

DI: 187309

B-BG-00017

DOUBEN.

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland

Ontwikkeling van de Waalbodem bij lage afvoeren

Studie naar natuurlijke processen met behulp van ArcView

Tussenrapport afstudeeronderzoek

oktober 2000

TU Delft



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

Bibliotheek

Nr. PW-BG.00017 ON

wl | delft hydraulics



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

Postbus 9070
6800 ED Arnhem
Tel. 026 - 3688355

Bibliotheek

| naam | afd. | retour | paraaf |
|------|------|--------|--------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

S.V.P. TIJDIG VERLENGEN

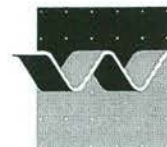
RWS Dir. Oost-Nederland

Bibliotheeknr. PW-BS.00017 ON

Ontwikkeling van de Waalbodem bij lage afvoeren

Studie naar natuurlijke processen met behulp van ArcView

F.E. Schepman



| | | | | | |
|---|--|----------------------------------|----------------|-------------------|--------------------|
| OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland | | | | | |
| TITEL: Ontwikkeling van de Waalbodem bij lage afvoeren Studie naar natuurlijke processen met behulp van ArcView | | | | | |
| SAMENVATTING: Tussenrapport in het kader van het afstudeeronderzoek naar een voorspelling voor de bodemligging van de Midden-Waal, ten behoeve van het beslissingsondersteunend systeem voor het uitvoeren van de baggerwerkzaamheden (BOS Baggeren). Rapportage over de analyses met betrekking tot de natuurlijke processen , uitgevoerd met behulp van ArcView. | | | | | |
| REFERENTIES: opdracht 86.50965 | | | | | |
| VER. | AUTEUR | DATUM | OPMERK. | REVIEW | GOEDKEURING |
| 1 | F.E. Schepman | oktober 2000 | | ir. G.J. Klaassen | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| PROJECTNUMMER: | | Q2734 | | | |
| TREFWOORDEN: | | Morfologische voorspelling, Waal | | | |
| INHOUD: | TEKST | TABELLEN | FIGUREN | APPENDICES | |
| STATUS: | <input type="checkbox"/> VOORLOPIG <input type="checkbox"/> CONCEPT <input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF | | | | |

Inhoud

Lijst van Figuren

Lijst van Tabellen

Lijst van Symbolen

Lijst van afkortingen

| | |
|---|-----------|
| 1 Inleiding | 1 |
| 2 Update beschikbare gegevens en werkwijze..... | 3 |
| 2.1 Beschikbare gegevens..... | 3 |
| 2.2 Werkwijze tijdens de afgelopen fase | 10 |
| 3 Huidige kennis over de opgedrongen geometrie | 11 |
| 3.1 Inleiding | 11 |
| 3.2 Bochten | 11 |
| 3.2.1 Theoretisch dwarsverhang volgens axiaalsymmetrische benadering | 11 |
| 3.2.2 Aanpassingslengten en aanpassingstijd voor bochten | 14 |
| 3.3 Crossings..... | 18 |
| 3.3.1 Aanzanding en uitschuring van crossings..... | 18 |
| 3.3.2 Aanpassingstijd voor crossings | 19 |
| 3.4 Invloed van kribben | 19 |
| 4 Analyse van de “forced” geometrie van de Midden-Waal met ArcView..... | 21 |
| 4.1 Inleiding | 21 |
| 4.2 Bepaling van de tijdsgemiddelde bodemligging | 22 |
| 4.2.1 Gemiddelde van de single-beam Jaarlijkse Dwarspeilingen (JDP's) van 1988 tot en met 1999 | 23 |
| 4.2.2 Gemiddelde van alle multi-beam peilingen vóór aanvang van de eerste baggerwerkzaamheden | 25 |
| 4.2.3 Gemiddelde van alle multi-beam peilingen tussen een hoogwater en baggerwerkzaamheden..... | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3 Resultaten van de analyse van de “forced” geometrie | 26 |
| 4.3.1 Onderlinge vergelijking van de gemiddelden en keuze | 26 |
| 4.3.2 Toepasbaarheid van de tijdsgemiddelde bodemligging | 32 |
| 4.3.3 Vergelijking van het gemiddelde JDP met de theorie | 37 |
| 4.3.4 Bepaling van de aanpassing van crossings in de tijd en vergelijking van de resultaten met de theorie..... | 39 |
| 5 Huidige kennis over de “free” geometrie | 47 |
| 5.1 Alternierende banken | 47 |
| 5.1.1 Groei en demping van alternierende banken | 47 |
| 5.1.2 Voortplantingssnelheid van alternierende banken..... | 49 |
| 5.2 Beddingvormen | 50 |
| 5.2.1 Afmetingen van duinen | 50 |
| 5.2.2 Voortplantingssnelheid van duinen | 55 |
| 5.3 Verstoringen ten gevolge van een hoogwater..... | 57 |
| 5.3.1 Uitdemping van hoogwaterverstoringen | 57 |
| 5.3.2 Voortplantingssnelheid van hoogwaterverstoringen | 57 |
| 6 Analyse van de “free” geometrie van de Midden-Waal met ArcView | 59 |
| 6.1 Uitwijkingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging | 59 |
| 6.1.1 Identificatie van beddingvormen..... | 59 |
| 6.1.2 Identificatie van verstoringen van een hoogwater..... | 64 |
| 6.2 Resultaten van de analyse van de “free” geometrie | 65 |
| 6.2.1 Hoogte van beddingvormen | 65 |
| 6.2.2 Voortplanting van beddingvormen | 76 |
| 7 Conclusies en aanbevelingen | 81 |

| | |
|---|----------|
| Bijlage A Indeling van de Morfologische Eenheden | 1 |
| Bijlage B Analyse van de tijdsgemiddelde bodemligging uit de JDP's: autonome bodemdaling en -stijging | 1 |
| Bijlage C Bepaling van de bruikbare bodempeilingen voor de berekening van de tijdsgemiddelde bodemligging | 1 |
| Bodempeilingen voor aanvang van de baggerwerkzaamheden | 1 |
| Slijk-Ewijk | 1 |
| Winssen | 1 |
| Dodewaard-Druten | 2 |
| Beneden-Leeuwen | 2 |
| Bodempeilingen tussen een hoogwater en baggerwerkzaamheden | 4 |
| Slijk-Ewijk | 5 |
| Winssen | 5 |
| Dodewaard-Druten | 6 |
| Beneden-Leeuwen | 6 |
| Bijlage D Verschillen tussen de berekende tijdsgemiddelde bodemliggingen per traject | 1 |
| Slijk-Ewijk | 1 |
| Winssen | 3 |
| Dodewaard-Druten | 6 |
| Beneden-Leeuwen | 8 |
| Bijlage E Bepaling van het dwarsverhang in de bochten en vergelijking met de theorie | 1 |
| Bijlage F Analyse van het volume van de crossings bij variërende afvoer. | 1 |
| 1. Verandering van het volume per crossing ten opzichte van verschillende vlakken en in de tijd | 1 |
| 2. Verandering van het volume boven een bepaald vlak voor alle crossings en in de tijd | 4 |
| 3. Percentage van het volume per diepteklasse ten opzichte van OLR voor een bepaalde maand en per crossing | 5 |
| 4. Relatie tussen het volume van een crossing boven het vlak OLR-2,80 meter en respectievelijk de gemiddelde afvoer en het verschil in afvoer tussen twee opeenvolgende bodempeilingen..... | 7 |

Bijlage G Analyse van de duinhoogte bij variërende afvoer 1

| | |
|--|----|
| Verschillen in uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging tussen Noord en Zuid | 1 |
| Vergelijking per maand en per traject van de absolute waarde van de maximale positieve uitwijking (bult) en de maximale negatieve uitwijking (kuil) aan beide zijden | 2 |
| Vergelijking van de maximale duinhoogte per traject en per zijde voor elke bodempeiling voor aanvang van de baggerwerkzaamheden | 9 |
| 2. Maximale hoogte van bulten en kuilen per diepteklasse van de gemiddelde waterdiepte | 13 |
| 3. Uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus de waterdiepte | 16 |
| Uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus de waterdiepte per traject over alle bodempeilingen tot aan de eerste baggerwerkzaamheden | 24 |
| 4. Duinhoogte bij verschillende waterdiepte uit hoogte van bulten en kuilen | 26 |

Bijlage H Tabellen afvoerverdeling Rijntakken 1996.0 1

Lijst van Figuren

| | |
|---|----|
| figuur 2-1: Overzichtsk kaart van de meettrajecten uit de Proef Morfologie (PM) | 3 |
| figuur 2-2: Afvoer verloop van de Boven-Rijn, met aanduiding van de meet- en baggerperiodes in 1998..... | 5 |
| figuur 2-3: Afvoer verloop van de Boven-Rijn en de Waal in 1999..... | 7 |
| figuur 2-4: Afvoer verloop van de Boven-Rijn en de Waal in 2000..... | 8 |
| figuur 3-1: Evenwicht voor een korrel op een helling | 12 |
| figuur 3-2: Relatieve dempings- en golflengte van de oscillatie als functie van de interactieparameter; vergelijking van de oplossing van het volledige model en het sterk vereenvoudigde model | 16 |
| figuur 3-3: Afhankelijkheid van de relatieve dempings- en golflengte van de oscillatie van de graad van niet-lineariteit | 17 |
| figuur 3-4: Response van de bodemligging op een opgelegde verstoring | 17 |
| figuur 3-5: Voorbeeld van een traject met kribbenvelden afgewisseld door gestrekte oevers | 19 |
| figuur 4-1: Gemiddelde bodemligging, bepaald uit de JDP's van 1988 tot en met 1999 | 24 |
| figuur 4-2: Verschil voor traject Winssen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98 | 28 |
| figuur 4-3: Verschil voor traject Winssen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 | 29 |
| figuur 4-4: Verschillen tussen het gemiddelde JDP en bodempeilingen voor bochten naar rechts..... | 34 |
| figuur 4-5: Verschillen tussen het gemiddelde JDP en bodempeilingen voor bochten naar links..... | 35 |
| figuur 4-6: Verschillen tussen het gemiddelde JDP en bodempeilingen voor crossings | 36 |
| figuur 4-7: Vergelijking van het dwarsverhang uit ArcView en uit theoretische / empirische relaties..... | 37 |
| figuur 4-8: Volume van crossings ten opzichte van OLR - 3,20 meter in de tijd | 40 |
| figuur 4-9: Volume van de crossing bij Beneden-Leeuwen ten opzichte van verschillende vlakken..... | 41 |
| figuur 4-10: Verandering van de maximale hoogte van de crossings in de tijd..... | 42 |
| figuur 4-11: Verandering van de gemiddelde hoogte van de crossings in de tijd | 43 |
| figuur 4-12: Snelheid van de verandering in hoogte van de crossings | 43 |
| figuur 5-1: Neutrale stabiliteitskromme [Struik sma, 1997]..... | 48 |
| figuur 5-2: Gemiddelde afmetingen van beddingvormen versus afvoer tijdens het hoogwater van 1997 op de Waal, nabij Druten [Lai, 1998] | 52 |

| | |
|---|----|
| figuur 5-3: Hoogtemodel van de Waal waarin de positie en de vorm van de drie profielen (uit DT2D) wordt getoond. [Wilbers, aug 1998] | 53 |
| figuur 5-4: Correlatie tussen de duinhoogte van beddingvormen op de Waal en de afvoer, onderverdeeld in grote en kleine duinen [Wilbers, aug 1998, en Wilbers en Ten Brinke, 1999]..... | 55 |
| figuur 5-5: Correlatie tussen de golflengte van beddingvormen op de Waal en de afvoer, onderverdeeld in grote en kleine duinen [Wilbers, aug 1998, en Wilbers en Ten Brinke, 1999]..... | 55 |
| figuur 5-6: Voortplantingssnelheid van grote duinen op de Waal versus afvoer [Wilbers en Ten Brinke, 1999]..... | 56 |
| figuur 6-1: Voorbeeld van berekende uitwijkingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging in ArcView | 60 |
| figuur 6-2: Definitie van een duin | 60 |
| figuur 6-3: Identificatie van bulten in ArcView | 61 |
| figuur 6-4: Contourlijnen rond bulten en kuilen | 62 |
| figuur 6-5: Bepaling van de waterdiepte uit de diepte ten opzichte van OLR | 63 |
| figuur 6-6: Duinhoogte voor traject Winssen, bepaald uit 100 meter stroken Noord en Zuid van de rivieras | 66 |
| figuur 6-7: In ArcView berekende duinhoogtes | 68 |
| figuur 6-8: Maximale hoogte van bulten per klasse van de gemiddelde waterdiepte in maart tot en met juni '98 op traject Winssen | 69 |
| figuur 6-9: Bepaling van verschillen ten opzichte van het gemiddelde per klasse van de gemiddelde diepte | 70 |
| figuur 6-10: Uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus waterdiepte voor alle trajecten en alle bodempeilingen voor aanvang van baggerwerkzaamheden | 71 |
| figuur 6-11: Duinhoogte versus oppervlakte bij Winssen voor verschillende gemiddelde waterdiepten | 74 |
| figuur 6-12: Oppervlakte en hoogte van kleine duinen op het traject Winssen | 75 |
| figuur 6-13: Voorbeeld van de voortplanting van duinen tussen twee opeenvolgende bodempeilingen | 76 |
| figuur 6-14: Sedimenttransport in de Waal [Ten Brinke, 2000] | 78 |

Lijst van Tabellen

| | |
|---|----|
| tabel 2-1: Meettrajecten uit de Proef Morfologie (PM)..... | 4 |
| tabel 2-2: Peilings- en baggergegevens per meettraject tijdens de Proef Morfologie (maart 1998 - januari 1999) | 5 |
| tabel 2-3: Bagger- en storttrajecten 1999..... | 6 |
| tabel 2-4: Peilings- en baggergegevens per meettraject voor 1999 | 7 |
| tabel 2-5: Data bodempeilingen 2000..... | 8 |
| tabel 4-1: Huidige indeling van de Morfologische Eenheden binnen het BOS Baggeren voor de beschouwde trajecten uit de Proef Morfologie..... | 22 |
| tabel 4-2: Bodempeilingen voor de tijdsgemiddelde bodemligging voor aanvang van baggerwerkzaamheden..... | 25 |
| tabel 4-3: Bodempeilingen voor de tijdsgemiddelde bodemligging tussen hoogwater en baggeren..... | 26 |
| tabel 4-4: Verschillen tussen de gemiddelden JDP, mb98 en mb98-00 | 30 |
| tabel 4-5: Verschil in verhang voor de bochten naar rechts ten opzichte van het gemiddelde JDP..... | 34 |
| tabel 4-6: Verschil in verhang voor de bochten naar links ten opzichte van het gemiddelde JDP..... | 35 |
| tabel 4-7: Aanpassingslengten en aanpassingstijd voor de bochten van de Midden-Waal.... | 38 |
| tabel 4-8: Crossings binnen de trajecten van de Proef Morfologie en gedeelte van beschikbare bodempeilingen | 39 |
| tabel 4-9: Tijdschaal voor de aanpassing van crossings aan de afvoer..... | 44 |
| tabel 5-1: Berekening van de tijdschaal en voortplantingssnelheid voor alternerende banken | 49 |
| tabel 5-2: Resultaten analyse hoogwaters 1993, 1995, 1997 [Wilbers, aug 1998]..... | 54 |
| tabel 6-1: Berekening van de werkelijke gemiddelde waterdiepte per bodempeiling..... | 64 |
| tabel 6-2: Verschillen tussen Noord en Zuid | 65 |
| tabel 6-3: In ArcView berekende duinhoogtes Noord van de rivieras..... | 67 |
| tabel 6-4: In ArcView berekende duinhoogtes Zuid van de rivieras | 67 |
| tabel 6-5: Diepteklasse tot waar de duinhoogte toeneemt met de waterdiepte..... | 71 |
| tabel 6-6: Gemiddelde, minimale en maximale hoogte van bulten en kuilen per traject en per maand..... | 73 |
| tabel 6-7: Duinhoogte voor de kleine duinen ($A \leq 1200 \text{ m}^2$) | 75 |
| tabel 6-8: Berekening voor de voortplanting van beddingvormen | 77 |

Lijst van Symbolen

| Symbol | Betekenis | Eenheid |
|-------------------|--|-------------------------|
| A | spiraalstromingscoëfficiënt | [-] |
| B | breedte van de hoofdgeul van de rivier | [m] |
| C | coëfficiënt van Chézy | [m ^{1/2} /s] |
| C ₉₀ | hydraulische ruwheidswaarde gebaseerd op de D ₉₀ korreldiameter | [m ^{1/2} /s] |
| c ₀ | voortplantingssnelheid voor 1-D bodemverstoringen | [m/dag] |
| c | voortplantingssnelheid voor 2-D bodemverstoringen | [m/dag] |
| c _{duin} | migratiesnelheid van duinen | [m/dag] |
| D=D ₅₀ | gemiddelde korreldiameter | [m] |
| D _m | mediane korreldiameter | [m] |
| f(θ) | dwarshellingseffect | [-] |
| F _{s,r} | stromingskracht in dwarsrichting | [kN] |
| g | gravitatieversnelling | [m/s ²] |
| G _z | zwaartekracht | [kN] |
| H | amplitude axiaalsymmetrisch dwarsprofiel | [m] |
| h | gemiddelde waterdiepte | [m] |
| i | verhang van de bodem | [-] |
| IP | interactieparameter | [-] |
| k | complex golfgetal van de bodemontwikkeling | [-] |
| L _D | dempingslengte | [m] |
| L _{cr} | lengte van de crossing | [m] |
| L _p | golflengte van de oscillatie | [m] |
| n | graad van niet-lineariteit van het sedimenttransport | [-] |
| Q | debiet | [m ³ /s] |
| R | bochtstraal van de rivier | [m] |
| r | radiale coördinaat, loodrecht op de stroomrichting | [m] |
| s | sedimenttransport per eenheid van breedte | [m ³ /dag/m] |
| sin β | dwarshelling | [-] |
| T | tijdschaal voor 2-D processen | [s] |
| T _{cr} | tijdschaal voor crossings | [s] |
| u | stroomsnelheid | [m/s] |
| u* | schuifspanningssnelheid | [m/s] |
| z | hoogte boven de bodem | [m] |
| z ₀ | hoogte boven de bodem waar de snelheid 0 m/s is | [m] |

| Symbol | Betekenis | Eenheid |
|--------------|--|----------------------|
| z_b | bodemligging | [m] |
| Δ | relatieve dichtheid (ρ_s/ρ) | [-] |
| θ | Shieldsparemeter | [-] |
| κ | constante van Von Kármán ($\kappa=0,4$) | [-] |
| λ | duinlengte | [m] |
| λ_s | aanpassingslengte voor het sedimenttransport | [m] |
| λ_w | aanpassingslengte voor de waterbeweging | [m] |
| μ | ribbelfactor | [-] |
| ρ | soortelijk gewicht van water | [kg/m ³] |
| ρ_s | soortelijk gewicht van de korrels | [kg/m ³] |
| τ_b | totale bodemschuifspanning | [N/m ²] |
| $\tau_{b,s}$ | bodemschuifspanning in de stroomrichting | [N/m ²] |
| $\tau_{b,r}$ | bodemschuifspanning loodrecht op de stroomrichting | [N/m ²] |

Lijst van afkortingen

| Afkorting | Betekenis |
|-----------|--|
| 1-D | ééndimensionaal |
| 2-D | tweedimensionaal |
| 3-D | driedimensionaal |
| BL | (traject) Beneden-Leeuwen |
| BRV | baggerreferentievlak |
| DD | (traject) Dodewaard-Druten |
| Do | (traject) Dodewaard |
| DON | Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat |
| Dr | (traject) Druten |
| DT2D | computer programma voor dune tracking |
| Ew | (traject) Ewijk |
| GIS | geografisch informatie systeem |
| JDP | jaarlijkse dwarspeiling |
| kmr. | kilometterraai |
| KP | werkkilometrering |
| mb | multi-beam bodempeiling |
| ME | Morfologische Eenheid |
| OLR | overeengekomen lage rivierstand |
| ON-806 | baggercontract 1999 |
| ON-1000 | baggercontract 2000 voor de Midden-Waal |
| ON-1023 | baggercontract 2000 voor de Waalbochten bij Nijmegen |
| PM | Proef Morfologie |
| SE | (traject) Slijk-Ewijk |
| Sl | (traject) Slijk |
| Wi | (traject) Winssen |

I Inleiding

Dit rapport doet verslag van de afgelopen fase van mijn afstuderen, van mei tot augustus 2000. Hierin wordt het gedrag van de rivierbodem van de Waal beschreven onder invloed van de natuurlijke processen, ofwel zonder effecten van baggerwerkzaamheden. Dit betreft dus de reactie van de rivierbodem op variërende afvoeren.

In de afgelopen fase is gezocht naar literatuur die een beschrijving geeft van de tweedimensionale (2-D) riviermorfologie, waar mogelijk toegespitst op de Waal. Daarnaast zijn de bodempeilingen die maandelijks op de Midden-Waal worden verricht in ArcView geanalyseerd. De uitkomsten van beide studies zijn met elkaar vergeleken. Daarbij vormen de theoretische of empirische relaties uit de literatuur de hypothesen voor het gedrag van de bodem en de bewerkingen in ArcView de toetsing, zoals dit in het werkplan [Schepman, 2000] beschreven staat.

De onderzoeksvragen die de basis vormden voor de afgelopen fase zijn:

1. Kunnen “forced” en “free” geometrie gescheiden worden?
en zo ja
2. Hoe kan de “forced” geometrie het beste beschreven worden;
3. Hoe varieert de “free” geometrie met de afvoer.

De derde vraag is verder onderverdeeld in drie subvragen:

- Bestaat er een verschil tussen Noord en Zuid;
- Neemt de hoogte van beddingvormen toe met de waterdiepte in een vaste verhouding;
- Treedt er naijling op.

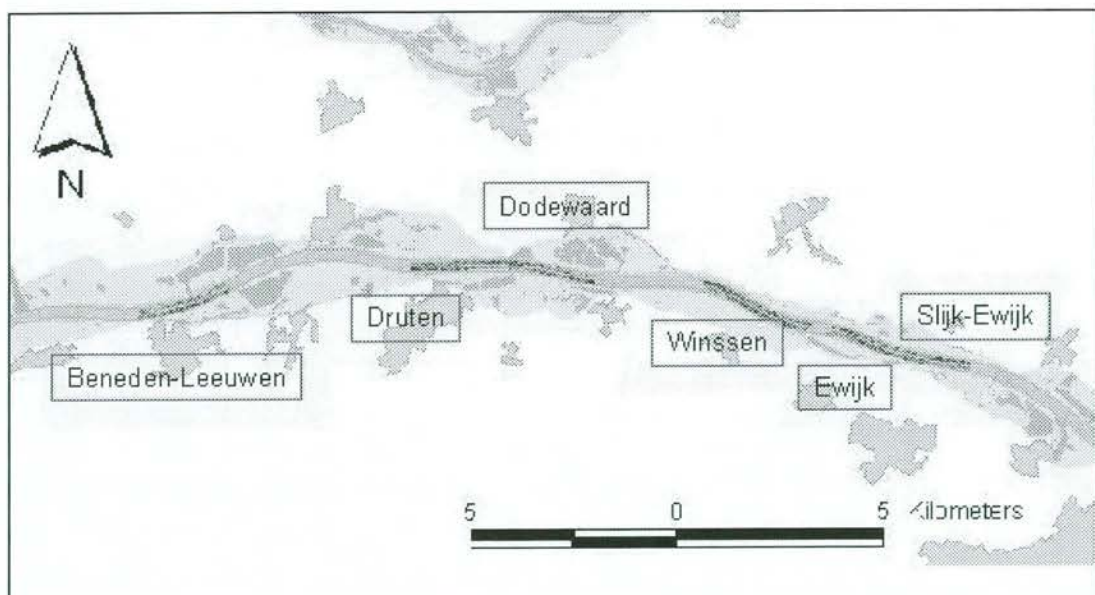
In hoofdstuk 2 wordt opnieuw een overzicht gegeven van de beschikbare gegevens, bijgewerkt en aangevuld met nieuwe informatie. Tevens wordt de werkwijze zoals deze in de afgelopen fase van het afstudeeronderzoek gevolgd is opnieuw beschreven, omdat deze niet geheel overeenkomt met de beschrijving uit het werkplan. In alle navolgende hoofdstukken is het onderscheid aangehouden tussen de “forced” geometrie, de door de geometrie van de rivier opgedrongen bodemligging, en de “free” geometrie, de vrije, zich voortplantende verschijnselen. De resultaten van het literatuuronderzoek naar toepasbare theoretische en/of empirische relaties voor de beschrijving van de 2-D morfologie van de Waal worden voor de opgedrongen en de vrije verschijnselen respectievelijk in de hoofdstukken 3 en 5 beschreven. De analyses die uitgevoerd zijn in ArcView, de resultaten en de vergelijking met de beschrijving uit de literatuur worden vervolgens gepresenteerd in de hoofdstukken 4 en 6. In het laatste hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen uit de afgelopen fase van het afstudeerwerk en uit dit rapport samengevat.

2 Update beschikbare gegevens en werkwijze

2.1 Beschikbare gegevens

Deze paragraaf geeft een volledig overzicht van de gegevens die momenteel beschikbaar zijn voor het afstudeeronderzoek. Ten opzichte van het werkplan zijn er enige gegevens toegevoegd en tevens enige gegevens aangepast.

Vanaf maart 1998 zijn er maandelijks metingen van de bodemligging van de Waal verricht, over zes trajecten van ieder 2 kilometer lengte.¹ Deze metingen gaan momenteel nog steeds door. Ze geven een beeld van het karakter van de Waalbodem bij verschillende afvoeren en van het morfologisch herstel na baggerwerkzaamheden (baggeren en terugstorten). De trajecten liggen allemaal op de Midden-Waal en bevatten dus enkel flauwe rivierbochten. De zes trajecten zijn als volgt gesitueerd:



figuur 2-1: Overzichtskaart van de meettrajecten uit de Proef Morfologie (PM)

Voor de analyses van de bodempeilingen die in dit rapport worden uitgevoerd zijn de trajecten Slijk en Ewijk evenals Dodewaard en Druten samengevoegd tot één traject, respectievelijk Slijk-Ewijk (SE) en Dodewaard-Druten (DD), aangezien de metingen volledig aaneengesloten zijn. De zo verkregen vier trajecten vormen het totale studiegebied van het onderzoek; de resultaten zullen naar verwachting voor de gehele Midden-Waal toepasbaar zijn.

¹ In de volgende maanden is er echter niet gemeten: augustus 1998, april 1999, juli 1999, augustus 1999, april 2000. Op traject Slijk is daarnaast niet gemeten in april t/m juni 1998 en april 1999.

De exacte aanduiding in kilometerraaien (kmr.) van de trajecten uit de Proef Morfologie staat in tabel 2-1.

| traject PM | locatienaam | kmr. begin | kmr. eind |
|------------|-----------------|------------|-----------|
| Sl | Slijk | 889.0 | 891.0 |
| Ew | Ewijk | 891.0 | 893.0 |
| Wi | Winssen | 894.0 | 896.0 |
| Do | Dodewaard | 899.5 | 901.5 |
| Dr | Druten | 901.5 | 903.5 |
| BL | Beneden-Leeuwen | 908.5 | 910.5 |

tabel 2-1: Meettrajecten uit de Proef Morfologie (PM)

In maart 1998 is de eerste oriëntatiepeiling uitgevoerd van het gehele traject tussen kmr. 886 en kmr. 912. De vervolgpeilingen van de bodem vonden plaats op de trajecten uit tabel 2-1. Van 20 juli tot en met 16 september 1998 werden over een lengte van 25 kilometer van de Midden-Waal baggerwerkzaamheden uitgevoerd. De periode dat er gebaggerd werd is per traject in tabel 2-2 weergegeven. In het kader van de Proef Morfologie is onder meer gekeken naar de invloed van de baggerdiepte op de duur van het morfologische herstel en op het verschil tussen het theoretisch bepaalde baggervolume en het werkelijk gebaggerde volume. De verschillende baggerdieptes zijn eveneens per traject weergegeven in tabel 2-2. Direct na de baggerwerkzaamheden zijn er in 1998 eenmalig over drie van de zes trajecten detailpeilingen uitgevoerd. Dit gebeurde dagelijks gedurende twee weken. De detailpeilingen geven een indruk van de bodemactiviteit en voortplanting van beddingvormen bij lage afvoeren.

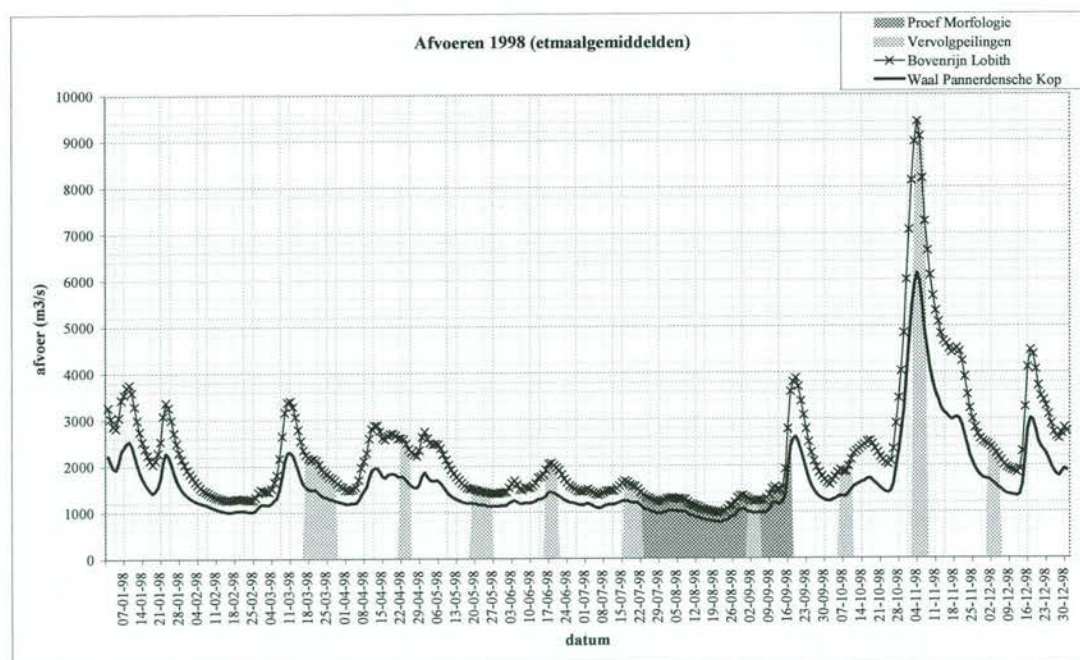
De beschikbare metingen van 1998, zowel de maandelijkse bodempeilingen als de detailpeilingen, zijn verwerkt en reeds op hoofdlijnen geanalyseerd [Taal, 1999]. Alle peilingen en baggerdieptes worden gerelateerd aan een baggerreferentievlak (BRV) dat jaarlijks wordt vastgesteld via extrapolatie van het vlak van de overeengekomen lage rivierstand (OLR)² en aanvullende gegevens. In dit onderzoek worden alle bodempeilingen ten opzichte van het BRV '98 geanalyseerd; dit wordt echter in de praktijk aangeduid als OLR '98.

² De OLR wordt 10-jaarlijks bepaald door Directie Oost-Nederland en vastgesteld door de Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR). De OLR is afhankelijk van de bodemontwikkeling van de Rijntakken, waardoor tussen twee opeenvolgende vaststellingen van het OLR-vlak de officiële OLR steeds verder afwijkt van de werkelijke OLR. Om deze reden wordt tussentijds het BRV vastgesteld.

| traject PM | bodempeilingen | baggerperiode | baggerdiepte (m + OLR) | detail- peiling |
|---------------|--|------------------|---------------------------|--------------------|
| Sl | 23 mrt, 27 juli, 31 aug, 5 okt, 2 nov, 30 nov, 6 jan | 20 juli - 17 aug | -3,20 | ja |
| Ew | 17 mrt, 21 apr, 18 mei, 19 juni, 15 juli, (31 aug), (5 okt), 2 nov, 30 nov, 6 jan | 20 juli - 3 aug | -3,20 | nee |
| Wi | 18 mrt, 22 apr, 19 mei, 17 juni, 16? juli, 1 sep, (6 okt), 3 nov, 1 dec, 7 jan | 27 juli - 14 aug | -3,40 | ja |
| Do | 19 mrt, 23 apr, (20 mei), 16 juni, 17 juli, 3 sep, 7 okt, 4 nov, 2 dec, 11 jan | 7 aug - 28 aug | -3,40 | nee |
| Dr | 20 mrt, 23 apr, (20 mei), 16 juni, 20 juli, 4 sep, 8 okt, 5 nov, 3 dec, 11 jan | 24 aug - 4 sep | -3,00/3,20 | nee |
| BL | 21 mrt, 24 apr, 25 mei, 15 juni, (21 juli), 2? sep, 9 okt, 6 nov, 1 dec, 8 jan | 7 sep - 16 sep | -3,00 | ja |

tabel 2-2: Peilings- en baggergegevens per meettraject tijdens de Proef Morfologie (maart 1998 - januari 1999)³

Bij de analyse van de gemeten waterdieptes is het verloop van de afvoer in de periode voorafgaand aan de metingen van groot belang. Het afvoerterloop over 1998 is weergegeven in figuur 2-2.



figuur 2-2: Afvoerterloop van de Boven-Rijn, met aanduiding van de meet- en baggerperiodes in 1998

³ Data die tussen haakjes staan betreffen bodempeilingen die niet correct zijn [Taal, 1999, en bijlage C] en die dus niet voor analyses gebruikt kunnen worden; data met een vraagteken betreffen bodempeilingen die gezien het beeld op een andere datum moeten zijn uitgevoerd dan de opgekregen datum.

De baggerwerkzaamheden van 1999 vallen onder contract ON-806. Binnen dit contract is er over een totale lengte van 60 kilometer Midden-Waal gebaggerd, waarna de gebaggerde trajecten met behulp van onderhoudsbaggerwerk op diepte zijn gehouden. Bij de baggerwerkzaamheden heeft alleen verrekening plaatsgevonden voor het werk dat is uitgevoerd binnen de vaargeulbelijning, met een tolerantie van maximaal 20 centimeter in hoogte. Over het gehele traject was de bagger- en stortdiepte OLR - 3,20 meter. De trajecten waarover gebaggerd is zijn verdeeld in zogenaamde P- en O-trajecten, welke niet samenvallen met de trajecten uit de Proef Morfologie. Bovendien zijn de trajecten gedefinieerd aan de hand van een werkkilometrerings (KP), die begint op 0 km op het splitsingspunt bij de Pannerdensche Kop (kmr. 867) en die langs de as van de vaargeul gemeten is. De baggerwerkzaamheden zijn uitgevoerd in twee fasen: in de eerste fase zijn alleen op de P-trajecten baggerwerkzaamheden uitgevoerd, in de tweede fase over alle trajecten. Echter, niet op alle trajecten zijn over de gehele lengte baggerwerkzaamheden uitgevoerd. In tabel 2-3 wordt een overzicht gegeven van de gebaggerde trajecten volgens het contract ON-806 en de bijbehorende (geïnterpoleerde) aanduiding in kilometerraaien. In de laatste kolom staan de trajecten uit de Proef Morfologie die geheel of gedeeltelijk binnen de desbetreffende P- en O-trajecten vallen.

| traject ON-806 | KP begin | KP eind | kmr. begin | kmr. eind | traject PM |
|-------------------|-------------|------------|---------------|--------------|---------------|
| P1 | 26,50 | 28,50 | 894,04 | 896,03 | Wi |
| P2 | 30,40 | 32,90 | 897,94 | 900,45 | Do |
| P3 | 35,60 | 38,00 | 903,15 | 905,54 | Dr |
| P4 | 39,50 | 45,00 | 907,04 | 912,52 | BL |
| P5 | 48,00 | 51,90 | 915,59 | 919,54 | |
| O1 | 4,30 | 5,00 | 871,36 | 872,05 | |
| O1 | 5,20 | 5,80 | 872,27 | 872,90 | |
| O2 | 9,00 | 9,70 | 876,16 | 876,88 | |
| O3 | 13,10 | 14,60 | 880,55 | 882,07 | |
| O4 | 18,80 | 21,90 | 886,28 | 889,38 | Sl |
| O4 | 22,10 | 23,10 | 889,58 | 890,59 | Sl |
| O4 | 24,30 | 25,50 | 891,81 | 892,67 | Sl, Ew |
| O4 | 25,70 | 26,50 | 892,81 | 894,04 | Ew |
| O5 | 28,50 | 30,40 | 896,03 | 897,94 | |
| O6 | 32,90 | 34,80 | 900,45 | 902,34 | Do, Dr |
| O7 | 38,00 | 39,50 | 905,54 | 907,04 | |
| O8 | 45,00 | 47,00 | 912,52 | 914,56 | |
| O8 | 47,40 | 48,00 | 914,98 | 915,59 | |
| O9 | 51,90 | 56,30 | 919,54 | 924,01 | |
| O10 | 61,20 | 64,50 | 929,01 | 932,37 | |
| O10 | 64,90 | 65,60 | 932,78 | 933,48 | |

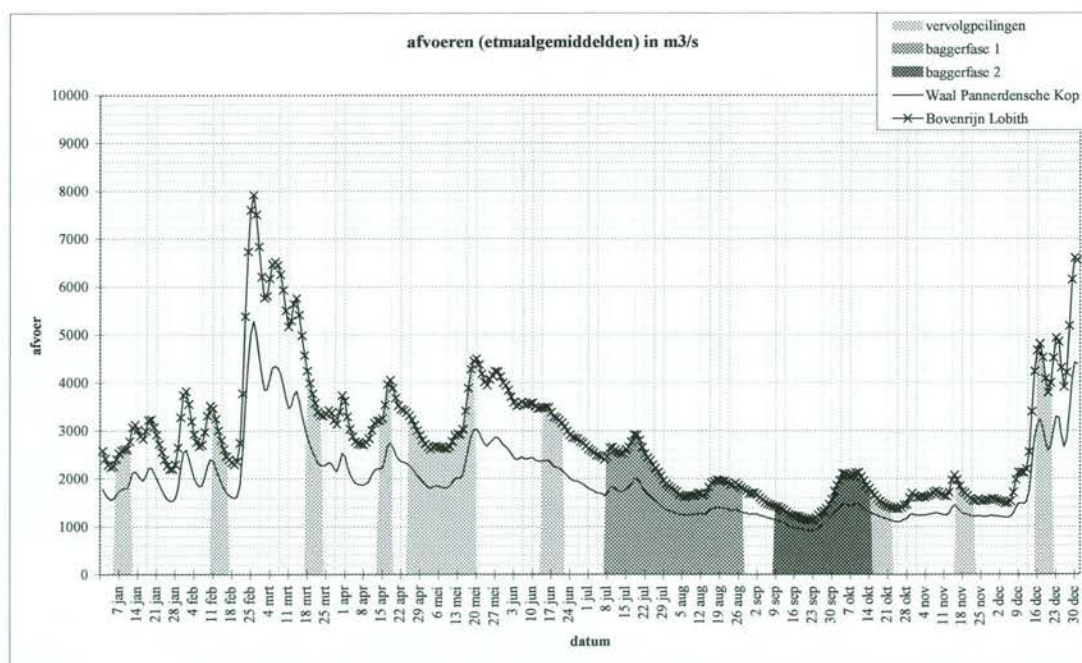
tabel 2-3: Bagger- en storttrajecten 1999

De maandelijkse bodempeilingen op de trajecten van de Proef Morfologie zijn in 1999 doorgegaan. Voor de bepaling welke bodempeilingen voor en na baggerwerkzaamheden vallen zijn de gegevens van de P- en O-trajecten omgezet naar gegevens voor de trajecten van de Proef Morfologie. Op de trajecten Slijk, Ewijk en Druten zijn slechts over een gedeelte van de gehele lengte baggerwerkzaamheden uitgevoerd. De peildata en baggerperiode per traject uit de Proef Morfologie zijn weergegeven in tabel 2-4. Er zijn geen detailpeilingen uitgevoerd.

| traject PM | bodempeilingen | baggerperiode |
|------------|--|--------------------------------------|
| SE | 6 jan, 16 feb, 23 mrt, 18 apr (alleen Ewijk), 26/25 apr, 16 juni, 12 aug, 22 okt, 16 nov, 16 dec | 9 sept - 27 sept |
| Wi | 7 jan, 12 feb, 22 mrt, 17 apr, 25 mei, 21 juni, 17 aug, 21 okt, 22 nov, 21 dec | 8 juli - 23 juli 16 sept - 1 okt |
| DD | 11 jan, 12/11 feb, 19 mrt, 16 apr, 19 mei, 14 juni, 16 aug, 20 okt, 18 nov, 17 dec | 27 juli - 17 aug 24 sept - 11 okt |
| BL | 8 jan, 11 feb, 18 mrt, 14 apr, 18 mei, 15 juni, 16 aug, 12 okt, 17 nov, 20 dec | 13 juli - 26 aug 29 sept - 14 okt |

tabel 2-4: Peilings- en baggergegevens per meettraject voor 1999⁴

Het afvoerverloop over 1999 is weergegeven in figuur 2-3.



figuur 2-3: Afvoerverloop van de Boven-Rijn en de Waal in 1999

⁴ De bodempeilingen die eind april zijn uitgevoerd, zijn geregistreerd als de bodempeiling van mei; de bodempeilingen die in augustus zijn uitgevoerd als die van september.

De baggerwerkzaamheden van 2000 vallen onder contract ON-1000. Deze zijn gestart op 5 juni 2000 en zijn momenteel nog in uitvoering. De baggerdiepte is opnieuw vastgesteld op OLR - 3,20 m; de stortdiepte binnen de vaargeul echter op OLR - 4,00 m. Buiten de vaargeul gelden geen beperkingen voor de terugstorthoogte; hier wordt sinds juli 2000 mee geëxperimenteerd door juist terug te storten op de ondiepe delen van de rivier om zo meer met de rivier mee te werken. De tolerantie bij de uitvoering is vastgesteld op 75 m³ per vak van 25 meter lengte. De gegevens die gedurende dit derde baggerseizoen worden gemeten zijn vooralsnog niet beschikbaar zijn om binnen dit afstudeeronderzoek te gebruiken.

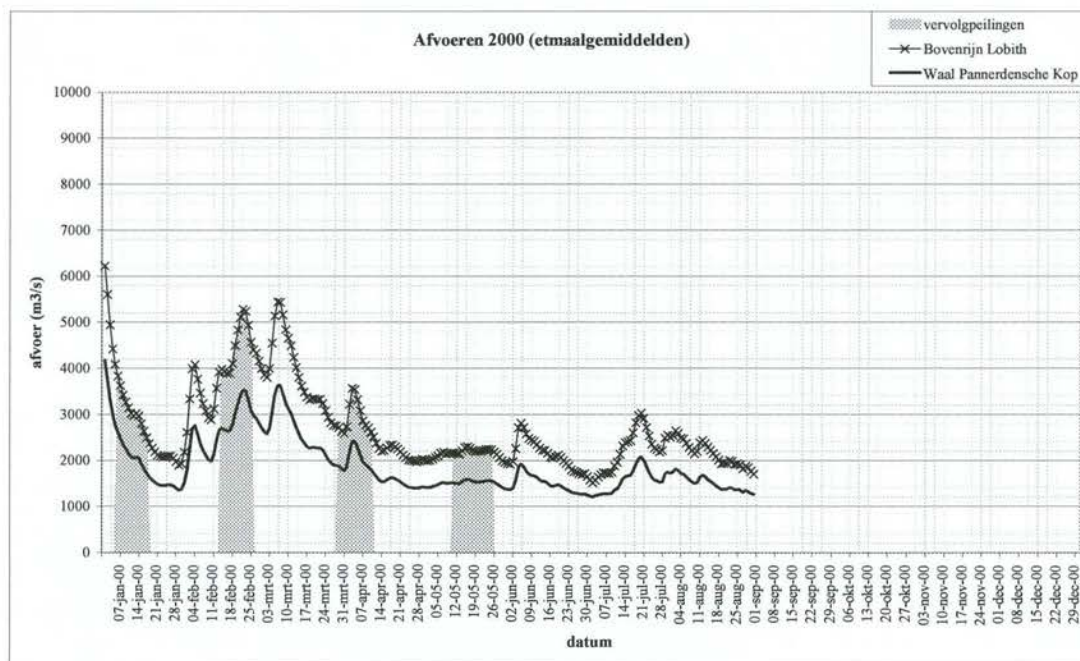
Vanaf augustus 2000 wordt voor het eerst ook in de bochten bij Nijmegen gebaggerd. Dit gebeurt onder contract ON-1023 en valt buiten het studiegebied van dit afstudeerrapport.

De data van de maandelijkse bodempeilingen op de trajecten uit de Proef Morfologie zijn voor 2000 als volgt:

| traject PM | bodempeilingen |
|------------|--------------------------------------|
| SE | 17 jan, 14/18 feb, 29 mrt, 17/25 mei |
| Wi | 14 jan, 18 feb, 31 mrt, 25 mei |
| DD | 7 jan, 25 feb, 10 apr, 17/12 mei |
| BL | 6 jan, 24 feb, 4 apr, 11 mei |

tabel 2-5: Data bodempeilingen 2000

Het afvoerverloop tot en met 31 mei 2000 is weergegeven in figuur 2-4.



figuur 2-4: Afvoerverloop van de Boven-Rijn en de Waal in 2000

Vanaf het tweede baggerseizoen, in 1999, wordt enkele dagen voor de uitvoering van baggerwerkzaamheden op een bepaald traject een inpeiling van de bodemligging verricht over de volledige breedte van de Waal. Zo snel mogelijk na het voltooien van de baggerwerkzaamheden wordt een uitpeiling verricht. Deze in- en uitpeiling vormen aanvullende informatie op de maandelijkse bodempeilingen van Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland (DON). De peilingen beslaan echter niet altijd dezelfde meettrajecten als de Proef Morfologie, omdat ze dienen ter controle van de door de aannemer verrichte baggerwerkzaamheden en dus alleen worden verricht op de trajecten waar gebaggerd of gestort wordt.

Uit de inpeiling wordt het theoretisch te baggeren volume berekend. Per dag en per meetboot kan circa 3 kilometer lengte van de Waal worden ingepeild. Het daadwerkelijk gebaggerde volume is echter altijd groter dan het theoretisch bepaalde, onder meer doordat tijdens het baggeren door het sedimenttransport alweer materiaal aangevuld wordt vanuit bovenstroomse en zijwaartse richting. Daarnaast moet rekening gehouden worden met een uitlevering van circa 5%: dit is het verschil in volume doordat het sediment een lossere pakking heeft in de beun van het schip dan op de Waalbodem. Voor het totale verschil in volume wordt gemiddeld een factor 1,8 aangehouden, maar dit neemt toe naarmate de te baggeren hoeveelheid kleiner is. Het daadwerkelijk gebaggerde volume wordt niet geregistreerd, mede doordat de baggerhoeveelheid niet eenduidig per locatie vast kan worden gelegd, zodra met varend materieel wordt gewerkt en gebaggerd wordt totdat de beun vol is. De baggerwerkzaamheden worden uitgevoerd met kleine sleephopperzuigers. Voor ondieptes in de rivier die te klein zijn om te baggeren wordt een ploeg ingezet, die de bodem gladstrijkt en kleine bulten in diepere kuilen schuift. Het terugstorten van materiaal uit het beun vindt in één keer plaats, aangezien tussentijds sluiten zeer lastig is. Daarom wordt alleen gedumpt op plaatsen waar minimaal een meter diepte beschikbaar is. De minimaal benodigde lengte van een kuil wordt bepaald door de lengte van het schip en bedraagt circa 60 à 70 m. Daarnaast geldt de eis dat het storten moet gebeuren binnen de normaallijnen. Doordat het dumpen van sediment op één locatie plaatsvindt, is registratie hiervan wel mogelijk.

Uit de uitpeiling direct na afloop van de baggerwerkzaamheden kan het verschilvolume met de inpeiling worden berekend, zodat globaal valt af te leiden waar er tot welke diepte gebaggerd is. Het uitpeilen gebeurt op kortere trajecten om de tijd tussen het voltooien van de baggerwerkzaamheden en de uitpeiling te minimaliseren.

Voor 1998 zijn de hierboven beschreven theoretische baggervolumes en de storthoeveelheden en -locaties per strook van 100 meter lengte en onderverdeeld naar rechter- en linkeroever in een Excel-bestand beschikbaar. Voor 1999 zijn per strook van 25 meter lengte de berekende volumes van de in- en uitpeiling boven het vlak OLR - 3,20 meter aangeleverd.

Sinds begin van dit jaar wordt naast de maandelijkse bodempeilingen elke twee weken een beheerspeiling uitgevoerd. Hierbij wordt de volledige rivier bemeten op het ondiepe gedeelte, buiten de stroombaan: er worden in bochten twee raaien en rond de crossings drie raaien gepeild. Deze bodempeilingen geven een goed beeld van te verwachten knelpunten. Vooral nog zijn de beheerspeilingen niet beschikbaar voor analyse binnen dit afstudeeronderzoek.

Naast alle bodempeilingen in het kader van de baggerwerkzaamheden op de Waal wordt elk jaar over de gehele lengte van de rivier een jaarlijkse dwarspeiling (JDP) verricht. Vanaf 1999 gebeurt dit gebiedsdekkend met behulp van multi-beam meetapparatuur; tot dan toe met single-beam meetapparatuur, waarmee met een onderlinge raai afstand van 125 of 62,5 meter (afhankelijk van de locatie) een meting van het dwarsprofiel wordt verkregen. Over de metingen tot 1988 bestaat onzekerheid wat betreft de nauwkeurigheid (er treedt een trendbreuk op), zodat alleen de metingen vanaf 1988 voor analyse beschikbaar zijn. Voor deze JDP's zijn van de gepeilde dwarsraaien echter met behulp van een interpolatiemethode (digipol) gebiedsdekkend gridbestanden gecreëerd. De JDP's vormen hierdoor een aanvulling op de maandelijkse metingen. Dit geldt echter niet voor de multi-beam JDP's vanaf 1999, aangezien de meting voor de desbetreffende maand uit de JDP wordt overgenomen.

2.2 Werkwijze tijdens de afgelopen fase

De aanpak zoals die in het werkplan staat beschreven is in de afgelopen fase niet volledig gevolgd. Dit kwam voornamelijk voort uit de planning van de activiteiten en beperkingen van ArcView. Allereerst stond het verblijf in Arnhem om te werken met de GIS-data al min of meer vast, terwijl op dat moment nog geen daadwerkelijke hypothesen waren opgesteld. Bovendien bleek het lastiger dan verwacht om binnen ArcView een goede scheiding uit te voeren van de verschillende verschijnselen die in het werkplan benoemd zijn. Gekozen is daarom voor een aanpak waarbij de bodemligging wordt beschreven met een gemiddelde “evenwichts”bodemligging (de opgedrongen of “forced” geometrie), waar zich vrije verstoringen (“free” geometrie) overheen voortplanten. Van de opgedrongen geometrie wordt hierbij verondersteld dat deze zich zodanig langzaam aan variërende afvoeren aanpast dat dit binnen de beschouwde termijn van maximaal één jaar waarvoor de voorspeller toegepast zal gaan worden verwaarloosbaar is. De opgedrongen geometrie is hierdoor in feite het stationaire deel van de bodemligging.

Een tweede probleem was dat binnen ArcView gegevensbestanden op relatief eenvoudige wijze kunnen worden bewerkt, maar dat er geen manier is om gridbestanden langs een kromme te verplaatsen. Het is dus evenmin mogelijk om op deze manier een voorspelde bodemligging uit een gemeten bodempeiling te verkrijgen, om zo een toetsing van de voorspelling uit te voeren.

De aanpak is nu als volgt geweest: ArcView bodempeilingen zijn geanalyseerd en parallel daaraan is literatuur bestudeerd. Uitkomsten uit beiden zijn vervolgens met elkaar vergeleken.

3 Huidige kennis over de opgedrongen geometrie

3.1 Inleiding

De “forced” geometrie is dat deel van de bodemligging, dat opgedrongen is door de geometrie van de rivier zelf: door de constructies en door het aanwezige alignement van zowel het zomer- als het winterbed, met voor de Midden-Waal een opeenvolging van relatief flauwe bochten en een zeer wisselende breedte van de uiterwaarden. Deze “forced” geometrie is afvoerafhankelijk en verandert dus in de tijd. Indien de tijdschaal van deze aanpassing - daling, stijging of kanteling - voldoende groot is ten opzichte van de beoogde voorspellingstermijn, kan een tijdsgemiddelde bodemligging bepaald worden, die als basis gebruikt kan worden om de vrije verschijnselen in de rivier te beschrijven.

In dit hoofdstuk wordt achtereenvolgens besproken wat er in de literatuur bekend is over de 2-D morfologie van bochten en van crossings (bochtovergangen) en over de bodemligging rond kribvakken. Hierbij wordt echter beperkt tot beschrijvingen en relaties die relevant zijn voor en/of toegepast kunnen worden bij de toetsing in ArcView. De gevolgen voor de bodemligging van een hoogwater - erosiekuilen en aanzandingen - worden in hoofdstuk 5 besproken, aangezien dit onderzoek zich concentreert op een voorspelling na een hoogwater en de verstoringen dan niet meer door de geometrie opgelegd zijn, maar zich als vrije verschijnselen voortplanten.

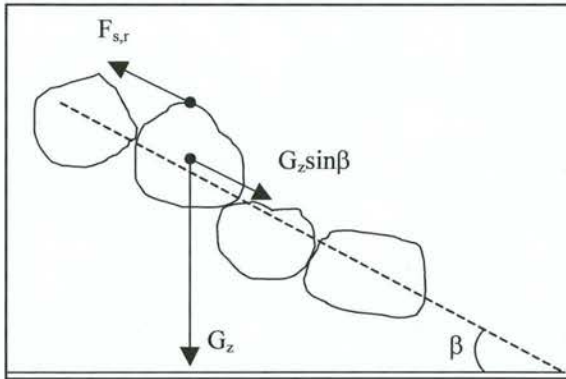
3.2 Bochten

In bochten stelt zich onder invloed van de spiraalstroming een dwarsverhang over de breedte van de rivier in: er is een diepe buitenbocht en een ondiepe binnenbocht. De grootte van dit dwarsverhang bepaalt of een bocht een knelpunt voor de scheepvaart vormt. Het dwarsverhang is voornamelijk afhankelijk van variaties in de afvoer en de bochtstraal. Doordat in een natuurlijke situatie geen sprake is van stationaire stroming, treden aanpassingsverschijnselen op aan het begin van de bocht, waardoor het werkelijke dwarsverhang groter kan zijn dan het evenwichtsdwarsverhang.

3.2.1 Theoretisch dwarsverhang volgens axiaalsymmetrische benadering

Het dwarsverhang volgens de axiaalsymmetrische benadering is het dwarsverhang dat zou ontstaan in een oneindig lange bocht. Dit betekent dat het dwarsverhang wordt berekend voor een bocht met een constante straal, waarin de waterbeweging zich volledig heeft ingesteld, zodat gradiënten in langs- en dwarsrichting ontbreken. Ondanks dat deze situatie in werkelijkheid niet optreedt, biedt deze benadering een goed inzicht in het morfologische gedrag in bochten. Het sedimenttransport in dwarsrichting is in de evenwichtssituatie gelijk

aan $0 \text{ m}^3/\text{s}$. Het dwarsverhang dat zich onder deze omstandigheden instelt kan daarom bepaald worden uit het evenwicht voor een individuele korrel. De component van de zwaartekracht die op de korrel werkt langs de helling moet dus gelijk zijn aan de kracht ten gevolge van de stroming loodrecht op de stroomrichting:



figuur 3-1: Evenwicht voor een korrel op een helling

$$G_z \sin \beta = F_{s,r} \quad (1)$$

G_z - zwaartekracht [kN]
 $\sin \beta$ - dwarselling [-]
 $F_{s,r}$ - stromingskracht in dwarsrichting [kN]

De zwaartekracht werkt op de gehele korrel, dus op het volume; de stromingskracht werkt op het oppervlak van de korrel:

$$(\rho_s - \rho)g \frac{1}{6} \pi D^3 \sin \beta = \tau_{b,r} \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2)$$

$$\sin \beta = 1,5 \frac{\tau_{b,r}}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (3)$$

ρ_s - soortelijk gewicht van de korrels [kg/m³]
 ρ - soortelijk gewicht van water [kg/m³]
 g - gravitatieversnelling [m/s²]
 D - gemiddelde korreldiameter [m]
 $\tau_{b,r}$ - bodemschuifspanning loodrecht op de stroomrichting [N/m²]

Voor de verdeling van de stroomsnelheid over de vertikaal worden in de literatuur verschillende uitdrukkingen voorgesteld [Jansen, 1994]. Een vaak gebruikte uitdrukking is de uitdrukking van het logaritmisch snelheidsprofiel:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4)$$

| | | | |
|----------------|---|---|-------|
| u | - | stroomsnelheid | [m/s] |
| u* | - | schuifspanningssnelheid | [m/s] |
| κ | - | constante van Von Kármán (κ=0,4) | [-] |
| z | - | hoogte boven de bodem | [m] |
| z ₀ | - | hoogte boven de bodem waar de snelheid 0 m/s is | [m] |

De bodemschuifspanning ten gevolge van de stroming loodrecht op de stroomrichting wordt hiermee:

$$\tau_{b,r} = -\rho h \frac{u^2}{r} \left[2 \left(\frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right)^2 - 2 \left(\frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right)^3 \right] \quad (5)$$

| | | | |
|---|---|--|-----------------------|
| h | - | gemiddelde waterdiepte | [m] |
| r | - | radiale coördinaat, loodrecht op de stroomrichting | [m] |
| C | - | coëfficiënt van Chézy | [m ^{1/2} /s] |

De vergelijking voor het dwarsverhang resulteert zo in:

$$\sin \beta = 1,5 \frac{\rho u^2}{(\rho_s - \rho) D C^2} \frac{h}{R} \frac{2}{\kappa^2} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right) \right] \quad (6)$$

Met gebruikmaking van de vergelijking van Chézy ($u = C\sqrt{hi}$) en de Shieldsparameter ($\theta = \frac{hi}{\Delta D}$) kan deze vergelijking worden geschreven als:

$$\sin \beta = 1,5 A \theta \frac{h}{R} \quad (7)$$

met

$$A = \frac{2}{\kappa^2} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right) \right] \quad (8)$$

| | | | |
|---|---|---|-----|
| R | - | bochtstraal van de rivier | [m] |
| Δ | - | relatieve dichtheid (ρ _s -ρ)/ρ | [-] |
| i | - | verhang van de bodem | [-] |
| θ | - | Shieldsparameter | [-] |
| A | - | spiraalstromingscoëfficiënt | [-] |

De uitkomsten uit vergelijking (7) komen echter niet goed overeen met het verhang dat gevonden wordt in experimenten. Door verschillende onderzoekers zijn nieuwe relaties voorgesteld, welke in algemene vorm geschreven kunnen worden als:

$$\sin \beta = \frac{\pi H}{B} = Af(\theta) \frac{h}{R} \quad (9)$$

| | | |
|-------|--|-----|
| H - | amplitude axiaalsymmetrisch dwarsprofiel | [m] |
| B - | breedte van de rivier | [m] |
| f(θ)- | dwarshellings-effect | [-] |

Voor de term f(θ) zijn door de jaren heen verschillende uitdrukkingen voorgesteld. De uitdrukking die momenteel meestal wordt aangehouden luidt [Struiksma et al., 1985]:

$$f(\theta) = 9 \left(\frac{D}{h} \right)^{0,3} \sqrt{\theta} \quad (10)$$

3.2.2 Aanpassingslengten en aanpassingstijd voor bochten

In de praktijk zal de axiaalsymmetrische oplossing nooit optreden, omdat de bochten een beperkte lengte en meestal geen constante straal hebben. In het begin van een bocht is de verdeling van de stroming en het sedimenttransport over het dwarsprofiel nog niet aangepast aan de geometrie van de bocht. Er is dus geen sprake van uniformiteit van de stroming in langsricting, die voor de axiaalsymmetrische benadering van het dwarsverhang is aangenomen. Door de herverdeling van stroming en sedimenttransport wordt de dwarshelling in een bocht niet meer alleen door lokale effecten, zoals waterdiepte, bodemschuifspanning, bochtstraal en sedimenteigenschappen, bepaald en kan de helling aanzienlijk toenemen.

Voor de beschrijving van de bodemontwikkeling kan een wiskundig model worden opgesteld. Bij morfologische modellen wordt vaak uitgegaan van een quasi-stationaire benadering: een beschrijving van de interactie tussen een stationaire waterbeweging en een niet-stationaire bodemontwikkeling, omdat de aanpassing van de waterbeweging ten opzichte van de bodemontwikkeling oneindig snel verloopt. Voor het stromingsmodel kunnen de ondiep-water vergelijkingen worden gebruikt, waarbij stroomsnelheden over de diepte gemiddeld worden. Voor het sedimentbewegingsmodel kan worden uitgegaan van enkel bodemtransport en een uniforme korrelverdeling. Aangenomen wordt dat het sedimenttransport wordt bepaald door lokale condities. Overige aannames zijn dat de oevers relatief stabiel zijn en dat er een hydrostatisch drukverloop is.

In de literatuur wordt de 2-D bodemontwikkeling vaak geanalyseerd aan de hand van de lineaire analyse van het wiskundige model. Hiermee kan op basis van een verstoringsanalyse van de gelineariseerde vergelijkingen inzicht worden verkregen in hoe het wiskundige model werkt en hoe het kan worden gestuurd. De stationaire oplossing van het zo verkregen model, die de opgedrongen bodemligging beschrijft, is een vierde graads polynoom [Struiksmā et al., 1985].

$$(k\lambda_w)^4 \gamma^2 n + (k\lambda_w)^3 \gamma^2 i \left[Af(\theta) - 1 \right] \frac{\lambda_w}{\lambda_s} - \frac{n}{2} + (k\lambda_w)^2 \left[1 + \frac{1}{2} \gamma^2 (3Af(\theta) - 1) \frac{\lambda_w}{\lambda_s} \right] + (k\lambda_w) i \left[\frac{n-3}{2} - \frac{\lambda_w}{\lambda_s} \right] - \frac{\lambda_w}{\lambda_s} = 0 \quad (11)$$

met

$$\gamma = \frac{1}{\pi} \frac{B}{\lambda_w} \quad (12)$$

- | | | | |
|-------------|---|--|-----|
| k | - | complex golfgetal van de bodemontwikkeling | [-] |
| λ_s | - | aanpassingslengte voor het sedimenttransport | [m] |
| λ_w | - | aanpassingslengte voor de waterbeweging | [m] |
| n | - | graad van niet-lineariteit van het sedimenttransport | [-] |

De aanpassingslengte voor de waterbeweging en voor het sedimenttransport worden respectievelijk gedefinieerd als:

$$\lambda_w = \frac{C^2 h}{2g} \quad (13)$$

en

$$\lambda_s = \frac{1}{\pi^2} h \left(\frac{B}{h} \right)^2 f(\theta) \quad (14)$$

Wanneer dit model sterk vereenvoudigd wordt door de spiraalstroming te verwaarlozen en aan te nemen dat de bodemhelling geen invloed heeft op het transport wordt een oplossing met twee wortels gevonden. Het zo gevonden primitieve model is dominant in de 2-D morfologie en de hiermee gevonden oplossing geeft een goede eerste schatting voor het gedrag van de rivierbodem [Struiksmā, 1997]. De morfologische processen worden volgens dit primitieve model gestuurd door de interactieparameter:

$$IP = \frac{\lambda_s}{\lambda_w} \quad (15)$$

- | | | | |
|----|---|---------------------|-----|
| IP | - | interactieparameter | [-] |
|----|---|---------------------|-----|

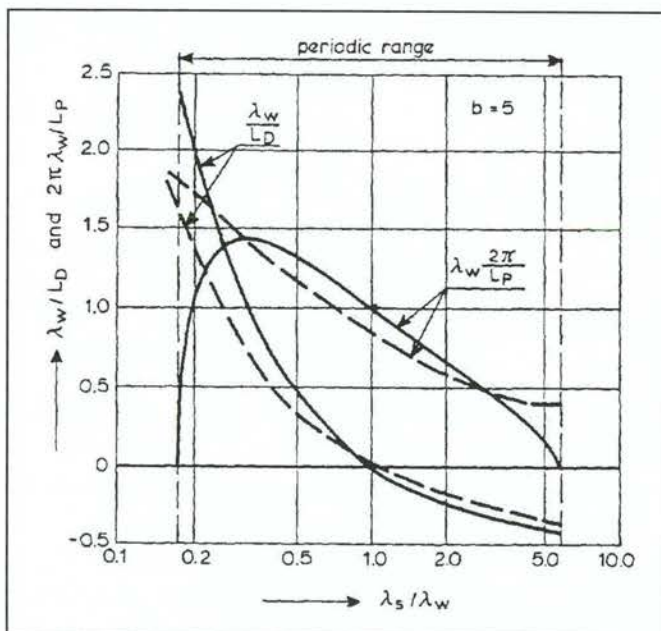
De bodemligging past zich aan volgens een gedempte oscillatie, die bepaald wordt door twee karakteristieke lengteschalen, L_P en L_D , welke respectievelijk de lengte van de periodieke oscillatie en de dempingslengte voorstellen.

$$\frac{2\pi\lambda_w}{L_p} = \frac{1}{2} \sqrt{(n+1) \frac{\lambda_w}{\lambda_s} - \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_s} \right)^2 - \left(\frac{n-3}{2} \right)^2} \quad (16)$$

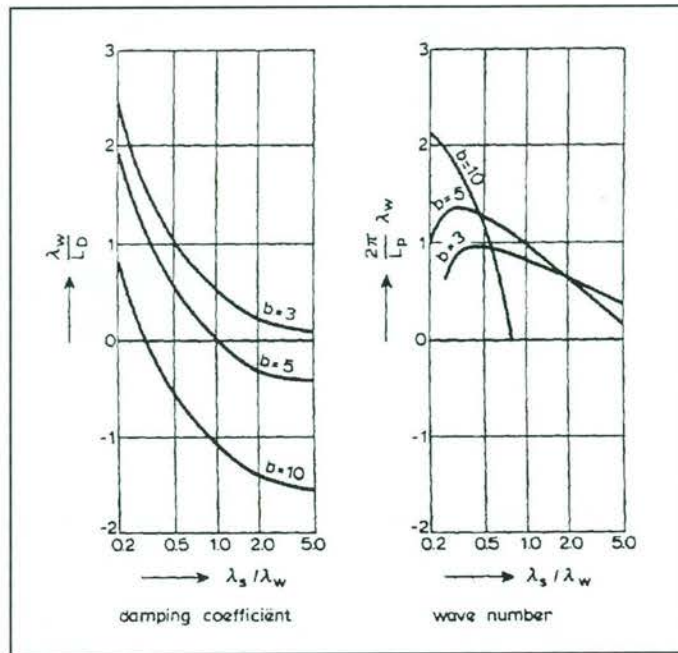
$$\frac{\lambda_w}{L_D} = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_s} - \frac{n-3}{2} \right) \quad (17)$$

L_p - golflengte van de oscillatie [m]
 L_D - dempingslengte [m]

In figuur 3-2 en figuur 3-3 wordt een grafische weergave getoond van de dempingslengte en de golflengte van de oscillatie. In de eerste figuur wordt de oplossing van het sterk vereenvoudigde model (vergelijkingen (16) en (17)) vergeleken met de oplossing uit het volledige model (vergelijking (11)). In de tweede figuur wordt de invloed van de graad van niet-lineariteit van het transport (aangeduid met b in de figuur, met n in deze tekst) op de dempingslengte en de golflengte van de oscillatie getoond. Voor de Waal wordt meestal gerekend met een waarde $n = 4$ à 5 .

