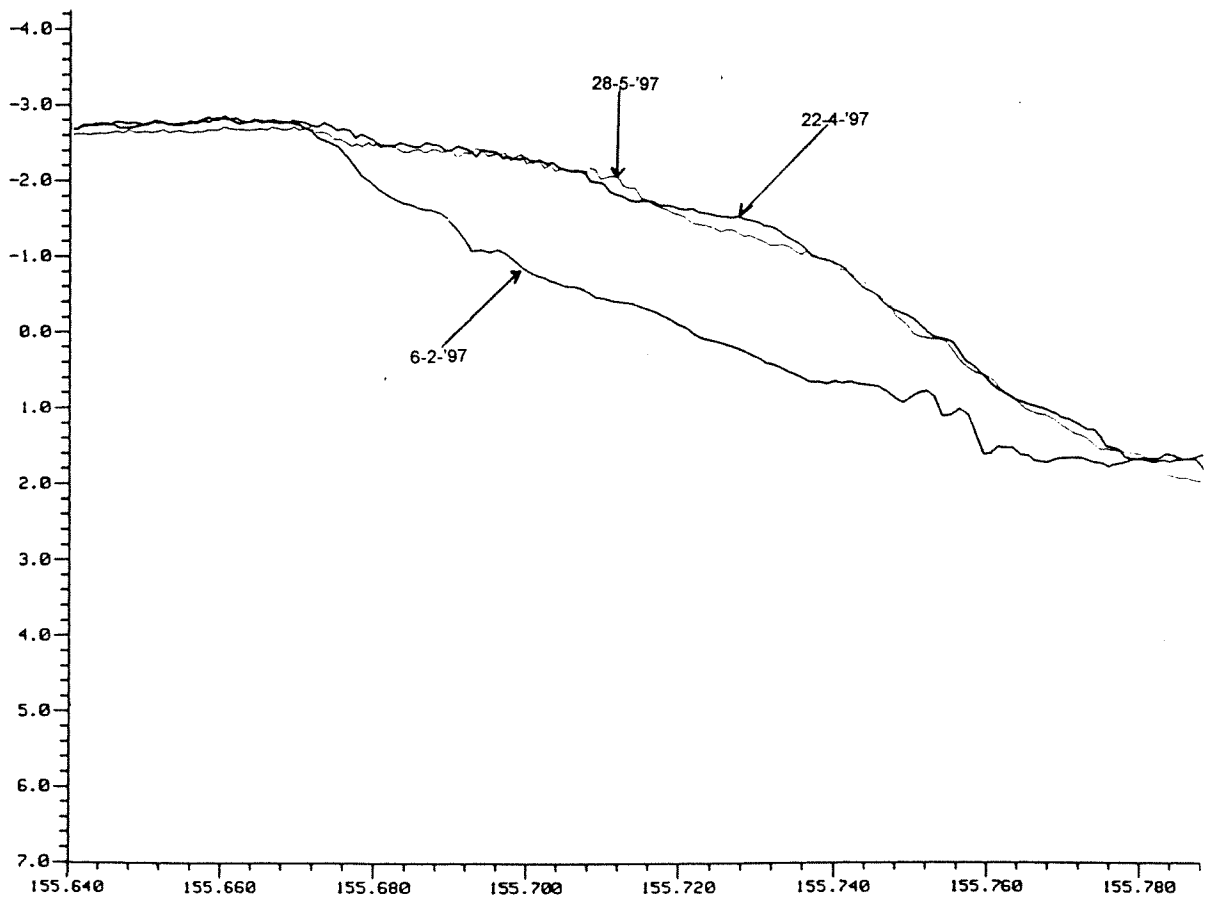
maximum dagtransport in m³

totaal dagtransport+	4545	313	2299	4106	2040
----------------------	------	-----	------	------	------

Bijlage 8a: Sedimentatiefront bij geul 1 uit waarnemingen

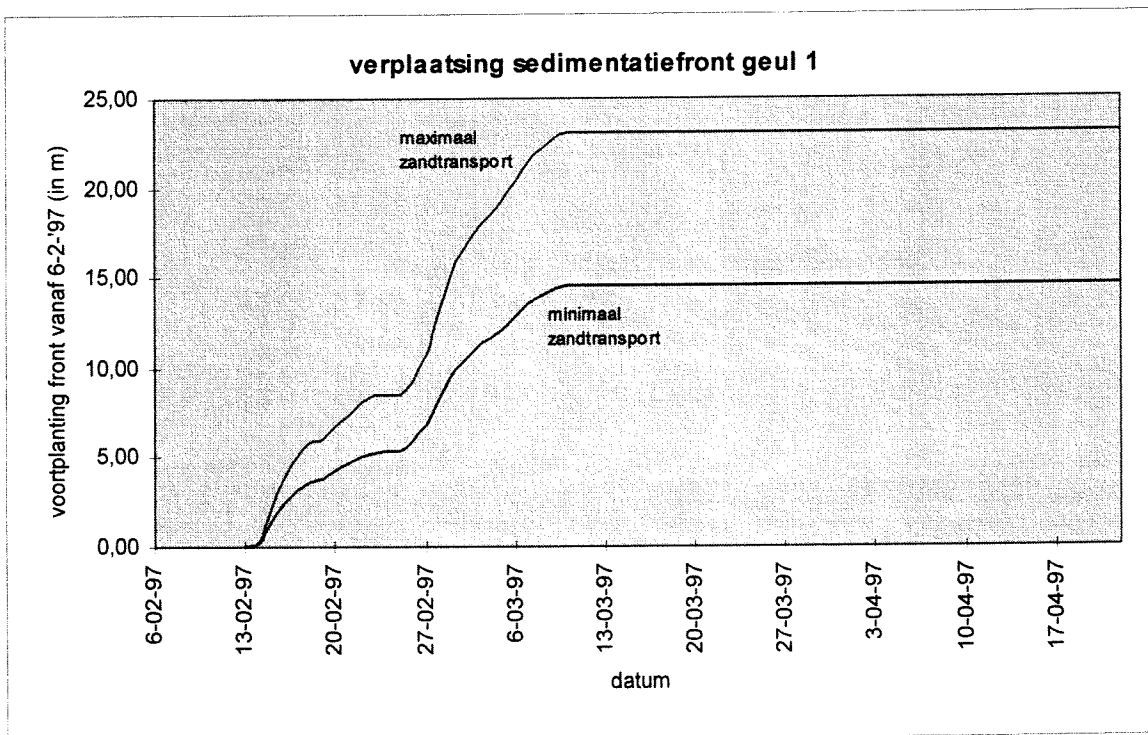
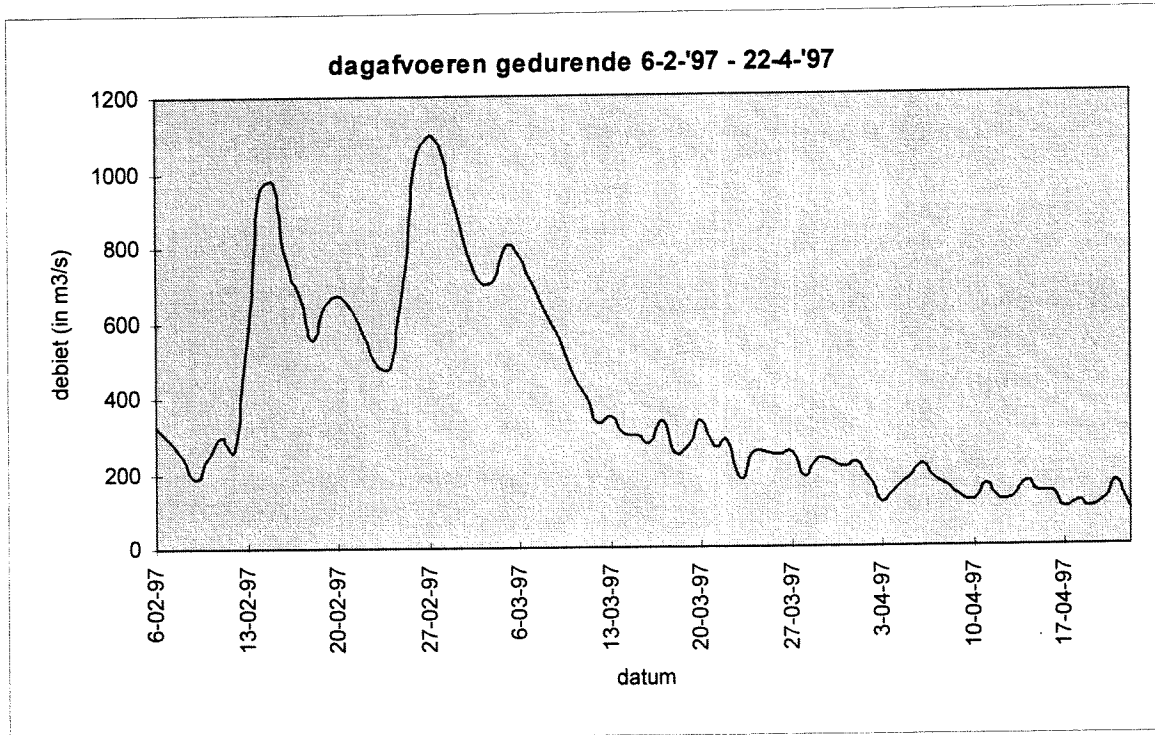


sedimentatiefront op 15 m van de rivieras



sedimentatiefront op de rivieras

Bijlage 8b: Voortplanting sedimentatiefront in geul 1 volgens berekeningen



Bijlage 9: Aanwezige DTM-bestanden

km	december	januari	februari	maart	april	mei	juni-juli
155	x		x	x	x	x	x
156			x	x	x	x	x
157	x			x	x	x	x
158	x	x		x	x	x	x
159	x	x		x	x	x	x
160	x	x		x	x	x	x
161	x	x		x	x	x	x
162	x	x		x	x	x	x
163	x	x		x	x	x	x
164			x	x	x	x	x
165			x	x	x	x	x
166		x		x	x	x	x
167	x	x		x	x	x	x
168	x	x		x	x		x
169	x	x		x	x	x	x
170	x	x		x	x	x	x
171	x	x		x	x	x	x
172	x	x	x	x	x	x	x
173	x		x	x	x	x	x
174			x	x	x	x	x

Bijlage 10: Globale processen op de lengteprofielen

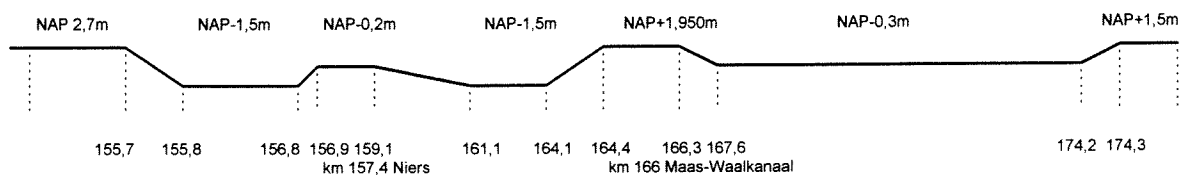
lokatie:	globaal proces:	opmerkingen:
km 155,200 - km 156,200		km 155,680-km 155,780, sedimentatiefront van ongeveer 20 m dik
km 156,200 - km 157,200	erosie	zeer sterke erosie
km 157,200 - km 158,200		bij de Niers veel sedimentatie
km 158,200 - km 159,200	erosie en sedimentatie	afwisselend erosie en sedimentatie
km 159,200 - km 160,200	erosie en sedimentatie	km 159,820-km 160,100, afwisselend erosie en sedimentatie
km 160,200 - km 161,200	erosie en sedimentatie	km 160,820-km 161,200, afwisselend erosie en sedimentatie
km 161,200 - km 162,200	erosie en sedimentatie	
km 162,200 - km 163,200	erosie en sedimentatie	km 162,840-km 163,200, afwisselend sterke erosie en sedimentatie
km 163,200 - km 164,200	erosie en sedimentatie	
km 164,200 - km 165,200	nauwelijksveranderingen	
km 165,200 - km 166,200	nauwelijks veranderingen	
km 166,200 - km 167,200	zie 2)	
km 167,200 - km 168,200	zie 2)	
km 168,200 - km 169,200	zie 2)	
km 169,200 - km 170,200	zie 2)	
km 170,200 - km 171,200	zie 2)	
km 171,200 - km 172,200	zie 2)	
km 172,200 - km 173,200	zie 2)	
km 173,200 - km 174,200	zie 2)	km 174,160-174,200, overgang gebaggerd-ongebaggerd, ca.0,5 m erosie gedurende februari-april. Zwak erosiefront.
174,200-175,000	nauwelijks veranderingen	

periode: december-juni/juli

- 1) op het einde van de geul op km 164,140 geen front , maar wel een verhoogde sedimentatie van km 164,040 tot km 164,140. De overgang van januari-april is vrij groot i.t.t. apr-mei
- 2) aan weerszijden 30 m van de rivieras vindt erosie plaats en op de rivieras en op 15 m aan weerszijden ervan vindt sedimentatie plaats.

Bijlage 11: Lokale processen op de lengteprofielen

Naast een globale kilometer-beschrijving volgt hier een wat gedetailleerdere beschrijving van de lokaal optredende processen.



lokatie	proces	lengte	orde van bodemverandering	periode
km 155,725 - km 155,800	sedimentatie	100 m	1,5-2 m	7 februari-10 mei
km 156,400 - km 157,175	erosie	775 m	0,5 m	7 februari-10 mei
km 157,400 - km 157,525	sedimentatie	150 m	0,75-1 m	5 december-10 mei
km 158,450 - km 158,575	erosie	125	0,5 m	5 december-10 mei
km 158,925 - km 159,075	sedimentatie	175 m	0,5 m	5-december-10 mei
km 160,100 - km 160,175	sedimentatie	100 m	0,5-1 m	6 januari-10 mei
km 161,800 - km 162,025	sedimentatie	175 m	0,5 m	6 januari-10 mei
km 162,825 - km 163,050	sedimentatie	250 m	0,5-1 m	6 januari-12 juli
km 164,025 - km 164,150	sedimentatie	125 m	0,5 m	6 januari-10 mei
km 167,875 - km 174,175	verdiepte deel: sedimentatie onverdiepte deel: erosie	6325 m	0,5 m 0,5 m	5 december-10 mei

N.B.: dwarsprofielen tot km 174,175 voor handen. Het einde van geul 2 staat hier niet op

- 1) In de tweede geul vindt erosie plaats op de ongebaggerde zijkanten en sedimentatie in de geul zelf. Verder worden de de geultaluds flauwer, waarbij de bovenkant van het talud naar de oevers wijkt en de onderkant naar het midden van de rivier, hetgeen doet veronderstellen dat de taluds instorten.
- 2) In de eerste geul zijn de optredende processen, afgezien van het instorten van de randen, sterker dan in de tweede geul.
- 3) In de periode na maart gebeurt weinig, waarschijnlijk a.g.v. van de lagere afvoeren en de lagere stroomsnelheden.
- 4) In de bochten verschijnen de specifieke bochtprofielen, die tg.v.het baggeren verdwenen waren, weer.

