

**Taal van de rivierbodem**





# Taal van de rivierbodem

parameters voor morfodynamiek in rivieren

13 juni 2008

J. Sieben

Waterdienst rapport nr WD 2008-049



---

Inhoud	3
Samenvatting	5
Hoofdstuk 1 Inleiding	
1.1 Aanleiding	7
1.2 Voorspelinstrumenten	7
1.3 Doel van deze studie	9
1.4 Aanpak	9
Hoofdstuk 2 Definitie van bodemparameters	
2.1 Achtergrond	11
2.2 Databehoefte	12
2.3 Bepaling van representatieve morfodynamica	13
2.4 Bodenvorm-gemiddelde bodemligging	14
2.5 Duinhoogte	16
2.6 Oriëntatie en lengte van bodenvormen	17
2.7 Verplaatsingssnelheid	18
2.8 Onderscheid plaatsvaste en verplaatsende bodenvormen	19
2.9 Automatische bepaling bodemparameters	22
2.10 Conclusies	25
Hoofdstuk 3 Bodemparameters van de Waal	
3.1 Achtergrond	27
3.2 Bodemliggingen	27
3.3 Bodenvormen in de Waal	29
3.4 Dwarsvariatie in bodemparameters	32
3.5 Richting van bodenvormen	33
3.6 Rotatie van bodenvormen	35
3.7 Conclusies	38
Hoofdstuk 4 Bodemparameters IJssel	
4.1 Achtergrond	39
4.2 Bodemliggingen	39
4.3 Zomerbedverdieping IJssedelta	40
4.4 Bodenvormen in de IJssel	42
4.5 Dwarsvariaties in bodemparameters	45
4.6 Richting van bodenvormen	45
4.7 Conclusies	49
Hoofdstuk 5 Bodemparameters van de Nieuwe Waterweg	
5.1 Achtergrond	51
5.2 Bodemliggingen 2004-2007	51
5.3 Bodenvormen in de Nieuwe Waterweg	54
5.4 Verplaatsingssnelheid	56
5.5 Conclusies	58

---

Hoofdstuk 6 Bodemparameters van de Dordtsche Kil	
6.1 Achtergrond	61
6.2 Profielgemiddelde bodemparameters	61
6.3 Dwarsvariatie in bodemparameters	64
6.4 Conclusies	65
Hoofdstuk 7 Verplaatsingssnelheid van bodemvormen	
7.1 Achtergrond	67
7.2 Hypothese verplaatsingssnelheid	67
7.3 Grootschalig gedrag in vaargeul Waal 2002-2003	69
7.4 Maandelijke peilingen Nieuwe Waterweg	72
7.5 Maandelijke peilingen Dordtsche Kil	73
7.6 Detailmetingen binnenbocht Waal	73
7.7 Hoogwatergegevens Bovenrijn, Waal en Merwede	75
7.8 Toepassing model verplaatsingssnelheid	78
7.9 Conclusies	80
Hoofdstuk 8 Belangrijkste conclusies	
8.1 Algemeen	81
8.2 Eerste indruk van bodemparameters	82
8.3 Perspectieven voor toepassing	83
Referenties	85
Bijlage A Automatische procedure voor de bepaling van bodemparameters (Fortran code)	87

---

## Samenvatting

### Aanleiding

Voor een duurzaam beleid en voor een optimaal beheer van rivieren is kennis over rivierbodempliggingen onontbeerlijk. Ter ondersteuning hiervan is, gestimuleerd door Rijkswaterstaat een nieuwe generatie morfologische modellen in ontwikkeling bij Deltares. De morfologische informatie die voor modellen van riviermorfologie de basis vormt heeft deze ontwikkeling echter in veel gevallen niet bijgehouden.

### Doel

Inmiddels kan deze zwakke schakel worden versterkt. Met het groeiend aantal multibeampeilingen van de grote rivieren komt onverwacht een grote informatierijkdom van bodempliggingen beschikbaar. Om al deze informatie daadwerkelijk te kunnen ontsluiten en gebruiken wordt in dit document een methodiek beschreven waarmee eenduidig en geautomatiseerd de morfodynamiek gekarakteriseerd kan worden. Dit alles met als doel om

*met meer inzicht de rivieren beter te beheren en de moderne voorspelkracht van modellen beter te benutten.*

### Uitvoering

De studie is uitgevoerd in de stuurboordprojecten "Morfologie van de Vaarweg", "Onzekerheden in vaarwegbodempliggingen"; "Effectiviteit beheer en onderhoud vaargeul Westerschelde", "Morfologie Rijn, Maas en Benedenrivieren", en op relevante onderdelen in de projecten "Ontwikkeling BOS Baggeren", "Duurzame Vaardiepte Rijndelta", "PKB Ruimte voor de Rivier".

### Conclusies en resultaten

De beschreven methodiek is het belangrijkste resultaat van de studie. De voorbeeldtoepassingen van Waal, IJssel, Nieuwe Waterweg en Dordtsche Kil zijn in dit document niet bedoeld voor uitvoerige systeemanalyses. Deze laten echter wel zien hoe de morfodynamiek in de beschouwde rivieren aanzienlijk varieert, en wat de invloed van bochten, bodemmateriaal en getij op de morfodynamiek kan zijn. Geconcludeerd wordt dat de gedefinieerde bodemparameters op eenduidige wijze leiden tot een verbeterde en uitgebreide systeembeschrijving die kan worden gebruikt om meer inzicht in rivierbodempliggingen te verwerven, en om de nieuwe generatie modellen voor rivierbodempliggingen krachtiger en betrouwbaarder te maken.

Resultaten van de methodiek zijn inmiddels toegepast in modulen van het BOS Baggeren, in de productie van vaargeulkaarten van de Waal, bij advisering over het vaarwegbeheer in de Dordtsche Kil, bij advisering over het onderhoud aan zomerbedverdieping voor Ruimte voor de Rivier en bij de bouw van duinhoogtevoorspellers in Delft2D vaarwegmodellen.

---



---

## Hoofdstuk 1 Inleiding

### 1.1 Aanleiding

Kennis over de bodemligging van het zomerbed speelt een rol in een groot aantal functies van de rivier. Informatie over bodemliggingen is bijvoorbeeld nodig voor het vaststellen van toetspeilen voor extreme afvoer; het beoordelen van waterstandsverlagende maatregelen in zomerbed en uiterwaarden; het plannen van baggerwerkzaamheden of het voorspellen van erosie of juist afdekking van vervuilde waterbodems.

Een duurzaam gebruik en beheer van het zomer- en winterbed van rivieren vergt prognoses van toekomstige bodemontwikkelingen. Voor traag reagerende rivieren als de Rijnakken en de Maas geldt daarbij dat vooruitblikken in de toekomst niet lukt zonder om te zien naar trends in het verleden. Daarbij kunnen in de regel waterstand en bodemligging verder vooruit voorspeld worden naarmate de ontwikkelingen in een groter riviertraject worden beschouwd. Dus, om gesteld te kunnen staan voor een toekomst met veranderend klimaat en een onverminderd intensief gebruik van de rivieren, is begrip nodig van actuele en historische bodemontwikkelingen en prognoses van toekomstige bodemveranderingen voor grote riviertrajecten.

Morfologische veranderingen zijn voor beheer en gebruik van de rivier niet alleen relevant op langere termijn, maar spelen ook een rol bij alledaagse aspecten. Bijvoorbeeld

- de aflaaddiepte in de vaargeul in de komende *dagen*
- de bodemverandering bij keringen en constructies tijdens een hoogwater in een *week* van een hoogwaterperiode
- het onderhoudsbaggerwerk in de *maanden* van het laagwaterseizoen
- de vaarbaanbreedte in de eerste *jaren* na aanleg van vaarwegverbeteringswerken
- de invloed van zandwinning op bodemliggingen na een *decennium*
- grootschalige bodemontwikkelingen over perioden van 100 jaar, door normalisatie, landgebruik, klimaatsverandering, afvoerverdeling en zandwinning,...

Inzicht in bodemontwikkelingen is dus van belang voor het formuleren van een *duurzaam beleid* op langere termijn (meer dan 20 jaar) en voor een *optimaal beheer* en onderhoud op kortere termijn (van enkele weken tot 20 jaar).

Dit document behandelt bodemparameters die de relevante kwantitatieve morfologische processen zodanig beschrijven dat een goede afregeling van morfologische modellen nodig wordt. De nadruk ligt daarbij op toepassingen die relevant kunnen zijn voor Rijkswaterstaat.

### 1.2 Voorspelinstrumenten

Dankzij de voortdurende ontwikkelingen in de modellen van riviermorfologie is inzet van deze numerieke modellen een nuttig en in veel gevallen onmisbaar rivierkundig instrument geworden. Verwacht mag worden dat dankzij krachtig gebruik van informatie-technologieën, de plek die dit modelinstrument in de rivierkundige praktijk heeft verworven in de toekomst nog groter wordt. Omdat dankzij diezelfde informatietechnologie ook steeds meer informatie beschikbaar komt over kwantiteit en kwaliteit van rivierbodems, betekent dit dat een steeds betere afregeling van modellen op rivierprocessen in de natuur niet alleen nodig, maar ook mogelijk is geworden.

De benodigde modellen hebben een aantal eigenschappen. Voor de Maas en de Rijnakken worden *analyses* van historische trends en *voorspellingen* van bodemontwikkelingen gemaakt met informatie en modellen. Door het bestuderen van riviertrajecten in samenhang kan de invloed tussen verschillende beheersgebieden (nationaal en internationaal) beter worden bepaald en voorspeld. Dit maakt het signaleren

---

van (toekomstige) knelpunten en het goed afstemmen van het beheer van verschillende rivierdirecties mogelijk. Om rivierstukken (bovenrivieren en benedenrivieren) daarbij in samenhang te kunnen beschouwen is er behoefte aan grootschaliger modellen (WL, 2008a).

Dit betekent niet alleen dat modellen steeds grotere riviertrajecten beschrijven, maar dat in één enkel model ook meer verschillende processen gecombineerd zullen voorkomen met variërende lengte- en tijdschalen. Bijvoorbeeld de afpleistering van toplagen, de erosie van oude kleilagen, de ontwikkeling van bodemvormen, de segregatie van grind, zand en slib, de sedimentuitwisseling tussen hoofdgeul en kribvakken, de sedimentatie bij zoet/zout overgangen, de bodemveranderingen tijdens getij en veranderingen in rivierbochten en rechtstanden tijdens hoogwater. Een functioneel ontwerp van een model voor de vaarweg kan bij wijze van voorbeeld gevonden worden in RIZA (2005). Deze grotere en uitgebreide modellen vergen snelle analyses voor een nuttige inzet in de praktijk, met het doorrekenen van meerdere scenario's. Dus, behalve de combinatie van meerschalyge processen behoort ook efficiënt en snel rekenen tot een essentiële eigenschap van de voorspelinstrumenten (WL, 2008b).

Met modellen wordt doorgaans van een bekende situatie geëxtrapoleerd naar onbekende omstandigheden (hoogwater, toekomstige afvoeren, verruimde uiterwaarden of een aangepaste zomerbedgeometrie). De eisen aan deze inschattingen groeien met het steeds intensiever gebruik en beheer van de rivier. Het hoeft geen betoog dat de modellen voor morfologische processen onder frequent waargenomen gemiddelde omstandigheden nauwkeuriger en betrouwbaarder zijn dan voor processen tijdens hoogwater. Echter, ook (het simuleren van) de invloed van extremere gebeurtenissen op bodemliggingen is relevant voor Rijkswaterstaat. Ook presteren afzonderlijke modellen voor geïsoleerde rivierstukken beter dan grootschalige modellen met overgangen van bijvoorbeeld rivier naar zee en van grindige naar zandige rivierstukken. Goede modellering van deze complexere rivierstukken maakt een duurzamer beheer mogelijk.

Tenslotte richten de meeste operationele modellen zich nog uitsluitend op veranderingen in bodemliggingen zonder *interactieve* invloed van rivierbeheer (baggeren en storten). Echter, voor intensief gebruikte trajecten van de Nederlandse rivieren is het vaarwegonderhoud dermate ingrijpend dat hiermee geen goede simulatie van bodemliggingen mogelijk is. Bovendien wordt slechts gerekend met bodemliggingen die zijn gemiddeld over kleinschalige bodemfluctuaties, dus bodemliggingen zonder duinen. Dit betekent dat een tijds- en plaatsafhankelijke invloed van bijvoorbeeld duinen op vaardiepte en bodemruwheid niet expliciet wordt voorspeld.

In de periode 2004 - 2006 is een begin gemaakt met het verbeteren van de modellen voor hydraulische en morfologische processen in de vaarweg tijdens hoogwater, in de stuurboordprojecten *Morfologie van de vaarweg en Onzekerheid voorspelde vaarwegbodem*. In het project *Duurzame Vaardiepte Rijndelta* (ON) zijn in 2006-2008 een groot aantal innovaties toegepast in een instrument voor lange-termijn-voorspellingen van vaargeuldimensies en beheer en onderhoud op het traject Duisburg, Doesburg, Driel en Werkendam (WL, 2008c). In het project "*Morfologie van Rijn, Maas en Benedenrivieren*" (2007-2008) is gewerkt aan modellen voor grootschalige bodemontwikkelingen, vanaf de Pannerdensch Kop tot en met de Rijn-Maas monding (WL, 2008a). Immers, het beheer en gebruik van de rivieren is gediend met een eenduidig voorspelgereedschap voor waterstanden en bodemliggingen in boven- en benedenrivieren.

De combinatie van meerschalyge riviermorfologische processen in boven- en benedenrivieren, het interactief beschouwen van vaargeulonderhoud, de bijdrage van bodemvormen, en de (probabilistische) scenario-behandeling van toekomstige ontwikkelingen lijken kenmerken te worden van een nieuwe generatie morfologische modellen voor de simulatie van vaarwegafmetingen.

---

### 1.3 Doel van deze studie

Om met het voorspelinstrumentarium tegemoet te kunnen komen aan rivierkundige vragen in de Rijkswaterstaatspraktijk is een steeds grotere en nauwkeuriger voorspelkracht nodig, met voorspelde morfologische informatie op variërende ruimte- en tijdschalen. Deze informatie van de rivier is met het groeiend gebruik van *multibeam echosounding* (MBES) ook in toenemende mate beschikbaar gekomen. Dit document is geschreven binnen het project *Morfologie Rijn, Maas en Benedenrivieren* om te laten zien

*hoe de informatie van MBES bodempeilingen kan worden weergegeven in bodemparameters waarmee meer begrip van het huidige systeem wordt verkregen, en een goede afregeling van de nieuwe generatie morfologische modellen mogelijk wordt.*

### 1.4 Aanpak

Bodempeilingen kunnen met ARC GIS tot kaartmateriaal worden verwerkt voor visuele analyses (bijvoorbeeld Bijlage D in WL, 2008a). Met een beeld van ruimtelijk structuren in bodemvormen, binnen- en buitenbocht, natuurlijke en aangelegde vaste lagen is dit kaartmateriaal onmisbaar voor een goede kennismaking met de morfologie van een rivierstuk.

Aanvullend op de bestaande ARC GIS middelen kunnen bodempeilingen worden bewerkt tot bodemparameters die de morfodynamiek karakteriseren en trends kwantitatief vaststellen. Hiermee kunnen bodemontwikkelingen objectief (numeriek) worden gevolgd en kunnen voorspelinstrumenten eenduidig worden gecalibreerd en geverifieerd. De methodiek in dit document is op het bepalen van deze bodemparameters gericht.

Om de informatie uit bodempeilingen goed te karakteriseren worden in Hoofdstuk 2 eerst de kenmerkende bodemparameters gedefinieerd. Daarna wordt de methodiek beschreven hoe deze bodemparameters met een automatische routine kunnen worden bepaald. In de hoofdstukken daarna wordt de methodiek toegepast voor een aantal zeer verschillende rivierstukken. Deze toepassingen dienen grotendeels ter karakterisering van riviertakken. Dit om te laten zien welke informatie besloten ligt in multibeampeilingen en hoe deze kan worden gebruikt. Een analyse van trends blijft in dit document grotendeels achterwege.

---

---

## Hoofdstuk 2 Definitie van bodemparameters

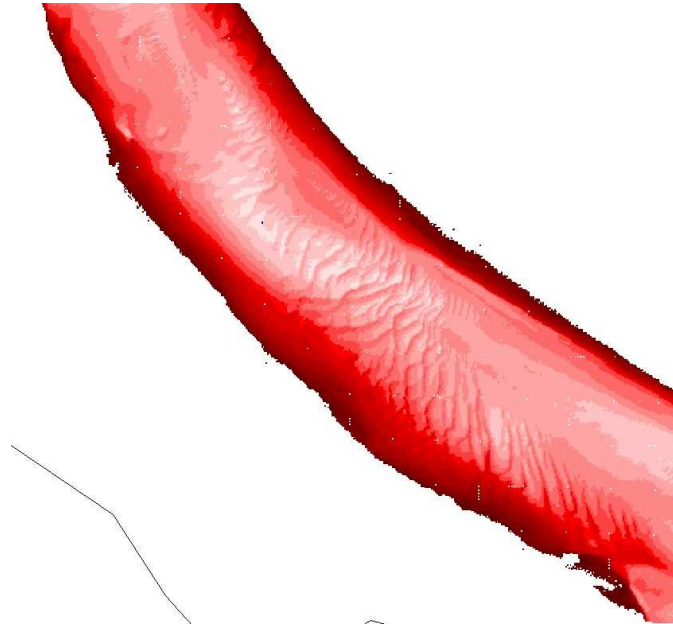
### 2.1 Achtergrond

De benodigde bodemparameters kunnen worden gedefinieerd met de *databehoefte* van de gebruiker en de *datastructuur* van het systeem. De databehoefte is grotendeels afhankelijk van de rivierfuncties. Zo beïnvloedt de bodemligging in het zomerbed de

- *waterstand bij maatgevende afvoer* (veiligheid tegen overstromen)
- *waterstand bij lagere afvoeren*<sup>1</sup>
- bevaarbare *diepte* in de vaargeul
- *stabiliteit* van oevers en kunstwerken (kaden, kribben, tunnels, brugpijlers, leidingen,...)
- *stabiliteit* van bodemmateriaal (erodeerbare lagen in de ondergrond, verontreinigde afzettingen onder de toplaag)

Deze diversiteit in relevante aspecten betekent dat voor het zomerbed behoefte is aan de bepaling van bijvoorbeeld

- bodemliggingen gemiddeld over de breedte en over het vak van een rivierkilometer<sup>2</sup> voor het weergeven van grootschalige bodemontwikkelingen op langere termijn
- bodemliggingen in bochtige trajecten en bij constructies, gemiddeld over kleinschalige fluctuaties
- afmetingen, aanpassings- en verplaatsingssnelheid van bodemvormen (duinen)
- afmetingen en aanpassingssnelheid van plaatsvast bodemvormen bij constructies



**Figuur 2.1** Voorbeeld van ruimtelijke variatie in bodemvormen in de vaargeul van de Westerschelde (RIZA memo 2006-023).

---

<sup>1</sup> Grootschalige bodemdaling in bovenstroomse trajecten van de Rijntakken leidt tot veranderingen in de afvoerdeling bij de Pannerdensch Kop, verdroging van uiterwaarden, de afname van dekking op kabels en leidingen in het zomerbed, een verminderde toegang tot binnenhavens en sluizen en een afname in de stabiliteit van kribben en oevers.

<sup>2</sup> Dit sluit aan bij aanwezige databases van Maas en Rijntakken, zodat bodemontwikkelingen over een lange termijn zo consistent mogelijk zichtbaar gemaakt kunnen worden.

---

Om deze parameters goed te kunnen bepalen en/of voorspellen is een beschrijving en/of simulatie van relevante processen nodig, die rekening houden met het ruimtelijke en temporele karakter van de bodemligging. Dus, om veranderingen in de rivierbodembodem te kunnen karakteriseren moet de kenmerkende bodemdynamiek worden beschouwd. Voor de rivieren in Nederland varieert deze van een afgepleisterde grindbodembodem (bovenstroomse delen van Maas en Rijnakken) die alleen bij hogere bodemschuifspanningen in beweging komt, tot een volledig beweegbare bodembodem van fijner sediment (benedenstroomse delen van Maas en Rijnakken).

Deze bodemdynamiek uit zich vooral in de ontwikkeling van kleinschalige *bodemvormen* (ribbels, duinen) die de grootte en richting van sedimenttransport aanduiden, de effectieve vaardiepte beïnvloeden en via vormverliezen aan de hydraulische bodemruwheid bijdragen. Dit laatste is van belang voor de opstuwings van waterstanden bij zowel lage als hoge afvoeren. Kortom, de ruimtelijke en temporele structuur van de bodemligging is een indicatie van de morfodynamiek en is daarom relevant voor gebruik, beheer en beleid van rivieren.

## 2.2 Databehoefte

Als uitgangspunt wordt gebruikt dat bodemparameters

- 1) de voor het riviergebruik en rivierbeheer relevante bodemveranderingen weergeven
- 2) aansluiten bij bestaande databases (bv. profielgemiddelde waarden per rivier km) om lange termijn bodemontwikkelingen in het riviersysteem te kunnen vaststellen
- 3) aansluiten bij de concepten van modellen voor het voorspellen van bodemliggingen
- 4) geautomatiseerd bepaald moeten worden
- 5) eenduidig interpreteerbaar zijn

De kleinste ruimte-schaal van relevante rivierbodembodemveranderingen komt vermoedelijk overeen met de waterdiepte. Een voorbeeld hiervan is de waarneming van *lokale ontgrondingen* bij constructies (kribben, pijlers, vaste lagen,..) die bij inspectie worden beschouwd om de stabiliteit van kunstwerken te beoordelen (RIZA, 2005b). Bij voorkeur dient de basisinformatie voor deze toepassingen met een resolutie van maximaal 25% van de waterdiepte beschikbaar te zijn. Ook voor het bepalen van afluaddiepten is het noodzakelijk om lokale *bodemfluctuaties* goed te kunnen interpreteren. De resolutie van waarnemingen dient daarbij maximaal 25% van de optredende bodemvormlengten te bedragen. Omdat afmetingen van deze bodemfluctuaties onder andere gerelateerd zijn aan de waterdiepte, is ook voor deze toepassing 25% van de waterdiepte een pragmatische maat voor de maximale resolutie van bodemwaarnemingen. Voor de Waal, met een profielgemiddelde waterdiepte van ongeveer 4 m betekent dit een resolutie van maximaal 1 m x 1 m. Voor de meeste datasets die zijn verkregen met multibeam echosounding wordt aan deze minimale resolutie dan ook gemakkelijk voldaan.

Voor speciale studies kan deze 25% norm desondanks onvoldoende zijn. Als bijvoorbeeld de lokatie van lijnelementen (kabels, leidingen, bodemverdedigingen, steilranden) moet worden bepaald, of als afmetingen van kleinschalige bodemvormen moeten worden vastgesteld voor het inschatten van menging in de toplaag van de rivierbodembodem kan een nog kleinere resolutie nodig zijn. A priori dient een schatting te worden gemaakt van de afmetingen van de te bestuderen bodemvormen, en vervolgens dient de gewenste resolutie als fractie daarvan te worden bepaald.

---

## 2.3 Bepaling van representatieve morfodynamica

De meeste informatie van bodemliggingen in dit document is afkomstig van de Waal. Op de Waal wordt de bevaarbare diepte bepaald door zowel de langzaam reagerende gemiddelde bodemligging in ondiepe binnenbochten als door de sneller reagerende bodemvormen in rechtstanden (zie bijvoorbeeld het BOS Baggeren). Het voorspellen van bodemliggingen voor zowel de korte termijn (enkele weken) als de langere termijn (baggerseizoenen buiten hoogwaterperiode) vergt dus inzicht in beide typen morfodynamiek. Bodemvormen spelen bovendien een rol in de hysteresis van bodemruwheid en bodemhoogte tijdens hoogwater (RIZA Memo 2006-014) en in de richting van sedimenttransport in bochten (RIZA Memo 2007-05).

Om zowel de *grootschalige bodemveranderingen* als de *kleinschalige bodemdynamiek* te kunnen beschouwen kan een onderscheid worden gemaakt in i) snelle, lokale bodemveranderingen door verplaatsende bodemvormen, en ii) langzame veranderingen in ruimtelijk-gemiddelde bodemligging.

- **Temporele statistiek**

Dit onderscheid tussen grootschalige veranderingen en kleinschalige fluctuaties is bijvoorbeeld mogelijk door het bepalen van een *stationaire* bodemligging die door middeling van een groot aantal peilingen uit een voldoende lange periode is bepaald (RIZA, 2005b). Alle afwijkingen van deze tijdsgemiddelde bodemligging kunnen dan vervolgens worden toegeschreven aan *verplaatsende* bodemvormen. Echter, een statistisch verantwoord onderscheid tussen een tijdsgemiddelde bodem en verplaatsende bodemvormen is pas mogelijk bij een voldoende groot aantal bodempeilingen, in een rivierstuk zonder trends in bodemveranderingen, met min of meer vergelijkbare hydraulische condities en zonder verstoringen door baggeren en/of storten. Voor de meeste rivierstukken kan hieraan niet worden voldaan.