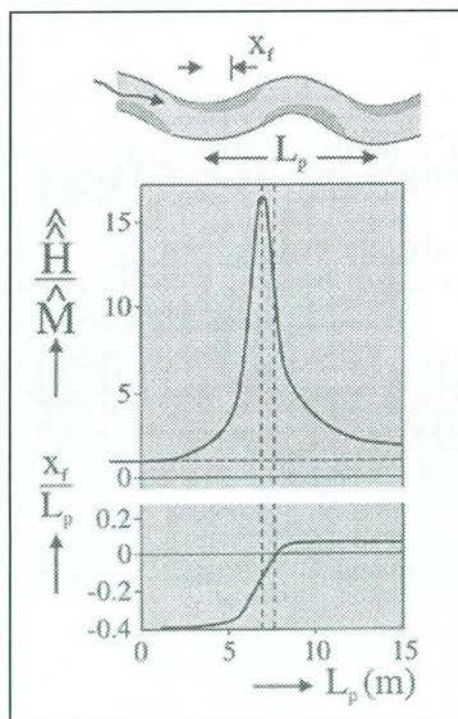


figuur 3-2: Relatieve dempings- en golflengte van de oscillatie als functie van de interactieparameter; vergelijking van de oplossing van het volledige model en het sterk vereenvoudigde model



figuur 3-3: Afhankelijkheid van de relatieve dempings- en golflengte van de oscillatie van de graad van niet-lineariteit

In een licht meanderende rivier, zoals de Midden-Waal, kunnen de invloed van de spiraalstroming en de kromming van de stroomlijnen niet worden verwaarloosd. Maximale respons van de amplitude van de bodemligging treedt op bij een golflengte L_p , die gelijk is aan de golflengte van de meanders.



figuur 3-4: Response van de bodemligging op een opgelegde verstoring

De tijdschaal waarmee de demping gekarakteriseerd kan worden is de tijdschaal voor 2-D processen die volgt uit de lineaire analyse:

$$T = -T_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{(n-1)k^{12}}{1+k^{12}} IP \right)^{-1} \quad (18)$$

3.3 Crossings

Crossings zijn de ondiepe gedeeltes in de rivier op de overgang tussen twee tegengesteld gerichte bochten. De stroming past zich hier vertraagd aan van een scheve snelheidsverdeling in de ene richting naar een scheve verdeling in de andere richting. De hoogte van de crossings bepaalt de hinder voor de scheepvaart. Deze is afhankelijk van de afvoer.

3.3.1 Aanzanding en uitschuring van crossings

De hoogte van de crossing is afhankelijk van de afvoer. Tijdens lage afvoeren schuurt een crossing uit, zodat de waterdiepte toeneemt; bij hoge afvoeren is dit andersom. Dit wordt veroorzaakt door het verschil in bodemschuifspanning bij variërende afvoeren tussen een bocht en een crossing. De totale bodemschuifspanning is gelijk aan:

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{b,s}^2 + \tau_{b,r}^2} \quad (19)$$

τ_b - totale bodemschuifspanning [N/m²]

Hierin wordt $\tau_{b,r}$ berekend volgens formule (5) en $\tau_{b,s}$ volgens:

$$\tau_{b,s} = \rho g h i = \rho g \frac{u^2}{C^2} \quad (20)$$

$\tau_{b,s}$ - bodemschuifspanning in de stroomrichting [N/m²]

De bodemligging op een crossing is relatief vlak (horizontaal) ten opzichte van de bodemligging in een bocht, waar een dwarsverhang optreedt. Dit heeft tot gevolg dat bij dalende of stijgende waterstanden de af- of toename van de gemiddelde waterdiepte, en hierdoor ook van de doorstroomoppervlakte, op een crossing groter is dan in een bocht. Dit veroorzaakt gradiënten in het sedimenttransport, die erosie of aanzanding op de crossing tot gevolg hebben. Bij lage afvoer treedt een vernauwing van het doorstroomprofiel op de crossing op, waardoor het water daar harder gaat stromen. De bodemschuifspanning en het sedimenttransport op de crossing nemen als gevolg hiervan toe, zodat uitschuring optreedt. Bij hoge afvoer is juist het omgekeerd het geval en zandt de crossing aan.

3.3.2 Aanpassingstijd voor crossings

Het verschijnsel van de uitschuring of aanzanding van een crossing is te vergelijken met een geringe versmalling op de crossing in geval van lagere afvoeren dan gemiddeld en een geringe verbreding in geval van hogere afvoeren dan gemiddeld [Struiksmā, persoonlijke communicatie]. De tijdschaal waarmee de crossing zich aanpast aan de afvoer is gelijk aan de aanpassingstijd van 1-D verstoringen en wordt weergegeven in vergelijking (21).

$$T_{cr} = \frac{L_{cr}}{c} \quad (21)$$

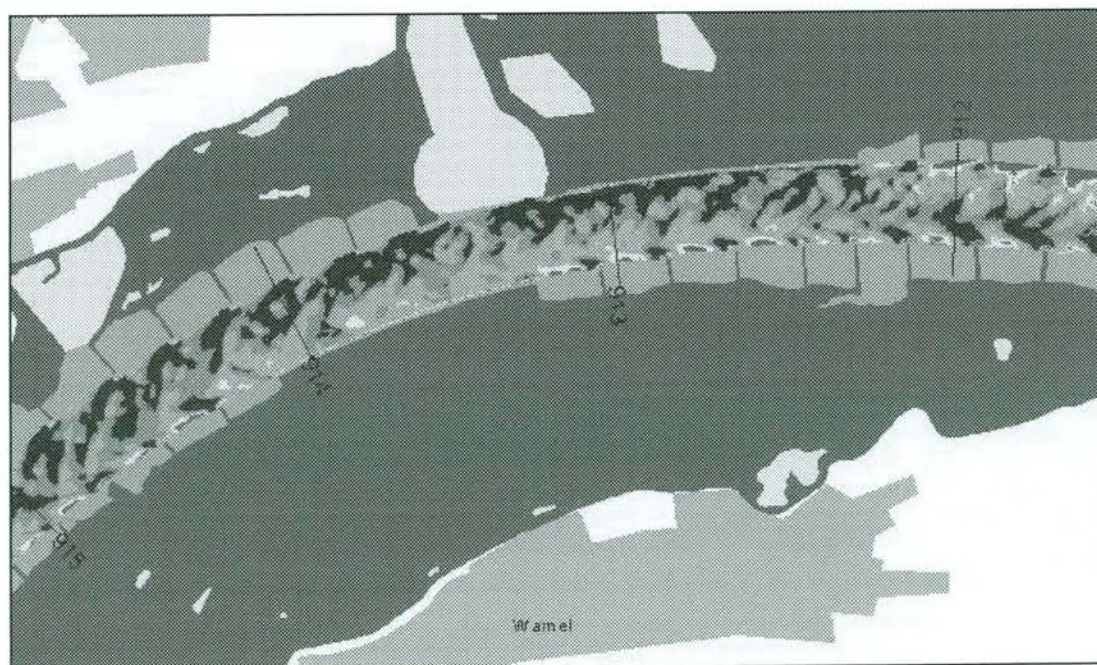
met

$$c_0 = \frac{ns}{h} \quad (22)$$

| | | |
|----------|---|-----------------------|
| T_{cr} | - tijdschaal voor crossings | [s] |
| L_{cr} | - lengte van de crossing | [m] |
| c_0 | - voortplantingssnelheid voor 1-D bodemverstoringen | [m/s] |
| s | - sedimenttransport per eenheid van breedte | [m ³ /s/m] |

3.4 Invloed van kribben

De aanwezigheid van kribben heeft een grote invloed op de bodemligging van de Waal. Dit wordt direct zichtbaar zodra het beeld rond een krib vergeleken wordt met het beeld rond een gestrekte oever (zie figuur 3-5). Hinder voor de scheepvaart treedt daar op waar de invloed van de kribben zich uitstrekt tot in de vaargeul.



figuur 3-5: Voorbeeld van een traject met kribbenvelden afgewisseld door gestrekte oevers

Over de invloed van kribben op de bodemligging in de vaargeul door nalevering van sediment is zeer weinig onderzoek gedaan. Experimenten die zijn uitgevoerd zijn nog niet goed te vertalen naar algemene situaties en naar afvoerafhankelijke relaties. Het is dan ook niet haalbaar binnen dit onderzoek om een voorspeller voor de invloed van kribben op te stellen.

De invloed van een kribbenveld bestaat hoofdzakelijk uit twee kenmerken:

- Erosiekuilen bij kribkoppen

De erosiekuilen bij de kribkoppen strekken zich uit vanaf de kribkop in benedenstroomse richting onder een hoek met de normaallijn. Over het gedrag van erosiekuilen onder invloed van variërende afvoeren is vrijwel niets bekend. Uit ervaring blijkt dat de diepte van een erosiekuil onder andere een functie van de waterdiepte is.

- Ondieptes, ofwel “vlammen” vanuit kribvakken

De ondieptes die vanuit de kribvakken de rivier insteken worden door een aantal verschillende processen gevoed:

- uitschuring rond de kribkoppen: het sediment dat ten gevolge van de uitschuring rond een kribkop - de erosiekuil - door het water wordt meegevoerd, sedimenteert (gedeeltelijk) direct weer doordat na de krib de transportcapaciteit voor het sediment onvoldoende groot is;
- uitbuiging van stroomlijnen: ten gevolge van de kribben vernauwen de stroomlijnen rond de kribkoppen, terwijl ze verwijden ter plaatse van de kribvakken. Door deze uitbuiging van stroomlijnen vermindert de stroomsnelheid - en daarmee de transportcapaciteit - en treedt aanzanding op. De vlammen zijn groter naarmate de afstand tussen twee opeenvolgende kribben groter is, doordat meer uitbuiging optreedt;
- nalevering: het sediment dat tijdens hogere afvoeren in de kribvakken wordt afgezet komt vertraagd weer terug in de rivier. Dit proces wordt nalevering genoemd. Scheepvaart versterkt de nalevering vanuit kribvakken.

Naar ondieptes rond kribvakken is voor zover bekend evenmin bruikbaar onderzoek verricht. Veel onderzoek naar de stroming in kribvakken is verricht door Ten Brinke [o.a. Ten Brinke et al., 1999] en studenten van Universiteit Utrecht bij Kruyt [o.a. Kruyt, 1997], zowel zonder als met invloed van scheepvaart. Dit levert echter nog geen zodanige resultaten op dat hieruit een voorspelling voor de ondieptes, de “vlammen” rond kribvakken kan worden gedaan.

4 Analyse van de “forced” geometrie van de Midden-Waal met ArcView

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de met behulp van ArcView uitgevoerde analyse van de opgedrongen geometrie van de Midden-Waal besproken. Gezocht is naar:

- een methode om de tijdsgemiddelde bodemligging te beschrijven; en
- een afvoerafhankelijke beschrijving van het gedrag van de crossings.

Aangezien zowel theoretisch als experimenteel nog te weinig bekend is over de invloed van kribben, is dit deel van de “forced” geometrie buiten beschouwing gebleven. In paragraaf 4.2 wordt allereerst besproken hoe in ArcView de gegevens bewerkt zijn om de opgedrongen geometrie te vinden. In paragraaf 4.3 worden de resultaten besproken en wordt de koppeling naar de theorie gelegd.

De door de geometrie van de Midden-Waal opgedrongen bodemligging is onder te verdelen in bochten en crossings; er doen zich geen echte rechtstanden voor. In het kader van het BOS Baggeren is een indeling van de rivier gemaakt naar morfologisch eenheden (ME's), die op de hierboven aangeduide manier getypeerd zijn. Echter, soms worden opeenvolgende ME's beide getypeerd als een bocht, zonder dat er een tussenliggende crossing is. Dit is onlogisch en herdefiniëring van de ME's is dan ook gewenst (zie ook Siegfried, 2000). De huidige indeling van de ME's is voor de trajecten die binnen deze studie in beschouwing worden genomen weergegeven in tabel 4-1, inclusief de grenzen van de trajecten van de Proef Morfologie. De volledige tabel van de ME's is weergegeven in bijlage A.

Wanneer in de navolgende paragrafen over bochten en crossings gesproken wordt, worden de verschijnselen aangeduid zoals ze uit de bodempeilingen naar voren komen. De aanduiding met kilometerraaien komt dan ook niet altijd overeen met de indeling van de ME's. Dit is zeker het geval voor die locaties waar volgens de indeling van de ME's twee bochten in elkaar overgaan zonder crossing tussenbeide.

| traject PM | code | naam | kmr. begin | kmr. eind | lengte | type |
|------------------|------|-----------------|---------------|--------------|--------|-------------------|
| | 17a | Slijk-Ewijk | 887,50 | 889,00 | 1,50 | bocht naar links |
| Slijk-Ewijk | 17b | Slijk-Ewijk | 889,00 | 890,50 | 1,50 | bocht naar links |
| | 18 | Beuningen | 890,50 | 891,00 | 0,50 | crossing |
| | 19 | Loenen | 891,00 | 892,10 | 1,10 | bocht naar rechts |
| | 20a | Ewijk | 892,10 | 893,00 | 0,90 | bocht naar links |
| | 20b | Ewijk | 893,00 | 893,80 | 0,80 | bocht naar links |
| | 21a | Brug A50 | 893,80 | 894,00 | 0,20 | crossing |
| Winssen | 21b | Brug A50 | 894,00 | 894,20 | 0,20 | crossing |
| | 22 | Winssen | 894,20 | 895,50 | 1,30 | bocht naar rechts |
| | 23 | Andelst | 895,50 | 896,00 | 0,50 | crossing |
| | 26a | Deest | 898,30 | 899,50 | 1,20 | bocht naar rechts |
| Dodewaard-Druten | 26b | Deest | 899,50 | 900,40 | 0,90 | bocht naar rechts |
| | 27 | Hooge Waard | 900,40 | 902,00 | 1,60 | bocht naar links |
| | 28 | De Tempel | 902,00 | 902,80 | 0,80 | crossing |
| | 29a | Druten | 902,80 | 903,50 | 0,70 | bocht naar rechts |
| | 29b | Druten | 903,50 | 904,75 | 1,25 | bocht naar rechts |
| | 31a | IJzendoorn | 907,40 | 908,50 | 1,10 | crossing |
| Beneden-Leeuwen | 31b | IJzendoorn | 908,50 | 908,70 | 0,20 | crossing |
| | 32a | Beneden Leeuwen | 908,70 | 910,50 | 1,80 | bocht naar rechts |
| | 32b | Beneden Leeuwen | 910,50 | 911,80 | 1,30 | bocht naar rechts |

tabel 4-1: Huidige indeling van de Morfologische Eenheden binnen het BOS Baggeren voor de beschouwde trajecten uit de Proef Morfologie

4.2 Bepaling van de tijdsgemiddelde bodemligging

Indien wordt aangenomen dat de tijdschaal voor aanpassing van de “forced” geometrie groot is ten opzichte van de voorspellingstermijn, dan moet een tijdsgemiddelde bodemligging bepaald kunnen worden, die zich met verwaarloosbaar kleine snelheid aanpast aan afvoervariaties. Deze bodemligging kan dan gezien worden als een evenwichtsbodemligging. De tijdsgemiddelde bodemligging is met behulp van ArcView onderzocht. Hiertoe zijn drie verschillende analyses uitgevoerd:

1. middeling van de single-beam JDP's van 1988 tot en met 1999;
2. middeling van de multi-beam bodempeilingen van voor de eerste grootschalige baggerwerkzaamheden;
3. middeling van de multi-beam bodempeilingen van voor de eerste grootschalige baggerwerkzaamheden gecombineerd met de bodempeilingen van na een hoogwater, maar voor de eerstvolgende baggerwerkzaamheden.

In deze paragraaf worden bovenstaande analyses achtereenvolgens besproken.

4.2.1 Gemiddelde van de single-beam Jaarlijkse Dwarspeilingen (JDP's) van 1988 tot en met 1999

De single-beam JDP-bestanden over de periode 1988 tot en met 1999 zijn geïnterpoleerd tot gebiedsdekkende gridbestanden. Deze zijn beschikbaar als diepte ten opzichte van NAP en als diepte ten opzichte van het voor dat jaar geïnterpoleerde OLR-vlak. De reden dat er voor elk jaar een (geïnterpoleerd) OLR-vlak is vastgesteld, is dat er op de Waal een autonome bodemdaling optreedt, onder meer veroorzaakt door ingrepen in de rivier uit het verleden⁵. De waterspiegel daalt met de bodem mee. Gelijke waterdieptes in verschillende jaren leveren zo een verschillende waterdiepte ten opzichte van NAP op. Het OLR wordt nu zodanig vastgesteld dat de waterdiepte ten opzichte van OLR wel gelijk is.

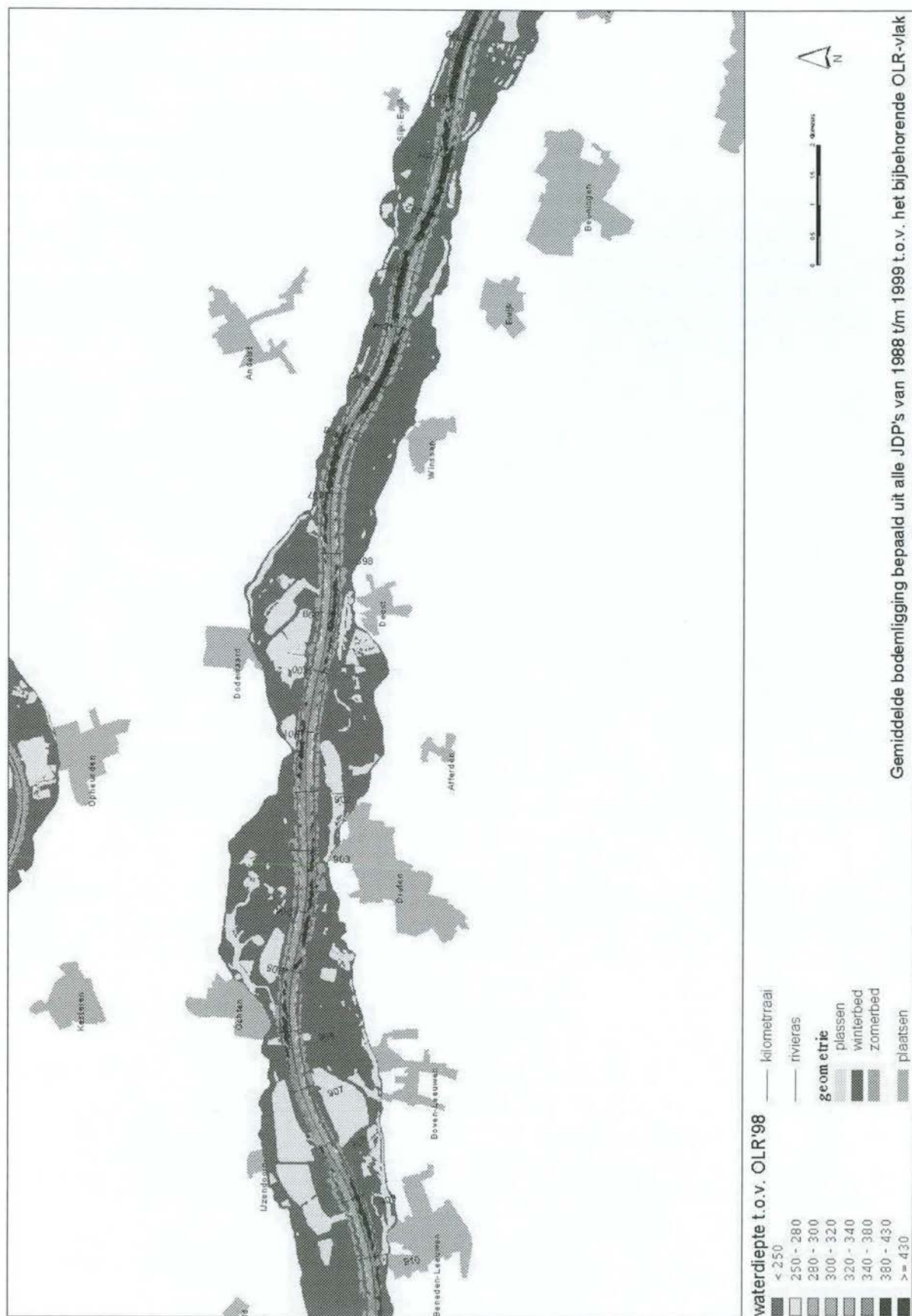
Aangezien de tijdsgemiddelde bodemligging waarnaar in deze studie gezocht wordt de gemiddelde waterdiepte ten opzichte van OLR weergeeft, moeten hierbij de invloeden van de autonome bodemdaling niet worden meegenomen. De middeling is daarom uitgevoerd over JDP-bestanden uit de periode van 1988 tot en met 1999 ten opzichte van het bijbehorende OLR-vlak. Dit levert een nieuw gridbestand op dat zich uitstrekt van kmr. 886,3 tot en met 913,3.⁶

Theoretisch gezien zijn er twaalf bestanden op basis waarvan het gemiddelde wordt bepaald. Uit bepaalde JDP's ontbreken echter enkele dwarsraaien, zodat er geen interpolatie heeft plaatsgevonden. Het aantal metingen waarop het gemiddelde gebaseerd is, varieert hierdoor binnen de normaallijnen tussen de tien en de twaalf. De breedte van de rivier waarover een JDP verricht kan worden, is afhankelijk van de waterdiepte ten tijde van de meting. Dit heeft tot gevolg dat buiten de normaallijnen het aantal beschikbare meetwaarden per gridcel varieert van één tot twaalf. De berekende diepten buiten de normaallijnen zijn hierdoor niet betrouwbaar en worden voor vervolganalyses buiten beschouwing gelaten.

Het hier bepaalde gemiddelde van de JDP's ten opzichte van OLR is weergegeven in figuur 4-1. Bochten en crossings zijn in deze figuur duidelijk te onderscheiden, evenals de invloed van de kribben en kribvakken. In het navolgende zal dit gemiddelde worden aangeduid als het gemiddelde JDP.

⁵ Naar de oorzaken van de autonome bodemdaling wordt door Rijkswaterstaat nog uitvoerig onderzoek verricht.

⁶ De verschillen tussen het zo berekende gemiddelde en het gemiddelde dat berekend kan worden uit de metingen ten opzichte van NAP worden in bijlage C nader besproken.



figuur 4-1: Gemiddelde bodemligging, bepaald uit de JDP's van 1988 tot en met 1999

4.2.2 Gemiddelde van alle multi-beam peilingen vóór aanvang van de eerste baggerwerkzaamheden

De tijdsgemiddelde bodemligging uit multi-beam bodempeilingen voor aanvang van de eerste baggerwerkzaamheden wordt beïnvloed door de natuurlijke respons van de rivier op afvoervariaties en door de scheepvaart. Theoretisch gezien zijn er geen bodempeilingen die volledig vrij zijn van baggerinvloeden, omdat ook in het verleden reeds gebaggerd is, zij het kleinschalig. Pas vanaf 1990 geldt bij de uitvoering van baggerwerkzaamheden de eis dat er geen netto onttrekking van sediment mag plaatsvinden. Vanaf maart 1998 zijn er maandelijks multi-beam bodempeilingen uitgevoerd over een zestal trajecten van de Midden-Waal met een totale lengte van 12 kilometer. Van 20 juli tot en met 16 september 1998 zijn voor het eerst grootschalig baggerwerkzaamheden uitgevoerd op de Waal, waarbij grote delen van het zomerbed, met een totale lengte van 25 kilometer, tot een voorgeschreven minimum diepte zijn uitgebaggerd en waarbij het gebaggerde sediment elders in de rivier, in de diepere delen, terug is gestort (zie paragraaf 2.1).

De beschikbare metingen van voor het eerste baggerseizoen geven een beeld van de ongestoorde situatie, waaruit een tijdsgemiddelde bodemligging kan worden berekend, die zich instelt onder invloed van de natuurlijke processen en de scheepvaart op de rivier. Het aantal metingen dat voor de berekening van dit gemiddelde beschikbaar is, is afhankelijk van de data van enerzijds de bodempeilingen en anderzijds de aanvang van de baggerwerkzaamheden en varieert per traject van slechts één tot vijf. In tabel 4-2 wordt een overzicht gegeven van welke bodempeilingen per traject zijn gebruikt in de bepaling van het gemiddelde. Het beeld dat ontstaat is op hoofdlijnen gelijk aan het gemiddelde uit de JDP's (figuur 4-1), zij het grilliger, doordat lokale verstoringen minder snel weg worden gemiddeld. De figuur, evenals een toelichting op tabel 4-2, is terug te vinden in bijlage C.

| traject | gebruikte bodempeilingen | aantal |
|------------------|--------------------------|--------|
| Slijk-Ewijk | mrt, (apr, mei, juni) | 1 of 4 |
| Winssen | mrt, apr, mei, juni | 4 |
| Dodewaard-Druten | mrt, apr, juni, juli | 4 |
| Beneden-Leeuwen | mrt, apr, mei, juni | 4 |

tabel 4-2: Bodempeilingen voor de tijdsgemiddelde bodemligging voor aanvang van baggerwerkzaamheden

4.2.3 Gemiddelde van alle multi-beam peilingen tussen een hoogwater en baggerwerkzaamheden

In de maandelijks bodempeilingen direct na het uitvoeren van baggerwerkzaamheden is het effect van deze baggerwerkzaamheden duidelijk terug te vinden, doordat geen knelpunten met een diepte van minder dan OLR - 2,80 meter binnen de vaargeul optreden. Na een hoogwater is hiervan vrijwel niets terug te vinden. Wanneer wordt aangenomen dat een hoogwater de effecten van baggerwerkzaamheden volledig uitwist, kan de tijdsgemiddelde bodemligging worden bepaald uit alle metingen voor aanvang van de eerste baggerwerkzaamheden en de metingen tussen een hoogwater en de daarop volgende

baggerwerkzaamheden. Dit heeft als voordelen ten opzichte van de voorgaande methoden dat:

- het gemiddelde bepaald wordt op basis van multi-beam bodempeilingen, waardoor geen rekening hoeft te worden gehouden met mogelijke verschillen tussen single-beam en multi-beam bodempeilingen; en
- het gemiddelde bepaald wordt op basis van een groter aantal bodempeilingen dan het gemiddelde uit paragraaf 4.2.2, zodat minder “ruis” optreedt door lokale verstoringen.

In tabel 4-3 wordt een overzicht gegeven van welke bodempeilingen zijn gebruikt ter bepaling van dit gemiddelde. Het zo berekende gemiddelde wijkt qua totaalbeeld weinig af van de voorgaande twee gemiddelden. Het resultaat en een toelichting hierop is terug te vinden in bijlage C.

| traject PM | gebruikte bodempeilingen | aantal |
|------------------|---|----------|
| Slijk-Ewijk | 1998: mrt, (apr, mei, juni), dec 1999: jan, feb, mrt, apr, mei, juni, sep 2000: jan, feb, mrt, mei | 16 of 12 |
| Winssen | 1998: mrt, apr, mei, juni, dec 1999: jan, feb, mrt, apr, mei, juni 2000: jan, feb, mrt, mei | 15 |
| Dodewaard-Druten | 1998: mrt, apr, juni, juli, dec 1999: jan, feb, mrt, apr, mei, juni 2000: jan, feb, mrt, mei | 15 |
| Beneden-Leeuwen | 1998: mrt, apr, mei, juni, nov, dec 1999: jan, feb, mrt, apr, mei, juni, sep 2000: jan, feb, mrt, mei | 17 |

tabel 4-3: Bodempeilingen voor de tijdsgemiddelde bodemligging tussen hoogwater en baggeren

4.3 Resultaten van de analyse van de “forced” geometrie

4.3.1 Onderlinge vergelijking van de gemiddelden en keuze

In deze paragraaf worden de gemiddelden vergeleken, die zijn bepaald uit:

1. de JDP's van 1988 tot en met 1999 ten opzichte van het bijbehorende OLR-vlak, hierna aangeduid als gemiddelde JDP;
2. de bodempeilingen voor aanvang van alle grootschalige baggerwerkzaamheden, hierna aangeduid als gemiddelde mb98; en
3. de bodempeilingen van het gemiddelde mb98 in combinatie met de bodempeilingen tussen een hoogwater en de eerstvolgende baggerwerkzaamheden, hierna aangeduid als gemiddelde mb98-00

Mogelijke verschillen tussen de gemiddelden kunnen door meerdere factoren worden veroorzaakt. Deze kunnen in drie hoofdcategorieën worden onderverdeeld:

- verschil in meetmethode: bodempeilingen met single-beam meetapparatuur geven zowel door de meetapparatuur zelf als door interpolatie naar gridbestanden een andere uitkomst dan multi-beam bodempeilingen;
- afhankelijkheid van de bodemontwikkeling van het afvoerverloop: een gemiddelde over een langere periode geeft een meer afvoerafhankelijk beeld;
- invloeden van grootschalige ingrepen in de rivier (met name baggeren).

Naar de verschillen tussen single-beam en multi-beam bodempeilingen is door DON een studie verricht. Het rapport is echter nog niet beschikbaar. Als eerste schatting wordt een verschil van 20 centimeter genoemd, waarbij de multi-beam meetapparatuur grotere dieptes meet. Dit verschil wordt onder andere veroorzaakt door:

- verschil in meetapparatuur en verwerking van de gegevens;
- correctie voor scheepsbewegingen die alleen bij de huidige multi-beam bodempeilingen plaatsvindt;
- interpolatiefouten bij omzetting van single-beam bodempeilingen naar gebiedsdekkende bestanden.

Daarnaast hebben er sinds 1988 ingrepen in de rivier plaatsgevonden, waardoor het gemiddelde op basis van de JDP's een afwijking vertoont ten opzichte van het werkelijke gemiddelde. Voor de beschouwde trajecten van de Midden-Waal betreft dit voornamelijk de opstuwings door de aanleg van de vaste laag van St. Andries, die bij Tiel nog een verhoging van de waterstand en daardoor van de bodemligging van circa 10 centimeter veroorzaakt.

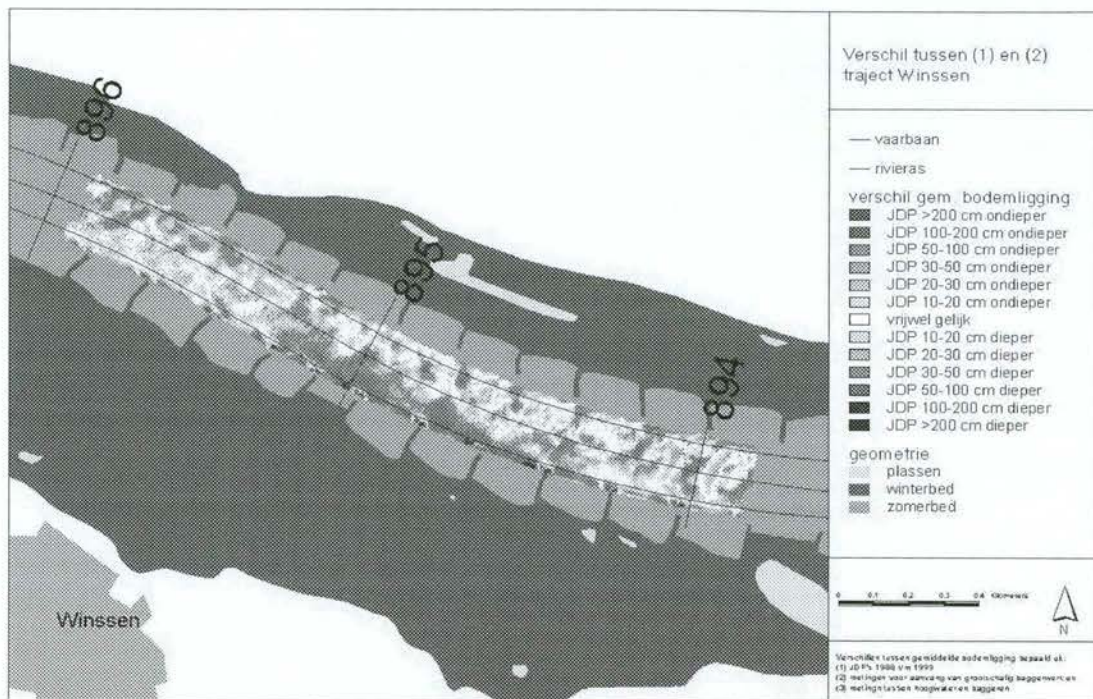
De reactie van de bodemligging op variaties in de afvoer is besproken in hoofdstuk 3. Bij het vergelijken van de gemiddelden is gekeken of de verschillende geometrische kenmerken van de rivier - bochten, crossings en erosiekuilen rond kribkoppen - terug te vinden zijn in het verschilbeeld en, zo ja, op welke wijze. Het dwarsverhang van een bocht wordt flauwer bij lagere afvoeren, dus de diepe buitenbocht ondieper en de ondiepe binnenbocht dieper; een crossing wordt lager door uitschuring bij lagere afvoeren, dus de waterdiepte groter; een erosiekuil wordt ondieper bij lagere afvoeren, dus de waterdiepte kleiner.

Wat betreft de grootschalige ingrepen in de rivier zijn alleen de effecten van baggerwerkzaamheden beschouwd, omdat hier gedetailleerde gegevens over beschikbaar zijn. Van de baggerwerkzaamheden is voor 1998 per strook van 100 meter bekend waar en aan welke zijde is teruggestort. Voor 1999 zijn de gegevens van de in- en uitpeilingen beschikbaar, met de berekening van de volumina boven het vlak dat bepaald wordt door de baggerdiepte (OLR - 3,20 meter). In dit bestand is de aanduiding in werkkilometrerings weliswaar veel nauwkeuriger, maar is de zijde niet aangegeven. Terugstorten hoort echter net als in 1998 in de diepe delen van de rivier te zijn gebeurd.

In het onderstaande wordt de vergelijking tussen de drie gemiddelden voor het traject Winssen besproken. Een soortgelijke analyse is gemaakt voor de overige trajecten. Deze staat in bijlage D.

Vergelijking van de drie gemiddelden voor traject Winssen

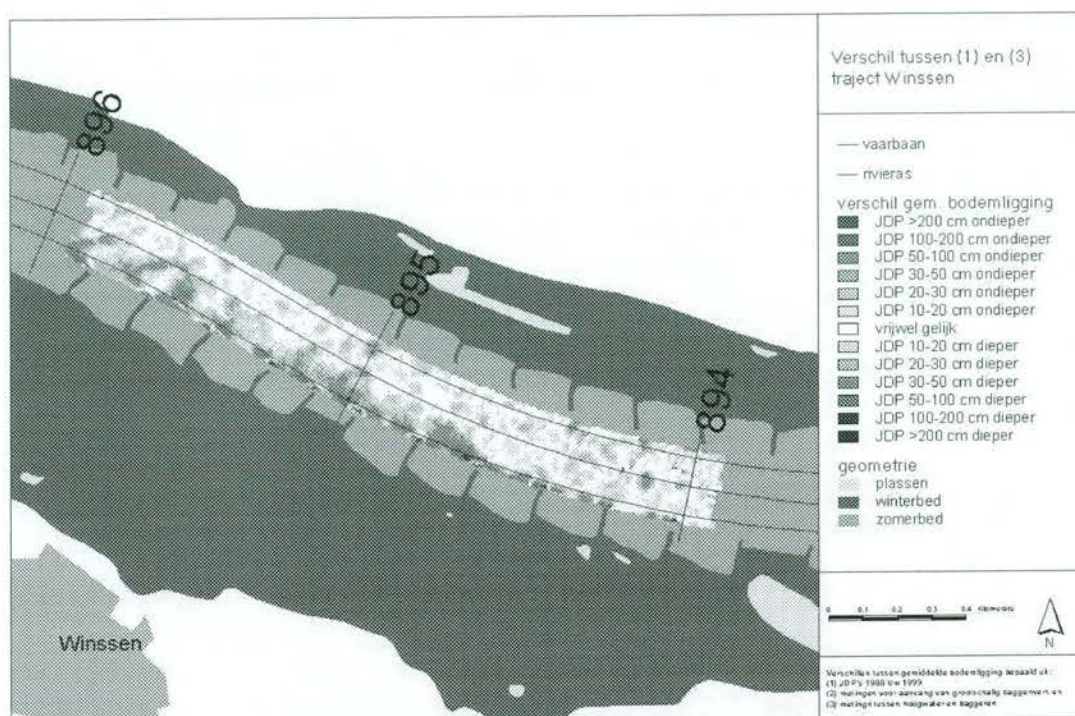
Het traject Winssen loopt in alle bodempeilingen minimaal van kmr. 893,9 tot en met 895,9. Het bestaat uit een bocht naar rechts, van kmr. 894,2 tot kmr 895,5, omringd door twee crossings (zie tabel 4-1). Voor het traject Winssen zijn de verschillen tussen het gemiddelde JDP en gemiddelde mb98 weergegevens in figuur 4-2.



figuur 4-2: Verschil voor traject Winssen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98

Voor Winssen ligt het gemiddelde JDP voor 71,4% van de cellen dieper dan het gemiddelde mb98 en voor 5,0% ondieper. Van het gehele gridbestand heeft 23,6% van de cellen een waarde die vrijwel gelijk is voor beide gemiddelden. Ondiepere delen doen zich voornamelijk voor in de erosiekuilen rond de kribkoppen. Daarnaast is het gemiddelde JDP op de eerste crossing ondieper dan het gemiddelde mb98. Rond kmr. 895 is het verschil tussen de gemiddelden veel groter in de buitenbocht dan in de binnenbocht; het dwarsverhang in het gemiddelde JDP is groter dan in het gemiddelde mb98. De tweede crossing is voor beide gemiddelden vrijwel even diep.

De verschillen voor het traject Winssen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 zijn te zien in figuur 4-3.



figuur 4-3: Verschil voor traject Winssen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00

In het gemiddelde mb98-00 voor traject Winssen heeft 42,2% van de cellen een waarde die vrijwel gelijk is aan het gemiddelde JDP. Het gemiddelde JDP is voor 42,7% dieper en voor 15,1% ondieper dan het gemiddelde mb98-00. In het beeld van het verschil komen de crossings duidelijk naar voren, echter, niet op gelijke wijze: de eerste crossing is ondieper in het gemiddelde JDP; de tweede dieper. Vanaf kmr. 894,6 tot aan het einde van het traject heeft de rechter zijde van de rivier een vrijwel gelijke of kleinere diepte in het gemiddelde JDP; de linker zijde een vrijwel gelijke of grotere diepte. Het dwarsverhang in het gemiddelde JDP is dus steiler dan in het gemiddelde mb98-00. Vanaf het begin van het traject tot aan kmr. 894,6 wisselen ondiepere en diepere delen elkaar af. De erosiekuilen zijn over het gehele traject echter ondieper in het gemiddelde JDP.

In 1998 is er sediment teruggestort aan de rechteroever van kmr. 894,1 tot kmr. 894,3 - aan het einde van de crossing en aan het begin van de binnenbocht -, aan de linkeroever van kmr. 894,0 tot 894,2 - op de crossing -, en van kmr. 894,3 tot kmr. 896,1 - in de diepe buitenbocht en op de tweede crossing -. De zo gecreëerde ondieptes komen overeen met het beeld van de verschillen tussen beide gemiddelden. De verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 worden dus (mede) veroorzaakt door het baggeren en teruggestorten van sediment in de vaargeul.

Vergelijking van de drie gemiddelden voor alle trajecten

Een samenvatting van de vergelijking van de drie gemiddelden voor alle trajecten is weergegeven in tabel 4-4. Bij de vergelijking van de verschillende methoden om een tijdsgemiddelde bodemligging voor de Midden-Waal te vinden is steeds het bestand gemiddelde JDP afgetrokken van bestand gemiddelde mb98 of gemiddelde mb98-00. De waterdiepte ten opzichte van OLR is positief voor een bodemligging onder het OLR-vlak, dus voor vrijwel alle gridcellen, met uitzondering van enkele cellen ver in de kribvakken. Hoe groter de waterdiepte hoe hoger dus de waarde ten opzichte van OLR. In de tabel wil een positieve waarde dan ook zeggen dat het gemiddelde JDP ondieper is dan het gemiddelde mb98 of mb98-00; een negatieve waarde dat het gemiddelde JDP dieper is. Voor de erosiekuilen en de crossings betekent een + in de tabel dat deze in het gemiddelde JDP ondieper zijn dan in het gemiddelde waarmee de vergelijking plaatsvindt; voor de bochten dat het dwarsverhang steiler is. Elke bocht en/of crossing is hierbij apart beschouwd. Een \pm geeft aan dat het beeld niet duidelijk genoeg is om conclusies te kunnen trekken.

| | vergelijking: gemiddelde JDP en mb98 | | | | vergelijking: gemiddelde JDP en mb98-00 | | | |
|------------------------|---|----------|-------------|---------|--|---------|---------------|---------|
| | SE | Wi | DD | BL | SE | Wi | DD | BL |
| kmr. begin | 888,7 | 893,9 | 899,4 | 908,4 | 889,0 | 893,9 | 899,4 | 908,4 |
| kmr. eind | 893,5 | 895,9 | 903,4 | 910,4 | 893,0 | 895,9 | 903,4 | 910,4 |
| gemiddeld verschil (m) | -0,233 | -0,203 | -0,00984 | -0,0809 | -0,0343 | -0,0836 | -0,0279 | -0,0353 |
| standaardafwijking (m) | 0,386 | 0,258 | 0,261 | 0,274 | 0,239 | 0,230 | 0,211 | 0,230 |
| minimum verschil (m) | -4,73 | -3,16 | -2,29 | -1,76 | -3,84 | -4,05 | -2,38 | -1,96 |
| maximum verschil (m) | 4,72 | 2,69 | 3,10 | 2,95 | 2,88 | 3,67 | 2,94 | 3,11 |
| JDP dieper (%) | 71,7 | 71,4 | 34,1 | 49,0 | 32,0 | 42,7 | 32,2 | 36,4 |
| JDP \approx mb (%) | 17,7 | 23,6 | 37,9 | 36,3 | 51,7 | 42,2 | 45,7 | 41,5 |
| JDP ondieper (%) | 10,6 | 5,0 | 28,0 | 14,7 | 16,3 | 15,1 | 22,0 | 22,1 |
| erosiekuilen in JDP | + | + | + | + | + | + | + | + |
| invloed baggeren | n.v.t. | n.v.t. | n.v.t. | n.v.t. | \pm | + | \pm | + |
| bocht in JDP | \pm, \pm, \pm | + | $\pm, -, +$ | \pm | $+, +, \pm$ | + | $+, \pm, \pm$ | \pm |
| crossing in JDP | - | $+, \pm$ | \pm | - | $\pm, -$ | $+, -$ | + | + |

tabel 4-4: Verschillen tussen de gemiddelden JDP, mb98 en mb98-00

Uit de tabel blijkt dat het gemiddelde verschil tussen het gemiddelde van de JDP's en het gemiddelde van multi-beam peilingen sterk varieert, maar dat deze voor de vergelijking tussen JDP en mb98-00 steeds minder dan 10 centimeter bedraagt. Bovendien is het percentage van het gemiddelde JDP dat dieper ligt dan het gemiddelde uit multi-beam bodempeilingen in alle gevallen groter dan het percentage dat ondieper ligt. Dit komt niet overeen met de geschatte afwijking van 20 cm, die wordt genoemd in de voorlopige analyse van het verschil tussen single-beam bodempeilingen en multi-beam bodempeilingen. Door deze bewerking zou het gemiddelde JDP namelijk nog dieper en zouden de verschilwaarden nog negatiever worden. De standaardafwijking blijft uiteraard gelijk.

Overige conclusies die uit tabel 4-4 kunnen worden getrokken zijn:

- het gemiddelde verschil met het gemiddelde JDP is kleiner voor het gemiddelde mb98-00 dan voor het gemiddelde mb98; het percentage gridcellen van het gemiddelde mb98-00 dat ongeveer gelijk is aan dat van het gemiddelde JDP is dan ook groter dan het percentage gridcellen van het gemiddelde mb98;
- de standaardafwijking van de verschillen met het gemiddelde JDP is kleiner voor het gemiddelde mb98-00 dan voor het gemiddelde mb98;
- het minimum en maximum verschil met het gemiddelde JDP is van gelijke grootte voor het gemiddelde mb98-00 en het gemiddelde mb98;
- de erosiekuilen zijn in alle gevallen ondieper in het gemiddelde JDP;
- de invloed van baggeren is voor de het gemiddelde mb98-00 op geen enkel traject afwezig; er zijn dan ook geen bochten flauwer in het gemiddelde JDP ten opzichte van het gemiddelde mb98-00;
- noch de verschillen in de bochten tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98 noch de verschillen op de crossings lijken onderlinge overeenkomsten te vertonen. De afvoerafhankelijkheid van de tijdsgemiddelde bodemligging komt hierin niet naar voren: het gemiddelde JDP is bepaald op gevarieerde afvoeren; het gemiddelde mb98 op relatief lage afvoeren. De verwachting zou op basis hiervan zijn dat de bochten in het gemiddelde JDP steiler en de crossings hoger zouden zijn dan in het gemiddelde mb98;
- de verschillen op de crossings tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde 98-00 zijn eveneens per crossing anders.

Keuze van een gemiddelde voor de beschrijving van de “forced” geometrie

De algemene indruk die uit de vergelijking naar voren komt is dat de verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98 niet goed te verklaren zijn, waardoor een keuze op basis van de vergelijking tussen beide gemiddelden niet mogelijk is. In paragraaf 4.2.2 wordt reeds aangegeven dat het gemiddelde mb98 op zeer weinig bodempeilingen gebaseerd is en daardoor veel “ruis” uit kleine, lokale verstoringen in zich meedraagt. Bovendien is het gemiddelde mb98 een gemiddelde dat bepaald is uit bodempeilingen bij een relatief lage, slechts gering variërende afvoer. Het gemiddelde mb98 is hierdoor hoogstwaarschijnlijk minder representatief voor de tijdsgemiddelde bodemligging bij verschillende afvoeren dan het gemiddelde JDP. Het gemiddelde mb98 zal daarom niet als basis voor de voorspelling van de bodemligging gebruikt worden.

De verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 lijken de bevindingen van Siegfried (2000) te bevestigen dat ook na een hoogwater nog het effect van voorgaande baggerwerkzaamheden waar te nemen is. Voor 1998 is dit nagegaan aan de hand van de stortgegevens. Voor 1999 kan niet met zekerheid worden gezegd of de baggerwerkzaamheden evenmin volledig teniet worden gedaan door het hoogwater, omdat de gegevens hiervoor niet duidelijk genoeg zijn. Dit is echter wel aannemelijk, aangezien het hoogwater van december 1999 tot januari 2000 ($Q_{\max, \text{Waal}} = 4178 \text{ m}^3/\text{s}$) veel kleiner was dan dat van november 1998 ($Q_{\max, \text{Waal}} = 6142 \text{ m}^3/\text{s}$). Het bepalen van een tijdsgemiddelde bodemligging uit bodempeilingen na een hoogwater en voor uitvoering van grootschalige

baggerwerkzaamheden is hierdoor geen goede methode om de natuurlijke, door de geometrie van de rivier opgedrongen, situatie weer te geven.

Er is echter ook een tweede verklaring mogelijk voor het verschil in dwarsverhang tussen beide gemiddelden: een hogere afvoer veroorzaakt een groter dwarsverhang. Van de JDP's is niet bekend bij welke afvoer ze zijn gemeten. Wellicht spelen bij het gemiddelde volgens JDP onder meer de hoogwaters van 1993 ($Q_{\max, \text{Waal}} = 6900 \text{ m}^3/\text{s}$) en 1995 ($Q_{\max, \text{Waal}} = 7000 \text{ m}^3/\text{s}$) een grote rol, terwijl voor het gemiddelde volgens mb98-00 in de periode van maart 1998 tot en met mei 2000 de maximale afvoer lager was.

Het gemiddelde bepaald uit de JDP's van 1988 tot en met 1999 ten opzichte van het bijbehorende (geïnterpoleerde) OLR bergt veel onzekerheden in zich. Dit wordt al direct veroorzaakt door de bepaling van de verschillende OLR vlakken zelf, die door extrapolatie van gegevens zijn vastgesteld. Door de JDP's ten opzichte van NAP te gebruiken en hier de gemiddelde bodemdaling over de gehele periode vanaf te trekken zou de fout verkleinen, maar de hiervoor vereiste gegevens over de bodemdaling - verwerkt tot gridbestand - zijn niet beschikbaar. De overige onzekerheden betreffen onder meer de interpolatie van een bodempeiling over dwarsraaien naar een gebiedsdekkend gridbestand, de structurele verschillen tussen bodempeilingen uitgevoerd met single- en met multi-beam meetapparatuur en de invloed van tussentijds aangelegde grootschalige rivierkundige constructies en andere kleinschaligere riviervverbeteringen. Zonder enige correcties uit te voeren op de aangeleverde gegevens lijkt het gevonden gemiddelde echter het beste beeld te geven voor de ongestoorde situatie.

Opgemerkt dient te worden dat het doel van het bepalen van een tijdsgemiddelde bodemligging niet is: het vinden van een absolute waarde voor de bodemligging, maar veeleer: het mogelijk maken van een beschrijving van het systeem volgens een vaste, door de geometrie van de rivier opgedrongen en vrijwel niet in de tijd variërende "evenwichtsbodemligging" waar verstoringen zich over voortplanten. Gekozen wordt daarom om met het gemiddelde uit de JDP's als basis verder te werken.

4.3.2 Toepasbaarheid van de tijdsgemiddelde bodemligging

De tijdsgemiddelde bodemligging is in het voorgaande steeds bepaald uit het gemiddelde van een aantal bodempeilingen. Door deze middeling kunnen echter naast beddingvormen ook aanpassingsverschijnselen van de bodem worden uitgevlakt. Dit kunnen grootschalige trends zoals een continue bodemdaling en -stijging zijn, maar ook de reactie op variërende afvoer: het uitschuren en aanzanden van een crossing en het kantelen van het dwarsverhang in een bocht. Hierdoor wordt een foutief - te ondiep of te diep, te steil of te vlak - gemiddelde gevonden⁷. Bovendien zou hierdoor de hypothese dat de geometrie te scheiden is in een opgedrongen vast deel en variabele vrije verschijnselen verworpen worden. Voor beide verschijnselen is echter een toetsing uit te voeren.

⁷ Dit is vergelijkbaar met de autonome bodemdaling die gevonden wordt door het gemiddelde van de JDP's ten opzichte van NAP te vergelijken met dat ten opzichte van OLR.

Controle op trends in de bodempeilingen

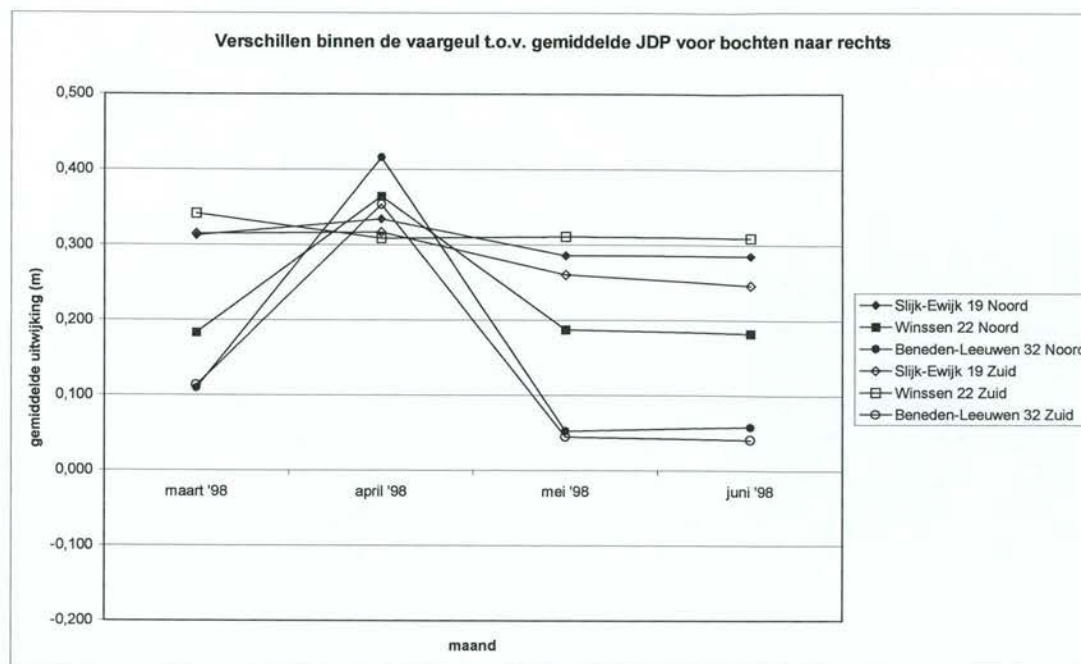
Voor het traject Beneden-Leeuwen is over de bodempeilingen tot het eerste baggerseizoen een controle uitgevoerd op het optreden van grootschalige trends in de bodemligging. Berekend is voor een reeks opeenvolgende maanden hoeveel gridcellen een continue trend lijken te volgen. Dit kan nog altijd worden toegeschreven aan toeval, doordat het meetinterval zodanig groot is dat tussen opvolgende metingen in een bepaald punt bijvoorbeeld verschillende dalen van duinen passeren. Uit de punten die een continue daling vertonen van maart tot en met juni 1998 blijkt dat de crossing uitschuurt: dit is de enige locatie waar een relatief groot aantal gridcellen dicht bij elkaar een continue daling vertonen. De overige punten met een continue daling of stijging zijn over het gehele traject verspreid. Over een periode van drie maanden vertoont slechts minder dan 5% een trend. Dit is zodanig weinig, dat aangenomen wordt dat de bepaalde gemiddelden geen invloeden van trends in zich meedragen. De verschillen tussen de tijdsgemiddelde bodemligging en een bodempeiling geven dan enkel de verstoringen weer die door het systeem lopen.

Een tweede controle heeft echter nog plaatsgevonden bij de analyse van de beddingvormen, aangezien het gemiddelde daarvoor van een individuele bodempeiling wordt afgetrokken. Trends in de ontwikkeling van de bodemligging worden dan zichtbaar via een continue toe- of afname van het gemiddelde verschil binnen een reeks opeenvolgende bodempeiling ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging. Een dergelijke trend is niet waargenomen (zie tabel 6-2).

Controle op aanpassing aan de afvoer

Om te controleren of de tijdsgemiddelde bodemligging niet afvoerafhankelijk is, zijn per morfologische eenheid de verschillen tussen de bodempeilingen van maart tot en met juni 1998 en het gemiddelde JDP berekend. Hiertoe is de bodempeiling steeds van het gemiddelde JDP afgetrokken. Indien grootschalige aanpassing van de bodemligging aan de afvoer optreedt, dan zou een doorgaande ontwikkeling over de maanden maart tot en met juni 1998 moeten worden waargenomen, met voor alle bochten een steiler of flauwer dwarsverhang en voor alle crossings een hogere of juist lagere ligging. De waarden die worden berekend zijn overwegend positief, wat overeenkomt met de resultaten van tabel 4-4 uit paragraaf 4.3.1, waarin wordt aangegeven dat het gemiddelde JDP dieper is dan het gemiddelde uit multi-beam bodempeilingen.

In de onderstaande figuren worden achtereenvolgens de gemiddelde verschillen Noord en Zuid van de rivieras getoond voor de bochten naar rechts, de bochten naar links en de crossings op de trajecten van de Proef Morfologie. Traject Dodewaard-Druten wordt niet getoond, omdat de bodempeiling van mei 1998 op dit traject niet correct is.

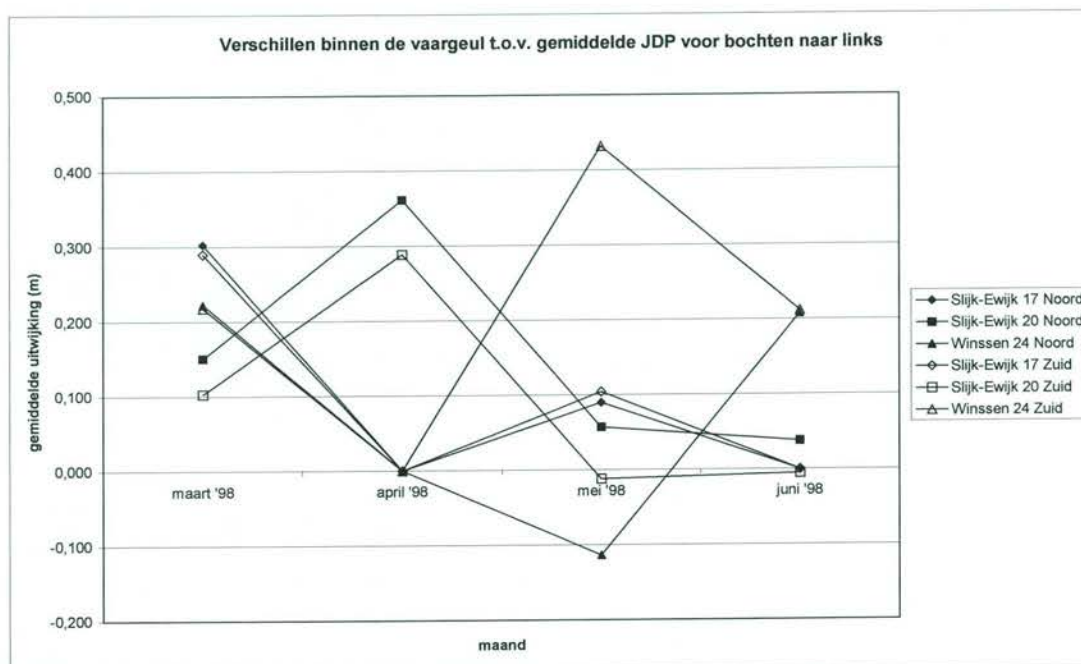


figuur 4-4: Verschillen tussen het gemiddelde JDP en bodempeilingen voor bochten naar rechts

Voor bochten naar rechts ligt de diepe buitenbocht aan de zuidzijde van de rivieras; de ondiepe binnenbocht aan de noordzijde. De bocht is dus steiler in een bepaalde bodempeiling dan in het gemiddelde JDP als het gemiddelde verschil Noord groter is dan het gemiddelde verschil Zuid. Uit de figuur blijkt nu:

| traject PM | ME | maart '98 | april '98 | mei '98 | juni '98 |
|-----------------|----|-----------|-----------|---------|----------|
| Slijk-Ewijk | 19 | flauwer | steiler | steiler | steiler |
| Winssen | 22 | flauwer | steiler | flauwer | flauwer |
| Beneden-Leeuwen | 32 | flauwer | steiler | steiler | steiler |

tabel 4-5: Verschil in verhang voor de bochten naar rechts ten opzichte van het gemiddelde JDP



figuur 4-5: Verschillen tussen het gemiddelde JDP en bodempeilingen voor bochten naar links

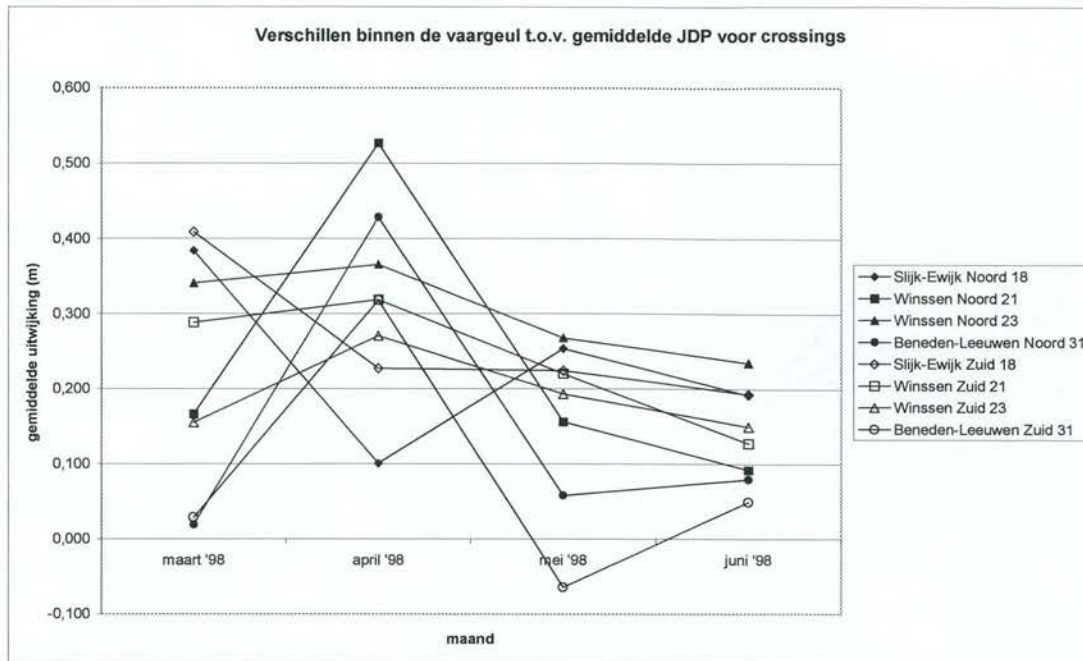
Voor bochten naar links ligt de ondiepe binnenbocht aan de zuidzijde van de rivieras; de diepe buitenbocht aan de noordzijde. De bocht is dus steiler in een bepaalde bodempeiling dan in het gemiddelde JDP als het gemiddelde verschil Noord kleiner is dan het gemiddelde verschil Zuid. Uit de figuur blijkt nu:

| traject PM | ME | maart '98 | april '98 | mei '98 | juni '98 |
|-------------|----|-----------|-----------|---------|----------|
| Slijk-Ewijk | 17 | flauwer | flauwer | steiler | flauwer |
| Slijk-Ewijk | 20 | flauwer | flauwer | flauwer | flauwer |
| Winssen | 24 | flauwer | flauwer | steiler | steiler |

tabel 4-6: Verschil in verhang voor de bochten naar links ten opzichte van het gemiddelde JDP

Uit tabel 4-5 en tabel 4-6 blijkt dat alle bochten in de bodempeiling van maart flauwer zijn dan in het gemiddelde JDP. Voor de overige maanden zijn de bochten naar rechts overwegend steiler en de bochten naar links overwegend flauwer. Dit betekent eerder dat een versterkt verschil tussen Noord en Zuid optreedt dan een structureel verschil tussen binnen- en buitenbocht. De verschillen tussen Noord en Zuid zijn klein ten opzichte van de verschillen tussen twee opeenvolgende maanden. De meeste verschillen tussen Noord en Zuid zijn bovendien kleiner dan 10 centimeter, wat kleiner is dan de nauwkeurigheid van de multi-beam bodempeilingen zelf. Deze verschillen zijn dus verwaarloosbaar klein.

Op de trajecten Slijk-Ewijk en Beneden-Leeuwen hebben de lijnen voor het gemiddelde verschil Noord en Zuid een vrijwel gelijk verloop. Dit duidt op het ademen van de bodemligging - het in zijn geheel op en neer gaan - zonder dat daarbij het verhang ingrijpend verandert. De tijdschaal voor dergelijke grootschalige aanpassing van de bodemligging is echter groot ten opzichte van de tijd tussen twee opeenvolgende bodempeilingen.



figuur 4-6: Verschillen tussen het gemiddelde JDP en bodempeilingen voor crossings

Op crossing is geen sprake van een diep en een ondiep deel Noord of Zuid van de rivieras, maar het ondiepe deel ligt rond de rivieras. Er zou dus over de gehele crossing bekeken vrijwel geen verschil tussen Noord en Zuid moeten zijn. Uit de figuur blijkt dat de crossings evenmin allemaal een gelijk gedrag - uitschuring of aanzanding - in de tijd vertonen.

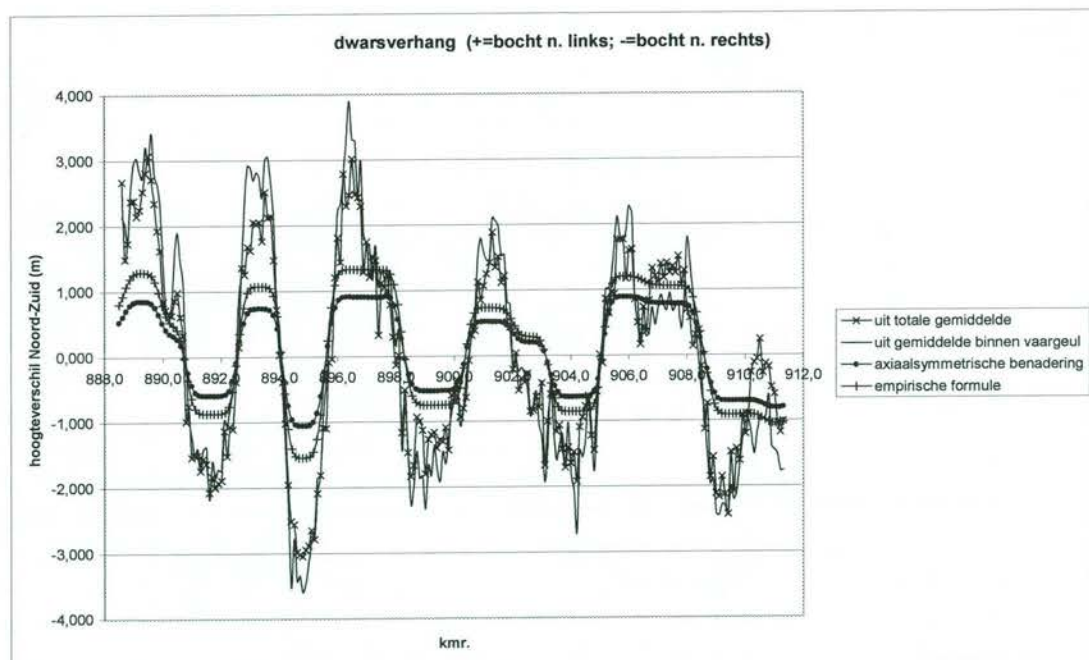
De hypothese dat de bodemligging kan worden gescheiden in een vaste, opgedrongen tijdsgemiddelde bodemligging en vrije verschijnselen die zich hier overheen voortplanten wordt door deze analyse ondersteund. De gevonden verschillen wijzen niet op een grootschalige aanpassing aan variërende afvoeren. Wat wel de oorzaak is voor de gevonden verschillen tussen opeenvolgende maanden is echter onduidelijk. De verschillen zijn in sommige gevallen zodanig groot dat getwijfeld wordt aan de correctheid van de aangeleverde gegevens.

Het aantal bodempeilingen dat beschikbaar is om de controle op de afvoerafhankelijkheid uit te voeren is zeer gering. Bovendien zijn er geen bodempeilingen zonder invloed van baggerwerkzaamheden van direct na een hoogwater, terwijl hoogwaters de grootste veranderingen in de bodemligging teweeg zouden kunnen brengen. Het is dus niet mogelijk om een uitspraak te doen over de geldigheid van de bovengenoemde hypothese.

4.3.3 Vergelijking van het gemiddelde JDP met de theorie

Vergelijking van het dwarsverhang

Voor de tijdsgemiddelde bodemligging die berekend is uit de JDP's, is met behulp van ArcView het dwarsverhang bepaald. Hiertoe is de gemiddelde diepte ten opzichte van OLR berekend voor zowel het gedeelte Noord als het gedeelte Zuid van de rivieras en zowel voor het gehele bestand als voor enkel het gedeelte binnen de vaargeul. Het verschil tussen de gemiddelde diepte Noord en de gemiddelde diepte Zuid is omgerekend naar een dwarsverhang voor de volledige breedte, waarbij is aangenomen dat het gemiddelde van elke zijde in het midden van die zijde optreedt. Het zo verkregen dwarsverhang kan worden vergeleken met het dwarsverhang volgens de formules (6) en (9). In figuur 4-7 wordt dit voor het gedeelte van de Waal van kmr 888,5 tot en met 911,3 getoond. Dit komt overeen met het gedeelte van de Midden-Waal waarbinnen alle trajecten van de Proef Morfologie gesitueerd zijn.



figuur 4-7: Vergelijking van het dwarsverhang uit ArcView en uit theoretische / empirische relaties

Uit deze figuur blijkt dat zowel de theoretische formule (6) als de empirische formule (9) een onderschatting geven van het dwarsverhang. Voor formule (9) blijkt het verschil ongeveer een factor 2 te zijn. Oorzaken voor dit verschil kunnen zijn:

- een foutieve aanname voor de bepaling van het dwarsverhang met behulp van ArcView;
- een te kleine lengte van de bocht ten opzichte van de dempingslengte, waardoor de axiaalsymmetrische benadering van de gebruikte formules een onderschatting geeft, omdat daarin geen rekening wordt gehouden met de overshoot;
- beïnvloeding door overige morfologische verschijnselen (met name beddingvormen).

In bijlage E zijn de figuren per traject van de Proef Morfologie weergegeven.