Bijlage 12a: beschrijving van de waarnemingen uit de verschilkaarten

rekening houdend met het criterium:

bodemtoestand	gestelde criterium
vlakke bodem / flauw talud	1 dm
steil talud	2 dm

december-juni/juli:

- geul 1: -op veel plaatsen sterke erosie/sedimentatie
-lokaal sterke erosie op een van de geulranden gepaard gaande met sterke sedimentatie op de tegenoverliggende geulrand
-op km 157, bij instroom Niers, sterke sedimentatie
-op km 159 sterke sedimentatie
-op km 160 sterke sedimentatie
-op km 163, aan het einde van geul 1, erosie
- geul 2: -gebeurt weinig
-bij de geulaluds op aantal plaatsen sedimentatie aan de teen en bovenin erosie
- tussenstuk: -geen kaarten

december-maart:

- geul 1: zie periode december-juni/juli
geul 2: zie periode december-juni/juli
tussenstuk: geen kaarten

maart-juni/juli:

- geul 1: -gebeurt weinig
-geen fronten
- geul2: -gebeurt weinig
-op km 174, aan einde geul 2, sterke erosie, warrig patroon
- tussenstuk: -gebeurt weinig

december-januari:

- geul 1: -sterke erosie/sedimentatie
-erosie overheerst
-op km 163, aan het einde van geul 1, sterke erosie
-lokaal veel erosie op de geulrand gepaard gaande met veel sedimentatie op de tegenoverliggende geulrand, of veel erosie op beide geulranden
- geul 2: -te weinig kaarten, geen conclusies
- tussenstuk: -geen kaarten

februari-maart:

- geul 1: -weinig kaarten aanwezig
-op km 155, begin van geul 1, sterke sedimentatie over groot oppervlak
-op km 156 sterke erosie
- geul 2: -gebeurt weinig
-op km 174, aan het einde van geul 2, veel erosie, geen warrig patroon
- tussenstuk: -geen kaarten

Bijlage 12b: beschrijving van de waarnemingen uit de verschilkaarten

maart-april:

geul 1: -gebeurt weinig
-geen fronten
geul 2: -gebeurt weinig
-geen fronten
tussenstuk: -gebeurt weinig

april-mei:

geul 1: -gebeurt weinig
-geen fronten
geul 2: -gebeurt weinig
-geen fronten
tussenstuk: -gebeurt weinig

mei-juni/juli

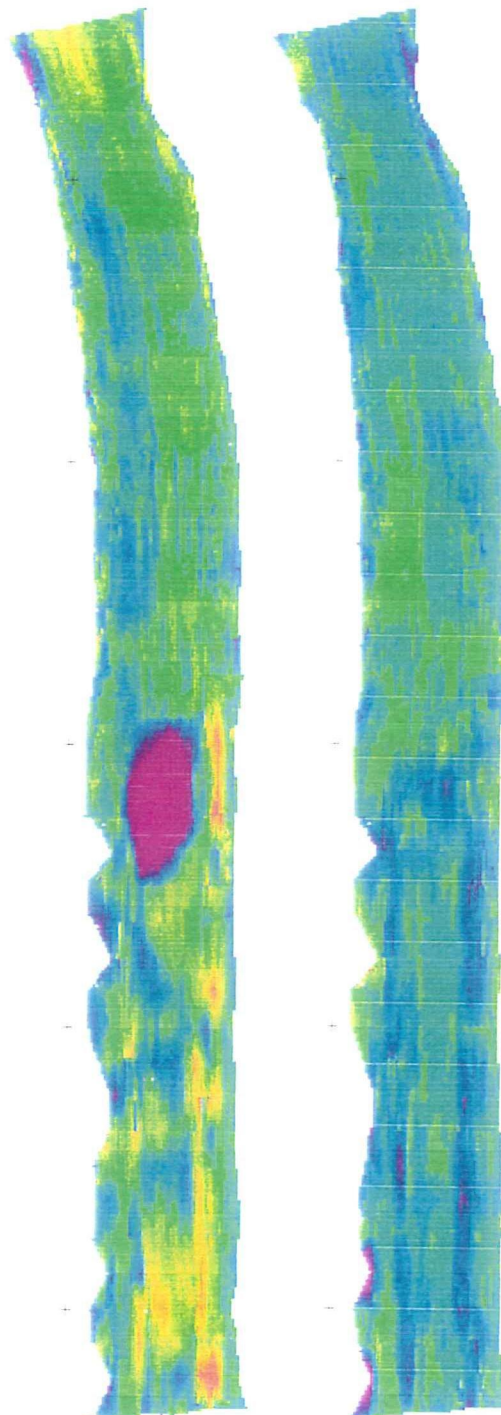
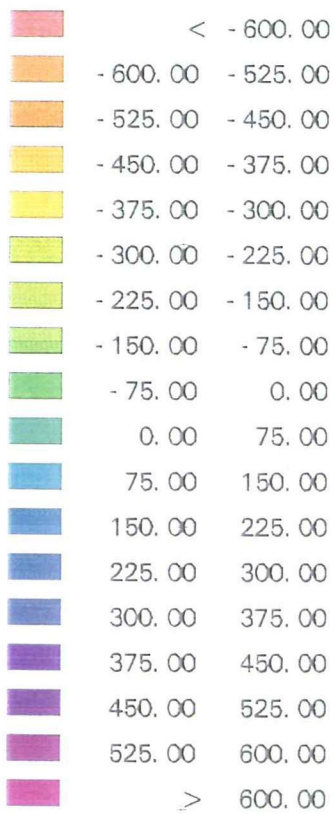
geul 1: -gebeurt weinig
-geen fronten
geul 2: -gebeurt weinig
-op km 174, aan het einde van geul 2, sterke erosie, zeer warrig patroon
tussenstuk: -gebeurt weinig

april-juni/juli

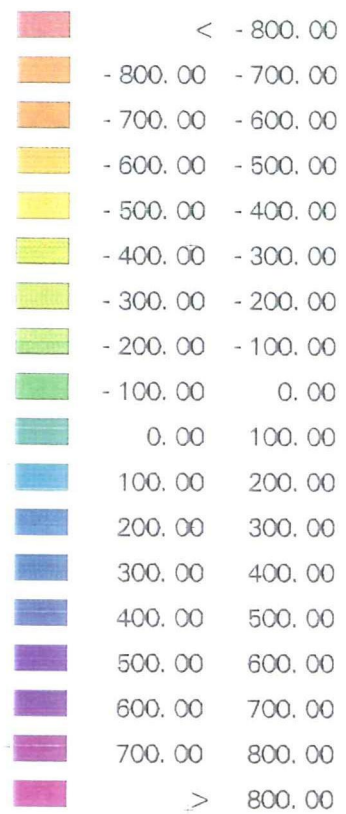
geul 1: -gebeurt weinig
-geen fronten
geul 2: -gebeurt weinig
-op km 174, aan het einde van geul 2, sterke erosie, zeer warrig patroon
tussenstuk: -gebeurt weinig

Bijlage 13a: Verschilkaarten km 155

sedimentatie in mm



sedimentatie in mm



lokatie: Zandmaas, km 155

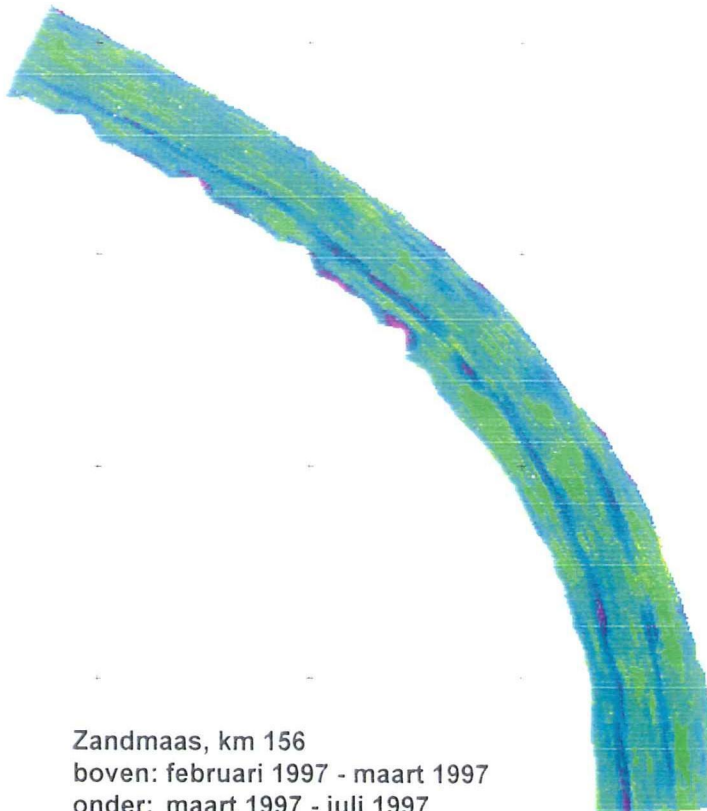
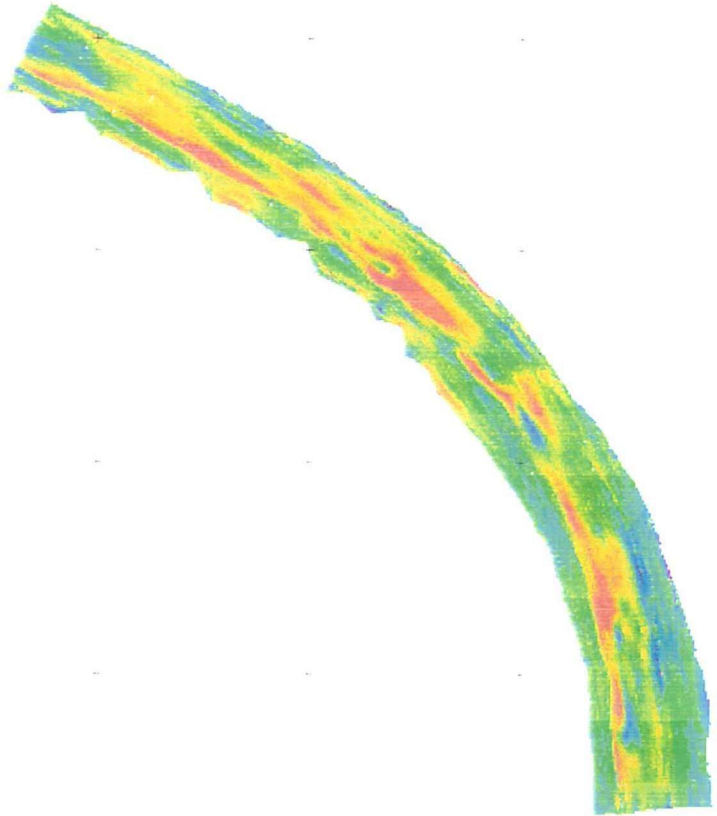
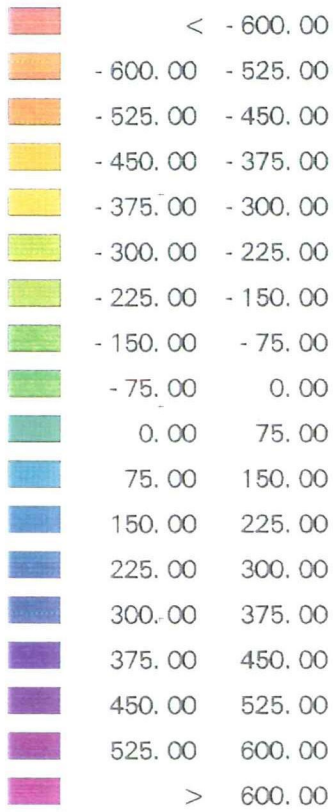
periode: links: februari 1997 - maart 1997

rechts: maart 1997 - juli 1997

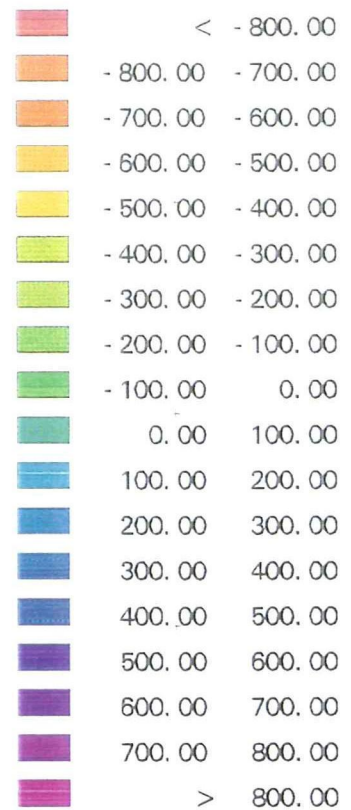
kenmerk: februari 1997 - maart 1997, veel sedimentatie aan het begin van geul 1