- **Ruimtelijke statistiek**

In plaats van middeling in de *tijd* over verschillende peilingen worden bodemvormen in deze studie daarom bepaald door middeling in de *ruimte* over een deeloppervlak van de rivierbodem. Een aantal problemen van de temporele statistiek worden zo weliswaar omzeild, maar hierdoor wordt echter niet direct een onderscheid gemaakt tussen *plaatsvaste* en *verplaatsende* bodemvormen (zie ook Sectie 2.8).

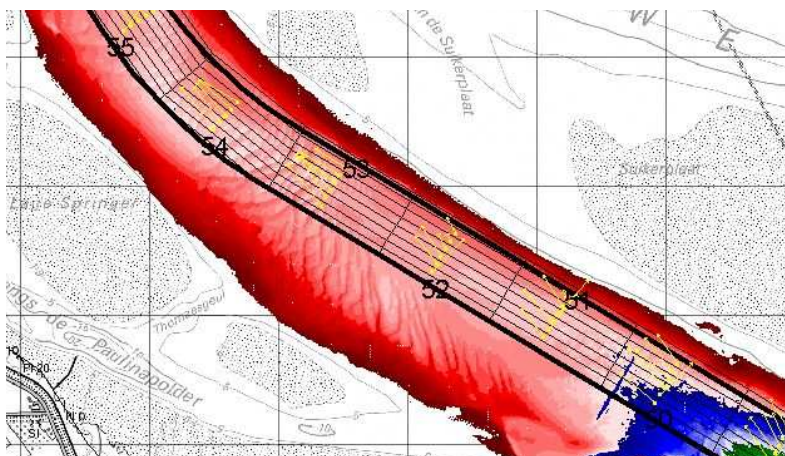
De bodemligging wordt verondersteld te bestaan uit i) een gemiddelde bodemligging die langzaam reageert op de hydraulische condities en ii) bodemfluctuaties door bodemvormen die snel reageren. De parameters van de gemiddelde bodemligging ad i) en de bodemvormen ad ii) moeten zodanig uit de waarnemingen worden bepaald dat de waargenomen ruimtelijke structuur er goed mee wordt beschreven. Ofwel, het deeloppervlak voor ruimtelijke middeling moet *lang* genoeg zijn om een voldoende aantal bodemvormen te bevatten, en *kort* genoeg om de ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemligging goed weer te geven. De bepaling van bodemparameters vergt daarmee drie stappen

1. indeling van het interessegebied in deeloppervlakken
2. karakterisering van de gemiddelde bodemligging
3. karakterisering van de bodemvormen

Met deze methode worden alle bodemvorm-structuren (primair, secundair, groot- en kleinschalig, verplaatsend en plaatsvast) met één enkele bodemvorm gekarakteriseerd. Dit betekent dat de karakteristieke bodemvormparameters niet zozeer als fysische grootheden maar statistisch representatieve parameters moeten worden opgevat. Bij toepassing van de bodemparameters in

empirische formules (bijvoorbeeld sedimenttransport- of bodemruweheidsvoorspellers) moet dit goed worden beseft.

De deeloppervlakken uit stap 1 zijn al vóór het analyseren van de bodemparameters gedefinieerd. Daardoor moet eigenlijk proefondervindelijk worden vastgesteld of hiermee de bodemligging goed gekarakteriseerd kan worden. Een overzicht van reeds gebruikte roosters is weergegeven in Tabel 2.1. In Fig.2.2 is een voorbeeld gegeven van 1000 mx70 m deeloppervlakken zoals deze zijn toegepast in een verkennende analyse van de vaargeul in de Westerschelde (RIZA Memo 2006-023).



**Figuur 2.2** Voorbeeld deeloppervlakken van 1000 m x 70 m, in de vaargeul van de Westerschelde (RIZA memo 2006-023).

Behalve voor de grootschalige toepassingen uit Tabel 2.1 is de methodiek ook gebruikt voor de analyse van deelgebieden. Zo is bijvoorbeeld een rooster met celafmetingen van 20 m x 20 m toegepast op een bodempeiling met lengte van 200 m en een breedte van 60 m, voor de analyse van secundaire bodemvormen op een grotere bodemvorm.

	traject km	aantal cellen in langsrichting	aantal cellen in dwarsrichting	celgrootte in langsrichting [m]	celgrootte in dwarsrichting [m]
Bovenrijn-Waal	854-959	216	7	500	50
IJssel	878-1005	941	8	125	25
Nieuwe Waterweg	1010-1034	49	7	500	50
Dordtsche Kil	980-988	19	7	500	50
Westerschelde	nvt	140	8	500	50

**Tabel 2.1** Overzicht kenmerkende roosterafmetingen.

## 2.4 Bodemvorm-gemiddelde bodemligging

Als de afmetingen van de deeloppervlakken zijn gedefinieerd, dan kan per deeloppervlak een vlak door de waarnemingen worden gefit. Dit *fitvlak* heeft in het centrum van het deeloppervlak een gemiddelde waarde die representatief is voor de bodemvorm-gemiddelde bodemligging. Voor een constante datadichtheid (bodempunten op een gelijkmatig grid) komt deze waarde overeen met het rekenkundig gemiddelde van alle waarnemingen uit het deeloppervlak. Toch verdient het wat ingewikkelder fitten van een vlak de voorkeur boven het bepalen van een rekenkundig gemiddelde. Immers, als de oorspronkelijke bodempunten van vaartracks worden gebruikt, dan is sprake van een onregelmatig grid



van bodemwaarnemingen in het deeloppervlak en is het directe rekenkundig gemiddelde daarvan niet altijd representatief voor de werkelijke gemiddelde bodemligging in het deeloppervlak.

Het vlak wat door de waarnemingen wordt gefit, wordt hier gedefinieerd als

$$\bar{z}(x, y) = z_m + a(x - x_m) + b(y - y_m) \quad ; \quad a = \frac{\partial \bar{z}(x, y)}{\partial x} \quad ; \quad b = \frac{\partial \bar{z}(x, y)}{\partial y} \quad (2.1)$$

Hierin zijn  $(x_m ; y_m)$  de ruimte-coördinaten in het centrum van het deeloppervlak. Met gebruik van rijksdriehoekscoördinaten is de  $y$ -as is gericht naar het Noorden, de  $x$ -as naar het Oosten. De bodemligging van het deeloppervlak wordt dus beschreven met de waarde  $z_m$ .

De definitie van het ruimtelijk vlak met Verg.2.1 betekent dat uit de waarnemingen drie parameters moeten worden bepaald;  $z_m$ ,  $a$  en  $b$ . Dit wordt bereikt met lineaire regressie. Het verschil tussen een gemeten bodempunt  $(Z_i ; x_i ; y_i)$  en de hoogte van het fitvlak wordt daartoe geschreven als

$$\varepsilon_i = Z_i - z_m - a(x_i - x_m) - b(y_i - y_m) \quad (2.2)$$

De fit van het vlak is optimaal met de volgende drie condities:

$$\bar{\varepsilon}_i = 0 \quad \rightarrow \quad z_m = \bar{Z}_i - a(\bar{x}_i - x_m) - b(\bar{y}_i - y_m) \quad (2.3-a)$$

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}_i^2}{\partial a} = 0 \quad \rightarrow \quad 2a(\bar{x}_i - x_m)^2 + 2b(\bar{x}_i - x_m)(\bar{y}_i - y_m) - 2(\bar{x}_i - x_m)(\bar{Z}_i - z_m) = 0 \quad (2.3-b)$$

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}_i^2}{\partial b} = 0 \quad \rightarrow \quad 2b(\bar{y}_i - y_m)^2 + 2a(\bar{x}_i - x_m)(\bar{y}_i - y_m) - 2(\bar{y}_i - y_m)(\bar{Z}_i - z_m) = 0 \quad (2.3-c)$$

Met de drie condities van Verg.2.3 kunnen vervolgens de drie onbekenden  $z_m$ ;  $a$  en  $b$  worden bepaald

$$a = \frac{z_m X + Y}{W} \quad ; \quad b = \frac{z_m U + V}{W} \quad \text{en} \quad z_m = \frac{\bar{Z}_i W - Y(\bar{x}_i - x_m) + V(\bar{y}_i - y_m)}{W + X(\bar{x}_i - x_m) - U(\bar{y}_i - y_m)} \quad (2.4-a)$$

met de symbolen uitgewerkt als

$$W = (\bar{x}_i \bar{y}_i - \bar{x}_i \bar{y}_m - \bar{x}_m \bar{y}_i + \bar{x}_m \bar{y}_m)^2 - (\bar{x}_i^2 + \bar{x}_m^2 - 2\bar{x}_i \bar{x}_m)(\bar{y}_i^2 + \bar{y}_m^2 - 2\bar{y}_i \bar{y}_m) \quad (2.4-b)$$

$$X = (\bar{x}_i - \bar{x}_m)(\bar{y}_i^2 + \bar{y}_m^2 - 2\bar{y}_i \bar{y}_m) - (\bar{y}_i - \bar{y}_m)(\bar{x}_i \bar{y}_i - \bar{x}_i \bar{y}_m - \bar{y}_i \bar{x}_m + \bar{x}_m \bar{y}_m) \quad (2.4-c)$$

$$Y = -(\bar{Z}_i \bar{x}_i - \bar{Z}_i \bar{x}_m)(\bar{y}_i^2 + \bar{y}_m^2 - 2\bar{y}_i \bar{y}_m) + (\bar{x}_i \bar{y}_i - \bar{x}_i \bar{y}_m - \bar{y}_i \bar{x}_m + \bar{x}_m \bar{y}_m)(\bar{Z}_i \bar{y}_i - \bar{Z}_i \bar{y}_m) \quad (2.4-d)$$

$$U = (\bar{x}_i - \bar{x}_m)(\bar{x}_i \bar{y}_i - \bar{x}_i \bar{y}_m - \bar{y}_i \bar{x}_m + \bar{x}_m \bar{y}_m) - (\bar{x}_i^2 + \bar{x}_m^2 - 2\bar{x}_i \bar{x}_m)(\bar{y}_i - \bar{y}_m) \quad (2.4-e)$$

$$V = -(\bar{Z}_i \bar{x}_i - \bar{Z}_i \bar{x}_m)(\bar{x}_i \bar{y}_i - \bar{x}_i \bar{y}_m - \bar{y}_i \bar{x}_m + \bar{x}_m \bar{y}_m) + (\bar{x}_i^2 + \bar{x}_m^2 - 2\bar{x}_i \bar{x}_m)(\bar{Z}_i \bar{y}_i - \bar{Z}_i \bar{y}_m) \quad (2.4-f)$$

Zoals eerder opgemerkt wordt de gemiddelde bodemligging voor elk deeloppervlak weergegeven met  $(z_m ; x_m ; y_m)$ . In deze waarde is de invloed van bodemvormen door middeling onderdrukt, en daarmee bruikbaar geworden voor

- i) het weergeven van representatieve bodemliggingen zonder de storende invloed van bodemvormen
- ii) het vaststellen van morfologische trends door integratie van  $(z_m ; x_m ; y_m)$  over rivierkilometervakken
- iii) de verificatie van modellen door simulaties van (veranderingen in) de bodemvorm-gemiddelde bodemligging, door lineaire interpolatie van  $(z_m ; x_m ; y_m)$  naar de rekenpunten in het model

Met de gemiddelde bodemligging kunnen lange termijn bodemontwikkelingen worden gekarakteriseerd. De relevante bodemparameters daarbij zijn bijvoorbeeld de langprofielen van decennium-gemiddelde bodemliggingen, de trajectgemiddelde bodemverandering, de bodemhelling en de trajectgemiddelde voortplantingssnelheid van bodemveranderingen (RIZA, 2005a). Deze bieden

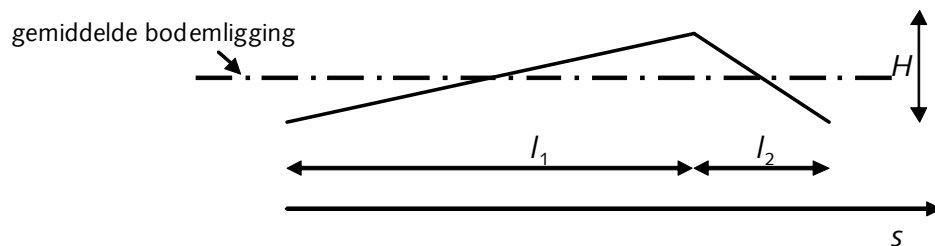
inzicht in de stabiliteit van het systeem (bv RIZA, 2005c) en zijn ijkpunten voor de bouw van betrouwbare modellen (bv WL, 2008c).

## 2.5 Duinhoogte

Om behalve een bodemvorm-gemiddelde bodemligging ook bodemvormen te kunnen beschrijven wordt het verschil tussen de waargenomen bodemligging en het in de vorige sectie beschreven fitvlak (Verg.2.1) beschouwd. Door de statistiek van dit verschil vervolgens gelijk te stellen aan de statistiek van een karakteristiek bodemvormsignaal kunnen representatieve bodemvormafmetingen worden bepaald.

Dit kan als volgt worden uitgewerkt. Veronderstel dat een gemeten bodemligging  $z$  op lokatie  $(x ; y)$  kan worden benaderd met de som van een de hoogte van het fitvlak  $\bar{z}$  (Verg.2.1) en een *periodieke variatie* in een bijdrage  $z'$ . Ofwel  $z(x,y) = \bar{z}(x,y) + z'(x,y)$  (2.5)

Het asymmetrische profiel van bodemvormen wordt vervolgens zo eenvoudig mogelijk benaderd met een driehoeksvorm zoals is geschetst in Fig.2.3.



**Figuur 2.3** Driehoeksvormig modelsignaal voor bodemvormen.

Met het driehoeksvormige modelsignaal van Fig.2.3 worden de afmetingen van de bodemvormen weergegeven met een karakteristieke duinhoogte  $H$  [m] (hoogteverschil tussen top en trog), een karakteristieke lengte  $l_1$  [m] van de loefzijde en een karakteristieke lengte  $l_2$  [m] van de lijzijde. Het driehoekige verloop kan worden geschreven met

$$z'_1 = H \left( \frac{s}{l_1} - \frac{1}{2} \right) \text{ voor } 0 < s < l_1 \text{ en } z'_1 = H \left( \frac{l_1}{l_2} + \frac{1}{2} - \frac{s}{l_2} \right) \text{ voor } l_1 < s < l_1 + l_2 \quad (2.6)$$

De periodieke driehoeksvormige fluctuatie uit Fig.2.3 kent ten opzichte van de gemiddelde bodemligging een ruimtelijk-gemiddelde waarde gelijk aan nul en een standaardafwijking die is

$$\text{gedefinieerd als } \sigma = \frac{H}{\sqrt{12}} \quad (2.7-a)$$

Nu is de standaardafwijking van alle waarnemingen ten opzichte van het fitvlak gegeven door

$$\overline{\varepsilon_i^2} = \overline{(Z_i - z_m - a(x_i - x_m) - b(y_i - y_m))^2} \quad (2.7-b)$$

$$\text{zodat de duinhoogte met Verg.2.7-a kan worden bepaald met } H = \sqrt{12 \overline{\varepsilon_i^2}} \quad (2.7-c)$$

## 2.6 Oriëntatie en lengten van bodemvormen.

De volgende stap is het bepalen van de karakteristieke oriëntatie van de bodemvorm in het deeloppervlak. Voor elke waarneming  $i$  met  $(z_i; x_i; y_i)$  in de dataset van een bodempeiling worden de twee dichtstbijzijnde waarnemingen geïdentificeerd met  $(z_1; x_1; y_1)$  en  $(z_2; x_2; y_2)$ . Met deze drie waarnemingen wordt vervolgens een lokaal passend vlak geconstrueerd in de vorm van

$$z - z_i = a_i'(x - x_i) + b_i'(y - y_i) \quad (2.8-a)$$

$$\text{met } a_i' = \frac{(z_1 - z_0)(y_2 - y_0) - (z_2 - z_0)(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)(y_2 - y_0) - (x_2 - x_0)(y_1 - y_0)}$$

$$\text{en } b_i' = \frac{(z_2 - z_0)(x_1 - x_0) - (z_1 - z_0)(x_2 - x_0)}{(x_1 - x_0)(y_2 - y_0) - (x_2 - x_0)(y_1 - y_0)} \quad (2.8-b)$$

Op  $(x_i; y_i)$  wordt de component van de bodemhelling in x-richting dan gegeven door  $a_i'$  en de component van de bodemhelling in y-richting is  $b_i'$ . De gemiddelde richting van alle waarnemingen in

$$\text{het deeloppervlak wordt dan gegeven door } \tan \varphi_m = \frac{\sum a_i' / \sqrt{a_i'^2 + b_i'^2}}{\sum b_i' / \sqrt{a_i'^2 + b_i'^2}} \quad (2.9)$$

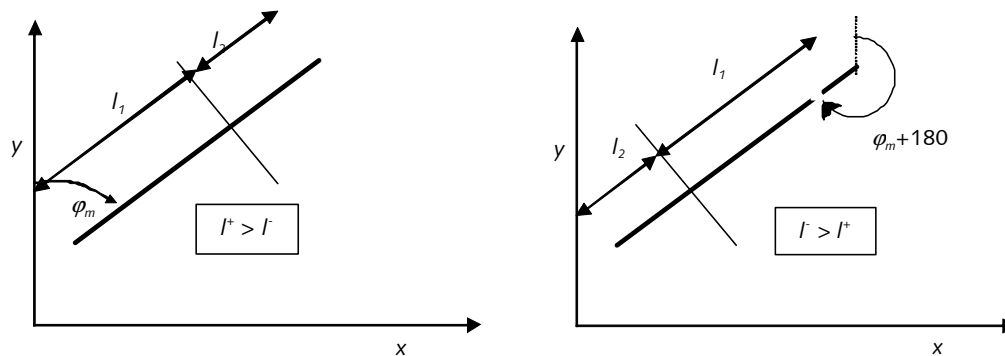
De hoek  $\varphi_m$  is gedefinieerd ten opzichte van de y-as (gericht op het Noorden) en geeft de gemiddelde loodlijn van de duinkammen aan, echter nog zonder rekening te houden met de verplaatsingsrichting van de bodemvorm. Om ook deze verplaatsingsrichting te kunnen bepalen is informatie van de loef- en lijzijde nodig. Dit kan als volgt. Als  $\varphi_m$  is bepaald kan voor elk waarnemingspunt de bodemhelling

$$\text{in } \varphi_m \text{ richting worden vastgesteld met } \left. \frac{\partial z}{\partial s_i} \right| = a_i' \sin \varphi_m + b_i' \cos \varphi_m \quad (2.10-a)$$

Met het onderscheid tussen positieve en negatieve bodemhellingen kan dan worden gesteld

$$\frac{H}{l^+} = \frac{\partial z}{\partial s_i} \text{ voor alle } \frac{\partial z}{\partial s_i} > 0 \text{ en } \frac{H}{l^-} = -\frac{\partial z}{\partial s_i} \text{ voor alle } \frac{\partial z}{\partial s_i} < 0 \quad (2.10-b)$$

Hieruit kunnen de lengten  $l^+$  en  $l^-$  worden bepaald. Als nu  $l^+$  groter is dan  $l^-$ , dan geldt voor de lengte van de loefzijde  $l_1 = l^+$  en voor de lengte van de lijzijde  $l_2 = l^-$ . In dat geval is de verplaatsingsrichting  $\varphi_s = \varphi_m$ . Als daarentegen  $l^-$  groter is dan  $l^+$ , dan geldt voor de lengte van de loefzijde  $l_1 = l^-$  en voor de lengte van de lijzijde  $l_2 = l^+$ . In dat geval is de verplaatsingsrichting  $\varphi_s = \varphi_m + 180$ . Dit is ter verduidelijking geschetst in Fig.2.4.



**Figuur 2.4** Schets van bepaling verplaatsingsrichting ten opzichte van het Noorden, met een loefzijde met lengte  $l_1$  en een lijzijde met lengte  $l_2$ .

## 2.7 Verplaatsingssnelheid

Als de rivierbodembodem voldoende kort na elkaar met een overlap is gepeild, dan is het mogelijk om met de bodemveranderingen een indicatie te geven van de verplaatsingssnelheid van bodemvormen. Per deelopervlak kan de gemiddelde waarde en de standaardafwijking van de bodemveranderingen worden bepaald. Als ditzelfde wordt gedaan voor veranderingen in het signaal

$z(x, y) = \bar{z}(x, y) + z'(x, y)$  geldt per definitie

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{\Delta A} \int_{\Delta A} \left( \frac{\partial z'(x, y)}{\partial t} \right)^2 dA \quad (2.11)$$

Als het driehoekige signaal zonder vormverandering over een afstand  $\Delta S = c\Delta t$  zou zijn verplaatst, dan is de standaardafwijking van de bodemverandering te schrijven als

$$\sigma_t^2 = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \left( c \frac{H}{l_1} \right)^2 + \frac{l_2}{l_1 + l_2} \left( -c \frac{H}{l_2} \right)^2 = \frac{c^2 H^2}{l_1 l_2} \quad (2.12-a)$$

De verplaatsingssnelheid is dan te bepalen met  $c = \frac{\sigma_t \sqrt{l_1 l_2}}{H}$  (2.12-b)

Omdat deze waarde van de verplaatsingssnelheid afhankelijk is van de gekozen driehoeksvorm, wordt echter een generieker methode gebruikt. Voor het bepalen van de verplaatsingsrichting wordt voor één enkele bodempeiling aangenomen dat bodemvormen verplaatsen in de richting  $\varphi_s$  (zie Sectie 2.6). Een kinematisch model voor verplaatsende, vormvaste bodemvormen (beschreven met een fluctuatie  $z'$  [m])

in de richting  $\varphi_s$  is dan  $\frac{\partial z'}{\partial t} + c \frac{\partial z'}{\partial s} = 0$  met  $\frac{\partial z'}{\partial s} = \sin \varphi_s \frac{\partial z'}{\partial x} + \cos \varphi_s \frac{\partial z'}{\partial y}$  (2.13-a)

Als dit model wordt toegepast op *gemeten* bodemgradiënten en bodemveranderingen dan wordt voor

een waarneming  $i$  gevonden  $\frac{\partial z'_i}{\partial t} = -c \left( \sin \varphi_s \frac{\partial z'_i}{\partial x} + \cos \varphi_s \frac{\partial z'_i}{\partial y} \right)$  (2.13-b)

Door het linker en rechterlid te kwadrateren en vervolgens voor elk waarnemingspunt in het deelopervlak te sommeren kan met het model van Verg.2.13-b en de definitie van bodemgradiënten volgens Verg.2.8 de verplaatsingssnelheid  $c$  worden bepaald met

$$c = \sqrt{\left( \frac{\partial z'_i}{\partial t} \right)^2 / \left( \sin^2 \varphi_s a_i^2 b_i^2 + b_i^2 \cos^2 \varphi_s + a_i^2 \sin^2 \varphi_s \right)} \quad (2.13-c)$$

Vanwege de veronderstelde periodiciteit van bodemvormen is het mogelijk dat de daadwerkelijke verplaatsingssnelheid met Verg.2.13-c niet goed kan worden vastgesteld. Immers, als de periode  $\Delta t$  tussen de peilingen te groot is zou de verplaatsing van bodemvormen bijvoorbeeld  $c \pm L / \Delta t$  kunnen bedragen. Om dit te voorkomen zou voor de verplaatsing van bodemvormen in de periode  $\Delta t$  ongeveer moeten gelden  $c\Delta t < L/2$ . Als een verplaatsingssnelheid  $c$  [m/dag] is bepaald, kan achteraf worden gecontroleerd of aan dit criterium is voldaan.

Er is ook een ondergrens te definiëren. Als de oorspronkelijke bodemwaarnemingen een onderlinge afstand (bodemgrid resolutie) van  $\delta$  [m] hebben kan vanwege de nauwkeurigheid gesteld worden dat ongeveer moet gelden  $c\Delta t > \delta$ . Dit betekent dat geldige waarden van de verplaatsingssnelheid  $c$

$$\text{moeten voldoen aan } \frac{\delta}{\Delta t} < c < \frac{L}{2\Delta t} \quad (2.13-d)$$

Hierin is	$c$	[m/s]	verplaatsingssnelheid van bodemvormen
	$L$	[m]	karakteristieke bodemvormlengte
	$\delta s$	[m]	karakteristieke onderlinge afstand van waarnemingen (gridresolutie)
	$\Delta t$	[s]	periode tussen de twee bodempeilingen

## 2.8 Onderscheid plaatsvaste en verplaatsende bodemvormen

Het reliëf van de rivierbodem wordt gevormd door combinaties van *gedwongen* en *vrije* structuren. Vrije bodemvormen verplaatsen zich, eenmaal ergens opgewekt, stroomafwaarts door de rivier. Tijdens deze verplaatsing vervormen de structuren onder invloed van variërende lokale condities (bijvoorbeeld diepte- en snelheidsveranderingen).