Berekening van de aanpassingslengten en -tijd van de bochten

De aanpassingslengten en aanpassingstijd volgens formule (16), (17) en (18) zijn berekend per morfologische eenheid voor de gemiddelde bochtstraal bij verschillende afvoeren. De resultaten staan in tabel 4-7.

| | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|--------|---------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Afvoer (m ³ /s) | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 |
| C | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 |
| h | 2,48 | 3,93 | 5,15 | 6,24 | 7,25 | 8,18 | 9,91 | 11,50 | 12,99 |
| Afgeleide parameters | | | | | | | | | |
| λ_w (m) | 279 | 443 | 580 | 703 | 816 | 921 | 1116 | 1295 | 1462 |
| λ_s (m) | 844 | 583 | 470 | 403 | 358 | 325 | 278 | 247 | 224 |
| IP (-) | 3,02 | 1,32 | 0,81 | 0,57 | 0,44 | 0,35 | 0,25 | 0,19 | 0,15 |
| L _P (m) | 3083 | 3229 | 3477 | 3792 | 4202 | 4772 | 7268 | | |
| L _D (m) | -3294 | 3413 | 1578 | 1130 | 916 | 788 | 636 | 546 | 486 |
| Sediment transport [Ten Brinke, 2000] | | | | | | | | | |
| s (m ² /dag) | 0,8 | 1,6 | 2,4 | 3,2 | 4 | 4,8 | 7 | 9,5 | 12,1 |
| Tijdsschaal groei/demping (dagen) | | | | | | | | | |
| ME 19 L = 1100 m | 1159 | 2025 | 8943 | -4127 | -1746 | -1129 | -621 | -416 | -311 |
| ME 20 L = 1700 m | 1953 | 3272 | -377202 | -3130 | -1590 | -1078 | -610 | -412 | -310 |
| ME 22 L = 1300 m | 1356 | 2308 | 13073 | -3765 | -1696 | -1114 | -618 | -415 | -311 |
| ME 26 L = 2100 m | 3028 | 5549 | -11429 | -2631 | -1484 | -1038 | -600 | -409 | -308 |
| ME 27 L = 1600 m | 1772 | 2961 | 55807 | -3276 | -1617 | -1087 | -612 | -413 | -310 |
| ME 29 L = 1950 m | 2543 | 4417 | -18051 | -2803 | -1523 | -1053 | -604 | -410 | -309 |
| ME 32 L = 3100 m | 26288 | -12082 | -3417 | -1854 | -1250 | -939 | -574 | -399 | -303 |

tabel 4-7: Aanpassingslengten en aanpassingstijd voor de bochten van de Midden-Waal

Uit de tabel blijkt dat:

- de golflengte van de oscillatie toeneemt bij hogere afvoeren. Voor hoge afvoeren kan geen golflengte voor de oscillatie bepaald worden. Dit wil zeggen dat er exponentiële demping optreedt;
- de golflengte van de oscillatie voor alle afvoeren en de dempingslengte bij lage afvoeren groter zijn dan de lengte van de bochten op de trajecten van de Proef Morfologie;
- bij lage afvoeren de tijdschaal positief is, wat wil zeggen dat de slingering om de “evenwichtsbodemligging” groeit. Lage afvoeren hebben echter een kleine gemiddelde onderschrijdingskans (zie bijlage H), zodat de werkelijke groei zeer gering zal zijn. Bij

hogere afvoeren nemen zowel de tijdschaal voor de damping als de dempingslengte af: de “evenwichtsbodemligging” wordt dus sneller - in ruimte en tijd - benaderd.

- de tijdschaal afneemt bij hogere afvoeren, maar dat deze nog steeds lang is ten opzichte van de voorspellingstermijn. Bovendien treden hoge afvoeren gemiddelde minder dan één dag per jaar op (zie bijlage H), zodat de gemiddelde tijdschaal over de voorspellingstermijn een stuk groter is.

De hier uitgevoerde berekeningen tonen aan dat het dwarsverhang dat met behulp van de axiaalsymmetrische benadering wordt berekend, een onderschatting zal geven van het werkelijke dwarsverhang over de gehele lengte van alle bochten van de Midden-Waal. De berekende tijdschalen zijn zodanig groot, dat de aanname dat de opgedrongen geometrie vrijwel niet wijzigt in de tijdsperiode waarover een voorspelling wordt gedaan waarschijnlijk een redelijke benadering van de werkelijkheid oplevert. De resultaten bevestigen dus het beeld dat in ArcView gevonden wordt: dat er geen aanpassingsverschijnselen worden waargenomen in de berekende verschillen van een bodempeilingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging.

4.3.4 Bepaling van de aanpassing van crossings in de tijd en vergelijking van de resultaten met de theorie

In ArcView is een analyse van de aanpassing van crossings aan variërende afvoeren uitgevoerd voor de crossings zoals deze door de definitie van de Morfologische Eenheden zijn vastgelegd (zie tabel 4-1). Aangezien de reactie van crossings op de natuurlijke processen wordt onderzocht is de analyse uitgevoerd over de bodempeilingen voor aanvang van de eerste baggerwerkzaamheden. Per bodempeiling en per crossing kunnen de veranderingen van de hoogte en het volume worden bepaald. Dit is gedaan voor het gedeelte binnen de vaargeul. Het probleem dat hierbij optreedt is echter, dat de meeste crossings zich niet geheel binnen een traject van de Proef Morfologie bevinden, zodat het deel van de crossing dat door de maandelijkse bodempeilingen gedekt wordt zeer beperkt is en bovendien wisselt per peiling. In tabel 4-8 wordt een overzicht gegeven van de gedeelten van de crossings die door alle bodempeilingen van voor de eerste baggerwerkzaamheden worden gedekt en waarover de analyse is uitgevoerd.

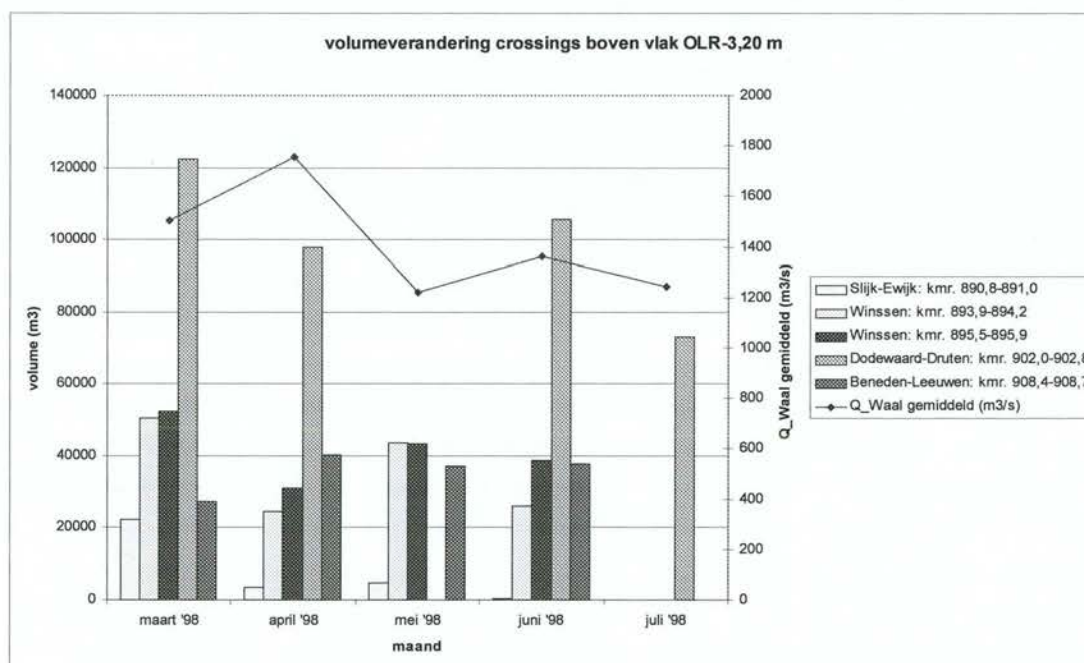
| ME | traject PM | kmr. begin | kmr. eind | lengte binnen metingen (m) |
|----|------------------|---------------|--------------|-------------------------------|
| 18 | Slijk-Ewijk | 890,8 | 891,0 | 200 |
| 21 | Winssen | 893,9 | 894,2 | 300 |
| 23 | Winssen | 895,5 | 895,9 | 400 |
| 28 | Dodewaard-Druten | 902,0 | 902,8 | 800 |
| 31 | Beneden-Leeuwen | 908,4 | 908,7 | 300 |

tabel 4-8: Crossings binnen de trajecten van de Proef Morfologie en gedeelte van beschikbare bodempeilingen

Verandering van het volume van de crossings

Bij lagere afvoeren dan gemiddeld treedt volgens de theorie uitschuring van de crossings op, dus een afname van het volume van een crossing; bij hogere afvoeren dan gemiddeld aanzanding, dus een toename van het volume van een crossing. De bodempeilingen voor aanvang van de eerste grootschalige baggerwerkzaamheden zijn allemaal uitgevoerd bij lagere afvoeren dan gemiddeld. Volgens de theorie betekent dit dus dat een continue uitschuring van de crossing zal optreden.

Het volume van de crossings is bepaald uit de door ArcView berekende totale oppervlakte aan gridcellen per diepte ten opzichte van OLR. Het volume is het totale volume binnen de vaargeul tussen de begin- en eindkilometerraai van de crossing volgens tabel 4-8. In figuur 4-8 wordt een voorbeeld gegeven van de resultaten: hierin is het volume boven het vlak OLR - 3,20 meter per maand en voor iedere crossing weergegeven, in combinatie met de gemiddelde Waal-afvoer over de data van de bodempeilingen waaruit het volume is bepaald.



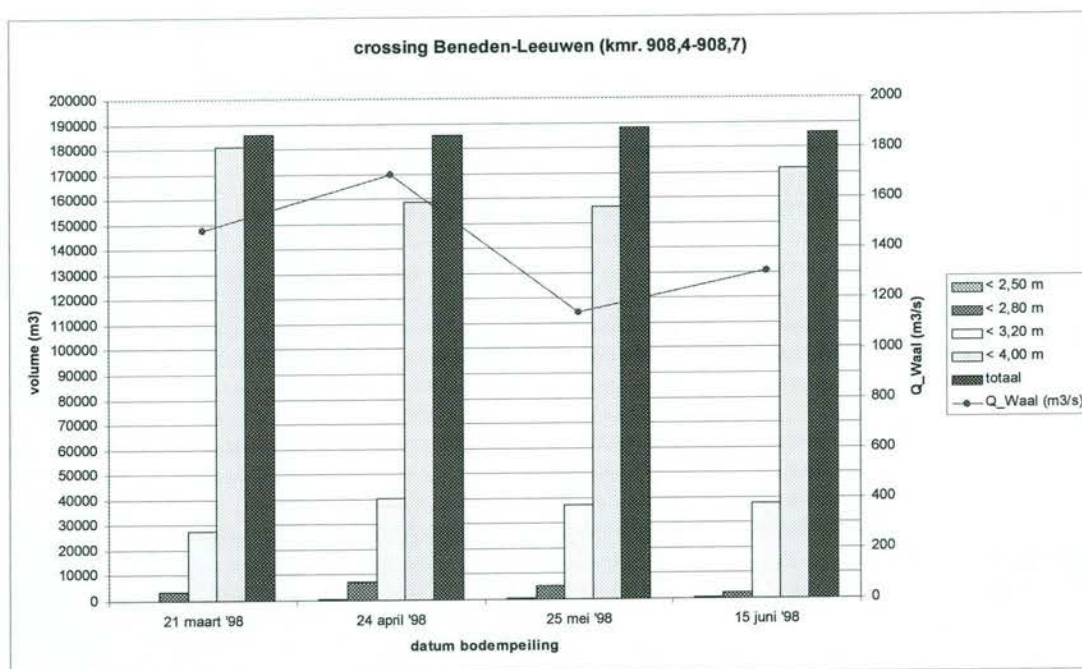
figuur 4-8: Volume van crossings ten opzichte van OLR - 3,20 meter in de tijd⁸

Op geen van de crossings wordt een continue afname van het volume in de tijd gevonden. De afvoer stijgt licht van maart tot april en van mei tot juni. De afvoer daalt licht van april tot mei en van juni tot juli. Als toch ook bij lage afvoeren het volume varieert met de afvoer, dan zou bij dalende afvoeren uitschuring op een crossing op moeten treden, dus een afname van het volume boven het vlak OLR - 3,20 meter. Dit is tussen april en mei alleen het geval voor de crossing bij Beneden-Leeuwen; tussen juni en juli voor de crossing bij

⁸ Voor mei 1998 kan het volume van de crossing niet bepaald worden voor de crossing bij Dodewaard-Druten; voor juli 1998 niet voor de overige crossings.

Dodewaard-Druten. Een toename van het volume zou bij stijgende afvoer moeten worden waargenomen: dit treedt zowel van maart tot april als heel licht van mei tot juni op bij de crossing bij Beneden-Leeuwen.

Het volume van de crossings is eveneens ten opzichte van een drietal andere vlakken berekend, te weten OLR - 2,50 meter, OLR - 2,80 meter en OLR - 4,00 meter. Daarnaast is het totale volume onder OLR bepaald. Per crossing is vervolgens het totale volume onder de verschillende vlakken per maand in een grafiek uitgezet. Voor de crossing bij Beneden-Leeuwen is het resultaat weergegeven in figuur 4-9.



figuur 4-9: Volume van de crossing bij Beneden-Leeuwen ten opzichte van verschillende vlakken

Uit deze figuur blijkt dat het totale volume van de crossing bij Beneden-Leeuwen binnen de vaargeul slechts weinig verandert. Bovendien blijkt dat het gedrag van het volume - toename of afname - afhankelijk is van het referentievlak ten opzichte waarvan het volume bepaald wordt. Voor de figuren van de overige trajecten wordt verwezen naar bijlage F. In bijlage F zijn daarnaast de grafieken weergegeven, waarin per maand de verdeling van het volume over de verschillende dieptes ten opzichte van OLR per crossing is uitgezet.

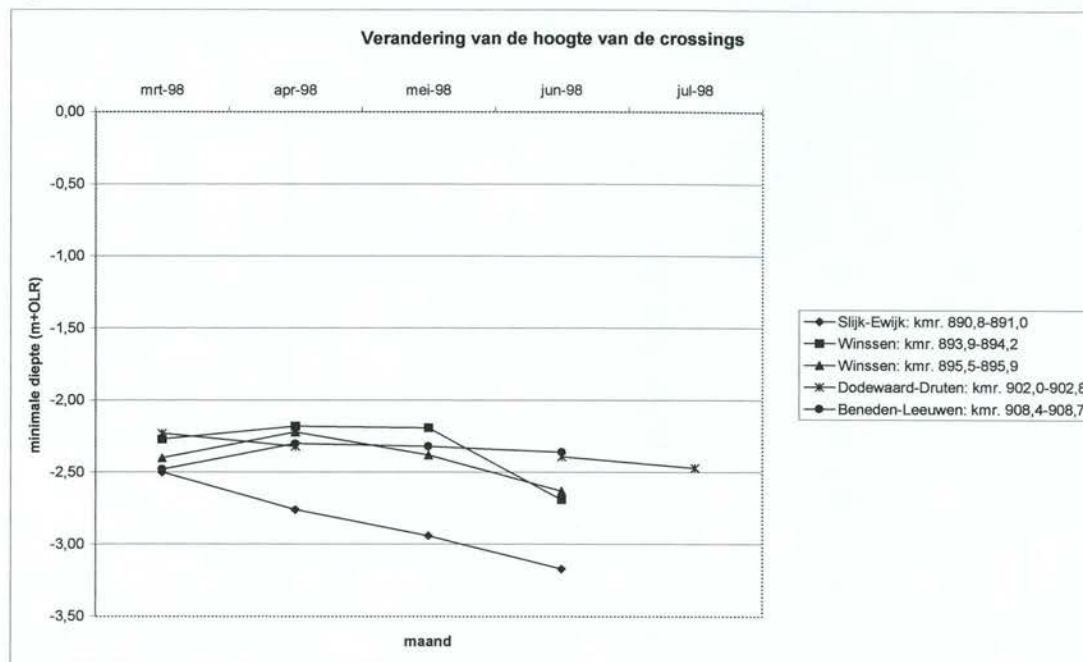
Vervolgens is gezocht naar een verband tussen de afvoer en het volume van een crossing. Hiervoor zijn twee soorten grafieken samengesteld:

- de verandering van het volume boven het vlak OLR - 2,80 meter als functie van de gemiddelde afvoer over de periode tussen twee opeenvolgende bodempeilingen;
- de verandering van het volume boven het vlak OLR - 2,80 meter als functie van de verandering van de afvoer tussen twee opeenvolgende bodempeilingen.

Deze grafieken zijn terug te vinden in bijlage F. Het aantal datapunten is echter te klein om er een betrouwbare relatie uit af te leiden.

Verandering van de hoogte van de crossings

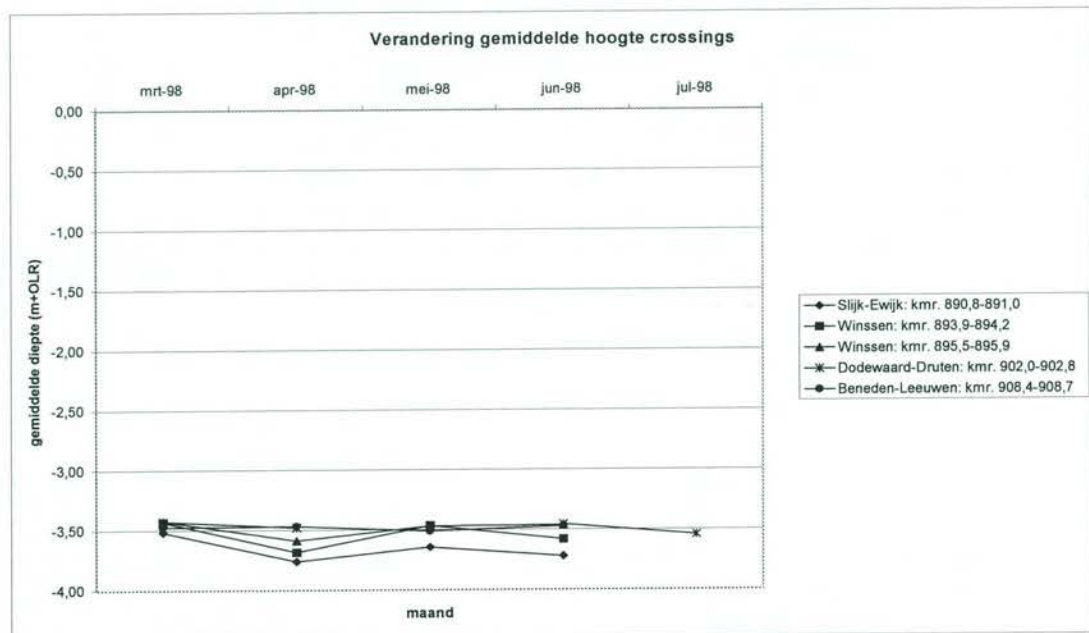
Voor de scheepvaart is behalve de totale omvang van de crossings vooral ook de hoogte van belang. Daarom is eveneens de verandering van de maximale hoogte van de crossings (minimale waterdiepte ten opzichte van OLR) over de bodempeilingen voor aanvang van de eerste grootschalige baggerwerkzaamheden onderzocht. Het resultaat is weergegeven in figuur 4-10.



figuur 4-10: Verandering van de maximale hoogte van de crossings in de tijd

Uit figuur 4-10 blijkt dat alleen voor de crossings op de trajecten Slijk-Ewijk en Dodewaard-Druten de hoogte continu afneemt, wat overeenkomt met de hypothese dat bij lage afvoeren de crossings continu uitschuren en dat alleen de snelheid van de uitschuring beïnvloedt wordt door het afvoerverloop.

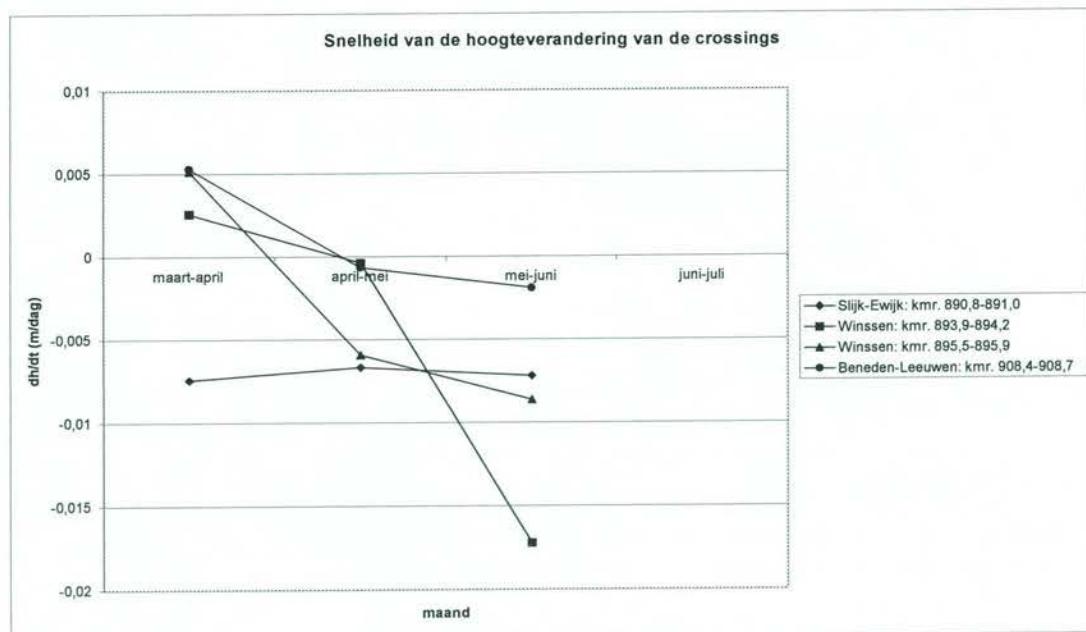
De maximale hoogte van een crossing is echter gebaseerd op slechts één gridcel, waardoor de betrouwbaarheid met betrekking tot de representativiteit voor het gedrag van de gehele crossing beperkt is. Daarom is eveneens gekeken naar het verloop van de gemiddelde hoogte van de crossings. Dit is weergegeven in figuur 4-11.



figuur 4-11: Verandering van de gemiddelde hoogte van de crossings in de tijd

Uit figuur 4-11 blijkt dat geen van de crossings een continue afname van de gemiddelde hoogte vertoont. De verandering van de gemiddelde hoogte van de crossing tussen maart en juni (juli) 1998 is echter zeer beperkt is. Dit is niet verwonderlijk gezien de grote tijdschalen voor de aanpassing van crossings bij lage afvoeren (zie paragraaf 4.3.4).

De tijdschaal voor de aanpassing van crossings aan de afvoer is - via het sedimenttransport - afhankelijk van die afvoer (zie vergelijking (21)). In figuur 4-12 is de snelheid waarmee de hoogte afneemt per crossing uitgezet. Dit is de verandering in hoogte tussen twee opeenvolgende bodempeilingen gedeeld door de tijd tussen die bodempeilingen.



figuur 4-12: Snelheid van de verandering in hoogte van de crossings

Voor de crossing op traject Slijk-Ewijk is de snelheid over de periode maart-april iets groter dan over de periode april-mei. De gemiddelde afvoer over de periode maart-april ($Q_{\text{Waal,gem}} = 1550 \text{ m}^3/\text{s}$) is echter kleiner dan over de periode april-mei ($Q_{\text{Waal,gem}} = 1602 \text{ m}^3/\text{s}$). De beide crossings op traject Winssen hebben eenzelfde gemiddeld afvoerverloop. De verandering van de snelheid waarmee de hoogte van de crossings afneemt is echter zeer verschillend. De hypothese dat de snelheid van de uitschuring afhangt van de afvoer wordt door deze grafiek dus niet ondersteund.

Vergelijking met de theorie

In paragraaf 3.3 is de theorie van crossings behandeld. Hierbij is een tijdschaal voor de aanpassingstijd gegeven in vergelijking (21). Deze is via de voortplantingssnelheid van 1-D verstoringen afhankelijk van de afvoer. In tabel 4-9 staat de werkelijke lengte van de crossing volgens de definitie van de ME's en de hierbij berekende tijdschaal. De 1-D voortplantingssnelheid is bepaald uit:

- graad van niet-lineariteit van het transport $n = 4$
- sedimenttransport s uit Ten Brinke (2000)
- waterdiepte h_{gem} uit tabellen 1996.0 (bijlage H)

| ME | | maart-april | april-mei | mei-juni |
|----|---|-------------|-----------|----------|
| 18 | $Q_{\text{Waal,gem}} (\text{m}^3/\text{s})$ | 1507 | 1544 | 1221 |
| | $L_{\text{cr}} (\text{m})$ | 500 | 500 | 500 |
| | $c_{\text{gem}} (\text{m}/\text{dag})$ | 1,8 | 2,0 | 1,3 |
| | $T_{\text{cr}} (\text{dag})$ | 282 | 253 | 391 |
| 21 | $Q_{\text{Waal,gem}} (\text{m}^3/\text{s})$ | 1513 | 1524 | 1208 |
| | $L_{\text{cr}} (\text{m})$ | 400 | 400 | 400 |
| | $c_{\text{gem}} (\text{m}/\text{dag})$ | 1,7 | 1,8 | 1,1 |
| | $T_{\text{cr}} (\text{dag})$ | 239 | 224 | 364 |
| 23 | $Q_{\text{Waal,gem}} (\text{m}^3/\text{s})$ | 1513 | 1524 | 1208 |
| | $L_{\text{cr}} (\text{m})$ | 500 | 500 | 500 |
| | $c_{\text{gem}} (\text{m}/\text{dag})$ | 1,7 | 1,8 | 1,1 |
| | $T_{\text{cr}} (\text{dag})$ | 29 | 280 | 455 |
| 28 | $Q_{\text{Waal,gem}} (\text{m}^3/\text{s})$ | 1520 | 1354 | 1225 |
| | $L_{\text{cr}} (\text{m})$ | 800 | 800 | 800 |
| | $c_{\text{gem}} (\text{m}/\text{dag})$ | 1,6 | 1,2 | 1,0 |
| | $T_{\text{cr}} (\text{dag})$ | 510 | 659 | 773 |
| 31 | $Q_{\text{Waal,gem}} (\text{m}^3/\text{s})$ | 1527 | 1442 | 1199 |
| | $L_{\text{cr}} (\text{m})$ | 1300 | 1300 | 1300 |
| | $c_{\text{gem}} (\text{m}/\text{dag})$ | 1,6 | 1,5 | 1,0 |
| | $T_{\text{cr}} (\text{dag})$ | 800 | 853 | 1258 |

tabel 4-9: Tijdschaal voor de aanpassing van crossings aan de afvoer

Uit de tabel blijkt dat de aanpassingstijden veel groter zijn dan de tijd tussen twee opeenvolgende metingen.

Het is op basis van de voorgaande analyses niet mogelijk om met zekerheid conclusies te trekken omtrent het gedrag van crossings bij variërende afvoer. De redenen hiervoor zijn:

- de grote tijdschaal voor de aanpassing van de crossing ten opzichte van het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende bodempeilingen;
- het geringe aantal bodempeilingen dat beschikbaar is voor de analyse;
- het afvoerverloop over de periode van de analyse: de afvoer is over de gehele periode maart tot juli 1998 lager dan gemiddeld, zonder dat sterke variaties optreden;
- het gedeelte van de crossing waarover gegevens beschikbaar zijn: enkel de crossing op het traject Dodewaard-Druten valt geheel binnen alle metingen; de crossings op de overige trajecten vallen voor een deel binnen het begin of einde van het traject en worden door de verschillende bodempeilingen niet over gelijke lengte bemeten;
- de aanwezigheid van beddingvormen: de beddingvormen planten zich voort over de crossings en worden meegenomen bij de berekening van het volume van de crossing. Als de afmetingen van de beddingvormen groot zijn ten opzichte van het verschil in hoogte van de crossing bij verschillende afvoeren, dan kan het gedrag van de crossings bij variërende afvoeren niet goed worden waargenomen

•

5 Huidige kennis over de “free” geometrie

De “free” geometrie van de rivier bestaat uit alle verstoringen die zich door de rivier voortplanten, zowel ééndimensionaal als tweedimensionaal. Afhankelijk van hun afmetingen reageren de vrije verstoringen zeer snel of relatief traag op veranderingen in de afvoer. Zowel de afvoer als de afmetingen en vorm van de verstoringen bepalen de voortplantingssnelheid.

In dit hoofdstuk wordt achtereenvolgens besproken wat er in de literatuur bekend is over de 2-D morfologie van alternerende banken, beddingvormen en verstoringen van een hoogwater. Hierbij wordt wederom beperkt tot beschrijvingen en relaties die relevant zijn voor en/of toegepast kunnen worden bij de toetsing in ArcView.

5.1 Alternerende banken

Alternerende banken zijn grote zandbanken die zich kunnen ontwikkelen in relatief rechte rivieren en die zich in benedenstroomse richting voortplanten. Ze zijn hinderlijk voor de scheepvaart omdat ze niet plaatsvast zijn.

5.1.1 Groei en demping van alternerende banken

Uit onderzoek van onder meer Lambeek en Mosselman (1998) is naar voren gekomen dat er op de Waal alternerende banken kunnen optreden. Het gedrag van alternerende banken wordt in de literatuur beschreven met behulp van de lineaire analyse [Struiksma, 1997]. Voor de beschrijving van vrije verschijnselen wordt de niet-stationaire oplossing beschouwd. Hieruit kan de tijdschaal worden bepaald voor groei en demping van alternerende banken:

$$T = -T_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{(n-1)k'^2}{1+k'^2} IP \right)^{-1} \quad (25)$$

met

$$T_0 = \frac{\lambda_s h}{s} \quad (26)$$

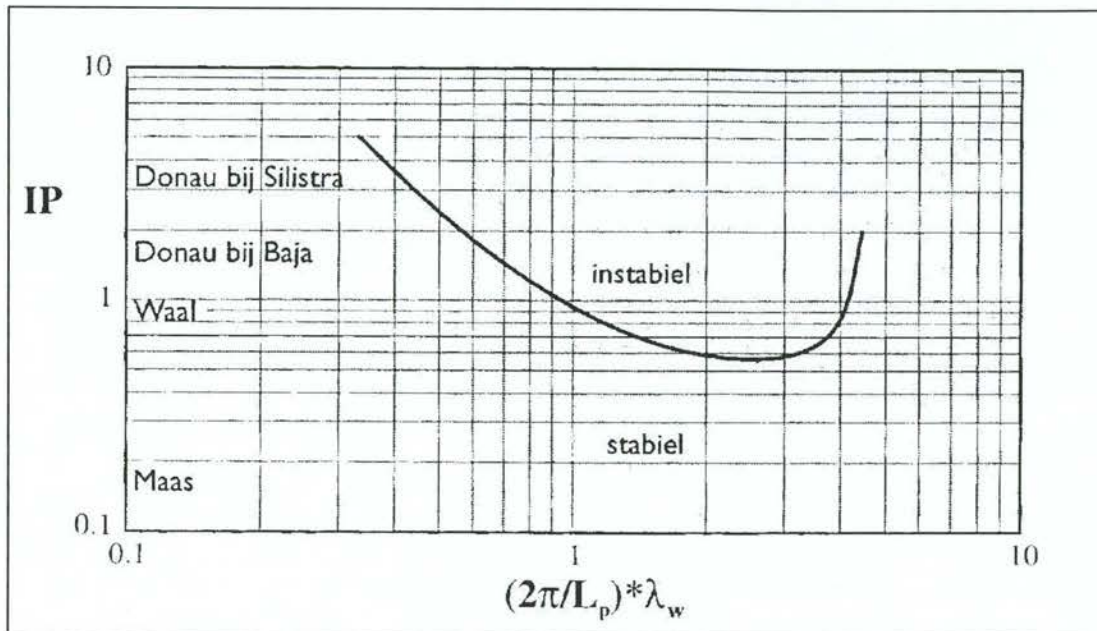
en

$$k' = \frac{2\pi\lambda_w}{L_p} \quad (27)$$

T - tijdschaal voor 2-D processen [s]

Voor lage afvoeren is de tijdschaal positief, wat wil zeggen dat alternerende banken aanwezig zijn en groeien; voor hogere afvoeren is de tijdschaal negatief, wat wil zeggen dat de alternerende banken uitdempen. Alternerende banken zijn op de Midden-Waal echter nog nooit waargenomen.

In figuur 5-1 wordt het resultaat van de lineaire analyse grafisch weergegeven: de neutrale stabiliteitskromme geeft de overgang tussen groei en demping van alternerende banken weer. In de figuur is te zien dat de Waal rond het overgangsgebied ligt.



figuur 5-1: Neutrale stabiliteitskromme [Struiksma, 1997]

Uit deze figuur blijkt dat voor waarden van de interactieparameter van circa 0,4 of meer mogelijk alternerende banken ontstaan op de Waal. Dit is het geval bij lage afvoeren. In tabel 5-1 zijn de tijdschaal en voortplantingssnelheid van alternerende banken berekend met de gemiddelde Waalkarakteristieken:

| | | | |
|--|----------|---|---------------------|
| – normaalbreedte van de rivier | B | = | 260 m |
| – verhang | i | = | $1,1 \cdot 10^{-4}$ |
| – korreldiameter | D_{50} | = | 2 mm |
| – graad van niet-lineariteit van het transport | n | = | 4 |

| | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| Afvoer (m ³ /s) | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 |
| C (m ^{1/2} /s) | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 |
| h (m) | 2,48 | 3,93 | 5,15 | 6,24 | 7,25 | 8,18 |
| Afgeleide parameters | | | | | | |
| Shieldsparemeter (-) | 0,08 | 0,13 | 0,17 | 0,21 | 0,24 | 0,27 |
| λ_w (m) | 279 | 443 | 580 | 703 | 816 | 921 |
| λ_s (m) | 926 | 652 | 525 | 450 | 400 | 363 |
| IP (-) | 3,32 | 1,47 | 0,90 | 0,64 | 0,49 | 0,39 |
| Sediment transport | | | | | | |
| s (m ³ /dag/m) [Ten Brinke, 2000] | 0,8 | 1,6 | 2,4 | 3,2 | 4,0 | 4,8 |
| Vrije verschijnselen | | | | | | |
| L (m) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| k' (-) | 1,75 | 2,78 | 3,65 | 4,42 | 5,13 | 5,79 |
| 2-D voortplantingssnelheid (m/dag) | 0,20 | 0,34 | 0,42 | 0,47 | 0,52 | 0,56 |
| T ₀ (dagen) | 2867 | 1603 | 1128 | 879 | 724 | 619 |
| Tijdschaal groei (dagen) | 1041 | 1678 | 4301 | -10235 | -2483 | -1451 |
| Groei/demping | groei | groei | groei | demping | demping | demping |

tabel 5-1: Berekening van de tijdschaal en voortplantingssnelheid voor alternerende banken

Hieruit blijkt dat er weliswaar groei optreedt voor afvoeren onder $Q_{\text{waal}} = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$, maar dat de tijdschaal zodanig groot is, dat de banken in de periode van voldoende lage afvoer waarschijnlijk onvoldoende groeien om waargenomen te worden. De grens vanaf waar demping optreedt ligt bij de berekende waarden lager dan uit de neutrale stabiliteitskromme volgt.

5.1.2 Voortplantingssnelheid van alternerende banken

Voor de voortplantingssnelheid van alternerende banken wordt uit de lineaire analyse de volgende uitdrukking gevonden:

$$c = \frac{s}{h} \frac{k'^2 - \frac{n-3}{2}}{k'^2 + 1} \quad (28)$$

c - voortplantingssnelheid voor 2-D bodemverstoringen [m/s]

In tabel 5-1 zijn tevens de voortplantingssnelheden berekend. Deze zijn zeer laag. Dit betekent dat indien alternerende banken zouden worden waargenomen, deze in twee opeenvolgende bodempeilingen nog vrijwel op dezelfde plaats zouden moeten liggen. Hierdoor zijn ze goed te onderscheiden van andere zich vrij voortplantende verschijnselen.

5.2 Beddingvormen

Beddingvormen ontstaan door interactie (wrijving) van het stromende water met de bodem. De afmetingen van beddingvormen variëren met de afvoer, zij het vertraagd. Daarnaast planten beddingvormen zich voort in benedenstroomse richting. Ze leveren daarom pas hinder op voor de scheepvaart als de hoogte te groot is of als ze zich over ondieptes voortplanten.

5.2.1 Afmetingen van duinen

Onderzoek naar beddingvormen in stroomgoten en metingen in het veld hebben uitgewezen dat er verschillende beddingvormen bestaan, met verschillende afmetingen en vormen, welke afhankelijk zijn van de karakteristieken van het bodemmateriaal en van de stromingscondities. In de literatuur worden beddingvormen over het algemeen onderverdeeld in ribbels, duinen, uitgevlakte duinen en antiduin. In de Waal, waar de stroomsnelheden en de Froude-getallen klein zijn en het materiaal bestaat uit zand en grind, treden alleen duinen of ribbels gesuperponeerd op duinen op. Ribbels zijn beddingvormen met zeer kleine afmetingen - een hoogte tot circa 0,04 meter en een lengte tot enkele decimeters - en een bij benadering driehoekige dwarsdoorsnede met een steil front en een flauw lijzijde. Ribbels treden op bij bodems met fijn sediment. Duinen zijn grotere vlakkammige verschijnselen met een hoogte van enkele decimeters tot meters en een lengte van enkele tot tientallen meters, die eveneens steiler zijn aan stroomafwaartse zijde (het front) dan aan de stroomopwaartse lijzijde. Verschillende onderzoekers hebben uit experimenten en veldmetingen relaties afgeleid voor de karakteristieken van beddingvormen. De afmetingen van beddingvormen - hoogte en lengte - worden in deze relaties vaak gerelateerd aan de mediane korreldiameter (D_{50}), de waterdiepte (h) en de transportparameter van Van Rijn (T), die als volgt wordt gedefinieerd:

$$T = \frac{\tau_b' - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} \quad (29)$$

| | | |
|---------------|--|---------------------|
| T | - transportparameter van Van Rijn | [-] |
| τ_b' | - bodemschuifspanning, betrokken op de korrel | [N/m ²] |
| $\tau_{b,cr}$ | - kritieke bodemschuifspanning volgens Shields | [N/m ²] |

Ook zijn diverse onderzoeken verricht specifiek naar de situatie in de Waal. Dit blijkt resultaten op te leveren die sterk afwijken van de meer algemene relaties: Lai (1998) concludeert uit analyse van de beddingvormen op de Waal tijdens het hoogwater van 1997 dat deze qua type niet overeenkomen met de voorspellingen van Van Rijn en van Van den Berg-Van Gelder. Bovendien wordt in hun relaties geen rekening gehouden met naijlingseffecten. Dit kan verklaard worden doordat de relaties zijn afgeleid voor stationaire stroming, terwijl naijling alleen bij niet-stationaire stroming optreedt. In deze paragraaf wordt dan ook enkel aandacht besteed aan voorspellingen van afmetingen van beddingvormen uit studies voor de Waal. In het navolgende worden verschillende onderzoeken besproken.

Lai (1998)

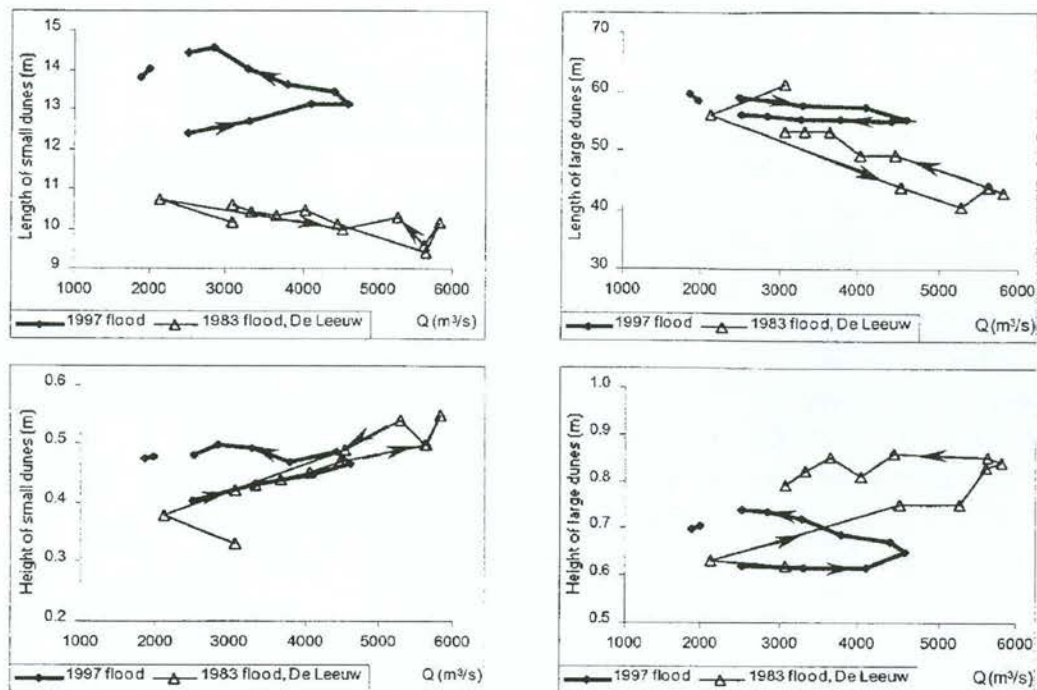
Lai heeft de beddingvormen bij Druten (kmr. 909-910) tijdens het hoogwater van 1997 geanalyseerd met behulp van spectraalanalyse en een time-series model. Op de Waal worden twee typen duinen waargenomen: kleine duinen gesuperponeerd op grotere. Daarnaast treedt er een verschil op tussen de noord- en de zuidzijde van de rivier: zowel de lengte en hoogte van de kleine duinen, als de hoogte van de grote duinen zijn aan de noordzijde groter dan aan de zuidzijde, terwijl de lengte van de grote duinen juist groter is aan de zuidzijde. Dit verschil treedt op ongeacht de waterdiepte en aangenomen wordt, dat dit het gevolg is van de scheepvaart op de Waal, doordat overwegend geladen opvaart langs de zuidzijde en overwegend ongeladen afvaart aan de noordzijde plaatsvindt. De scheepvaart veroorzaakt twee soorten verstoringen van de natuurlijke situatie:

- de fijnkorrelige stranden tussen de kribvakken eroderen, waardoor een zodanige sortering van het sediment ontstaat, dat de mediane korrelgrootte aan noordzijde groter is dan aan de zuidzijde en tevens de verticale opbouw in lagen van verschillende diameter verschilt;
- de retourstroom onder de schepen vlakkt de top van de duinen af, waardoor de hoogte kleiner is.

De afmetingen van de duinen zijn afvoerafhankelijk: de hoogte neemt toe met stijgende afvoer en neemt af met dalende afvoer. De maximale hoogte wordt echter bereikt enkele dagen na de maximale afvoer. De lengte van de kleine duinen neemt toe met toenemende afvoer en blijft bij dalende afvoer doorgroeien. De lengte van grote duinen neemt daarentegen volgens Lai af met toenemende waterdiepte - dus met de afvoer - en neemt toe na de piekafvoer. De lengte van de duinen varieert van enkele meters tot honderden meters, zonder duidelijke relatie met de duinhoogte.

Voor niet-stationaire stroming reageert de ontwikkeling van de beddingvormen vertraagd op de veranderingen van de afvoer. De naijling van de duinafmetingen op de variërende afvoer is groter voor de duinlengte dan voor de duinhoogte en is tevens groter voor dalende dan voor stijgende afvoeren. Uit de analyses van Lai volgt voor de duinhoogte een vertraging van circa 4 tot 5 dagen.

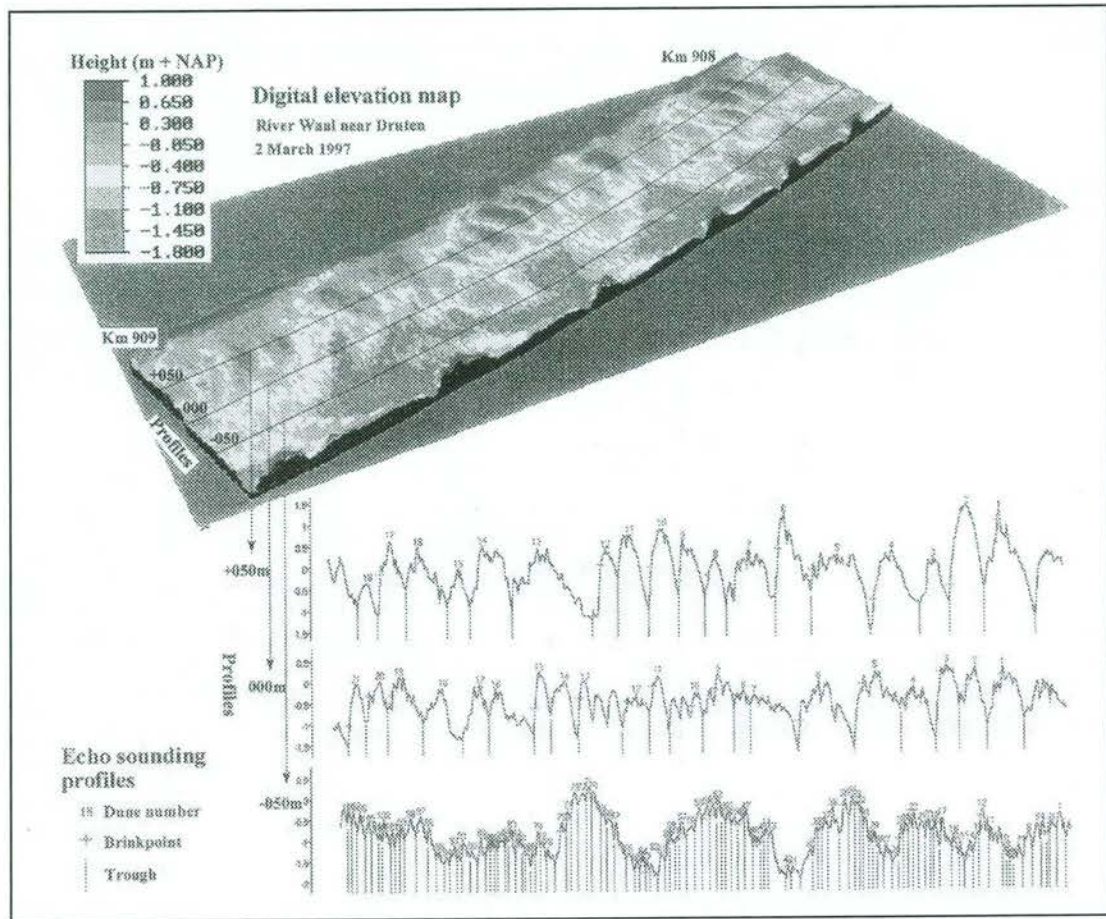
De resultaten van Lai (1998) met betrekking tot de relatie tussen de afmetingen van beddingvormen en de afvoer zijn weergegeven in figuur 5-2.



figuur 5-2: Gemiddelde afmetingen van beddingvormen versus afvoer tijdens het hoogwater van 1997 op de Waal, nabij Druten [Lai, 1998]

Wilbers (nov 1997, aug 1998, nov 1998, nov 1999)

Wilbers heeft de ontwikkeling van beddingvormen op de Midden-Waal (kmr. 890-910) geanalyseerd voor de hoogwaters tussen 1989 en 1998. Met name het hoogwater van 1997 - meetlocatie Deest tot Beneden-Leeuwen: kmr. 900-910 - is meerder malen onderzocht, waaruit steeds een bijstelling van de karakteristieken naar lagere waarden plaatsvond. Ook uit al deze onderzoeken worden verschillen gevonden voor de noordelijke en zuidelijke rivierhelft: de noordelijk helft bevat grote duinen met een gemiddelde lengte van 30 tot 80 meter en een gemiddelde hoogte van 0,5 tot 1,5 meter; de zuidelijke helft kleine duinen met een gemiddelde lengte van 10 tot 20 meter en een gemiddelde hoogte van 0,3 tot 0,8 meter. Uit het onderzoek van het hoogwater van 1998 - meetlocatie Druten: kmr. 909-910 - blijkt dat de werkelijke scheiding tussen beide riviergedeeltes 10 meter ten zuiden van de rivieras ligt. In het midden van de rivier komen beide duinsoorten voor, waarbij de kleine duinen zijn gesuperponeerd op de grote. Daarnaast bevinden zich aan de randen van de Waal de "vlammen" rond de kribvakken. Dit zijn in feite zeer grote beddingvormen, met lengtes tussen 175 en 225 meter, maar deze worden hier verder niet beschouwd. De verschillende beddingvormen zijn duidelijk waarneembaar in figuur 5-3.



figuur 5-3: Hoogtemodel van de Waal waarin de positie en de vorm van de drie profielen (uit DT2D) wordt getoond. [Wilbers, aug 1998]

Wilbers vindt bij lage afvoeren ($Q_{\text{Waal}} = 500 \text{ à } 3000 \text{ m}^3/\text{s}$) geen grote veranderingen voor de karakteristieken van de grote duinen; voor kleine duinen is het niet mogelijk de karakteristieken te bepalen. Zowel over de metingen in de eerste week na het hoogwater van 1993 - meetlocaties Slijk-Ewijk en Druten: kmr. 890-894 en 902-905 - als over de metingen tijdens het hoogwater van 1995 - meetlocatie Druten: kmr 902-906 - zijn de duinkarakteristieken voor de grote en de kleine duinen eveneens vrijwel constant. Voor het hoogwater van 1997 wordt bij toenemende afvoer een groei van de duinhoogte van beide typen duinen waargenomen. Deze groei zet door tot 2 dagen na de afvoerpiek, waarna de duinhoogte afneemt met de afvoer. De duinlengten van grote en kleine duinen vertonen een tegengesteld beeld: gedurende het gehele hoogwater - bij stijgende en dalende afvoer - neemt de lengte van kleine duinen toe, terwijl voor grote duinen een afname van de duinlengte wordt waargenomen. De afname van de duinlengte van grote duinen bij toenemende afvoer wordt veroorzaakt doordat de grotere duinen onstabiel worden en splitsen in meerdere kleinere duinen. Tijdens het hoogwater van 1998 worden gemiddeld nauwelijks veranderingen in de dimensies van de duinen in de tijd waargenomen, terwijl individuele duinen wel zeer veranderlijk van vorm zijn. In tabel 5-2 zijn de resultaten van Wilbers samengevat.

| | | 1e week na HW 1993 | tijdens HW 1995 | tijdens HW 1997 | tijdens HW 1998 |
|---|--------------------------------|-----------------------|------------------------|--|---------------------|
| max. Waalafvoer (m^3/s) | | 6900 | 7000 | 4650 | 6142 |
| datum afvoerpiek | | 26 dec | 2 feb | 3 mrt | 4 nov |
| grote duinen | reactie op stijgende afvoer | vrijwel geen | vrijwel geen | hoogte \uparrow , lengte \downarrow | |
| | gem. hoogte (m) | 1,0 | 1,2 | 1,0 | 1,2 |
| | gem. lengte (m) | 55 | 55 | 36 | 37,6 |
| | migratiesnelheid (m/dag) | 7,1-10,3 gem.: 8,7 | 9,5-10,9 gem.: 10,1 | 8,5 - 10 | gem.: 8,9 |
| kleine duinen | reactie op stijgende afvoer | vrijwel geen | vrijwel geen | hoogte \uparrow , lengte \uparrow | wisselt per duin |
| | gem. hoogte (m) | 0,4 | 0,55 | 0,35 | 0,47 |
| | gem. lengte (m) | 15 | 15 | 9 | 9 |
| | migratiesnelheid (m/dag) | | | > 9 | 162 |

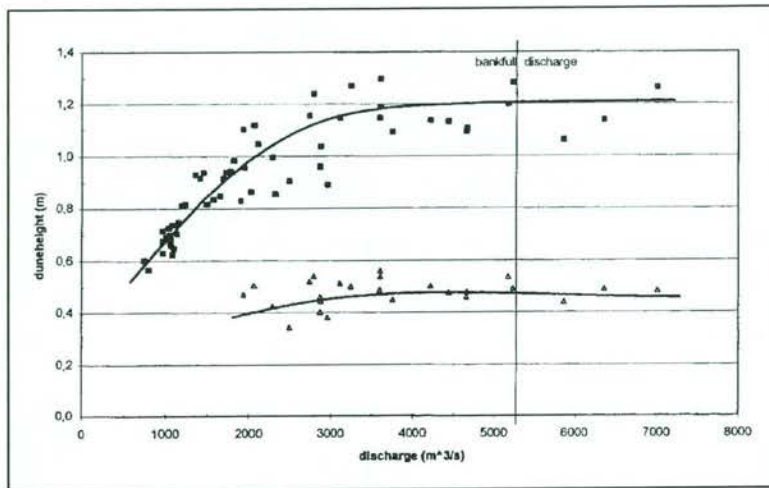
tabel 5-2: Resultaten analyse hoogwaters 1993, 1995, 1997 [Wilbers, aug 1998]

Wilbers en Ten Brinke (1999)

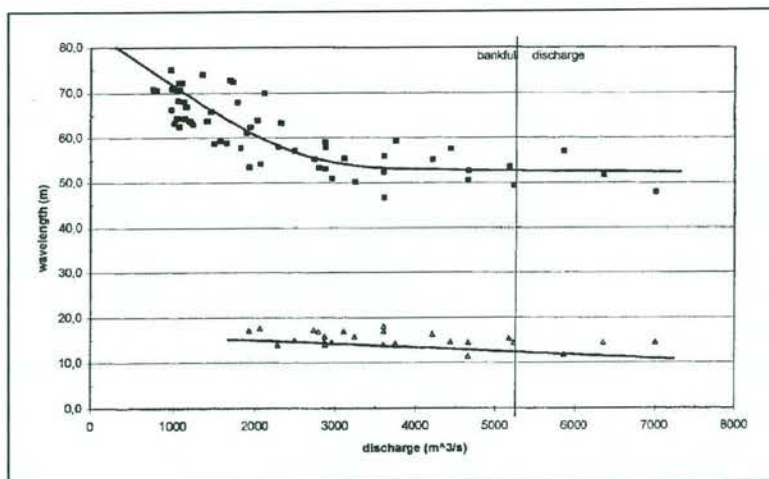
Wilbers en Ten Brinke hebben de ontwikkeling van beddingvormen voor zowel de hoogwaters van 1993, 1995 en 1997 als de periode van januari 1989 tot en met maart 1990 onderzocht. Het studiegebied strekt zich uit van Slijk-Ewijk tot aan Beneden-Leeuwen, dus over het gehele traject van de Midden-Waal waarbinnen de trajecten van de Proef Morfologie gesitueerd zijn. Wilbers en Ten Brinke onderscheiden eveneens structurele verschillen tussen de beddingvormen Noord en Zuid van de rivieras: kleine duinen treden op aan de zuidzijde van de rivier en grote duinen aan de noordzijde, waarbij het gedrag onder variërende afvoer sterk verschilt. De onderzoeksmethode (DT2D) is echter niet in staat om kleine duinen gesuperponeerd op grote duinen te onderscheiden: het programma maakt een overschatting van de duinhoogte van de grote duinen.

Wilbers en Ten Brinke berekenen voor de zuidzijde van de rivier zeer grote symmetrische beddingvormen met een lengte van 150 tot 160 meter en een hoogte van 1,5 meter, wat te groot is voor duinen. Hierover planten zich relatief kleine duinen voort, met een lengte van 60 tot 70 meter en een hoogte van 0,6 tot 1,2 meter. Bij lage afvoeren zijn de grote duinen op de Waal lang, laag en niet erg steil. Bij stijgende afvoer tot $Q_{\text{Waal}} \approx 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ worden de grote duinen korter, hoger en steiler; hierna zijn de karakteristieken vrijwel constant. De karakteristieken van de kleine duinen kunnen niet berekend worden voor lage afvoeren en lijken bij afvoeren boven $Q_{\text{Waal}} \approx 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ vrijwel niet met de afvoeren te veranderen. Het naijlingseffect voor de afmetingen van de duinen is volgens Wilbers en Ten Brinke te verwaarlozen.

De resultaten van Wilbers en Ten Brinke (1999), voor wat betreft de afmetingen van duinen op de Waal, zijn weergegeven in figuur 5-4.



figuur 5-4: Correlatie tussen de duinhoogte van beddingvormen op de Waal en de afvoer, onderverdeeld in grote en kleine duinen [Wilbers, aug 1998, en Wilbers en Ten Brinke, 1999].



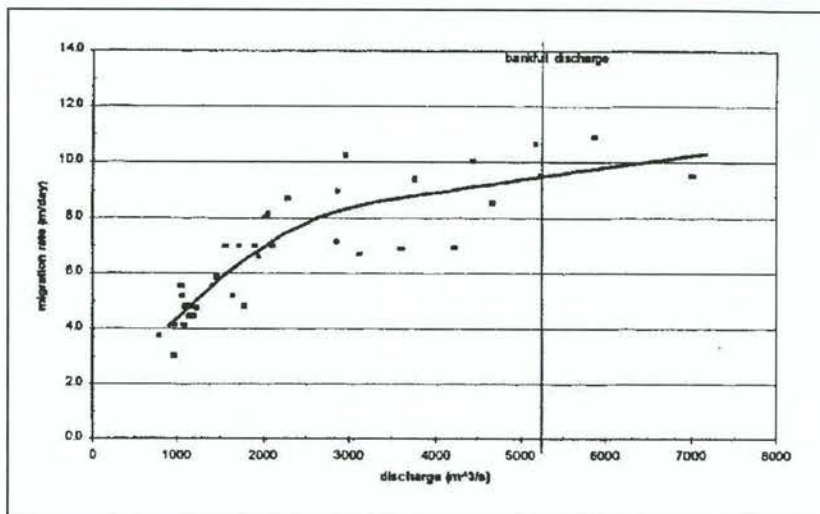
figuur 5-5: Correlatie tussen de golflengte van beddingvormen op de Waal en de afvoer, onderverdeeld in grote en kleine duinen [Wilbers, aug 1998, en Wilbers en Ten Brinke, 1999]

5.2.2 Voortplantingssnelheid van duinen

Duinen zijn relatief kleine verstoringen die zich vrijwel over de gehele breedte van de rivier uitstrekken. Voor de berekening van de voortplantingssnelheid van dergelijke verstoringen wordt in de literatuur de 1-D voortplantingssnelheid (vergelijking (22)) gebruikt.

Berekening van de voortplantingssnelheid van duinen direct uit bodempeilingen is alleen mogelijk als de duinen zich tussen twee opeenvolgende bodempeilingen niet verder hebben voortgeplant dan één maal de gemiddelde duinlengte. Uit ervaring blijkt dat bij een grotere voortplantingsafstand de karakteristieken van een individuele duin zodanig veranderd zijn, dat deze niet meer met zekerheid terug te vinden is. Voor duinen die zich relatief langzaam

voortplanten zijn dagelijkse metingen voldoende; voor kleinere duinen, die zich sneller voortplanten en een kleinere lengte hebben, is het maximale tijdsinterval tussen twee opeenvolgende metingen in sommige gevallen slechts 2 à 3 uur. De voortplantingssnelheid van de grote duinen op de Waal, dus de duinen aan de noordzijde van de rivier, neemt toe met toenemende afvoer. Deze toename is het grootste bij lage afvoeren [Wilbers en Ten Brinke, 1999]. In figuur 5-6 wordt de door Wilbers en Ten Brinke (1999) gevonden correlatie tussen de voortplantingssnelheid van grote duinen en de afvoer op de Waal weergegeven, inclusief de door hun gevonden best passende trendlijn.



figuur 5-6: Voortplantingssnelheid van grote duinen op de Waal versus afvoer [Wilbers en Ten Brinke, 1999]

Via indirecte methoden wordt in Wilbers (1999) wel een voorspelling gedaan over de migratiesnelheden van kleine duinen:

1. Uit de metingen van de hoogwaters van 1997 en 1998 is een verband berekend tussen de duinlengte en de migratiesnelheid:

$$c_{\text{duin}} = 1133,6988\lambda^{-1,2309084} \quad (30)$$

c_{duin} - migratiesnelheid van duinen [m/dag]

λ - duinlengte [m]

2. Uit de overlap tussen verschillende multi-beam raaien (in totaal 15 duinen), die op één dag gevaren zijn (1 november 1998) is een voortplantingssnelheid van 162 m/dag bepaald.

Uit de ervaring die momenteel wordt opgedaan bij het uitvoeren van baggerwerkzaamheden op de Waal volgt een schatting van de voortplantingssnelheid voor de grote duinen van gemiddeld 6 m/dag [van Riel, persoonlijke communicatie].

5.3 Verstoringen ten gevolge van een hoogwater

Bij hoogwater stroomt op diverse locaties langs de Waal een deel van het water de uiterwaarden in, waarna het pas verder benedenstrooms weer terug in het zomerbed komt. Op plaatsen waar het water uit het zomerbed treedt en waar het water terug stroomt, vormt zich een erosiekuil; benedenstrooms van het uitstromingspunt vormt zich een aanzanding.

5.3.1 Uitdemping van hoogwaterverstoringen

De afmetingen van de verstoringen ten gevolge van een hoogwater zijn afhankelijk van de grootte en de duur van het hoogwater. Na afloop van een hoogwater dempt de verstoring uit. De tijdschaal die hierbij hoort is de tijdschaal voor 2-D processen uit vergelijking (25).

5.3.2 Voortplantingssnelheid van hoogwaterverstoringen

De verstoringen van een hoogwater ontwikkelen zich meestal niet over de gehele breedte van de rivier. Voor dergelijke eenzijdige verstoringen is tijdens proeven [Struiksma, persoonlijke communicatie] gebleken dat naast de 2-D voortplantingsverschijnselen in benedenstroomse richting, zich ook een 1-D verstoring ontwikkelt, die zich in bovenstroomse richting voortplant, met een veel grotere snelheid. De formules voor deze 1- en 2-D voortplantingssnelheden zijn respectievelijk de formules (22) en (28).

6 Analyse van de “free” geometrie van de Midden-Waal met ArcView

In dit hoofdstuk wordt besproken hoe de analyse van de vrije verschijnselen in de Midden-Waal in ArcView is aangepakt. Hierbij wordt onderscheid gemaakt naar beddingvormen en naar verstoringen ten gevolge van hoogwaters. Zoals in paragraaf 5.1 reeds is vermeld worden in de bodempeilingen geen alternerende banken waargenomen.

In paragraaf 6.1 wordt eerst aangegeven hoe de gegevens in ArcView bewerkt zijn om de vrije verschijnselen te kunnen bestuderen. In paragraaf 6.2 worden de uitkomsten van de analyses besproken.

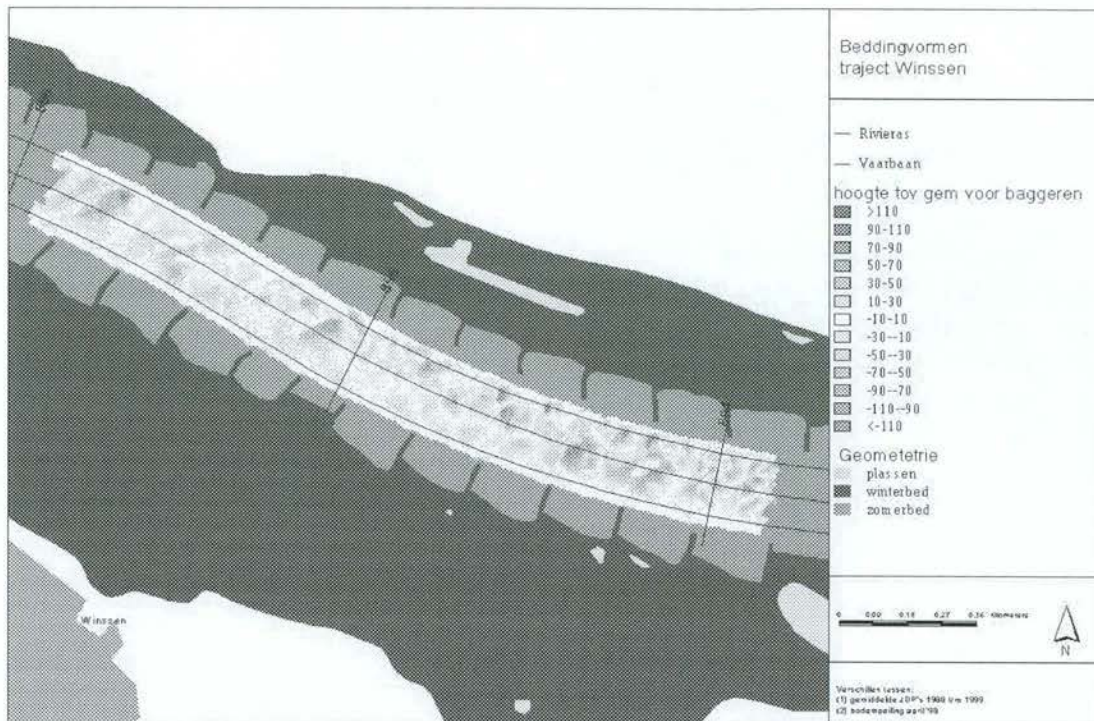
6.1 Uitwijkingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging

Vrije verschijnselen zijn de verstoringen die zich over de “forced” geometrie voortplanten. Van de “forced” geometrie is aangenomen dat deze bij benadering constant is in de tijd. De vrije verschijnselen zijn dan gelijk aan de verschillen - de uitwijkingen - van een bepaalde bodempeiling ten opzichte van het gemiddelde.

De vrije verschijnselen zijn onder te verdelen in beddingvormen en verstoringen ten gevolge van een hoogwater. In dit rapport worden de natuurlijke morfologische processen in de Midden-Waal zonder baggerinvloeden beschouwd, dus in de analyse van de beddingvormen worden enkel de bodempeilingen voor aanvang van de eerste baggerwerkzaamheden meegenomen. Gedurende deze periode van de bodempeilingen tot aan het eerste baggerseizoen is echter geen hoogwater opgetreden. De analyse van de verstoringen ten gevolge van een hoogwater kan dus niet op basis van dezelfde set bodempeilingen worden uitgevoerd. Dit verschil is van belang voor het te gebruiken “referentievlak”, dat wordt gevormd door de tijdsgemiddelde bodemligging.

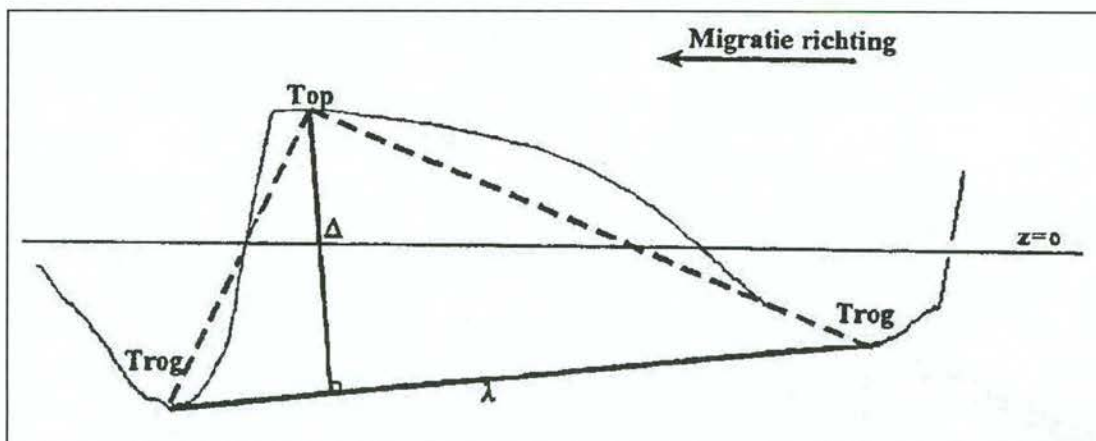
6.1.1 Identificatie van beddingvormen

De analyse van de beddingvormen is uitgevoerd over alle bodempeilingen voor aanvang van de eerste baggerwerkzaamheden. Dit zijn dus de bodempeilingen uit tabel 4-2. Van elke afzonderlijke peiling is vervolgens de tijdsgemiddelde bodemligging afgetrokken. Het resultaat bestaat theoretisch gezien uit alle verstoringen die zich over dit gemiddelde voortplanten, dus alle vrije verschijnselen en niet alleen beddingvormen. Het verder scheiden van de vrije verschijnselen om zo alleen beddingvormen over te houden is echter niet mogelijk. In de praktijk bevat het resultaat daarnaast ook de “fouten” in het gebruikte gemiddelde. Een voorbeeld van de berekende verschillen tussen een bodempeiling en het gemiddelde wordt gegeven in figuur 6-1.



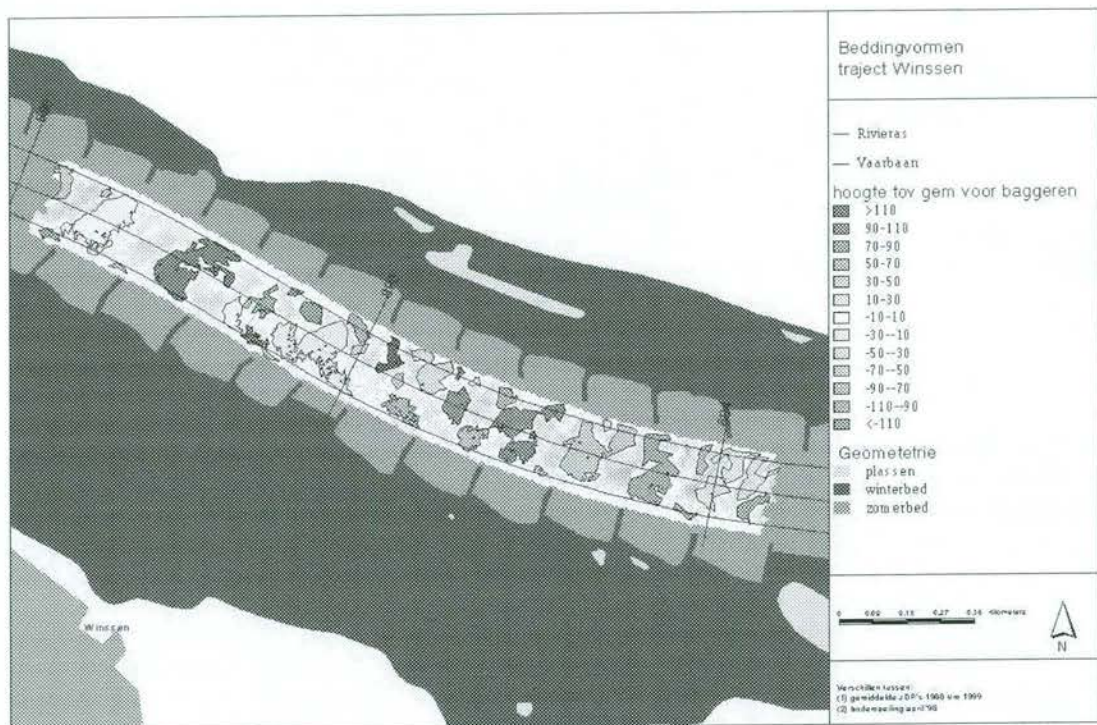
figuur 6-1: Voorbeeld van berekende uitwijkingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging in ArcView

In de onderzoeken van Wilbers (zie paragraaf 5.2) worden duinen gedefinieerd als “vormen die bestaan uit twee troggen en een top”. Deze definitie wordt grafisch weergegeven in figuur 6-2. De duinlengte is gelijk aan de afstand tussen de twee troggen; de hoogte is gelijk aan de lengte van de loodlijn tussen de top en de lijn die de trogpunten met elkaar verbindt. In ArcView is een dergelijke definitie echter niet bruikbaar, aangezien ArcView enkel gridcellen en geen vormen kan identificeren.