Bijlage 13b: Verschilkaarten km 156

sedimentatie in mm

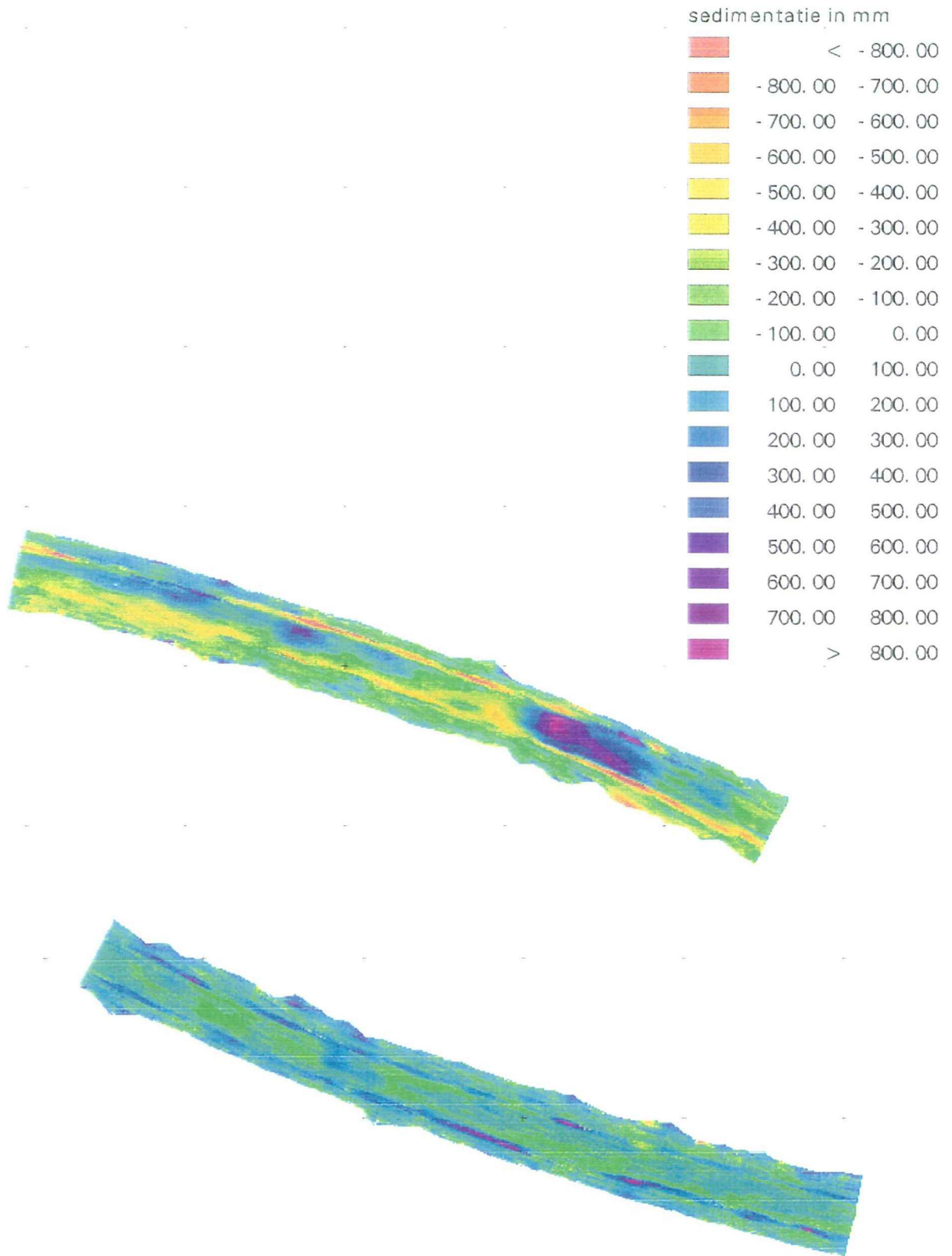


sedimentatie in mm



lokatie: Zandmaas, km 156
 periode: boven: februari 1997 - maart 1997
 onder: maart 1997 - juli 1997
 kenmerk: februari 1997 - maart 1997, veel erosie waarneembaar

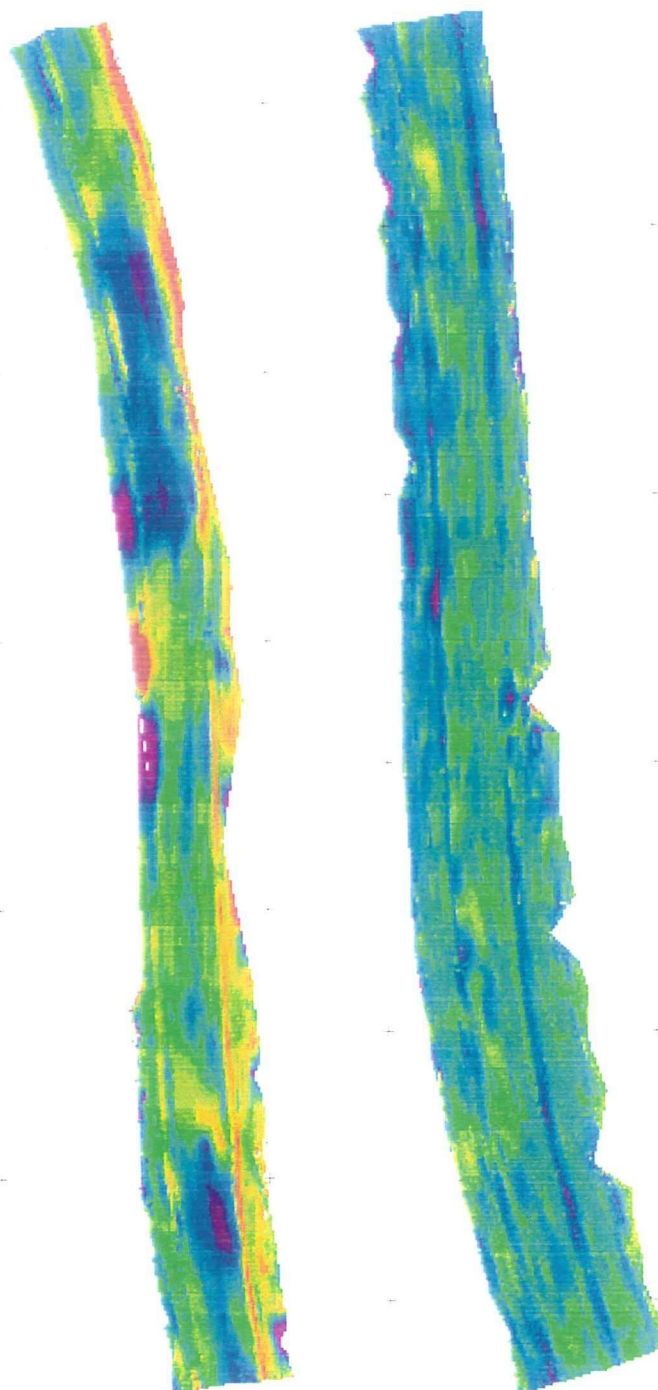
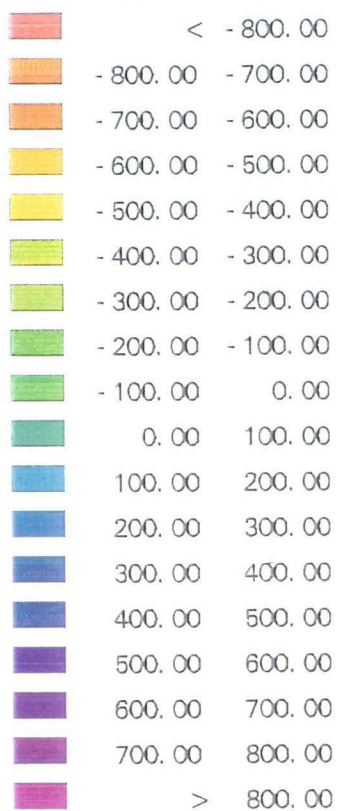
Bijlage 13c: Verschilkaarten km 157



lokatie: Zandmaas, km 157
periode: boven: december 1996 - maart 1997
onder: maart 1997 - juli 1997
kenmerk: december 1996 - maart 1997, veel sedimentatie bij de Niers waarneembaar

Bijlage 13d: Verschilkaarten km 162

sedimentatie in mm



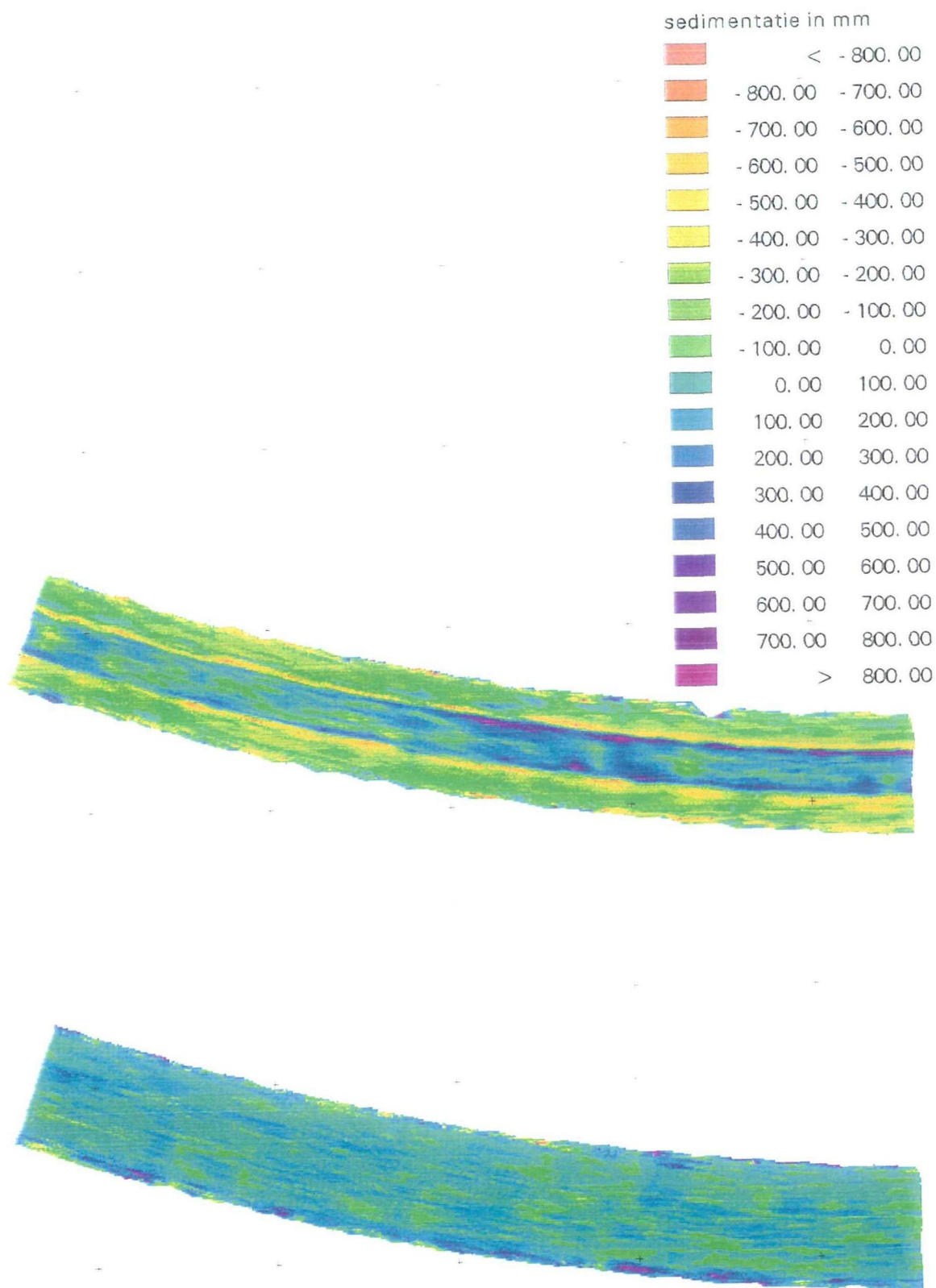
lokatie: Zandmaas, km 162

periode: links: december 1996 - maart 1997

rechts: maart 1997 - juli 1997

kenmerk: representatief voor de in tijd overeenkomende verschilkaarten van baggergeul 1

Bijlage 13e: Verschilkaarten km 172



lokatie: Zandmaas, km 172

Periode: boven: december 1996 - maart 1997

onder: maart 1997 - juni 1997

kenmerk: representatief voor de in tijd overeenkomende verschilkaarten in baggergeul 2

Bijlage 14a: KUBEER.AML / INTEGER.AML

INTEGER.AML (AML om de waarden in de DTM-bestanden naar integer om te zetten)

```
&echo &on
display 9999 size frame 101 101 position 0 105
grid
dec96_km157_3 = int ( dec96_km157_2 * 1000 )
dec96_km158_3 = int ( dec96_km158_2 * 1000 )
dec96_km159_3 = int ( dec96_km159_2 * 1000 )
dec96_km160_3 = int ( dec96_km160_2 * 1000 )
quit
&echo &off
&return
```

KUBEER.AML

```
&s dtmzv vers_173md
&s uittab t173md
&call kuberem
```

```
&return
```

```
&routine kuberem
/* Voer kubering uit
Display 9999 size frame 100 100 position 0 105
grid
evol = scalar(0) /* Erosie volume
eopp = scalar(0) /* Erosie oppervlakte
svol = scalar(0) /* Sedimentatie volume
sopp = scalar(0) /* Sedimentatie oppervlakte
topp = scalar(0) /* Totale oppervlakte
&describe %dtmzv%
&s gs %GRD$DX%
```

```
docell
if (^ isnull(%dtmzv%))
  topp += 1
if (%dtmzv% > 0)
  begin
    svol += %dtmzv%
    sopp += 1
  end
else if (%dtmzv% < 0)
  begin
    evol += %dtmzv%
    eopp += 1
  end
end
&s evol [calc -1 * %gs% * %gs% * [show evol]]
&s eopp [calc %gs% * %gs% * [show eopp]]
&s svol [calc %gs% * %gs% * [show svol]]
&s sopp [calc %gs% * %gs% * [show sopp]]
&s topp [calc %gs% * %gs% * [show topp]]
```

```
/* Afronden op m3
&s evol [truncate %evol%]
&s eopp [truncate %eopp%]
&s svol [truncate %svol%]
```

Bijlage 14b: KUBEER.AML / INTEGER.AML

```
&s sopp [truncate %sopp%]  
&s topp [truncate %topp%]  
quit
```