Gedwongen structuren zijn plaatsvaste bodemvormen want gebonden aan de forcerende lokale condities. Een voorbeeld hiervan zijn de ontgrondingskuilen die zijn te vinden bij harde (of zelfs vaste) bodemlagen en ontgrondingskuilen in de wervelstraten bij kribben en variërende oeververdedigingen). De afmetingen hiervan variëren enigszins gedurende het hoog- en laagwaterseizoen, maar de variatie hierin is over het algemeen klein ten opzichte van de bodemvariatie die wordt veroorzaakt door verplaatsende bodemvormen.

In een bodempeiling kunnen beide typen bodemvormen voorkomen. De bodemparameters maken hierin echter geen onderscheid. Dit kan een goede interpretatie van de bodemparameters in de weg staan. In deze sectie wordt onderzocht hoe een pragmatisch onderscheid tussen deze beide typen bodemvormen kan worden gemaakt.

- **Bodemvormparameters voor beide bodemvormen**

Veronderstel dat de bodemparameters uit de vorige secties worden bepaald uit een bodempeiling van een rivierstuk met zowel vaste als plaatsvaste bodemvormen. De bepaalde bodemvormparameters zijn dan gedefinieerd als

$$H_{\text{totaal}} = \sqrt{12(\varepsilon_{\text{verpl}}^2 + \varepsilon_{\text{vast}}^2)} \quad (2.14)$$

$$\tan \varphi_{m \text{ totaal}} = \frac{\sum a'_{i \text{ verpl}} + \sum a'_{i \text{ vast}}}{\sum b'_{i \text{ verpl}} + \sum b'_{i \text{ vast}}} \quad (2.15)$$

$$\frac{H_{\text{totaal}}}{I_{\text{totaal}}^+} = (\overline{a'_{i \text{ verpl}} + a'_{i \text{ vast}}}) \sin \varphi_{m \text{ totaal}} + (\overline{b'_{i \text{ verpl}} + b'_{i \text{ vast}}}) \cos \varphi_{m \text{ totaal}} \text{ voor alle } \frac{\partial z}{\partial s_i} > 0 \text{ en} \quad (2.16-a)$$

$$\frac{H_{\text{totaal}}}{-I_{\text{totaal}}^-} = (\overline{a'_{i \text{ verpl}} + a'_{i \text{ vast}}}) \sin \varphi_{m \text{ totaal}} + (\overline{b'_{i \text{ verpl}} + b'_{i \text{ vast}}}) \cos \varphi_{m \text{ totaal}} \text{ voor alle } \frac{\partial z}{\partial s_i} < 0 \quad (2.16-b)$$

$$c_{\text{totaal}} = \sqrt{\left(\frac{\partial z_i}{\partial t}\right)^2 / \left(\frac{\partial z'_{i \text{ totaal}}}{\partial s}\right)^2} \quad (2.17)$$

- **Bodemvormparameters voor plaatsvaste bodemvormen**

Als nu van een voldoende groot aantal bodempeilingen uit een homogene reeks (waarin trends verwaarloosbaar klein zijn) een gemiddelde bodempeiling wordt bepaald dan karakteriseren de bodemvormparameters van deze gemiddelde bodempeiling uitsluitend de plaatsvaste bodemvormen. Dit leidt tot de volgende karakteristieke waarden (subscript "totaal" om aan te duiden dat een combinatie van beide typen bodemvormen wordt gekarakteriseerd)

$$H_{vast} = \sqrt{12(\overline{\epsilon_{vast}^2})} \quad (2.18)$$

$$\tan \varphi_{m\,vast} = \frac{\sum a'_{i\,vast}}{\sum b'_{i\,vast}} \quad (2.19)$$

$$\frac{H_{vast}}{I_{vast}^+} = (\overline{a'_{i\,vast}}) \sin \varphi_{m\,vast} + (\overline{b'_{i\,vast}}) \cos \varphi_{m\,vast} \text{ voor alle } \frac{\partial z}{\partial s_i} > 0 \text{ en} \quad (2.20-a)$$

$$\frac{H_{vast}}{-I_{vast}^-} = (\overline{a'_{i\,vast}}) \sin \varphi_{m\,vast} + (\overline{b'_{i\,vast}}) \cos \varphi_{m\,vast} \text{ voor alle } \frac{\partial z}{\partial s_i} < 0 \quad (2.20-b)$$

- **Bodemvormparameters voor verplaatsende bodemvormen**

Nu de plaatsvaste en de gecombineerde bodemvormen zijn gekarakteriseerd kunnen de parameters voor verplaatsende bodemvormen worden bepaald. Door Verg.2.14 en 2.18 te combineren kan voor de duinhoogte van verplaatsende bodemvormen worden gevonden  $H_{verpl} = \sqrt{H_{totaal}^2 - H_{vast}^2}$  (2.21)

Met het modelsignaal van Verg.2.5 en de definities van Verg.2.4 en Verg.2.6 kan voor de verschillende peilingen de gradiënt worden gekarakteriseerd met

$$\frac{\partial z_{totaal}}{\partial x} = a_{totaal} + \sin \theta_{m\,totaal} \frac{\partial z'_{totaal}}{\partial s} \text{ en } \frac{\partial z_{totaal}}{\partial y} = b_{totaal} + \cos \theta_{m\,totaal} \frac{\partial z'_{totaal}}{\partial s} \quad (2.22-a)$$

$$\frac{\partial z_{vast}}{\partial x} = a_{vast} + \sin \theta_{m\,vast} \frac{\partial z'_{vast}}{\partial s} \text{ en } \frac{\partial z_{vast}}{\partial y} = b_{vast} + \cos \theta_{m\,vast} \frac{\partial z'_{vast}}{\partial s} \quad (2.22-b)$$

$$\frac{\partial z_{verpl}}{\partial x} = a_{verpl} + \sin \theta_{m\,verpl} \frac{\partial z'_{verpl}}{\partial s} \text{ en } \frac{\partial z_{verpl}}{\partial y} = b_{verpl} + \cos \theta_{m\,verpl} \frac{\partial z'_{verpl}}{\partial s} \quad (2.22-c)$$

Om de bijdrage van verplaatsende bodemvormen aan de bodemgradiënt te kunnen oplossen wordt daarbij gebruik gemaakt van

$$\frac{\partial z_{totaal}}{\partial x} = \frac{\partial z_{vast}}{\partial x} + \frac{\partial z_{verpl}}{\partial x} \text{ en } \frac{\partial z_{totaal}}{\partial y} = \frac{\partial z_{vast}}{\partial y} + \frac{\partial z_{verpl}}{\partial y} \quad (2.22-d)$$

Deze lineaire combinatie past weliswaar bij de lineaire bepaling van bodemvormlengten, maar niet bij de behandeling van niet-lineaire bijdragen in de duinhoogte (Verg.2.21).

Zoals in Verg.2.22-a, -b en -c is te zien bestaat elke bodemgradiënt uit een component van het fitvlak en de helling van de loef- of lijzijde van een bodemvorm. De eerste bijdrage is in het algemeen een orde kleiner dan de tweede en wordt daarom verwaarloosd. Met de definities van Verg.2.22 kan door combinatie worden gevonden

$$\tan \theta_{m \text{ verpl}} \approx \frac{\sin \theta_{m \text{ totaal}} \frac{\partial z'_{\text{totaal}}}{\partial s} - \sin \theta_{m \text{ vast}} \frac{\partial z'_{\text{vast}}}{\partial s}}{\cos \theta_{m \text{ totaal}} \frac{\partial z'_{\text{totaal}}}{\partial s} - \cos \theta_{m \text{ vast}} \frac{\partial z'_{\text{vast}}}{\partial s}} \quad (2.23-a)$$

$$\frac{\partial z'_{\text{verpl}}}{\partial s} \approx \sqrt{\left( \sin \theta_{m \text{ totaal}} \frac{\partial z'_{\text{totaal}}}{\partial s} - \sin \theta_{m \text{ vast}} \frac{\partial z'_{\text{vast}}}{\partial s} \right)^2 + \left( \cos \theta_{m \text{ totaal}} \frac{\partial z'_{\text{totaal}}}{\partial s} - \cos \theta_{m \text{ vast}} \frac{\partial z'_{\text{vast}}}{\partial s} \right)^2} \quad (2.23-b)$$

Door voor de bodemgradiënten de hellingen van loef- en lijzijde in te vullen leidt dit tot

$$\tan \theta_{m \text{ verpl}} \approx \frac{\sin \theta_{m \text{ totaal}} \frac{H_{\text{totaal}}}{l_{1 \text{ totaal}}} - \sin \theta_{m \text{ vast}} \frac{H_{\text{vast}}}{l_{1 \text{ vast}}}}{\cos \theta_{m \text{ totaal}} \frac{H_{\text{totaal}}}{l_{1 \text{ totaal}}} - \cos \theta_{m \text{ vast}} \frac{H_{\text{vast}}}{l_{1 \text{ vast}}}} \quad (2.24-a)$$

$$\frac{H_{\text{verpl}}}{l_{1 \text{ verpl}}} \approx \sqrt{\left( \sin \theta_{m \text{ totaal}} \frac{H_{\text{totaal}}}{l_{1 \text{ totaal}}} - \sin \theta_{m \text{ vast}} \frac{H_{\text{vast}}}{l_{1 \text{ vast}}} \right)^2 + \left( \cos \theta_{m \text{ totaal}} \frac{H_{\text{totaal}}}{l_{1 \text{ totaal}}} - \cos \theta_{m \text{ vast}} \frac{H_{\text{vast}}}{l_{1 \text{ vast}}} \right)^2} \quad (2.24-b)$$

$$\frac{H_{\text{verpl}}}{l_{2 \text{ verpl}}} \approx \sqrt{\left( \sin \theta_{m \text{ totaal}} \frac{H_{\text{totaal}}}{l_{2 \text{ totaal}}} - \sin \theta_{m \text{ vast}} \frac{H_{\text{vast}}}{l_{2 \text{ vast}}} \right)^2 + \left( \cos \theta_{m \text{ totaal}} \frac{H_{\text{totaal}}}{l_{2 \text{ totaal}}} - \cos \theta_{m \text{ vast}} \frac{H_{\text{vast}}}{l_{2 \text{ vast}}} \right)^2} \quad (2.24-c)$$

De laatste bodemparameter die voor verplaatsende bodemvormen kan worden bepaald is de verplaatsingssnelheid. Als de definitie hiervoor (Verg.2.17) wordt toegepast op een gewone peiling (subscript "totaal" omdat zowel plaatsvaste als verplaatsende bodemvormen voorkomen) dan kan de verplaatsingssnelheid worden geschreven als

$$\frac{c_{\text{verpl}}}{c_{\text{totaal}}} = \frac{\sqrt{\left( \frac{\partial z'_i}{\partial t} \right)^2 / \left( \frac{\partial z'_{\text{verpl}}}{\partial s} \right)^2}}{\sqrt{\left( \frac{\partial z'_i}{\partial t} \right)^2 / \left( \frac{\partial z'_{\text{totaal}}}{\partial s} \right)^2}} = \left( \frac{\left( \frac{\partial z'_{\text{totaal}}}{\partial s} \right)^2}{\left( \frac{\partial z'_{\text{verpl}}}{\partial s} \right)^2} \right)^{1/2} \quad (2.25-a)$$

Het rechterlid is een sommatie van bodemgradiënten in het kwadraat. Dit kan voor het driehoekige

$$\text{modelsignaal geschreven worden als } \left( \frac{\partial z'_i}{\partial s} \right)^2 = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \left( \frac{H}{l_1} \right)^2 + \frac{l_2}{l_1 + l_2} \left( \frac{H}{l_2} \right)^2 = \frac{H^2}{l_1 l_2} \quad (2.25-b)$$

Als het model van Verg.2.25-b in het rechterlid van Verg.2.25-a wordt ingevuld, dan leidt dit tot een correctiefactor voor de verplaatsingssnelheid

$$\frac{c_{\text{verpl}}}{c_{\text{totaal}}} \approx \left( \frac{\frac{H_{\text{totaal}}^2}{l_{\text{totaal}}^+ l_{\text{totaal}}^-}}{\frac{H_{\text{verpl}}^2}{l_{\text{verpl}}^+ l_{\text{verpl}}^-}} \right)^{1/2} = \frac{H_{\text{totaal}}}{H_{\text{verpl}}} \sqrt{\frac{l_{\text{verpl}}^+ l_{\text{verpl}}^-}{l_{\text{totaal}}^+ l_{\text{totaal}}^-}} \quad (2.26)$$

---

Geconcludeerd wordt dat het onderscheid tussen verplaatsende en plaatsvaste bodemvormen met de volgende stappen kan worden gemaakt.

1. maak een referentie-bodempeiling met een homogene reeks van bodempeilingen, waarin de bijdrage van verplaatsende bodemvormen door tijdsmiddeling in onderdrukt
2. bepaal de bodemparameters (Sectie 2.9) van de referentie-bodempeiling. Dit zijn bodemparameters die de plaatsvaste bodemvormen karakteriseren.
3. bepaal de bodemparameters (Sectie 2.9) van een bodempeiling uit de reeks. Dit zijn bodemparameters die een combinatie van beide bodemvormen karakteriseren.
4. bepaal de duinhoogte (Verg.2.21), richting (Verg.2.24-a), lengten (Verg.2.24-b en 2.24-c) en verplaatsingssnelheid (Verg.2.26) die de verplaatsende bodemvormen karakteriseren.

Nb, voor deze verkenning is de bovenstaande procedure niet geverifieerd en gebruikt, bij gebrek aan een goede referentie-bodempeiling. In plaats daarvan wordt (noodgedwongen) aangenomen dat rondom de rivieras, zo ver mogelijk van bijvoorbeeld kribben, de bijdrage van plaatsvaste bodemvormen aan de ruimtelijke gradiënten in bodemligging minimaal is, zodat bodemfluctuaties in deze zone toegeschreven kunnen worden aan verplaatsende bodemvormen.

## 2.9 Automatische bepaling bodemparameters

In de vorige sectie is bepaald hoe met behulp van deeloppervlakken een bodemvorm-gemiddelde bodemligging, en de karakteristieke duinhoogte, lengte (van loefzijde en lijzijde), orientatie en verplaatsingssnelheid van bodemvormen kan worden bepaald. Om dit grootschalig en geautomatiseerd toe te kunnen passen is met de definities uit de vorige secties een FORTRAN programma bedchar.exe gemaakt dat is vermeld in Bijlage A. Dit programma bestaat uit de volgende onderdelen.

- 1) Inlezen van
  - a) stuur-informatie uit de file *data.txt*
  - b) x,y coördinaten en n,m labels van de deeloppervlakken uit de file *rooster.txt*
  - c) x,y,z informatie van de te analyseren bodempeilingen
- 2) Samenvoegen en rangschikken van waarnemingen per deeloppervlak  
Hier worden de waarnemingen op volgorde gezet zodat een efficiënte bepaling van bodemhellingen (en bodemveranderingen) mogelijk is.
- 3) Analyse van waarnemingen per deeloppervlak
  - Bepalen van gradiënten in bodemhelling
  - Bepalen van veranderingen in bodemligging
- 4) Berekenen van bodemparameters (vlak voor gemiddelde bodemligging en bodemvorm-parameters) conform de definities in Sectie 2.5, 2.6 en 2.7
- 5) Wegschrijven resultaten



---

De te gebruiken informatie kan als volgt worden toegelicht. Met de file *data.txt* kan de analyse worden aangestuurd. Deze file bestaat bijvoorbeeld uit de volgende regels:

```
lijst met stuur info
schaalfactor (tot m+NAP)
1.00
meerdere bodemliggingen
1
naam van peilbestand
nw0504 nw0506 62
nw0506 nw0510 122
```

Deze inhoud van *data.txt* kan als volgt worden toegelicht.

lijst met stuur info	commentaarregel
schaalfactor (tot m+NAP)	commentaarregel
1.00	vermenigvuldiging van bodemliggingen voor behandeling in m
meerdere bodemliggingen	commentaarregel
1	integer; als 0/1 dan geen/wel bepaling van bodemveranderingen
naam van peilbestand	commentaarregel
nw0504 nw0506 62	familienaam van peilingen, fam.naam van peilingen, interval in dagen
nw0506 nw0510 122	idem

Met deze *data.txt* file worden eerst alle in de directory aanwezige bodempeilingen met *nw0504.xxx* (met xxx van 000 tot 999) samengevoegd, en hiervan worden de bodemparameters bepaald. In de file *status.run* wordt verslag gedaan van het aantal bodempeilingen dat is gevonden en samengevoegd tot één bodembestand. Nb, de naamgeving van de bodembestanden is hiermee vastgelegd tot zes letters/cijfers. De resultatenfile krijgt deze zelfde naam met een andere extensie. De extensie van de bodembestanden is vastgelegd met drie cijfers (variërend van 000 tot 999).

Als na "meerdere bodemliggingen" een 0 is gegeven, dan worden alleen de bodempeilingen uit *nw0504.xxx* beschouwd voor het bepalen van bodemparameters. De verplaatsingssnelheid van bodemvormen wordt dan niet uit metingen bepaald. De inhoud van bodembestand *nw0504.002* heeft bijvoorbeeld de volgende vorm

```
81792.500 434312.500 -15.167
81797.500 434312.500 -15.313
81802.500 434312.500 -15.430
81807.500 434312.500 -15.699
81812.500 434312.500 -15.412
81817.500 434312.500 -15.320
```

De eerste kolom is de x-coördinaat, de tweede de y-coördinaat en de derde is de bodemhoogte. Alle z-waarden worden met 1 vermenigvuldigd omdat bodemhoogten in de *nw0504.xxx* files kennelijk in [m] zijn gegeven. Omdat in de stuurfile *data.txt* na de regel "meerdere bodemliggingen" een 1 is gegeven, worden de samengevoegde bodempeilingen met *nw0506.xxx* vergeleken met de samengevoegde bodempeilingen *nw0504.xxx*. Om uit de bodemveranderingen de verplaatsingssnelheid van bodemvormen te bepalen wordt een tijdsinterval van 62 dagen gebruikt (het derde gegeven op dezelfde regel in *data.txt*). Nb, de file met de oudste bodempeilingen wordt eerst genoemd, daarna volgt de de file met de nieuwste bodempeilingen.

De coördinaten van de deeloppervlakken worden gegeven in de file *rooster.txt*, in het volgende format

```
"Area", "Perimeter", "R500ws_v#", "R500ws_v-id", "M-coord", "N-coord", "X-coord", "Y-coord", "Id"
27503.363,1110.016,2,439,7,49,63439.910,445580.688,439
27495.719,1109.977,3,438,6,49,63421.352,445528.906,438
27495.719,1109.977,4,437,5,49,63402.793,445477.125,437
Etc.
```

De eerste regel in *rooster.txt* is een commentaarregel. De tweede regel wordt als volgt geïnterpreteerd.

27503.363	oppervlak [m <sup>2</sup> ] van het deeloppervlak, wordt niet gebruikt
1110.016	omtrek [m] van het deeloppervlak, wordt niet gebruikt
2	code van het deeloppervlak, wordt niet gebruikt
439	code van het deeloppervlak, wordt niet gebruikt
7	<i>m</i> -coördinaat van het deeloppervlak, wordt wel gebruikt
49	<i>n</i> -coördinaat van het deeloppervlak, wordt wel gebruikt
63439.910	<i>x</i> -coördinaat [m] in het centrum van het deeloppervlak, wordt wel gebruikt
445580.688	<i>y</i> -coördinaat [m] in het centrum van het deeloppervlak, wordt wel gebruikt
439	id van het deeloppervlak, wordt niet gebruikt

Opgemerkt wordt dat het maximaal aantal roostercellen vanwege het benodigde geheugen (pc toepassing) is begrensd. In de versie van Bijlage A geldt  $n_{min}=2$ ;  $n_{max}=950$ ;  $m_{min}=2$  en  $m_{max}=14$ . Als het rooster niet goed kan worden gelezen, ontbreekt in de status.run file de opmerking "rooster goed gelezen", en wordt de berekening afgebroken.

Als de bodemparameters van *nw0504* zijn weggeschreven naar een resultatenfile *nw0504results.txt* (en *nw0504direction.txt*) wordt de analyse herhaald voor bodempeilingen uit files genaamd *nw0506.xxx* en *nw0510.xxx*.

De resultaten in *nw0504results.txt* hebben de vorm

x	y	n	m	number	bedlevel[cm]+NAP	amplitude[cm]	length[cm]	Ltrough/Ltotal	azimuth[grd]	celerity[cm/day]	transport[cm <sup>2</sup> /day]	nw0506-	nw0504
83498.50	434652.28	2	2	1861	-1240	97	9166	0.36	137	104	7130		
83475.83	434702.41	2	3	1201	-1471	102	4575	0.44	181	10	743		
83453.15	434752.50	2	4	1134	-1462	50	3944	0.50	274	21	775		
83430.47	434802.59	2	5	1117	-1455	57	7081	0.46	255	23	954		

Deze kolommen worden als volgt geïnterpreteerd.

83498.50	<i>x</i> - coördinaat in het centrum van het betreffende deeloppervlak
434652.28	<i>y</i> - coördinaat in het centrum van het betreffende deeloppervlak
2	<i>n</i> - coördinaat van het betreffende deeloppervlak (in langsrichting)
2	<i>m</i> - coördinaat van het betreffende deeloppervlak (in dwarsrichting)
1861	aantal gevonden waarnemingen in het betreffende deeloppervlak
-1240	bodemligging in [cm]+NAP, in het centrum van het deeloppervlak
97	duinhoogte [cm] van de bodemvormen in het betreffende deeloppervlak
9166	duinlengte [cm] van de bodemvormen in het betreffende deeloppervlak
0.36	lengte van de lijzijde gedeeld door de totale duinlengte
317	azimuth [grd] van de bodemvormen, op basis van de lengten van loef- en lijzijden
104	verplaatsingsnelheid [cm/dag] van bodemvormen in het betreffende deeloppervlak
7130	geschat bodemvormtransport [cm <sup>2</sup> /dag]

---

Bovendien wordt er een file gemaakt *nw0504direction.txt* met als inhoud

```
x y azimuth migrationrate[cm/day] nw0506-nw0504
83498.50 434652.28 317 104
83475.83 434702.41 1 10
83453.15 434752.50 354 21
83430.47 434802.59 255 23
```

Dit betreft de x- en y-coördinaat in het centrum van het deeloppervlak, de azimuth [grd] van de bodemvormen en de verplaatsingssnelheid [cm/dag]. Met deze resultaten kan in ARCGIS eenvoudig een vectoren-kaart van verplaatsende bodemvormen gemaakt worden, die samen met de bodempeiling gerapporteerd kan worden.

## 2.10 Conclusies

Morfodynamiek in rivieren bestaat uit snelle fluctuaties en langzame bodemveranderingen. Beiden zijn van belang voor het beheer en gebruik van rivieren. In dit hoofdstuk is een methodiek uitgewerkt die door statistische bewerking van waarnemingen in een deeloppervlak karakteristieke bodemparameters genereert. Deze bodemparameters zijn representatief voor de langzame bodemveranderingen en de snelle fluctuaties in het deeloppervlak en vatten dit met de volgende bodemparameters samen;

- gemiddelde bodemligging (voor de langzame bodemveranderingen)
- karakteristieke bodemvorm met een
  - duinhoogte (verschil tussen top en trog)
  - duinlengte (gebaseerd op de gemiddelde bodemgradiënt)
  - duinkamoriëntatie (gebaseerd op de gemiddelde bodemgradiënt)
  - duinprofiel (relatieve lengte van de lijzijde)
  - verplaatsingssnelheid (in geval van overlappende peilingen binnen een voldoende korte periode)

Met multibeambodempeilingen als input kunnen deze bodemparameters geautomatiseerd worden bepaald. Voor de toepassing in dit rapport is de FORTRAN code gebruikt die is beschreven in Bijlage A.

De methodiek is schaalgebonden dus is het van belang om bij elke toepassing eerst de grootte-orde van de relevante bodemvormlengten af te schatten en de afmetingen van de deeloppervlakken circa een factor 20 groter te dimensioneren.

De karakteristieke bodemvormparameters zijn afhankelijk van alle bodemstructuren in een deeloppervlak en geven dus niet altijd de eigenschappen van afzonderlijke bodemvormen weer. Als uit een homogene reeks bodempeilingen een gemiddelde bodemligging kan worden bepaald, dan is een onderscheid tussen verplaatsende en plaatsvaste bodemvormen mogelijk. De aanpak hiervoor is in dit hoofdstuk beschreven.