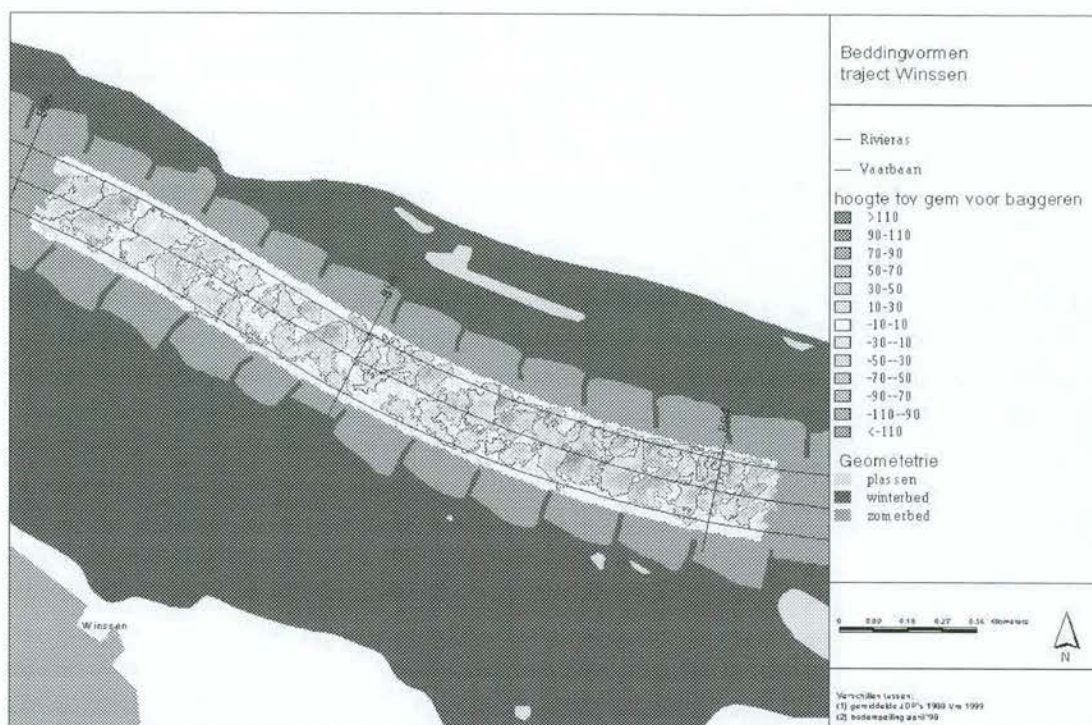
figuur 6-2: Definitie van een duin

In ArcView zijn uit de berekende uitwijkingen ten opzichte van het gemiddelde (zoals figuur 6-1) beddingvormen geïdentificeerd door alle gridcellen onder of boven een bepaald vlak te zoeken. Uitwijkingen ten opzichte van het gemiddelde van minder dan 0,10 meter zijn verwaarloosbaar, omdat dit binnen de nauwkeurigheidsmarge van een multi-beam bodempeiling valt. Grotere uitwijkingen worden getypeerd als bult indien de bodempeiling een ondiepere waarde heeft dan het gemiddelde; als kuil indien de bodempeiling een diepere waarde heeft. Bij de analyse van beddingvormen wordt bovendien geconcentreerd op grotere verstoringen, zodat ze duidelijk aan hun vorm herkenbaar zijn, terwijl kleine duinen nog wel in de analyse meegenomen worden: een bult of kuil is minimaal 10 gridcellen groot (oppervlakte $A = 250 \text{ m}^2$). Deze analyse resulteert in een figuur zoals figuur 6-3, waarin elke bult een eigen kleur heeft.



figuur 6-3: Identificatie van bulten in ArcView

Een tweede bewerking die is uitgevoerd op het bestand van de uitwijkingen ten opzichte van het gemiddelde, is het creëren van contourlijnen rond bulten en kuilen, zodat de resultaten van meerdere maanden over elkaar heen kunnen worden getoond. Een voorbeeld van de berekende contourlijnen wordt gegeven in figuur 6-4. Ook hierbij wordt geconcentreerd op grotere beddingvormen, zodat niet te veel beddingvormen over elkaar heen worden afgebeeld en de vormen herkenbaar blijven: de contourlijnen hebben een minimale lengte (=omtrek van de bult of kuil) van 200 meter.

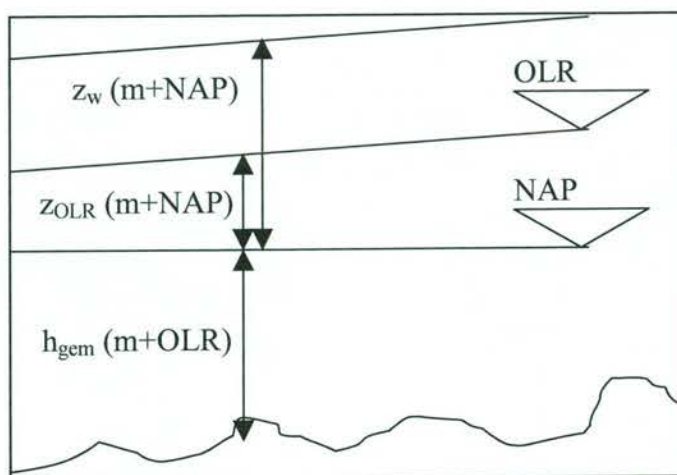


figuur 6-4: Contourlijnen rond bulten en kuilen

Bepaling van de gemiddelde waterdiepte

Het gedrag van vrije verschijnselen is volgens de literatuur afhankelijk van de waterdiepte (zie paragraaf 5.2). Voor de analyse van beddingvormen wordt de waterdiepte bepaald met behulp van de tijdsgemiddelde bodemligging en de afvoer. De tijdsgemiddelde bodemligging die hierbij gebruikt wordt is het gemiddelde voor baggeren (mb98), aangezien dit kleinere gemiddelde afwijkingen tussen de individuele bodempeiling en de tijdsgemiddelde bodemligging oplevert, waarvoor in de analyse gecorrigeerd moet worden. De tijdsgemiddelde bodemligging is uitgedrukt in de gemiddelde waterdiepte ten opzichte van OLR⁹. De hoogte van beddingvormen varieert echter met de werkelijke waterdiepte. Om de waterdiepte ten opzichte van OLR om te zetten in de werkelijke waterdiepte dienen zowel de ligging van het OLR-vlak als de afvoer op de dag van de bodempeiling bekend te zijn. In figuur 6-5 wordt dit schematisch weergegeven.

⁹ Alle bodempeilingen, dus ook de bepaling van de waterdiepte, worden gegeven ten opzichte van het zogenaamde OLR van 1998, dat echter een onofficieel OLR-vlak is.



figuur 6-5: Bepaling van de waterdiepte uit de diepte ten opzichte van OLR

De afvoer op de dag van een bodempeiling is bekend. Hieruit kan via de tabellen 1996.0 de waterstand in meters ten opzichte van NAP op de peilschalen te Nijmegen, Tiel en St. Andries worden bepaald, voor het bijbehorende stuwregime¹⁰. Deze waterstand kan vervolgens worden geïnterpoleerd naar een waterstand voor het midden van het desbetreffende traject. De hoogte van het OLR-vlak ten opzichte van NAP wordt eveneens bepaald voor het midden van het traject. De gemiddelde waterdiepte in meters ten opzichte van OLR wordt per traject berekend uit de bodempeiling voor de desbetreffende maand. Hiervoor wordt het gemiddelde binnen de 170 meter vaargeul genomen, zodat de invloed van de kribkoppen en -vakken niet in wordt meegenomen. De werkelijke waterdieptes worden nu berekend volgens:

$$h = h_{gem,OLR} + w.s._{NAP} - h_{OLR,NAP} \quad (31)$$

| | | |
|----------------|--|-----|
| h | - waterdiepte | [m] |
| $h_{gem, OLR}$ | - diepte ten opzichte van OLR uit bodempeiling | [m] |
| $z_{w,NAP}$ | - waterstand ten opzichte van NAP uit tabel 1996.0 | [m] |
| $z_{OLR,NAP}$ | - ligging van het OLR-vlak ten opzichte van NAP | [m] |

¹⁰ De tabellen 1996.0 zijn te vinden in bijlage I

De uitkomsten zijn weergegeven in tabel 6-1.

| traject PM | bodempeiling | afvoer (m ³ /s) | waterdiepte (m+NAP) | waterdiepte (m+OLR) | OLR (m+NAP) | waterdiepte (m) |
|---------------|--------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------------|--------------------|
| Ew | 17 mrt | 2245 | 7,0 | 3,55 | 4,860 | 5,7 |
| | 21 apr | 2599 | 7,5 | 3,83 | | 6,5 |
| | 18 mei | 1513 | 6,1 | 3,65 | | 4,9 |
| | 19 juni | 2012 | 6,7 | 3,68 | | 5,5 |
| Wi | 18 mrt | 2181 | 6,5 | 3,51 | 4,490 | 5,5 |
| | 22 apr | 2605 | 7,1 | 3,67 | | 6,3 |
| | 19 mei | 1511 | 5,7 | 3,51 | | 4,7 |
| | 17 juni | 2047 | 6,3 | 3,54 | | 5,4 |
| DD | 19 mrt | 2142 | 5,7 | 3,53 | 3,885 | 5,3 |
| | 23 apr | 2586 | 6,4 | 3,55 | | 6,1 |
| | 16 juni | 1916 | 5,4 | 3,50 | | 5,0 |
| | 17 juli | 1648 | 5,1 | 3,55 | | 4,8 |
| BL | 21 mrt | 2130 | 4,8 | 3,48 | 2,995 | 5,3 |
| | 24 apr | 2486 | 5,3 | 3,54 | | 5,8 |
| | 25 mei | 1422 | 3,9 | 3,55 | | 4,5 |
| | 15 juni | 1811 | 4,4 | 3,53 | | 4,9 |

tabel 6-1: Berekening van de werkelijke gemiddelde waterdiepte per bodempeiling

6.1.2 Identificatie van verstoringen van een hoogwater

De verstoringen die ontstaan tijdens een hoogwater kunnen worden geanalyseerd op basis van alle peilingen direct voor en na een hoogwater. De duidelijkste locatie waar effecten van een hoogwater waarneembaar zijn is op traject Druten: rond kmr. 901,6 ontstaat een aanzanding; rond kmr. 901,3 en 903,2 een erosiekuil. Het probleem voor de analyse binnen ArcView is dat de verstoringen zich na een hoogwater beginnen voort te planten, waarbij ze bovendien vervormen. Het is hierdoor lastig om de verstoringen te lokaliseren en te volgen. Er is nog geen standaardprocedure gevonden om dit binnen ArcView te bereiken. Daarnaast wordt het na verloop van tijd steeds moeilijker om de verstoringen van een hoogwater te onderscheiden van beddingvormen, doordat de afmetingen van de verstoringen steeds minder verschillen.

Bij de analyse wordt gekeken naar de uitwijkingen ten opzichte van het gemiddelde dat bepaald is uit de JDP's. Naar het gedrag van de erosiekuilen en aanzanding in de periode na een hoogwater is echter nog geen uitgebreid onderzoek verricht.

6.2 Resultaten van de analyse van de “free” geometrie

In deze paragraaf worden de resultaten van de analyse in ArcView van de vrije verschijnselen gepresenteerd. Te weinig onderzoek is verricht naar de verstoringen ten gevolge van een hoogwater om hier resultaten te kunnen bespreken. Daarnaast is het niet mogelijk gebleken de lengte van beddingvormen in ArcView te bepalen, dus wat betreft de afmetingen van de beddingvormen worden alleen resultaten voor de hoogte besproken.

6.2.1 Hoogte van beddingvormen

Zoals in paragraaf 6.1.1 reeds is aangegeven zijn analyses uitgevoerd over de geïdentificeerde bulten en kuilen, in plaats van rechtstreeks voor duinen. Afhankelijk van de manier waarop de hoogtes bepaald zijn geeft het maximum van een bult minus het minimum van een kuil een goede indicatie voor de duinhoogte.

Verschil in hoogte van de beddingvormen tussen Noord en Zuid

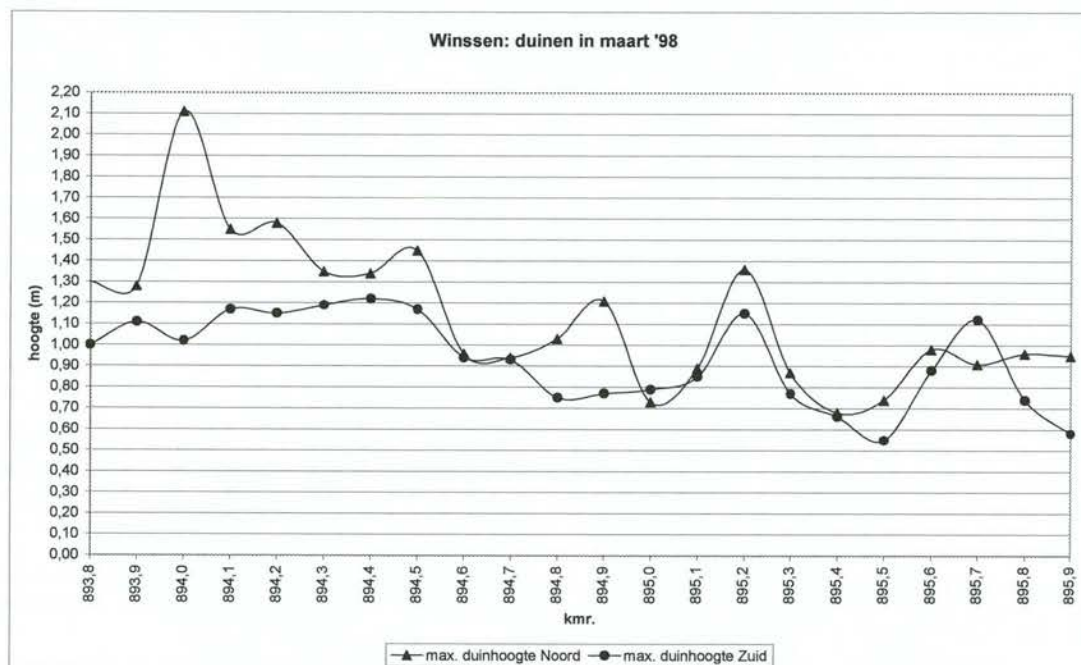
In eerste instantie is grofweg per peiling gekeken of er een verschil bestaat tussen de noordzijde en de zuidzijde van de rivier. In tabel 6-2 worden de verschillen tussen Noord en Zuid voor alle trajecten samen weergegeven.

| maand | | waarde Noord (m) | waarde Zuid (m) |
|-----------|--------------------|---------------------|--------------------|
| maart '98 | gemiddelde | 0,0297 | 0,0344 |
| | minimum | -1,09 | -0,84 |
| | maximum | 1,25 | 0,91 |
| | standaardafwijking | 0,244 | 0,200 |
| april '98 | gemiddelde | -0,0768 | -0,0629 |
| | minimum | -1,13 | -1,02 |
| | maximum | 1,14 | 0,98 |
| | standaardafwijking | 0,321 | 0,239 |
| mei '98 | gemiddelde | -0,133 | -0,124 |
| | minimum | -1,61 | -1,35 |
| | maximum | 1,34 | 1,03 |
| | standaardafwijking | 0,396 | 0,316 |
| juni '98 | gemiddelde | 0,00721 | 0,00330 |
| | minimum | -1,56 | -1,30 |
| | maximum | 1,20 | 1,18 |
| | standaardafwijking | 0,307 | 0,256 |

tabel 6-2: Verschillen tussen Noord en Zuid

Uit deze tabel blijkt dat het maximum aan de noordzijde van de rivieras in alle gevallen groter en het minimum in alle gevallen kleiner is dan aan de zuidzijde van de rivieras. Ook de standaardafwijking Noord is voor alle maanden groter dan voor Zuid, wat betekent dat de variatie rond het gemiddelde aan de noordzijde groter is dan aan de zuidzijde. Het gemiddelde Noord en Zuid is steeds ongeveer gelijk (maximale verschil 0,014 meter). De hier geconstateerde verschillen komen overeen met de onderzoeken uit paragraaf 5.2.1.

Vervolgens zijn de verschillen in maximale uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging tussen Noord en Zuid per traject nader beschouwd. Hiertoe zijn de uitwijkingen ten opzichte van het gemiddelde per strook van 100 meter lengte en per zijde van de rivieras beschouwd. Voor elk gebiedje dat zo gecreëerd wordt kunnen wederom door ArcView per maand statistische gegevens worden berekend, zoals de minimum, maximum en gemiddelde hoogte en de standaardafwijking. Voor de grote duinen is de lengte volgens de onderzoeken uit paragraaf 5.2.1 groter bij lagere afvoeren. Uit figuur 5-5 blijkt dat de lengte van de grote duinen bij afvoeren onder de $Q_{\text{Waal}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ variëren van 50 tot 80 meter. Per strook van 100 meter worden dus in het ongunstigste geval twee duinen gevonden. Het verschil tussen het minimum en het maximum per gebiedje zal daarom een goede schatting geven van de duinhoogte van de grote duinen. Voor de kleine duinen, die een gemiddelde lengte hebben van 15 meter, zal de benadering slechter zijn. Voor de berekende waarden Zuid van de rivieras worden waarschijnlijk delen gevonden van de zeer grote beddingvormen, die Wilbers en Ten Brinke (1999) reeds aantoonde. In figuur 6-6 wordt een voorbeeld gegeven voor traject Winssen. De volledige resultaten staan in bijlage G.



figuur 6-6: Duinhoogte voor traject Winssen, bepaald uit 100 meter stroken Noord en Zuid van de rivieras

Uit de figuur blijkt dat maximaal een uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging van 2,11 meter wordt gevonden. Uit figuur 5-4 blijkt echter dat voor de duinhoogte van grote duinen op de Midden-Waal door Wilbers (aug 1998) een maximum

hoogte van 1,4 meter is gevonden. Dit verschil kan voor een deel worden verklaard doordat de duinhoogte door Wilbers niet wordt bepaald als het absolute verschil tussen de trog en de top (zie figuur 6-2). In tabel 6-3 (Noord) en tabel 6-4 (Zuid) worden de resultaten van de berekening van de duinhoogte per traject en per maand samengevat.

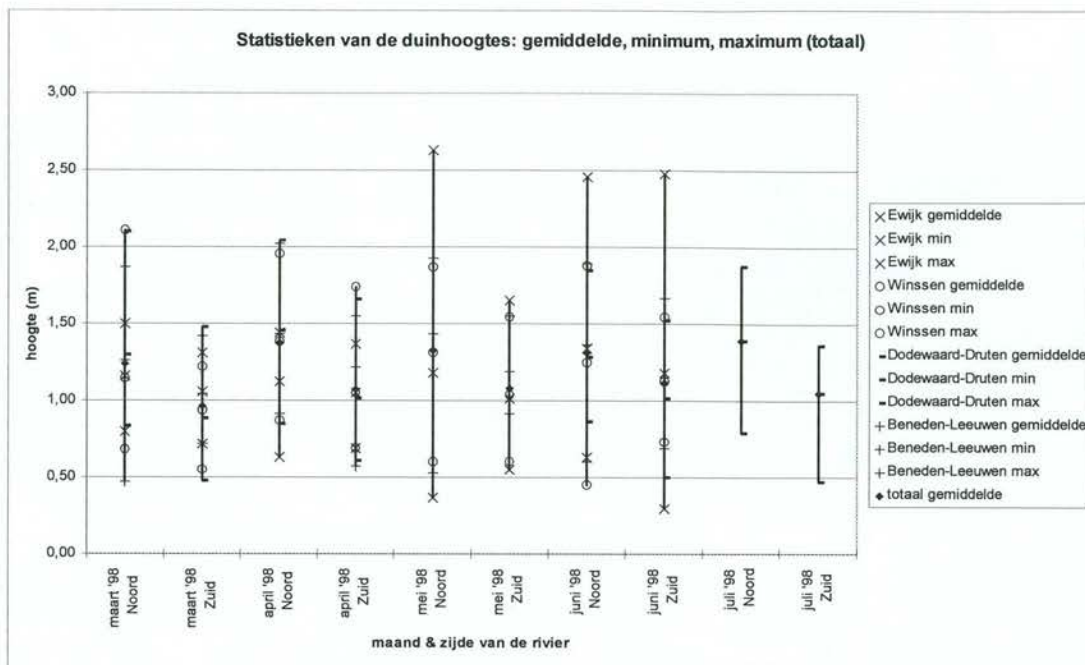
| | | maart '98 | april '98 | mei '98 | juni '98 | juli '98 |
|---|----------------|-----------|-----------|---------|----------|----------|
| gemiddelde Waalafvoer (m ³ /s) | | 2175 | 2569 | 1482 | 1947 | 1648 |
| Ewijk | gemiddelde (m) | 1,16 | 1,13 | 1,18 | 1,34 | |
| | minimum (m) | 0,80 | 0,63 | 0,37 | 0,63 | |
| | maximum (m) | 1,50 | 1,44 | 2,63 | 2,46 | |
| Winssen | gemiddelde (m) | 1,14 | 1,38 | 1,31 | 1,25 | |
| | minimum (m) | 0,68 | 0,87 | 0,60 | 0,45 | |
| | maximum (m) | 2,11 | 1,96 | 1,87 | 1,88 | |
| Dodewaard-Druten | gemiddelde (m) | 1,30 | 1,46 | | 1,28 | 1,39 |
| | minimum (m) | 0,83 | 0,85 | | 0,86 | 0,79 |
| | maximum (m) | 2,10 | 2,04 | | 1,85 | 1,88 |
| Beneden-Leeuwen | gemiddelde (m) | 1,26 | 1,44 | 1,44 | 1,36 | |
| | minimum (m) | 0,47 | 0,91 | 0,53 | 0,60 | |
| | maximum (m) | 1,87 | 2,02 | 1,93 | 1,89 | |
| totaal | gemiddelde (m) | 1,24 | 1,37 | 1,33 | 1,31 | 1,39 |
| | minimum (m) | 0,68 | 0,63 | 0,60 | 0,45 | 0,79 |
| | maximum (m) | 2,11 | 2,04 | 2,63 | 2,46 | 1,88 |

tabel 6-3: In ArcView berekende duinhoogtes Noord van de rivieras

| | | maart '98 | april '98 | mei '98 | juni '98 | juli '98 |
|---|----------------|-----------|-----------|---------|----------|----------|
| gemiddelde Waalafvoer (m ³ /s) | | 2175 | 2569 | 1482 | 1947 | 1648 |
| Ewijk | gemiddelde (m) | 1,05 | 1,05 | 1,01 | 1,18 | |
| | minimum (m) | 0,72 | 0,69 | 0,55 | 0,30 | |
| | maximum (m) | 1,31 | 1,37 | 1,65 | 2,48 | |
| Winssen | gemiddelde (m) | 0,93 | 1,05 | 1,04 | 1,12 | |
| | minimum (m) | 0,55 | 0,69 | 0,60 | 0,73 | |
| | maximum (m) | 1,22 | 1,74 | 1,54 | 1,54 | |
| Dodewaard-Druten | gemiddelde (m) | 0,88 | 1,02 | | 1,01 | 1,05 |
| | minimum (m) | 0,48 | 0,61 | | 0,50 | 0,47 |
| | maximum (m) | 1,48 | 1,66 | | 1,52 | 1,36 |
| Beneden-Leeuwen | gemiddelde (m) | 1,04 | 1,22 | 1,19 | 1,15 | |
| | minimum (m) | 0,72 | 0,57 | 0,91 | 0,69 | |
| | maximum (m) | 1,42 | 1,55 | 1,55 | 1,67 | |
| totaal | gemiddelde (m) | 0,96 | 1,07 | 1,08 | 1,11 | 1,05 |
| | minimum (m) | 0,48 | 0,61 | 0,60 | 0,50 | 0,47 |
| | maximum (m) | 1,48 | 1,74 | 1,65 | 2,48 | 1,36 |

tabel 6-4: In ArcView berekende duinhoogtes Zuid van de rivieras

Een grafische weergave van deze resultaten wordt gegeven in figuur 6-7.

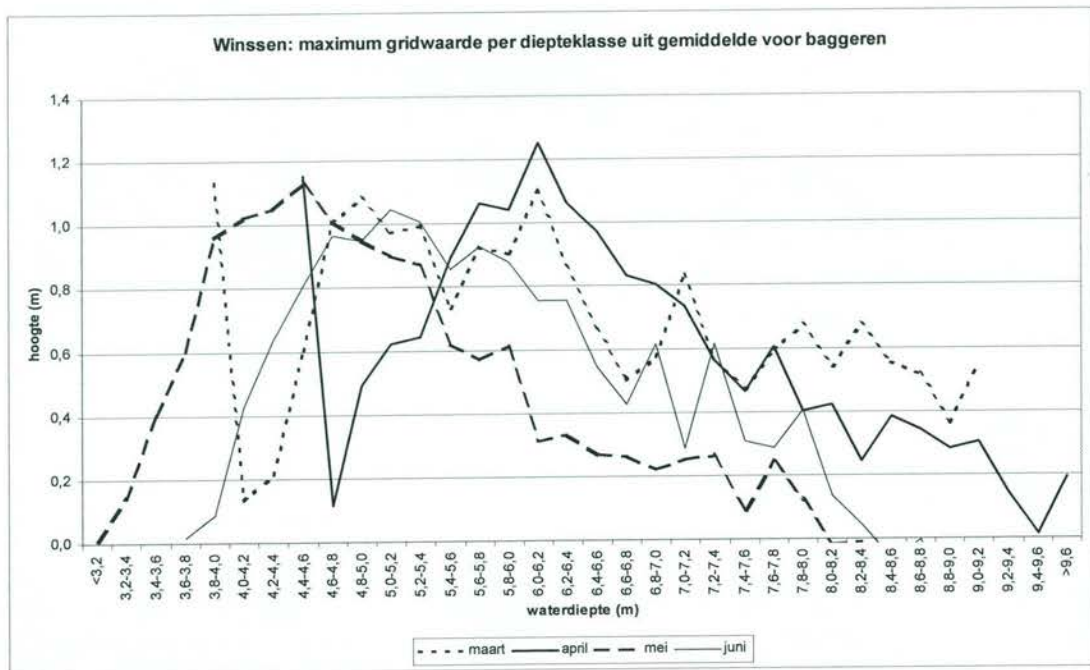


figuur 6-7: In ArcView berekende duinhoogtes

De maximale duinhoogtes die door Lai (figuur 5-2) en Wilbers (figuur 5-4) worden gevonden voor afvoeren tussen de 1500 en 2500 m³/s zijn aanzienlijk lager: voor grote duinen respectievelijk 0,62 - 0,74 meter en 0,80 - 1,20 meter; voor kleine duinen respectievelijk 0,40 - 0,48 meter en minder dan 0,52 meter. De berekende gemiddelde waarde voor de duinhoogte ligt hier in de meeste gevallen al boven.

Hoogte van beddingvormen bij verschillende waterdiepte

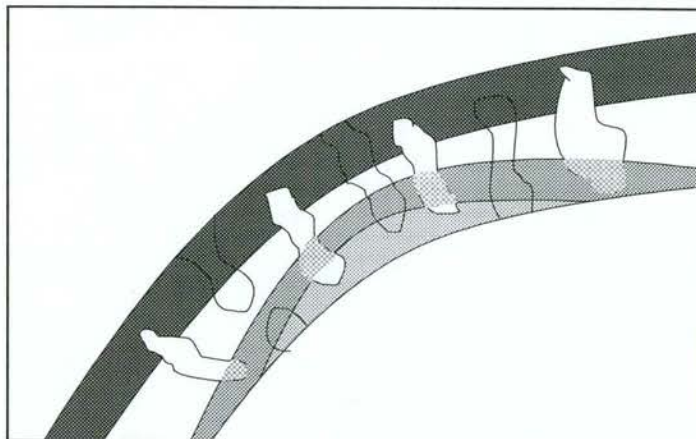
De relatie tussen de duinhoogte en de waterdiepte kan alleen direct worden onderzocht door de duinhoogte tegen de waterdiepte uit te zetten. Dit is echter niet eenvoudig te realiseren in ArcView. Per diepteklasse van de gemiddelde waterdiepte kunnen de statistische gegevens van de uitwijking ten opzichte van het gemiddelde worden berekend. De duinhoogte kan hier echter niet uit worden bepaald, omdat de plaats waar het minimum en maximum gemeten worden zeer ver uit elkaar kunnen liggen (afhankelijk van het traject tot maximaal 2 of 4 kilometer). Bovendien wordt een grote overschatting gemaakt als uitgegaan wordt van de maxima over een dergelijk groot gebied. Als de duinhoogte toeneemt met de waterdiepte, moeten echter ook de maxima en minima deze afhankelijkheid vertonen. Zowel de grootste negatieve waarde (kuil) als de grootste positieve waarde (bult) die per diepteklasse van de gemiddelde waterdiepte voor aan vang van de baggerwerkzaamheden wordt gevonden zijn in grafieken per traject uitgezet. Voor traject Winssen wordt in figuur 6-8 een voorbeeld gegeven van de berekende maximale uitwijkingen per diepteklasse. De overige figuren staan in bijlage G.



figuur 6-8: Maximale hoogte van bulten per klasse van de gemiddelde waterdiepte in maart tot en met juni '98 op traject Winssen

Uit deze figuren kan worden geconcludeerd dat de duinhoogte zal toenemen met de waterdiepte tot een bepaalde grenswaarde van de waterdiepte. Welke waarde hiervoor moet worden aangehouden is niet duidelijk. Dit omslagpunt lijkt rond een waterdiepte van 5 à 6 meter te liggen. Hierna neemt de duinhoogte af met toenemende waterdiepte.

Voor een verdere analyse van het verschil tussen een individuele peiling en de tijdsgemiddelde bodemligging, op zoek naar een relatie tussen de uitwijkingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging en de waterdiepte, is per traject het totale oppervlak aan gridcellen met een bepaalde hoogte ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging berekend, verdeeld over stroken met een bepaalde diepte ten opzichte van OLR in dit gemiddelde. Voorgaande wordt schematisch geïllustreerd in figuur 6-9. De stroken van gelijke waterdiepte uit het gemiddelde zijn met verschillende grijsinten aangegeven, de duinen en kuilen als witte en doorzichtige vormen. Het deel van een duin dat binnen een diepteklasse valt, is nu het geruite deel. Als nu binnen dat deel de hoogte binnen één klasse valt, dan is het geruite oppervlak gelijk aan het oppervlak waarnaar gezocht wordt, anders wordt het nader onderverdeeld. Zowel de gemiddelde waterdiepte als het verschil ten opzichte van dit gemiddelde is verdeeld in klassen van 0,20 meter.



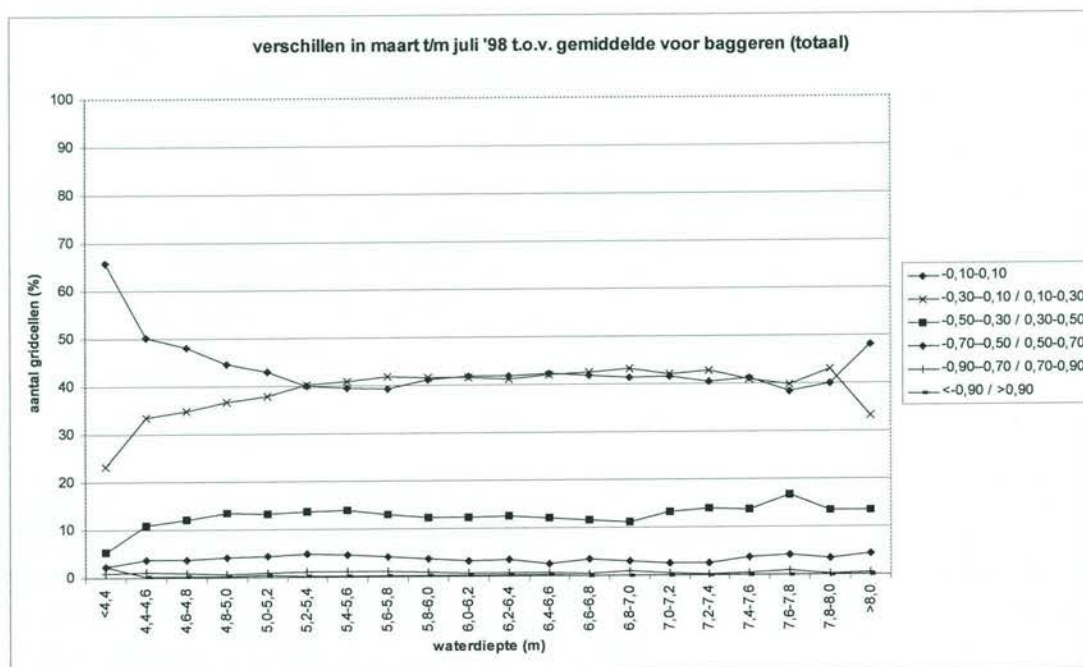
figuur 6-9: Bepaling van verschillen ten opzichte van het gemiddelde per klasse van de gemiddelde diepte

In het gemiddelde voor baggeren komt niet elke diepte even veel voor. In de analyse zijn daarom alle dieptes die minder dan 1% van het totale gridbestand uitmaken niet meegenomen. Ook de verschilwaarden komen niet met gelijke frequentie voor; hiervoor is eveneens een minimum van 1% van het totaal aangehouden voor gegevens die bij de analyse worden betrokken. Bovendien worden om deze reden de resultaten in percentages in plaats van in absolute aantallen weergegeven.

In ArcView zijn per bodempeiling en per traject tabellen gegenereerd van het oppervlak aan gridcellen die binnen een bepaalde klasse van de waterdiepte een bepaalde hoogte ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging bezitten. Vervolgens is de absolute grootte van de uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging bekeken, dus is geen onderscheid tussen bulten en kuilen gemaakt. Aangenomen wordt, dat als de duinhoogte inderdaad toeneemt met de waterdiepte, bij grotere waterdieptes relatief meer gridcellen een groter verschil ten opzichte van de gemiddelde waterdiepte moeten hebben, ten koste van het aantal cellen met verwaarloosbare uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging (waarde tussen -0,10 en 0,10 meter).

Als wordt aangenomen dat geen naijlingseffect voor de afmetingen van beddingvormen optreedt [Wilbers en Ten Brinke, 1999] kunnen alle gegevens - voor alle trajecten en alle bodempeilingen voor aanvang van de baggerwerkzaamheden - samen worden gevoegd tot één figuur, aangezien gewerkt wordt met de werkelijke waterdiepte en de uitwijkingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging. Het totaal resultaat wordt weergegeven in figuur 6-10. Het beeld is als volgt:

- tot een diepte van 5,6 tot 5,8 meter: de uitwijking neemt iets toe met de waterdiepte;
- tot een diepte van 6,6 tot 6,8 meter: de uitwijkingen veranderen vrijwel niet met de waterdiepte;
- vanaf een diepte van 6,6 tot 6,8 meter: onverklaarbaar grilliger verloop.



figuur 6-10: Uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus waterdiepte voor alle trajecten en alle bodempeilingen voor aanvang van baggerwerkzaamheden

In bijlage G worden de grafieken per traject gepresenteerd. De resultaten per traject verschillen slechts weinig van elkaar. De diepte tot waar een positief verband tussen de uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging en de gemiddelde waterdiepte bestaat is echter niet gelijk voor de vier trajecten:

| traject PM | diepteklasse (m) |
|------------------|------------------|
| Ewijk | 5,8-6,0 |
| Winssen | 5,2-5,4 |
| Dodewaard-Druten | 5,6-5,8 |
| Beneden-Leeuwen | 5,2-5,4 |

tabel 6-5: Diepteklasse tot waar de duinhoogte toeneemt met de waterdiepte

Bij dieptes groter dan die tot waar een positief verband wordt gevonden tussen de waterdiepte en de uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging, verschilt het gedrag per traject en per maand: soms blijven de verhoudingen vrijwel constant, soms nemen ze af en soms hebben ze een zeer grillig verloop.

Als gekeken wordt naar de grafieken per traject en per maand, dan valt op dat de waterdiepte tot waar de positieve relatie tussen de waterdiepte en de uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging zich doorzet, toeneemt met de afvoer. Het maximale percentage van de beddingvormen binnen een bepaalde klasse van de uitwijking is per traject echter voor alle maanden ongeveer gelijk.

Hoogte per door ArcView geïdentificeerde bult of kuil

Voor de beddingvormen, die geïdentificeerd worden volgens de methode uit paragraaf 6.1.1, is per bult of kuil de oppervlakte bepaald. Hieruit blijkt voor sommige door ArcView gevonden vormen, dat er geen sprake kan zijn van enkele duinen. ArcView kan echter geen vormen die een andere vorm geheel of gedeeltelijk insluiten, dus ring- of hoefijzervormig zijn, splitsen in twee losse vormen. In paragraaf 5.2.1 valt uit de grafieken af te lezen dat de duinlengte van grote duinen bij afvoeren tussen de $Q_{\text{waal}} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_{\text{waal}} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ niet boven de 80 meter uitkomt. De maximale oppervlakte van grote duinen is dus gelijk aan de orde van grootte van 100 maal de rivierbreedte ($A = 17000 \text{ m}^2$).

Per bult of kuil zijn in ArcView de statistische gegevens berekend. In tabel 6-6 worden de gemiddelde, minimale en maximale hoogten weergegeven, berekend over alle geïdentificeerde bulten en kuilen per traject en per maand. Hierbij is een correctie uitgevoerd voor de gemiddelde uitwijking van het gehele gridbestand per traject ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging.

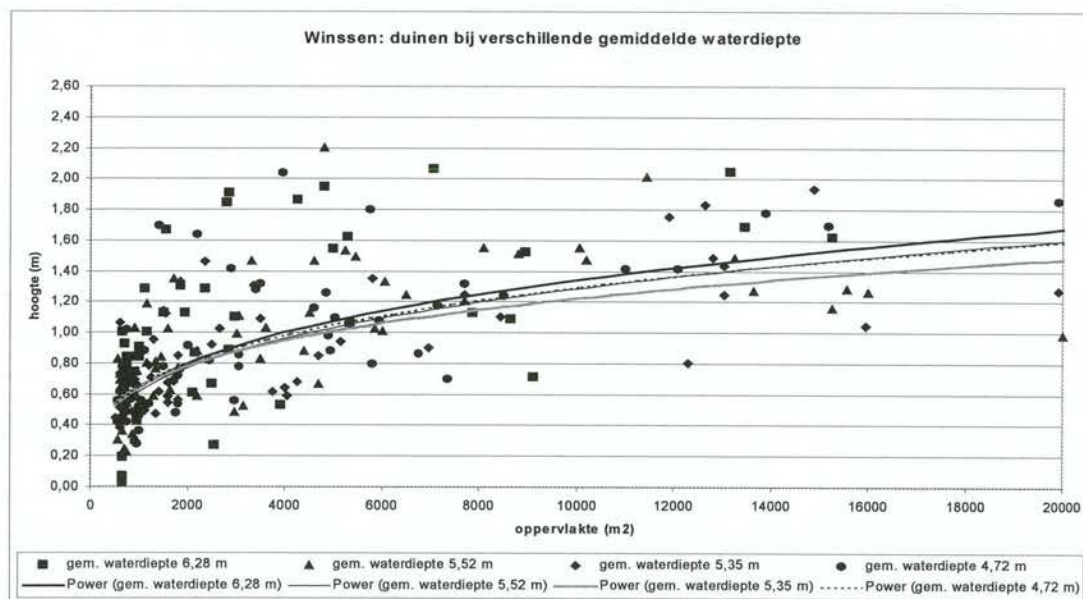
| | | maart '98 | april '98 | mei '98 | juni '98 | juli '98 |
|---|---|-----------------|-----------|---------|----------|----------|
| gemiddelde Waalafvoer (m ³ /s) | | 2175 | 2569 | 1482 | 1947 | 1648 |
| Ewijk | | | | | | |
| kuil | gemiddelde diepte (m) | -0,497 | -0,689 | -0,533 | -0,537 | |
| | minimum diepte (m) | -0,230 | -0,116 | -0,188 | -0,154 | |
| | maximum diepte (m) | -0,810 | -2,056 | -1,388 | -1,534 | |
| | oppervlakte bij max. diepte (m ²) | 2875 | 273125 | 10200 | 45425 | |
| bult | gemiddelde hoogte (m) | 0,563 | 0,581 | 0,551 | 0,563 | |
| | minimum hoogte (m) | 0,150 | 0,424 | 0,262 | 0,156 | |
| | maximum hoogte (m) | 0,880 | 0,854 | 1,342 | 1,226 | |
| | oppervlakte bij max. hoogte (m ²) | 38350; 92950 | 1700 | 5075 | 5125 | |
| Winssen | | | | | | |
| kuil | gemiddelde diepte (m) | -0,486 | -0,524 | -0,560 | -0,464 | |
| | minimum diepte (m) | -0,217 | -0,016 | -0,229 | -0,193 | |
| | maximum diepte (m) | -1,007 | -1,106 | -0,949 | -1,023 | |
| | oppervlakte bij max. diepte (m ²) | 5725 | 38725 | 11950 | 12725 | |
| bult | gemiddelde hoogte (m) | 0,479 | 0,633 | 0,530 | 0,532 | |
| | minimum hoogte (m) | 0,113 | 0,354 | 0,141 | 0,237 | |
| | maximum hoogte (m) | 1,103 | 1,254 | 1,131 | 1,047 | |
| | oppervlakte bij max. hoogte (m ²) | 2400 | 10075 | 11975 | 12875 | |
| Dodewaard-Druten | | | | | | |
| kuil | gemiddelde diepte (m) | -0,530 | -0,506 | | -0,492 | -0,369 |
| | minimum diepte (m) | -0,205 | -0,113 | | -0,185 | -0,142 |
| | maximum diepte (m) | -1,115 | -1,103 | | -0,935 | -0,692 |
| | oppervlakte bij max. diepte (m ²) | 7100 | 17500 | | 12450 | 8750 |
| bult | gemiddelde hoogte (m) | 0,486 | 0,594 | | 0,522 | 0,483 |
| | minimum hoogte (m) | 0,165 | 0,177 | | 0,135 | 0,288 |
| | maximum hoogte (m) | 1,005 | 1,157 | | 0,985 | 0,918 |
| | oppervlakte bij max. hoogte (m ²) | 32975 | 2925 | | 9250 | 9650 |
| Beneden-Leeuwen | | | | | | |
| kuil | gemiddelde diepte (m) | -0,488 | -0,609 | -0,528 | -0,555 | |
| | minimum diepte (m) | -0,204 | -0,222 | -0,214 | -0,174 | |
| | maximum diepte (m) | -0,914 | -1,002 | -1,104 | -1,034 | |
| | oppervlakte bij max. diepte (m ²) | 8475 | 14500 | 8400 | 11950 | |
| bult | gemiddelde hoogte (m) | 0,479 | 0,583 | 0,547 | 0,533 | |
| | minimum hoogte (m) | 0,136 | 0,178 | 0,206 | 0,206 | |
| | maximum hoogte (m) | 1,236 | 1,038 | 1,116 | 1,136 | |
| | oppervlakte bij max. hoogte (m ²) | 11575 | 5575 | 3250 | 10375 | |

tabel 6-6: Gemiddelde, minimale en maximale hoogte van bulten en kuilen per traject en per maand

De verwachting op basis van de theorie is dat - tot een zekere maximale oppervlakte - de hoogte van de bulten en kuilen zal toenemen met de oppervlakte, aangezien de helling van een duinen niet oneindig steil kan worden. Dit blijkt niet direct uit de tabel. Andersom gaat dit verband niet op: er is geen minimum steilheid voor een duin. De oppervlakte voor de minimale hoogte is daarom ook niet in de tabel weergegeven.

Daarnaast is uit literatuur gebleken dat de duinhoogte toeneemt met de afvoer. Bij een grotere waterdiepte zouden dus hogere maxima voor de bulten en kuilen moeten worden waargenomen. Dit blijkt evenmin duidelijk uit tabel 6-6. Echter, de gemiddelde hoogte blijkt voor alle kuilen en bulten, met uitzondering van de kuilen bij Winssen, wel mee te variëren met de afvoer. De gemiddelde hoogte in mei is groter dan die in april, terwijl de afvoer lager is (behalve voor de bulten bij Ewijk). Dit heeft wellicht toch te maken met een naijlingseffect.

Per traject zijn voor alle bodempeilingen voor aanvang van de baggerwerkzaamheden de duinhoogtes tegen de duinoppervlaktes uitgezet. Hierbij is aangenomen dat de duinhoogte kan worden benaderd met twee maal de hoogte van de bult of kuil. De duinoppervlakte is eveneens met een factor 2 vermenigvuldigd, ook al geeft dit een onderschatting van de werkelijke oppervlakte doordat de gridcellen met een uitwijking van minder dan 0,10 meter niet mee worden gerekend. Er lijkt weinig correlatie te zitten tussen hoogte en oppervlakte. Wanneer voor elke maand - in de figuren gekarakteriseerd door de gemiddelde waterdiepte - een door Excel berekende trendlijn wordt toegevoegd, wordt eveneens slechts een zeer zwak verband tussen de oppervlakte en de duinhoogte gevonden. In figuur 6-11 wordt het resultaat voor traject Winssen getoond.



figuur 6-11: Duinhoogte versus oppervlakte bij Winssen voor verschillende gemiddelde waterdiepten

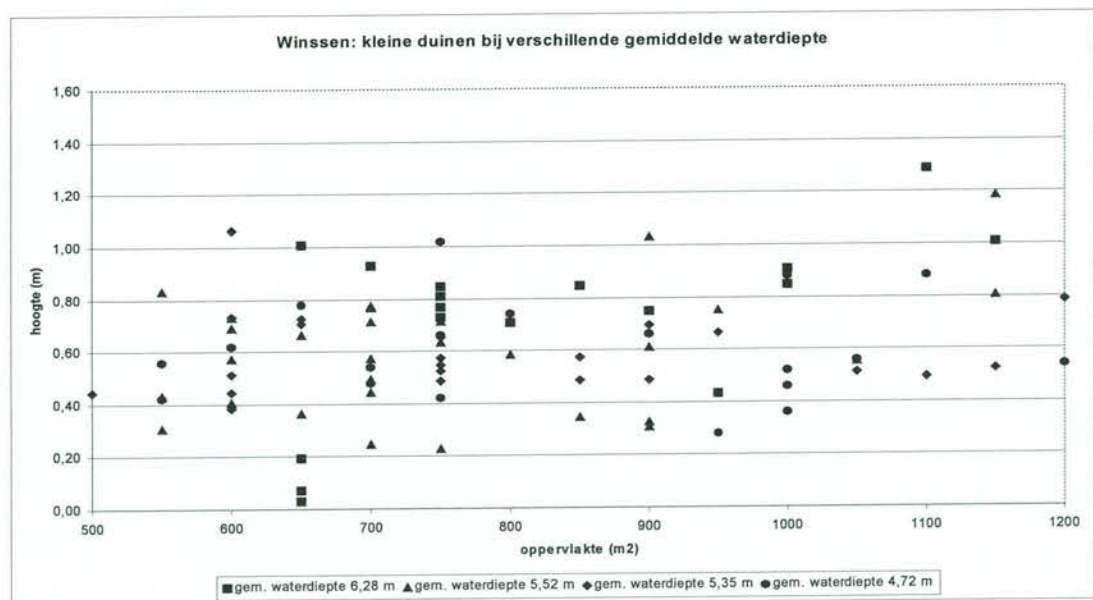
Kleine duinen hebben een gemiddelde lengte van 15 meter en bevinden zich aan de zuidzijde tot 10 meter uit de rivieras. Ze hebben dus globaal een oppervlakte van $A = 15 \times 80 = 1200 \text{ m}^2$. Wanneer deze kleine vormen apart beschouwd worden, kan een schatting voor de duinhoogte van de kleine duinen worden verkregen. Deze wordt wederom gelijkgesteld

aan twee maal de maximum of minimum uitwijking ten opzichte van de gemiddelde uitwijking. De resultaten worden weergegeven in tabel 6-7. Voor het traject Dodewaard-Druten wordt in juli geen enkele duin met een oppervlakte van minder dan 1200 m² gevonden.

| | | maart '98 | april '98 | mei '98 | juni '98 |
|---|-----------|-----------|-----------|---------|----------|
| gemiddelde Waalafvoer (m ³ /s) | | 2175 | 2569 | 1482 | 1947 |
| Ewijk | gemiddeld | 0,626 | 0,911 | 0,744 | 0,666 |
| | minimum | 0,299 | 0,231 | 0,376 | 0,308 |
| | maximum | 0,981 | 1,629 | 1,156 | 1,272 |
| Winssen | gemiddeld | 0,581 | 0,689 | 0,599 | 0,610 |
| | minimum | 0,226 | 0,032 | 0,282 | 0,386 |
| | maximum | 1,186 | 1,288 | 1,018 | 1,066 |
| Dodewaard-Druten | gemiddeld | 0,610 | 0,588 | | 0,602 |
| | minimum | 0,390 | 0,227 | | 0,270 |
| | maximum | 1,050 | 0,947 | | 1,130 |
| Beneden-Leeuwen | gemiddeld | 0,542 | 0,654 | 0,667 | 0,578 |
| | minimum | 0,272 | 0,355 | 0,412 | 0,349 |
| | maximum | 0,872 | 0,965 | 1,268 | 0,829 |

tabel 6-7: Duinhoogte voor de kleine duinen ($A \leq 1200$ m²)

Uit deze tabel blijkt dat evenmin voor de kleine duinen een duidelijk relatie bestaat tussen de maximale duinhoogte en de waterdiepte; de gemiddelde duinhoogte volgt ook hier het afvoerverloop voor de meeste maanden. De verdeling van de duinhoogten van kleine duinen versus de duinoppervlakte is eveneens in grafieken uitgezet. Een voorbeeld wordt gegeven in figuur 6-12; de figuren voor de overige trajecten staan in bijlage G.



figuur 6-12: Oppervlakte en hoogte van kleine duinen op het traject Winssen

Uit de figuren blijkt dat relatief weinig kleine duinen een hoogte van meer dan 1,00 meter hebben en dat de meesten – afhankelijk van het beschouwde traject – een hoogte hebben van 0,40 à 0,80 meter. Via deze analyse wordt dus een duidelijk verschil in afmetingen gevonden tussen grote en kleine duinen. De gevonden hoogtes van de kleine duinen komen redelijk overeen met de analyse van Wilbers en Lai (zie figuur 5-2 en figuur 5-4).

6.2.2 Voortplanting van beddingvormen

Het blijkt lastig om in ArcView voor twee opeenvolgende bodempeilingen de verplaatsing van beddingvormen te bepalen. Na een maand tijd zijn de vormen slechts in een paar gevallen terug te vinden. In figuur 6-13 wordt een voorbeeld gegeven van de voortplanting van beddingvormen: de contouren van de kuilen van de laatste peiling worden over de kuilen van de vorige peiling heen getoond. De afstand tussen de getekende rechte lijnen is steeds 100 meter.



figuur 6-13: Voorbeeld van de voortplanting van duinen tussen twee opeenvolgende bodempeilingen

Berekening van de voortplantingssnelheden van beddingvormen

In tabel 6-8 staat een schatting voor de afstand waarover de beddingvormen zijn voortgeplant tussen twee opeenvolgende bodempeilingen, gebaseerd op de gemiddelde afvoer over de periode tussen deze bodempeilingen. In de tabel worden twee voortplantingsafstanden berekend: de eerste op basis van de voortplantingssnelheid voor 1-D bodemverstoringen uit formule (22), de tweede op basis van de voortplantingssnelheid uit figuur 5-6, aangeduid met WtB.

| | | maart- april | april- mei | mei- juni | juni- juli |
|------------------|---|-----------------|---------------|--------------|---------------|
| Ewijk | dT (dagen) | 34 | 27 | 31 | |
| | $Q_{\text{Boven-Rijn, gem}} \text{ (m}^3/\text{s)}$ | 2126 | 2213 | 1585 | |
| | $h_{\text{gem}} \text{ (m)}$ | 5,63 | 5,88 | 5,01 | |
| | c (m/dag) | 1,8 | 2,0 | 1,3 | |
| | dL (m) | 60 | 53 | 40 | |
| | c WtB (m/dag) | 7,0 | 7,8 | 5,7 | |
| | dL WtB (m) | 238 | 211 | 177 | |
| Winssen | dT (dagen) | 34 | 27 | 28 | |
| | $Q_{\text{Boven-Rijn, gem}} \text{ (m}^3/\text{s)}$ | 2136 | 2174 | 1557 | |
| | $h_{\text{gem}} \text{ (m)}$ | 5,50 | 5,60 | 4,74 | |
| | c (m/dag) | 1,7 | 1,8 | 1,1 | |
| | dL (m) | 57 | 48 | 31 | |
| | c WtB (m/dag) | 7,4 | 7,5 | 5,7 | |
| | dL WtB (m) | 252 | 203 | 160 | |
| Dodewaard-Druten | dT (dagen) | 33 | 53 | 31 | |
| | $Q_{\text{Boven-Rijn, gem}} \text{ (m}^3/\text{s)}$ | 2147 | 1844 | 1606 | |
| | $h_{\text{gem}} \text{ (m)}$ | 5,36 | 4,94 | 4,64 | |
| | c (m/dag) | 1,6 | 1,2 | 1,0 | |
| | dL (m) | 52 | 64 | 32 | |
| | c WtB (m/dag) | 7,4 | 6,3 | 6,0 | |
| | dL WtB (m) | 244 | 334 | 186 | |
| Beneden-Leeuwen | dT (dagen) | 33 | 31 | 20 | |
| | $Q_{\text{Boven-Rijn, gem}} \text{ (m}^3/\text{s)}$ | 2156 | 2013 | 1542 | |
| | $h_{\text{gem}} \text{ (m)}$ | 5,42 | 5,25 | 4,65 | |
| | c (m/dag) | 1,6 | 1,5 | 1,0 | |
| | dL (m) | 54 | 47 | 21 | |
| | c WtB (m/dag) | 7,4 | 6,9 | 5,6 | |
| | dL WtB (m) | 244 | 214 | 112 | |

tabel 6-8: Berekening voor de voortplanting van beddingvormen

| | | |
|------------------------------|--|---------------------|
| dT | - tijdsverschil tussen twee bodempeilingen | [dagen] |
| $Q_{\text{Boven-Rijn, gem}}$ | - gemiddelde afvoer tussen twee bodempeilingen | [m ³ /s] |
| h_{gem} | - waterstand, behorend bij de gemiddelde afvoer | [m] |
| c | - berekende voortplantingssnelheid van beddingvormen | [m/dag] |
| c WtB | - voortplantingssnelheid volgens Wilbers en Ten Brinke | [m/dag] |
| dL | - afgelegde afstand tussen twee bodempeilingen | [m] |

Voor de berekening van de voortplantingssnelheid c uit formule (22) is voor de graad van niet-lineariteit van het sedimenttransport een waarde $n = 4$ gebruikt. Het sedimenttransport kan op twee manieren worden bepaald.

- met behulp van de transportformule van Meyer-Peter-Müller:

$$\frac{s}{\sqrt{g\Delta D_m^3}} = 13,3 \left(\frac{\mu h i}{\Delta D_m} - 0,047 \right)^{3/2} \quad (32)$$

met

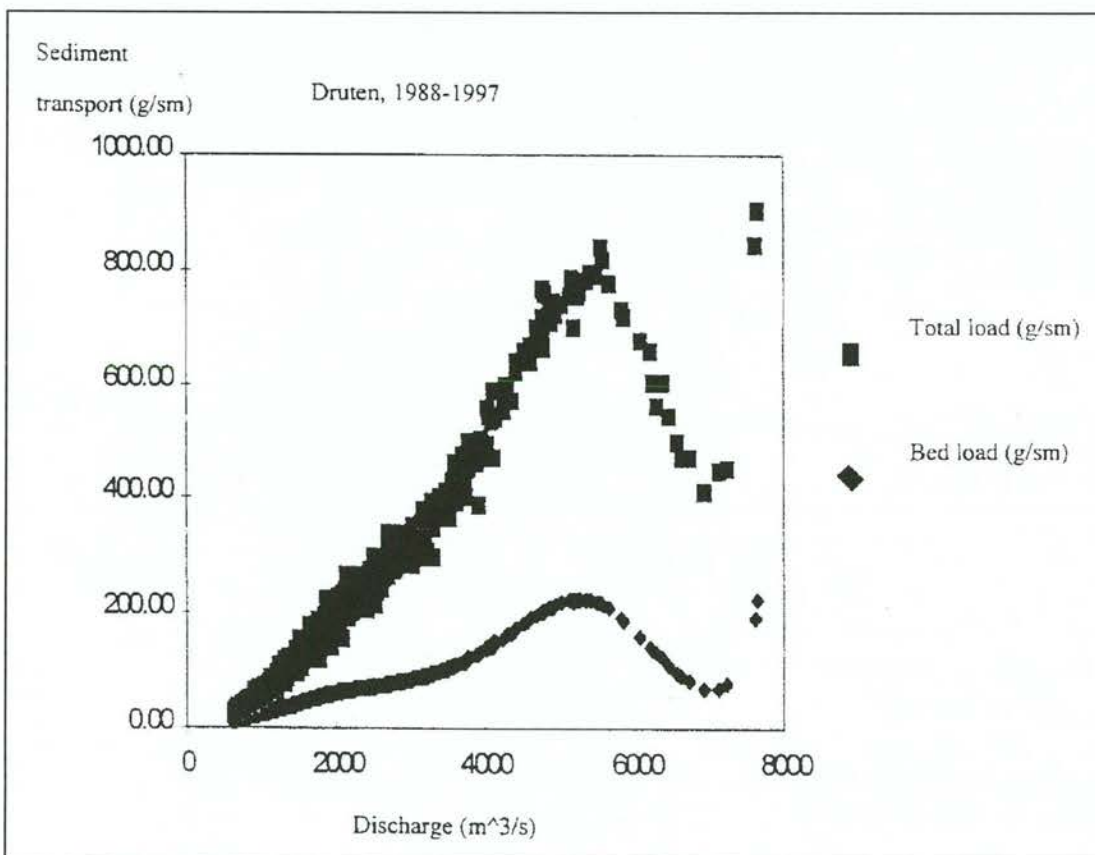
$$\mu = \left(\frac{C}{C_{90}} \right)^{3/2} \quad (33)$$

D_m - mediane korreldiameter [m]

μ - ribbelfactor [-]

C_{90} - ruwheid gebaseerd op de D_{90} korreldiameter [$m^{1/2}/s$]

- uit figuur 6-14 [Ten Brinke, 2000]



figuur 6-14: Sedimenttransport in de Waal [Ten Brinke, 2000]

Voor de tabel is gebruik gemaakt van het sedimenttransport volgens Ten Brinke (2000).

De beide uitkomsten voor de voortplantingsafstand vertonen grote verschillen. Dit kan voor een deel worden verklaard doordat de berekening is uitgevoerd voor de gemiddelde afvoer in de periode tussen twee bodempeilingen, terwijl het verband tussen de voortplantingssnelheid en de afvoer niet lineair is. De werkelijke voortplantingssnelheden en afstanden zullen groter zijn. Daarnaast is het onzeker of met behulp van de transportformule van Meyer-Peter-Müller

Zoals in paragraaf 5.2.2 is aangegeven, kunnen beddingvormen alleen worden gevolgd als de afstand waarover ze zijn voortgeplant kleiner is dan één maal de golflengte. Met de voortplantingssnelheden volgens Wilbers en Ten Brinke zijn de afstanden veel te groot om beddingvormen in twee opeenvolgende bodempeilingen terug te vinden; de afstanden uit de 1-D voortplantingssnelheid zijn een grensgeval. Met de huidige gegevens kan dus geen voorspelling opgesteld worden voor de voortplanting van beddingvormen.

Het is binnen ArcView niet mogelijk om de contouren van de beddingvormen van een bepaalde bodempeiling over de contouren van de beddingvormen van een andere bodempeiling te verschuiven, om zo te zoeken naar de afstand die de hoogste correlatie tussen beide patronen vertoont. Het identificeren van gelijke beddingvormen in twee verschillende bodempeilingen kan alleen handmatig, evenals het bepalen van de afstand tussen beide vormen. Dit is te bewerkelijk en levert geen goede resultaten op, zodat er met behulp van ArcView geen voorspelling van de voortplanting van beddingvormen kan worden gedaan.

7 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport is verslag gedaan van de studie naar natuurlijke processen in de Waal. De conclusies uit de voorgaande hoofdstukken, zowel wat betreft de opgedrongen (“forced”) geometrie als de vrije verschijnselen (“free” geometrie) worden in dit hoofdstuk nogmaals kort samengevat. Vervolgens worden op basis hiervan enkele aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek en een eventuele wijziging in de aanpak hierbij. Algemeen geldt dat het lastiger blijkt dan verwacht om in ArcView analyses uit te voeren. Dit ligt deels aan het programma zelf en deels aan de data. De voornaamste problemen zijn:

- Door de gekozen gridafmetingen van hooguit 5 bij 5 meter zijn de gegevens zeer gedetailleerd;
- Het is moeilijk om de diverse morfologische processen van elkaar te scheiden;
- ArcView kent geen mogelijkheid tot het uitvoeren van analyses en bewerkingen langs een door de gebruiker gedefinieerde lijn (bijvoorbeeld de rivieras). Het verschuiven van bestanden of kenmerken in de stroomrichting is dus niet mogelijk;
- Het is niet mogelijk om via een standaardbewerking kleine, losse gebieden tot een groter geheel samen te voegen of andersom, om grote gebieden te splitsen in twee kleinere;
- ArcView kan geen vormen herkennen, enkel gridcellen. Het groeperen van gridcellen tot aaneengesloten vormen is slechts mogelijk op basis van door de gebruiker gedefinieerde criteria met betrekking tot de waarde van de individuele gridcellen.

Conclusies met betrekking tot de “forced” geometrie

- In de Midden-Waal lijkt een tijdsgemiddelde “evenwichtsbodemligging” te bestaan, die door de geometrie van de rivier wordt opgedrongen - de “forced” geometrie - en die slechts zeer langzaam in de tijd varieert. De analyse hiervan wordt echter bemoeilijkt door de beddingvormen, die afmetingen hebben die groot zijn ten opzichte van de eventuele verschillen in de bodemligging tussen twee opeenvolgende bodempeilingen ten gevolge van aanpassing van de opgedrongen bodemligging aan variërende afvoeren. Een goede controle op de eventuele afvoerafhankelijkheid van de opgedrongen geometrie kan met de huidige gegevens niet uitgevoerd worden, doordat er slechts vier bodempeilingen zonder invloed van baggerwerkzaamheden beschikbaar zijn en de afvoervariatie over deze bodempeilingen gering is;
- De tijdsgemiddelde bodemligging kan met de gegevens die momenteel beschikbaar zijn het best beschreven worden met het gemiddelde bepaald uit de jaarlijkse dwarspeilingen. Hiertoe zijn de JDP's van 1988 tot en met 1999 gebruikt;
- Het gemiddelde dwarsverhang in de bochten dat bepaald is met behulp van ArcView, is een factor 2 groter dan het dwarsverhang dat gevonden wordt met de empirische formule van Struiksma voor de axiaalsymmetrische benadering. In de formule wordt het effect van overshoot aan het begin van een bocht echter niet meegenomen;
- De dempingslengte voor bochten uit de lineaire analyse is groot ten opzichte van de lengte van de bochten op de Midden-Waal, waardoor de evenwichtsbodemligging niet met behulp van de axiaalsymmetrische benadering kan worden geschat;

- De aanpassingstijd voor bochten is zodanig groot dat de tijdsgemiddelde bodemligging bij een voorspellingstermijn van maximaal één jaar vrijwel niet verandert. Hierdoor kan de voorspelling van de bodemligging dus bestaan uit een vaste tijdsgemiddelde bodemligging waar verstoringen zich over voortplanten;
- De volumeverandering van crossings zoals bepaald uit ArcView voor de maanden maart '98 tot en met juni '98 is zeer gering. Er is geen relatie met de afvoer gevonden;
- De aanpassingstijd van crossings is groot ten opzichte van het interval tussen twee opeenvolgende bodempeilingen, waardoor het gedrag van de crossings niet goed bepaald kan worden uit de bodempeilingen voor aanvang van de baggerwerkzaamheden;
- In de literatuur is nog te weinig bekend over het gedrag van de bodemligging rond kribben. Hiernaar is dan ook niet gezocht met behulp van ArcView.

Conclusies met betrekking tot de “free” geometrie

- De vrije verschijnselen die zich door de rivier voortplanten - de “free” geometrie - zijn gelijk aan de uitwijkingen van een individuele bodempeiling ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging;
- De variatie in de afvoer in de maanden voor aanvang van de eerste grootschalige baggerwerkzaamheden is zeer gering. Dit is waarschijnlijk mede de oorzaak voor het gebrek aan duidelijke relaties uit de analyses in ArcView tussen de afmetingen van de vrije verstoringen en de waterdiepte;
- De vrije verschijnselen kunnen het best worden beschreven ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging voor aanvang van de eerste baggerwerkzaamheden, aangezien de gemiddelde afwijkingen dan het kleinste zijn;
- Volgens de lineaire analyse zouden bij lage afvoeren alternierende banken gevormd moeten worden op de Waal. Deze zijn echter nog nooit waargenomen en zijn ook niet terug te vinden in de bodempeilingen in ArcView. De tijdschaal voor de groei is hier waarschijnlijk debet aan, in combinatie met de onderschrijdingskans van de lage afvoeren waarbij groei optreedt: voordat alternierende banken aangegroeid zijn tot waarneembare afmetingen is de afvoer alweer zodanig hoog dat de banken uitgedempt worden;
- Gezien de lage voortplantingssnelheid van de alternierende banken zouden deze, indien ze worden waargenomen, in twee opeenvolgende bodempeilingen vrijwel op dezelfde plaats moeten liggen;
- Op de Waal worden ten noorden en ten zuiden van de rivieras verschillende beddingvormen waargenomen. Dit verschil wordt voornamelijk veroorzaakt door de invloed van de scheepvaart, waardoor de korrelverdeling van het sediment verschilt tussen Noord en Zuid. De analyse met ArcView bevestigt dat beddingvormen aan de noordzijde hoger zijn dan aan de zuidzijde. De gevonden hoogtes zijn echter groter dan die uit voorgaande onderzoeken;
- Met behulp van ArcView zijn beddingvormen met verschillende afmetingen geïdentificeerd. Van deze bulten en kuilen is de ligging ten opzichte van de rivieras echter niet bekend en dit kan binnen ArcView ook enkel handmatig per duin uitgezocht worden, wat erg arbeidsintensief is. Dit is daarom nog niet gedaan;

- Uit de analyse van de bodempeilingen in ArcView blijkt, dat de toename van de hoogte van de beddingvormen met de waterdiepte niet volgens een vaste verhouding verloopt, maar groter is voor kleinere waterdieptes en reduceert tot 0 voor waterdieptes van meer dan circa 6 meter. Door de scheepvaart worden - voornamelijk bij lage afvoeren, dus geringe waterdieptes - de hogere beddingvormen waarschijnlijk afgevlakt;
- Het is niet mogelijk om binnen ArcView de lengte van duinen te bepalen. Dit kan enkel handmatig per duin: de lengte moet worden geschat uit de kilometerraaien en de 100 meter stroken;
- De frequentie van de bodempeilingen (maandelijks) is te laag om de voortplanting van beddingvormen goed te kunnen volgen;
- De meettrajecten van de Proef Morfologie zijn niet goed gesitueerd om de verstoringen ten gevolge van een hoogwater goed te bestuderen, omdat de verstoringen te snel buiten het gebied lopen.