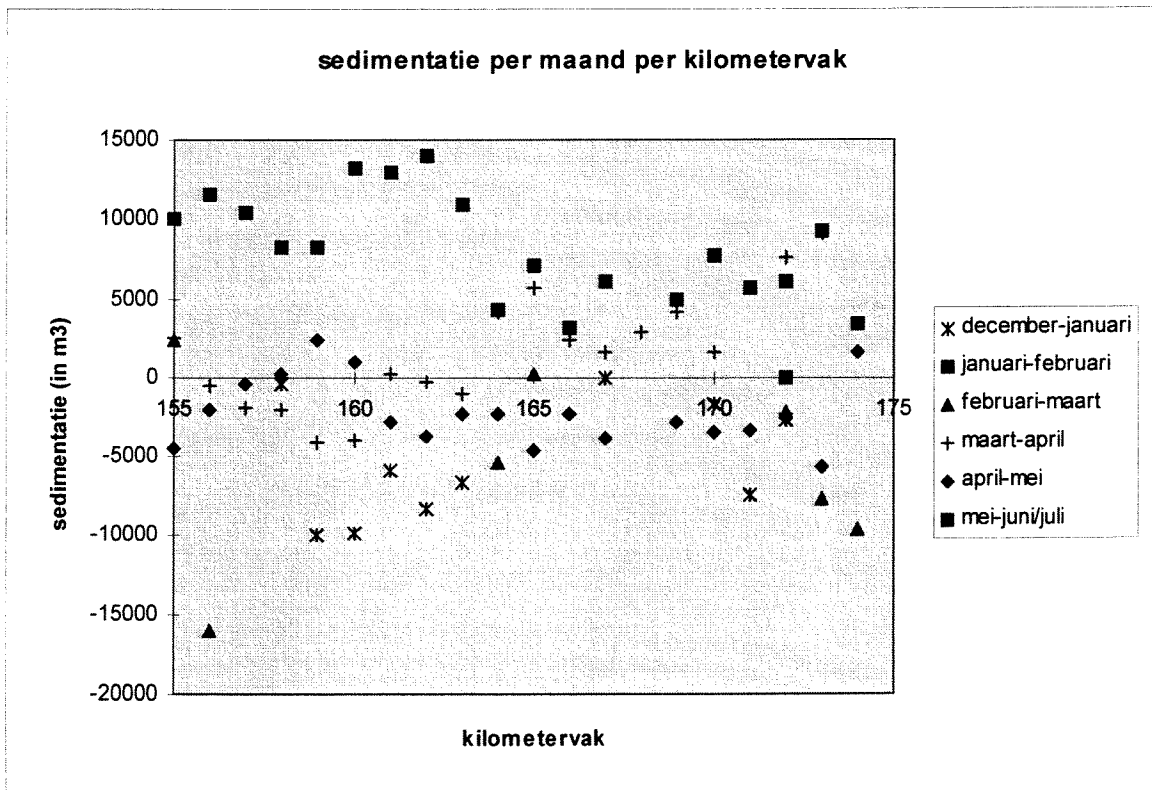
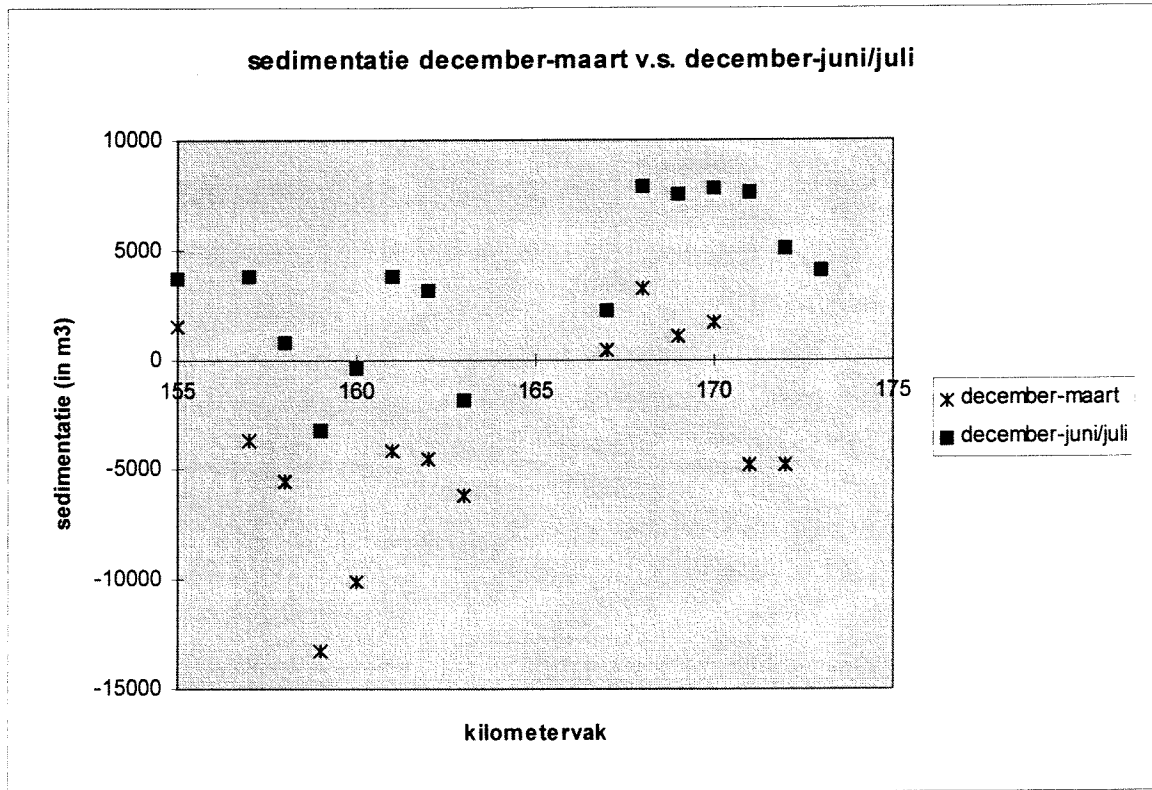
```
/* Bestandsnamen zetten  
&s tmpuitf %uittab%
```

```
/* Resultatenbestand openen  
&s fh = [open %tmpuitf% ios -w]
```

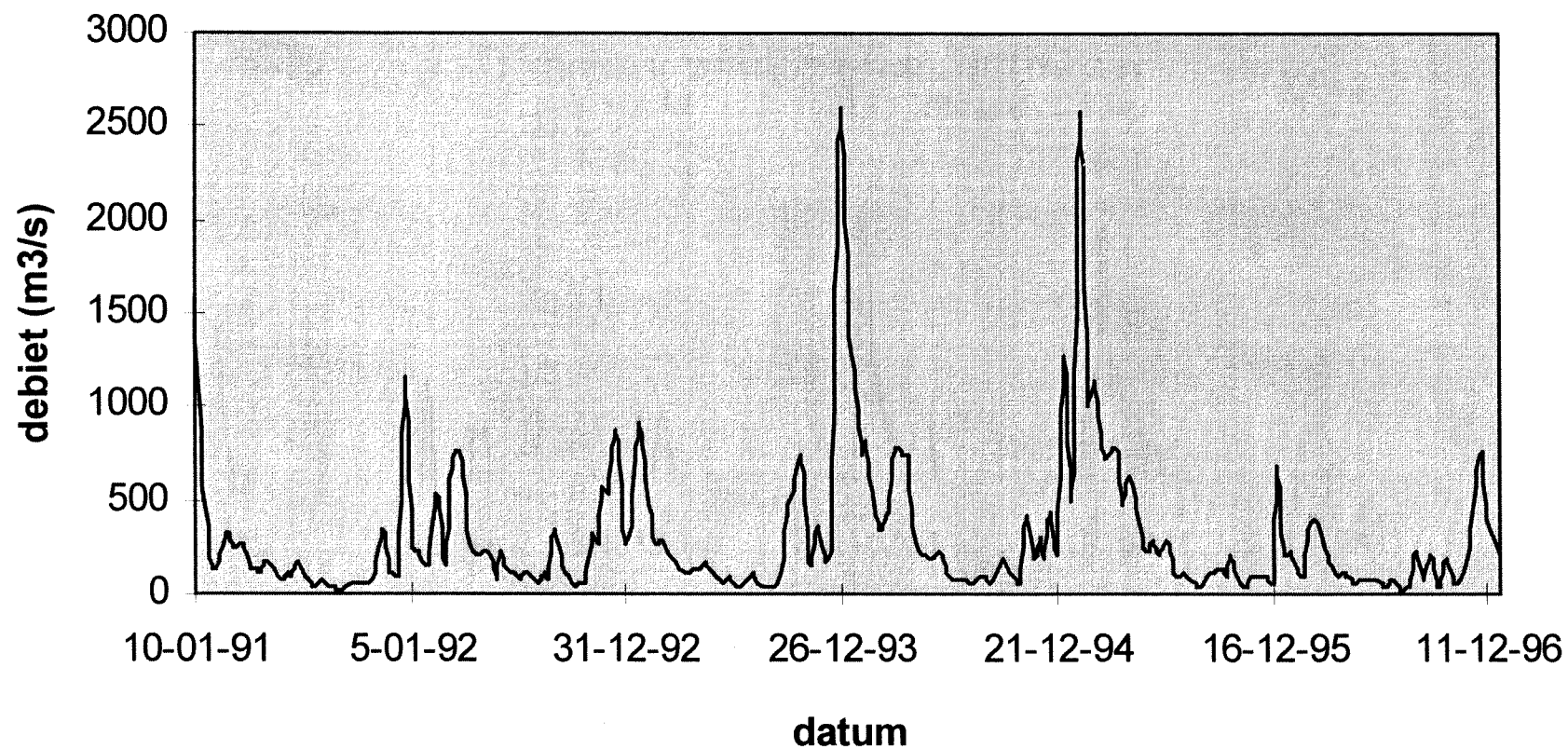
```
/* Resultatenbestand schrijven  
&s ios = [write %fh% %evol%] /* erosie  
&s ios = [write %fh% %eopp%] /* erosie opp  
&s ios = [write %fh% %svol%] /* sedimentatie  
&s ios = [write %fh% %sopp%] /* sed opp  
&s ios = [write %fh% %topp%] /* totaal opp
```

```
/* Resultatenbestand sluiten  
&s ios [close %fh%]  
&dv fh ios  
&return
```

Bijlage 15: Resultaten Arc/info kuberingen



decadegemiddelde debieten periode 1-1-1991 - 30-12-1996



Bijlage 17a: Resultaten hydraulische ijking op gemeten waterstanden; verschil = gemeten - berekend

ijkreeks

30-apr		Q = 179 m ³ /s		h = 7,60 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil	
km	gemeten	berekend	(in m)	
147	7,77	7,77	0	
155	7,69	7,69	0	
159	7,68	7,66	0,02	
166	7,59	7,63	-0,04	
169	7,59	7,62	-0,03	
175	7,6	7,6	0	

14-mrt		Q = 304 m ³ /s		h = 7,49 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil	
km	gemeten	berekend	(in m)	
147	7,99	7,97	0,02	
155	7,76	7,75	0,01	
159	7,68	7,66	0,02	
166	7,56	7,57	-0,01	
169	7,53	7,54	-0,01	
175	7,49	7,49	0	

23-feb		r.v.w. : Q = 487 m ³ /s		h = 7,47 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil	
km	gemeten	berekend	(in m)	
147	8,62	8,54	0,08	
155	8,08	8,08	0	
159	7,9	7,89	0,01	
166	7,66	7,68	0,02	
169	7,58	7,61	0,03	
175	7,47	7,47	0	

21-feb		Q = 633 m ³ /s		h = 7,40 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil	
km	gemeten	berekend	(in m)	
147	8,99	9,02	-0,03	
155	8,32	8,38	-0,06	
159	8,04	8,04	0	
166	7,72	7,76	-0,04	
169	7,57	7,6	-0,03	
175	7,4	7,4	0	

28-feb		Q = 1054 m ³ /s		h = 7,46 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil	
km	gemeten	berekend	(in m)	
147	10,24	10,5	-0,26	
155	9,3	9,53	-0,23	
159	8,81	9,03	-0,22	
166	8,23	8,33	-0,1	
169	7,93	8,05	-0,12	
175	7,46	7,46	0	

controle reeks

25-apr		Q = 84,1 m ³ /s		h = 7,69 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil	
km	gemeten	berekend	(in m)	
147	7,69	7,73	-0,04	
155	7,69	7,71	-0,02	
159	7,67	7,7	-0,03	
166	7,71	7,7	0,01	
169	7,7	7,69	0,01	
175	7,69	7,69	0	

22-dec		Q = 287 m ³ /s		h = 7,52 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil	
km	gemeten	berekend	(in m)	
147	7,92	7,95	-0,03	
155	7,72	7,75	-0,03	
159	7,67	7,67	0	
166	7,56	7,59	-0,03	
169	7,54	7,56	-0,02	
175	7,52	7,52	0	

geen

4-dec		Q = 651 m ³ /s		h = 7,43 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil	
km	gemeten	berekend	(in m)	
147	9,11	9,18	-0,07	
155	8,34	8,45	-0,11	
159	8,06	8,19	-0,13	
166	7,71	7,87	-0,16	
169	7,57	7,67	-0,1	
175	7,41	7,41	0	

1-mrt		Q = 904 m ³ /s		h = 7,40 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil	
km	gemeten	berekend	(in m)	
147	10,12	9,98	0,14	
155	9,2	9,1	0,1	
159	8,74	8,66	0,08	
166	8,17	8,08	0,09	
169	7,87	7,86	0,01	
175	7,4	7,4	0	

T = referentieperiode afvoer

Q is bovenstroomse randvoorwaarde; h is benedenstroomse randvoorwaarde

Bijlage 17b: Resultaten hydraulische ijking op Zwendl-berekeningen; verschil = ZWENDL - berekend

T = 10 jaar	Q = 2050 m ³ /s		h= 9,55 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil
km	ZWENDL	SOBEK	(in m)
147	12,63	12,64	0,01
155	11,56	11,80	-0,24
159	11,11	11,54	-0,43
166	10,55	10,84	-0,29
169	10,24	10,45	-0,21
175	9,55	9,55	0

T = 50 jaar	Q = 2597 m ³ /s		h= 10,33 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil
km	ZWENDL	SOBEK	(in m)
147	13,16	13,31	0,15
155	12,36	12,44	0,08
159	11,97	12,22	-0,25
166	11,38	11,59	-0,21
169	11,02	11,21	-0,19
175	10,33	10,33	0

T = 90 jaar	Q = 2753 m ³ /s		h= 10,54 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil
km	ZWENDL	SOBEK	(in m)
147	13,41	13,49	-0,08
155	12,63	12,6	-0,03
159	12,23	12,39	-0,16
166	11,63	11,77	-0,14
169	11,26	11,39	-0,13
175	10,54	10,54	0

T = 250 jaar	Q = 3079 m ³ /s		h= 10,86 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil
km	ZWENDL	SOBEK	(in m)
147	13,82	13,82	0
155	13,08	12,91	0,17
159	12,68	12,69	-0,01
166	12,04	12,07	-0,03
169	11,63	11,70	-0,07
175	10,86	10,86	0