---

---

## Hoofdstuk 3 Bodemparameters van de Waal

### 3.1 Achtergrond

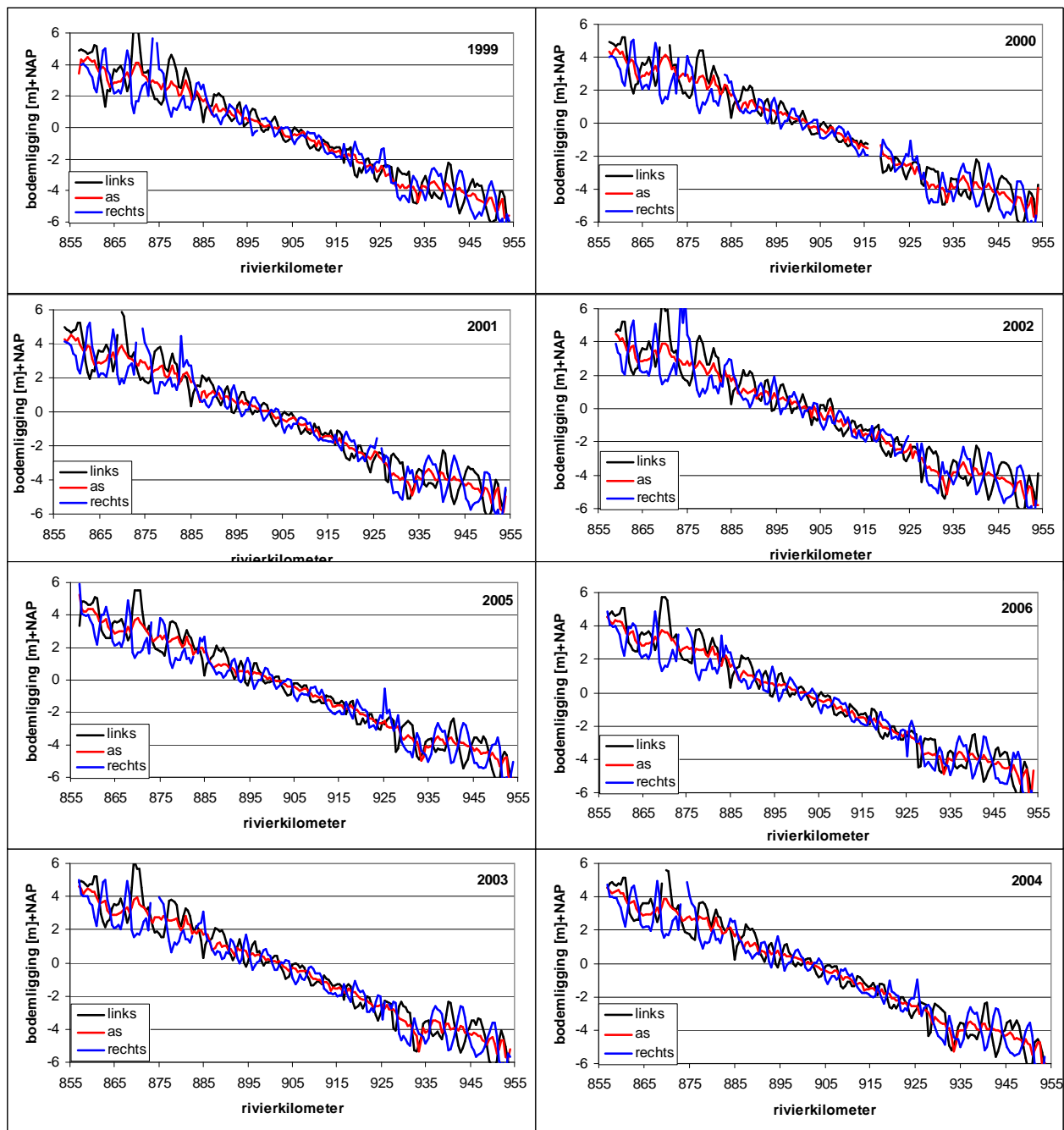
Om met de methodiek van Hoofdstuk 2 (en de procedure van Sectie 2.9) morfologische parameters voor de Waal te bepalen zijn de jaarlijkse oriëntatiepeilingen uit de periode 1999-2006 gebruikt. Deze peilingen zijn gemaakt buiten het hoogwaterseizoen. De bodemparameters zijn bepaald per deeloppevlak van 500 m lengte en 50 m breedte. Hiermee zijn de bodemparameters voor ongeveer vier punten per dwarsprofiel berekend.

### 3.2 Bodemliggingen

In Fig.3.1 zijn voor elke bodempeiling drie langsprofielen van de gemiddelde bodemligging weergegeven. In Tabel 3.1 zijn de trajectgemiddelde veranderingen (5<sup>de</sup> kolom) vergeleken met de langjarige trends (3<sup>de</sup> en 4<sup>de</sup> kolom). De trajectgemiddelde bodemveranderingen zijn een orde kleiner dan de historische gegevens. Mogelijk duidt dit er op dat het stopzetten van sedimentonttrekkingen bovenstrooms van Zaltbommel een effectieve maatregel is in het reduceren van de trajectgemiddelde bodemdaling. Echter, de periode 1999-2006 is te kort om definitieve conclusies over grootschalige trends te kunnen trekken.

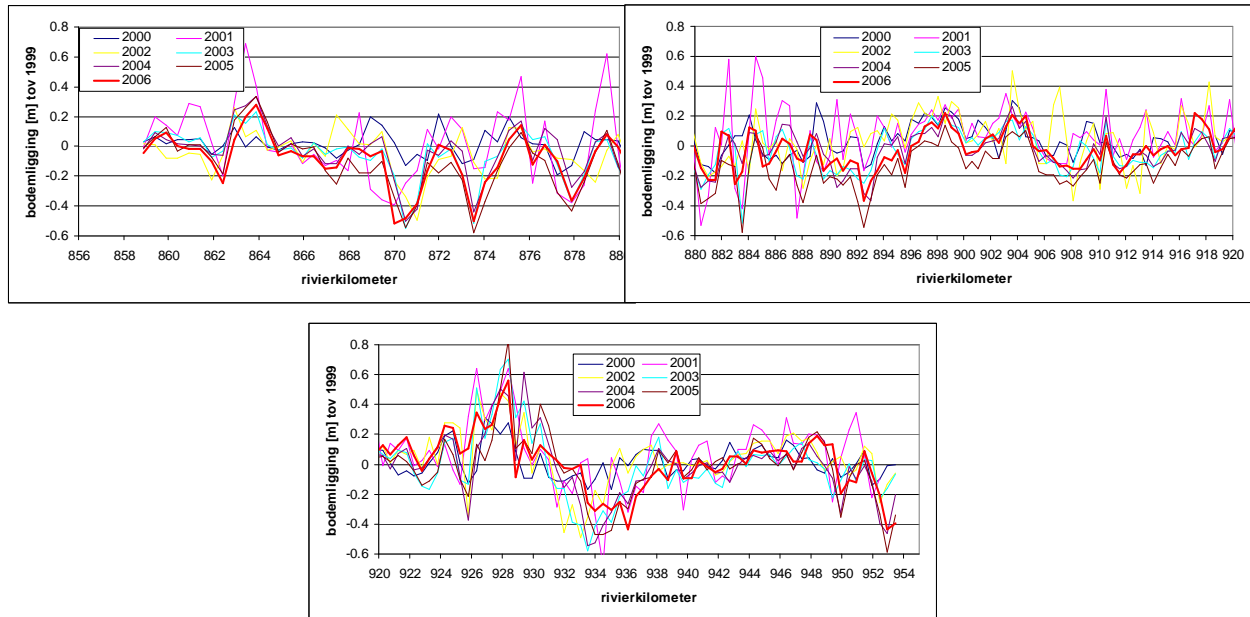
Traject	km	Jaargemiddelde bodemverandering periode 1950-1973 m/jaar	Jaargemiddelde bodemverandering periode 1970-1999 m/jaar	Jaargemiddelde Bodemverandering 1999-2006 m/jaar
Bovenrijn	859-867	-0,03	-0,03	-0,001
Bovenwaal	868-886	-0,01	-0,03	-0,017
Middenwaal	887-915	-0,01	-0,01	-0,005
Benedenwaal	916-951	0,01	-0,02	0,004

**Tabel 3.1** Vergelijking recente gemiddelde veranderingen met langjarige trends.



Figuur 3.1 Langsprofiel van bodemliggingen (zonder invloed van bodemvormen).

De langspiegels van de gemeten bodemveranderingen in de Waal sinds 1999 zijn weergegeven in Fig.3.2 In de Bovenwaal is lokaal ter plekke van de bodemkribben bij Erlecom (km 870 en km 873,5) en bij km 878 sprake van een lagere bodem. Benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen, over een groter traject van km 885 tot circa km 896 is de bodem in de periode 1999-2006 0,1 a 0,2 m gedaald. In de Middenwaal tussen km 896 en 905 is daarentegen sprake van een stijgende bodem (circa 0,1 a 0,2 m), vooral ter plekke van km 898,6 en km 904. Dit is ook het geval bij km 917-918. De grootste lokale verandering is te vinden in de bocht bij van de vaste laag bij St.Andries (km 925-928). Deze bodemstijging gaat gepaard met een bodemerosiegolf die stroomafwaarts voortplant.



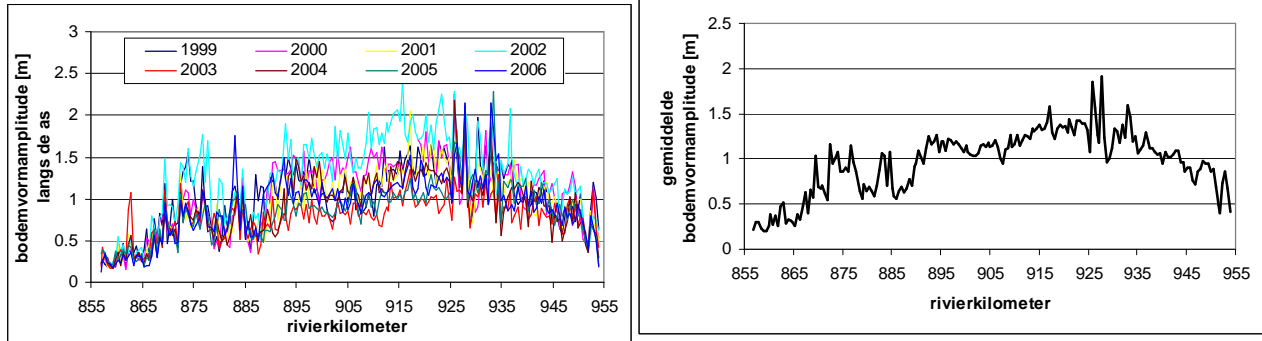
**Figuur 3.2** Langsprofiel van bodemveranderingen, gemiddeld over het dwarsprofiel.

Om de bodemligging te stabiliseren zou het, op basis van de trends in Fig.3.2, een voorlopige strategie kunnen zijn om baggervolumes van ondiepten uit het traject van km 896-905 gelijkmatig terug te storten in het traject van km 886-896. Dit sluit overigens goed aan bij *sediment management* maatregelen zoals beschreven in de MIT verkenningnota "Duurzame Vaardiepte Rijn-delta" (RWS-ON 2008).

### 3.3 Bodemvormen in de Waal

De bodempeilingen van het zomerbed leveren ook informatie over bodemvormen. Volgens de methodiek uit Hoofdstuk 2 worden deze per deeloppervlak (500 m lengte en 50 m breedte) bepaald met een karakteristieke duinhoogte (top-dal), bodemvormlengte, een mate van asymmetrie (lengte trog/totale lengte) en een oriëntatie van de duinkammen. Als er binnen voldoende korte periode een overlappend bodemoppervlak is gepeild dan kan ook de verplaatsingssnelheid van bodemvormen worden bepaald. Een voorbeeld hiervan is te vinden in Hoofdstuk 7.

In Fig.3.3 is het langspiegel van de duinhoogte weergegeven. Het valt op dat de vorm van dit langspiegel voor de verschillende jaren redelijk gelijk blijft. De grootte van de duinhoogte varieert wel enigszins, dit is vermoedelijk afhankelijk van variaties in het afvoerverloop.



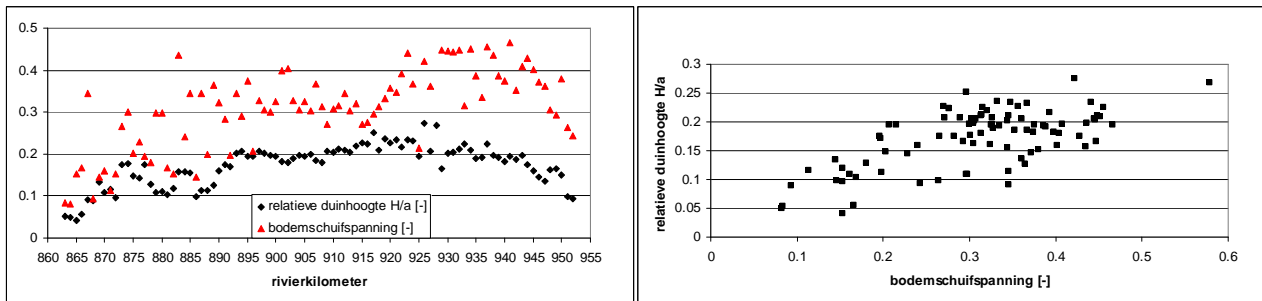
**Figuur 3.3** Langspiegel van duinhoogte langs de rivieras van de Waal.

De grootschalige gradiënt in duinhoogte duidt op een grootschalige gradiënt in mobiliteit. (RIZA, 2004a). Voor de Bovenrijn en Waal tot km 885 is de kleine duinhoogte vermoedelijk het gevolg van minder mobiel bodemmateriaal (grind en grof zand). Voor het traject benedenstrooms van km 930 is de afname in duinhoogte vermoedelijk gerelateerd aan de grotere normaalbreedte (en de bijbehorende lagere bodemschuifspanning). Om dit te verifiëren is in Fig.3.4 het geschatte verloop in bodemschuifspanning toegevoegd. De relatieve bodemschuifspanning is gedefinieerd als

$$\theta = \frac{u^2}{C^2 \Delta D_{50}}$$

met een relatief sedimentgewicht  $\Delta=1,65$  een stroomsnelheid  $u$  [m/s], waterdiepte  $a$  [m]

en bodemruwheid  $C$  [m<sup>1/2</sup>/s] afkomstig uit een 1D Rijntakkenmodel (WL, 2006). De korreldiameter  $D_{50}$  [m] is het gemiddelde van bemonsteringen uit 1966, 1976, 1984 en 1995.



**Figuur 3.4** Relatie tussen mobiliteit (relatieve bodemschuifspanning) en relatieve duinhoogte.

De evenwichtswaarde van de duinhoogte wordt begrensd door de waterdiepte en de mobiliteit van het bodemmateriaal (bv. Van Rijn, 1983; RIZA, 2004a). In Fig.3.4 is daarom de relatieve duinhoogte ( $H/a$  met  $H$  [m] de duinhoogte en  $a$  [m] de waterdiepte) weergegeven samen met de relatieve bodemschuifspanning. De trend laat grotere bodemvormen bij een grotere relatieve bodemschuifspanning zien. Dit verloop van de relatieve duinhoogte geeft aan dat de mobiliteit van het bodemmateriaal in de verschillende Waaltrajecten sterk varieert.

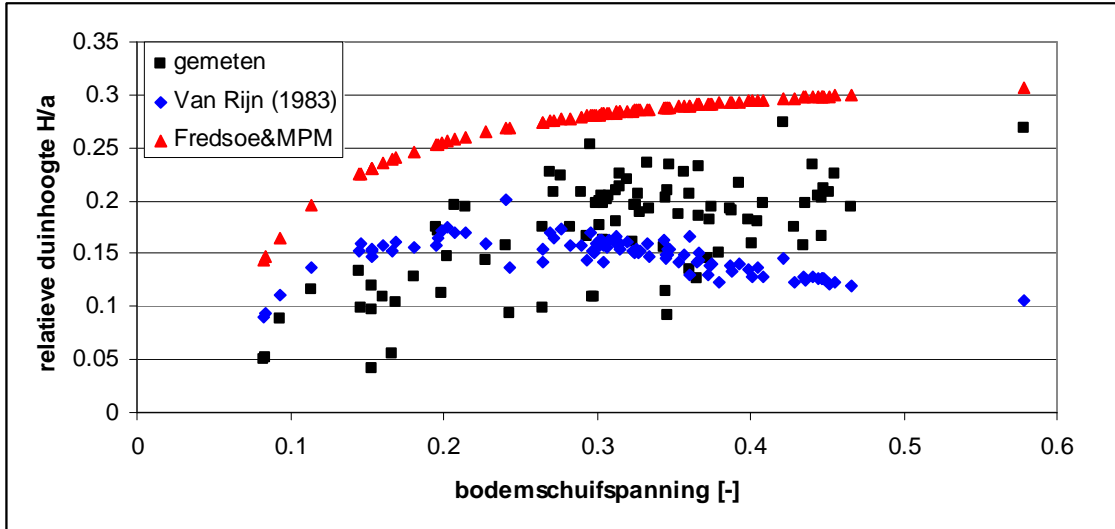
Om een indruk te krijgen van de voorspelbaarheid zijn in Fig.3.5 de gemeten duinhoogten gecombineerd met voorspelde waarden. Hiervoor zijn twee bestaande duinhoogtevoorspellers gebruikt

- Van Rijn (1983) 
$$\frac{H}{a} = 0,11 \left( \frac{D_{50}}{a} \right)^{0,3} \left( 1 - e^{-0,5 - 0,5 \frac{\theta}{\theta_{cr}}} \right) \left( 24 - \frac{\theta}{\theta_{cr}} \right) \quad (3.1-a)$$



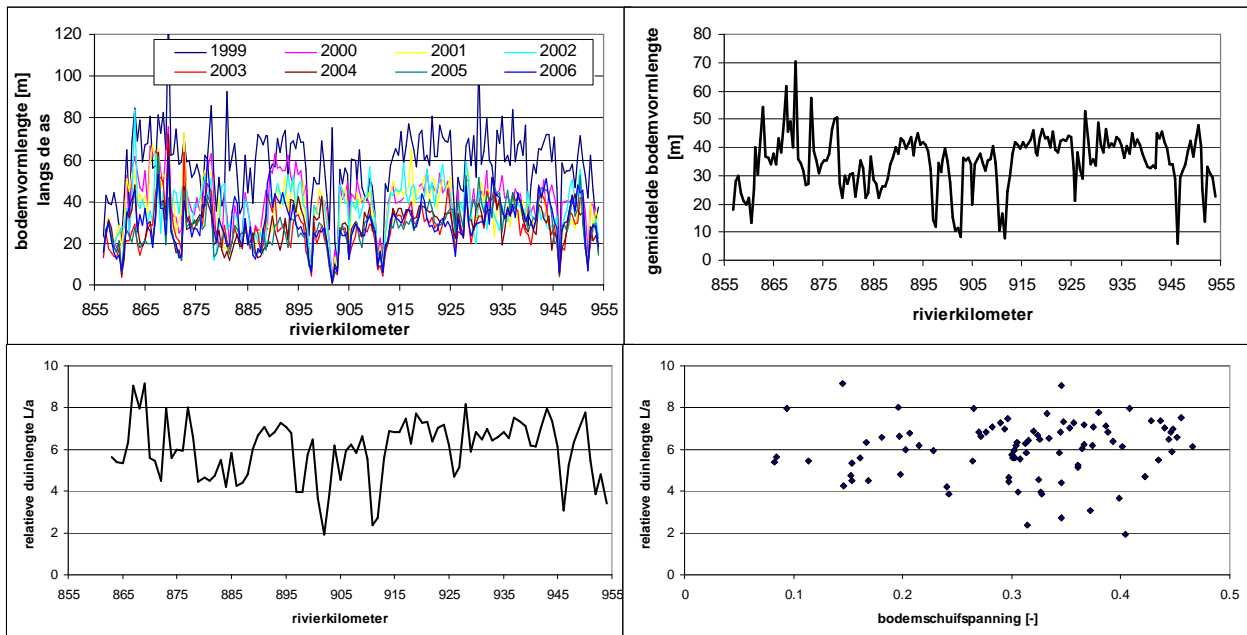
- Fredsoe-benadering (Fredsoe, 1982; RIZA, 2004a) toegepast op de transportformule van Meyer-Peter en Müller (1948)  $\frac{H}{a} = \frac{\xi}{3} \left( 1 - \frac{\theta_{cr}}{\theta} \right)$  met  $O(\xi)=1$  en  $\theta_{cr} = 0,047$  (3.1-b)

Uit het verloop van de voorspelde waarden blijkt dat beide formules na een eenvoudige calibratie (bijvoorbeeld  $\xi=0,5$ ) de trend in gemeten duinhoogten redelijk volgen. De Van Rijn (1983) voorspeller geeft echter ten onrechte een afname van duinhoogte voor grotere bodemschuifspanningen te zien.



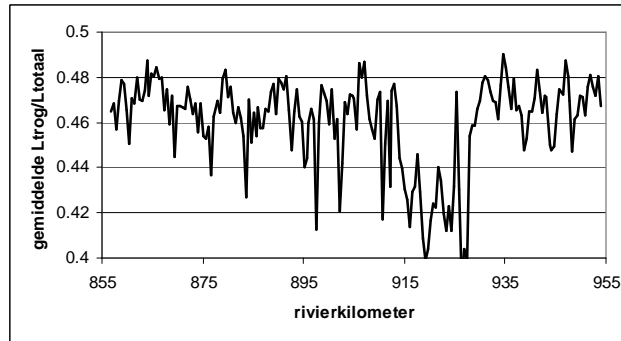
Figuur 3.4 Relatieve duinhoogte als functie van bodemschuifspanning.

De karakteristieke bodemvormlengte (zie Hoofdstuk 2) in Fig.3.5 is bepaald met de duinhoogte en de gemiddelde helling van loef- en lijzijden. Met uitzondering van de peiling in 1999 is het verloop in deze karakteristieke bodemvormlengte voor de verschillende jaren vergelijkbaar (Fig.3.5 linksboven). De grootte-orde van de bodemvormlengte bedraagt 5 á 8 maal de waterdiepte (Fig.3.5 linksonder) zoals ook door Van Rijn (1983) is geconstateerd.



Figuur 3.5 Overzicht bodemvormlengte in de Waal.

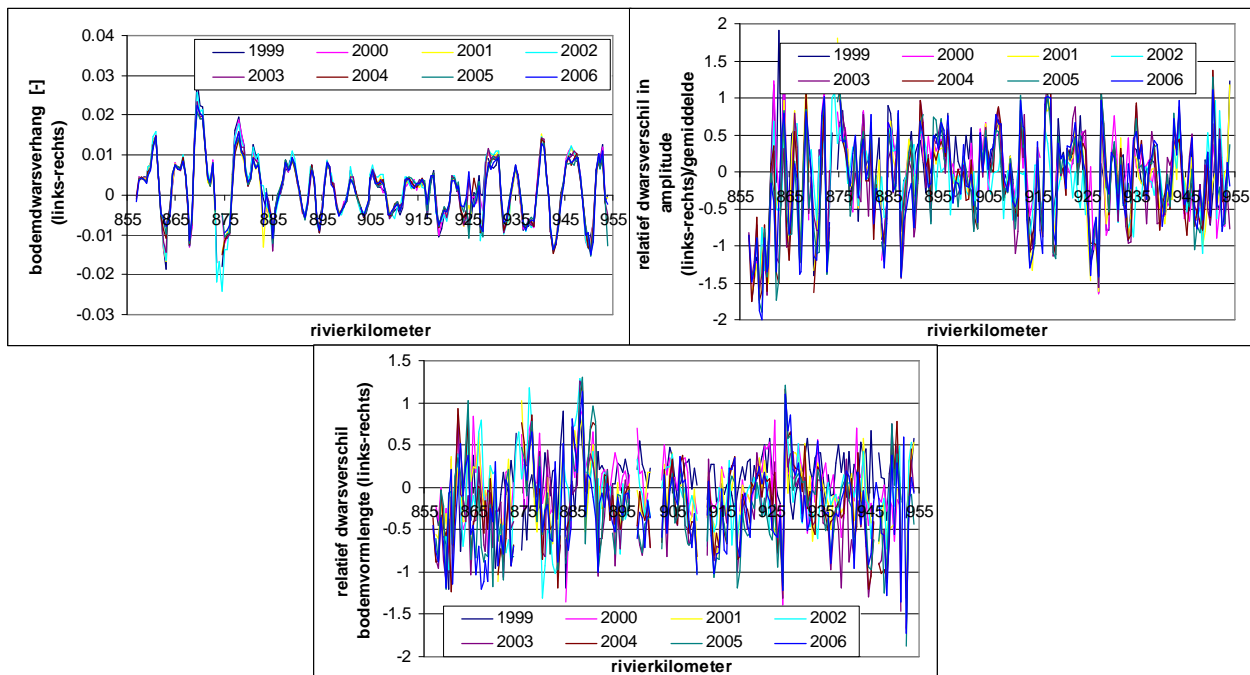
Behalve de bodemvormlengte zijn ook de gemiddelde lengten van trog- en loefzijde bepaald. De verhouding tussen troglengte en totale bodemvormlengte, gemiddeld voor de verschillende bodempeilingen is weergegeven in Fig.3.6. Op het traject van km 915-930 is de relatieve troglengte duidelijk kleiner dan in de rest van de Waal. De bodemvormen in dit traject zijn steiler. Behalve de invloed van de vaste laag (km 925-928) is de oorzaak hiervan onbekend, mogelijk duidt dit op een afwijkende ondergrond; in dit rivierstuk kruist de Waal de Peelbreuk.