Aanbevelingen

1. Het wordt aanbevolen om een studie met behulp van een 2D-model uit te voeren, aangezien dan beter op één verschijnsel tegelijk geconcentreerd kan worden: voor de analyse van de “forced” geometrie is er bijvoorbeeld geen verstoring van beddingvormen waar rekening mee gehouden dient te worden. In 2-D modellen is een voorspelling voor het gedrag van beddingvormen echter niet mogelijk;
2. De hypothese dat de bodemligging van de Waal kan worden beschreven met een tijdsgemiddelde bodemligging waar vrije verschijnselen zich overheen voortplanten dient nader getoetst te worden. Een toetsing op de afvoeronafhankelijkheid van de tijdsgemiddelde bodemligging kan worden uitgevoerd door de gemeten JDP's te koppelen aan het voorafgaande afvoerverloop;
3. De tijdsgemiddelde bodemligging is bepaald op basis van jaarlijkse dwarspeilingen. Op basis van het nog te publiceren rapport over de verschillen tussen single-beam en multi-beam bodempeilingen van Rijkswaterstaat, dient de keuze voor dit gemiddelde nogmaals overwogen te worden;
4. Naast de metingen van stroomsnelheden en sedimentconcentraties in kribvakken, die tot nu toe zijn verricht, dient er ook onderzoek te worden verricht naar de sedimentuitwisseling tussen kribvak en vaargeul;
5. Veel onderzoek is verricht naar beddingvormen in de Waal. Dit heeft geresulteerd in een aantal grafieken voor de afmetingen en voortplantingssnelheid versus de afvoer. Het onderzoek concentreert zich echter op de situatie rond hoogwaters. Aanvullend onderzoek naar laagwatercondities is nodig;
6. De invloed van de scheepvaart op de bodemligging is zeer onzeker. Dit zou met behulp van modelproeven onderzocht kunnen worden. Prototype proeven waarbij bijvoorbeeld de geladen scheepvaart langs de Noordoever wordt gestuurd leveren waarschijnlijk onveilige situaties op de Waal op;
7. Onderzocht moet worden of de twee-wekelijkse beheerspeilingen wél een voorspelling voor de voortplanting van grote beddingvormen kunnen opleveren;

8. Gekeken dient te worden of met betrekking tot de vergelijking van de analyses in ArcView met de relaties uit de theorie betere resultaten bereikt kunnen worden door het gebruik van twee verschillende korreldiameters, respectievelijk $D_{50} = 2,28$ mm voor het noordelijke deel en $D_{50} = 0,64$ mm voor het zuidelijke deel [Ten Brinke, 1997];
9. Voor de analyse van de kleine beddingvormen zou uit het bestand van de 100 meter stroken een grid met kortere stroken gecreëerd moeten worden (orde van grootte van 15 meter);
10. Onderzoek naar beddingvormen met behulp van dune tracking programmatuur (DT2D) lijkt betere resultaten op te leveren dan analyse met behulp van ArcView, omdat ArcView geen vormen kan herkennen. Aanbevolen wordt dan ook om dergelijke studies uit te voeren;
11. Voor de identificatie van verstoringen ten gevolge van een hoogwater kan de stroomatlas van de Waal gekoppeld worden aan de gegevens uit de multi-beam bodempeilingen;
12. Voor de studie naar de vervorming en voortplanting van de verstoringen ten gevolge van een hoogwater wordt aanbevolen om na een volgend hoogwater de trajecten van de bodempeilingen aan te passen aan enkele notoire knelpuntlocaties en deze te monitoren.

Geraadpleegde literatuur en referenties

- Brinke, W.B.M ten, 1997, *De bodemsamenstelling van de Waal en IJssel in de jaren 1966, 1979, 1984 en 1995*, Rapport 97.009, RWS, RIZA
- Brinke, W.B.M. ten, 2000, *Sedimenthuishouding Rijntakken*, RWS, RIZA
- Brinke, W.B.M. ten, N.M. Kruyt, A. Kroon, J.H. van den Berg, 1999, *Erosion of sediments between groynes in the River Waal as a result of navigation traffic*, Spec. Publs int. Ass. Sediment, 28, 147-160
- Douben, ing. N., maart 2000, *Temporele variaties in bodemligging per morfologische eenheid (BOS baggeren)*, Memo RYN*2000-11(I), RWS, RIZA
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), 1996, *ArcView Spatial Analyst, Advanced spatial analysis using raster and vector data - Using the ArcView Spatial Analyst*, GAC10M4/98, USA
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), 1996, *ArcView GIS, The geographic information system for everyone - Using ArcView GIS*, GAC55M7/98sp, USA
- Environmental and GIS Support Project for Water Sector Planning (EGIS) and River Survey Project (FAP 24), October 1996, *Spatial representation and analysis of hydraulic and morphological data*, special report 17
- Kleinhans, M.G., september 1999, *Sedimenttransport in de Waal: hoogwater november 1998*, report ICG 99/6, Netherlands Centre for Geo-ecological Research
- Kruyt, drs. N.M., november 1997, *Analyse kribvakmetingen in een bochtig traject van de Waal in de zomer van 1997*, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU)
- Lai, N.T., augustus 1998, *Bedforms in the Waal River - Characterization and hydraulic roughness*, M.Sc. Thesis H.E.024, IHE Delft
- Lambeek, J.J.P., E. Mosselman, april 1998, *Huidige en historische rivierkundige parameters van de Nederlandse Rijntakken*, Rapport Q 2382, WL | Delft Hydraulics
- Mamun, K. al, april 2000, *Morphology of upper Gorai and maintenance dredging*, M.Sc. thesis IHE 059, International institute for infrastructural, hydraulic and environmental engineering (IHE Delft)
- Miwa, H., T. Nagayoshi, 1999, *Suppression limit of alternate bar migration through sine-generated meander channels*, Journal of natural disasterscience, volume 21, number 1, pp 1-10
- Schans, drs. H., oktober 1998, *Bed level development in Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal and the upstream part of the Waal*, Report ICG 98/16, Netherlands Centre for Geo-ecological Research
- Schepman, F.E., mei 2000, *Morfologische ontwikkeling van de Waalbodem - een studie naar eenvoudige relaties die de bodemontwikkeling beschrijven voor en na baggeren*, werkplan afstuderen TU Delft, rapport Q2734, WL | Delft Hydraulics
- Sieben, J., augustus 1999, *Lokale morfologische effecten door verlaging van zomerkaden*, RWS, RIZA
- Siegfried, A. august 2000, *Morphologische Reaktion der Waal auf Baggermassnahmen*, diplomarbeit, Universität von Karlsruhe, RWS, DON, WL | Delft Hydraulics
- Struiksma, N., C. Flokstra, K.W. Olsesen, dr. H.J. de Vriend, 1985, *Bed deformation in curved alluvial channels*, Journal of Hydraulic Research, vol 23, no. 1, pg 57-79
- Struiksma, N., mei 1997, *Cursus 2-D Riviermorfologie*, Waterloopkundig Laboratorium / Technische Universiteit Delft
- Taal, ir. M, oktober 1999, *Waalproject - Proef morfologie*, CD-ROM, versie 2.0, RWS, DON
- Vriend, prof.dr.ir. H.J. de, juni 1997, *Rivierwaterbouwkunde*, CTwa3340, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek
- Vriend, prof.dr.ir. H.J. de, oktober 1999, *Rivierdynamica*, collegehand-outs CTwa5311, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek
- Wilbers, A.W.E., november 1997, *Duinkarakteristieken en dune tracking tijdens een hoogwater in de Rijntakken - verwerking van de gegevens bij Druten en de Pannerdensch Kop met DT2D*, Rapport ICG 97/8, Netherlands Centre for Geo-ecological Research
- Wilbers, A.W.E., augustus 1998, *Bodemtransport en duinontwikkeling tijdens afvoergolven in de Bovenrijn en Waal*, Rapport ICG 98/12, Netherlands Centre for Geo-ecological Research
- Wilbers, A.W.E., november 1998, *Ruimtelijke variabiliteit van duinkarakteristieken in de Waal tijdens een hoogwatergolf in 1997*, Rapport ICG 98/19, Netherlands Centre for Geo-ecological Research

- Wilbers, A.W.E., januari 1999, *Duinontwikkeling en meanderverplaatsing - beschrijving van de animaties*, incl. CD-ROM, Universiteit Utrecht
- Wilbers, A.W.E., november 1999, *Bodemtransport en duinontwikkeling in de Rijntakken - bodempeilingen hoogwater november 1998*, Rapport ICG 99/10, Netherlands Centre for Geo-ecological Research
- Wilbers, A.W.E., W.B.M. ten Brinke 1999, *Development of subaqueous dunes in the Rhine and Waal, the Netherlands. A preliminary note*, Department of Physical Geography, Utrecht University, National Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA)

Internetsites

- <http://www.esri.com>, ESRI - GIS & Mapping software

Bijlage A Indeling van de Morfologische Eenheden

| Code ME | Naam ME | Beginkmr. | Eindkmr. | Lengte traject | Bocht naar rechts/links of crossing |
|---------|--------------------|-----------|----------|----------------|---|
| 1 | Spijk | 857.00 | 861.00 | 4.00 | |
| 2 | Tolkamer | 861.00 | 863.00 | 2.00 | r |
| 3 | Vossegat | 863.00 | 864.20 | 1.20 | c |
| 4 | Bimmen | 864.20 | 866.20 | 2.00 | l |
| 5 | Millingen a/d Rijn | 866.20 | 866.98 | 0.78 | c |
| 6 | Pannerdense Kop | 866.98 | 868.05 | 1.07 | r |
| 7 | Fort Pannerden | 868.05 | 868.95 | 0.90 | c |
| 8 | Kolenbranderbos | 868.95 | 871.50 | 2.55 | l |
| 9 | Kekerdome | 871.50 | 873.20 | 1.70 | c |
| 10 | Erlecom | 873.20 | 876.20 | 3.00 | r |
| 11 | Kommerdijk | 876.20 | 877.00 | 0.80 | c |
| 12 | Haalderen 1 | 877.00 | 879.00 | 2.00 | l |
| 13 | Haalderen 2 | 879.00 | 882.50 | 3.50 | l |
| 14 | Lent | 882.50 | 883.20 | 0.70 | c |
| 15 | Nijmegen | 883.20 | 886.00 | 2.80 | r |
| 16 | Maas-Waalkanaal | 886.00 | 887.50 | 1.50 | c |
| 17 | Slijk-Ewijk | 887.50 | 890.50 | 3.00 | l |
| 18 | Beuningen | 890.50 | 891.00 | 0.50 | c |
| 19 | Loenen | 891.00 | 892.10 | 1.10 | r |
| 20 | Ewijk | 892.10 | 893.80 | 1.70 | l |
| 21 | Brug A50 | 893.80 | 894.20 | 0.40 | c |
| 22 | Winssen | 894.20 | 895.50 | 1.30 | r |
| 23 | Andelst | 895.50 | 896.00 | 0.50 | c |
| 24 | Wely | 896.00 | 897.80 | 1.80 | l |
| 25 | Kernc.Dodewaard | 897.80 | 898.30 | 0.50 | c |
| 26 | Deest | 898.30 | 900.40 | 2.10 | r |
| 27 | Hooge Waard | 900.40 | 902.00 | 1.60 | l |
| 28 | De Tempel | 902.00 | 902.80 | 0.80 | c |
| 29 | Druten | 902.80 | 904.75 | 1.95 | r |
| 30 | Ochten | 904.75 | 907.40 | 2.65 | l |
| 31 | IJzendoorn | 907.40 | 908.70 | 1.30 | c |
| 32 | Beneden Leeuwen | 908.70 | 911.80 | 3.10 | r |
| 33 | Wamel | 911.80 | 913.00 | 1.20 | c |
| 34 | Tiel | 913.00 | 916.40 | 3.40 | l |
| 35 | Passewaay | 916.40 | 917.80 | 1.40 | r |

| Code ME | Naam ME | Beginkmr. | Eindkmr. | Lengte traject | Bocht naar rechts/links of crossing |
|---------|--------------|-----------|----------|----------------|--|
| 36 | Zennewijnwn | 917.80 | 918.70 | 0.90 | l |
| 37 | Dreumel | 918.70 | 919.00 | 0.30 | c |
| 38 | Ophemert | 919.00 | 921.50 | 2.50 | r |
| 39 | Varik | 921.50 | 923.50 | 2.00 | l |
| 40 | Sint-Andries | 923.50 | 927.90 | 4.40 | r |
| 41 | Heesselt | 927.90 | 928.60 | 0.70 | c |
| 42 | Opijnen | 928.60 | 932.20 | 3.60 | l |
| 43 | Hurwenen | 932.20 | 933.30 | 1.10 | r |
| 44 | Brug A2 | 933.30 | 934.00 | 0.70 | c |
| 45 | Zaltbommel | 934.00 | 936.00 | 2.00 | l |
| 46 | Gameren | 936.00 | 939.10 | 3.10 | r |
| 47 | Nieuwaal | 939.10 | 941.50 | 2.40 | l |
| 48 | Herwijnen | 941.50 | 944.50 | 3.00 | r |
| 49 | Brakel | 944.50 | 948.20 | 3.70 | l |
| 50 | Vuren | 948.20 | 950.70 | 2.50 | r |
| 51 | Woudrichem | 950.70 | 953 | 2.30 | l |

Bijlage B Analyse van de tijdsgemiddelde bodempligging uit de JDP's: autonome bodemdaling en -stijging

De gridbestanden van de JDP's zijn beschikbaar zowel in dieptes ten opzichte van NAP als in dieptes ten opzichte van het officiële of geïnterpoleerde OLR-vlak van het desbetreffende jaar. In deze bijlage worden de verschillen tussen de twee gemiddelden besproken, die op basis van deze bestanden kunnen worden bepaald. Deze verschillen laten de zeer lange termijn bodemontwikkeling van de Midden-Waal zien.

Een middeling is uitgevoerd over de periode van 1988 tot en met 1999, zowel voor alle bestanden ten opzichte van NAP als voor de bestanden ten opzichte van OLR. Het gemiddelde van de bodempeilingen ten opzichte van NAP is vervolgens afgetrokken van het OLR-vlak van 1998. Hierna zijn beide gemiddelden met elkaar vergeleken over het gebied van kmr. 886,3 tot en met 913,3. In het resulterende beeld valt een duidelijk onderscheid te maken tussen:

- het gebied binnen de normaallijnen: hier treedt een langsverhang op;
- het gebied buiten de normaallijnen: hier treden verschillen op tot 5 meter met een zeer grillig patroon.

Het langsverhang binnen de normaallijnen wordt gevonden doordat bij middeling van de JDP's ten opzichte van NAP een waterdiepte wordt gevonden waarbij geen rekening is gehouden met de lange termijn processen op de Waal. Aan bovenstroomse zijde is de JDP ten opzichte van OLR groter dan die ten opzichte van NAP. Dit is het gevolg van de autonome bodemdaling die over een periode van 13 jaar niet te verwaarlozen is: deze is het grootste aan de bovenrand van het gebied en reduceert tot 0 rond kmr. 909,5. Het maximale verschil tussen beide gemiddelden bedraagt 0,14 meter. Het verschil tussen de JDP van 1988 (kleinste diepte ten opzichte van NAP) en de JDP van 1999 (grootste diepte ten opzichte van NAP) zal twee keer zo groot zijn als de gemiddelde afwijking. De autonome bodemdaling over de periode 1988 tot en met 1999 kan hier dus geschat worden op 0,28 meter, ofwel gemiddeld 0,023 meter per jaar. Dit komt goed overeen met de huidige schattingen omtrent de bodemdaling: uit analyse van de gegevens voor de Waal van kmr. 876,4 tot 887,0 over de periode 1975-1995 [Schans, 1998] volgt een gemiddelde autonome bodemdaling van 0,0291 meter per jaar, waarbij eveneens wordt vastgesteld dat de autonome bodemdaling afneemt in stroomafwaartse richting.

Aan de benedenstroomse rand is het gemiddelden van de JDP's ten opzichte van NAP juist kleiner dan het gemiddelde ten opzichte van OLR. Hier treedt dus een bodemstijging op. Het maximale verschil aan de benedenrand (kmr. 913) bedraagt 0,02 meter. Dit kan door twee oorzaken worden verklaard: van 1996 tot en met 1999 is gewerkt aan de vaste laag bij St. Andries, die voor een opstuwing bovenstrooms zorgt. Daarnaast zandt de Waal benedenstrooms van St. Andries jaarlijks aan, wat uiteraard bovenstrooms merkbaar is.

De verschillen buiten de normaallijnen zijn minder eenvoudig te verklaren. Mogelijke oorzaken zijn:

- De afhankelijkheid van de afvoer waarbij een JDP verricht is: hoe hoger de waterstand, hoe verder tot in het kribvak gemeten kan worden.
- Het aantal metingen waarover het gemiddelde is berekend: de metingen ten opzichte van NAP en de metingen ten opzichte van OLR reiken niet altijd tot even ver buiten de normaallijnen. Theoretisch gezien zijn er twaalf bestanden op basis waarvan het gemiddelde wordt bepaald, maar in werkelijkheid zijn dit er één tot twaalf.
- Meet- en/of verwerkingsfouten.

Geconcludeerd kan worden dat de metingen buiten de normaallijnen niet betrouwbaar zijn. Dit is in de nadere analyse van alle gegevens meegenomen: er worden enkel berekeningen uitgevoerd voor gridcellen binnen de normaallijnen.

De vergelijking van beide gemiddelden toont aan dat de lange termijn bodemontwikkeling van de Midden-Waal zeer goed uit de multi-beam bodempeilingen naar voren komt. Deze ontwikkeling wordt verwerkt in het OLR-vlak en/of baggerreferentievlak (BRV-vlak) dat jaarlijks wordt vastgesteld. Aangezien alle bodempeilingen worden omgezet in dieptes ten opzichte van OLR, is de autonome bodemontwikkeling niet van belang voor de in het kader van deze studie naar de natuurlijke morfologie van de Midden-Waal voor het BOS Baggeren te bepalen natuurlijke, door de geometrie van de Waal opgedrongen, 2-D "evenwichts"bodempligging. De invloed op de termijn waarvoor een voorspelling wordt ontwikkeld, dus de afwijking van het OLR die binnen minder dan een jaar optreedt, is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de verstoringen die zich over de tijdsgemiddelde bodempligging voortplanten.

Bijlage C Bepaling van de bruikbare bodempeilingen voor de berekening van de tijdsgemiddelde bodemligging

Bodempeilingen voor aanvang van de baggerwerkzaamheden

Bij de bepaling welke bodempeilingen kunnen worden gebruikt om de tijdsgemiddelde bodemligging voor aanvang van de eerste grootschalige baggerwerkzaamheden te berekenen, zijn de aanvangsdata van de baggerwerkzaamheden en de data van de bodempeilingen van belang. Deze staan in tabel 2-2, maar blijken niet allemaal correct te zijn. Hierna wordt daarom per traject aangegeven welke bodempeilingen zijn gebruikt.

Slijk-Ewijk

Op het traject Slijk-Ewijk zijn de eerste grootschalige baggerwerkzaamheden gestart op 20 juli 1998. De bodempeiling van juli 1998 is voor deeltraject Slijk pas na deze datum verricht. De tijdsgemiddelde bodemligging voor aanvang van alle baggerwerkzaamheden wordt dus bepaald op basis van de bodempeilingen van maart tot en met juni 1998. Op het deeltraject Slijk is echter tussen maart en juli 1998 niet gemeten, zodat het gemiddelde voor de eerste twee kilometer gedeelte gelijk is aan de meting van maart (!). Voor de laatste twee kilometer wordt de middeling over 4 metingen gemaakt.

Winssen

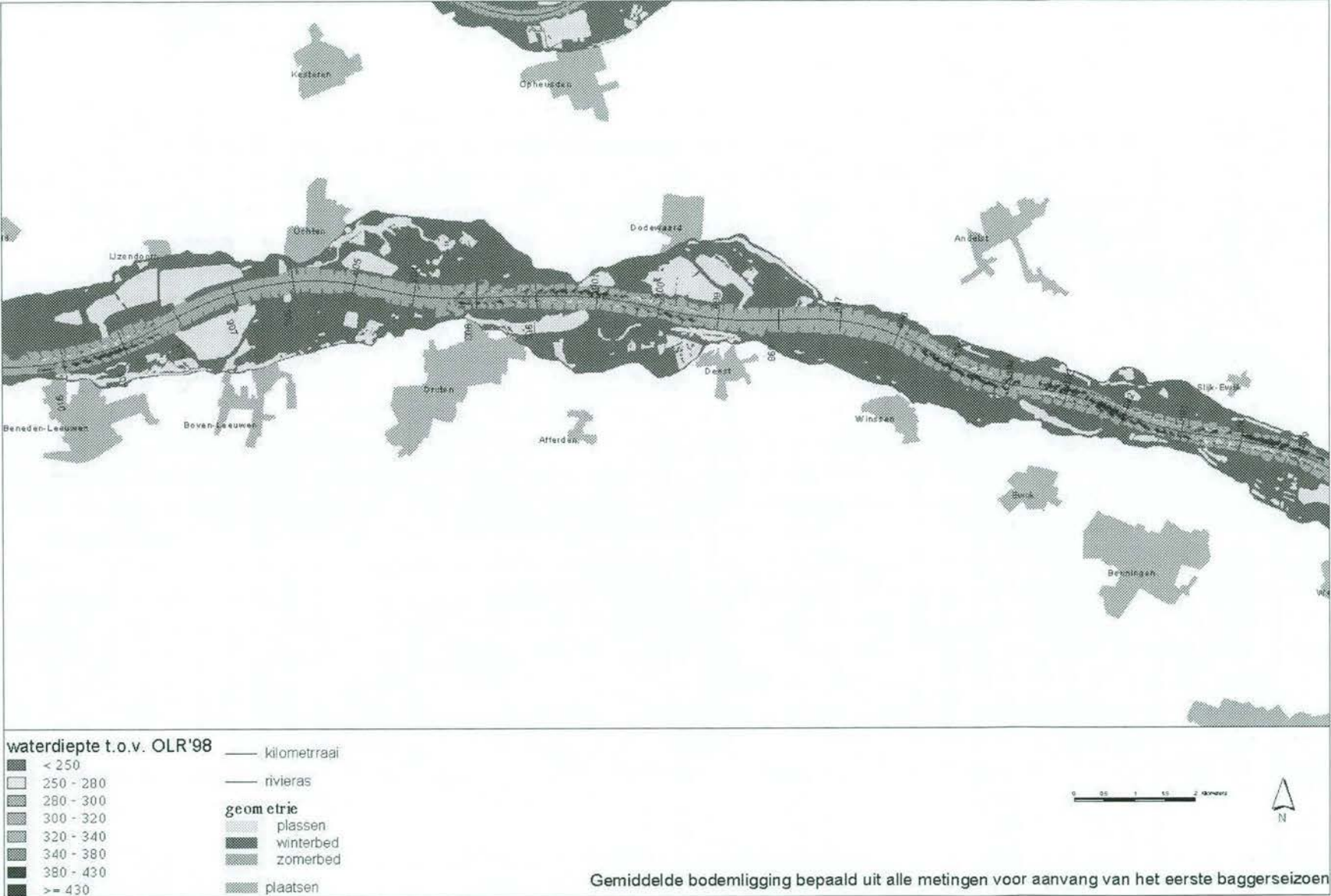
Op het traject Winssen is vanaf 27 juli 1998 voor de eerste maal grootschalig gebaggerd. De bodempeiling van juli valt volgens de opgegeven datum nog voor aanvang van de baggerwerkzaamheden, maar de peiling zelf toont een beeld van na baggerwerkzaamheden. Het gemiddelde voor het traject Winssen is daarom berekend op basis van de 4 metingen van maart tot en met juni 1998.

Dodewaard-Druten

Op het deeltraject Dodewaard is de eerste baggercampagne begonnen op 7 augustus 1998; op het deeltraject Druten op 24 augustus. De bodempeiling van juli is voor beide deeltrajecten de laatste bodempeiling voor aanvang van de baggerwerkzaamheden. De bodempeiling van mei 1998 lijkt over het gehele traject te grote waterdieptes te geven en wordt daarom niet in de berekening van het gemiddelde meegenomen. Het gemiddelde wordt bepaald op basis van de metingen van maart, april, juni en juli 1998, hetgeen een gemiddelde van 4 metingen oplevert.

Beneden-Leeuwen

Op het traject Beneden-Leeuwen is op 7 september 1998 begonnen met baggeren. De bodempeiling van juli wijkt sterk af van die van juni: de gemeten waterdieptes zijn te ondiep. De peiling is dus hoogstwaarschijnlijk niet correct en wordt niet in de berekening van het gemiddelde meegenomen. De bodempeiling van september valt volgens de opgegeven datum nog voor aanvang van de baggerwerkzaamheden, maar de peiling zelf toont een beeld van na baggerwerkzaamheden. Het gemiddelde voor het traject Beneden-Leeuwen wordt daarom berekend op basis van de 5 metingen van maart tot en met juni 1998.



figuur 1: Gemiddelde mb98 (gemiddelde voor baggeren)

Bodempeilingen tussen een hoogwater en baggerwerkzaamheden

Een hoogwater is een situatie waarbij er water stroomt door de uiterwaarden van de rivier. Voor de Waal treedt deze situatie op bij een rivierafvoer op de Boven-Rijn (Q_{Lobith}) van meer dan 4500 m³/s [Douben, 1995]. De exacte afvoer waarbij dit gebeurt kan uiteraard van locatie tot locatie verschillen, maar deze grenswaarde is aangehouden voor de bepaling van welke metingen kunnen worden gebruikt voor de bepaling van de tijdsgemiddelde bodemligging. Aangenomen wordt dat een hoogwater zodanige invloeden op de bodemligging van de rivier heeft dat de effecten van voorafgaande baggerwerkzaamheden worden teniet gedaan en dat meting na een hoogwater daardoor vrij zijn van baggerinvloeden, zodat ze een beeld geven van de natuurlijke geometrie.

Het afvoerverloop van de Boven-Rijn van januari 1998 tot en met mei 2000 is weergegeven in figuur 2-2, figuur 2-3 en figuur 2-4. Hieruit zijn vervolgens alle afvoeren geselecteerd van meer dan 4500 m³/s. Een overzicht van alle hoogwaters in de beschouwde periode staat in tabel 1.

| begin van hoogwater $Q_{\text{Lobith}} > 4500 \text{ m}^3/\text{s}$ | eind van hoogwater $Q_{\text{Lobith}} < 4500 \text{ m}^3/\text{s}$ | piekafvoer (m ³ /s) | datum piekafvoer |
|--|---|-----------------------------------|---------------------|
| 30 oktober 1998 | 20 november 1998 | 9413 | 4 november |
| 23 februari 1999 | 18 maart 1999 | 7920 | 26 februari |
| 20 mei 1999 | 21 mei 1999 | 4503 | 20 mei |
| 16 december 1999 | 19 december 1999 | 4808 | 17 december |
| 22 december 1999 | 25 december 1999 | 4934 | 23 december |
| 28 december 1999 | 4 januari 2000 | 6604 | 30 december |
| 20 februari 2000 | 26 februari 2000 | 5282 | 22 februari |
| 4 maart 2000 | 11 maart 2000 | 5442 | 6 maart |

tabel 1: Hoogwaters van januari 1999 tot en met mei 2000

Voor de bepaling van de bodempeilingen die vallen tussen een hoogwaterperiode en de aanvang van baggerwerkzaamheden is echter steeds het eerste hoogwater na een baggerperiode van belang. Dat wil zeggen dat na het eerste baggerseizoen, dat loopt van 20 juli tot en met 17 september 1998, het hoogwater van november 1998 geacht wordt het effect van de baggerwerkzaamheden teniet te doen en na het tweede baggerseizoen, dat loopt van 8 juli tot en met 14 oktober 1999, het hoogwater van december 1999 en januari 2000 de baggerwerkzaamheden uitvaagt. Voor de eerste bodempeiling na een hoogwater die wordt gebruikt voor de bepaling van de tijdsgemiddelde bodemligging, wordt gesteld dat de datum na de piek van het hoogwater moet vallen, aangezien de bodemontwikkeling naijlt op de afvoer en eerdere bodempeiling dus nog niet vrij zullen zijn van baggerinvloeden.

De data van de baggerwerkzaamheden (zie tabel 2-2 en tabel 2-4) zijn voor het eerste baggerseizoen gehaald uit de evaluatie van de Proef Morfologie [Taal, 1999]. De gegevens van de stortlocaties zijn afgelezen uit een Excel-sheet met een overzicht van in welke week

op welke locatie gebaggerd is, waarbij ervan wordt uitgegaan dat baggeren en storten van materiaal op dezelfde dag plaatsvindt. De data van de baggerwerkzaamheden van het tweede baggerseizoen zijn verkregen uit de informatie (Excel-sheets) van de in- en uitpeilingen. De daadwerkelijke baggerwerkzaamheden hebben dus wellicht iets korter geduurd, omdat de in- of uitpeiling niet op dezelfde dag als de aanvang of beëindiging van de baggerwerkzaamheden hoeft te vallen. In 2000 zijn de eerste baggerwerkzaamheden begonnen op 5 juni, dus pas na de laatste beschikbare bodempeilingen.

Slijk-Ewijk

In 1999 is er op het traject Slijk gebaggerd van 9 tot en met 27 september; op het traject Ewijk van 13 tot en met 27 september. De laatste bodempeiling voor aanvang van de baggerwerkzaamheden is de peiling die wordt aangeduid als de bodempeiling van september, maar die in werkelijkheid op 12 augustus 1999 is verricht.

De bodempeilingen van november 1998 zijn verricht op respectievelijk 16 en 2 november, dus na aanvang van het hoogwater. De peiling op het tweede deel van het traject vindt echter plaats nog voor de piek van het hoogwater. Alle peilingen van december 1998 tot en met september 1999 worden gebruikt voor bepaling van het gemiddelde. De bodempeilingen van december 1999 is op het gehele traject verricht op 16 december, dus op de eerste dag van de hoogwaterperiode. De meting van 17 januari 2000 valt ruim na de hoogwaterperiode. Alle beschikbare metingen van 2000 kunnen daarom worden gebruikt voor de berekening van het gemiddelde.

Het gemiddelde van de bodemligging uit de metingen tussen een hoogwater en aanvang van baggerwerkzaamheden wordt voor Slijk-Ewijk dus berekend uit de metingen van maart tot en met juni 1998, december 1998 tot en met september 1999 en januari tot en met mei 2000. Dit betreffen in totaal 13 bodempeilingen voor de eerste twee kilometers en 16 bodempeilingen voor de tweede twee kilometer.

Winssen

In 1999 is er op het traject Winssen gebaggerd van 8 tot en met 23 juli en van 16 september tot en met 1 oktober. De laatste bodempeiling voor aanvang van dit tweede baggerseizoen is de peiling van 21 juni 1999.

De bodempeilingen van november 1998 is verricht op 3 november, dus na aanvang van het hoogwater, maar voor het optreden van de hoogwaterpiek. Alle peilingen van december 1998 tot en met juni 1999 worden daarom gebruikt voor de bepaling van het gemiddelde. De bodempeilingen van december 1999 is verricht op 21 december, dus na de eerste val van de hoogwaterperiode maar voor de hoogwaterpiek. De meting van 14 januari 2000 valt ruim na het hoogwater. Alle beschikbare metingen van 2000 kunnen daarom worden gebruikt voor de bepaling van het gemiddelde.

Het gemiddelde van de bodemligging uit de metingen tussen een hoogwater en aanvang van baggerwerkzaamheden wordt voor Winssen dus berekend uit de metingen van maart tot en

met juni 1998, december 1998 tot en met juni 1999 en januari tot en met mei 2000. Dit betreffen in totaal 15 bodempeilingen.

Dodewaard-Druten

In 1999 is er op het traject Dodewaard gebaggerd van 27 juli tot en met 17 augustus en van 24 september tot en met 11 oktober; op het traject Druten van 2 tot en met 10 augustus en van 27 september tot en met 5 oktober. De laatste bodempeiling voor aanvang van de baggerwerkzaamheden is de peiling van 14 juni 1999.

De bodempeilingen van november 1998 zijn verricht op respectievelijk 4 en 5 november, dus na aanvang van het hoogwater, rond de piekafvoer. Alle peilingen van december 1998 tot en met juni 1999 kunnen dus worden gebruikt voor de bepaling van het gemiddelde. De bodempeilingen van december 1999 is op het gehele traject verricht op 17 december, dus ruim voor de hoogwaterpiek. De meting van 7 januari 2000 valt kort na de hoogwaterperiode, maar verondersteld wordt dat dit lang genoeg na de piekafvoer is om het effect van de baggerwerkzaamheden te hebben laten verdwijnen, wat door het beeld van de bodempeiling wordt bevestigd. Alle beschikbare metingen van 2000 kunnen worden gebruikt voor de bepaling van het gemiddelde.

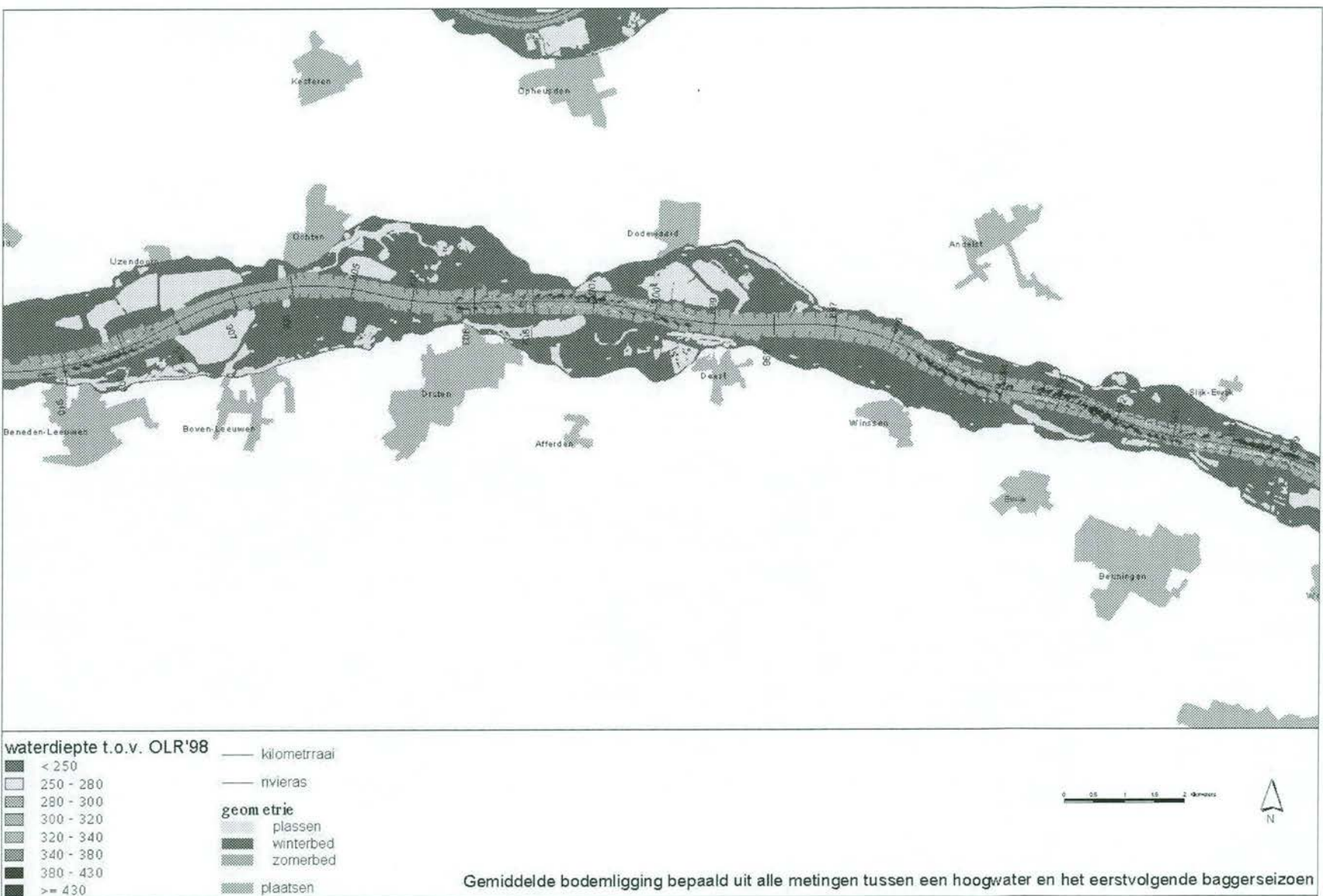
Het gemiddelde van de bodemligging uit de metingen tussen een hoogwater en aanvang van baggerwerkzaamheden wordt voor Dodewaard-Druten dus berekend uit de metingen van maart tot en met juli 1998, met uitzondering van de bodempeiling van mei, december 1998 tot en met juni 1999 en januari tot en met mei 2000. Dit betreffen in totaal 15 bodempeilingen.

Beneden-Leeuwen

In 1999 is er op het traject Beneden-Leeuwen gebaggerd van 13 juli tot en met 26 augustus en van 29 september tot en met 14 oktober. De laatste bodempeiling voor aanvang van de baggerwerkzaamheden is de peiling van 15 juni 1999.

De bodempeilingen van november 1998 is verricht op 6 november, dus kort na het optreden van de hoogwaterpiek. De bodempeiling vertoont een beeld met een groot aantal, zij het nog relatief kleine, ondieptes in de vaargeul, zodat wordt aangenomen dat het effect van de baggerwerkzaamheden al vrijwel nihil is. Alle peilingen van november 1998 tot en met juni 1999 kunnen dus worden gebruikt voor de bepaling van het gemiddelde. De bodempeilingen van december 1999 is verricht op 20 december, dus tijdens de eerste val van de hoogwaterperiode en voor de hoogwaterpiek. Alle beschikbare metingen van 2000 kunnen wel worden gebruikt voor de bepaling van het gemiddelde.

Het gemiddelde van de bodemligging uit de metingen tussen een hoogwater en aanvang van baggerwerkzaamheden wordt voor Beneden-Leeuwen dus berekend uit de metingen van maart tot en met juni 1998, november 1998 tot en met juni 1999 en januari tot en met mei 2000. Dit betreffen in totaal 16 bodempeilingen.

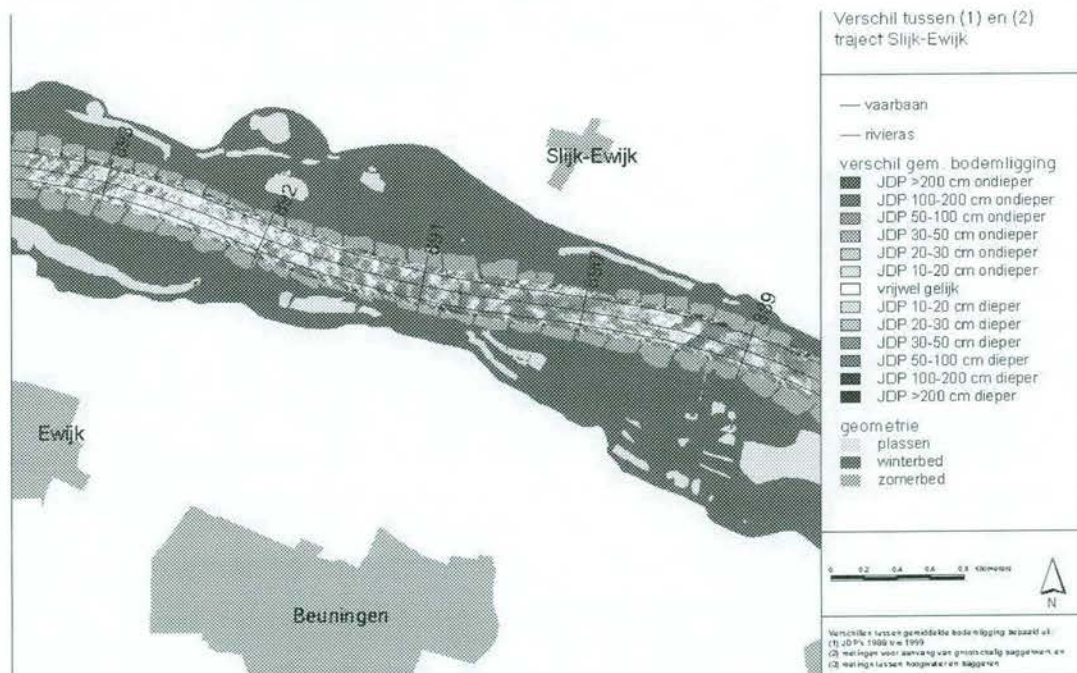


figuur 2: Gemiddelde mb98-00 (tussen hoogwater en baggeren)

Bijlage D Verschillen tussen de berekende tijdsgemiddelde bodemliggingen per traject

Slijk-Ewijk

Het traject Slijk-Ewijk bestaat vanaf het begin van het traject uit een bocht naar links tot kmr. 890,5, een crossing en een bocht naar rechts van kmr. 891,0 tot en met kmr. 892,1, die direct gevolgd wordt door een bocht naar links. Het gedeelte van het traject Slijk-Ewijk waarvoor de verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98 kunnen worden bepaald loopt van kmr. 888,7 tot en met kmr. 893,5. Deze verschillen worden weergegeven in figuur 1.

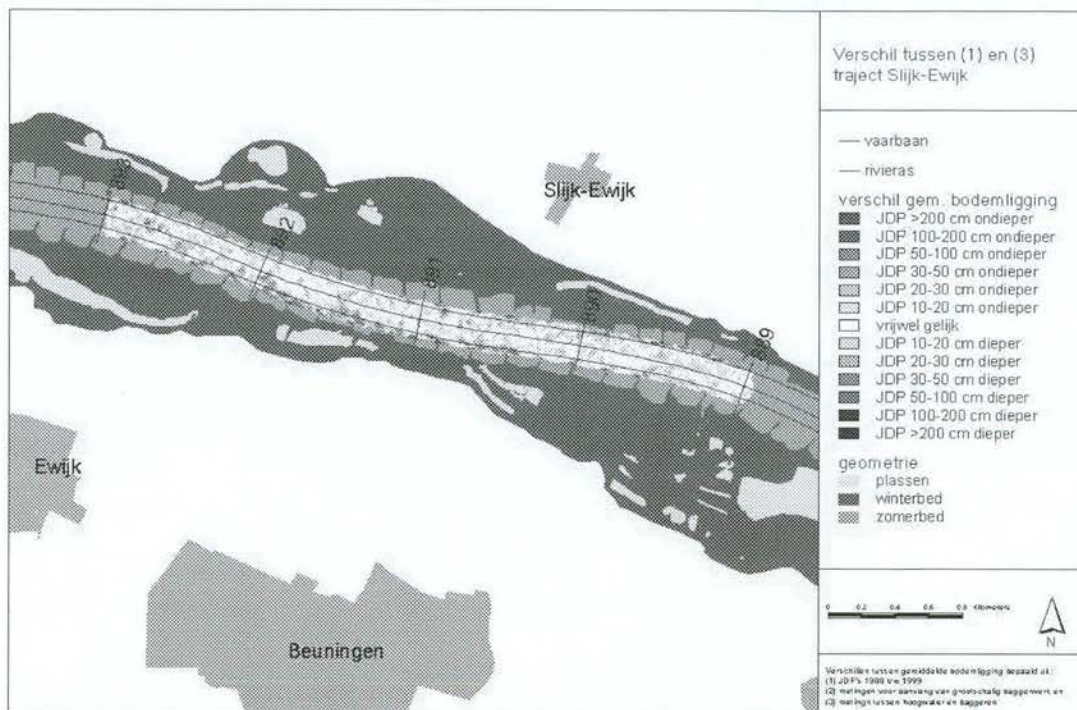


figuur 1: Verschil tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98 voor Slijk-Ewijk

Over het gehele traject heeft 17,7% een vrijwel gelijke waarde in beide gemiddelden. Voor 71,7 % van traject ligt het gemiddelde JDP dieper dan het gemiddelde mb98; voor 10,6 % ondieper. Het gedeelte waarover het gemiddelde JDP vrijwel overal dieper is, loopt tot kmr.

893,1; op het traject tot kmr. 892,1 is dit verschil het grootst. Op het laatste gedeelte van het traject wisselen ondiepere en diepere delen elkaar af. Over het gehele traject zijn de erosiekuilen rond de kribkoppen in het gemiddelde JDP ondieper dan in het gemiddelde mb98. Het verhang in de bochten is voor beide gemiddelden ongeveer even groot. De crossing in het gemiddelde JDP is dieper dan de crossing in het gemiddelde mb98. De verschillen zijn niet goed te verklaren. Wellicht speelt een rol dat het gemiddelde mb98 buiten het traject van kmr. 890,8 tot en met 892,9 enkel gebaseerd is op de meting van maart 1998.

In figuur 2 worden de verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 voor Slijk-Ewijk getoond.



figuur 2: Verschil tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 voor Slijk-Ewijk

De verschillen zijn berekend over het gehele traject Slijk-Ewijk: van kmr. 889,0 tot en met kmr. 893,0. Het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 liggen voor 51,7 % van het traject op vrijwel gelijke diepte. Voor 32,0% van het traject is het gemiddelde JDP dieper dan het gemiddelde mb98-00; voor 16,3% ondieper. Wederom zijn vrijwel alle erosiekuilen in het gemiddelde JDP ondieper dan in het gemiddelde mb98-00. In het beeld van de verschillen tussen de gemiddelden lijken de geometrische kenmerken van het traject naar voren te komen: zowel rond kmr. 890,1 tot kmr. 890,4 en rond kmr. 892,5 tot kmr. 892,7 treden crossings op. De eerste crossing toont vrijwel geen verschillen tussen de beide gemiddelden; de tweede crossing is dieper in het gemiddelde JDP dan in het gemiddelde mb98-00. De hier aangeduide crossings komen qua locatie niet overeen met de crossings volgens de definitie van de ME's; de tweede crossing komt in de definitie niet eens voor. Voor de eerste twee bochten is het dwarsverhang in het gemiddelde JDP groter dan in het gemiddelde mb98-00: de buitenbocht is dieper; de binnenbocht ondieper. Voor de derde bocht zijn de verschillen tussen beide gemiddelden verwaarloosbaar klein.

De berekende verschillen kunnen gedeeltelijk door de uitgevoerde baggerwerkzaamheden worden verklaard: in 1998 is er sediment teruggestort aan de rechter zijde van de rivier van kmr. 889,3 tot kmr. 890,8, van kmr. 890,9 tot kmr. 891,1, van kmr. 892,5 tot kmr. 892,6 en van 892,7 tot kmr. 892,8. Aan de linker zijde van de rivier is sediment teruggestort van kmr. 891,1 tot kmr. 891,3 en van kmr. 891,4 tot kmr. 892,3. Het grootste gedeelte van het teruggestorte materiaal is in de diepe buitenbochten teruggestort, wat het verschil in verhang voor de eerste twee bochten verklaart, maar niet de afwezigheid van een dergelijk verschil in de laatste bocht. Door terug te storten in de eerste diepe buitenbocht wordt het dwarsverhang afgevlakt, waardoor wellicht onterecht de aanwezigheid van een crossing wordt verondersteld. Opmerkelijk is echter dat teruggestort is aan de rechter zijde van vrijwel de gehele eerste crossing volgens de definitie van de ME's, evenals aan het begin van de ondiepe binnenbochten.

De verschillen tussen de drie gemiddelden wordt gekarakteriseerd door de statistische gegevens voor het gehele traject:

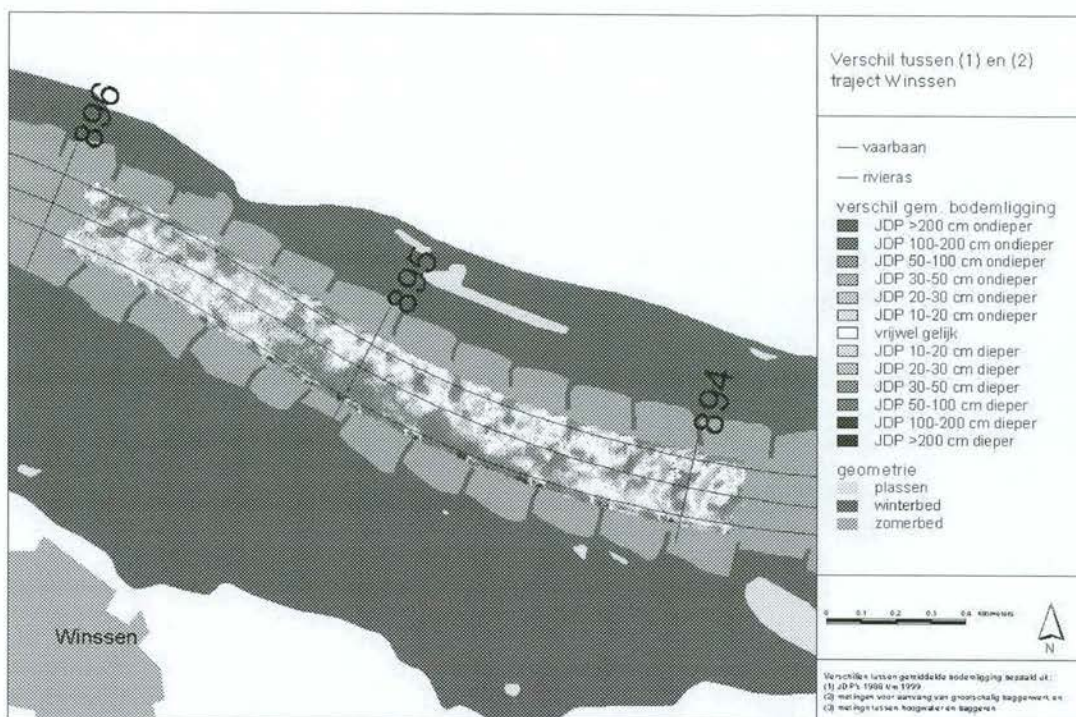
| | verschil JDP - mb98 | verschil JDP - mb98-00 |
|------------------------|---------------------|------------------------|
| minimum verschil (m) | -4,73 | -3,84 |
| maximum verschil (m) | 4,72 | 2,88 |
| gemiddeld (m) | -0,233 | -0,0343 |
| standaardafwijking (m) | 0,387 | 0,239 |

tabel 1 : Verschillen voor Slijk-Ewijk tussen de gemiddelden JDP, mb98 en mb98-00

Hieruit blijkt dat het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 over het geheel veel kleinere verschillen ten opzichte van elkaar vertonen dan het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98.

Winssen

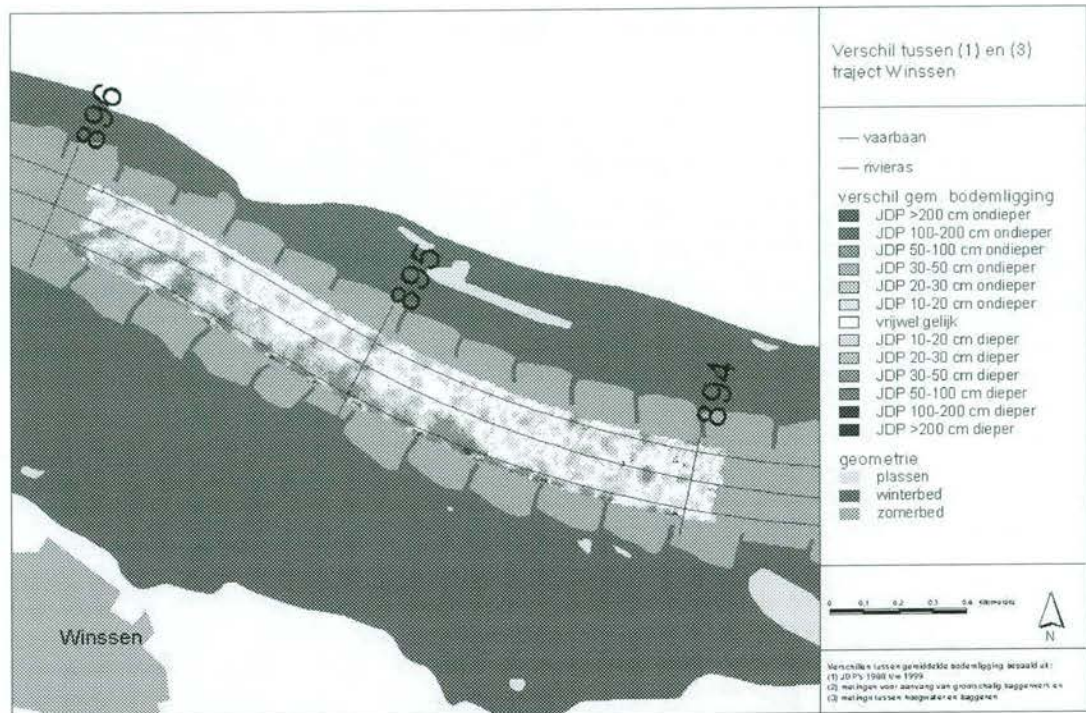
Het traject Winssen bestaat uit een bocht naar rechts, van kmr. 894,2 tot kmr 895,5, omringd door twee crossings. De verschillen tussen de gemiddelden kunnen worden bepaald voor kmr. 893,9 tot en met 895,9. Voor het traject Winssen zijn de verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98 weergegeven in figuur 3.



figuur 3: Verschil voor Winssen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98

Voor Winssen ligt het gemiddelde JDP voor 71,4% van de cellen dieper dan het gemiddelde mb98 en voor 5,0% ondieper. Van het gehele gridbestand heeft 23,6% van de cellen een waarde die vrijwel gelijk is voor beide gemiddelden. Ondiepere delen doen zich voornamelijk voor in de erosiekuilen rond de kribkoppen. Daarnaast is het gemiddelde JDP op de eerste crossing ondieper dan het gemiddelde mb98. Rond kmr. 895 is het verschil tussen de gemiddelden veel groter in de buitenbocht dan in de binnenbocht; het dwarsverhang in het gemiddelde JDP is groter dan in het gemiddelde mb98. De tweede crossing is voor beide gemiddelden vrijwel even diep.

De verschillen voor het traject Winssen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 zijn te zien in figuur 4.



figuur 4: Verschil voor Winssen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00

In het gemiddelde mb98-00 voor traject Winssen heeft 42,2% van de cellen een waarde die vrijwel gelijk is aan het gemiddelde JDP. Het gemiddelde JDP is voor 42,7% dieper en voor 15,1% ondieper dan het gemiddelde mb98-00. In het beeld van het verschil komen de crossings duidelijk naar voren, echter, niet op gelijke wijze: de eerste crossing is ondieper in het gemiddelde JDP; de tweede dieper. Vanaf kmr. 894,6 tot aan het einde van het traject heeft de rechter zijde van de rivier een vrijwel gelijke of kleinere diepte in het gemiddelde JDP; de linker zijde een vrijwel gelijke of grotere diepte. Het dwarsverhang in het gemiddelde JDP is dus steiler dan in het gemiddelde mb98-00. Vanaf het begin van het traject tot aan kmr. 894,6 wisselen ondiepere en diepere delen elkaar af. De erosiekuilen zijn over het gehele traject echter ondieper in het gemiddelde JDP.

In 1998 is er sediment teruggestort aan de rechteroever van kmr. 894,1 tot kmr. 894,3 - het einde van de crossing en begin van de binnenbocht -; aan de linkeroever van kmr. 894,0 tot 894,2 - de crossing -, en van kmr. 894,3 tot kmr. 896,1 - de diepe buitenbocht en de tweede crossing -. De zo gecreëerde ondieptes komen overeen met het beeld van de verschillen tussen beide gemiddelden. De verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 worden dus (mede) veroorzaakt door het baggeren en teruggestorten van sediment in de vaargeul.

Voor het traject Winssen worden de verschillen tussen de drie gemiddelden gekarakteriseerd door:

| | verschil JDP - mb98 | verschil JDP - mb98-00 |
|------------------------|---------------------|------------------------|
| minimum verschil (m) | -3,16 | -4,05 |
| maximum verschil (m) | 2,69 | 3,67 |
| gemiddeld (m) | -0,203 | -0,0836 |
| standaardafwijking (m) | 0,258 | 0,230 |

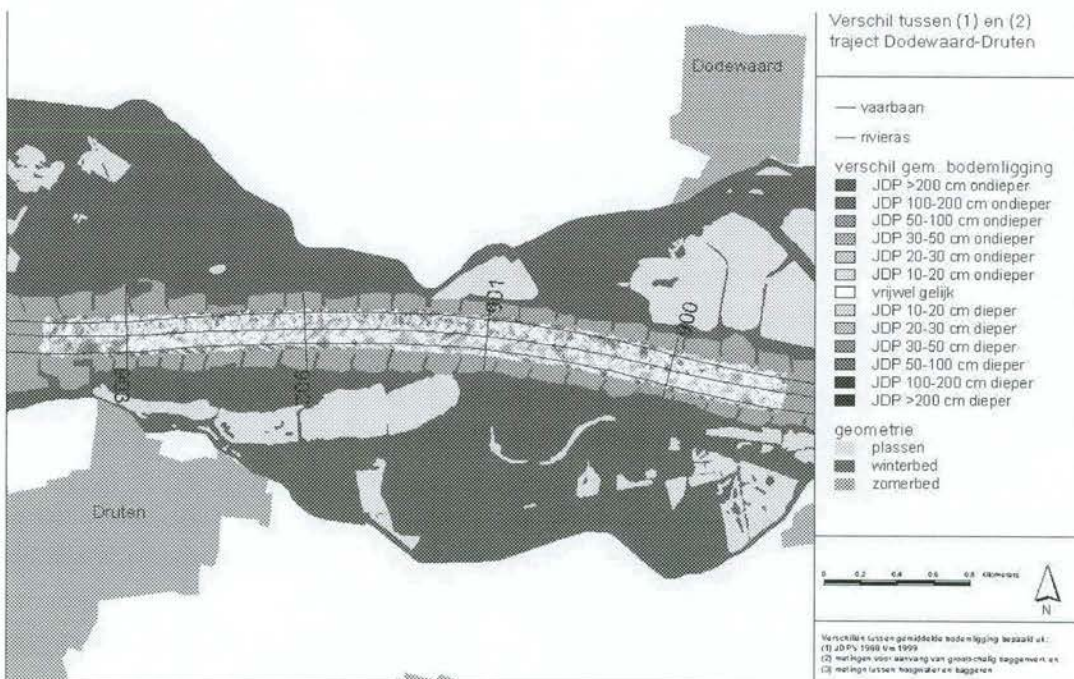
tabel 2: Verschillen voor Winssen tussen de gemiddelden JDP, mb98 en mb98-00

Hieruit blijkt dat het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 gemiddeld en qua standaardafwijking kleinere verschillen ten opzichte van elkaar vertonen dan het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98, maar dat het maximale en minimale verschil groter is.

Dodewaard-Druten

Het traject Dodewaard-Druten bestaat uit een bocht naar rechts tot kmr. 900,4, direct gevolgd door een bocht naar links tot kmr. 902,0, een crossing en een tweede bocht naar rechts vanaf kmr. 902,8. De verschillen tussen de gemiddelden kunnen worden bepaald van kmr. 899,4 tot en met kmr. 903,4.

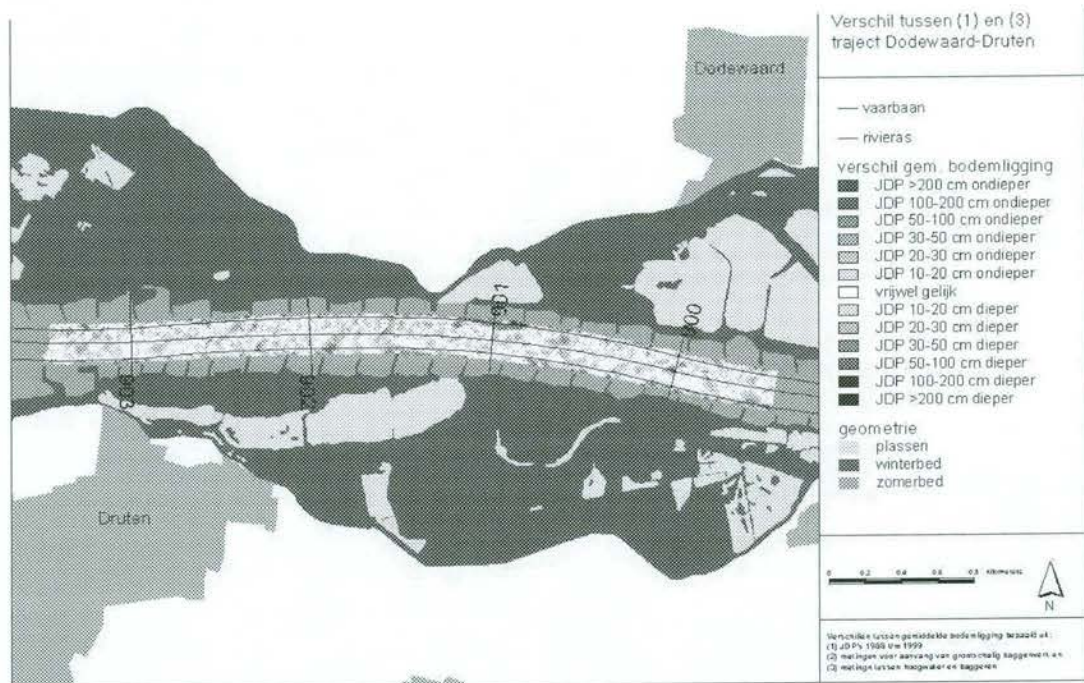
Voor het traject Dodewaard-Druten zijn de verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98 weergegeven in figuur 5.



figuur 5: Verschil voor Dodewaard-Druten tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98

De beide gemiddelden zijn voor 37,9% van het traject vrijwel gelijk aan elkaar. Het gemiddelde JDP is voor 34,1% dieper dan het gemiddelde mb98; voor 28,0% ondieper. De locaties waar het gemiddelde op basis van JDP veel ondieper is dan het gemiddelde mb98 vallen samen met de erosiekuilen rond de kribkoppen. Tot kmr. 900,0 zijn de verschillen kleiner dan op de rest van het traject. De verschillen op de bochten zijn tegenstrijdig: de eerste bocht vertoont vrijwel geen verschillen; de verschillen in de tweede bocht duiden op een flauwer dwarsverhang in het gemiddelde JDP, terwijl de laatste bocht een steiler verhang in het gemiddelde JDP heeft dan in het gemiddelde mb98.

In figuur 6 worden de verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 getoond.



figuur 6: Verschil voor Dodewaard-Druten tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00

Over het gehele traject is het verschil tussen de gemiddelden voor 45,7% verwaarloosbaar klein. Het gemiddelde JDP ligt voor 32,2% dieper dan het gemiddelde mb98-00; voor 22,0% ondieper. Met name rond kmr. 901,0 is de diepte in het gemiddelde JDP veel groter dan in het gemiddelde mb98-00. In het gemiddelde mb98-00 lijkt het diepere deel van de buitenbocht dan ook teveel naar het midden van de rivier in plaats van naar de oever te liggen. De plaatsen waar zich een ondieper gemiddelde JDP voordoet, treden wederom op rond de kribkoppen, maar nu ook op de crossing. Alleen de eerste bocht toont een duidelijk verschil tussen beide gemiddelden: in het gemiddelde JDP is het dwarsverhang steiler.

In 1998 is sediment teruggestort aan de rechter oever van kmr. 900,8 tot en met kmr. 902,1; aan de linker oever van kmr. 899,4 tot en met kmr. 900,7 en van kmr. 902,2 tot en met kmr. 903,3, met uitzondering van kmr. 902,4 en kmr. 903,0. Dit is voornamelijk in de diepe buitenbochten, maar ook op een deel van de crossing. De verschillen tussen de gemiddelden kunnen hierdoor deels worden verklaard; onduidelijk is echter waardoor de tweede en derde bocht geen duidelijk verschil in dwarsverhang tussen beide gemiddelden vertonen.

De verschillen tussen het gemiddelde JDP en de twee multi-beam gemiddelden worden gekarakteriseerd door:

| | verschil JDP - mb98 | verschil JDP - mb98-00 |
|------------------------|---------------------|------------------------|
| minimum verschil (m) | -2,29 | -2,38 |
| maximum verschil (m) | 3,10 | 2,94 |
| gemiddeld (m) | -0,00984 | -0,02791 |
| standaardafwijking (m) | 0,261 | 0,211 |

tabel 3: Verschillen voor Dodewaard-Druten tussen de gemiddelden JDP, mb98 en mb98-00

De gemiddelde verschillen de standaardafwijking zijn weer kleiner voor het verschil tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 dan voor het verschil tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98. Het maximale en minimale verschil wijken zeer weinig van elkaar af voor beide vergelijkingen van de gemiddelden.

Beneden-Leeuwen

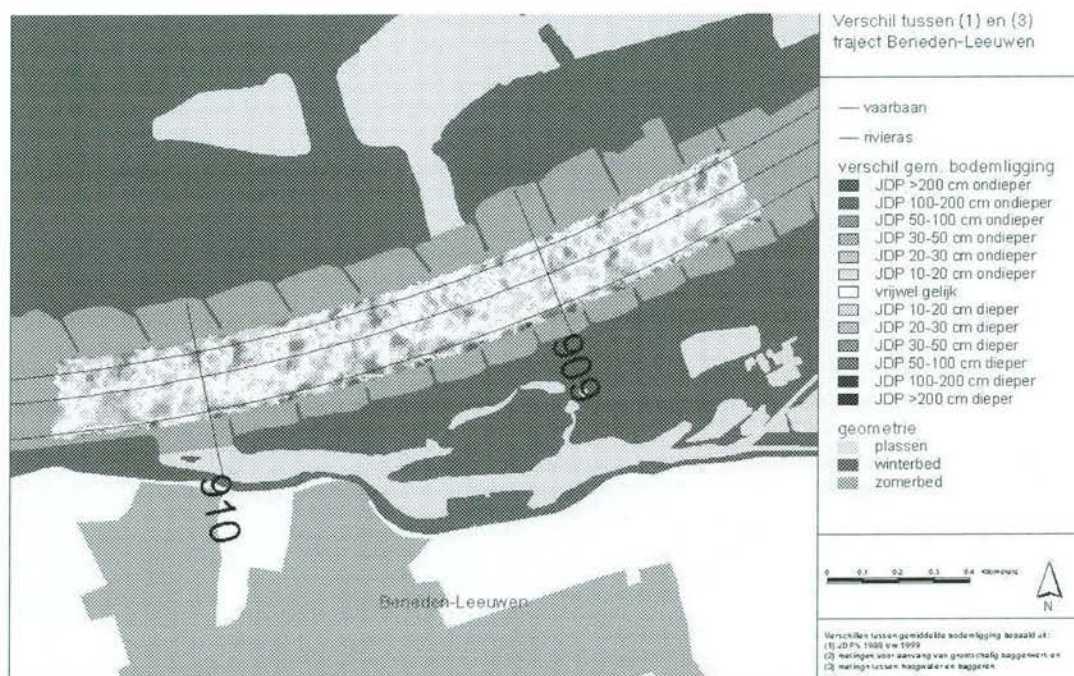
Het traject Beneden-Leeuwen bestaat uit een crossing tot kmr. 908,7, gevolgd door een bocht naar rechts. De berekende gemiddelden beslaan het gebied van kmr. 908,4 tot en met kmr. 910,4. De verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98 wordt weergegeven in figuur 7.



figuur 7: Verschil voor Beneden-Leeuwen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98

Het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98 zijn voor 36,3% van het traject vrijwel aan elkaar gelijk. Het gemiddelde JDP is voor 49,0% van het traject dieper dan het gemiddelde mb98; voor 14,7% ondieper. De gedeelten waar het gemiddelde JDP dieper is doen zich vooral voor vanaf kmr. 910,2 tot aan het einde van het traject, maar ook de crossing is dieper in het gemiddelde JDP. De erosiekuilen zijn over het gehele traject ondieper in het gemiddelde JDP ondieper dan in het gemiddelde mb98. De bocht heeft in beide gemiddelden een vergelijkbaar dwarsverhang.

In figuur 8 worden de verschillen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 getoond.



figuur 8: Verschil voor Beneden-Leeuwen tussen het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00

Het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 hebben voor 41,5% van het traject een vergelijkbare ligging. Voor 36,4% van het traject ligt het gemiddelde JDP dieper dan het gemiddelde mb98-00; voor 22,1% ondieper. Op de crossing en aan het einde van de buitenbocht - vanaf kmr. 910,1 - is het gemiddelde JDP ondieper dan het gemiddelde mb98-00; van kmr. 909,4 tot kmr. 910,1 is het gemiddelde JDP overwegend dieper; voor de overige delen wisselen diepere en ondiepere delen elkaar af. De erosiekuilen in het gemiddelde JDP zijn met name aan de linkeroever ondieper dan in het gemiddelde mb98-00. Het dwarsverhang van de bocht verschilt nauwelijks tussen beide gemiddelden.