T = 1250 jaar	Q = 3826 m ³ /s		h= 11,62 m
	waterstand (in NAP+m)		verschil
km	ZWENDL	SOBEK	(in m)
147	14,69	14,51	0,18
155	14,01	13,55	0,46
159	13,65	1,35	0,30
166	12,94	12,73	0,21
169	12,48	12,37	0,11
175	11,62	11,62	0

T = referentieperiode afvoer

Q is bovenstroomse randvoorwaarde; h is benedenstroomse randvoorwaarde

Bijlage 18a: Lijst van de modelprofielen

toelichting op de profielenlijst:				
description	profielnaam	stroomvoerende breedte	breedte uiterwaarde	sedimenttransporterende breedte
{				
hoogteligging <i>i</i>	totale rivierbreedte <i>i</i>	stroomvoerende breedte <i>i</i>		
hoogteligging <i>i+1</i>	totale rivierbreedte <i>i+1</i>	stroomvoerende breedte <i>i+1</i>		
hoogteligging <i>i+2</i>	totale rivierbreedte <i>i+2</i>	stroomvoerende breedte <i>i+2</i>		
...		
...		
N.B.:	~alle breedtes in meters			
	~hoogteligging in NAP+m			
	~ <i>i</i> heeft betrekking op de hoogteligging <i>i</i> , etc			
	~ laagste index <i>i</i> , komt overeen met de rivierbodem			
}				

description	a1	132	500	132
{				
	2,1	37,5	37,5	
	3,1	215	85	
	4,4	224	94	
	5,4	229	99	
	10,4	262	132	
	10,5	632	632	
	14	632	632	
}				
description	a2	132	500	132
{				
	1,3	37,5	37,5	
	2,6	85	85	
	3,9	224	94	
	4,9	229	99	
	9,9	262	132	
	10	632	632	
	14	632	632	
}				
description	a3	145	500	145
{				
	2,4	78	78	
	4	232	102	
	5	242	112	
	10	275	145	
	10,1	645	645	
	14	645	645	
}				

description	b1	130	1500	130
{				
-1,57	39	39		
2,05	59	59		
2,62	76	76		
4,05	216	86		
5,05	227	97		
10,05	260	130		
10,15	1630	1630		
14	1630	1630		
}				
description	b2	130	1500	130
{				
-1,63	39	39		
1,99	59	59		
2,56	76	76		
3,99	216	86		
4,99	227	97		
9,99	260	130		
10,09	1630	1630		
14	1630	1630		
}				
description	b3	130	1500	130
{				
-1,63	39	39		
1,99	59	59		
2,56	76	76		
3,99	216	86		
4,99	227	97		
9,99	260	130		
10,09	1630	1630		
14	1630	1630		
}				
description	b4	130	1500	130
{				
-1,67	39	39		
1,95	59	59		
2,52	76	76		
3,95	216	86		
4,95	227	97		
9,95	260	130		
10,05	1630	1630		
14	1630	1630		
}				
description	c1	129	1500	129
{				
-0,34	42	42		
2,64	59	59		
2,87	81	76		
4,11	221	91		
5,11	226	96		
10,11	259	129		
10,21	1629	1629		
14	1629	1629		
}				
description	c2	129	1500	129
{				

-0,37	42	42		
2,61	59	59		
2,84	81	76		
4,08	221	91		
5,08	226	96		
10,08	259	129		
10,18	1629	1629		
14	1629	1629		
}				
description	c3	129	1500	129
{				
-0,37	42	42		
2,61	59	59		
2,84	81	76		
4,08	221	91		
5,08	226	96		
10,08	259	129		
10,18	1629	1629		
14	1629	1629		
}				
description	c4	129	1500	129
{				
-0,39	42	42		
2,59	59	59		
2,82	81	76		
4,06	221	91		
5,06	226	96		
10,06	259	129		
10,16	1629	1629		
14	1629	1629		
}				
description	c5	129	1500	129
{				
-0,39	42	42		
2,59	59	59		
2,82	81	76		
4,06	221	91		
5,06	226	96		
10,06	259	129		
10,16	1629	1629		
14	1629	1629		
}				
description	c6	129	1500	129
{				
-0,56	42	42		
2,42	59	59		
2,65	81	76		
3,89	221	91		
4,89	226	96		
9,89	259	129		
9,99	1629	1629		
14	1629	1629		
}				
description	d1	140	1500	140
{				
-1,79	41	41		
1,36	57	57		

1,84	85	85		
4,15	232	102		
5,15	237	107		
10,15	270	140		
10,25	1640	1640		
14	1640	1640		
}				
description	d2	140	1500	140
{				
-1,79	41	41		
1,36	57	57		
1,84	85	85		
4,15	232	102		
5,15	237	107		
10,15	270	140		
10,25	1640	1640		
14	1640	1640		
}				
description	d3	140	1500	140
{				
-2,09	41	41		
1,06	57	57		
1,54	85	85		
3,85	232	102		
4,85	237	107		
9,85	270	140		
9,95	1640	1640		
14	1640	1640		
}				
description	e1	157	500	157
{				
1,75	103	103		
4,1	248	118		
5,1	254	124		
10,1	287	157		
10,2	657	657		
14	657	657		
}				
description	e2	157	500	157
{				
1,55	103	103		
4,1	248	118		
5,1	254	124		
10	287	157		
10,2	657	657		
14	657	657		
}				
description	f1	168	1000	168
{				
-0,33	44	44		
1,53	56	56		
1,66	115	115		
4,23	261	131		
5,23	265	135		
10,23	298	168		
10,33	1168	1168		
14	1168	1168		

}				
description	f2	168	1000	168
{				
-0,99	44	44		
0,87	56	56		
1	115	115		
3,57	261	131		
4,57	265	135		
9,57	298	168		
9,67	1168	1168		
14	1168	1168		
}				
description	g1	178	1000	178
{				
1,2	130	130		
4	270	140		
5	275	145		
10	308	178		
10,1	1178	1178		
14	1178	1178		
}				
description	g2	178	1000	178
{				
1,13	130	130		
3,93	270	140		
4,93	275	145		
9,93	308	178		
10,03	1178	1178		
14	1178	1178		
}				

Bijlage 19: Lijst van de modeldoorsneden

toelichting op de doorsnedelijst				
<i>crosssection</i>	<i>doorsnedenaam</i>	<i>profielnaam</i>	<i>taknaam</i>	<i>afstand tot het begin van de tak (in m)</i>
...

crosssection	a1	a1	branch1	0
crosssection	a2	a2	branch1	8000
crosssection	a3	a3	branch1	8700
crosssection	b1	b1	branch1	8800
crosssection	b2	b1	branch2	0
crosssection	b3	b2	branch2	600
crosssection	b4	b2	branch3	0
crosssection	b5	b4	branch3	400
crosssection	c1	c1	branch3	500
crosssection	c2	c2	branch3	800
crosssection	c3	c3	branch4	0
crosssection	c4	c4	branch4	200
crosssection	c5	c5	branch5	0
crosssection	c6	c6	branch5	1700
crosssection	d1	d1	branch5	3600
crosssection	d2	d1	branch6	0
crosssection	d3	d3	branch6	3000
crosssection	d4	d3	branch7	0
crosssection	e1	e1	branch7	300
crosssection	e2	e2	branch7	2200
crosssection	f1	f1	branch7	3500
crosssection	f2	f1	branch8	0
crosssection	f3	f2	branch8	6600
crosssection	f4	f2	branch9	0
crosssection	g1	g1	branch9	100
crosssection	g2	g2	branch9	900

Bijlage 20: Lijst overige modelwaarden

modeltype: rivier
 morfologie

rooster

	X	Y
minimum waarde	0	0
maximum waarde	30.000	5.000

lokatie

	X	Y
beginwaarde	0	3.000
eindwaarde	28.000	3.000

knopen

	X	Y
node1	0	3.000
node2	8.800	3.000
node3	9.400	3.000
node4	10.200	3.000
node5	10.400	3.000
node6	12.100	3.000
node7	14.100	3.000
node8	17.100	3.000
node8	20.600	3.000
node10	27.200	3.000
node11	28.000	3.000

benedenstroomse randvoorwaarde
Q-h relatie

Q (in m ³ /s)	h (in m)
1000	7,5
1100	7,68
1200	7,86
1300	8,04
1400	8,22
1500	8,40
1600	8,58

Q (in m ³ /s)	h (in m)
1700	8,76
1800	8,94
1900	9,12
2000	9,30
2100	9,48
2200	9,66
2300	9,84

Q (in m ³ /s)	h (in m)
2400	10,02
2500	10,20
2600	10,38
2700	10,56
2800	10,74
3079	10,86
3826	11,62

overige constante paramaters:

Chezywaarde:

Strickler ruwheid uiterwaarden:

wijze van erosie/sedimentatie:

stroomtoestand:

dikte transportlaag bij vaste laag:

tijdstap:

plaatsstap:

transportformule:

vermenigvuldigingsfactor transportformule:

$$C = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$$

$$k_n = 0,2 \text{ m}$$

proportioneel met de waterdiepte

stationair

$$\delta = 0,1 \text{ m}$$

$$\Delta t = 1 \text{ uur}$$

$$\Delta x = 100 \text{ meter}$$

Meyer-Peter & Mueller

3

Bijlage 21: Extra modelgegevens betreffende de verschillende scenario's

Scenario 1

tak	bodem	D _m (in mm)	D ₉₀ (in mm)
branch 1	geen vaste laag	6,39	18
branch 2	geen vaste laag	6,39	18
branch 3	geen vaste laag	3,05	4,5
branch 4	geen vaste laag	3,05	4,5
branch 5	vaste laag	3,05	4,5
branch 6	vaste laag	3,05	4,5
branch 7	vaste laag	3,05	4,5
branch 8	vaste laag	3,05	4,5
branch 9	vaste laag	3,05	4,5

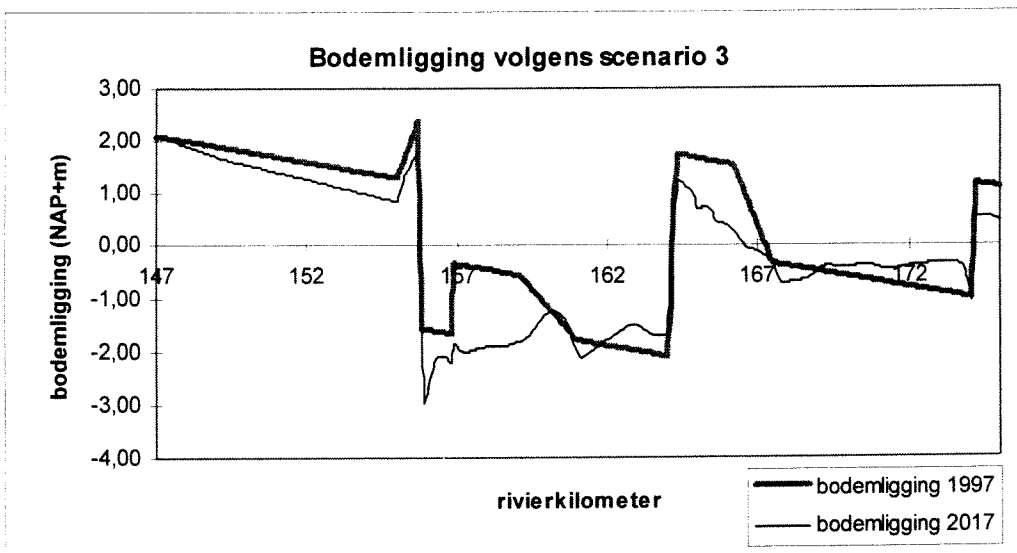
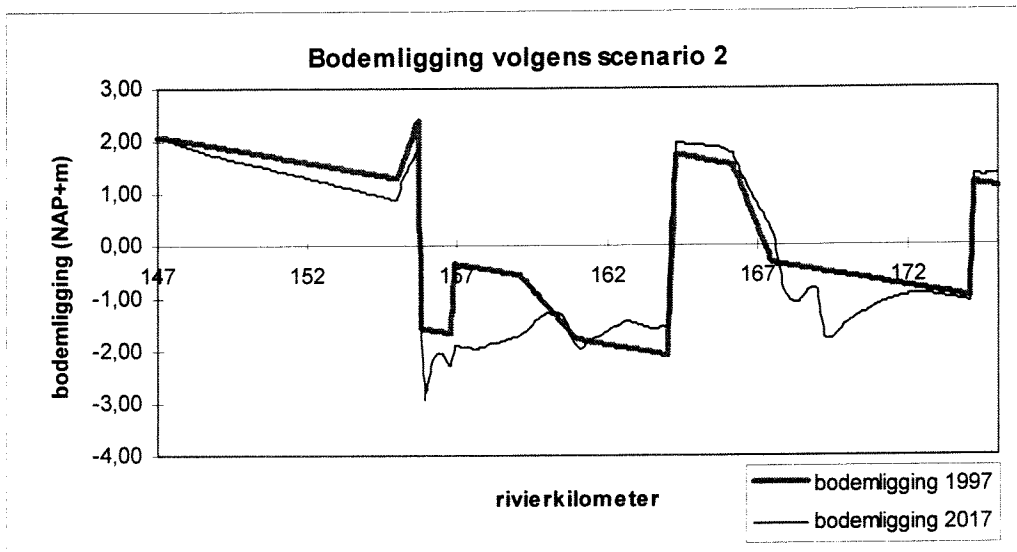
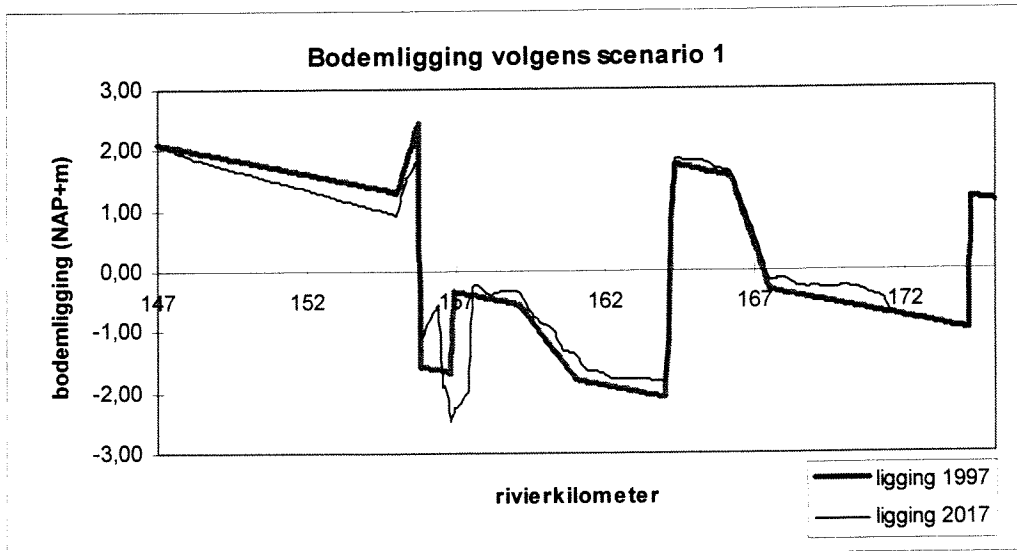
Scenario 2

tak	bodem	D _m (in mm)	D ₉₀ (in mm)
branch 1	geen vaste laag	6,39	18
branch 2	geen vaste laag	3,05	4,05
branch 3	geen vaste laag	3,05	4,05
branch 4	geen vaste laag	3,05	4,05
branch 5	geen vaste laag	3,05	4,05
branch 6	geen vaste laag	3,05	4,05
branch 7	vaste laag	3,05	4,05
branch 8	geen vaste laag	3,05	4,05
branch 9	vaste laag	3,05	4,05