Figuur 3.6 Langsprofiel in relatieve bodemvormlengte.

### 3.4 Dwarsvariatie in bodemparameters.

Het bodemdwaarsverhang is weergegeven in Fig.3.7. Dit blijkt voor de verschillende jaren goed vergelijkbaar. Dat bevestigt dat de bankenstructuur in de bodem van de Waal grotendeels plaatsvast is. Opvallend genoeg geldt dit ook voor de dwarsvariatie in duinhoogte en in bodemvormlengte. Dus, de plattegrond van de rivier is niet alleen bepalend voor de ruimtelijk-gemiddelde bodemligging maar ook voor gradiënten in de bodemvormafmetingen.

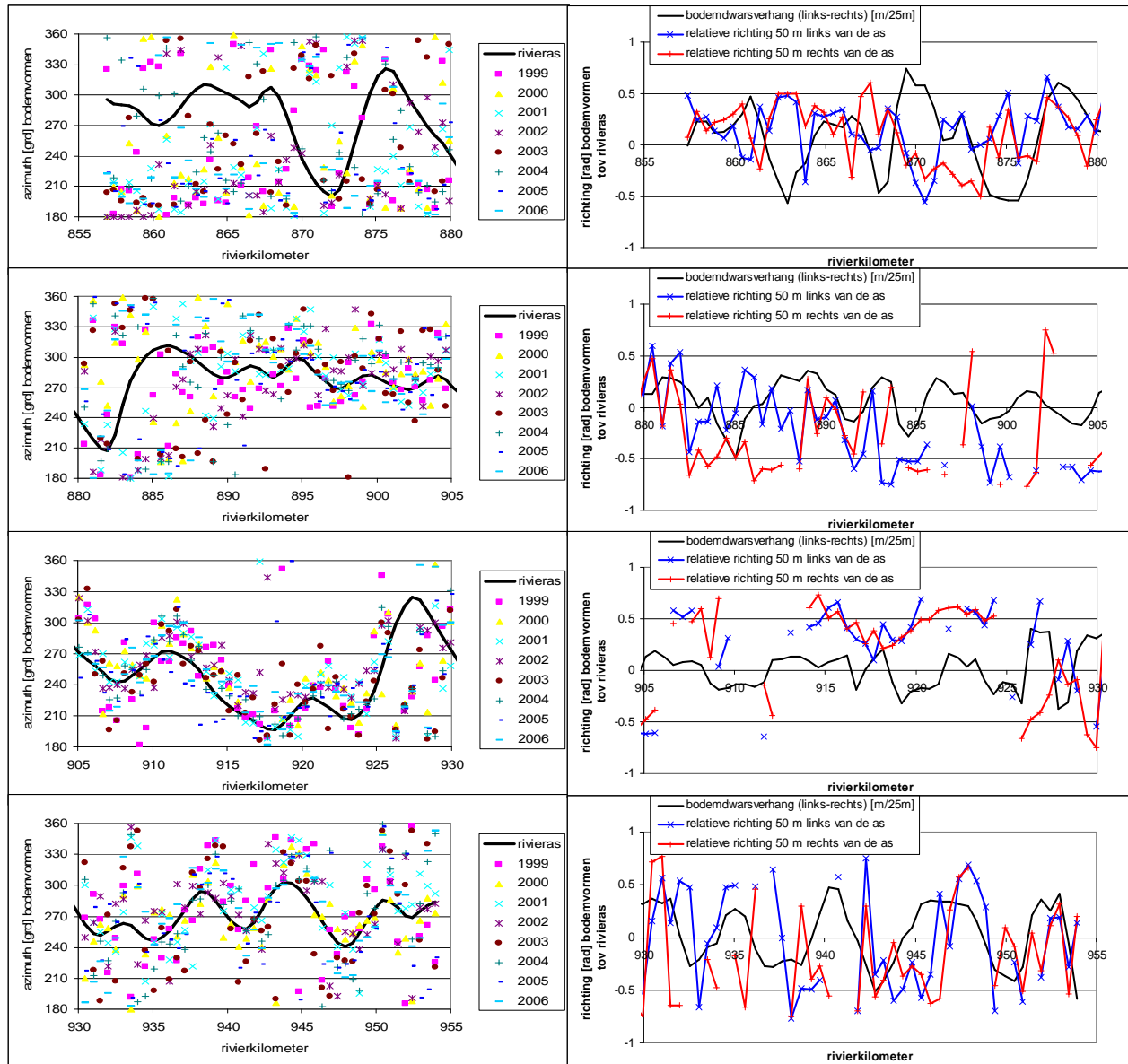


Figuur 3.7 Overzicht van dwarsgradiënten in bodemligging, duinhoogte en bodemvormlengte.

---

### 3.5 Richting van bodemvormen

Uit de hellingen van bodempunten kan de gemiddelde richting van bodemvormen worden bepaald (Hoofdstuk 2). Om zoveel mogelijk inzicht in het gedrag van *verplaatsende* bodemvormen te krijgen worden hier alleen waarden in een zone van 100 m rondom de rivieras beschouwd. In deze zone is de bijdrage van plaatsvast bodemvormen immers een orde kleiner.



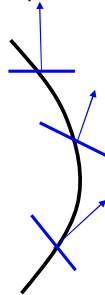
**Figuur 3.8-a** Langsprofilen van azimuth [grad] van de rivieras en de richting van bodemvormen.

**Figuur 3.8-b** Langsprofilen van het bodemdwaarsverhang en de richting van bodemvormen ten opzichte van de rivieras [rad].

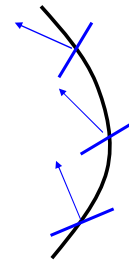
Fig.3.8-a geeft de richting van rivieras en bodemvormen weer, in graden ten opzichte van het Noorden (positief met de klok mee). Voor de trajecten in de Bovenrijn en Bovenwaal (grofweg bovenstrooms km 885), waar bodemvormen relatief klein zijn, is de spreiding in de gevonden richting groot. Gezien de grote spreiding in met name de Bovenrijn en Bovenwaal zijn minder realistische richtingsafwijkingen van meer dan 45 graden buiten beschouwing gelaten. Hierdoor worden trends in de aannemelijke

richting duidelijker. Voorbeelden van duinkamoriëntatie in de Waal zijn onder andere te vinden in Bijlage D van WL Delft Hydraulics (2008).

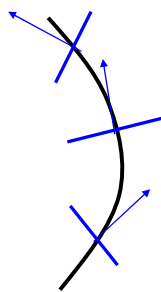
Het verschil tussen de richting van bodemvormen en de richting van de rivieras is, samen met het bodemdwaarsverhang (niet op schaal) weergegeven in Fig.3.8-b. Dit verschil in richting is zo gedefinieerd dat een positieve afwijking een duinkam-verdraaiing naar de rechteroever betekent (met de klok mee). Bovendien is voor een positief bodemdwaarsverhang de bodemligging links van de rivieras hoger dan de rechterbodempligging. Een positief bodemdwaarsverhang wordt daarom geïnterpreteerd als een bocht naar links. Rechtstanden worden geassocieerd met een bodemdwaarsverhang gelijk aan nul. Voor een goede interpretatie van Fig.3.8-b zijn de volgende schetsjes toegevoegd.



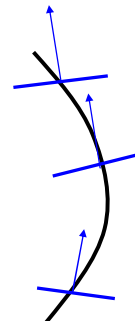
**Figuur 3.9-a** Gelijk teken tussen bodemdwaarsverhang en relatieve bodemvormrichting (*duinkammen gericht naar de buitenbocht*).



**Figuur 3.9-b** Tegengesteld teken tussen bodem-dwaarsverhang en relatieve bodemvormrichting (*duinkammen gericht naar de binnenbocht*).



**Figuur 3.9-c** Verandering van gelijk naar tegengesteld teken voor bodemdwaarsverhang en relatieve bodemvormrichting (*grotere verplaatsingssnelheid in de buitenbocht*).



**Figuur 3.9-d** Verandering van tegengesteld naar gelijk teken tussen bodemdwaarsverhang en relatieve bodemvormrichting (*grotere verplaatsingssnelheid in de binnenbocht*).

Er is voor de bochten uit de verschillende trajecten nauwelijks een eenduidige trend te ontdekken. In de Bovenrijn komen enkele bochten voor die lijken op de situatie in Fig.3.9-b. In de Midden-Waal lijkt voor een aantal bochten Fig.3.9-a representatief. In de Beneden-Waal is de situatie van Fig.3.9-c karakteristiek. Het maximale verschil tussen bodemvormrichting en rivieras is ongeveer 10 á 20 graden.

### 3.6 Rotatie van bodemvormen

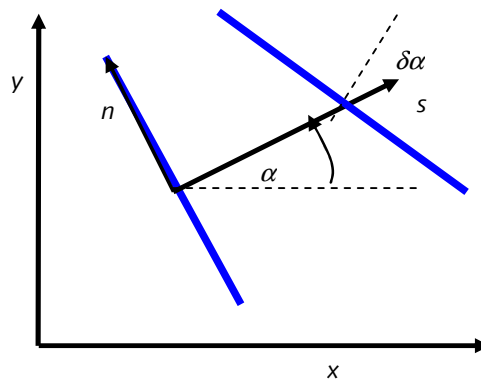
In het voorgaande is geconstateerd dat de richting van bodemvormen verandert in bochten, wat wijst op een variatie in verplaatsingssnelheid over de breedte. Dit effect kan als volgt worden bestudeerd. In overeenstemming met windgolf-toepassingen in Battjes (1988) kan voor de verandering in de richting van de duinstraal (loodlijn op de duinkam) worden geschreven

$$\frac{\partial \alpha}{\partial s} = -\frac{1}{w} \frac{\partial w}{\partial n} \quad (3.2)$$

met  $w$  [m/s] de bodemvormverplaatsingssnelheid;  $\alpha$  [rad] de richting van bodemvormen (loodlijn op duinkam);  $s$  [m] de plaatscoördinaat in de duinverplaatsingsrichting en  $n$  [m] de plaatscoördinaat in de richting loodrecht op de duinverplaatsing (zie Fig.3.10-a).

De relatie van Verg.3.2 kan getransformeerd worden naar vaste rijksdriehoekskoordinaten met  $x = -n \sin \alpha + s \cos \alpha$  en  $y = n \cos \alpha + s \sin \alpha$  tot

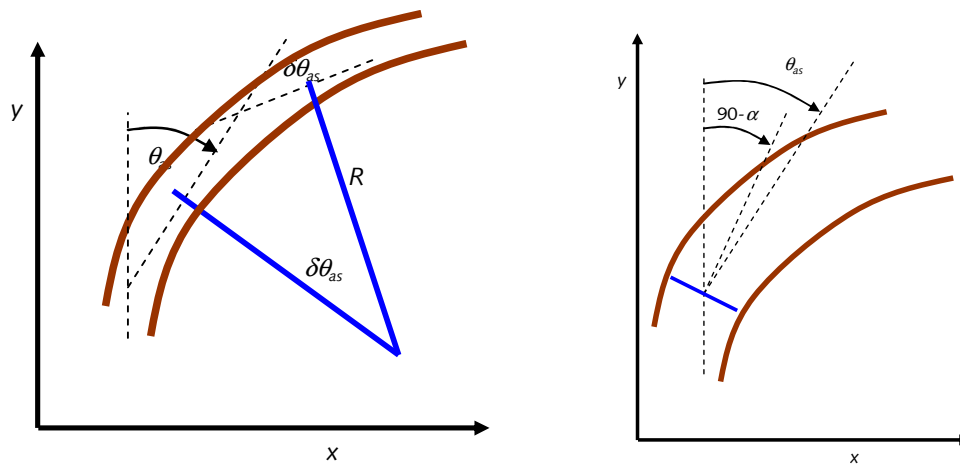
$$\cos \alpha \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \sin \alpha \frac{\partial \alpha}{\partial y} = \frac{\sin \alpha}{w} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\cos \alpha}{w} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3.3)$$



Figuur 3.10-a Definitie van roterende duinkam.

De hoek  $\alpha$  kan in graden ook gedefinieerd worden als  $\alpha = 90 - \vartheta_{duinkam}$  met  $\vartheta_{duinkam}$  de hoek (azimuth) van duinkammen in graden ten opzichte van de  $y$ -as (het Noorden).

Om de rotatie van duinkammen in bochten te analyseren kan in Verg.3.2 de afstand langs de as ook worden geschreven als  $\delta s = R \delta \theta_{as}$  met  $R$  [m] de lokale bochtstraal van de rivieras en  $\delta \theta_{as}$  de verandering in rivierasrichting (rad). De definities hiervan zijn weergegeven in Fig.3.10-b. Voor bochten met de klok mee heeft de bochtstraal dus een positieve waarde.



**Figuur 3.10-b** Definitie van bochtstraal, richting van de rivieras en richting van duinkammen.

Vervolgens wordt de richting van bodemvormen uitgedrukt ten opzichte van de rivieras-richting  $\theta_{as}$  met  $\alpha' = (90 - \alpha) - \theta_{as}$ . Een afwijking naar rechts (met de klok mee) heeft met deze definitie dus een

positieve waarde. Als dit wordt ingevuld in Verg.3.2, dan wordt gevonden  $\frac{1}{R} + \frac{\partial \alpha'}{\partial s} = \frac{1}{w} \frac{\partial w}{\partial n}$  (3.4)

Hierin is de coördinaat  $n$  gedefinieerd loodrecht op de rivieras, gericht op de linkeroever (kijkend in de richting van  $\theta_{as}$ ). Verg.3.4 drukt uit dat als de richting van duinkammen niet afwijkt van de rivieras ( $\alpha=0$  rad), dan is de dwarsgradiënt in verplaatsingssnelheid omgekeerd evenredig met de bochtstraal.

Verg.3.4 kan worden gebruikt om informatie over de dwarsvariatie in sedimenttransport te schatten. Immers, de *verhouding* in verplaatsingssnelheid op een afstand  $\Delta y$  [m] kan door linearisatie van

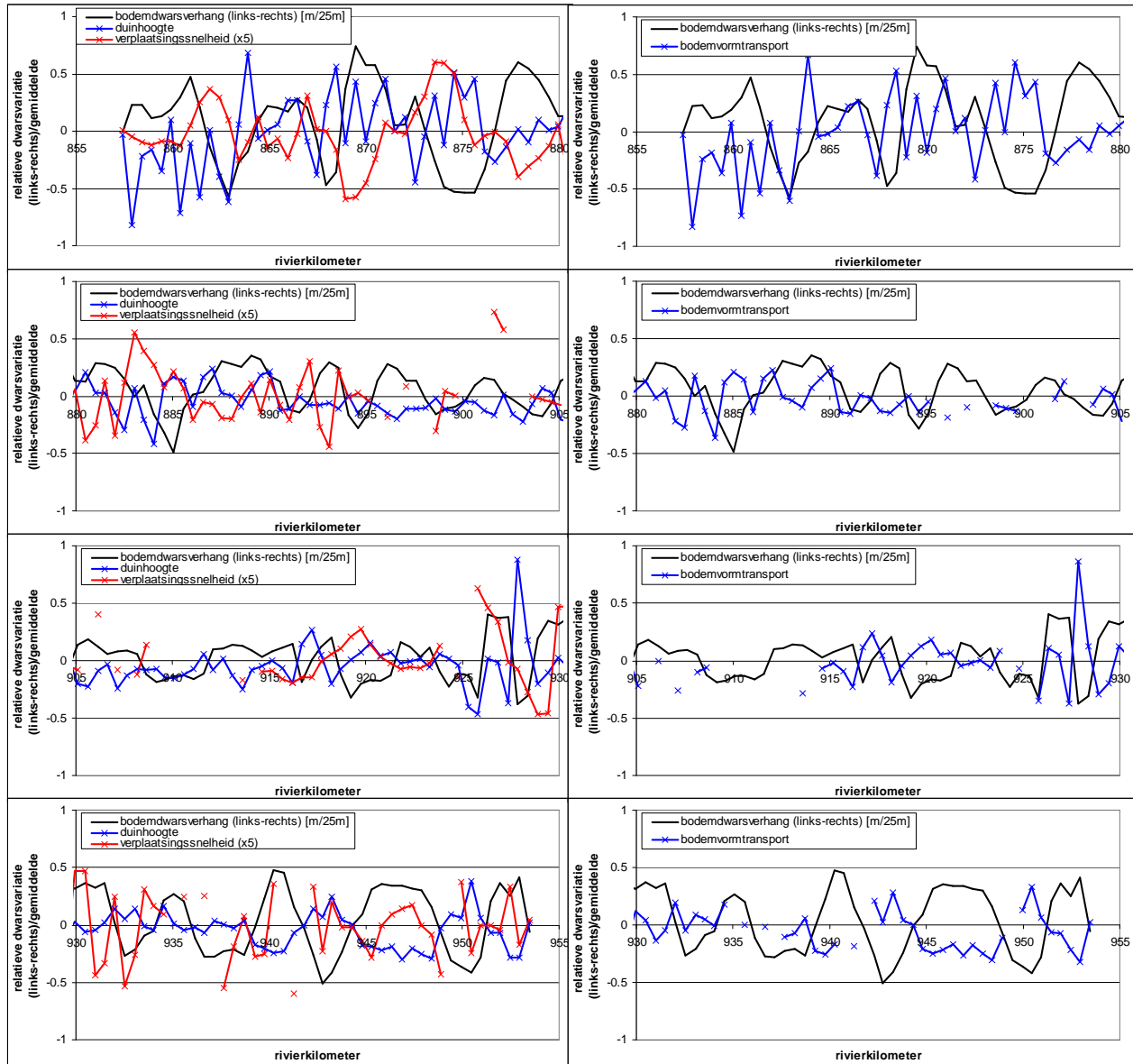
Verg.3.4 worden bepaald met  $\frac{w_{links} - w_{rechts}}{w} \approx \Delta y \left( \frac{\Delta \alpha'}{\Delta s} + \frac{1}{R} \right)$  (3.5)

Hierin is  $\Delta y$  [m] de afstand in dwarsrichting tussen de lokaties voor  $w_{links}$  en  $w_{rechts}$ . Deze benadering is met  $\Delta y = 50$  m toegepast op de richtingen uit Fig.3.8-b. De gradiënt van de richting  $\Delta \alpha'$  is bepaald met een centraal-differentieschema over puntwaarden met onderlinge afstand van  $\Delta s = 500$  m. Het resultaat is weergegeven in Fig.3.11. Met behulp van de verhouding tussen duinhoogten kan Verg.3.5 worden

gebruikt om de dwarsvariatie in bodemvormtransport te bepalen met  $\frac{S_{links}}{S_{rechts}} = \frac{w_{links}}{w_{rechts}} \frac{H_{links}}{H_{rechts}}$  (3.6)

Hierbij wordt aangenomen dat de richting van bodemvormtransport overeenkomt met de oriëntatie van de duinkammen. Als de richting van bodemvormen niet verandert in een bocht, dan is in stroomrichting sprake van een uniforme situatie. De verdeling van sedimenttransport over de breedte is dan in evenwicht (met volgens Verg.3.4 een verplaatsingssnelheid die toeneemt van binnen- naar buitenbocht). Zolang de richting van bodemvormen in een bocht wel verandert is sprake van een *herverdeling* van transport over de breedte. Dit is in de meeste Waalbochten het geval, zoals ook theoretisch voorspeld kan worden (Struiksmas *et al.* 1986). Benaderende oplossingen laten zien dat een hoge interactie tussen herverdeling van stroming en van sedimenttransport hierin de belangrijkste rol speelt (bv RIZA memo 2000-023).

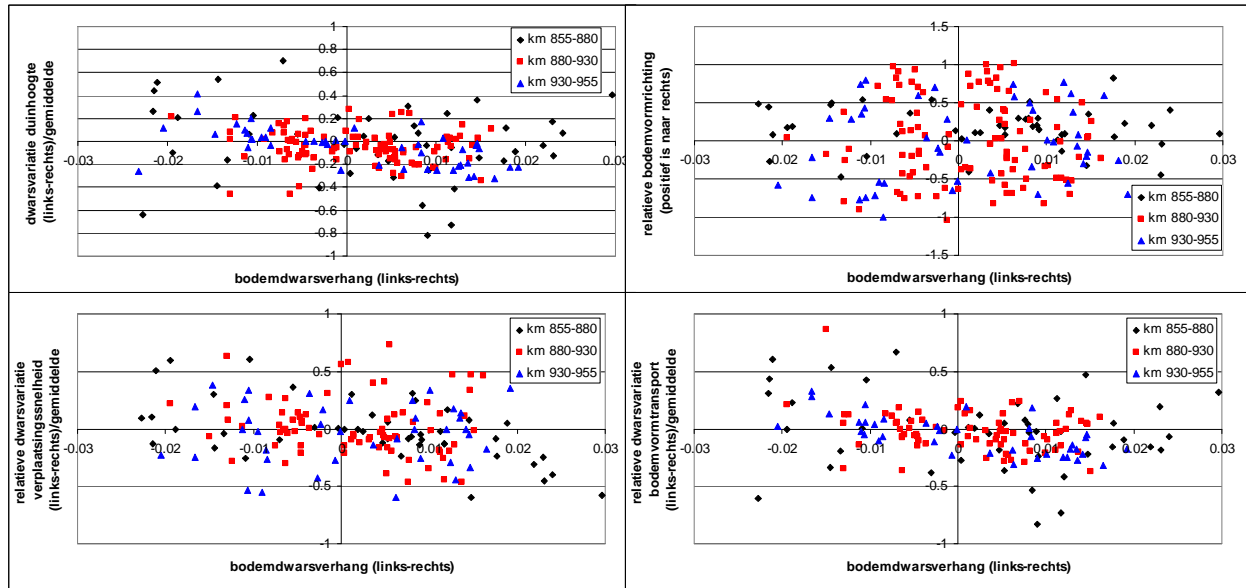
De verhouding van verplaatsingssnelheden in de linkerkolom van Fig.3.11 is met Verg.3.5 gebaseerd op de rotatie van duinkammen in stroomrichting. Vervolgens is Verg.3.6 gebruikt om het relatieve verschil in transport in de rechterkolom van Fig.3.11 weer te geven.



**Figuur 3.11** Bodemdwersverhang en dwarsvariatie in duinhoogte, verplaatsingssnelheid en bodemvormtransport.

De langspiegelen in Fig.3.11 duiden er op dat in buitenbochten de verplaatsingssnelheden meestal maximaal zijn (het tegengesteld teken tussen dwarsvariatie in verplaatsingssnelheid en bodemdwersverhang komt overeen met Fig.3.9-c). Deze trend is het sterkst in de Bovenrijn en Bovenwaal, en neemt stroomafwaarts langzaam af. Grofweg benedenstrooms de vaste laag bij St.Andries (km 928) is dit zover verschoven dat de verplaatsingssnelheid ook maximaal is in een aantal binnenbochten. In de meeste Waalbochten is de duinhoogte maximaal in buitenbochten.





**Figuur 3.12** Overzicht dwarsvariatie bodemvormparameters en bodemvormtransport.

Voor de duidelijkheid is in Fig.3.12 de relatie tussen dwarsvariatie in duinhoogte, richtingsafwijking, verplaatsingssnelheid en bodemvormtransport nog eens samengevat. Positieve waarden van het bodemdwaarsverhang kunnen worden geïnterpreteerd als bochten naar links (met links=binnenbocht en rechts=buitenbocht), en negatieve waarden van het bodemdwaarsverhang als bochten naar rechts (met links=buitenbocht en rechts=binnenbocht).

### 3.8 Conclusies

De gemiddelde bodemliggingen (zonder de bijdragen van bodemvormen) bieden inzicht in de stabiliteit van de Waal op langere termijn. Door integratie over de breedte en per rivierkilometer is het mogelijk om de bodemliggingen-database van de 20<sup>ste</sup> eeuw eenvoudig te verlengen.