In 1998 is er sediment gestort aan de linker zijde van de Waal van kmr. 908,3 tot kmr. 909,3 en van kmr. 910,1 tot kmr. 910,2. Het terugstorten van sediment zou een verflauwing van de dwarshelling kunnen veroorzaken, maar dit is niet waargenomen. Het blijkt dat het overwegend diepere deel van het gemiddelde JDP ten opzichte van het gemiddelde mb98-00 vrijwel samenvalt met het ongestoorde deel wat betreft het terugstorten van sediment.

In tabel 4 worden de karakteristieken van de verschillen tussen de drie gemiddelden weergegeven.

| | verschil JDP - mb98 | verschil JDP - mb98-00 |
|------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| minimum verschil (m) | -1,76 | -1,96 |
| maximum verschil (m) | 2,95 | 3,11 |
| gemiddeld (m) | -0,0809 | -0,0353 |
| standaardafwijking (m) | 0,274 | 0,230 |

tabel 4: Verschillen voor Beneden-Leeuwen tussen de gemiddelden JDP, mb98 en mb98-00

Hieruit blijkt dat ook in dit geval het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98-00 gemiddeld en qua standaardafwijking kleinere verschillen ten opzichte van elkaar vertonen dan het gemiddelde JDP en het gemiddelde mb98, maar dat het maximale en minimale verschil iets groter is.

Bijlage E Bepaling van het dwarsverhang in de bochten en vergelijking met de theorie

Het dwarsverhang is bepaald door per strook van 100 meter het verschil te berekenen tussen de tijdsgemiddelde bodemligging ten opzichte van OLR Noord en Zuid van de rivieras. Twee berekeningen zijn gemaakt:

1. een berekening voor het gehele gridbestand: van het gemiddelde van de JDP's binnen de normaallijnen;
2. een berekening voor het gedeelte binnen de vaargeul.

Het dwarsverhang is vervolgens als volgt bepaald:

$$dz_b = (z_{b,gem,Noord} - z_{b,gem,Zuid}) \frac{B}{l} \quad (D.1)$$

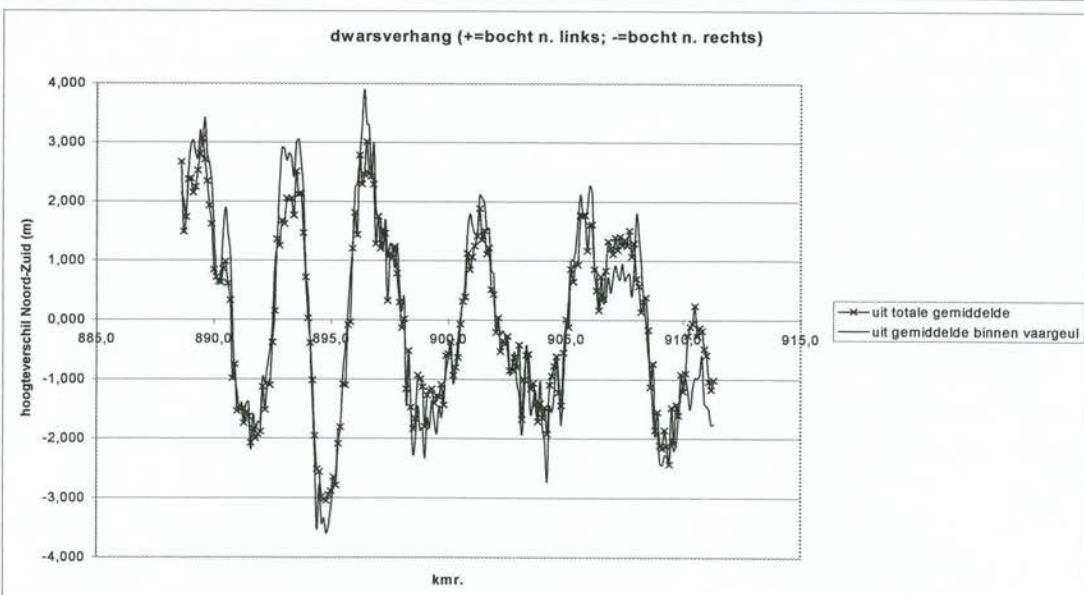
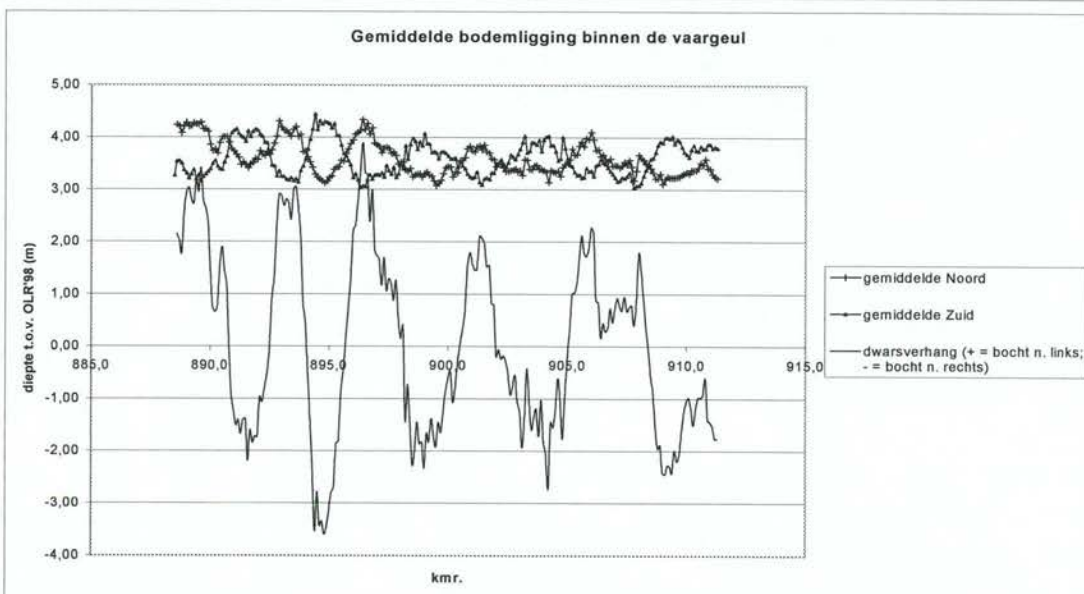
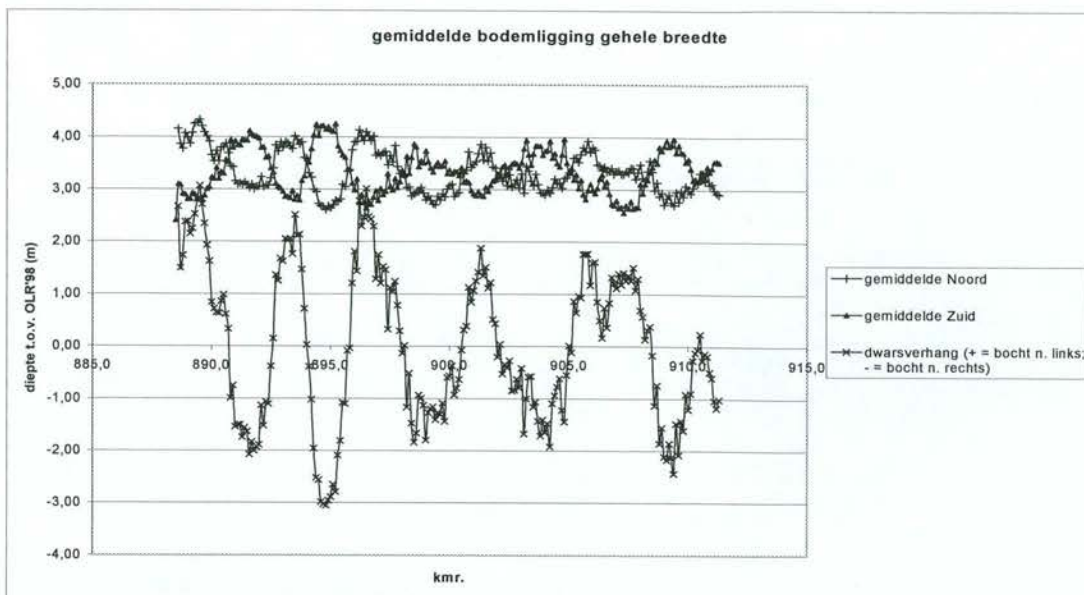
| | | |
|-------------|--|-----|
| dz_b | - dwarsverhang | [m] |
| $z_{b,gem}$ | - gemiddelde bodemligging | [m] |
| B | - breedte van de rivier | [m] |
| l | - afstand tussen de twee berekende gemiddelden | [m] |

De breedte van de rivier is gelijk aan 260 meter.

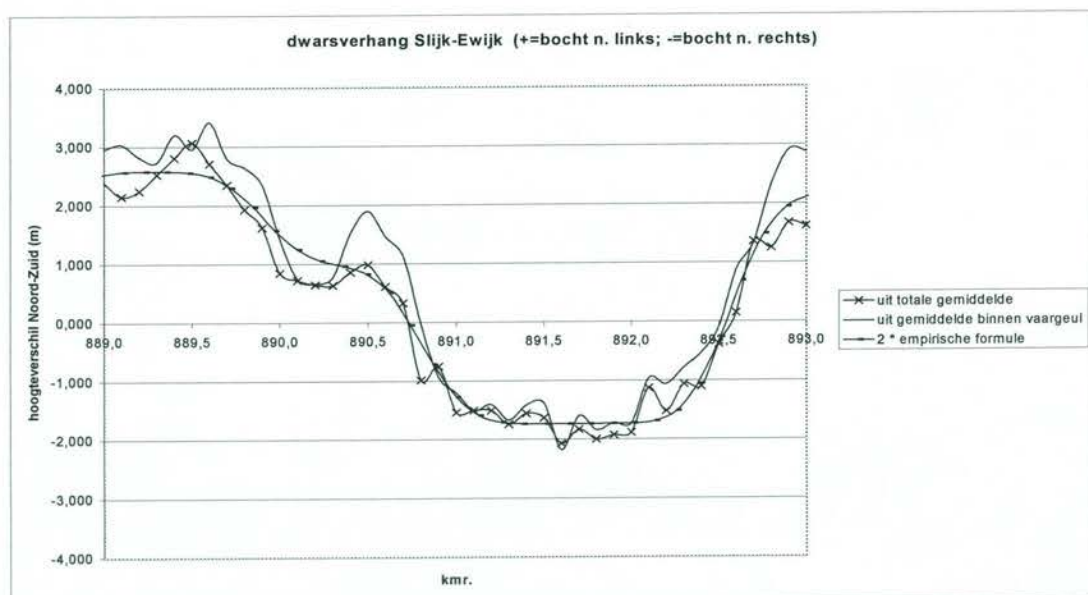
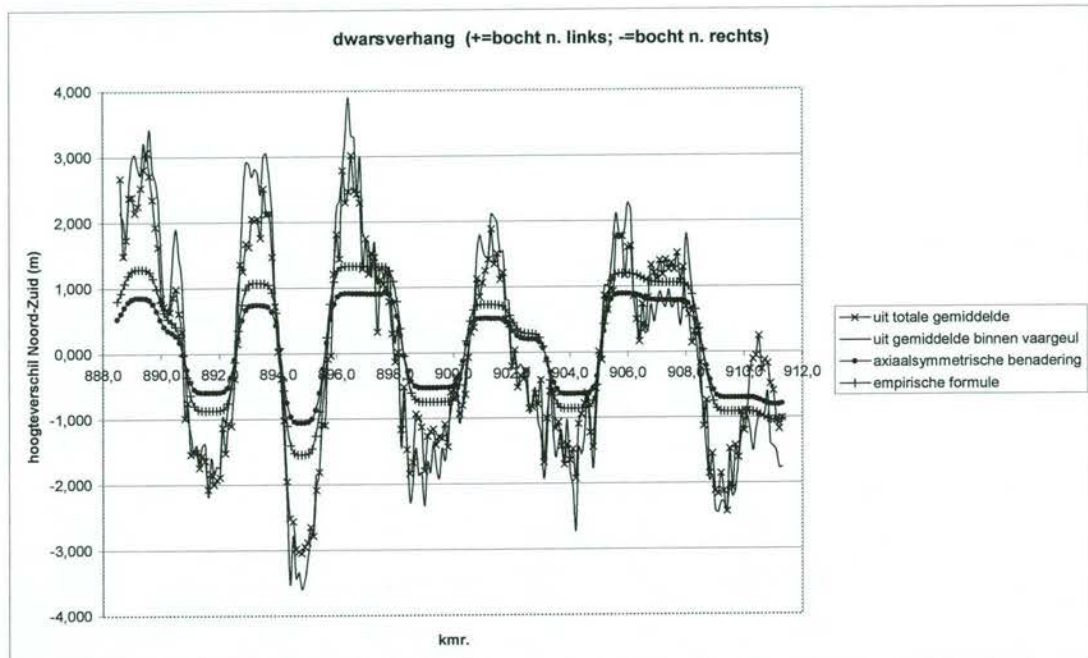
Aangenomen wordt dat het berekende gemiddelde per zijde overeenkomt met de gemiddelde diepte in het midden van die zijde. De afstand tussen de twee berekende gemiddelden wordt nu in geval 1 berekend door de oppervlakte waarover door ArcView het gemiddelde per zijde heeft berekend (uitvoer van ArcView) te delen door 200: bekend is dat het gemiddelde bepaald is over een strook van 100 meter lengte en aangezien de gemiddelden de diepte in het midden van de zijde zijn is de breedte de helft van de breedte van de strook. Deze afstand is een benadering van de werkelijke afstand, doordat de 100 meter stroken niet parallel aan elkaar zijn. In het 2e geval is de afstand tussen de twee berekende gemiddelden gelijk aan 85 meter, omdat bekend is dat de vaargeul 170 meter breed is.

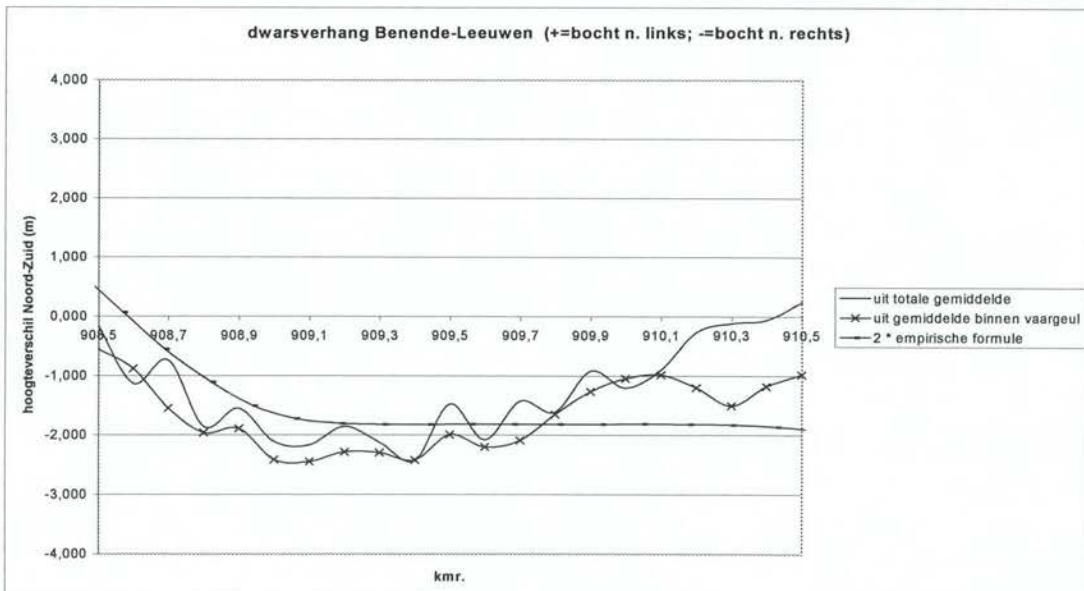
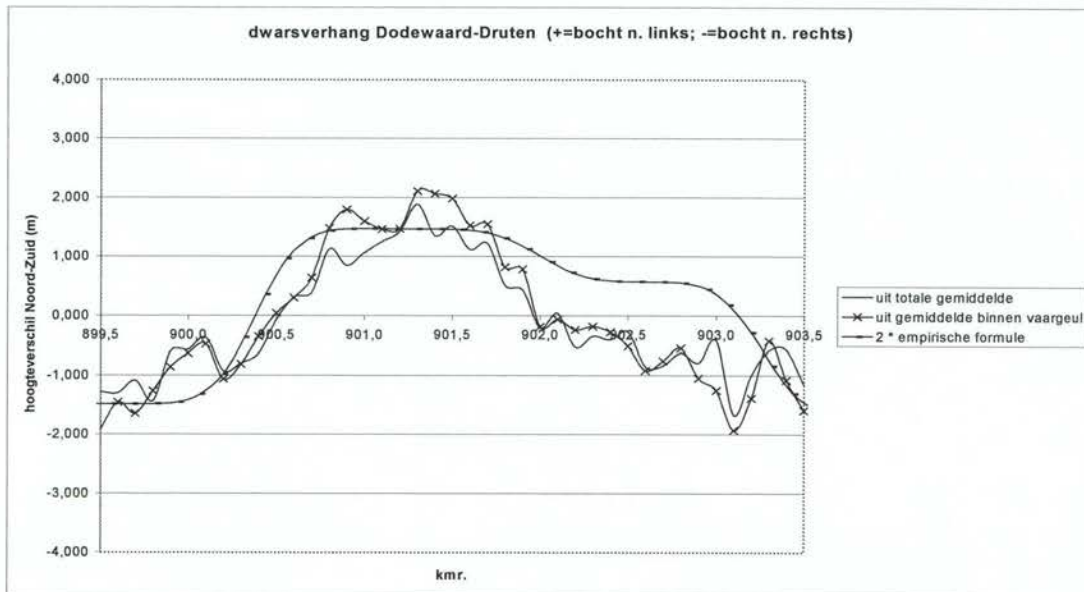
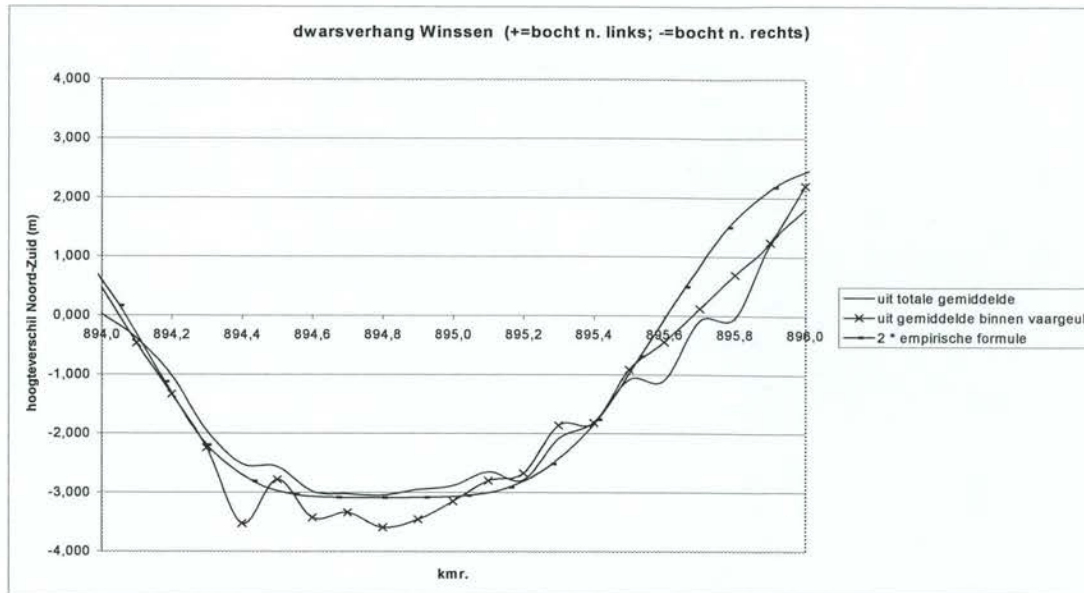
In de volgende figuren wordt achtereenvolgens getoond:

- het gemiddelde Noord en Zuid en het dwarsverhang voor geval 2;
- het verschil in dwarsverhang tussen geval 1 en 2;
- de vergelijking van het dwarsverhang uit ArcView met het dwarsverhang uit formules (6) en (9);
- de vergelijking per traject uit de Proef Morfologie van het dwarsverhang uit ArcView met het dwarsverhang uit formule (9) vermenigvuldigd met een factor 2.



Het verhang voor geval 1, dus voor het gemiddelde binnen de normaallijnen geeft waarschijnlijk een afwijking ten opzichte van het werkelijke verhang omdat de afstand tussen het gemiddelde Noord en het gemiddelde Zuid niet goed bepaald kan worden. De afwijking zal het grootste zijn daar waar de kromming van de bocht het grootste is. Het verhang voor geval 2 - het gemiddelde binnen de vaargeulbelijning - geeft waarschijnlijk een onderschatting van het verhang, omdat de vaargeul het relatief diepe gedeelte is, juist buiten de point bars.



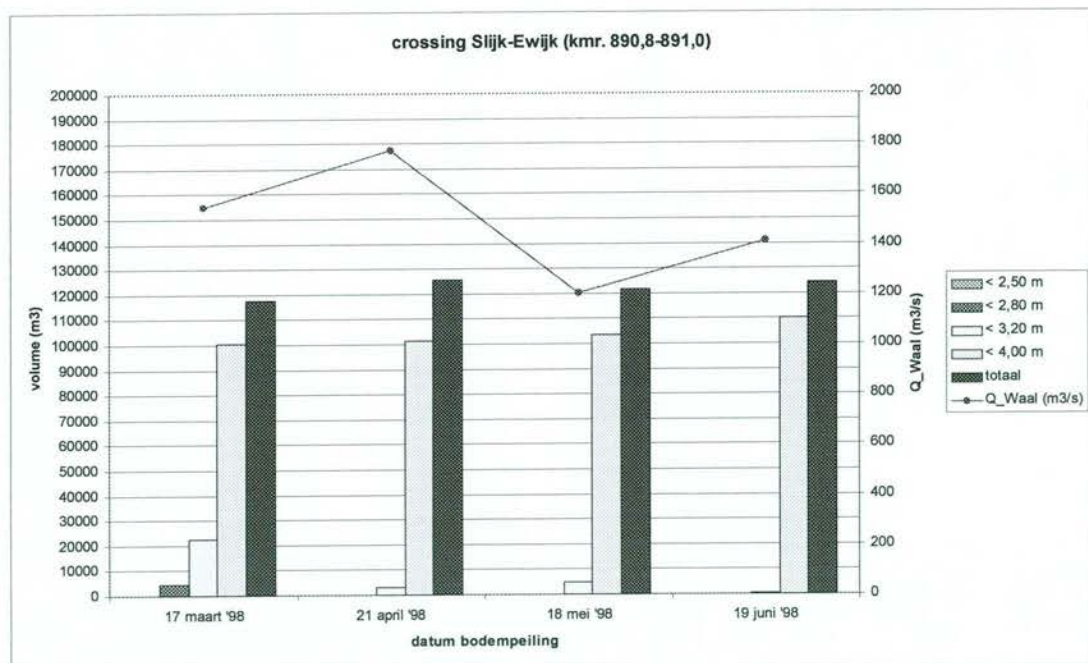


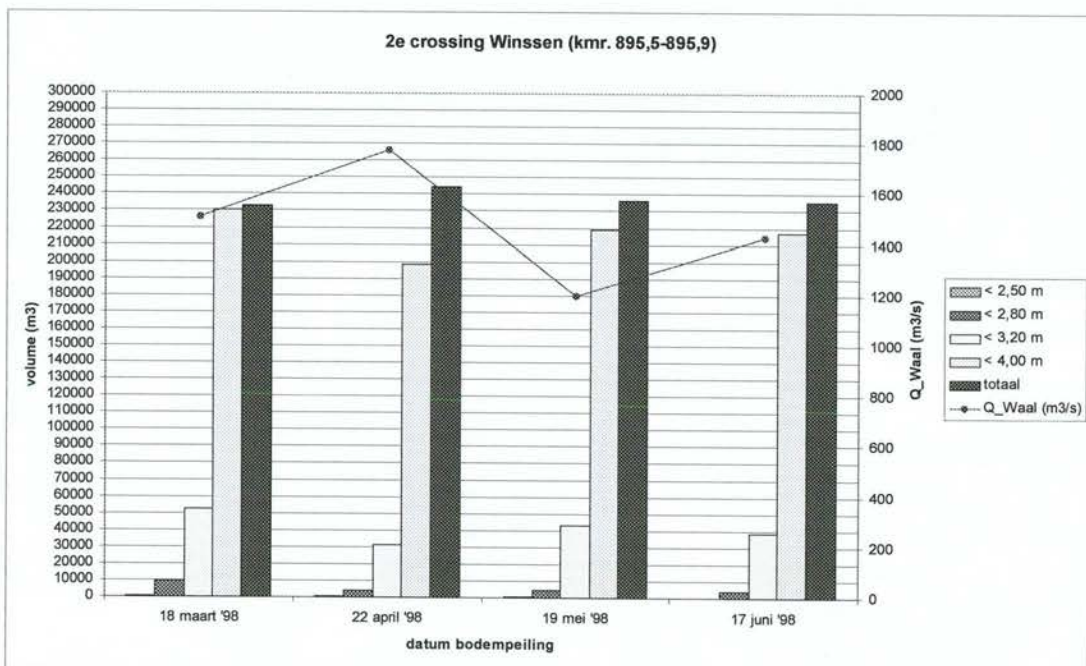
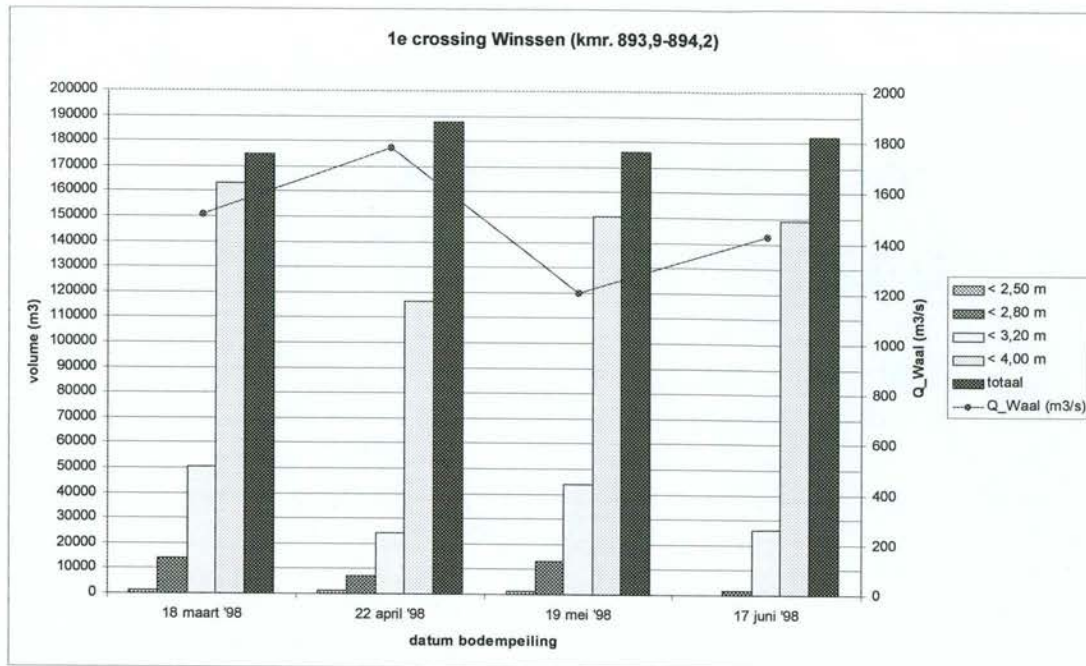
Bijlage F Analyse van het volume van de crossings bij variërende afvoer.

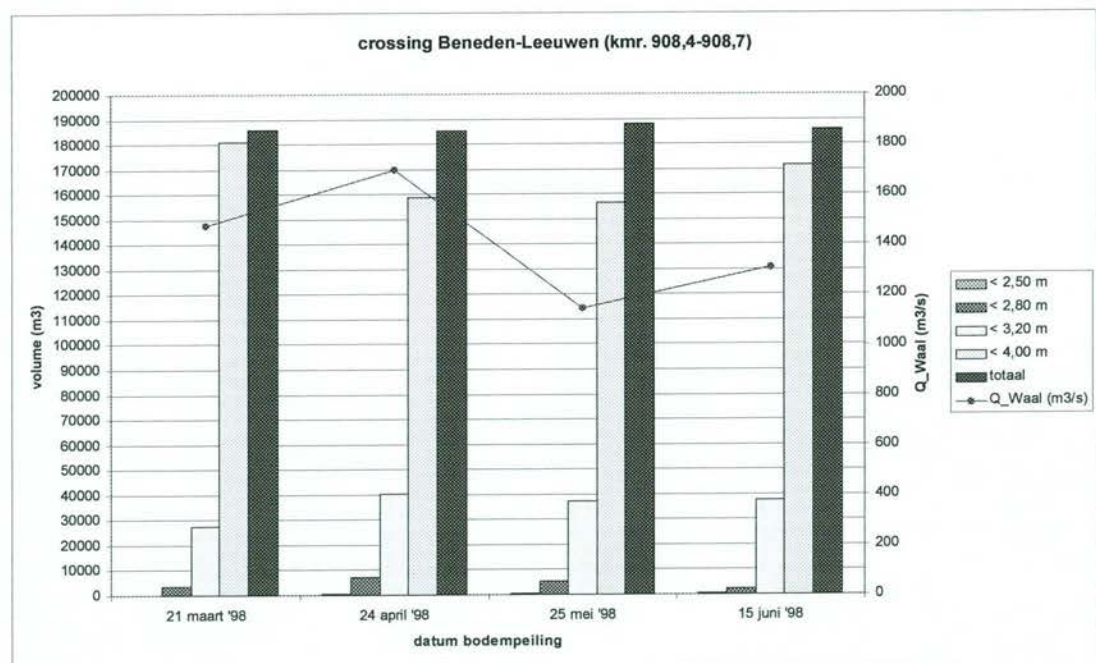
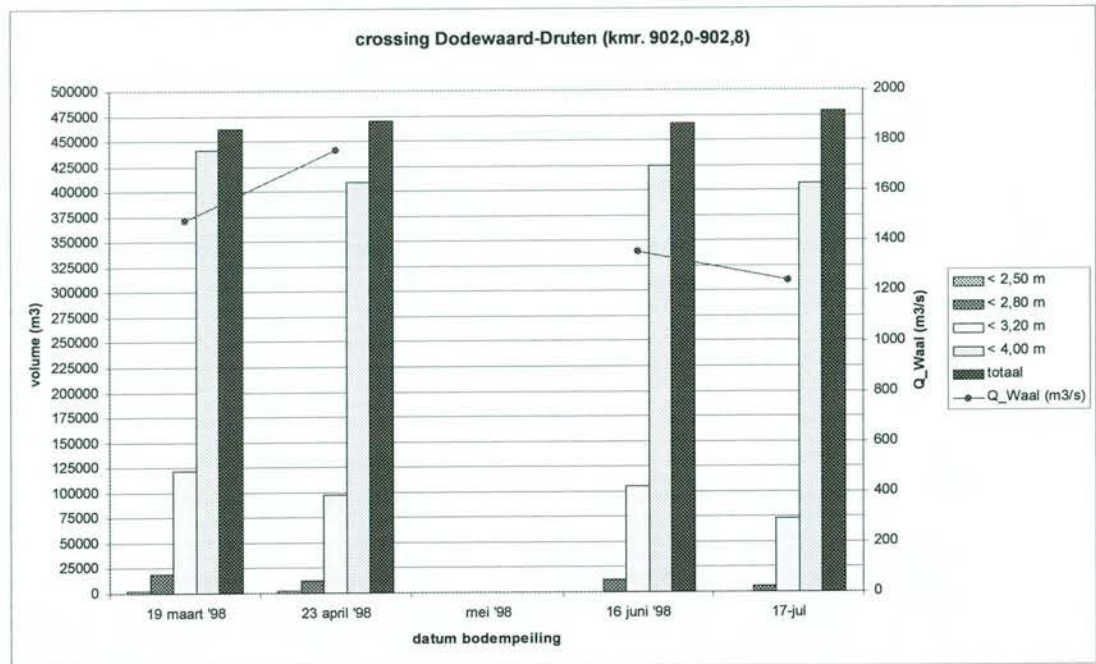
Achtereenvolgens worden de figuren weergegeven voor:

1. Verandering van het volume per crossing ten opzichte van verschillende vlakken en in de tijd;
2. Verandering van het volume boven een bepaald vlak voor alle crossings en in de tijd
3. Percentage van het volume per diepteklasse ten opzichte van OLR voor een bepaalde maand en per crossing;
4. Relatie tussen het volume van een crossing boven het vlak OLR-2,80 meter en respectievelijk de gemiddelde afvoer en het verschil in afvoer tussen twee opeenvolgende bodempeilingen.

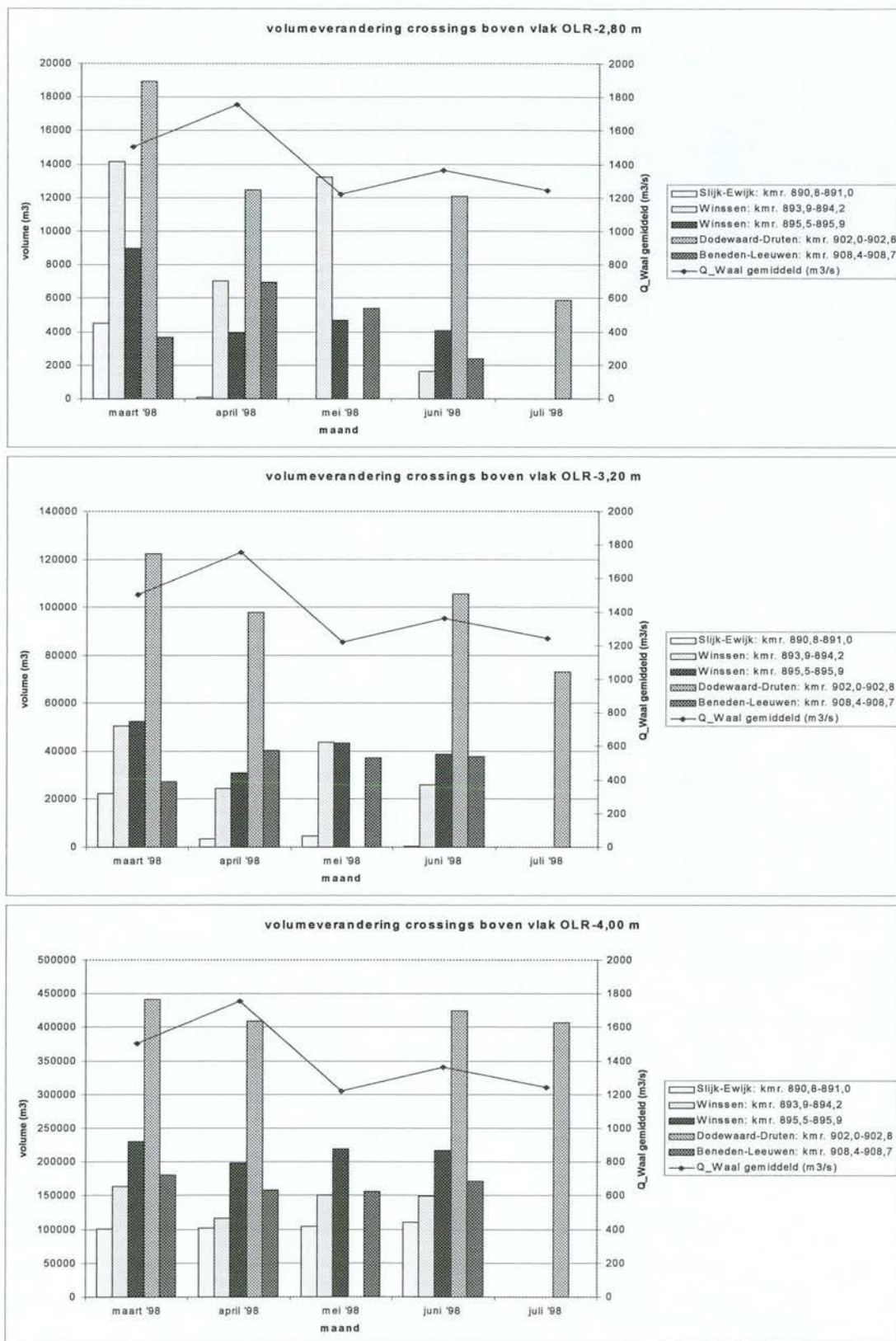
I. Verandering van het volume per crossing ten opzichte van verschillende vlakken en in de tijd



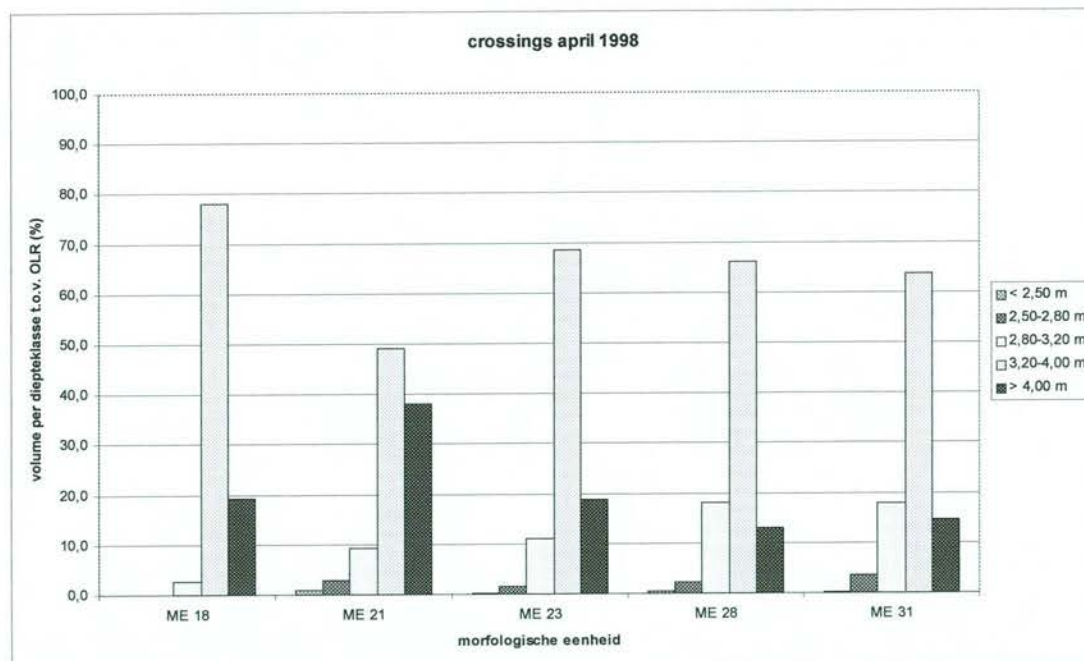
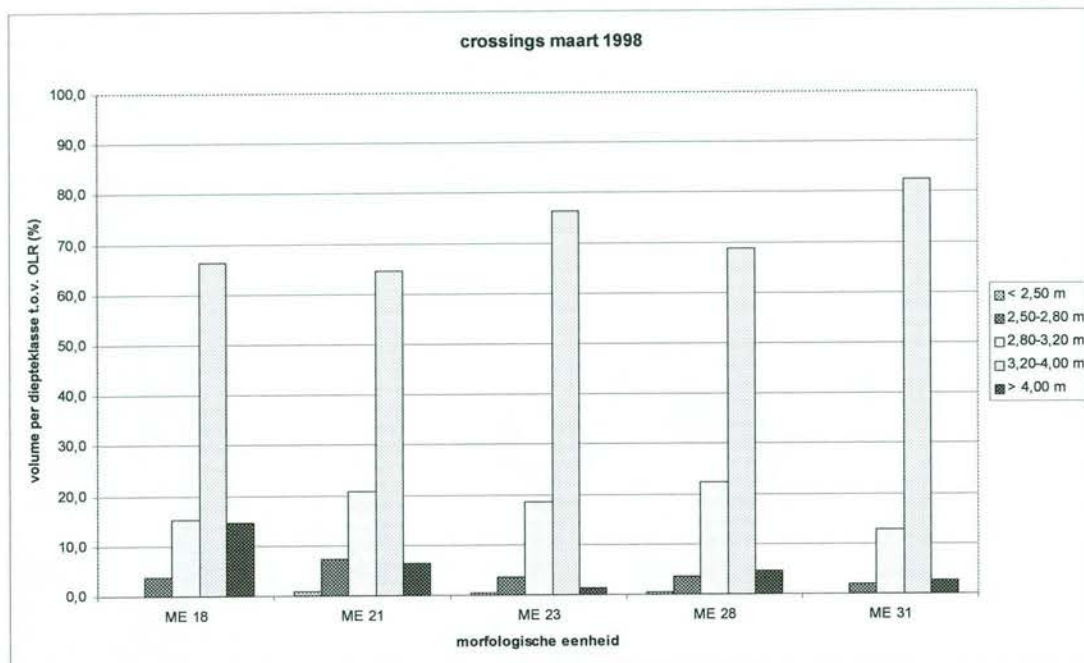


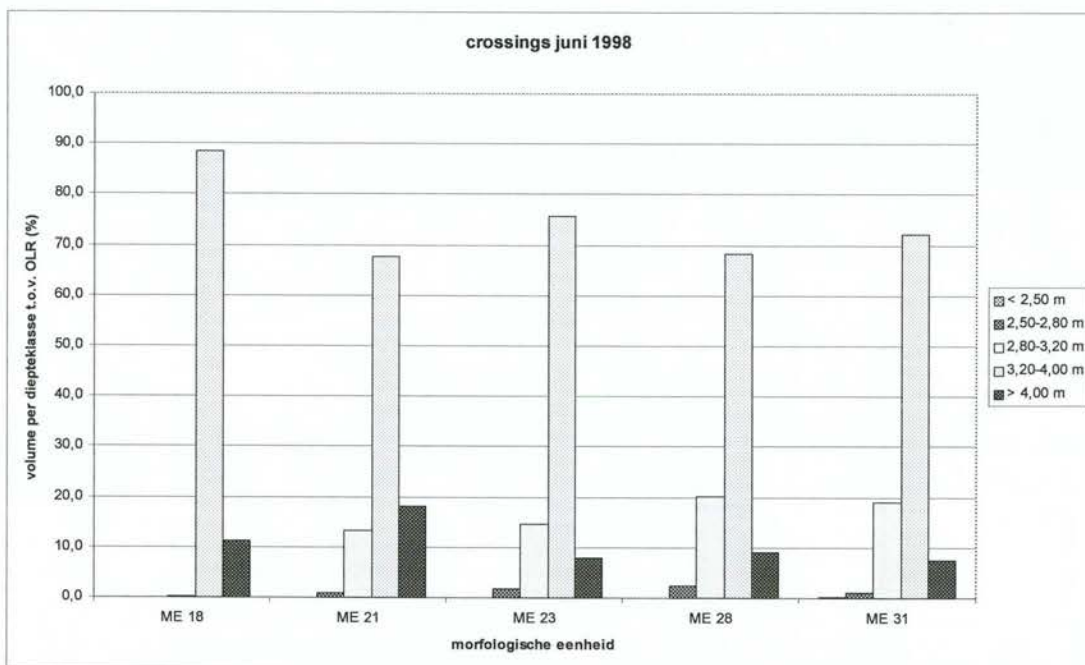
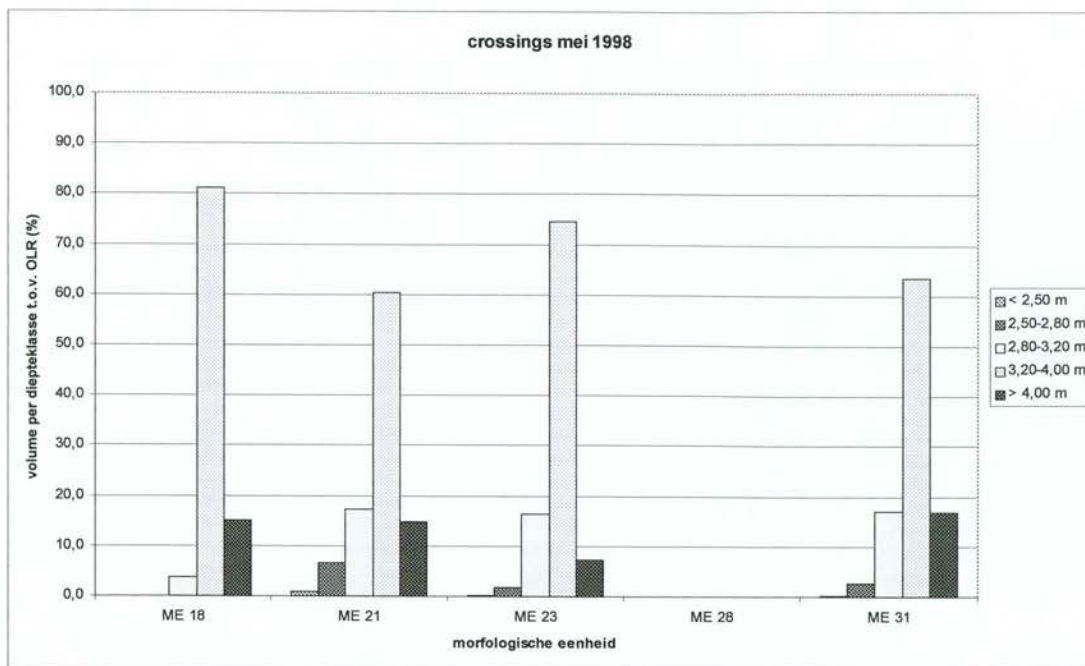


2. Verandering van het volume boven een bepaald vlak voor alle crossings en in de tijd

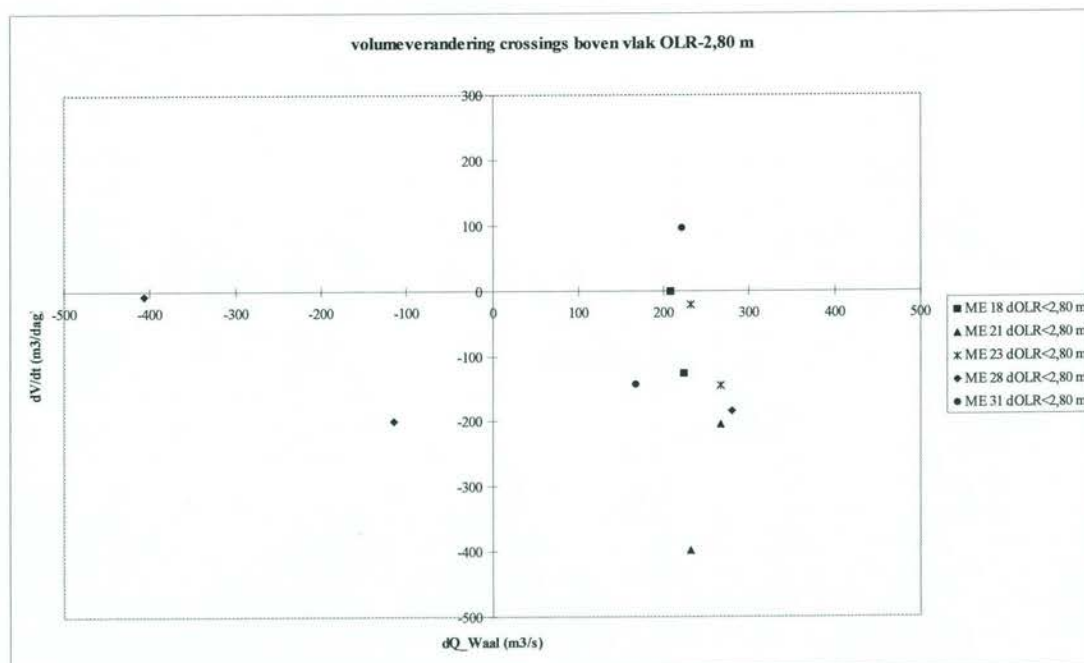
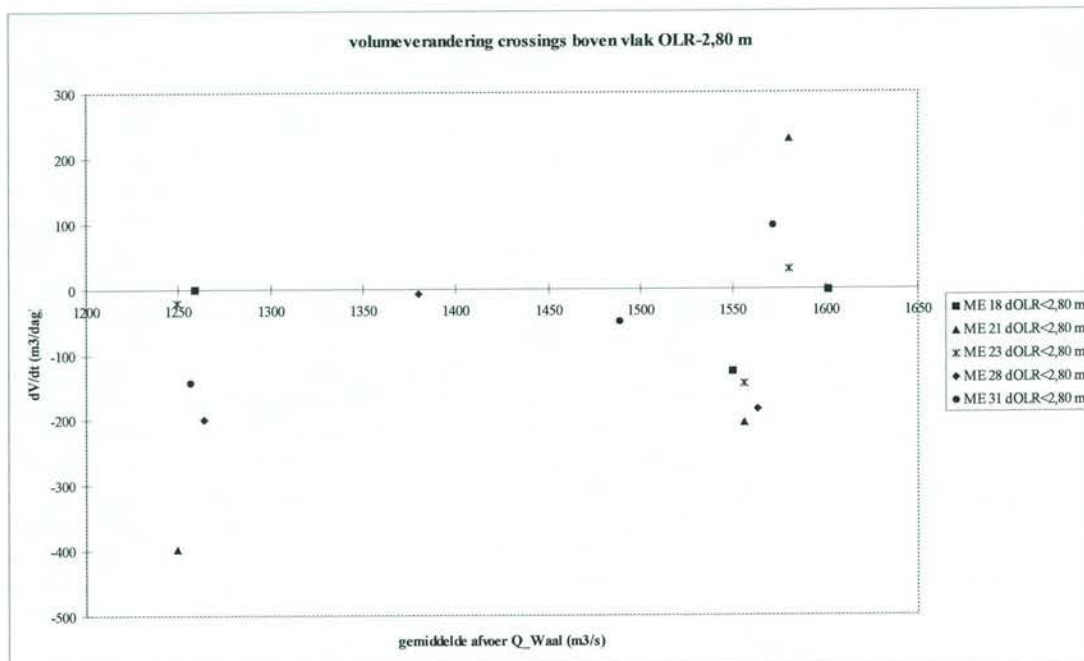


3. Percentage van het volume per diepteklasse ten opzichte van OLR voor een bepaalde maand en per crossing





4. Relatie tussen het volume van een crossing boven het vlak OLR-2,80 meter en respectievelijk de gemiddelde afvoer en het verschil in afvoer tussen twee opeenvolgende bodempeilingen



Bijlage G Analyse van de duinhoogte bij variërende afvoer

Verschillen in uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodempligging tussen Noord en Zuid

De verschillen tussen de beddingvormen aan de noordzijde van de rivieras en aan de zuidzijde van de rivieras per strook van 100 meter lengte zijn op verschillende manieren onderzocht:

- vergelijking per maand en per traject van de absolute waarde van de maximale positieve uitwijking (bult) en de maximale negatieve uitwijking (kuil) aan beide zijden
De maximale hoogte van de bulten blijkt in veel gevallen hoger te zijn dan de maximale diepte van de kuilen;
- vergelijking van de maximale duinhoogte per traject en per zijde voor elke bodempeiling voor aanvang van de baggerwerkzaamheden
De maximale duinhoogte is bepaald door het minimum en het maximum per strook van 100 aan de noord- of zuidzijde op te tellen. De verschillen tussen de gemiddelde hoogte Noord en Zuid komt duidelijk naar voren; de veranderingen van de maximale duinhoogte in de tijd lijken willekeurig.

De tabellen en figuren worden hierna weergegeven.

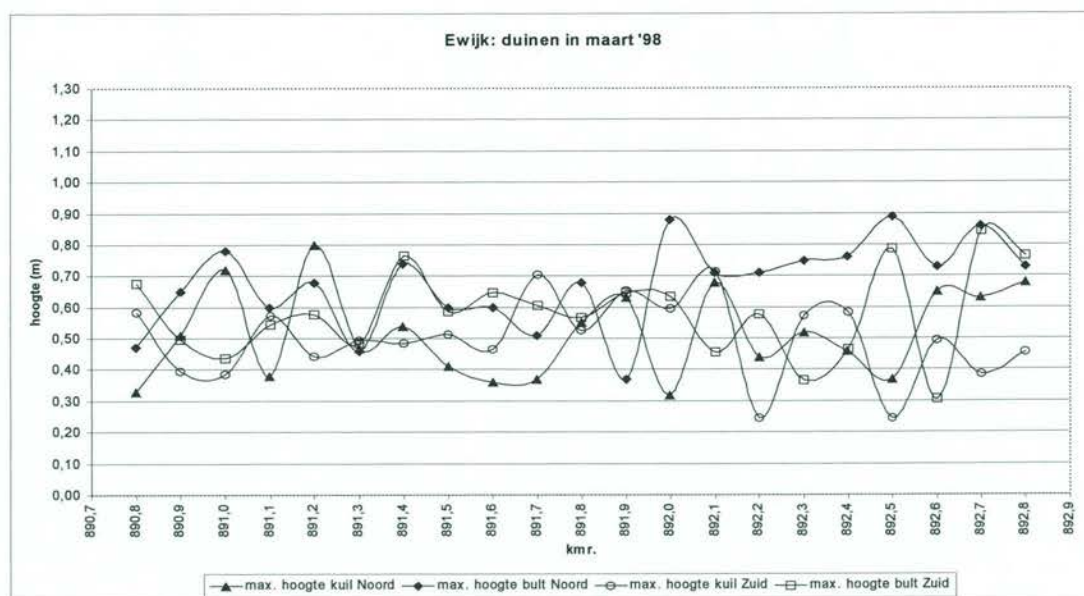
Vergelijking per maand en per traject van de absolute waarde van de maximale positieve uitwijking (bult) en de maximale negatieve uitwijking (kuil) aan beide zijden

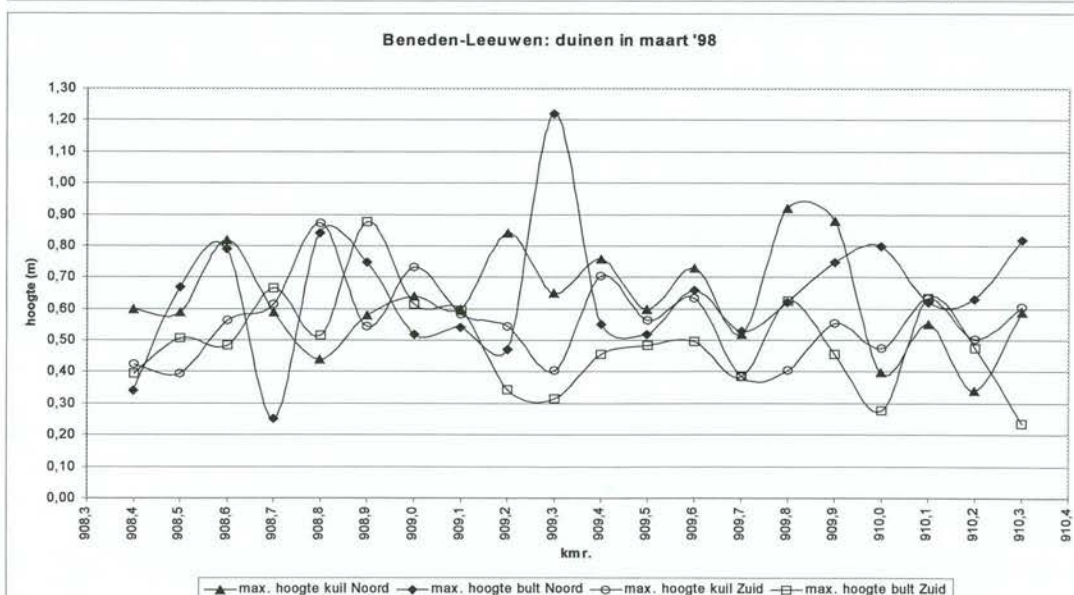
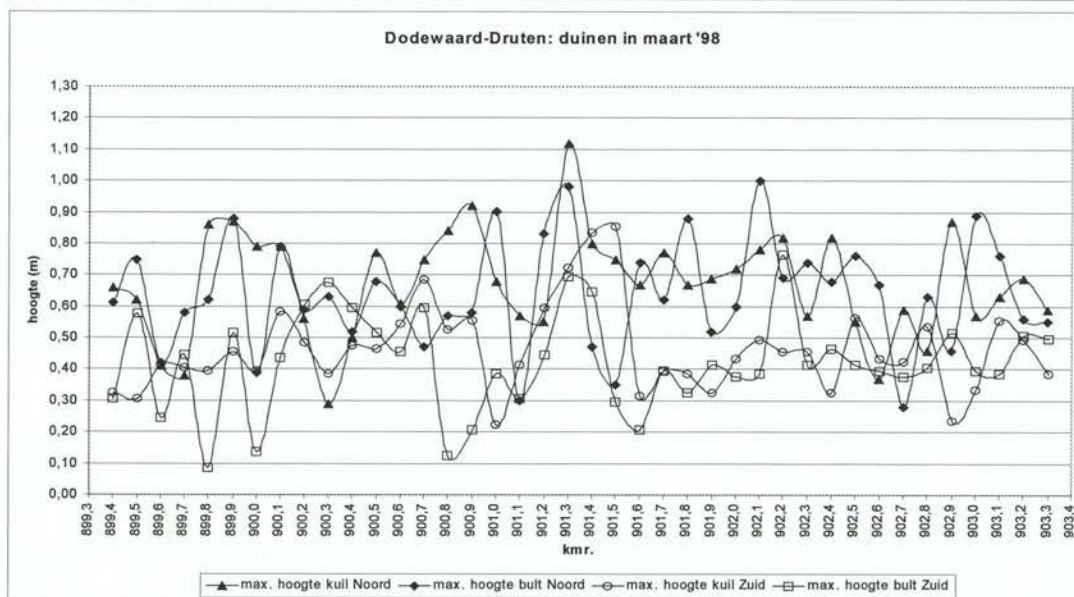
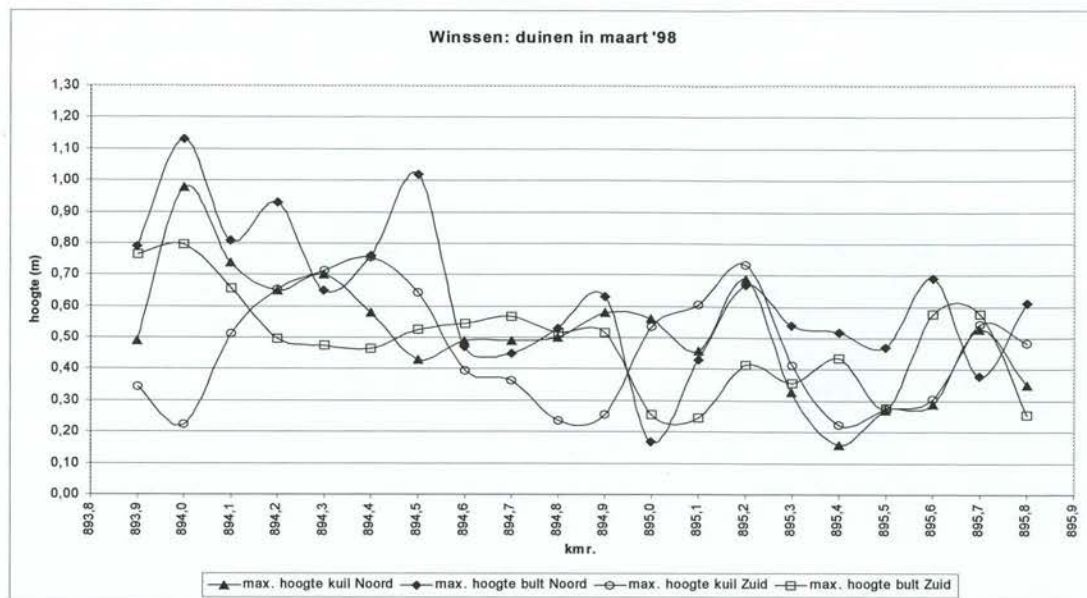
| | maart '98 | | april '98 | | mei '98 | | juni '98 | | juli '98 | |
|---|-----------|-------|-----------|-------|---------|-------|----------|-------|----------|-------|
| | Noord | Zuid | Noord | Zuid | Noord | Zuid | Noord | Zuid | Noord | Zuid |
| $Q_{\text{Waal, gem}} \text{ (m}^3/\text{s)}$ | 2175 | 2175 | 2569 | 2569 | 1482 | 1482 | 1947 | 1947 | 1648 | 1648 |
| Ewijk | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | -0,51 | -0,50 | -0,62 | -0,62 | -0,50 | -0,41 | -0,66 | -0,61 | | |
| minimum | -0,80 | -0,71 | -0,98 | -0,90 | -1,26 | -0,97 | -1,57 | -1,30 | | |
| maximum | -0,32 | -0,24 | -0,36 | -0,36 | -0,21 | -0,12 | -0,32 | -0,26 | | |
| Winssen | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | -0,51 | -0,46 | -0,73 | -0,56 | -0,43 | -0,37 | -0,58 | -0,57 | | |
| minimum | -0,98 | -0,75 | -0,99 | -0,91 | -0,79 | -0,78 | -1,02 | -0,88 | | |
| maximum | -0,16 | -0,22 | -0,41 | -0,30 | 0,03 | -0,02 | -0,21 | -0,25 | | |
| Dodewaard-Druten | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | -0,67 | -0,46 | -0,67 | -0,44 | | | -0,59 | -0,47 | -0,63 | -0,63 |
| minimum | -1,12 | -0,85 | -1,05 | -0,84 | | | -0,93 | -0,74 | -0,91 | -0,91 |
| maximum | -0,29 | -0,22 | -0,29 | -0,19 | | | -0,29 | -0,09 | -0,27 | -0,27 |
| Beneden-Leeuwen | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | -0,63 | -0,56 | -0,67 | -0,58 | -0,62 | -0,48 | -0,70 | -0,60 | | |
| minimum | -0,92 | -0,87 | -0,92 | -0,88 | -0,99 | -0,70 | -1,05 | -0,93 | | |
| maximum | -0,34 | -0,38 | -0,40 | -0,31 | -0,44 | -0,33 | -0,36 | -0,29 | | |
| Totaal | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | -0,60 | -0,49 | -0,67 | -0,53 | -0,51 | -0,42 | -0,62 | -0,55 | | |
| minimum | -1,12 | -0,87 | -1,05 | -0,91 | -1,26 | -0,97 | -1,57 | -1,30 | | |
| maximum | -0,16 | -0,22 | -0,29 | -0,19 | 0,03 | -0,02 | -0,21 | -0,09 | | |

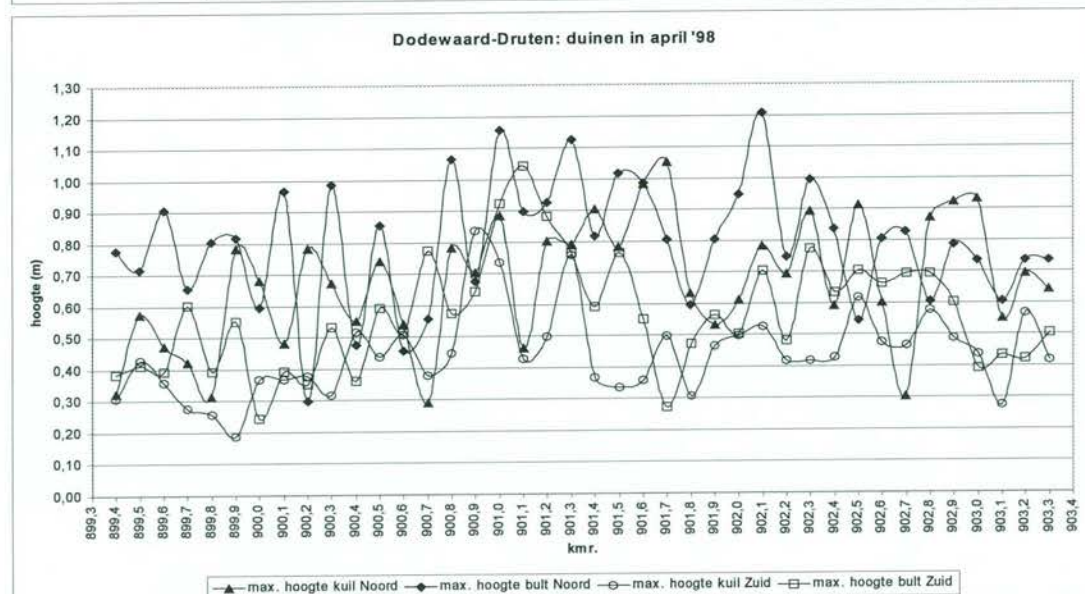
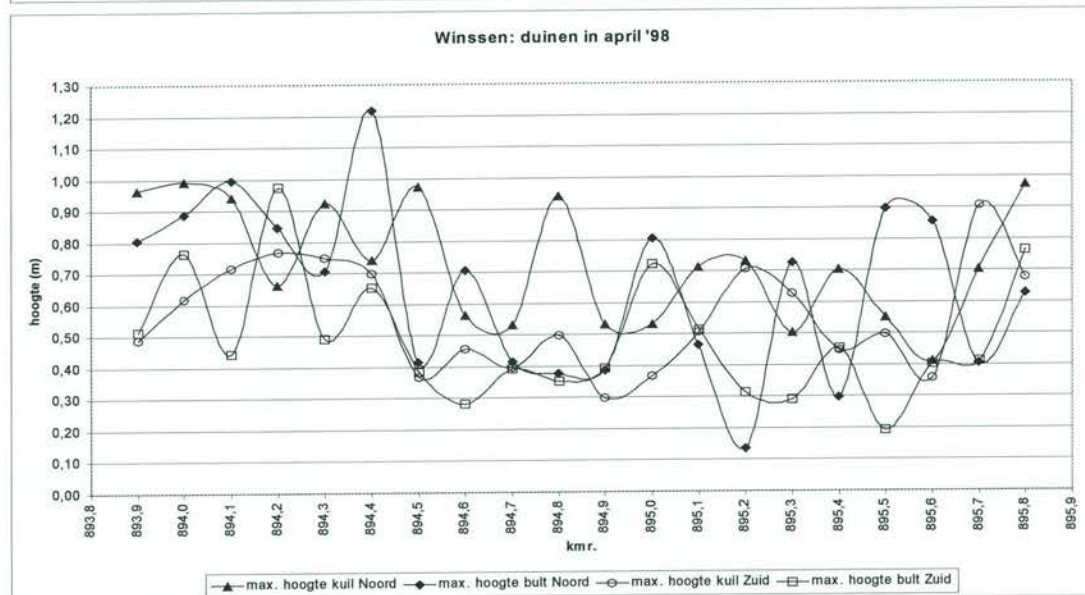
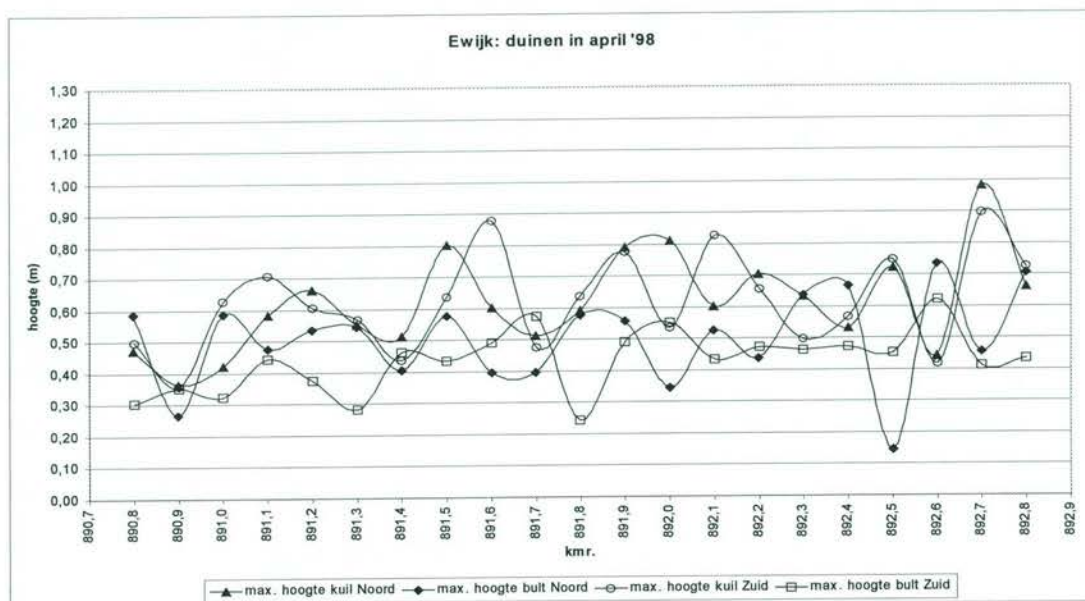
tabel 1: diepte van de kuilen per traject