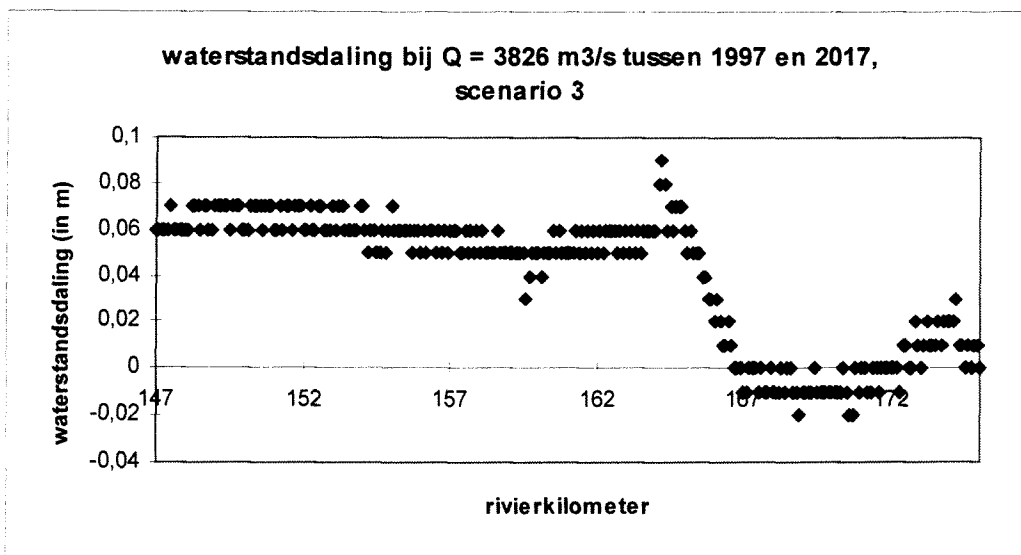
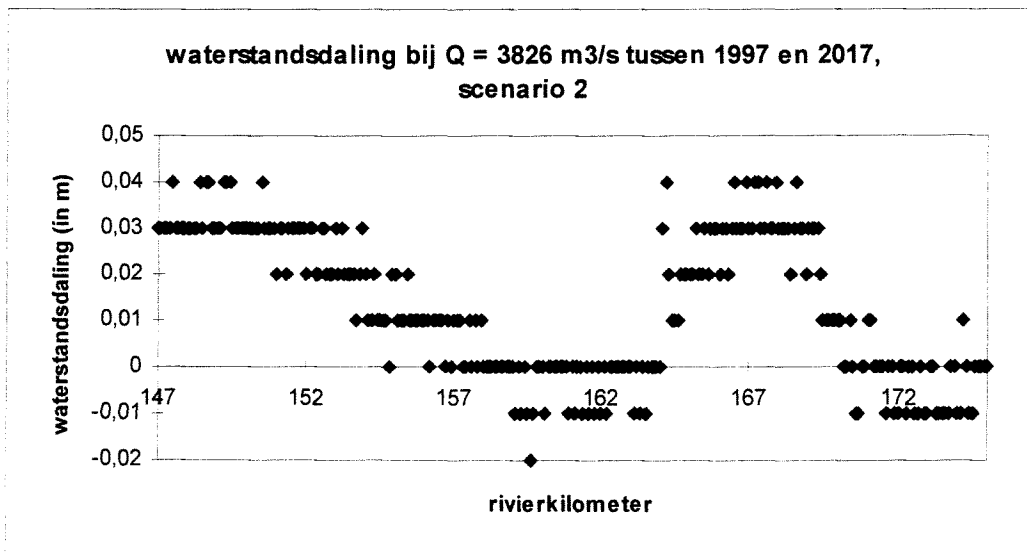
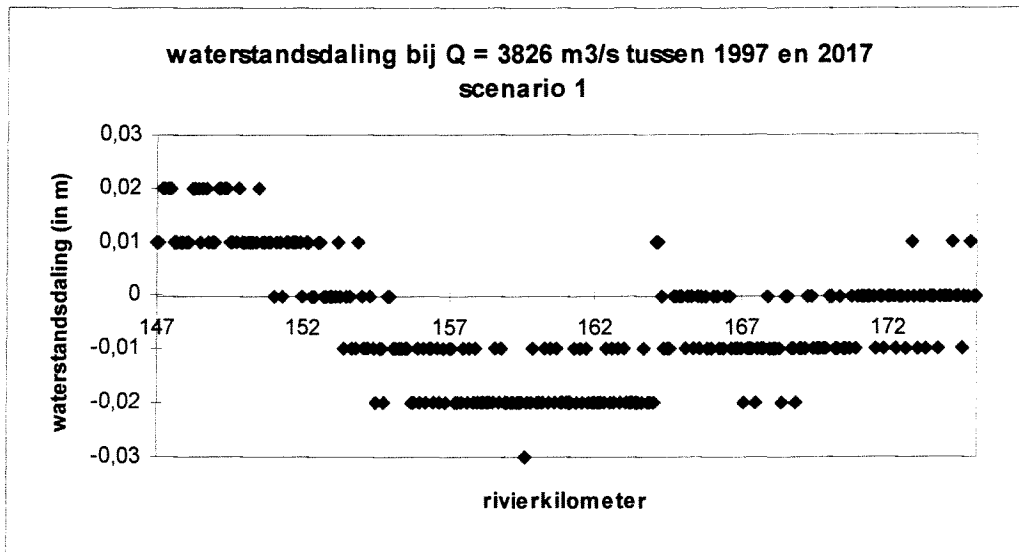
Scenario 3

tak	bodem	D _m (in mm)	D ₉₀ (in mm)
branch 1	geen vaste laag	6,39	18
branch 2	geen vaste laag	3,05	4,5
branch 3	geen vaste laag	3,05	4,5
branch 4	geen vaste laag	3,05	4,5
branch 5	geen vaste laag	3,05	4,5
branch 6	geen vaste laag	3,05	4,5
branch 7	geen vaste laag	3,05	4,5
branch 8	geen vaste laag	3,05	4,5
branch 9	geen vaste laag	3,05	4,5

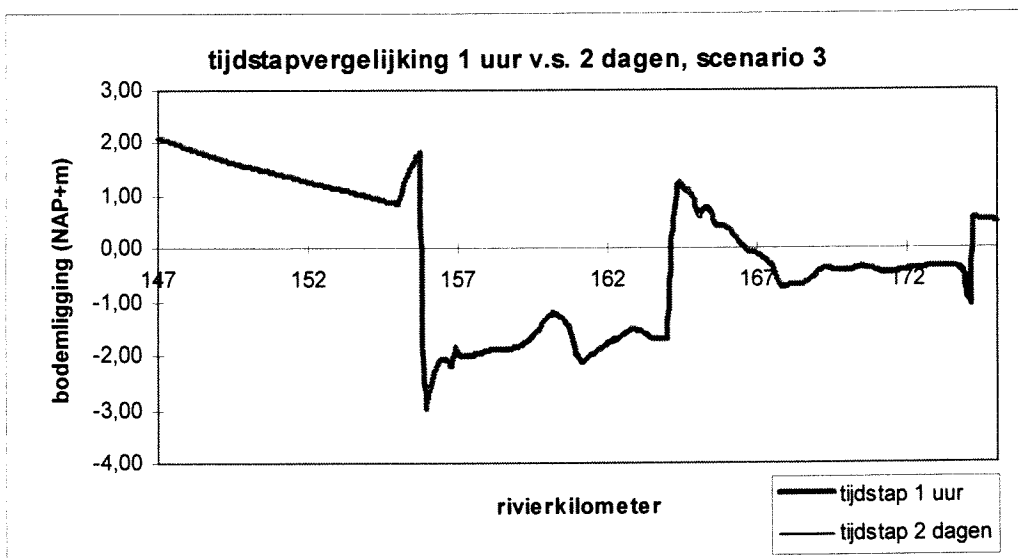
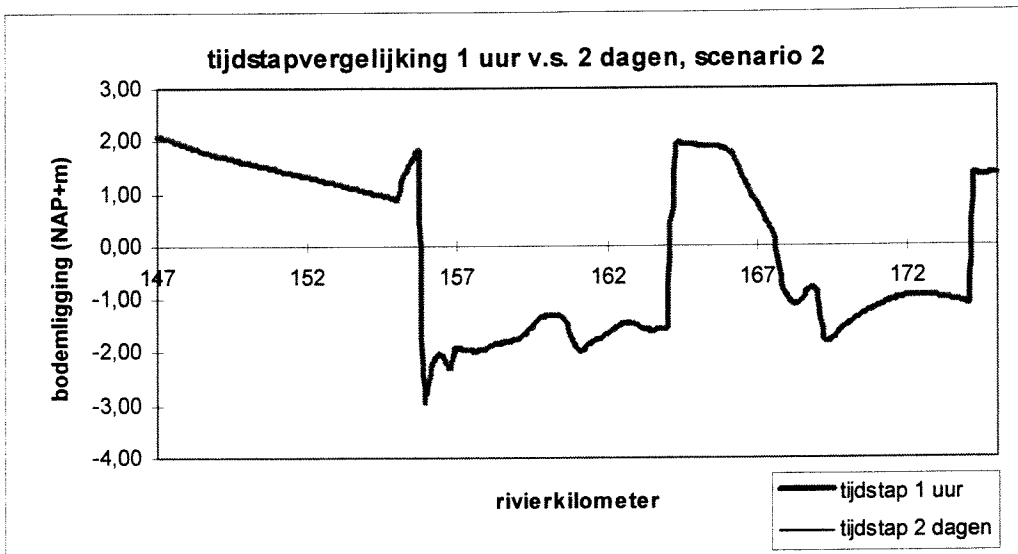
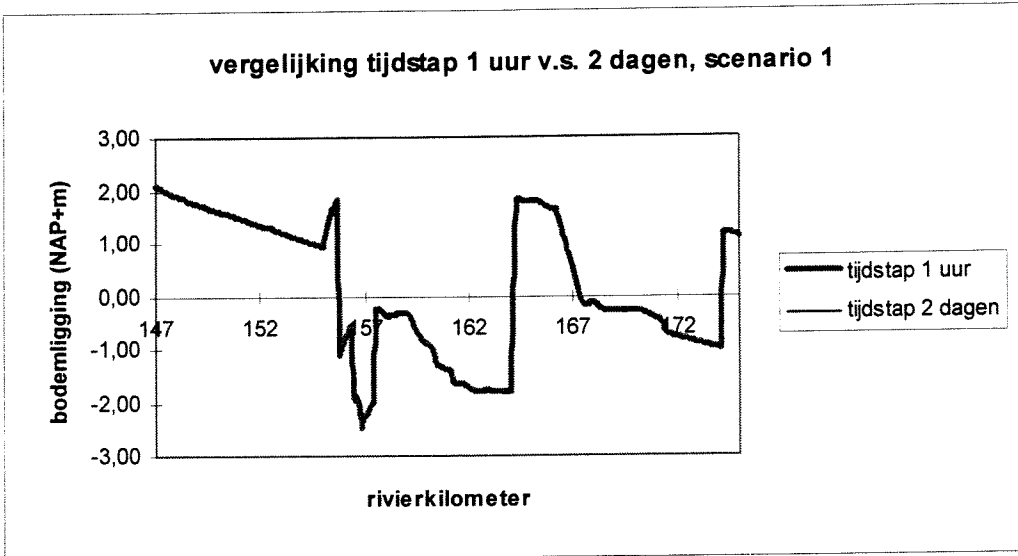
Bijlage 22: Bodemligging in 2017