De ruimtelijke variatie in zowel de gemiddelde bodemligging als in de bodemvormafmetingen is redelijk constant voor de verschillende jaren. De duinhoogte in het midden van de Waal is sterk afhankelijk van de relatieve bodemschuifspanning. Er is daarom een redelijke overeenkomst tussen gemeten waarden van de duinhoogte en voorspellingen met de methode van Fredsoe (1982) toegepast op de voorspeller van Meyer-Peter en Müller (1948). De voorspeller van Van Rijn (1983) lijkt ten onrechte een afname van duinhoogten te voorspellen voor hogere relatieve bodemschuifspanningen.

De algemene trends in bodemvormen (Fig.3.12) in de Waal zijn

- grotere duinhoogten in buitenbochten
- variërende richting van bodenvormen gedurende de bocht (roterende duinkammen richting binnenbocht)
- grotere verplaatsingssnelheden in buitenbochten (met name bovenstrooms van km 930)
- een groter bodemvormtransport door de buitenbochten (met name bovenstrooms van km 930)

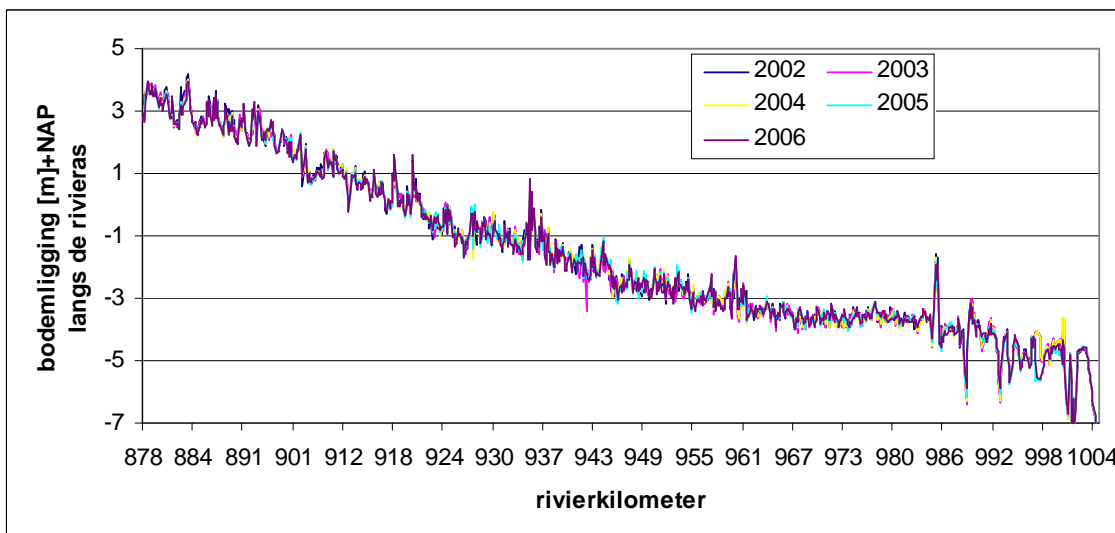
## Hoofdstuk 4 Bodemparameters IJssel

### 4.1 Achtergrond

Om morfologische parameters voor de IJssel te bepalen zijn jaarlijkse multibeampeilingen uit de periode 2002-2006 gebruikt. De bodemparameters zijn volgens de methodiek uit Hoofdstuk 2 bepaald per deelopervlak van 125 m lengte en 25 m breedte (ongeveer vijf punten per dwarsprofiel). Net als voor de Waal worden in dit hoofdstuk eerst de ruimtelijk-gemiddelde bodemliggingen gerapporteerd, daarna wordt aandacht geschonken aan de structuur van de bodemvormparameters.

### 4.2 Bodemliggingen

De bodemligging, gemiddeld over een afstand van 125 m binnen een 25 m brede zone rondom de rivieras, is voor de verschillende jaren weergegeven in Fig.4.1. Grofweg tot km 970 is er een bodemverhang van 0,085 m per km. Benedenstrooms hiervan neemt dit af. Tussen km 970 en 983 is sprake van opvallend weinig variatie in de gemiddelde bodemligging.

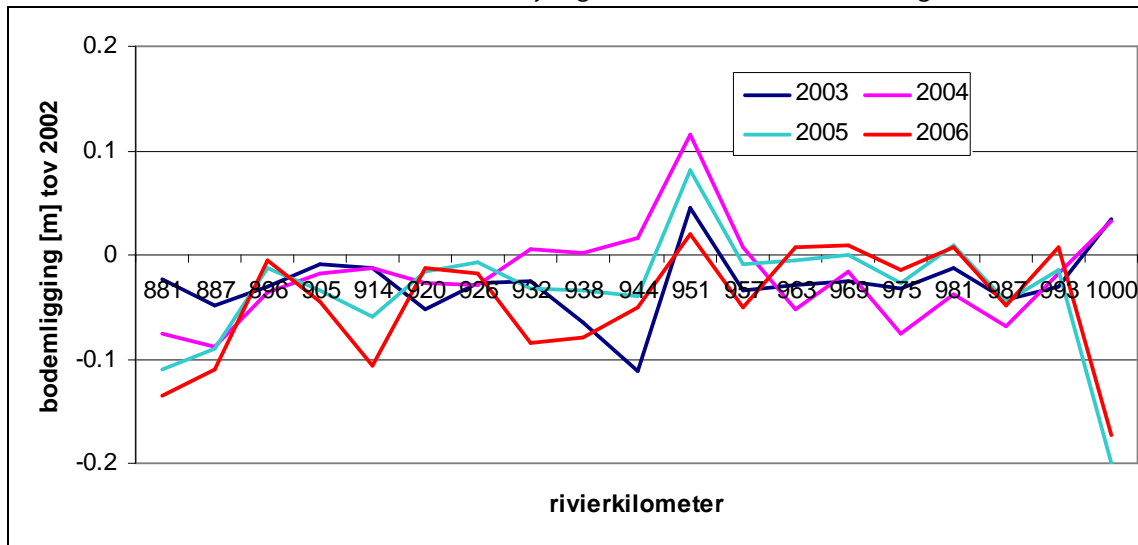


**Figuur 4.1** Gemiddelde bodemligging langs de rivieras van de IJssel.

De bodemveranderingen in Fig.4.2 zijn gemiddeld over enkele kilometers lengte, en laten een daling zien tussen km 880 en km 950, die zich relatief snel stroomafwaarts voortzet. Tussen km 950 en km 990 zijn bodemdalingen veel kleiner. De trajectgemiddelde waarden (5<sup>de</sup> kolom in Tabel 4.1) zijn van vergelijkbare grootte als de historische veranderingen (3<sup>de</sup> en 4<sup>de</sup> kolom in Tabel 4.1). Alleen in de Bovenijssel wordt opnieuw bodemdaling geconstateerd. De periode 2002-2006 is overigens te kort om al eventuele trendbreuken te kunnen ontdekken.

traject	km	jaargemiddelde bodemverandering periode 1950-1973 m/jaar	jaargemiddelde bodemverandering periode 1970-1999 m/jaar	jaargemiddelde bodemverandering periode 2002-2006 m/jaar
Bovenijssel	880-930	-0,02	0,02	-0,016
Middenijssel	930-970	0,02	-0,01	-0,007
Benedenijssel	970-1000	0,02	-0,02	-0,014

Tabel 4.1 Overzicht Trajectgemiddelde bodemveranderingen.



Figuur 4.2 Bovenstroomse bodemdaling sinds 2002.

### 4.3 Zomerbedverdieping IJsseldelta

Behalve de *grootschalige* bodemdaling in de Bovenijssel (Fig.4.2) laten de bodempeilingen tussen km 997 en km 998 (Fig.4.3) ook een *lokale* verdieping van 1,5 m in de BenedenIjssel zien. Vanwege een eventuele zomerbedverdieping als rivierverruimingsmaatregel (PKB *Ruimte voor de Rivier*) is het de moeite waard om de waargenomen veranderingen na verdieping nader te bekijken.

De theorie achter het schatten van sedimentatie in een lokale verdieping is als volgt. In RIZA (2004b) wordt de onderhoudsinspanning voor zomerbedverdieping in de IJsseldelta geschat met

$$v = c_{sed} \Delta z T \quad (4.1)$$

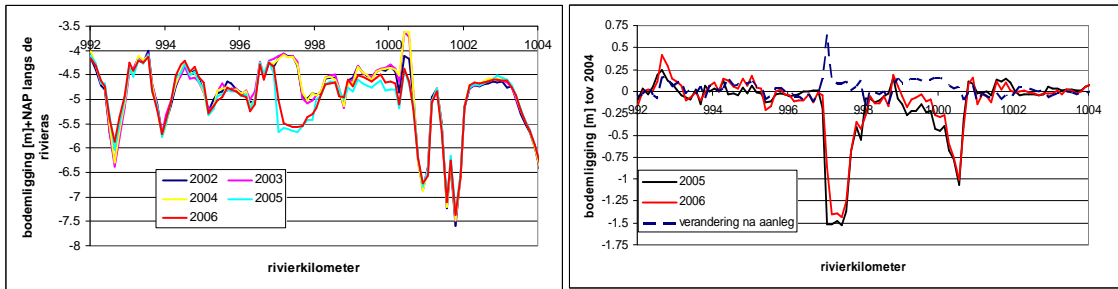
met  $v$  [ $m^3/m$ ] het jaarlijks sedimentatievolume per meter breedte;  $c_{sed}$  [ $m/jaar$ ] de jaargemiddelde verplaatsingssnelheid van het sedimentatiefront ;  $\Delta z$  [ $m$ ] de hoogte van het sedimentatiefront, bij benadering gelijk aan de grootte van de zomerbedverdieping en  $T=1$  jaar. De jaargemiddelde voortplantingssnelheid  $c_{sed}$  is groter dan of gelijk aan  $c_1$ , de voortplantingssnelheid van bodemveranderingen *in het verdiepte deel*, en kleiner dan of gelijk aan  $c_0$ , de voortplantingssnelheid van *bovenstroomse* bodemveranderingen (Sieben, 1997). Ofwel, voor het sedimentatievolume  $v$  kan gelden  $c_1 \Delta z T \leq v \leq c_0 \Delta z T$

$$(4.2)$$

Voor  $c_0$  wordt op basis van km-gemiddelde waarden van het traject km 970-1000 in de periode 1970-1999 (RIZA, 2004b) gebruikt  $c_0=1060$  m/jaar. Deze jaargemiddelde waarde past bij de over die periode

gemiddelde hydrograaf. De bovengrens voor het jaarlijks sedimentatievolume wordt dan met  $\Delta z=1,5$  m geschat op  $v_{max}=c_0\Delta z=1590$  m<sup>3</sup>/m.

Het sedimenttransport  $s$  [m<sup>2</sup>/s] wordt benaderd met een machtswet  $s \propto u^b$  met  $u$  [m/s] de stroomsnelheid en  $b$  een coëfficiënt met  $O(b)=5$  en de theoretische voortplantingssnelheid met  $c_0 = bs/a$  (De Vries, 1965). Met de rigid-lid benadering voor waterstanden kan vervolgens worden gevonden  $c_1 \approx c_0(1+(\Delta z/a_0))^{-1-b}$  (4.3) met  $a_0$ [m] de waterdiepte direct bovenstrooms van de zomerbedverdieping en  $\Delta z=1,5$  m. Met Verg.4.3 wordt de minimale waarde van  $c_1$  dan geschat op  $c_1 \approx 0,15c_0 \approx 157$  m/jaar. Dus, de ondergrens voor het jaarlijks sedimentatievolume is dan  $v_{max}=c_0\Delta z=235$  m<sup>3</sup>/m. In RIZA (2004)c is pragmatisch het gemiddelde van de boven- en ondergrens als schatting voor het sedimentatievolume gebruikt. Dit komt voor 1,5 m verdieping overeen met een jaarlijkse sedimentatie ter plekke van de verdieping van 912 m<sup>3</sup>/m.



**Figuur 4.3** Verdieping van het zomerbed met 1,5 m bij km 997-998 in 2004.

De vraag is hoe deze voorspelde waarde zich verhoudt tot de waarnemingen van km 997-998 in de periode 2004-2006. Allereerst is te zien dat na aanleg van de verdieping tussen km 997 en km 998 er bovenstrooms van de verdieping ongeveer 0,12 m erosie heeft plaatsgevonden. Deze terugschrijdende erosie wordt opgewekt door een vermoedelijk even grote daling van lokale waterstanden. Behalve deze bovenstroomse erosie vindt ook ongeveer 145 á 155 m<sup>3</sup>/m sedimentatie plaats ter plekke van de verdieping. De waargenomen sedimentatie in 2005-2006 is daarmee slechts 15 % van het geschatte volume.

Een verklaring voor deze afwijking is als volgt. De voorspelling is gebaseerd op een afvoerverloop waarmee de historische afvoeren uit de periode 1970-1999 gekarakteriseerd worden. Het is echter de vraag of dit ook representatief is voor de periode 2005-2006. Daarom is in Fig.4.4 de afvoeroverschrijdings-kromme van de periode 2005-2006 vergeleken met de kromme van afvoeren uit de periode 1970-1999. De jaren 2005 en 2006 blijken relatief droog. De invloed hiervan op de sedimentvracht in de IJsseldelta kan als volgt worden geschat. Met een door het vaste IJsselmeerpeil geringe variatie in waterstand en waterdiepte in de IJsseldelta, is opnieuw met de machtswet  $s \propto u^b$  de

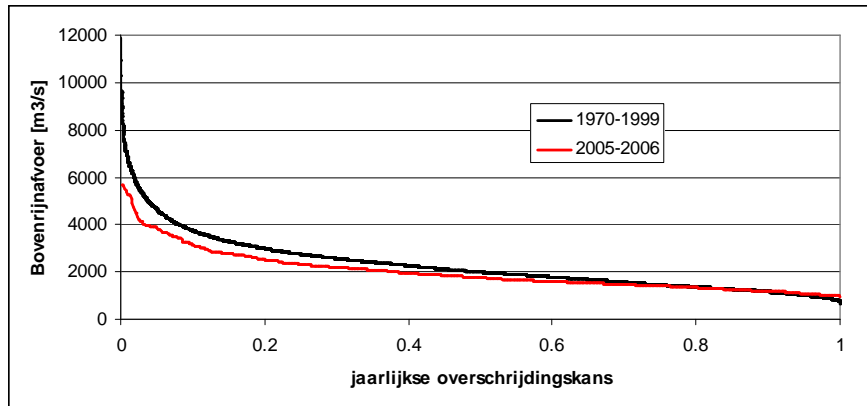
$$\text{jaarlijkse sedimentvracht } V \text{ ongeveer evenredig met } V \propto \int_T u^b dt \propto \frac{1}{a^b} \int_{p=0}^{p=1} Q^b dp \quad (4.4)$$

met  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] de afvoer en  $p$  [-] de afvoeroverschrijdingskans en  $b=5$ . Door deze benadering voor de sedimentvracht voor de beide sets afvoeren uit Fig.4.4 toe te passen wordt vervolgens gevonden

$$\frac{V_{2005-2006}}{V_{1970-1999}} \approx \frac{\int_{p=0}^{p=1} Q_{2005-2006}^b dp}{\int_{p=0}^{p=1} Q_{1970-1999}^b dp} \approx 0,2 \quad (4.5)$$

Dit betekent dat de sedimentvracht door de IJssel in 2005-2006 slechts één vijfde bedroeg van de referentie sedimentvracht voor de periode 1970-1999. Dit kan het verschil tussen de geschatte en de waargenomen aanzanding in de gerealiseerde verdieping van het zomerbed grotendeels verklaren. Dit

illustreert echter ook de *zeer grote invloed van het afvoerverloop op de sedimentvracht* door de benedenstroomse rivierstukken.



Figuur 4.4 Vergelijking afvoeren 2005-2006 met referentieperiode 1970-1999.

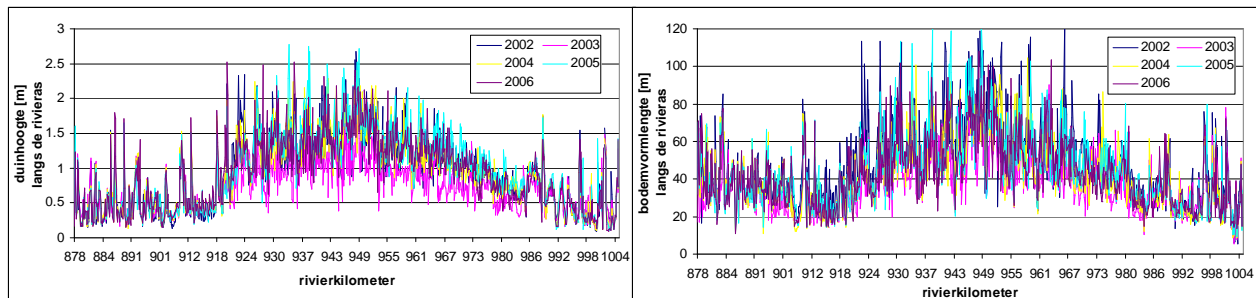
#### 4.4 Bodemvormen in de IJssel

Net als in de Waal kunnen ook voor de IJssel karakteristieke bodemvormafmetingen worden bepaald. Omdat in deze relatief smalle rivier de invloed van randen (met name ontgrondingskuilen bij kribben) op de bodemligging groot kan zijn, wordt in Fig.4.5 alleen een langspatief van duinhoogten gepresenteerd die is bepaald in een 25 m brede zone rondom de rivieras. Aangenomen wordt dat bodemvormen in het midden van de rivier grotendeels betrekking hebben op *verplaatsende* bodemvormen. Er zijn overigens meer multibeam-bodempeilingen nodig om deze aanname goed te kunnen onderbouwen, en om een onderscheid te kunnen maken tussen verplaatsende en plaatsvaste bodemvormen (zie Sectie 2.8).

Het verloop in de gevonden bodemvormafmetingen varieert voor de verschillende trajecten;

- in de Bovenijssel van km 880 tot km 920 zijn bodemvormen klein (orde 0,3 m) en kort (30 m lang)
- in de Middenijssel van km 920-950 is sprake van een langzame groei in duinhoogte en duinlengte van bodemvormen. Dit duidt op een toenemende mobiliteit door een afname in korrelgrootte
- in de Benedenijssel van km 950-1004 nemen duinhoogte en duinlengte weer af, onder andere dankzij de toenemende normaalbreedte van de IJssel.

Het *verloop* is voor de verschillende jaren vergelijkbaar, maar de *grootte* van de duinen varieert wel, afhankelijk van de afvoer. Zo is 2003 een droog jaar, met kleinere duinhoogten tot gevolg.

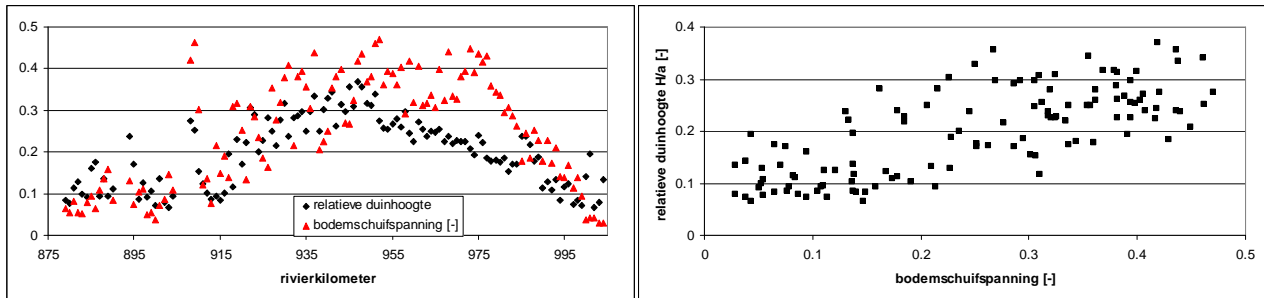


Figuur 4.5 Langspatief van duinhoogte en bodenvormlengte langs de rivieras van de IJssel.

De duinhoogte van bodemvormen wordt begrensd door waterdiepte en mobiliteit van het bodemmateriaal (zie ook Sectie 3.3). In de linkergrafiek van Fig.4.6 is de relatieve duinhoogte ( $H/a$  met

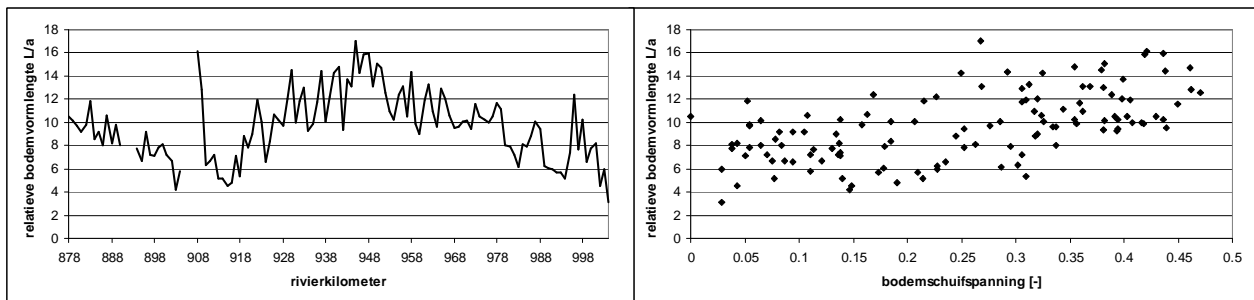
$H$  [m] de duinhoogte en  $a$  [m] de waterdiepte) weergegeven samen met de relatieve bodemschuifspanning. De relatieve bodemschuifspanning in Fig.4.6, 4.7 en 4.8 is analoog aan Sectie 3.3 bepaald met een stroomsnelheid  $u$  [m/s], een waterdiepte  $a$  [m] en een bodemruwheid  $C$  [ $m^{1/2}/s$ ] uit een 1D Rijntakkenmodel (bij gemiddelde afvoer). De korreldiameter  $D_{50}$  is het gemiddelde van bemonsteringen uit 1951; 1966 1976 1984 en 1995. Impliciet wordt met de presentatie in de volgende figuren verondersteld dat de gemeten bodemvormafmetingen gerelateerd kunnen worden aan condities die horen bij een gemiddelde afvoer, dus zonder nadijnde effecten van voorgaande hogere of lagere afvoeren.

Het verloop in Fig.4.6 geeft aan dat de mobiliteit van het bodemmateriaal (gekaracteriseerd met de relatieve bodemschuifspanning) in de verschillende IJsseltrajecten sterk varieert. De trend in de rechtergrafiek van Fig.4.6 laat grotere bodemvormen bij een grotere relatieve bodemschuifspanning zien.



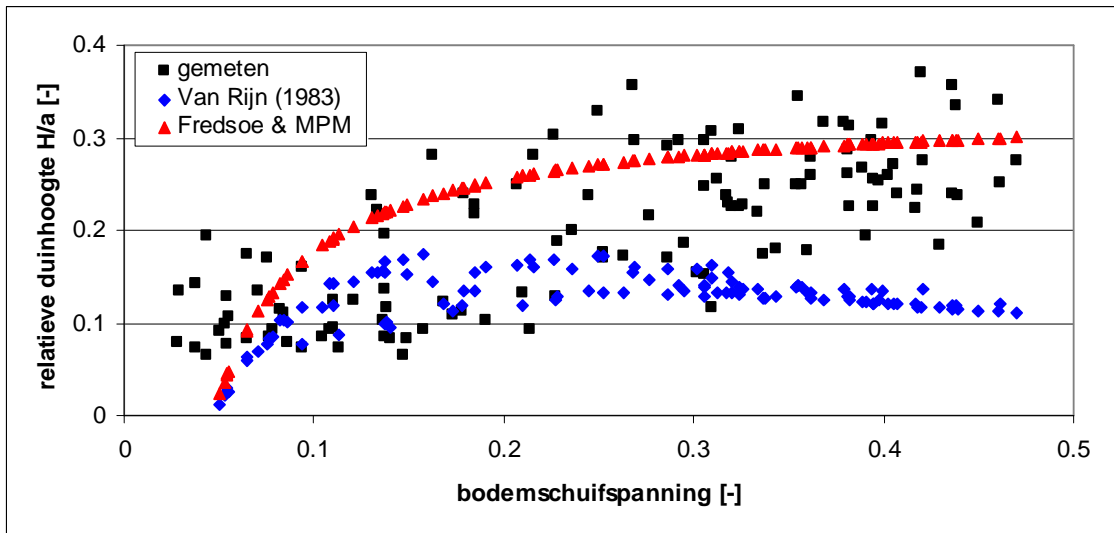
**Figuur 4.6** Relatie tussen duinhoogte en geschatte bodemschuifspanning.

In de linkergrafiek van Fig.4.7 is het verloop in de relatieve bodemvormlengte (bodemvormlengte  $L$  [m] gedeeld door de waterdiepte  $a$  [m]). De trend in de rechtergrafiek van Fig.4.7 geeft aan dat ook de relatieve bodemvormlengte afhankelijk lijkt te zijn van de bodemschuifspanning.