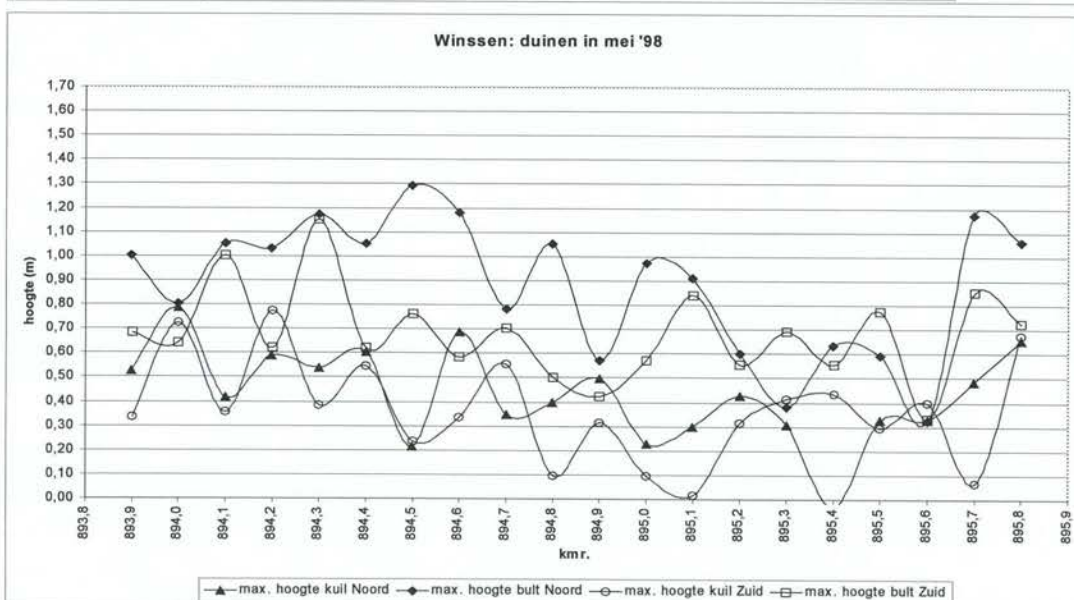
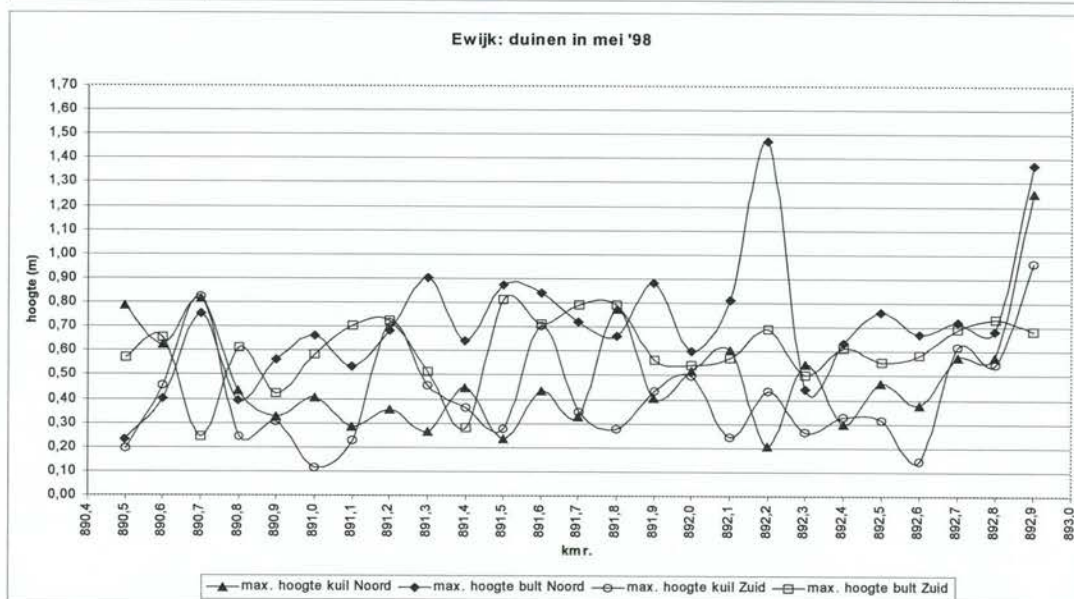
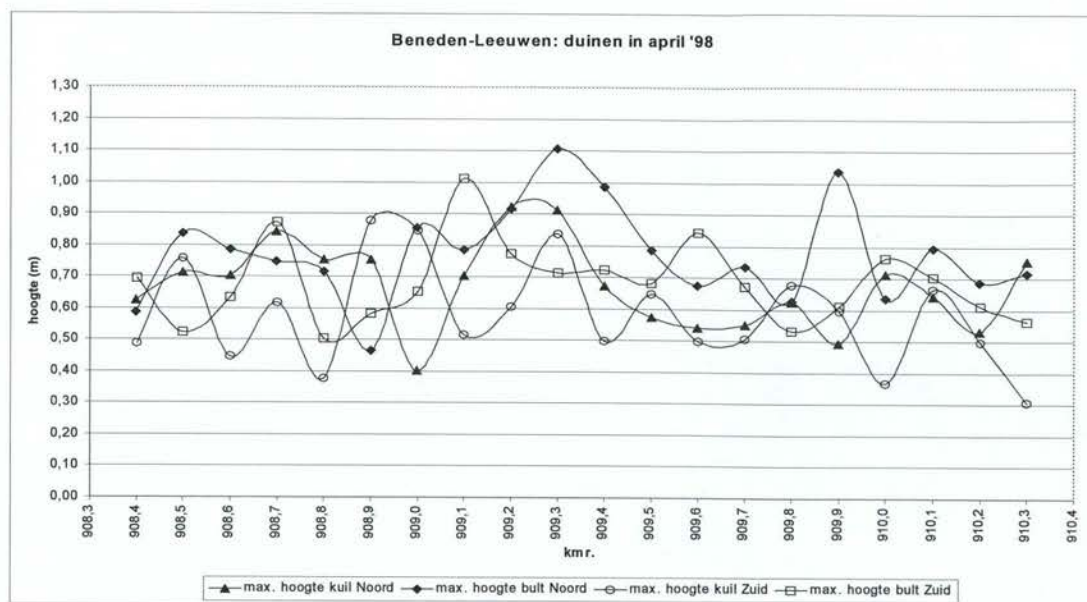
| | maart '98 | | april '98 | | mei '98 | | juni '98 | | juli '98 | |
|---|-----------|------|-----------|------|---------|------|----------|------|----------|------|
| | Noord | Zuid | Noord | Zuid | Noord | Zuid | Noord | Zuid | Noord | Zuid |
| $Q_{\text{Waal, gem}} \text{ (m}^3/\text{s)}$ | 2175 | 2175 | 2569 | 2569 | 1482 | 1482 | 1947 | 1947 | 1648 | 1648 |
| Ewijk | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 0,67 | 0,58 | 0,50 | 0,43 | 0,72 | 0,61 | 0,68 | 0,58 | | |
| minimum | 0,37 | 0,31 | 0,15 | 0,24 | 0,23 | 0,24 | 0,16 | 0,28 | | |
| maximum | 0,89 | 0,85 | 0,74 | 0,62 | 1,47 | 0,81 | 1,19 | 1,18 | | |
| Winssen | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 0,63 | 0,49 | 0,65 | 0,49 | 0,88 | 0,68 | 0,67 | 0,56 | | |
| minimum | 0,17 | 0,25 | 0,14 | 0,19 | 0,32 | 0,33 | 0,12 | 0,21 | | |
| maximum | 1,13 | 0,80 | 1,22 | 0,97 | 1,29 | 1,15 | 1,05 | 0,94 | | |
| Dodewaard-Druten | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 0,64 | 0,42 | 0,80 | 0,57 | | | 0,71 | 0,54 | 0,77 | 0,77 |
| minimum | 0,28 | 0,09 | 0,30 | 0,24 | | | 0,43 | 0,25 | 0,30 | 0,30 |
| maximum | 1,00 | 0,77 | 1,21 | 1,04 | | | 0,99 | 0,90 | 1,17 | 1,17 |
| Beneden-Leeuwen | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 0,64 | 0,49 | 0,77 | 0,68 | 0,86 | 0,71 | 0,70 | 0,57 | | |
| minimum | 0,25 | 0,24 | 0,47 | 0,50 | 0,52 | 0,49 | 0,29 | 0,29 | | |
| maximum | 1,22 | 0,88 | 1,11 | 1,01 | 1,16 | 0,98 | 1,12 | 0,83 | | |
| Totaal | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 0,65 | 0,48 | 0,70 | 0,55 | 0,81 | 0,66 | 0,69 | 0,56 | | |
| minimum | 0,17 | 0,09 | 0,14 | 0,19 | 0,23 | 0,24 | 0,12 | 0,21 | | |
| maximum | 1,22 | 0,88 | 1,22 | 1,04 | 1,47 | 1,15 | 1,19 | 1,18 | | |

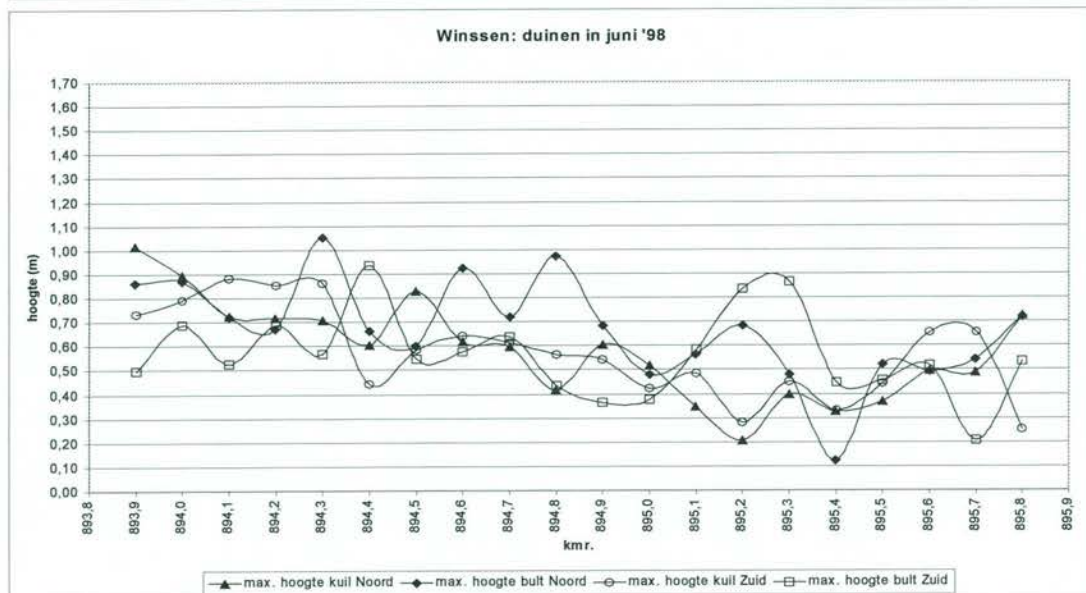
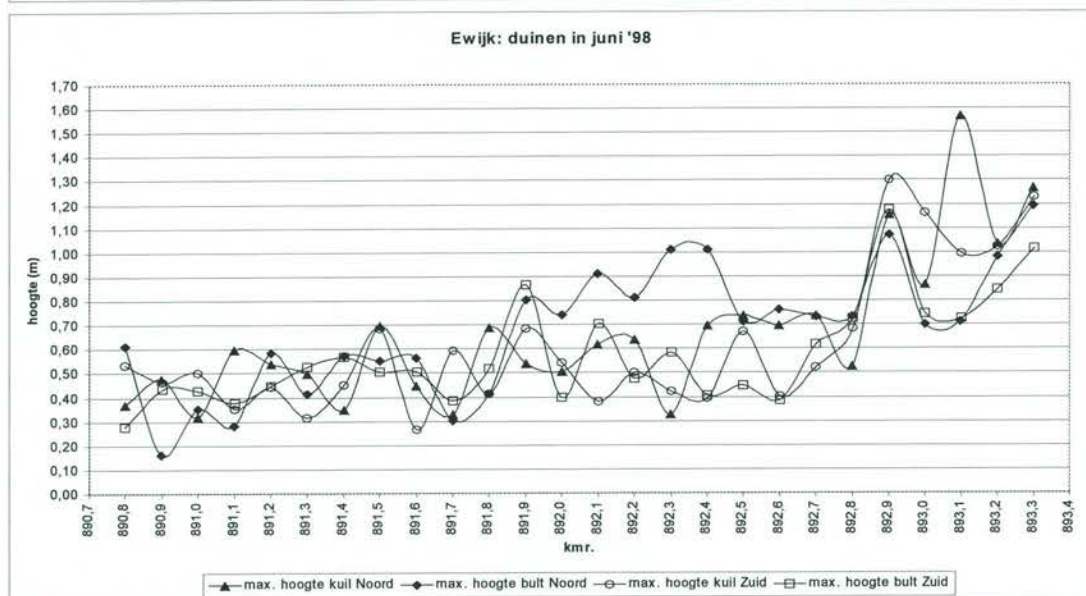
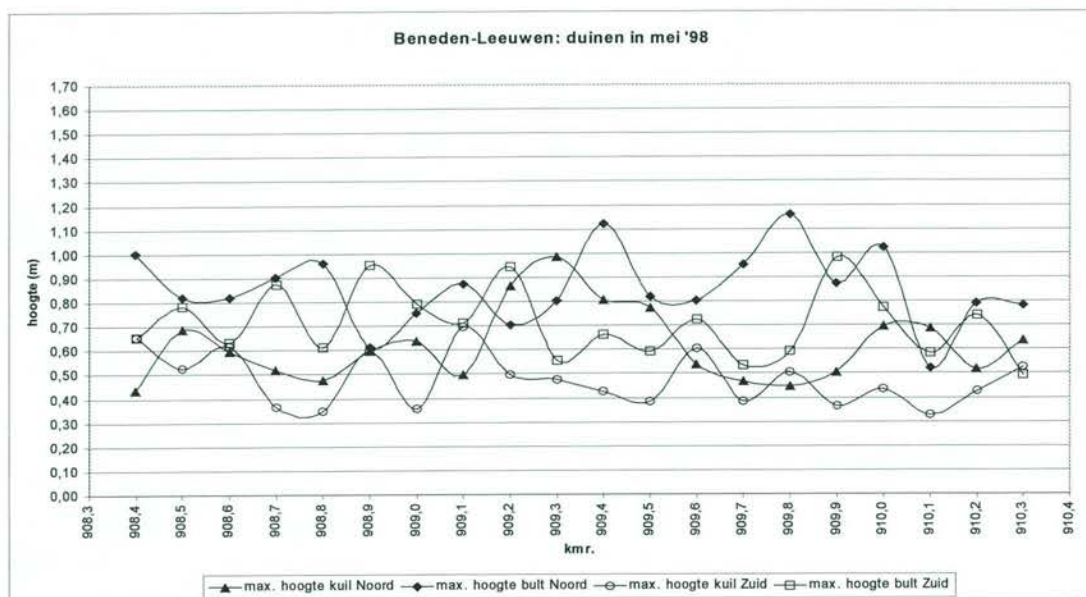
tabel 2: hoogte van de bulten per traject

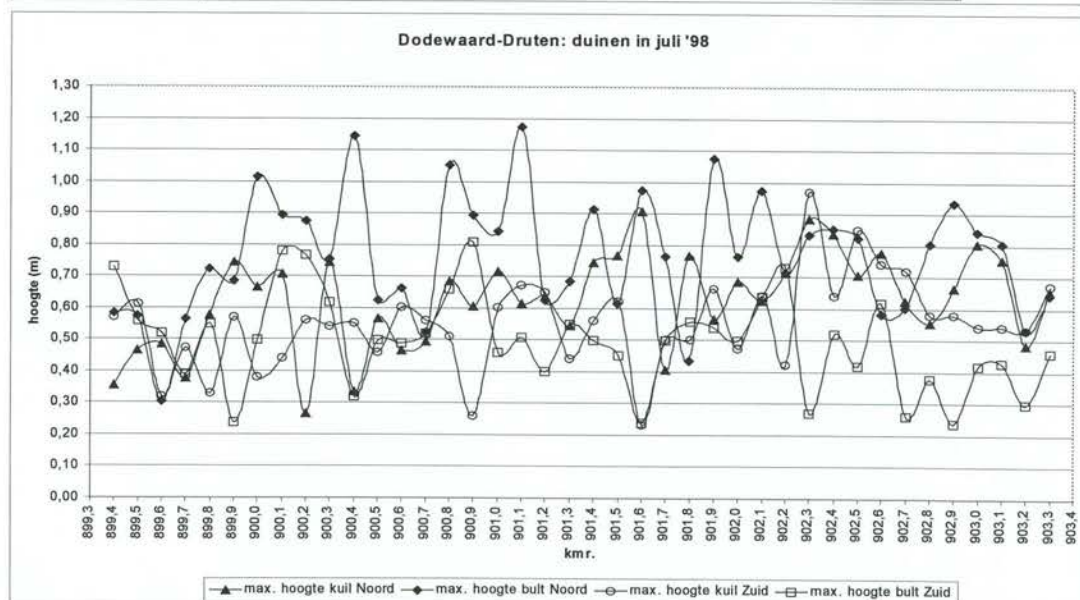
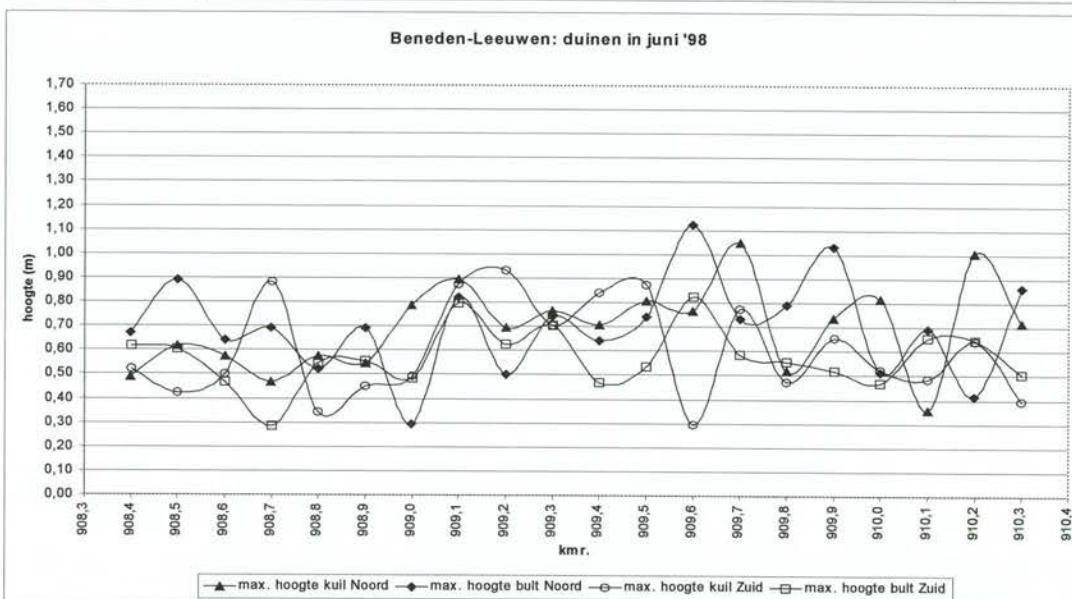
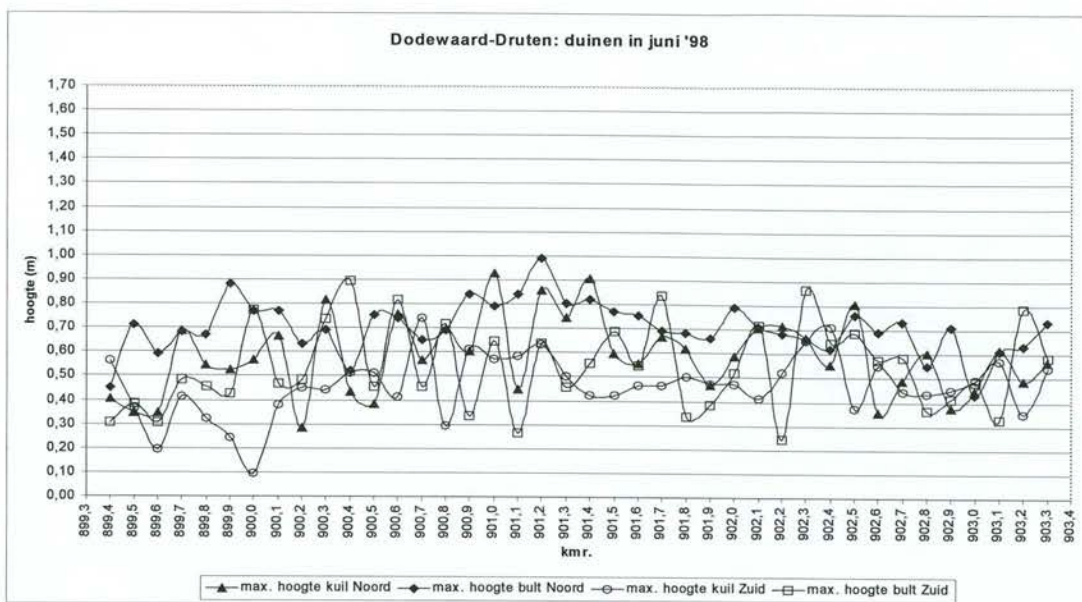








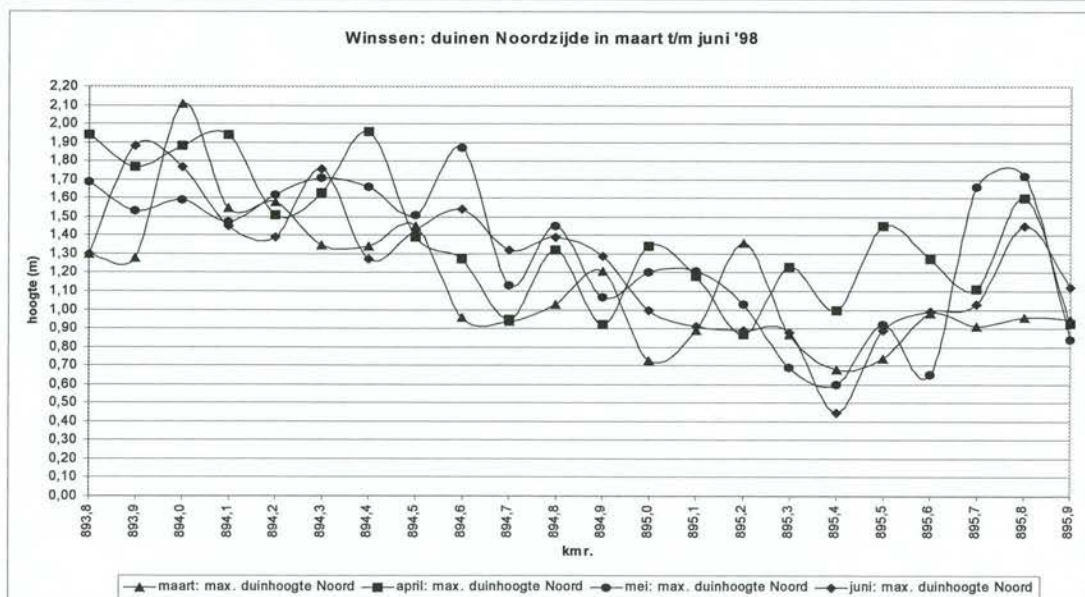
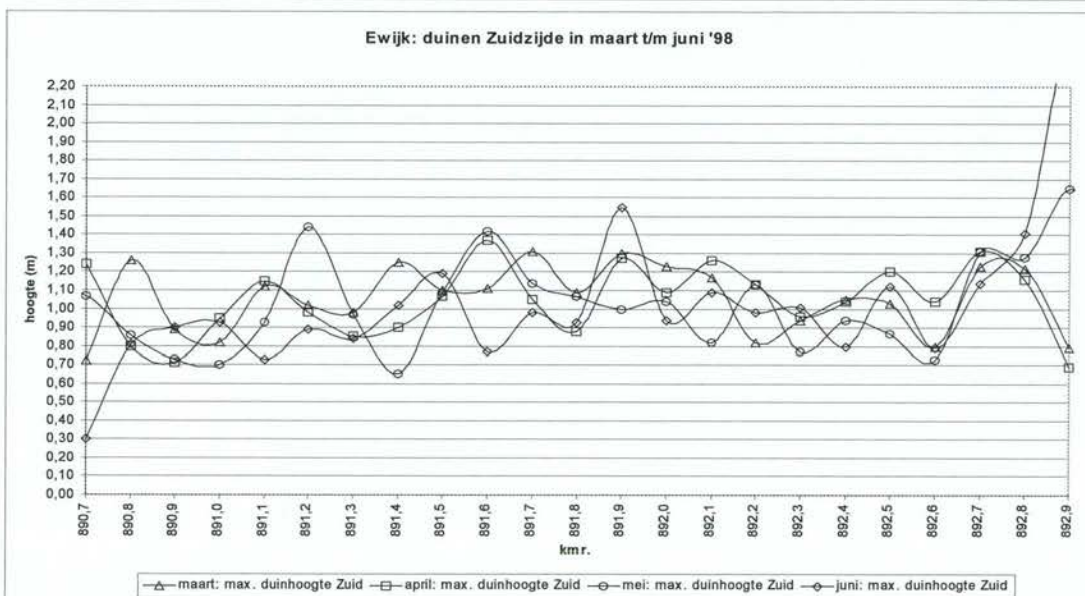
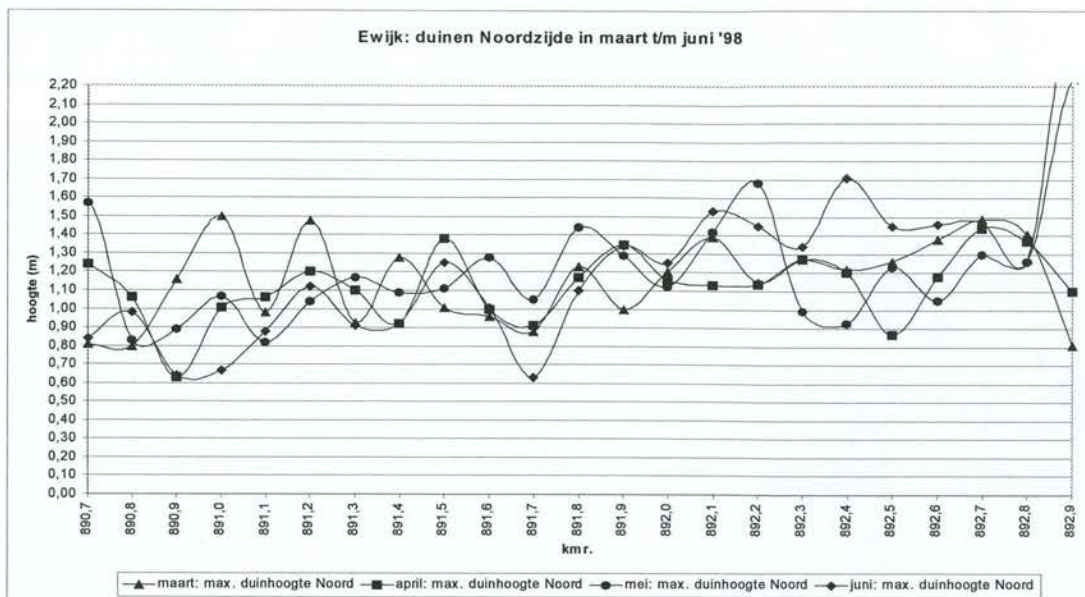


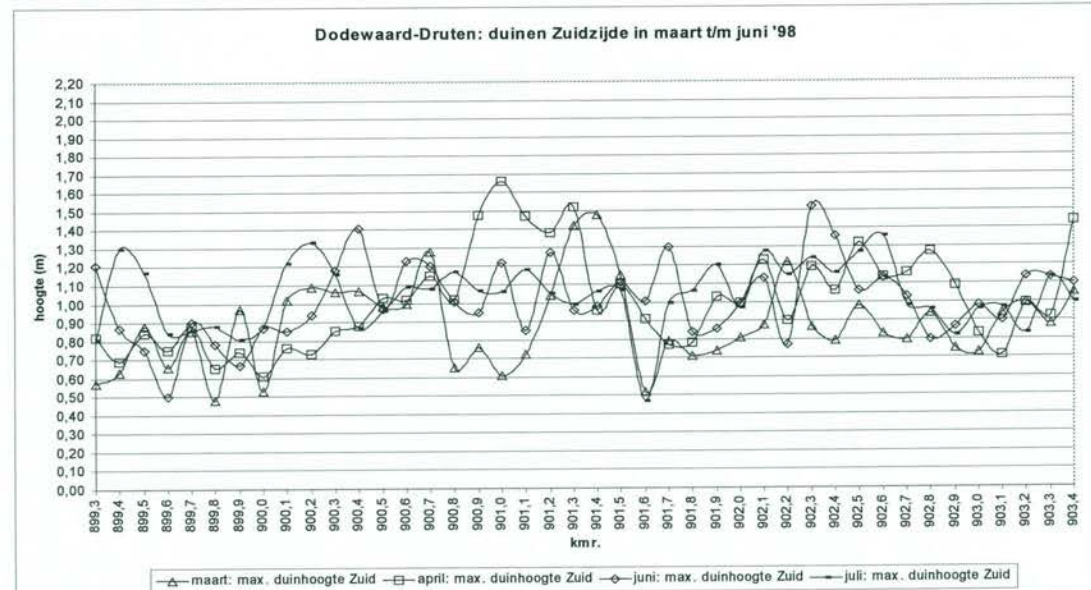
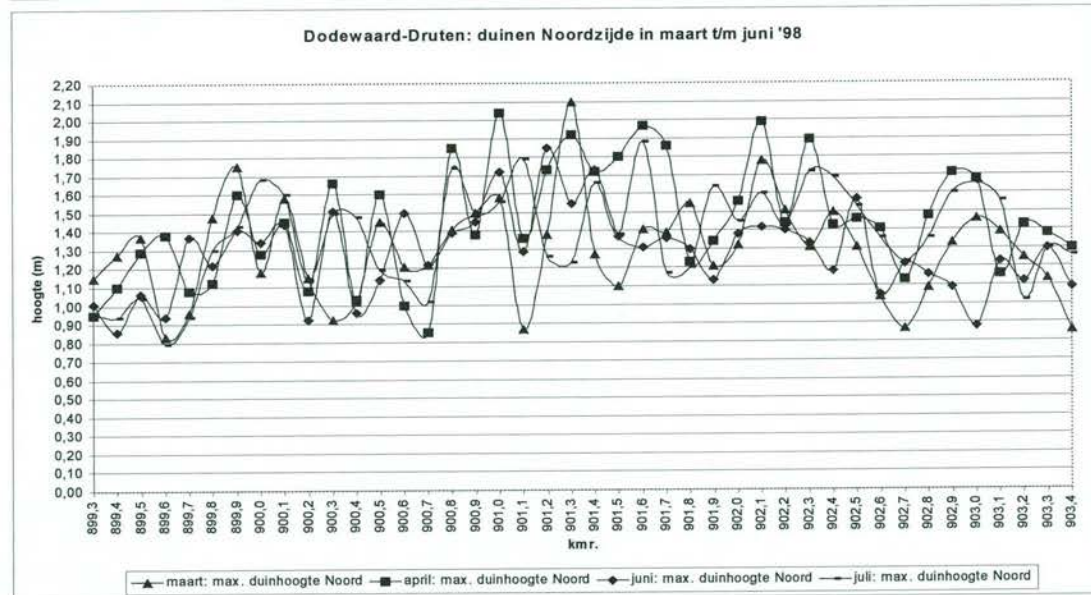
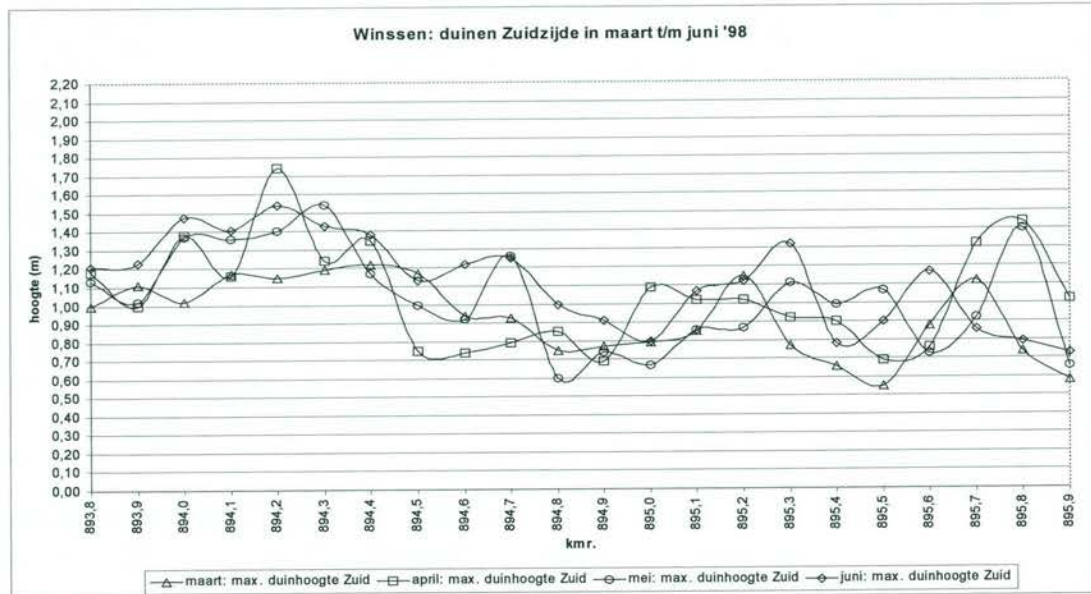


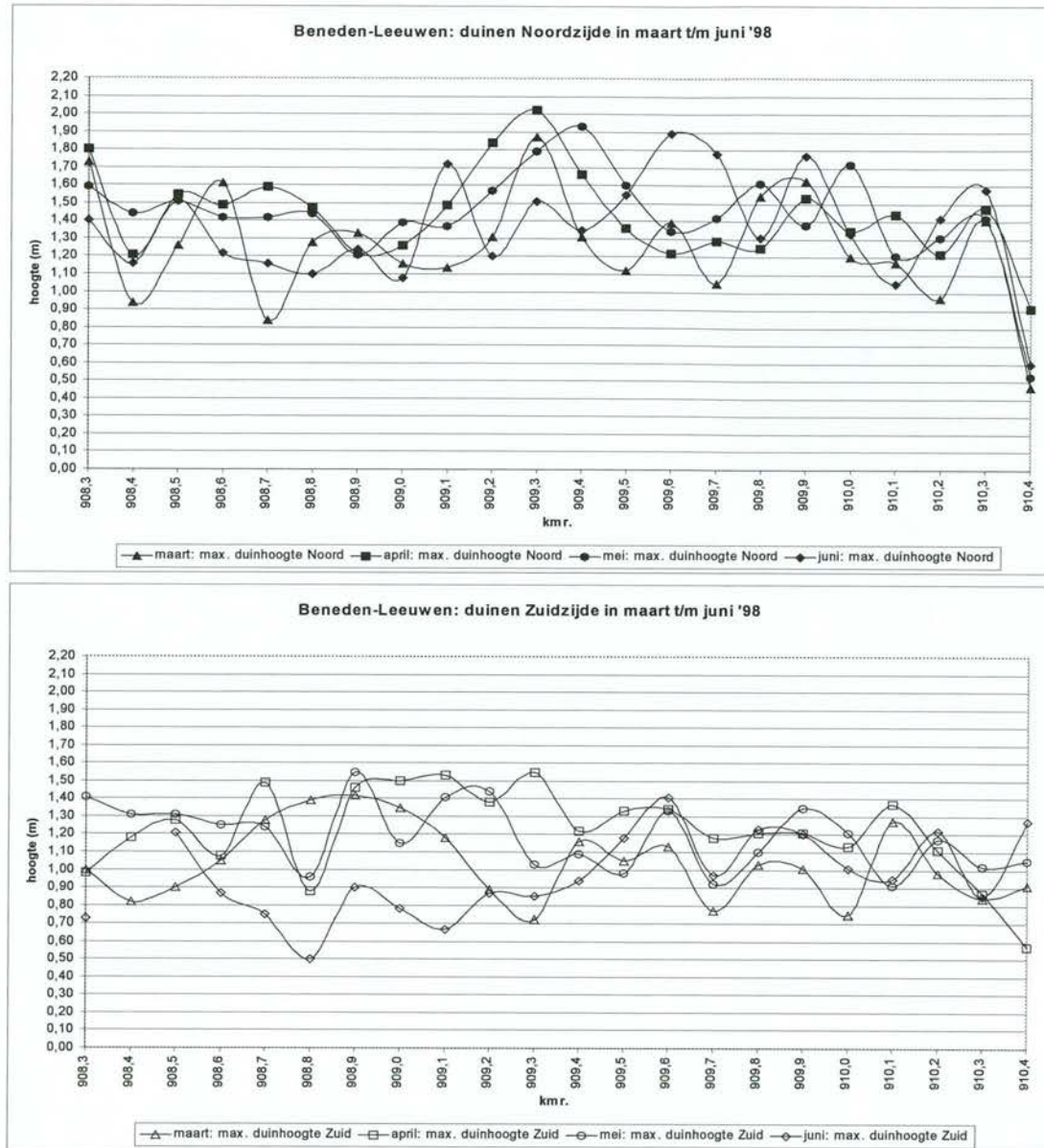
Vergelijking van de maximale duinhoogte per traject en per zijde voor elke bodempeiling voor aanvang van de baggerwerkzaamheden

| | maart '98 | | april '98 | | mei '98 | | juni '98 | | juli '98 | |
|--------------------------------|-----------|------|-----------|------|---------|------|----------|------|----------|------|
| | Noord | Zuid | Noord | Zuid | Noord | Zuid | Noord | Zuid | Noord | Zuid |
| $Q_{\text{Waal, gem}} (m^3/s)$ | 2175 | 2175 | 2569 | 2569 | 1482 | 1482 | 1947 | 1947 | 1648 | 1648 |
| Ewijk | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 1,16 | 1,05 | 1,13 | 1,05 | 1,18 | 1,01 | 1,34 | 1,18 | | |
| minimum | 0,80 | 0,72 | 0,63 | 0,69 | 0,37 | 0,55 | 0,63 | 0,30 | | |
| maximum | 1,50 | 1,31 | 1,44 | 1,37 | 2,63 | 1,65 | 2,46 | 2,48 | | |
| Winssen | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 1,14 | 0,93 | 1,38 | 1,05 | 1,31 | 1,04 | 1,25 | 1,12 | | |
| minimum | 0,68 | 0,55 | 0,87 | 0,69 | 0,60 | 0,60 | 0,45 | 0,73 | | |
| maximum | 2,11 | 1,22 | 1,96 | 1,74 | 1,87 | 1,54 | 1,88 | 1,54 | | |
| Dodewaard-Druten | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 1,30 | 0,88 | 1,46 | 1,02 | | | 1,28 | 1,01 | 1,39 | 1,39 |
| minimum | 0,83 | 0,48 | 0,85 | 0,61 | | | 0,86 | 0,50 | 0,79 | 0,79 |
| maximum | 2,10 | 1,48 | 2,04 | 1,66 | | | 1,85 | 1,52 | 1,88 | 1,88 |
| Beneden-Leeuwen | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 1,26 | 1,04 | 1,44 | 1,22 | 1,44 | 1,19 | 1,36 | 1,15 | | |
| minimum | 0,47 | 0,72 | 0,91 | 0,57 | 0,53 | 0,91 | 0,60 | 0,69 | | |
| maximum | 1,87 | 1,42 | 2,02 | 1,55 | 1,93 | 1,55 | 1,89 | 1,67 | | |
| Totaal | | | | | | | | | | |
| gemiddeld | 1,24 | 0,96 | 1,37 | 1,07 | 1,33 | 1,08 | 1,31 | 1,11 | | |
| minimum | 0,68 | 0,48 | 0,63 | 0,61 | 0,60 | 0,60 | 0,45 | 0,50 | | |
| maximum | 2,11 | 1,48 | 2,04 | 1,74 | 2,63 | 1,65 | 2,46 | 2,48 | | |

tabel 3: duinhoogtes per traject

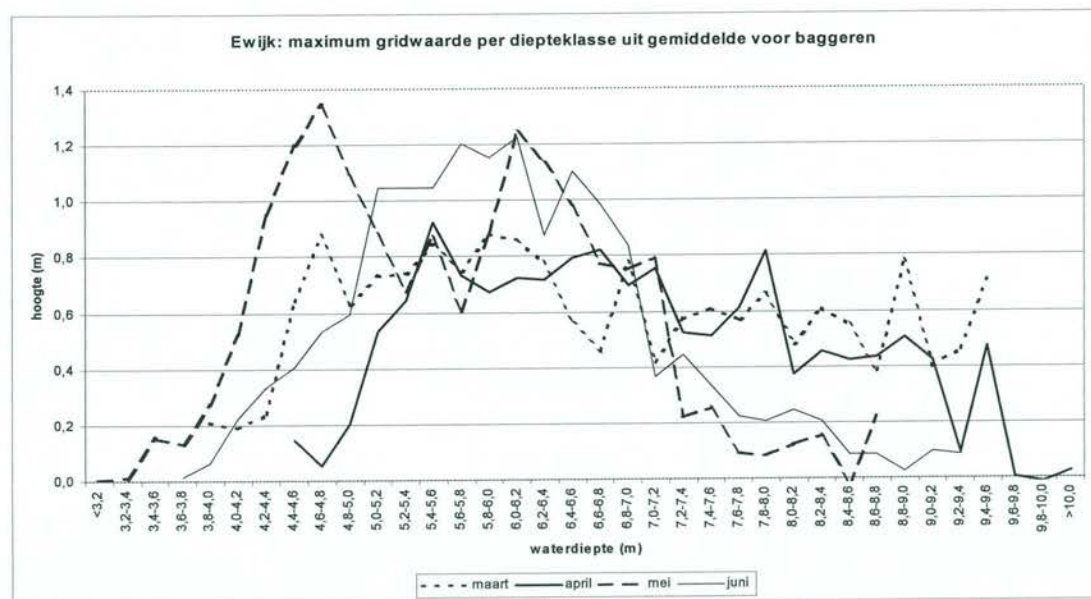


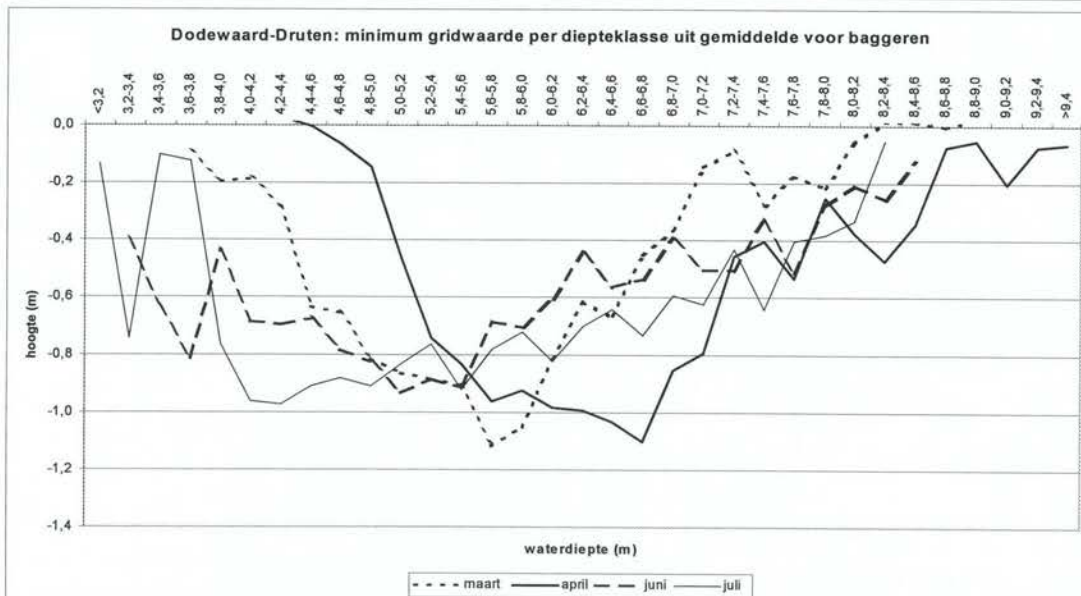
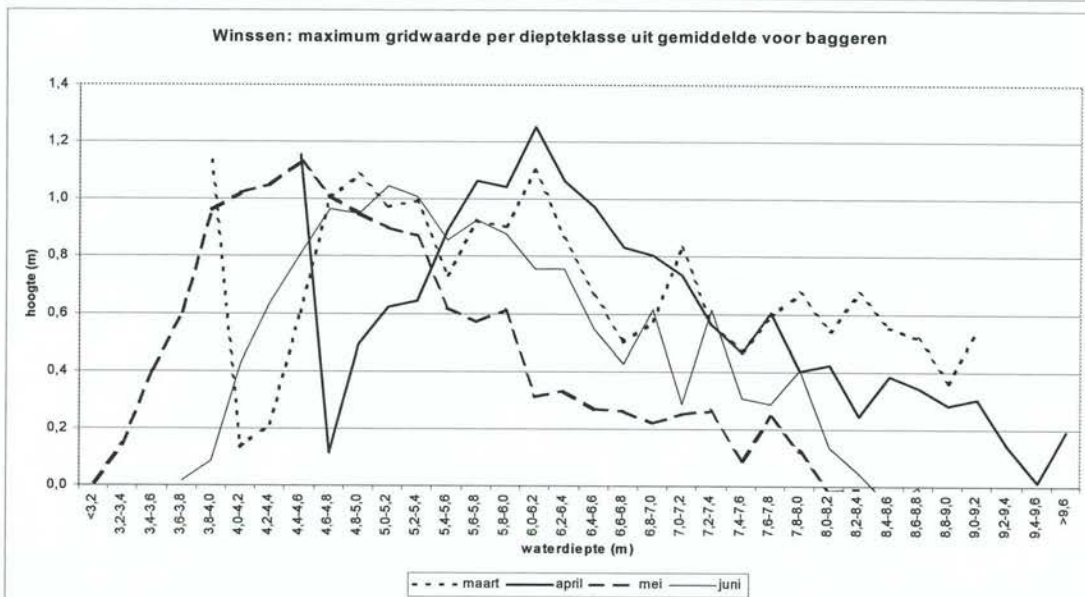
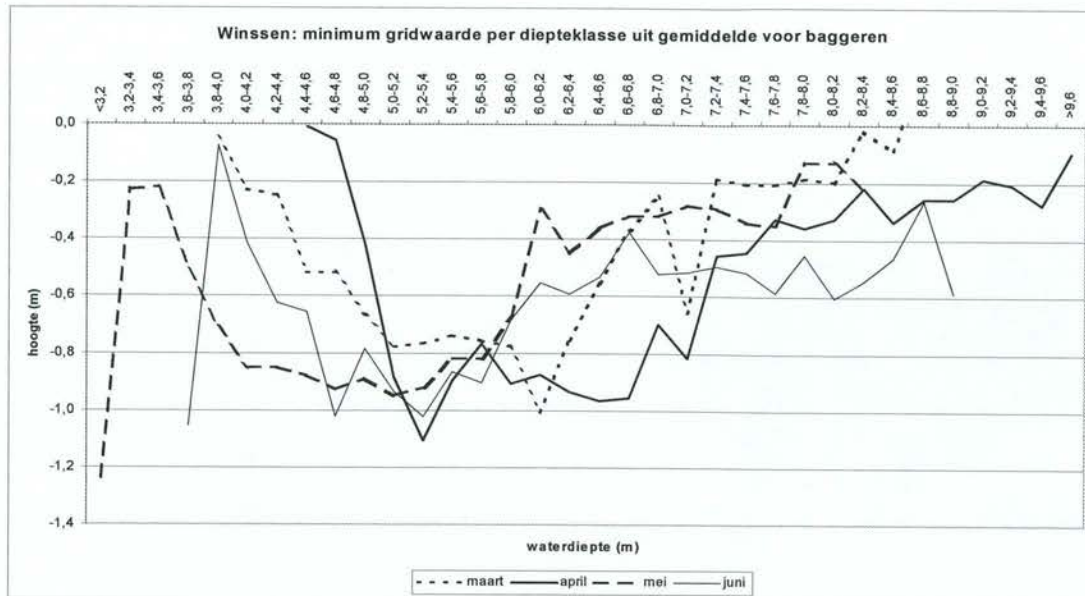


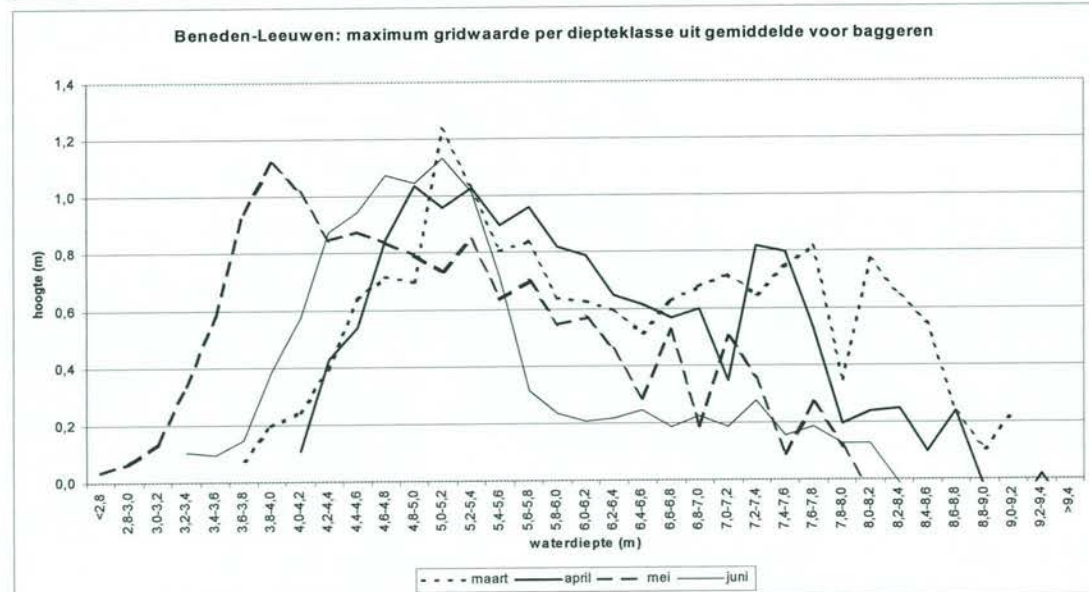
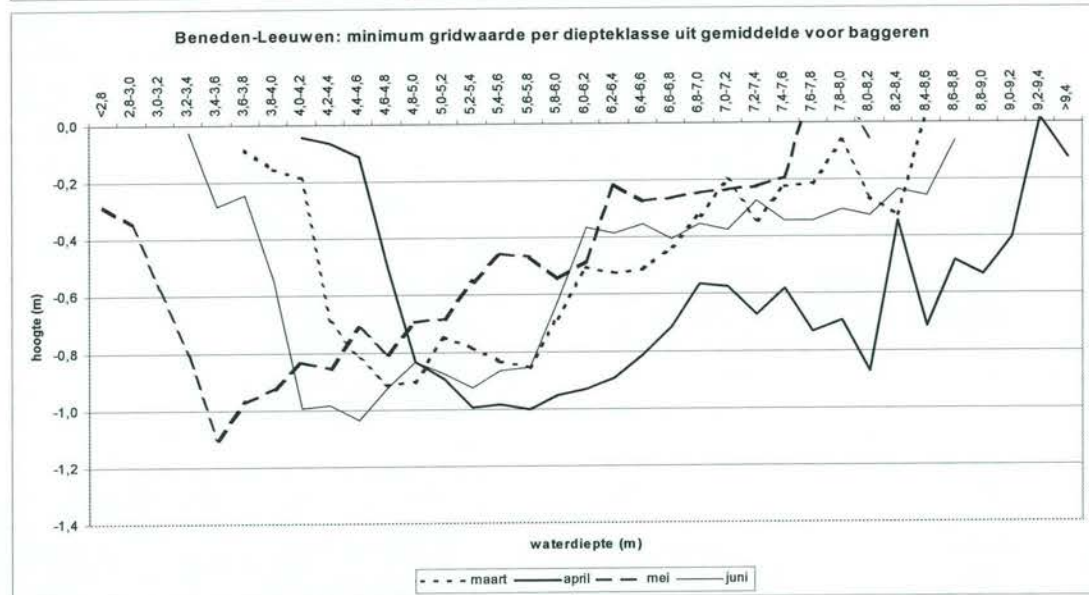
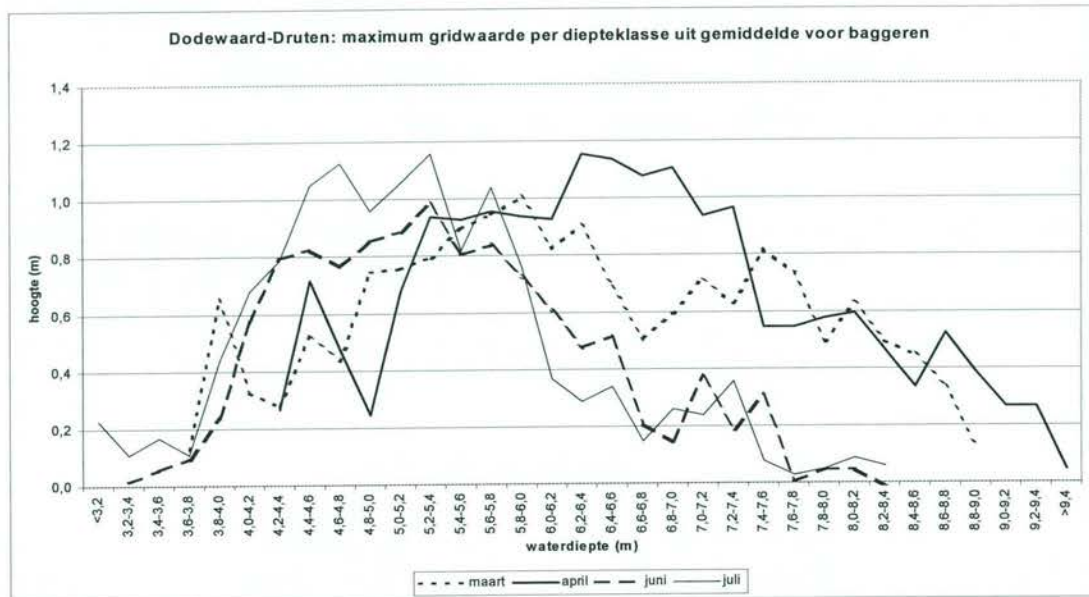


2. Maximale hoogte van bulten en kuilen per diepteklasse van de gemiddelde waterdiepte

De tijdsgemiddelde bodemligging is ingedeeld in stroken met een verschil in waterdiepte van steeds 0,20 meter. Voor elke strook is per traject de maximale en minimale uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging berekend.







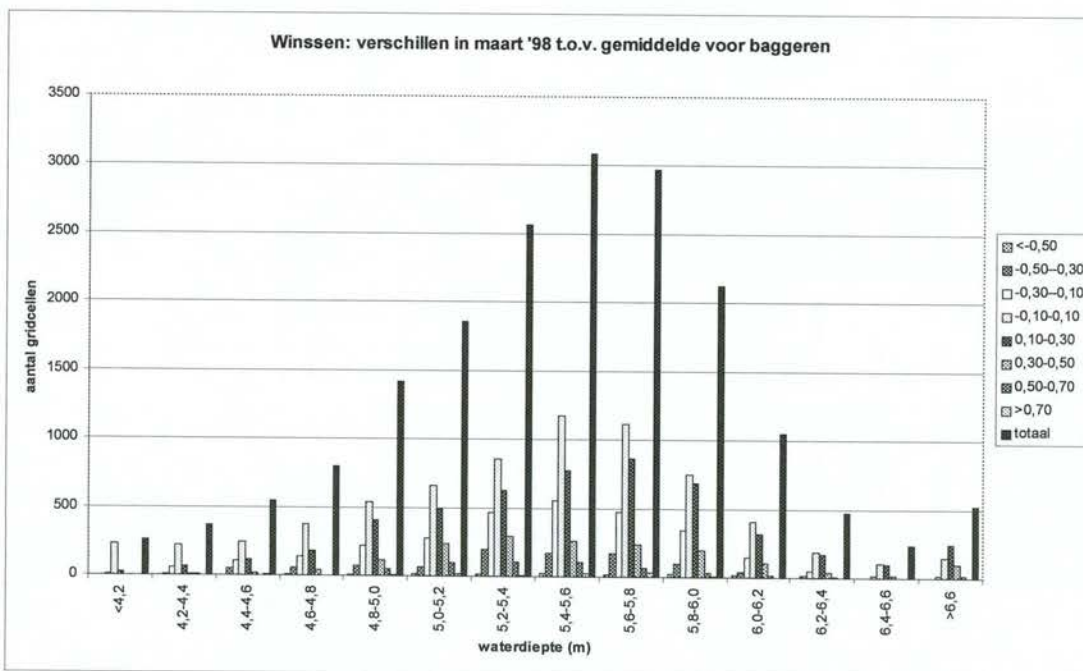
3. Uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus de waterdiepte

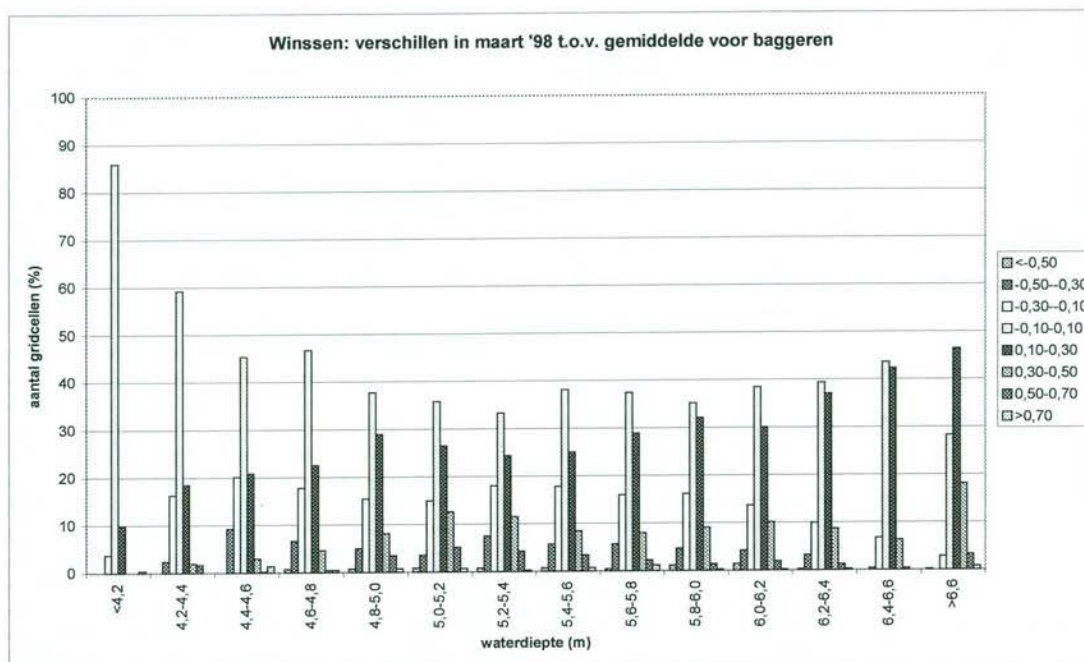
Voor de bepaling van de uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus de waterdiepte, zijn zowel het bestand van de gemiddelde waterdiepte als het bestand van de uitwijking in klassen verdeeld. Niet elke klasse bevat evenveel gridcellen: zodra het aantal kleiner is dan 1% van het totale aantal worden de gegevens buiten beschouwing gelaten. Vervolgens zijn twee analyses uitgevoerd:

- Uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus de waterdiepte per traject en per maand;
- Uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus de waterdiepte per traject over alle bodempeilingen tot aan de eerste baggerwerkzaamheden.

Doordat de waterdiepte bekend is kunnen de uitkomsten voor verschillende maanden worden opgeteld. De uitkomsten geven een voorspelling voor het geval er geen naijling optreedt.

De uitwijkingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging zijn per traject gecorrigeerd voor de gemiddelde uitwijking voor het gehele traject. Hierdoor is het mogelijk om positieve uitwijkingen (bulten) en negatieve uitwijkingen (kuilen) op te tellen. Om vergelijking mogelijk te maken is gekeken naar het relatieve voorkomen van bepaalde uitwijkingen, in plaats van naar absolute aantallen gridcellen met een bepaalde waarde. Hieronder worden als voorbeeld eerst voor traject Winssen de oorspronkelijke gegevens van de werkelijke aantallen gridcellen en de relatieve aantallen, maar nog opgesplitst naar bult en kuil getoond:

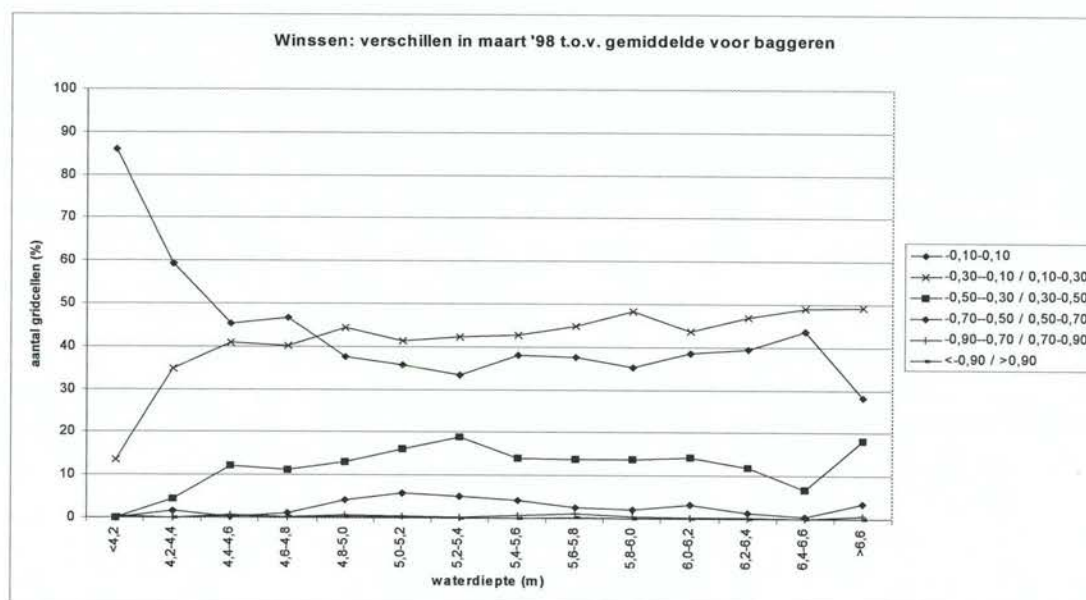
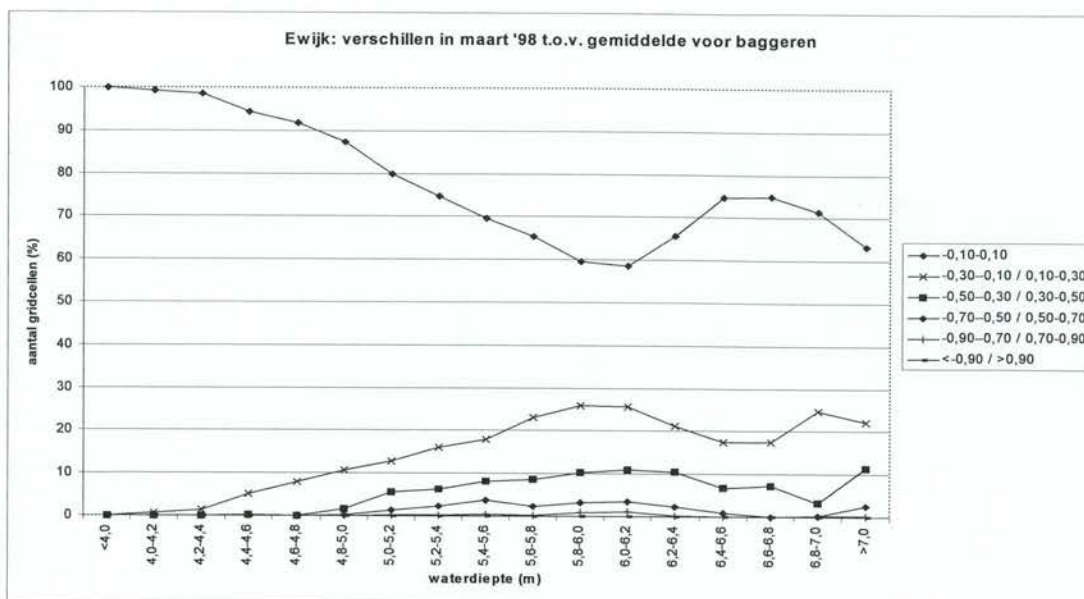


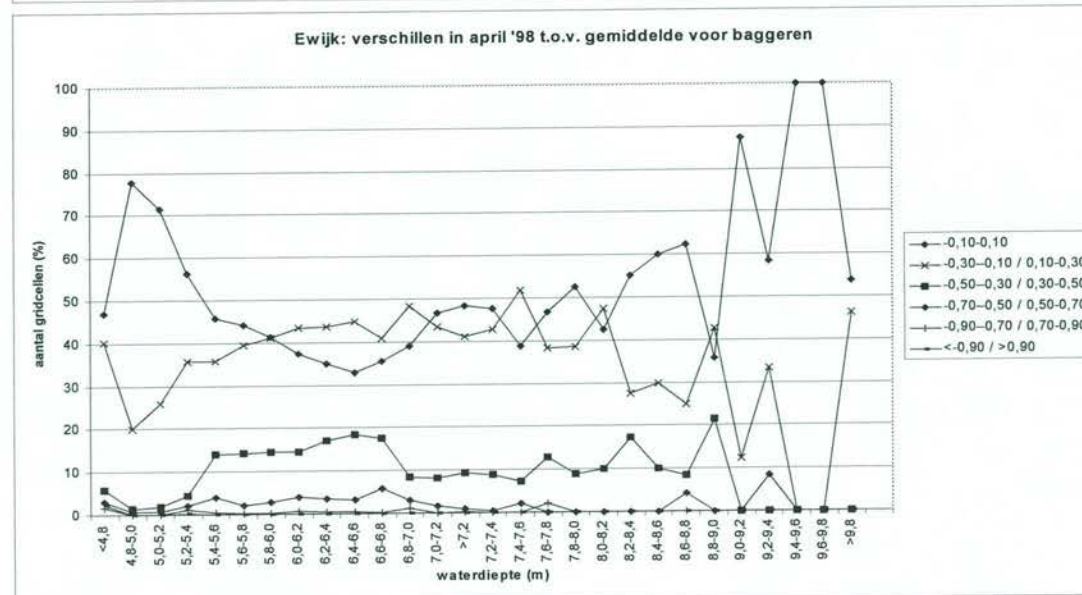
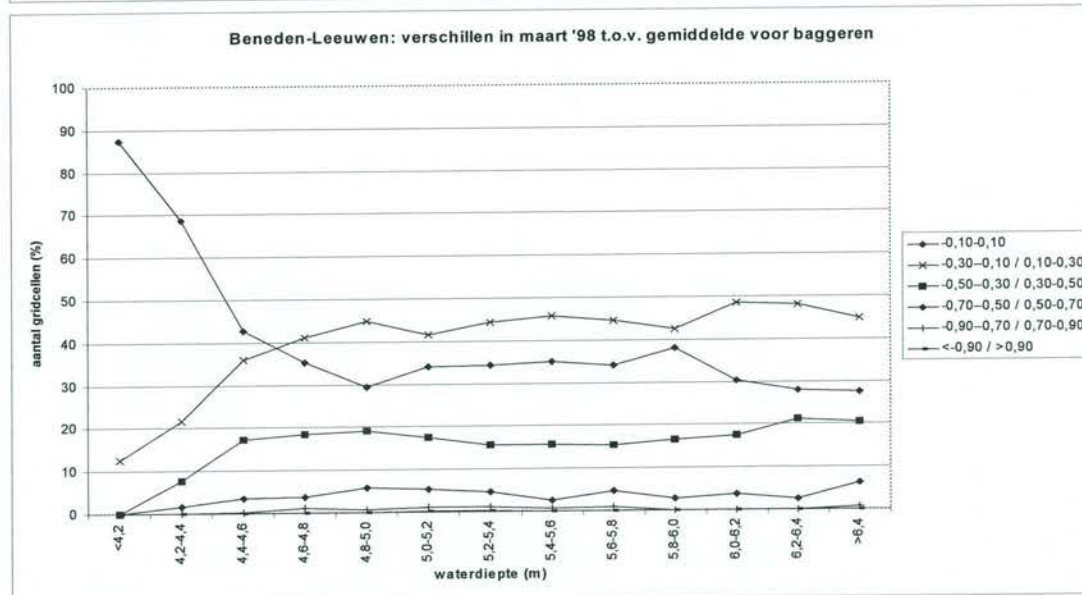
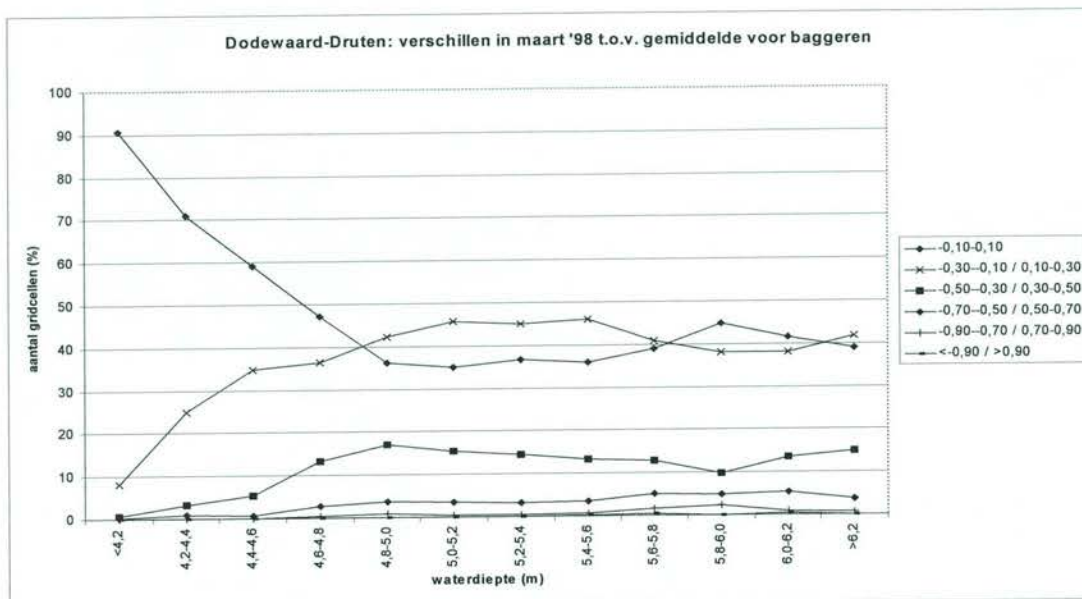


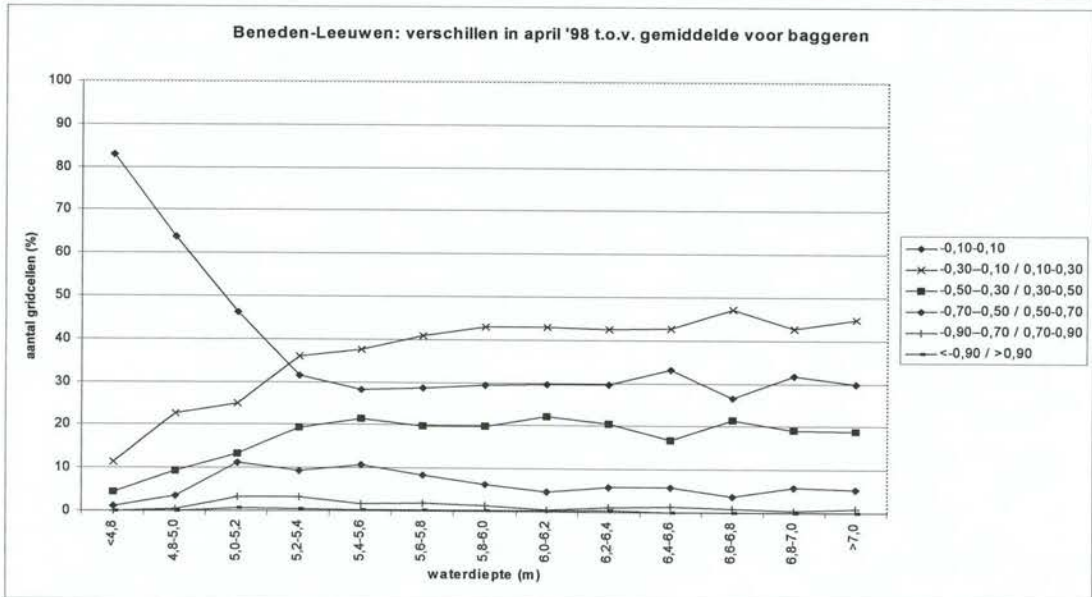
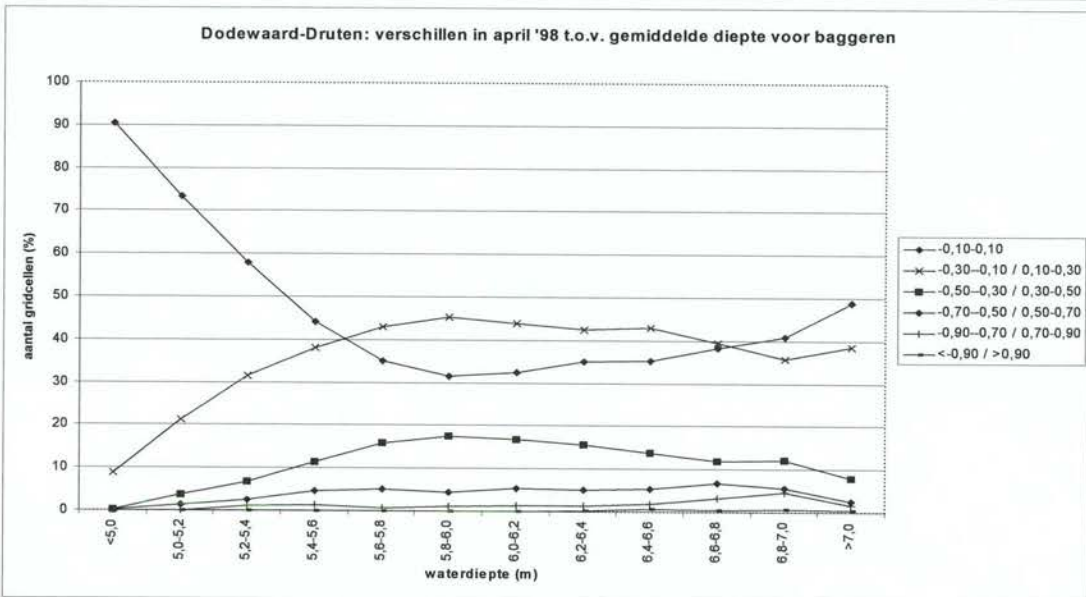
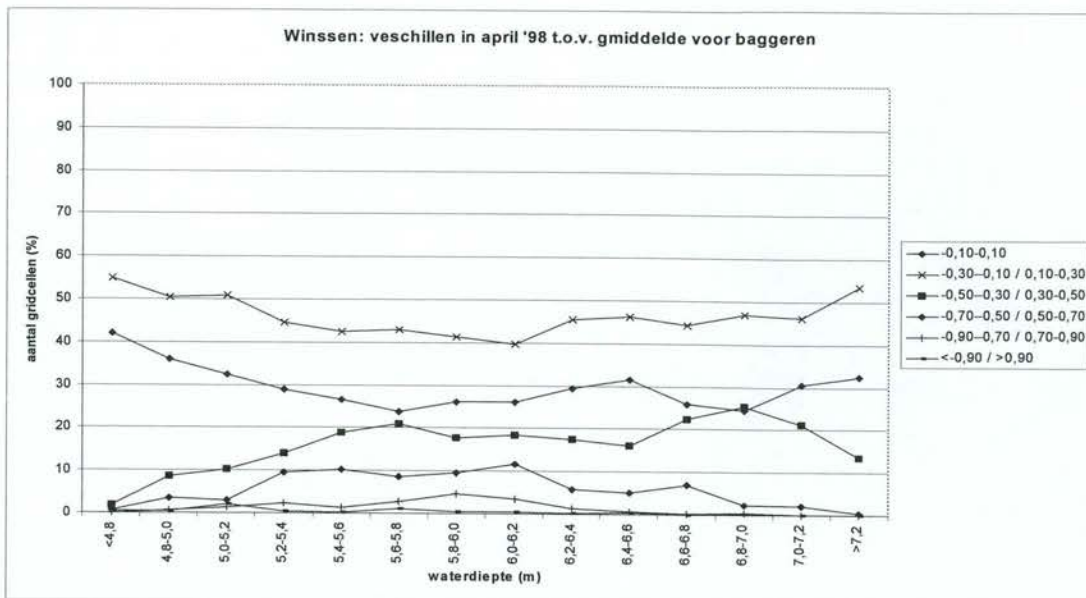
Hieruit blijkt dat voor maart de waterdiepte $h = 5,4 - 5,6$ veruit het meeste cellen bevat. Een dergelijke verdeling treedt voor elke maand en elk traject op, alleen de diepte waarbij het maximum optreedt varieert in de tijd.