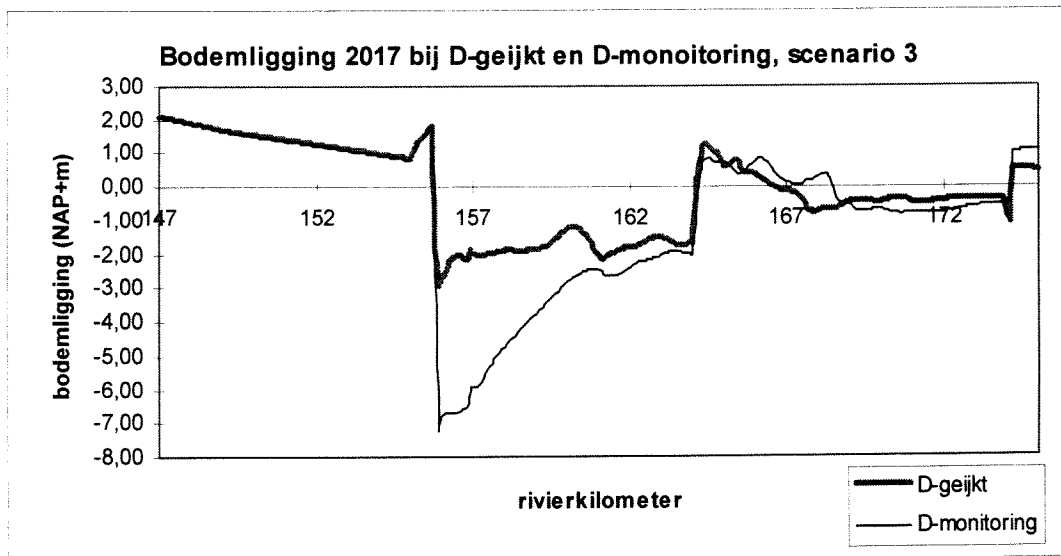
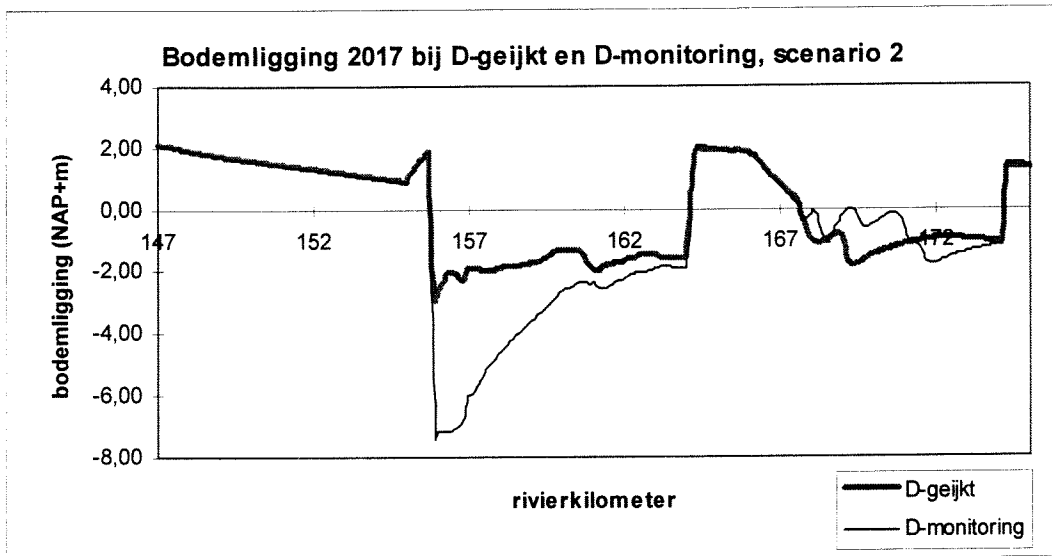
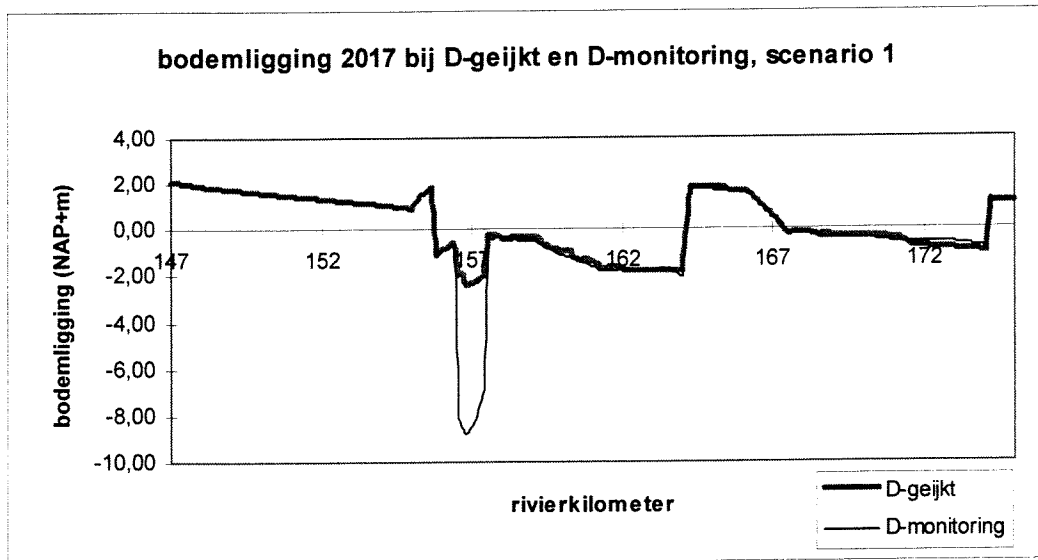
Bijlage 23: waterstandsddaling in 2017 t.o.v 1997 bij een debiet van 3826 m3/s



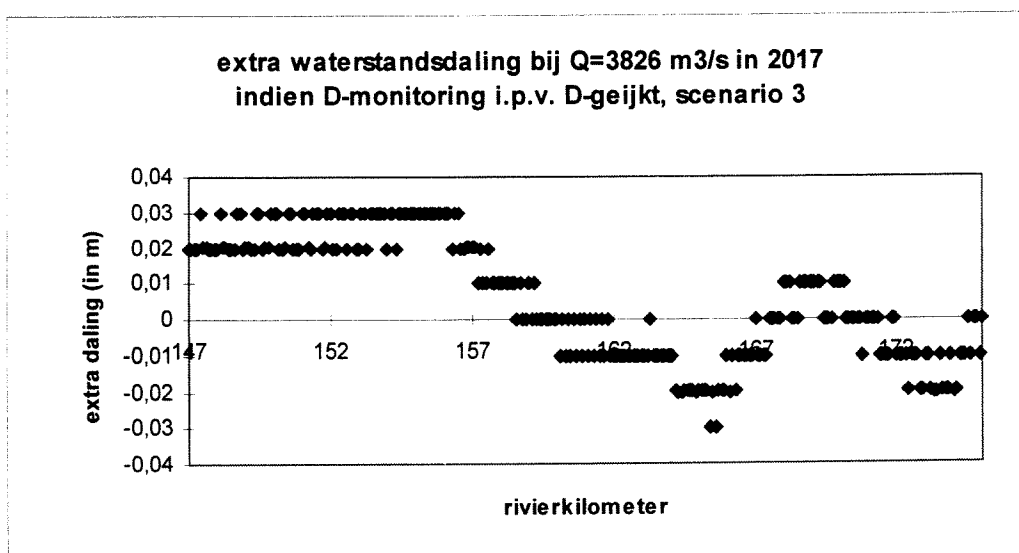
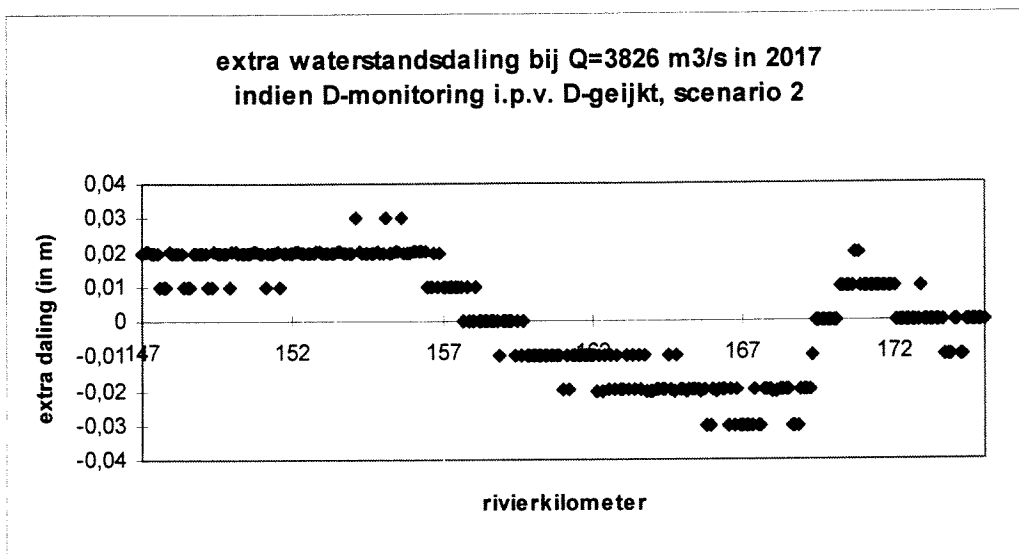
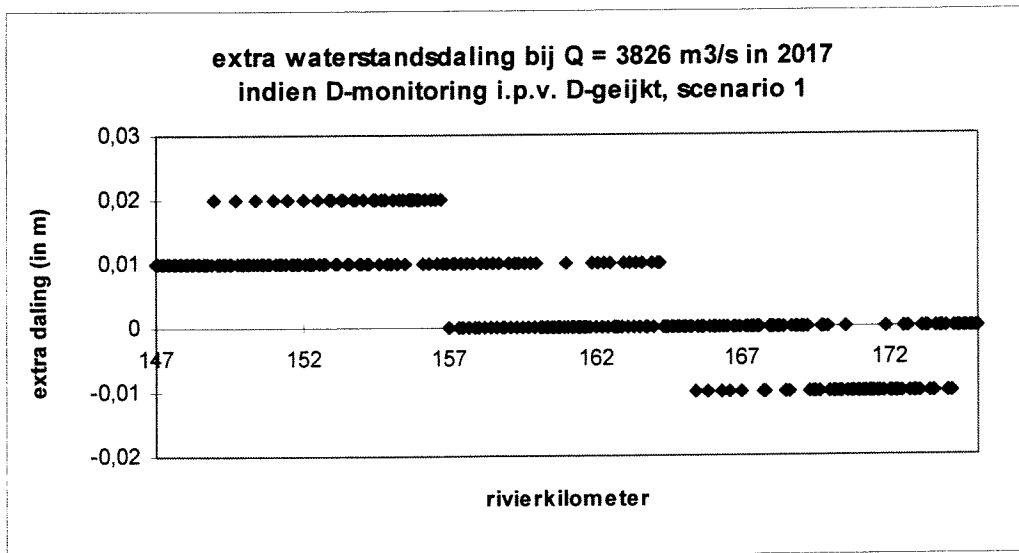
Bijlage 24: Verschillende tijdstappen



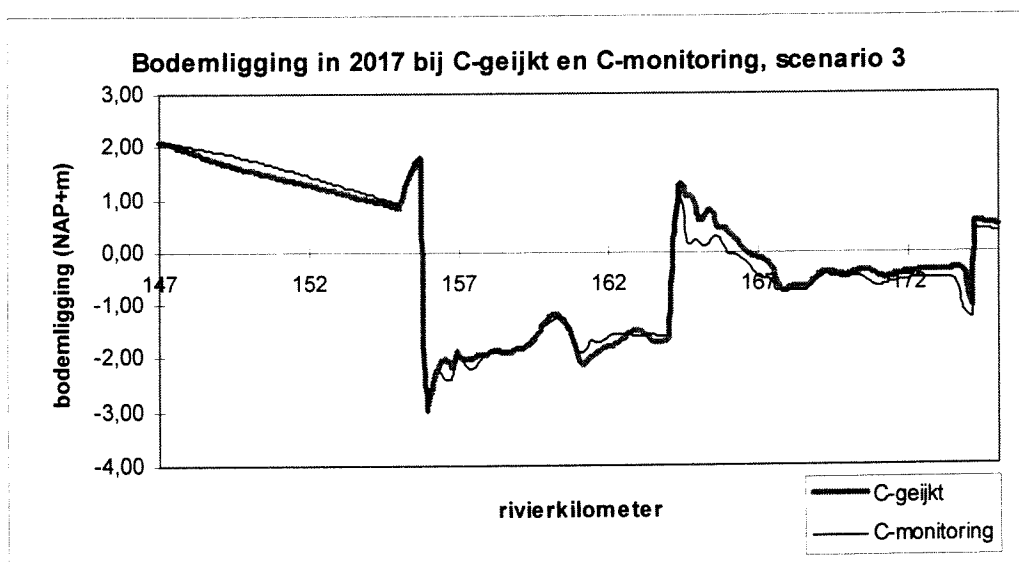
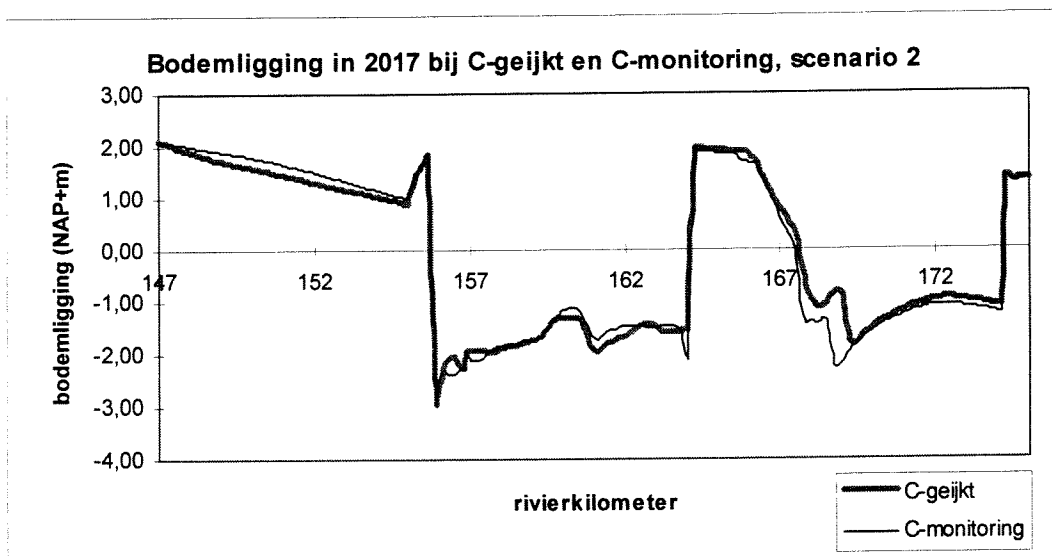
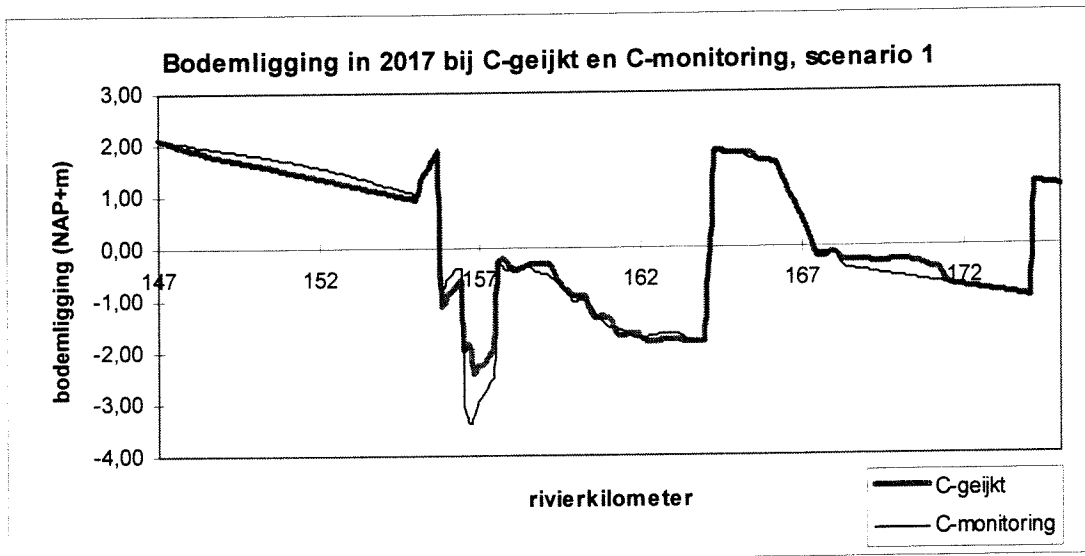
Bijlage 25: Bodemligging in 2017 bij aanname $D = D_{\text{monitoring}}$