**Figuur 4.7** Relatie tussen duinlengte en geschatte bodemschuifspanning.

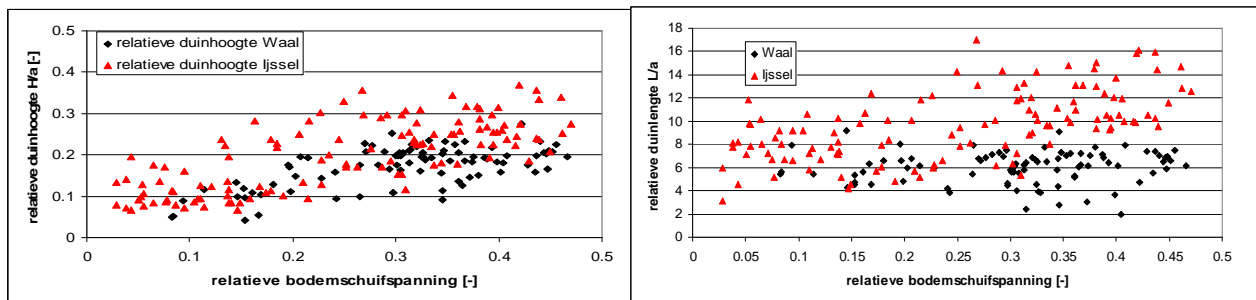
Net als in Sectie 3.3 wordt de gemeten duinhoogten vergeleken met de duinhoogtevoorspeller van Van Rijn (1983), en voorspeller volgens de Fredsoe benadering (Fredsoe, 1982; RIZA, 2004a) toegepast op Meyer-Peter Müller (1948).



Figuur 4.7 Vergelijking gemeten en voorspelde duinhoogten.

Uit het verloop van de voorspelde waarden blijkt dat beide formules na een eenvoudige calibratie de trend in gemeten duinhoogten redelijk volgen. Voor grotere bodemschuifspanningen (bijvoorbeeld  $\theta > 0,3$ ) is de duinhoogte niet langer afhankelijk van de bodemschuifspanning, maar alleen nog evenredig met de waterdiepte. In die zone levert de Van Rijn (1983) voorspeller ten onrechte een afname in duinhoogte voor grotere bodemschuifspanningen.

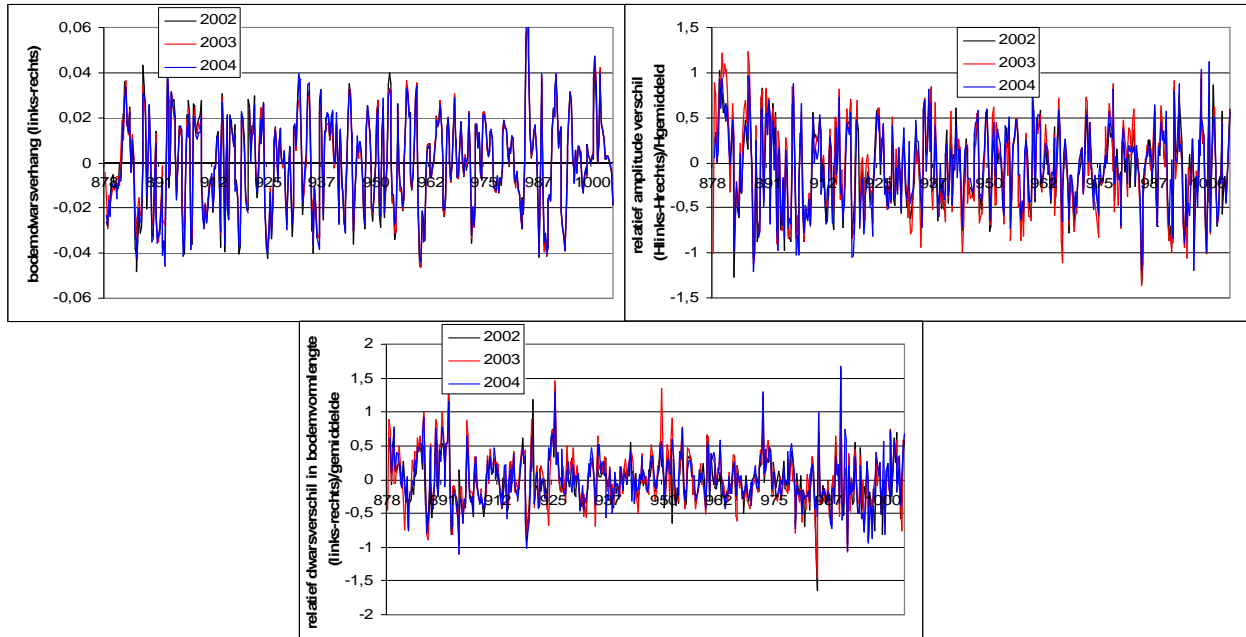
In Fig.4.8 zijn tenslotte de relatieve duinhoogten van de IJssel vergeleken met die van de Waal (Fig.3.4). Voor een aantal punten is de geschatte duinhoogte in de IJssel groter dan in de Waal. Dit kan worden veroorzaakt door een grotere invloed van plaatsvaste bodemvormen, en/of een frequenter interactie tussen scheepvaart en rivierbodem in de Waal. Pas met meer bodempeilingen kan het onderscheid tussen plaatsvaste en verplaatsende bodemvormen beter worden bepaald (Sectie 2.8). De trend in de relatie met de bodemschuifspanning lijkt voor beide Rijntakken echter goed overeen te komen. Bovendien valt op dat de IJssel een nog grotere variatie in relatieve bodemschuifspanning (bij gemiddelde afvoer) kent dan de Waal.



Figuur 4.8 Relatieve duinhoogte en bodemschuifspanning.

## 4.5 Dwarsvariaties in bodemparameters

De relatieve verschillen in dwarsrichting zijn voor het bodemdwaarsverhang, duinhoogte en bodemvormlengte weergegeven in Fig.4.9. Net als voor de Waal blijkt ook in de IJssel niet alleen de ruimtelijke variatie in bodemligging behoorlijk plaatsgebonden, maar ook de ruimtelijke variatie in bodemvormparameters. De afmetingen van bodemvormen worden dus sterk bepaald door vaste lokale condities. Ook hier kan weer worden opgemerkt dat in Fig.4.9 geen onderscheid is gemaakt tussen verplaatsende en plaatsvaste bodemvormen.

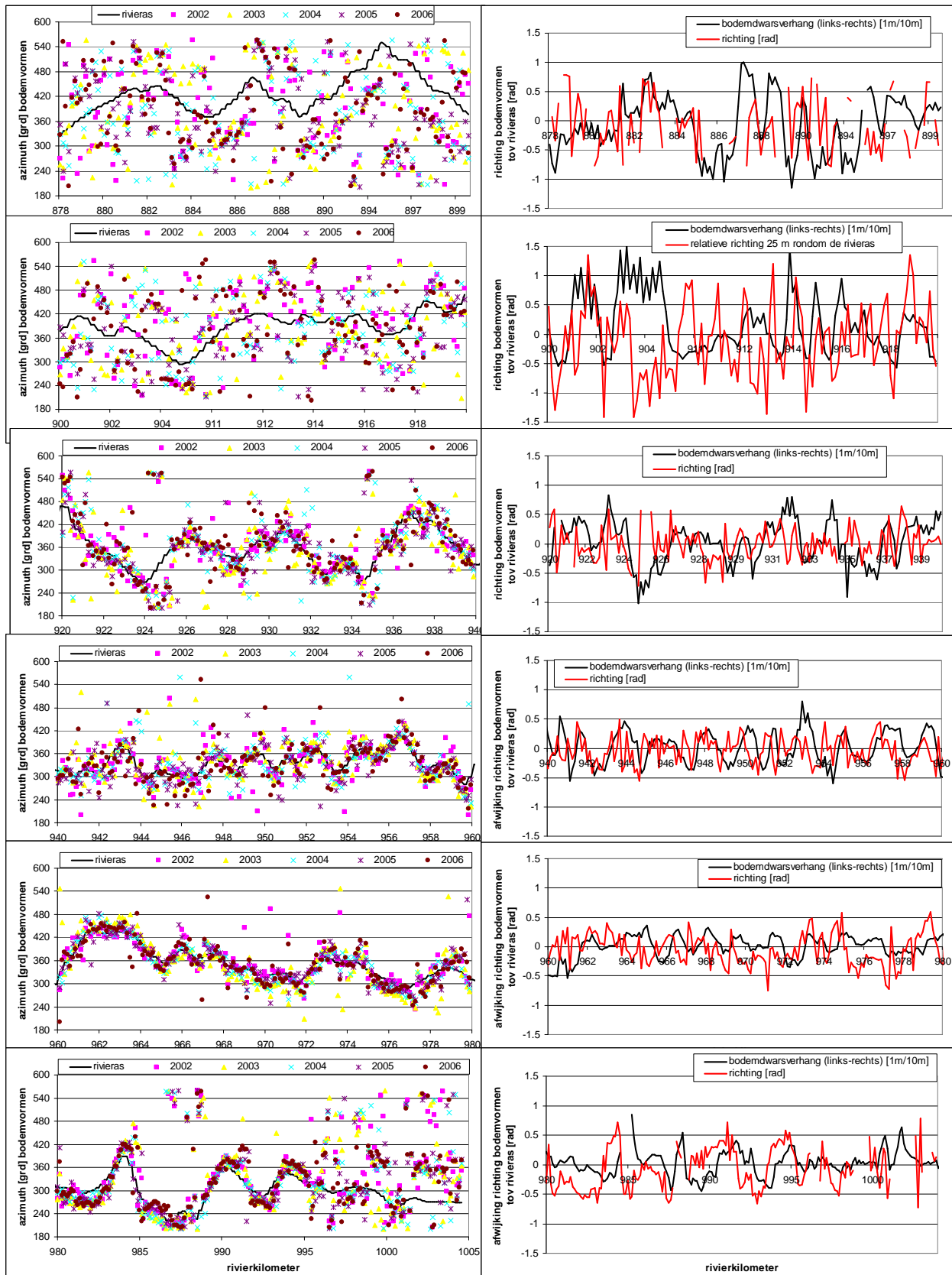


Figuur 4.9 Overzicht van gradiënten in dwarsrichting voor verschillende jaren.

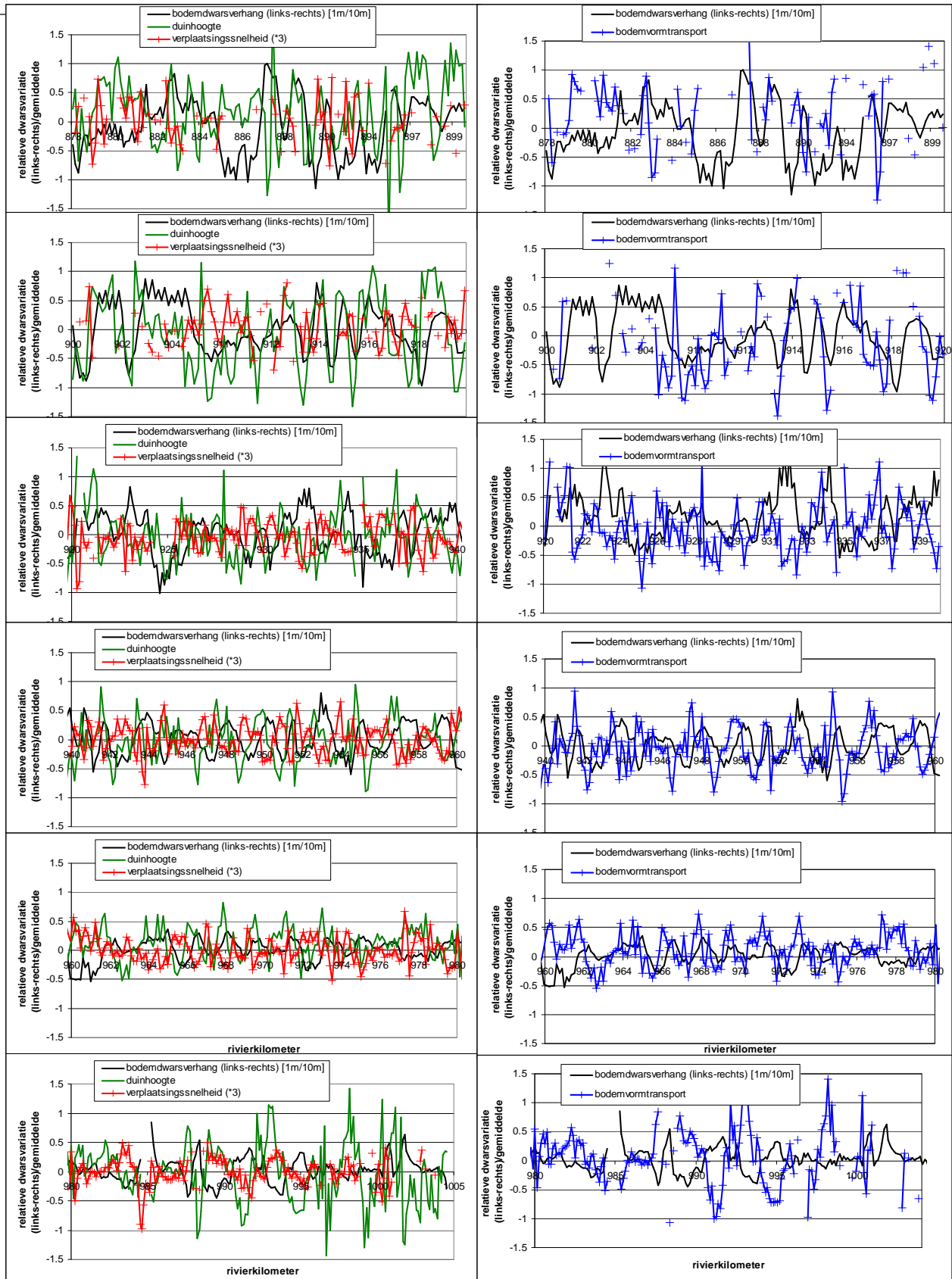
## 4.6 Richting van bodemvormen

In de linkerkolom van Fig.4.10 is de richting van bodemvormen in graden ten opzichte van het Noorden weergegeven, samen met de richting van de rivieras. De spreiding in de bodemvormrichting is het grootst in de traject van de Boven-IJssel waar het bodemmateriaal het minst mobiel is. In de rechterkolom van Fig.4.10 is de richting van de bodemvormen in radialen ten opzichte van de rivieras weergegeven (een afwijking naar rechts is als positief gedefinieerd). Ter oriëntatie is ook het bodemdwaarsverhang (niet op schaal) toegevoegd. Bij deze relatieve richting (rechterkolom) zijn niet-realistische afwijkingen van meer dan 45 graden uit de jaarlijkse resultaten weggelaten, voordat met alle bodempeilingen een jaargemiddelde waarde is bepaald. De trends zijn daarmee niet significant beïnvloed, maar voor een beperkt aantal lokaties ontbreken hierdoor waarnemingen.





Figuur 4.10 Langsprofilen in bodemvormrichting langs de rieras van de IJssel.



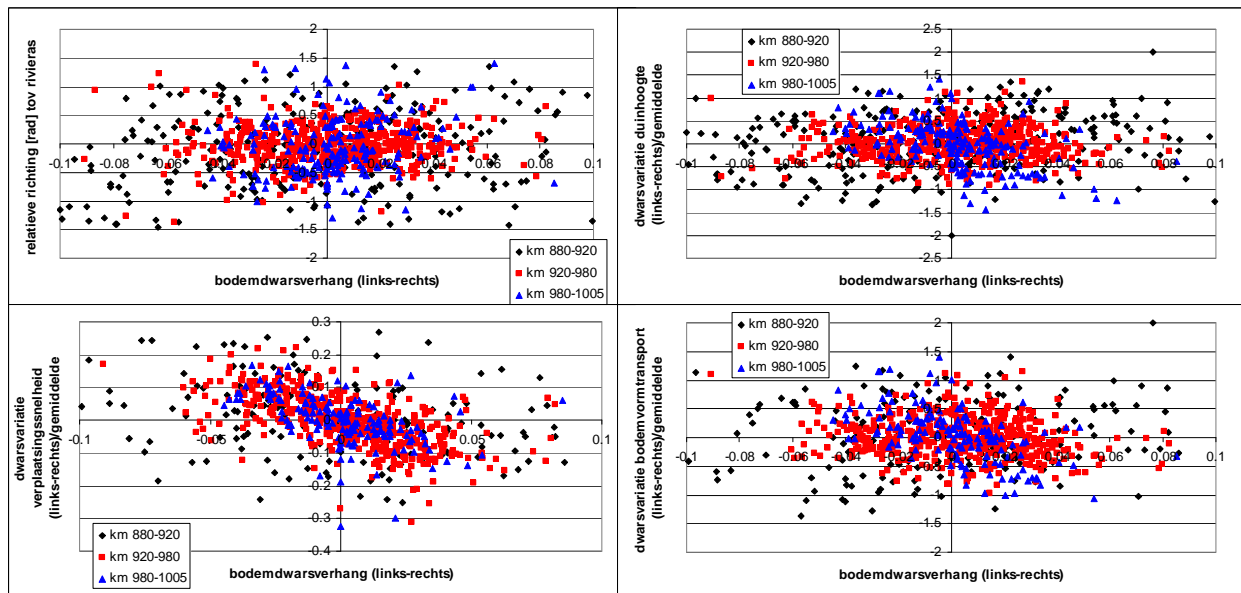
Figuur 4.11 Dwarsvariatie in duinhoogte, verplaatsingssnelheid en bodemvormtransport.

De richting van bodemvormen in de IJsselbochten varieert voor de verschillende trajecten. Voor het traject van km 890-913 wijkt de richting van duinkammen af naar de binnenbocht (Fig.3.9-b), terwijl bovenstrooms hiervan bochten voorkomen waarin de duinkammen afwijken naar de buitenbocht (Fig.3.9-a). Voor de trajecten van de MiddenIJssel en BenedenIJssel draaien de duinkammen in de meeste gevallen gedurende de bocht naar de binnenbocht (Fig.3.9-c). Dit duidt op grotere verplaatsingssnelheden in buitenbochten. Voorbeelden van duinkamoriëntatie in de IJssel zijn onder andere te vinden in Bijlage D van WL Delft Hydraulics (2008).

Door de relatie tussen de verdraaiing van duinkammen en de verplaatsingssnelheid (Sectie 3.6) ook op de IJsseldata toe te passen kan met de richtingen uit Fig.4.10 de relatieve variatie in verplaatsingssnelheid (linkerkolom Fig.4.11) en de relatieve variatie in bodemvormtransport (rechterkolom Fig.4.11) worden bepaald. De langsprofielen van bodemdwaarsverhang en relatieve dwarsvariatie in sedimenttransport laten verschillende trends zien.

- Voor het traject km 900-920 is het teken van bodemdwaarsverhang en variatie in sedimenttransport gelijk; het sedimenttransport in binnenbochten is hier groter dan in buitenbochten.
- In het traject van km 940-980 is de dwarsvariatie in bodemvormtransport bij benadering minimaal bij een maximaal bodemdwaarsverhang. Bovenstrooms hiervan is het teken in beide parameters gelijk; daar vindt het meeste bodemvormtransport plaats door de binnenbocht. Benedenstrooms van dit punt is er sprake van een tekenverschil; daar vindt het meeste bodemvormtransport plaats door de buitenbocht. In dit traject is dus sprake van een continue *herverdeling* van sedimenttransport in de bochten.
- In het traject benedenstrooms van km 980 vallen de nulpunten in bodemdwaarsverhang (rechtstanden) en in dwarsvariatie in sedimenttransport (uniforme verdeling) voor enkele bochten samen. In de bocht houden de verdeling van bodemligging en sedimenttransport gelijke tred. Het tekenverschil tussen beide parameters geeft daarbij aan dat het bodemvormtransport door de buitenbocht het grootst is.

Het bovenstaande geeft aan dat het gedrag van sedimenttransport in bochten sterk varieert in de verschillende rivierstukken van de IJssel.



**Figuur 4.12** Dwarsvariatie in duinhoogte, relatieve bodemvormrichting, verplaatsingssnelheid en in bodemvormtransport als functie van bodemdwaarsverhang.

---

De gemiddelde relatie tussen dwarsvariatie in duinhoogte, richtingsafwijking, verplaatsingssnelheid en bodemvormtransport is voor drie trajecten nog eens weergegeven in Fig.4.12. Positieve waarden van het bodemdwaarsverhang kunnen geïnterpreteerd worden met links=binnenbocht en rechts=buitenbocht. Voor negatieve waarden geldt links=buitenbocht en rechts=binnenbocht).

#### 4.7 Conclusies

In de gemiddelde bodemliggingen is de invloed van bodemvormen onderdrukt, zodat kleinere bodemveranderingen zichtbaar gemaakt kunnen worden. Voor de IJssel blijkt in de beschouwde periode sprake te zijn van bodemdaling in het bovenstroomse traject. Behalve grootschalige trends is ook het effect van lokale zomerbedverdieping in de BenedenIJssel terug te vinden. Na aanleg vindt *in* deze verdieping sedimentatie plaats en bovenstrooms ervan terugschrijdende erosie.

Uit de relatief langzame reactie op de zomerbedverdieping in de IJsseldelta blijkt de grote invloed van het jaarlijks afvoerloop op de sedimentvracht door benedenstroomse rivierstukken.

Bodemvormen in de IJssel kennen een sterk variërende ruimtelijke structuur. Voor de Bovenijssel lijken voor een aantal bochten de duinhoogten maximaal in de binnenbocht.(Fig.4.12). Voor de BenedenIJssel is deze trend duidelijk andersom; daar zijn duinhoogten maximaal in de buitenbochten. De MiddenIJssel laat een overgang tussen beiden trajecten zien.

Voor alle trajecten geldt dat er geen duidelijke relatie is tussen bodemdwaarsverhang en de richting van bodenvormen, doordat gedurende de bocht duinkammen roteren. De rotatie van de duinkammen geeft aan dat voor alle trajecten de maximale verplaatsingssnelheden zijn te vinden in de buitenbochten. Vanwege de trends in duinhoogte en verplaatsingssnelheid is de verdeling van bodemvormtransport in de BovenIJssel en in de MiddenIJssel gemiddeld redelijk uniform over het dwarsprofiel, terwijl in de BenedenIJssel het meeste bodemvormtransport door de buitenbochten gaat.

Het verschil in gedrag van bodemvormen in deze trajecten wordt vermoedelijk veroorzaakt door de variatie in mobiliteit van het bodemmateriaal (zie ook Sectie 4.4) en de grotere breedte-diepte verhouding in de benedenstroomse trajecten. Net als in de Waal is de duinhoogte sterk gerelateerd aan waterdiepte en bodemschuifspanning. Gemeten waarden komen dan ook redelijk overeen met bijvoorbeeld voorspellingen met de methode Fredsoe (1982) toegepast op Meyer-Peter en Müller (1948).

Tenslotte wordt er nogmaals op gewezen dat de invloed van plaatsvaste bodemvormen op de waargenomen bodemgradiënten relatief groter zijn bij lagere mobiliteit. Met name voor de Bovenijssel kan dit een interpretatie voor verplaatsende bodemvormen verstoren.