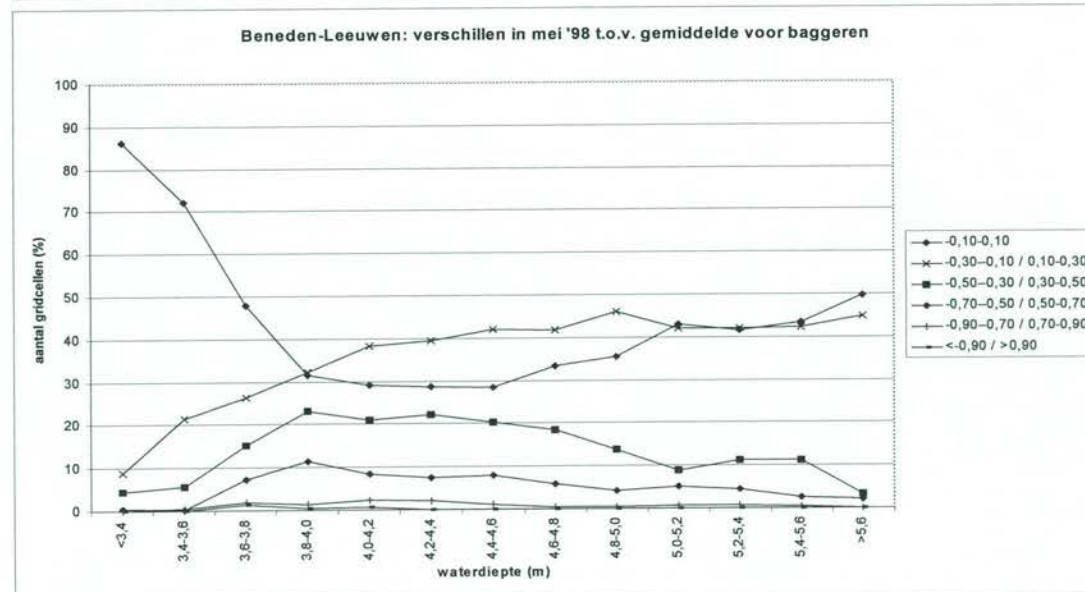
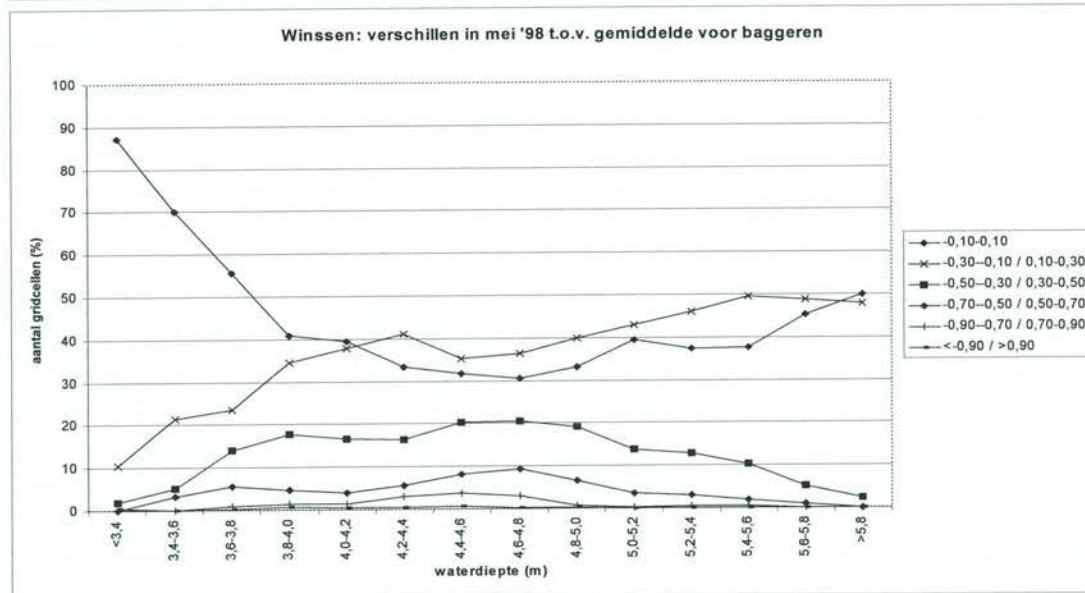
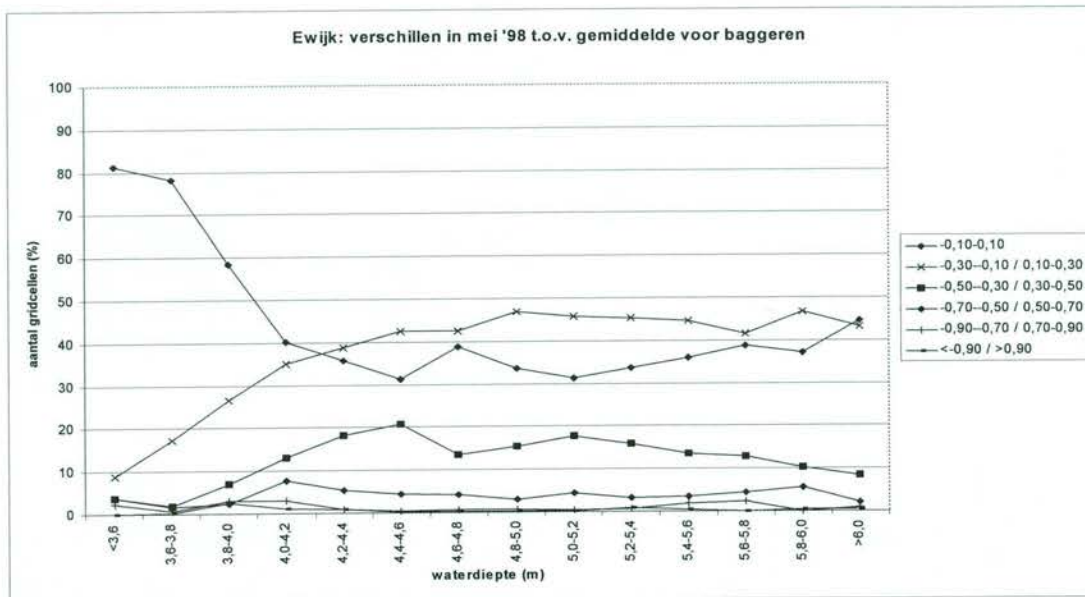
Voor maart blijken er meer hoge bulten dan hoge kuilen op te treden. Dit hangt samen met de keuze van de klassenindeling en de correctie die voor elk gridbestand wordt uitgevoerd: om vergelijking mogelijk te maken worden steeds dezelfde grenzen aangehouden, wat echter tot gevolg heeft dat de klassen niet altijd netjes rond de oorspronkelijke klasse vallen.

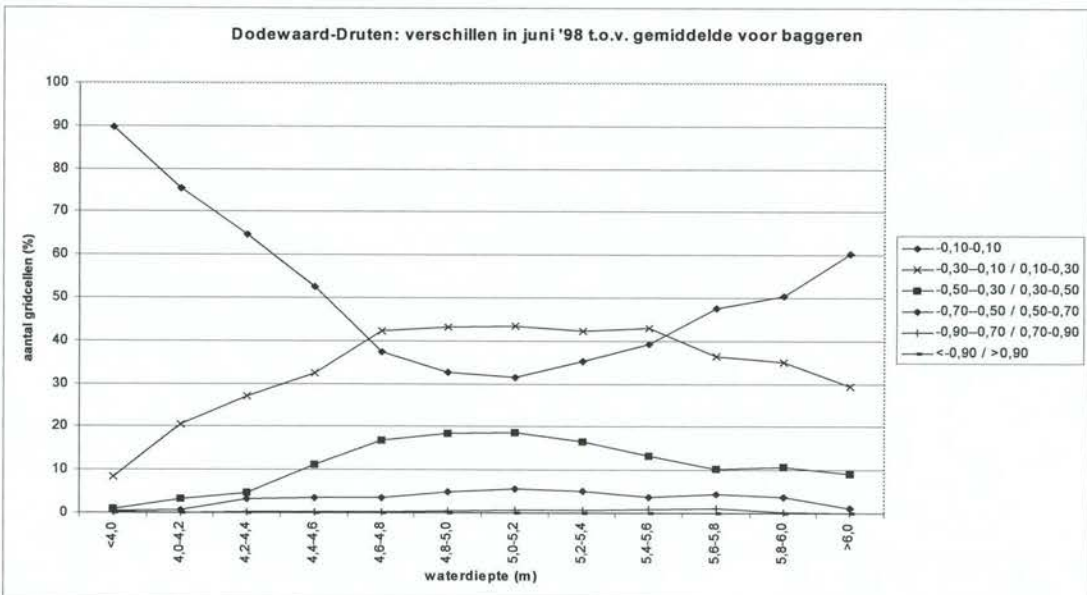
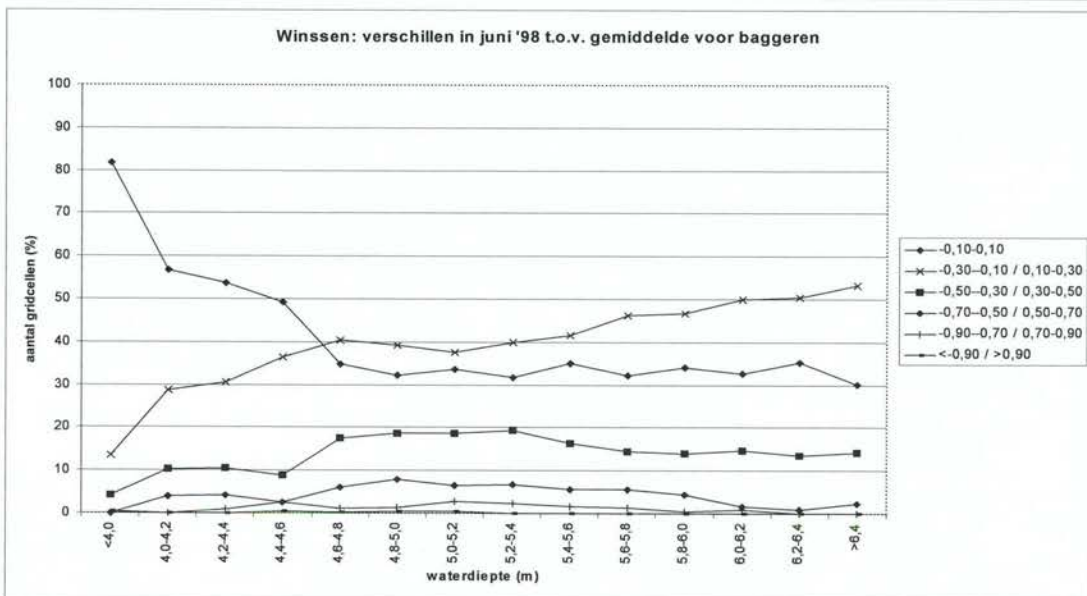
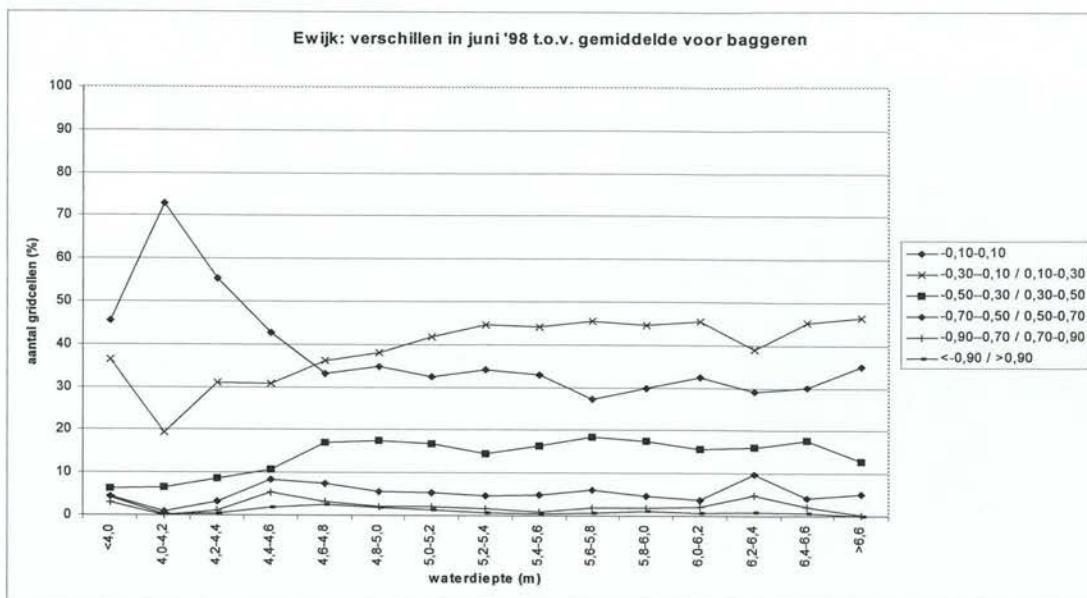
Uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus de waterdiepte per traject en per maand

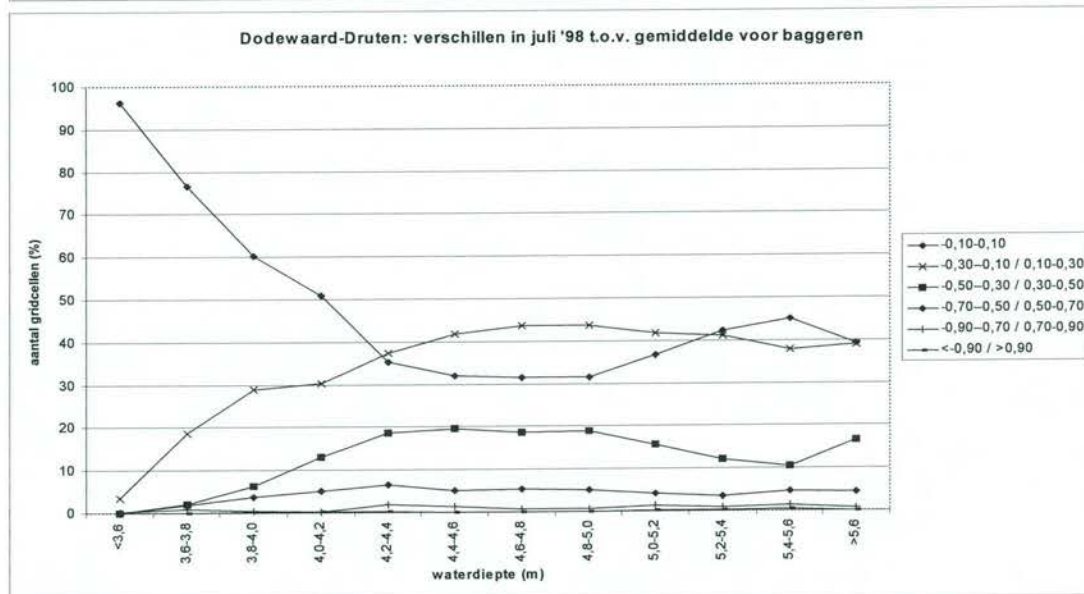
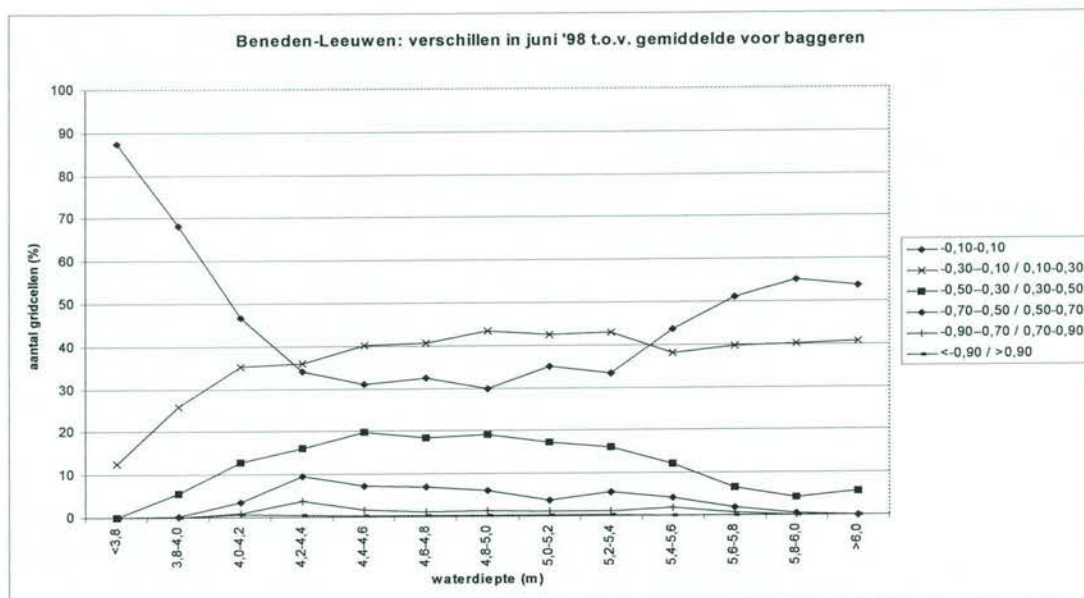




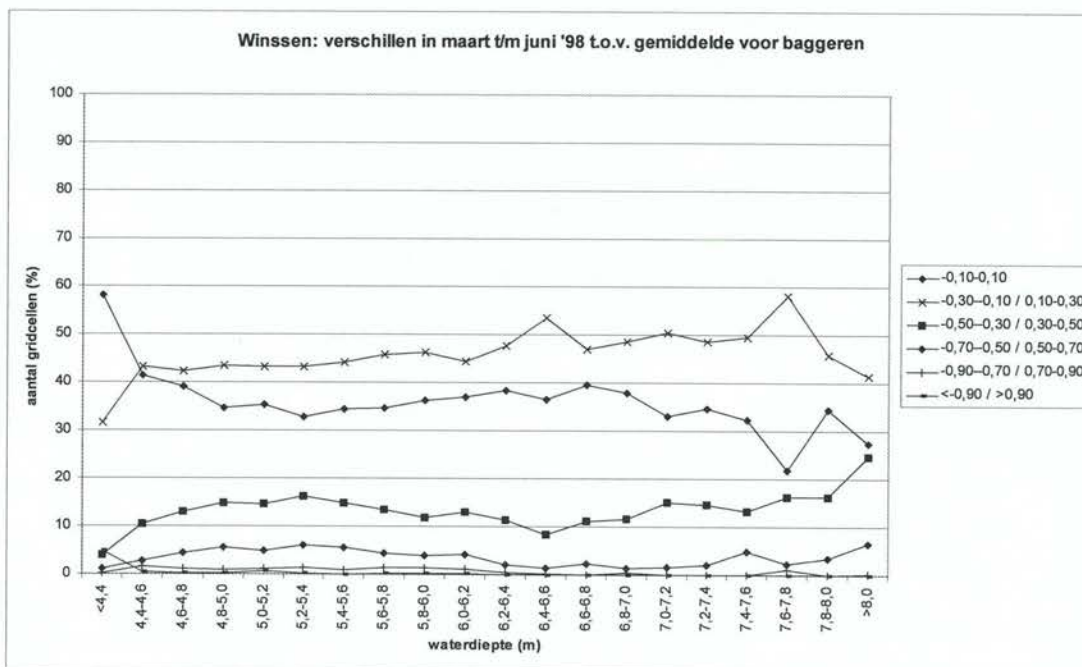
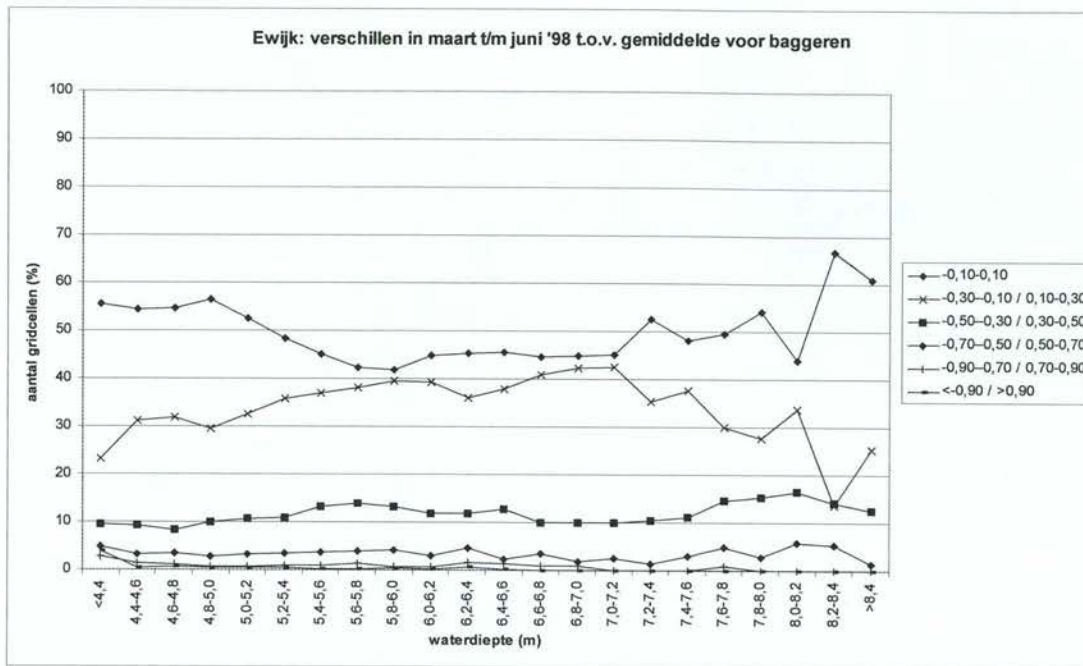


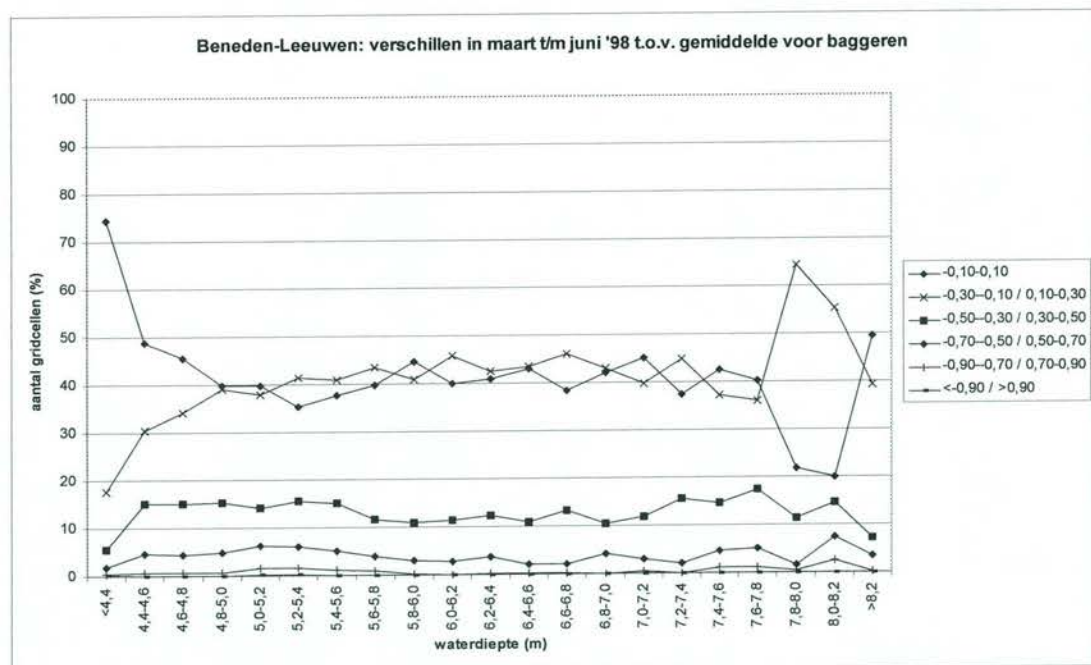
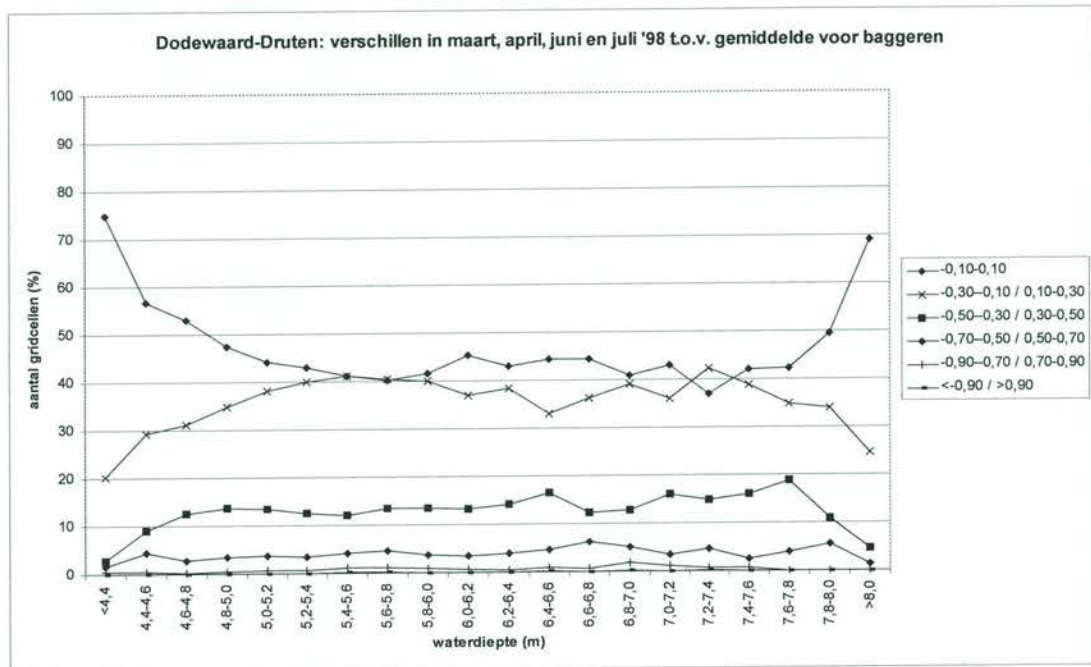






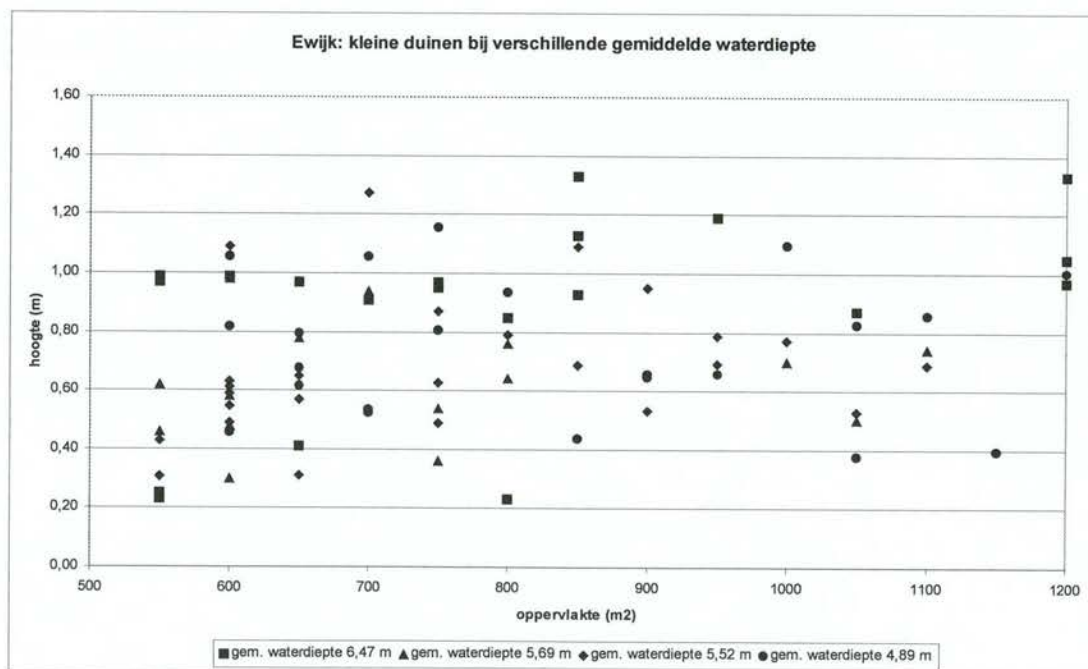
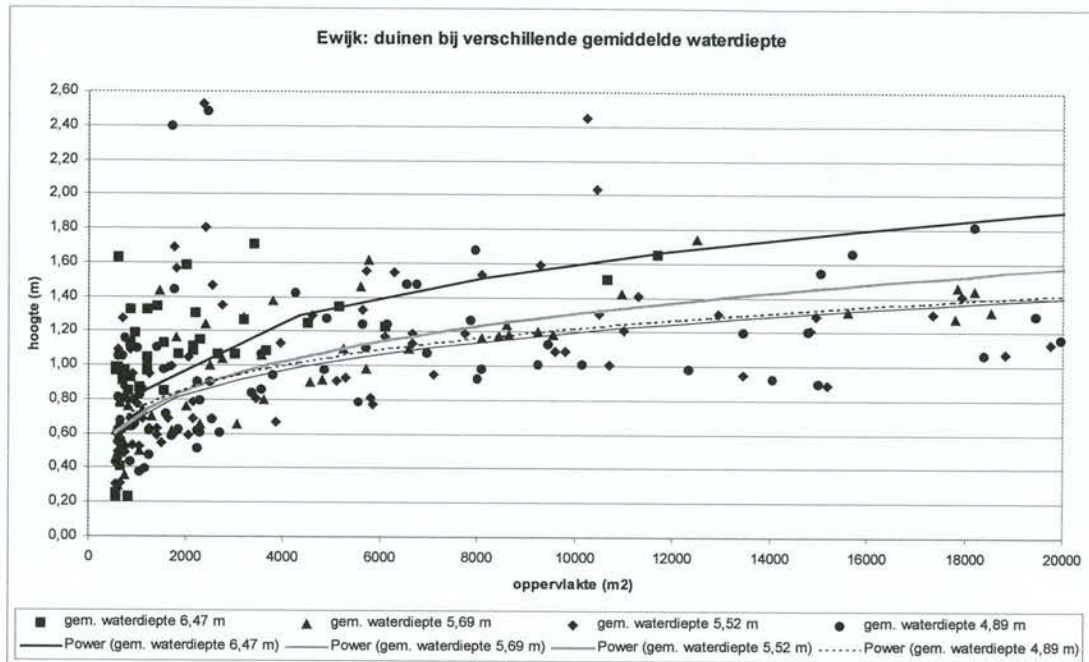
Uitwijking ten opzichte van de tijdsgemiddelde bodemligging versus de waterdiepte per traject over alle bodempeilingen tot aan de eerste baggerwerkzaamheden

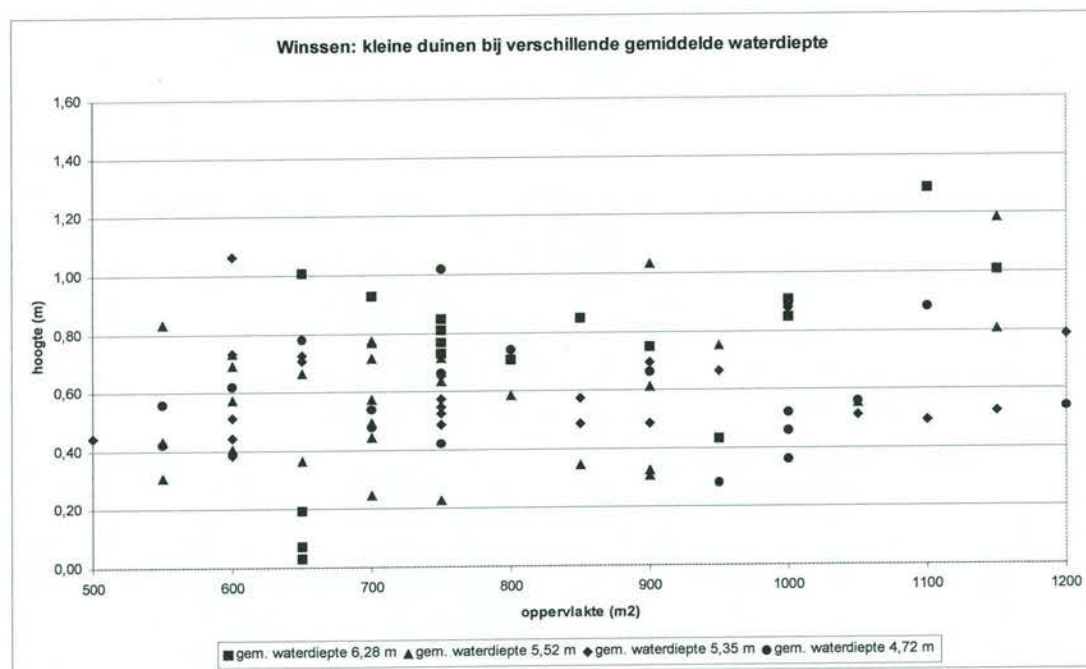
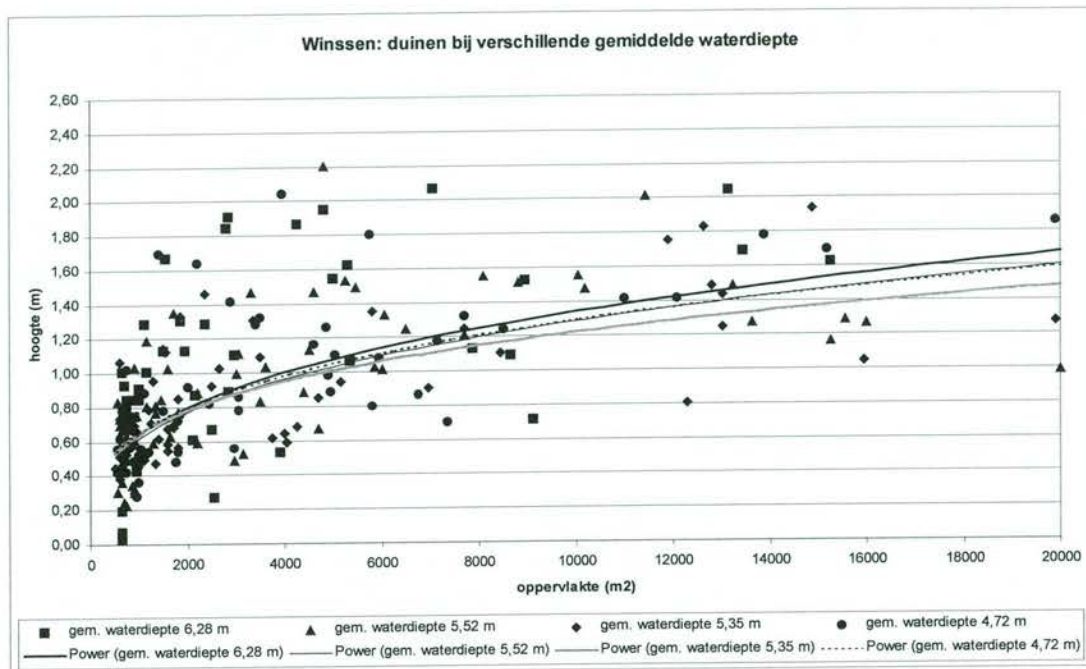


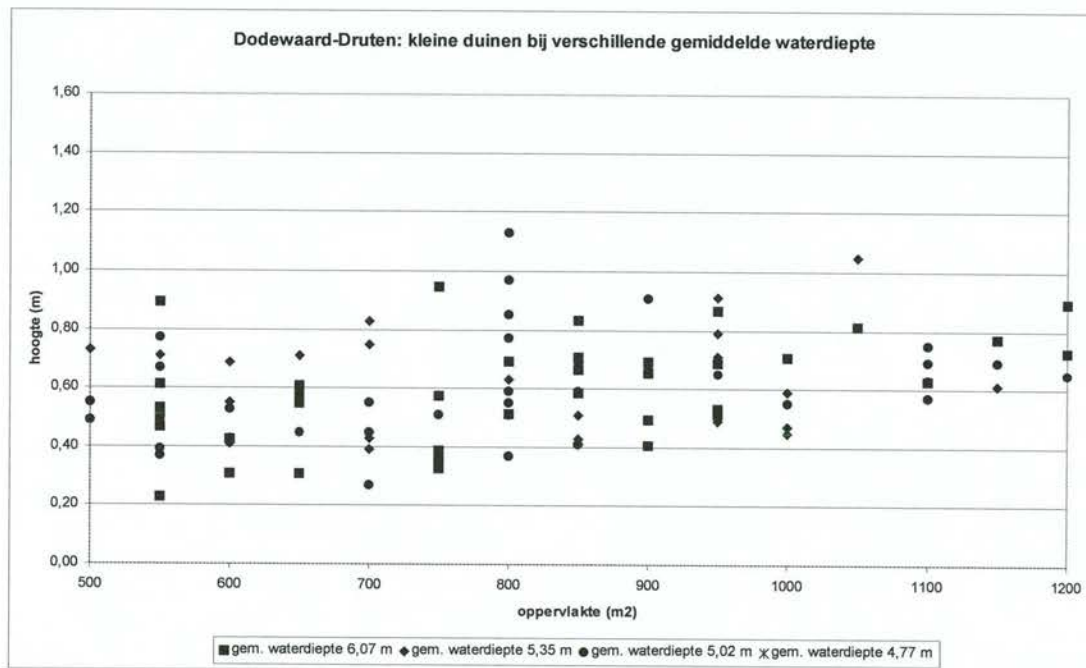
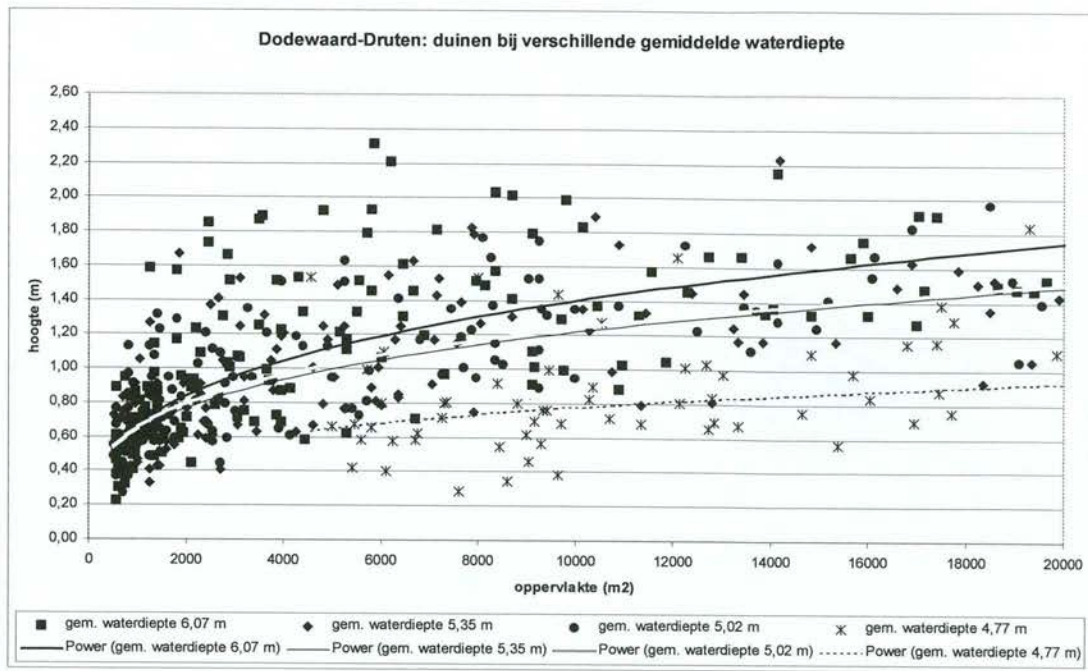


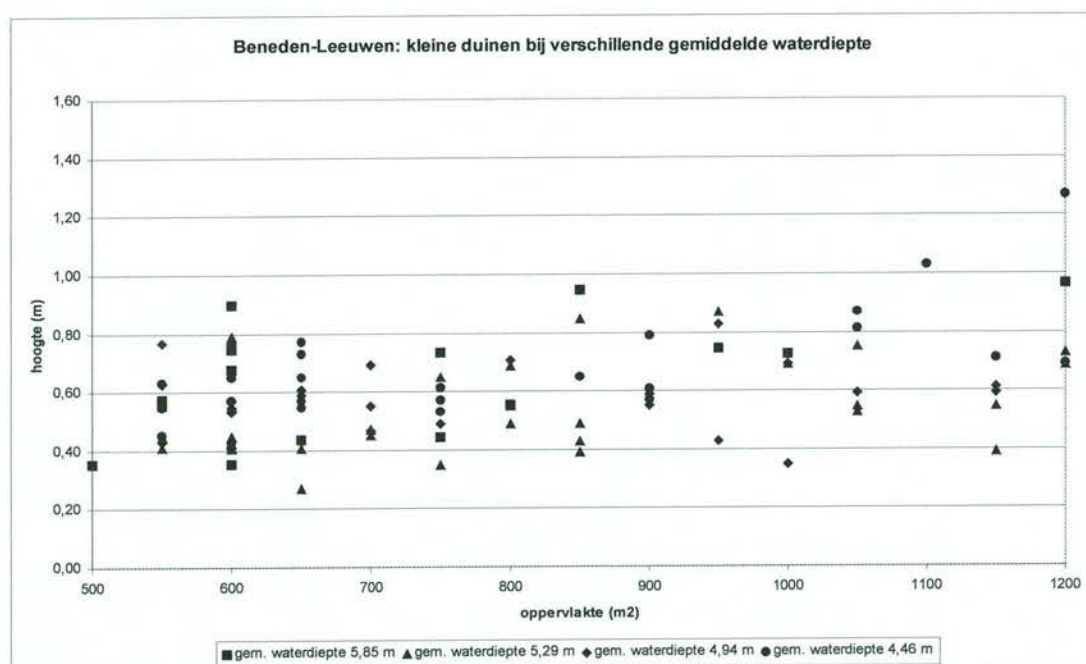
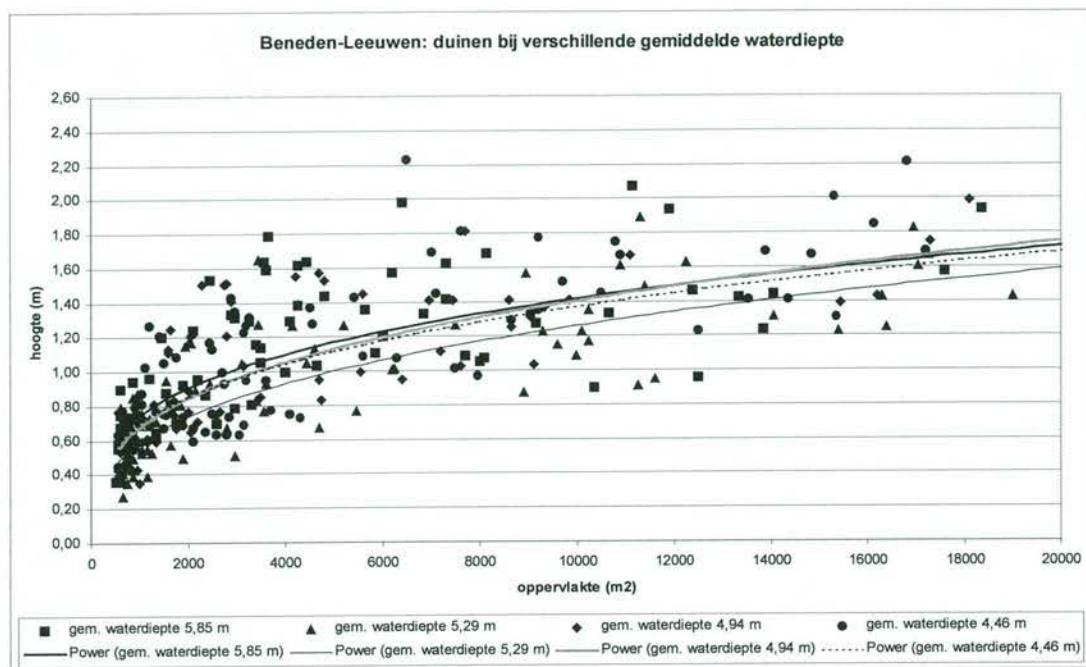
4. Duinhoogte bij verschillende waterdiepte uit hoogte van bulten en kuilen

Voor alle geïdentificeerde bulten en kuilen is zowel de oppervlakte als de maximale uitwijking ten opzichte van het gemiddelde bepaald. De duinhoogte wordt geschat door zowel de maximale uitwijking als de oppervlakte met een factor 2 te vermenigvuldigen. De volgende figuren geven per traject de totale resultaten en de resultaten voor de kleine duinen (oppervlakte $A \leq 1200 \text{ m}^2$) weer.









Bijlage H Tabellen afvoerverdeling Rijntakken 1996.0

- Tabellen behorend bij afvoerregime:
 1. volledig gestuwd: $Q_{Lobith} < 1495 \text{ m}^3/\text{s}$
 2. gedeeltelijk gestuwd: $1495 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{Lobith} \leq 2400 \text{ m}^3/\text{s}$
 3. open: $Q_{Lobith} > 2400 \text{ m}^3/\text{s}$
- Betrekkingslijnen 1996.0
- Waterstanden op de trajecten van de Proef Morfologie

| Afvoerverdeling Rijntakken 1996.0 Gestuwd | | | | | | | | |
|--|--------------|---------------|------------------|----------------|------|---------------|----------------|--------|
| Waterstanden | | | | Afvoeren | | | | |
| Lobith | Pann. kop | IJssel kop | Driel - Boven | Boven- Rijn | Waal | Pann. Kan. | Neder- rijn | IJssel |
| 700 | 684 | 663 | 663 | 773 | 629 | 144 | 25 | 119 |
| 710 | 693 | 673 | 673 | 811 | 658 | 153 | 25 | 128 |
| 720 | 702 | 682 | 682 | 849 | 688 | 161 | 25 | 136 |
| 730 | 712 | 691 | 691 | 887 | 717 | 170 | 25 | 145 |
| 740 | 721 | 700 | 700 | 925 | 746 | 179 | 25 | 154 |
| 750 | 730 | 710 | 710 | 963 | 775 | 188 | 25 | 163 |
| 760 | 740 | 719 | 719 | 1004 | 807 | 197 | 25 | 172 |
| 770 | 749 | 729 | 729 | 1046 | 839 | 207 | 25 | 182 |
| 780 | 759 | 738 | 738 | 1087 | 871 | 216 | 25 | 191 |
| 790 | 768 | 748 | 748 | 1129 | 903 | 226 | 25 | 201 |
| 800 | 778 | 757 | 757 | 1170 | 935 | 235 | 25 | 210 |
| 810 | 788 | 766 | 766 | 1213 | 968 | 245 | 25 | 220 |
| 820 | 798 | 776 | 776 | 1256 | 1001 | 255 | 25 | 230 |
| 830 | 808 | 786 | 786 | 1299 | 1034 | 265 | 25 | 240 |
| 840 | 817 | 795 | 795 | 1342 | 1067 | 275 | 25 | 250 |
| 850 | 827 | 805 | 805 | 1385 | 1100 | 285 | 25 | 260 |
| 860 | 837 | 815 | 815 | 1429 | 1134 | 295 | 25 | 270 |
| 870 | 847 | 825 | 825 | 1473 | 1168 | 305 | 25 | 280 |
| 875 | 852 | 830 | 830 | 1495 | 1185 | 310 | 25 | 285 |
| 880 | 856 | 830 | 829 | 1547 | 1202 | 345 | 60 | 285 |
| 890 | 864 | 830 | 824 | 1641 | 1236 | 405 | 120 | 285 |
| 900 | 872 | 830 | 819 | 1725 | 1270 | 455 | 170 | 285 |
| 910 | 881 | 830 | 813 | 1802 | 1302 | 500 | 215 | 285 |
| 920 | 890 | 831 | 806 | 1875 | 1336 | 539 | 253 | 286 |
| 930 | 899 | 834 | 797 | 1942 | 1369 | 573 | 284 | 289 |
| 940 | 908 | 837 | 787 | 2008 | 1405 | 603 | 311 | 292 |
| 950 | 918 | 841 | 776 | 2071 | 1441 | 630 | 334 | 296 |
| 960 | 928 | 846 | 765 | 2137 | 1479 | 658 | 357 | 301 |
| 970 | 937 | 852 | 752 | 2203 | 1518 | 685 | 378 | 307 |
| 980 | 947 | 859 | 737 | 2270 | 1558 | 712 | 398 | 314 |
| 990 | 956 | 867 | 720 | 2338 | 1599 | 739 | 416 | 323 |
| 1000 | 966 | 876 | 726 | 2400 | 1640 | 760 | 428 | 332 |
| Rijkswaterstaat Dir. Oost-Nederland Afdeling Informatie (ANIC) | | | | | | | | |

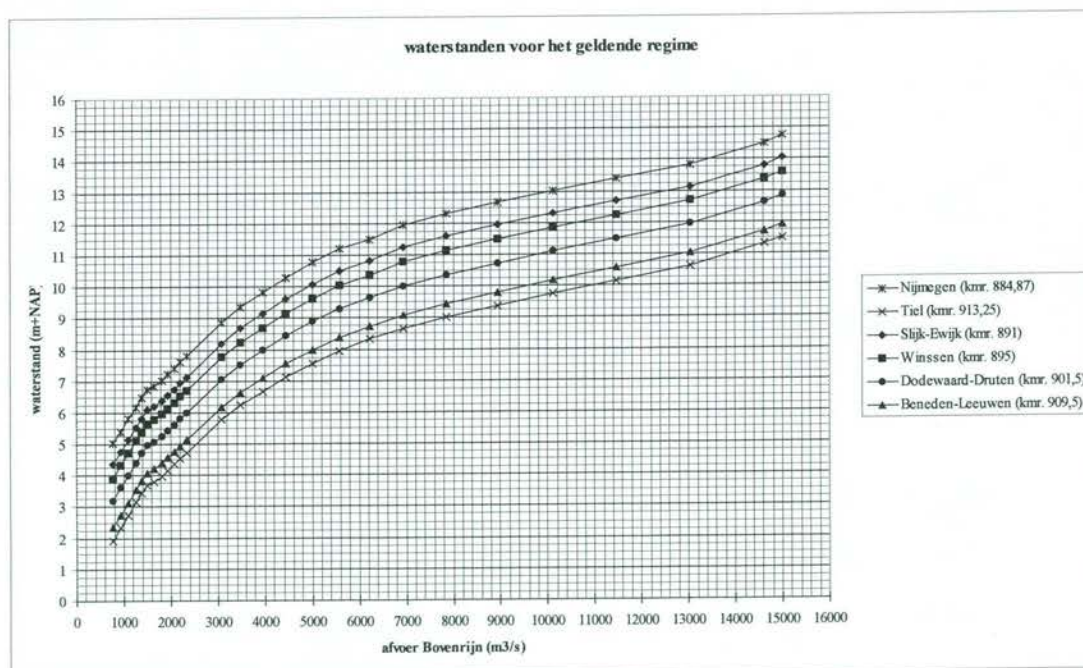
| Afvoerverdeling Rijntakken 1996.0 Gestuwd/Open | | | | | | | |
|--|--------------|---------------|----------------|----------------------------|---------------|----------------|--------|
| Waterstanden | | | Afvoeren | | | | |
| Lobith | Pann. kop | IJssel kop | Boven- Rijn | Waal | Pann. Kan. | Neder- rijn | IJssel |
| 700 | 684 | 663 | 773 | 629 | 144 | 25 | 119 |
| 750 | 730 | 710 | 963 | 775 | 188 | 25 | 163 |
| 800 | 778 | 757 | 1170 | 935 | 235 | 25 | 210 |
| 850 | 827 | 805 | 1385 | 1100 | 285 | 25 | 260 |
| 875 | 852 | 830 | 1495 | 1185 | 310 | 25 | 285 |
| 900 | 872 | 830 | 1725 | 1270 | 455 | 170 | 285 |
| 950 | 918 | 841 | 2071 | 1441 | 630 | 334 | 296 |
| 990 | 956 | 867 | 2338 | 1599 | 739 | 417 | 322 |
| 1000 | 966 | 876 | 2400 | 1640 | 760 | 428 | 332 |
| 1050 | 1015 | 918 | 2730 | 1865 | 865 | 490 | 375 |
| 1100 | 1063 | 960 | 3085 | 2105 | 980 | 560 | 420 |
| 1150 | 1111 | 1004 | 3490 | 2365 | 1125 | 645 | 480 |
| 1200 | 1160 | 1047 | 3950 | 2665 | 1285 | 740 | 545 |
| 1250 | 1209 | 1088 | 4440 | 2980 | 1460 | 840 | 620 |
| 1300 | 1258 | 1129 | 5000 | 3345 | 1655 | 955 | 700 |
| 1350 | 1306 | 1169 | 5585 | 3725 | 1860 | 1075 | 785 |
| 1400 | 1350 | 1208 | 6220 | 4145 | 2075 | 1200 | 875 |
| 1450 | 1394 | 1245 | 6940 | 4610 | 2330 | 1350 | 980 |
| 1500 | 1438 | 1281 | 7850 | 5200 | 2650 | 1540 | 1110 |
| 1550 | 1482 | 1317 | 8930 | 5860 | 3070 | 1800 | 1270 |
| 1600 | 1525 | 1352 | 10110 | 6535 | 3575 | 2105 | 1470 |
| 1650 | 1568 | 1386 | 11480 | 7345 | 4135 | 2425 | 1710 |
| 1700 | 1611 | 1418 | 13040 | 8310 | 4730 | 2765 | 1965 |
| 1750 | 1653 | 1447 | 14610 | 9290 | 5320 | 3090 | 2230 |
| 1761 | 1661 | 1454 | 15000 | 9530 | 5470 | 3165 | 2305 |
| Rijkswaterstaat Dir. Oost-Nederland | | | | Afdeling Informatie (ANIC) | | | |

| Afvoerverdeling Rijntakken 1996.0 Open rivier | | | | | | | |
|---|--------------|---------------|----------------|----------------------------|---------------|----------------|--------|
| Waterstanden | | | Afvoeren | | | | |
| Lobith | Pann. kop | IJssel kop | Boven- Rijn | Waal | Pann. Kan. | Neder- rijn | IJssel |
| 700 | 681 | 615 | 825 | 620 | 205 | 130 | 75 |
| 750 | 728 | 659 | 1050 | 768 | 282 | 167 | 115 |
| 800 | 775 | 703 | 1290 | 924 | 366 | 211 | 155 |
| 850 | 822 | 747 | 1550 | 1089 | 461 | 261 | 200 |
| 900 | 870 | 790 | 1820 | 1263 | 557 | 314 | 243 |
| 950 | 917 | 833 | 2100 | 1441 | 659 | 371 | 288 |
| 1000 | 966 | 876 | 2400 | 1640 | 760 | 428 | 332 |
| 1050 | 1015 | 918 | 2730 | 1865 | 865 | 490 | 375 |
| 1100 | 1063 | 960 | 3085 | 2105 | 980 | 560 | 420 |
| 1150 | 1111 | 1004 | 3490 | 2365 | 1125 | 645 | 480 |
| 1200 | 1160 | 1047 | 3950 | 2665 | 1285 | 740 | 545 |
| 1250 | 1209 | 1088 | 4440 | 2980 | 1460 | 840 | 620 |
| 1300 | 1258 | 1129 | 5000 | 3345 | 1655 | 955 | 700 |
| 1350 | 1306 | 1169 | 5585 | 3725 | 1860 | 1075 | 785 |
| 1400 | 1350 | 1208 | 6220 | 4145 | 2075 | 1200 | 875 |
| 1450 | 1394 | 1245 | 6940 | 4610 | 2330 | 1350 | 980 |
| 1500 | 1438 | 1281 | 7850 | 5200 | 2650 | 1540 | 1110 |
| 1550 | 1482 | 1317 | 8930 | 5860 | 3070 | 1800 | 1270 |
| 1600 | 1525 | 1352 | 10110 | 6535 | 3575 | 2105 | 1470 |
| 1650 | 1568 | 1386 | 11480 | 7345 | 4135 | 2425 | 1710 |
| 1700 | 1611 | 1418 | 13040 | 8310 | 4730 | 2765 | 1965 |
| 1750 | 1653 | 1447 | 14610 | 9290 | 5320 | 3090 | 2230 |
| 1761 | 1661 | 1454 | 15000 | 9530 | 5470 | 3165 | 2305 |
| Rijkswaterstaat Dir. Oost-Nederland | | | | Afdeling Informatie (ANIC) | | | |

Betrekkingenlijnen 1996.0

| Waterstandsduurlijn Bovenrijn en Waal 1996.0 | | | | | | | | |
|--|----------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|
| afvoer | peilschaal | | | | | | | |
| Bovenrijn (m ³ /s) | Lobith (kmr. 862,18) | Pannerdensch (kmr. 867,22) | Nijmegen (kmr. 884,87) | Tiel (kmr. 913,25) | St. Andries (kmr. 926,12) | Zaltbommel (kmr. 934,78) | Vuren (kmr. 951,78) | Gem. Onderscheiding 1901-1995 |
| 773 | 700 | 684 | 502 | 193 | 84 | 46 | 39 | 3 |
| 925 | 740 | 721 | 541 | 233 | 117 | 70 | 46 | 12,09 |
| 1087 | 780 | 759 | 581 | 273 | 153 | 94 | 53 | 29,34 |
| 1256 | 820 | 798 | 619 | 314 | 187 | 118 | 63 | 54,07 |
| 1385 | 850 | 827 | 649 | 344 | 213 | 136 | 70 | 77,13 |
| 1495 | 875 | 852 | 675 | 369 | 235 | 152 | 76 | 96,64 |
| 1641 | 890 | 864 | 686 | 381 | 245 | 159 | 80 | 123,26 |
| 1802 | 910 | 881 | 704 | 398 | 259 | 170 | 84 | 153,73 |
| 1942 | 930 | 899 | 722 | 416 | 274 | 182 | 89 | 179,29 |
| 2071 | 950 | 918 | 742 | 435 | 290 | 196 | 94 | 202,03 |
| 2203 | 970 | 937 | 761 | 454 | 307 | 209 | 99 | 222,51 |
| 2338 | 990 | 956 | 781 | 472 | 323 | 224 | 105 | 242,26 |
| 2529 | 1020 | 985 | 810 | 501 | 347 | 246 | 112 | 266,15 |
| 2798 | 1060 | 1025 | 851 | 540 | 382 | 277 | 125 | 290,47 |
| 3085 | 1100 | 1063 | 887 | 577 | 415 | 309 | 138 | 309,05 |
| 3490 | 1150 | 1111 | 935 | 623 | 456 | 348 | 159 | 325,72 |
| 3950 | 1200 | 1160 | 983 | 668 | 497 | 388 | 182 | 337,54 |
| 4440 | 1250 | 1209 | 1030 | 713 | 540 | 430 | 209 | 346,37 |
| 5000 | 1300 | 1258 | 1077 | 756 | 582 | 470 | 238 | 352,91 |
| 5585 | 1350 | 1306 | 1120 | 796 | 624 | 510 | 270 | 357,47 |
| 6220 | 1400 | 1350 | 1149 | 832 | 662 | 548 | 300 | 360,47 |
| 6940 | 1450 | 1394 | 1195 | 866 | 700 | 585 | 330 | 362,5 |
| 7850 | 1500 | 1438 | 1230 | 901 | 740 | 623 | 364 | 364,02 |
| 8930 | 1550 | 1482 | 1265 | 937 | 778 | 659 | 398 | 364,71 |
| 10110 | 1600 | 1525 | 1302 | 975 | 817 | 695 | 432 | 365,07 |
| 11480 | 1650 | 1568 | 1341 | 1014 | 858 | 732 | 468 | 365,2 |
| 13040 | 1700 | 1611 | 1384 | 1060 | 904 | 777 | 506 | 365,24 |
| 14645 | 1750 | 1653 | 1450 | 1130 | 966 | 844 | 572 | 365,24 |
| 15000 | 1761 | 1661 | 1475 | 1148 | 990 | 873 | 607 | 365,24 |
| Rijkswaterstaat Dir. Oost-Nederland | | | | Afdeling Informatie (ANIC) | | | | |

Uit voorgaande tabellen is via interpolatie een grafiek samengesteld voor de waterstanden op de trajecten van de Proef Morfologie bij afvoeren van de Boven-Rijn en voor het geldende afvoerregime:





wl | delft hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