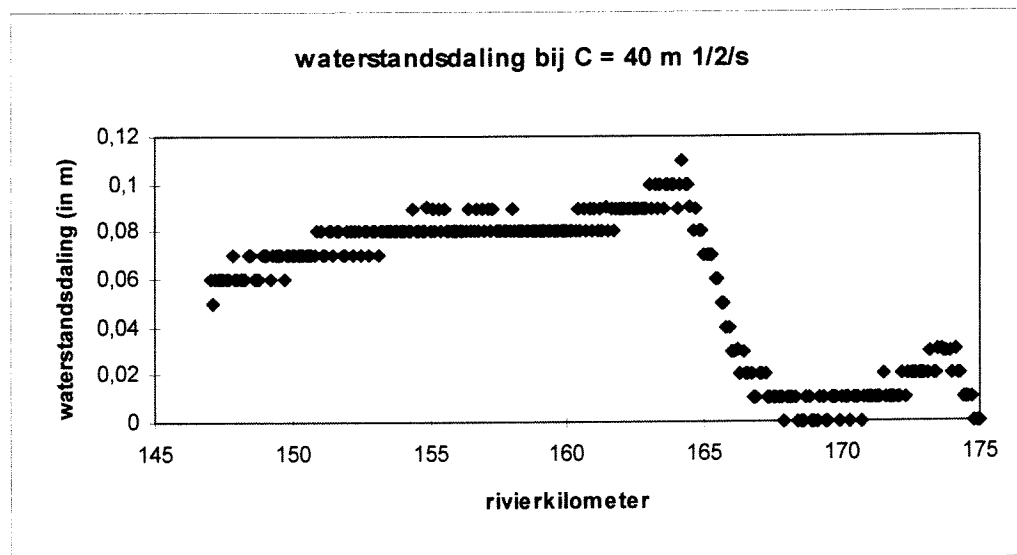
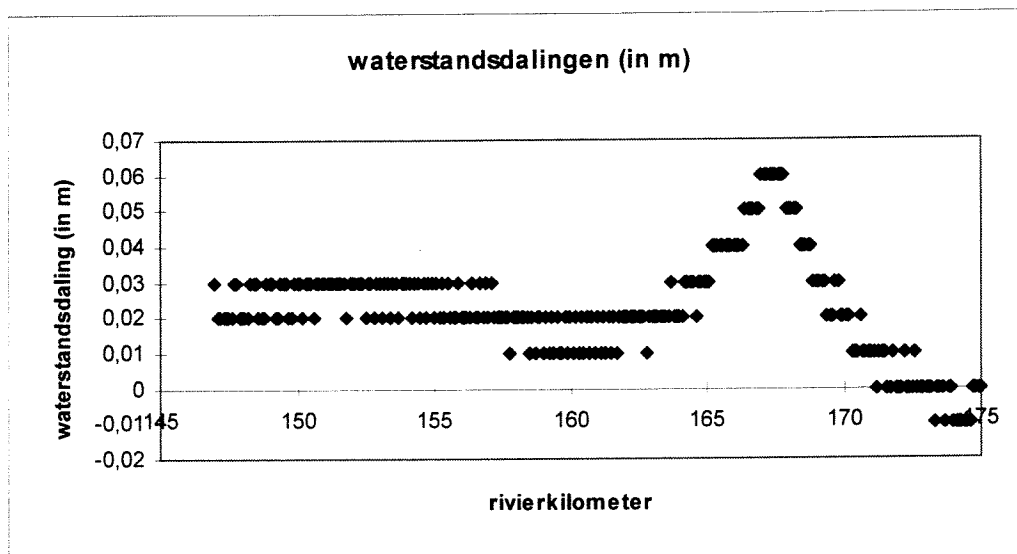
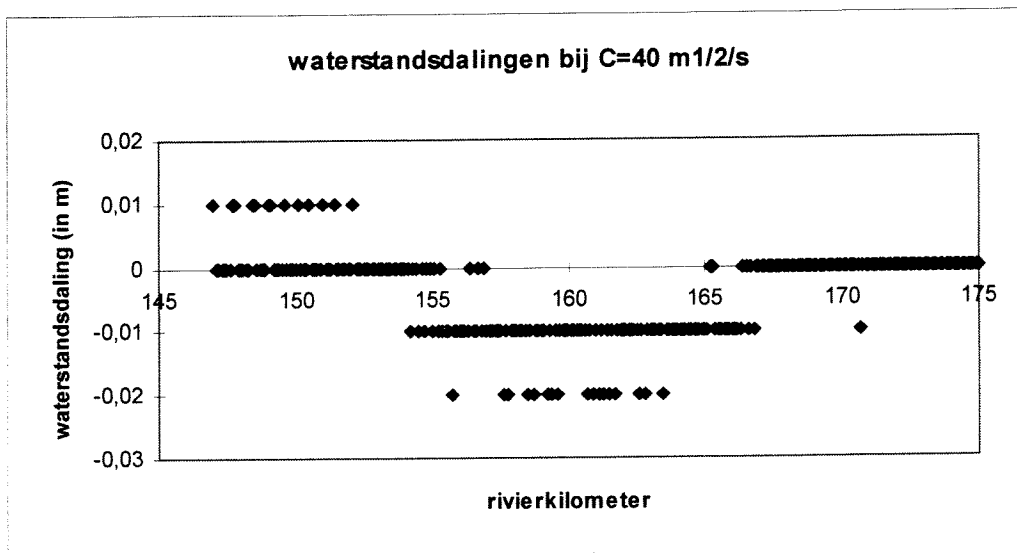
Bijlage 26: Extra waterstandsdaling bij aanname $D = D_{\text{monitoring}}$ bij een debiet van $3826 \text{ m}^3/\text{s}$



Bijlage 27: Bodemligging in 2017 bij C = C_{monitoring}



**Bijlage 28: Waterstandsding in 2017 t.o.v. 1997 bij een debiet van 3826 m³/s
bij aanname C = C_{monitoring}**



Literatuurlijst

1. Battjes, J.A., *Vloeistofmechanica*, Collegedictaat B70. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1990, pp.201-214.
2. Battjes, J.A., *Vloeistofmechanica*, Collegedictaat B71. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1990, pp. 85-105.
3. Bouwmeester, J., *Binnenscheepvaart en scheepvaartwegen; Havens en Scheepvaartwegen*, Collegedictaat f12. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1992, pp. 47-59.
4. CUR/RWS, *Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering*, CUR Report 169, Gouda: CUR, 1995 pp. 4.12-4.14.
5. Fugro ingenieursbureau b.v., *Rapport betreffende monitorplan Maas*, opdrachtnummer H-0895/06, materiaalkundig laboratorium, Arnhem, 1997.
6. Fugro milieu consult b.v., *Rapportage herhalingsbodemonderzoek Maas traject Gennep-Grave*, opdrachtnummer D-6129/193.
7. Jansen, P.Ph.(ed.), *Principles of River Engineering, The non-tidal alluvial river*, Facsimile edition 1994. Delft: Delftse Uitgevers Maatschappij, 1994. Oorspr. uitg.: London: Pitman, 1979.
8. Jong, G. de en Munck, J.C de, *Onderwater akoestiek*, Collegedictaat. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Geodesie, 1982, pp. 58-67.
9. Kleinhans, M.G., *Sedimenttransport in de Nederlandse Rijntakken; verwerking metingen 1988-1995 en toetsing transportvergelijkingen*, ICG rapport 96/7. Universiteit Utrecht, 1996.
10. Kraak, M.J., *Geografische Informatie Systemen*, Collegedictaat. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Geodesie, 1994, pp. 29-38.
11. Przedwojski, R, Blazejewski, R and Pilarczyk, K.W., *River Training Technics; Fundamentals, Design and Applications*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995, pp. 129-134.
12. Raudkivi, A.J., *Loose Boundary Hydraulics*, 3rd edition. Oxford: Pergamon Press, 1990, pp. 228.
13. Rijkswaterstaat, *Monitoringsplan Gennep-Grave*, werkdocument 95.151x, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwater, afdeling Rivieren 1995.
14. Rijkswaterstaat, *Sedimentmetingen Zand-Maas, 15 februari t/m 1 maart 1997*, notitie ZLMD-97.N.001, Directie Zeeland, Meetdienst Zeeland, 1997.
15. Rijkswaterstaat, *Voortgangsrapport monitoring baggerbestek Gennep-Grave*, werkdocument 97.043x, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwater, 1995.
16. Rijkswaterstaat, *De Maas, beïnvloeding van waterstanden door veranderingen in de geometrie, situatie medio oktober 1997*, werkdocument 97.147x, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwater, 1997.
17. Rijn, L.C. van, 'Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport'. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No.10, October, 1984 pp. 1431-1456.
18. Rijn, L.C. van, 'Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport'. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No.11, November, 1984 pp. 1613-1641.

19. Rijn, L.C. van, 'Sediment Transport, Part III: Bed Load Transport'. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No.12, December, 1984 pp. 1733-1754.
20. Schaafsma A.S. en W.J.G.J. der Kinderen, 'Ultrasonic instruments for the continuous measurement of suspended sand transport'. Uit: *Symposium on Measuring Techniques in Hydraulic Research, Delft, 22-24 April 1985*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1986, pp. 125-136.
21. Vakgroep Natuurkundig Practicum, *Natuurkundig Practicum*, handleiding voor TN1 studenten, deel 1. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Technische Natuurkunde, 1994, deel "onnauwkeurighedsanalyse".
22. Velden, E.T.J.M. van der, *Coastal Engineering*, Collegedictaat f7. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1995, pp. 33-71.
23. Vries, M. de, *River Engineering*, Collegedictaat f10. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1993.
24. Vries, M. de, *Rivieren*, Collegedictaat f8. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1994.
25. Verspuy, C., *Lange golven*, Handleiding Deel I, Collegedictaat B73. Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiel Techniek, 1987, pp. 45-67.

Brochurelijst:

26. *2-D USTM, 2-dimensional ultrasonic sand transport meter*. Delft Hydraulics.
27. *Debietmeter FLOW-2000, Een akoestisch systeem voor het meten van debieten*: Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.
28. *Systeem Flow-2000, Akoestische debietmeter voor open wateren*: STORK, Servex B.V..

Software-lijst:

29. Arc/info: ESRI, programma documentatie Arc/info, versie 7.04.
30. Baggis: Fioole, A., Gebruik van het ruimtelijk interpolatieprogramma Surfis, (concept, RIZA rapport 1996).
31. DIGIPOL: Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Gebruikershandleiding, versienummer 1.0.
32. Microsoft Excel, versie 5.0a. Microsoft Corporation.
33. Microsoft Word, versie 6.0a. Microsoft Corporation.
34. Microsoft Windows, versie 3.11. Microsoft Corporation.
35. Microsoft Windows 95. Microsoft Corporation.
36. Sobek: Delft Hydraulics en RWS/RIZA, User manual, version 1.18.
37. Sobek: Delft Hydraulics en RWS/RIZA, Technical reference manual, version 1.18.
38. Sobek: Delft Hydraulics, User manual ODS2XLS, version 1.20.

Belangrijkste symbolen

symbool	dimensie	omschrijving
A	$[L^2]$	oppervlak rivierprofiel
A_s	$[L^2]$	oppervlak doorstroomprofiel
a	$[L]$	waterdiepte
B	$[L]$	rivierbreedte
c	$[M L^{-3}]$	concentratie
c	$[L T^{-1}]$	voortplantingssnelheid verstoring
C	$[L^{1/2} T^{-1}]$	Chezy waarde
D	$[L]$	korreldiameter
D_m	$[L]$	gemiddelde korreldiameter
D_x	$[L]$	korreldiameter waarbij x% van het totale monstergewicht door de zeef wordt doorgelaten
d_e	$[L]$	evenwichtsdiepte
$d_{virt.}$	$[L]$	virtuele waterdiepte
Fr	$[-]$	Froude getal
g	$[L T^{-2}]$	gravitatie versnelling
h	$[L]$	waterstand
i	$[-]$	bodemverhang
k_N	$[L]$	Nikuradse ruwheid
O	$[L]$	natte omtrek
Q	$[L^3 T^{-1}]$	debiet
q	$[L^2 T^{-1}]$	debiet p.e.v. breedte
q_b	$[M T^{-1} L^{-1}]$	bodemtransport p.e.v. breedte
q_s	$[M T^{-1} L^{-1}]$	zwevend transport p.e.v. breedte
R	$[L]$	hydraulische straal
s	$[L^2 T^{-1}]$	sedimenttransport p.e.v. breedte
t	$[T]$	tijd
u	$[L T^{-1}]$	stroomsnelheid langs rivieras
u_*	$[L T^{-1}]$	schuifspanningssnelheid
w_s	$[L T^{-1}]$	valsnelheid korrel in water
x	$[L]$	coördinaat in stroomrichting
z	$[L]$	hoogte boven de waterbodem
z_0	$[L]$	hoogte t.o.v. bodem waar $u = 0$ m/s in het logaritmische stroomprofiel
ε	$[-]$	porositeit sediment
θ	$[-]$	Shields-parameter
θ_{cr}	$[-]$	kritische θ
κ	$[-]$	Von Karmanconstante (0,4)
μ	$[-]$	ribbelfactor
ν	$[L^2 T^{-1}]$	kinematische viscositeit
ρ	$[M L^{-3}]$	dichtheid van water
ρ_s	$[M L^{-3}]$	dichtheid van steen/sediment
σ_b	$[-]$	dimensieloze transportparameter voor bulkvolume
τ	$[M L^{-1} T^{-2}]$	schuifspanning
τ_b	$[M L^{-1} T^{-2}]$	bodemschuifspanning