---

## Hoofdstuk 5 Bodemparameters van de Nieuwe Waterweg

### 5.1 Achtergrond

Aanvullend aan de toepassingen in de Waal en IJssel wordt in dit hoofdstuk een toepassing beschreven voor de Nieuwe Waterweg. Voor deze verkenning zijn alleen bodempeilingen van de vaargeul beschikbaar. De deeloppervlakken zijn daarom gedefinieerd met roosterlijnen die zijn georiënteerd op de vaargeul, voor het traject km 1005-1035. De gebruikte roostercellen zijn circa 55 m breed en 500 m lang. Een dwarsprofiel door de vaargeul wordt op deze wijze met zes cellen beschreven. De bodemparameters zijn vervolgens bepaald met multibeampelingen van de vaargeul uit de periode 2004-2007, die zijn aangeleverd door Directie Zuid-Holland in een regelmatig 5 m x 5 m bodemgrid. Een overzicht hiervan is gegeven in Tabel 5.1.

traject km 1009-1023	traject 1020-1035
	Juli 2004
	November 2004
	December 2004
Februari 2005	
	Maart 2005
April 2005	
Juni 2005	Juni 2005
	Augustus 2005
Oktober 2005	
	November 2005
Februari 2006	
	Maart 2006
April 2006	
	Juni 2006
Juli 2006	
	Augustus 2006
Oktober 2006	
	November 2006
Januari 2007	Januari 2007
Februari 2007	Februari 2007
Maart 2007	Maart 2007
Mei 2007	

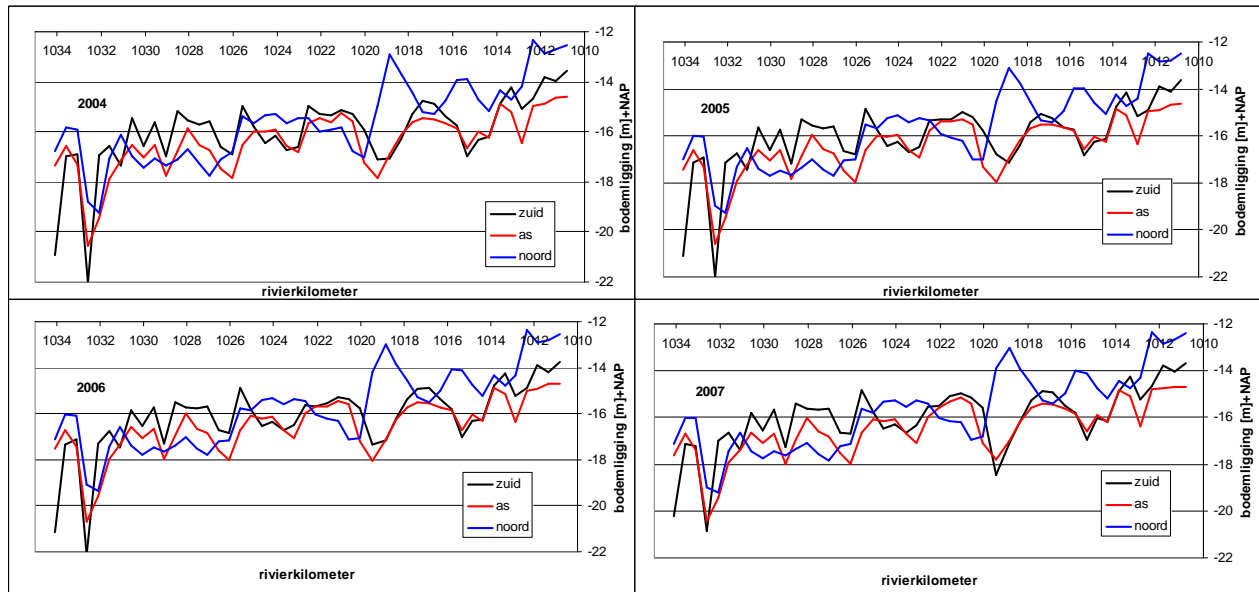
**Tabel 5.1** Overzicht gebruikte bodempeilingen Nieuwe Waterweg.

Voor elke peiling zijn de karakteristieke bodemvormafmetingen bepaald. Voor enkele peilingen uit 2007 is bovendien sprake van een overlap in een redelijk korte periode. Met deze stukken is geprobeerd om uit de bodemveranderingen ook de verplaatsingssnelheid van bodemvormen te schatten.

### 5.2 Bodemliggingen 2004-2007

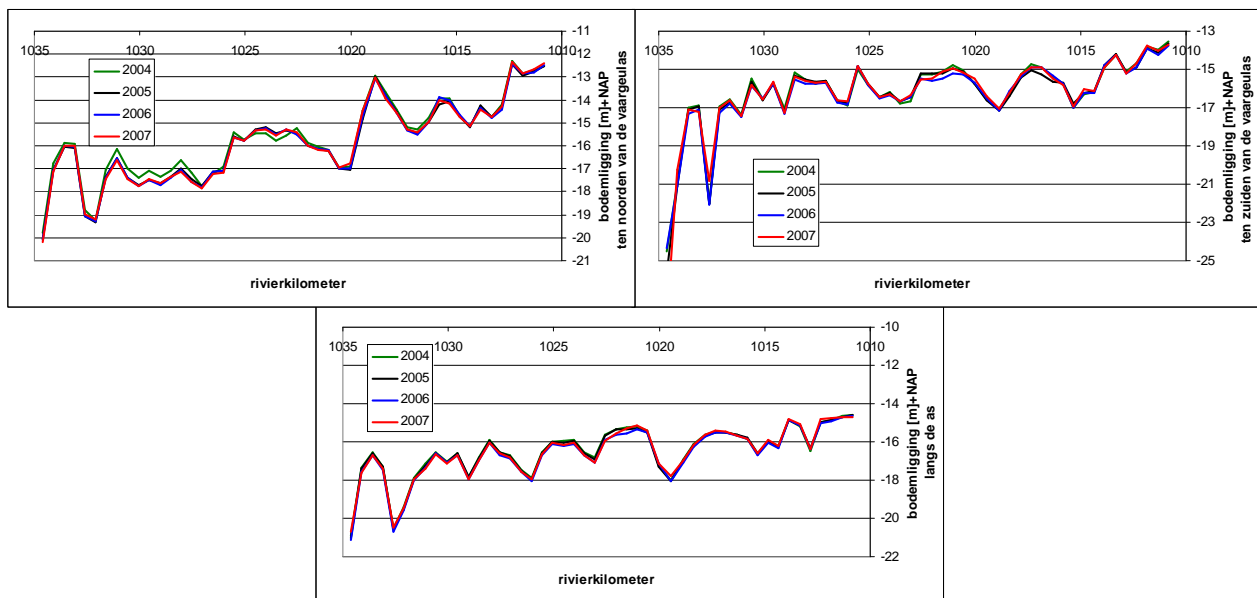
Met de beschikbare peilingen zijn jaargemiddelde bodemliggingen bepaald. Deze zijn vervolgens in drie langsprofielen door de vaargeul verdeeld, elk gemiddeld over een zone van ongeveer 100 m breed. Deze profielen zijn in Fig.5.1 weergegeven. De gemiddelde bodemligging in het bemeten deel van de

Nieuwe Waterweg varieert tussen ongeveer NAP-12 m in het Oosten tot ongeveer NAP-22 m in het Westen. De grootste ondiepte is te vinden in de Noordrand van de vaargeul, ter hoogte van km 1019. De grootste diepte ligt bij km 1032,5. De grootste dwarsvariatie in de vaargeul is te vinden ten Oosten van km 1020.



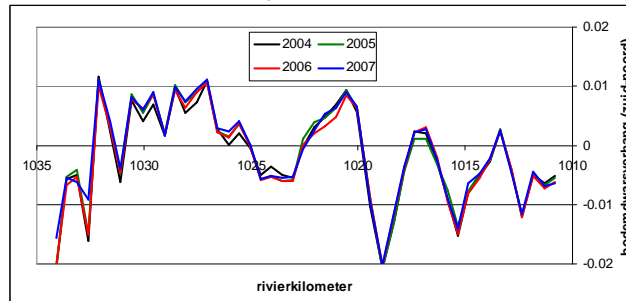
**Figuur 5.1** Ruimtelijk-gemiddelde bodemligging per jaar.

De bodemligging is voor de verschillende jaren samen weergegeven in Fig.5.2 Deze waarden kunnen worden gebruikt om een langjariger database van ruimte-gemiddelde bodemliggingen in de Nieuwe Waterweg op te bouwen. Om meer inzicht te verwerven in het systeemgedrag is het overigens wel noodzakelijk dat de analyse zich niet beperkt tot de vaargeul, maar dat in ieder geval jaarlijks de bodem van oever tot oever wordt gepeild om de morfologische informatie van de gehele Nieuwe Waterweg compleet te krijgen. Fig.5.2 laat zien dat gemiddeld over de 500 m x 100 m vlakken de bodemveranderingen niet groot zijn.



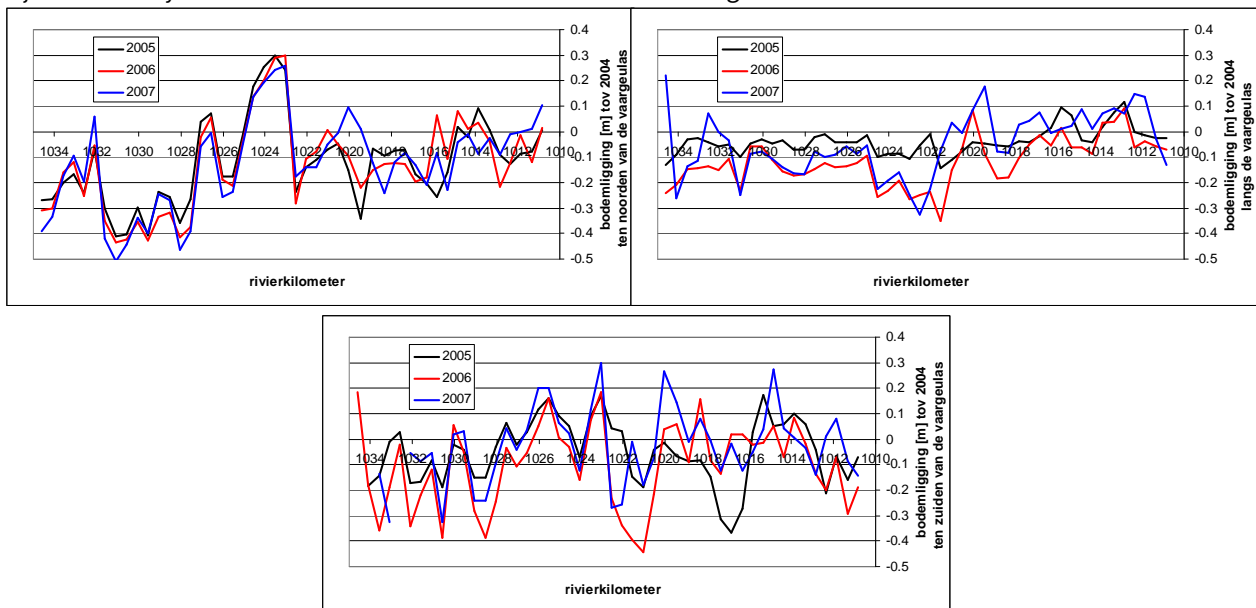
**Figuur 5.2** Bodemliggingen ten noorden en ten zuiden van de vaargeulas van de Nieuwe Waterweg.

Het bodemdwaarsverhang in de vaargeul is weergegeven in Fig.5.3. De grootte hiervan varieert weinig gedurende de verschillende jaren. De meest extreme waarde wordt gevonden bij km 1019. De lengte van de dieptevariaties is ongeveer 3,5 km ten oosten van km 1020. Tussen km 1025 en km 1031 is de vaargeul ten noorden van de as structureel dieper.



**Figuur 5.3** Bodemdwaarsverhang.

Om de bodemveranderingen wat nauwkeuriger te kunnen bekijken zijn de veranderingen sinds 2004 voor de drie langsprofielen van Fig.5.1 weergegeven in Fig.5.4. Elk van de profielen laat met name tussen 2004 en 2005 een daling ten westen van km 1027 zien. Bij km 1022-1024 is langs de as in 2006 de bodem gedaald (mogelijk door baggeren) terwijl ten noorden en ten zuiden van de as de bodem met dezelfde grootte-orde is gestegen. In de laatste jaren is het westelijk deel van de vaargeul in de Nieuwe Waterweg dus verdiept. Dergelijke trends kunnen van invloed zijn op verschillende rivierfuncties. Door bodemveranderingen zoals in Fig.5.4 samen met de bagger- en stortinspanningen van de afgelopen jaren te analyseren kan de stabiliteit van de Nieuwe Waterweg beoordeeld worden.

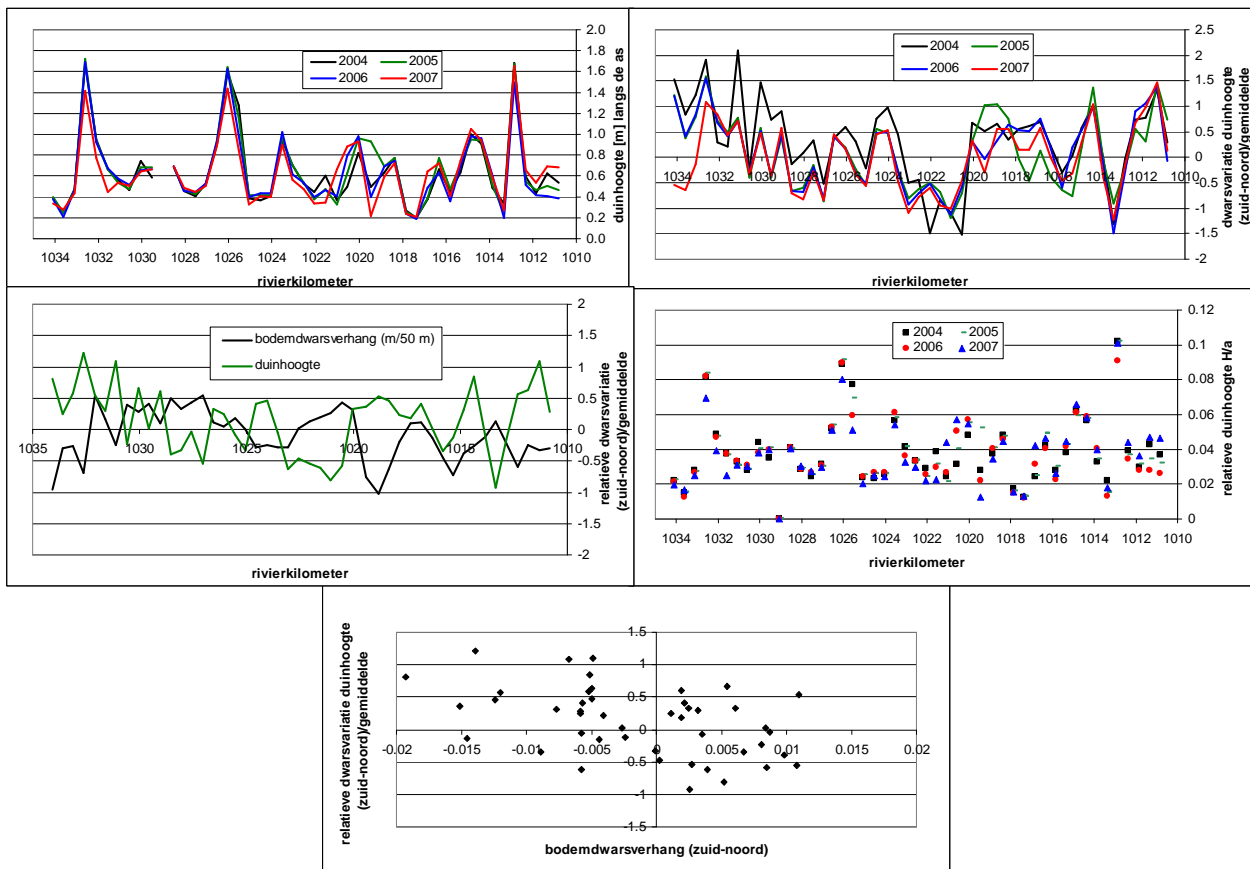


**Figuur 5.4** Bodemveranderingen Nieuwe Waterweg sinds 2002.

### 5.3 Bodemvormen in de Nieuwe Waterweg

De parameters van bodemvormen langs de as van de vaargeul, en de relatieve variatie in dwarsrichting, zijn weergegeven in Fig.5.5. Opgemerkt wordt dat met de methodiek van Hoofdstuk 2 alle afwijkingen van een gemiddeld vlak per rekencel worden toegeschreven aan bodemvormen. Op lokaties met een sterk variërende bodem kan dit ten onrechte worden geïnterpreteerd als een lokatie met bodemvormen van grote amplitude (zie ook Sectie 2.8).

Het verloop in duinhoogte en bodemvormlengte is redelijk constant in de verschillende jaren. Het merendeel van de duinhoogten varieert tussen 2 á 6 % van de waterdiepte (rechtsmidden Fig.5.5). Dit is relatief laag vergeleken met de duinhoogten in Waal en IJssel. Mogelijk speelt een dempende invloed van getij en/of afwijkende eigenschappen van het bodemmateriaal hierin een rol. Uitschieters van circa 10% (die beter overeenkomen met riviercondities) zijn te vinden bij km 1013; 1026 en km 1032. De algemene trend lijkt grotere duinhoogten in buitenbochten (grafiek linksmidden en grafiek middenonder van Fig.5.5) te zijn, en dat komt overeen met het gedrag in de benedenstroomse rivierstukken die in Hoofdstuk 3 en 4 zijn beschouwd.

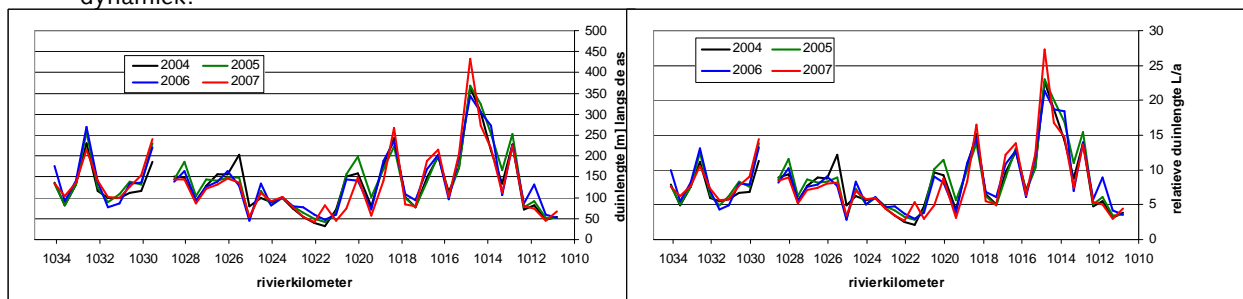


Figuur 5.5 Verloop in duinhoogte.

De structuur voor het verloop in bodemvormlengte is redelijk constant, daarom is in Fig.5.6 een gemiddeld verloop weergegeven. De duinlengte varieert van 50 m tot 350 m, en dat varieert van 5 tot 25 maal de waterdiepte. Deze waarden zijn daarmee relatief groot; immers Van Rijn (1983) noemt voor de lengte van bodemvormen een maat van 7 maal de waterdiepte. Alleen in het traject tussen km 1021 en km 1025 is de gevonden duinlengte van deze orde. De grootste lengten (meest vlakke bodemstructuur) zijn te vinden in het oostelijk deel van de Nieuwe Waterweg tussen km 1010 en 1019. De maximale waarden van de



karakteristieke duinlengte zijn vergelijkbaar met de lengte van de deeloppervlakken. De numerieke waarde zegt dan ook weinig over een fysische bodemvormlengte; voor een goede statistische bepaling van duinlengten zijn de deeloppervlakken blijkbaar te klein. De grote lengtemaat geeft vooral aan dat op deze trajecten de bodemligging van de Nieuwe Waterweg zeer vlak is. Dit kan een aanduiding zijn voor lage dynamiek.



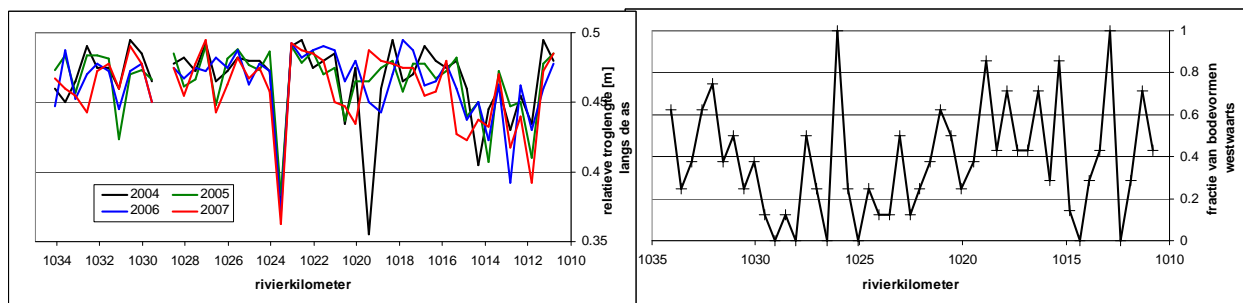
Figuur 5.6 Verloop duinlengte in de Nieuwe Waterweg.

De verhouding tussen de lengte van de loefzijde (lengte van de bodemvormtrog) en de totale bodemvormlengte is een maat voor het karakteristieke langsprofiel van bodemvormen. Als deze nadert tot 0,5 dan is sprake van *symmetrische* bodemvormen, waarvan zonder verdere informatie niet duidelijk is in welke richting deze verplaatsen, en die de indruk wekken dat *diffusieve* processen (demping) dominant zijn over *convectieve* processen (verplaatsing). Als de troglengte daarentegen relatief klein is, is sprake van *asymmetrische* bodemvormen met een goed ontwikkeld voortplantingsfront dat bovendien door de bodempeiling goed is weergegeven. Dit kan duiden op een bodemvorm die in een duidelijke richting verplaatst.

De grootte van deze vormfactor (lengte van de trog/ totale bodemvormlengte) is voor de verschillende peilingen weergegeven in de linkerfiguur van Fig.5.7. Kleine waarden (goed ontwikkelde verplaatsingsfronten) komen vooral voor in het Oostelijk deel van de vaargeul in de Nieuwe Waterweg, tussen km 1011 en km 1015. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door de lokaal zeer vlakke bodemstructuur (Fig.5.6).

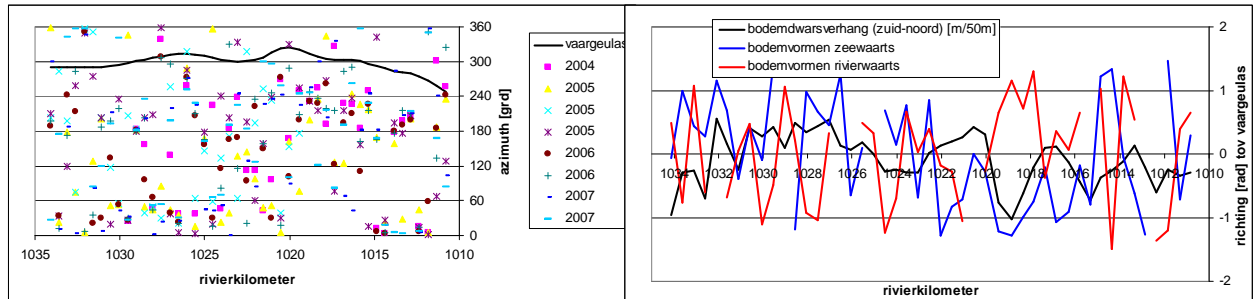
Met behulp van de asymmetrie van bodemvormen kan worden geregistreerd wat de meest waarschijnlijke verplaatsingsrichting is, door aan te nemen dat de bodemvorm verplaatst in de richting van de steilste helling (Sectie 2.7). De fractie van bodemvormen die in de beschouwde bodempeilingen zeewaarts zijn gericht is weergegeven in de rechterfiguur van Fig.5.7. Tussen km 1020 en 1030 neemt dit aandeel langzaam af; wat er op duiden kan dat in dit deel het rivierwaartsgericht transport overheerst. Rondom km 1033 lijkt daarentegen lokaal weer sprake te zijn van grotendeels zeewaarts-gericht transport in de vaargeul. Om de transportbanen goed te kunnen identificeren zou dezelfde informatie ook buiten de vaargeul moeten worden vastgesteld.

Voor de interpretatie van verplaatsingsrichting in de rechtergrafiek van Fig.5.7 wordt impliciet aangenomen dat de beschouwde peilingen een representatief beeld geven van de tij-gemiddelde situatie. Wellicht zijn voor een betrouwbaarder vaststelling van de richting van het bodemvormtransport meer peilingen nodig, uniform verdeeld over de cyclus van het getij en mogelijk weergegeven op een fijner grid dan nu is gebruikt.



Figuur 5.7 Jaargemiddelde relatieve troglengte, en gemiddelde fractie van verplaatsingsrichting.

Net als bij de Waal en de IJssel, kan ook voor de bodemvormen in de Nieuwe Waterweg de azimuth van de steilste zijde worden bepaald. Deze is voor de verschillende jaren weergegeven in de linkergrafiek van Fig.5.8. De richting van de vaargeulas is in Fig.5.8 gedefinieerd van Oost naar West. In de rechtergrafiek van Fig.5.8 zijn de zeewaarts- van de rivierwaartsgerichte bodemvormen onderscheiden door te stellen dat alle zeewaarts gerichte bodemvormen minder dan 90 graden afwijken van de richting van de vaargeulas (deze is gedefinieerd van Oost naar West). Deze presentatie heeft tot gevolg dat bij gelijkvormigheid tussen de rode en blauwe lijn, de verplaatsingsrichting slechts 180 graden is omgedraaid.



**Figuur 5.8** Richting van bodemvormen in de Nieuwe Waterweg.

Omdat vanwege de omkering van stroming een onderscheid is gemaakt in twee bodemvormclusters is de statistische basis van de blauwe en rode lijn in Fig.5.8 kleiner geworden. Als desondanks de trends representatief zijn voor het gemiddeld gedrag van beide groepen bodemvormen, dan zou de afwijking van de rode en blauwe lijn in de rechtergrafiek van Fig.5.8 betekenen dan door het getij bodemvormen kunnen verdraaien. Er zijn meer peilingen nodig om betrouwbaar een representatieve richting van zee- en rivierwaarts verplaatsende bodemvormen te kunnen vaststellen.

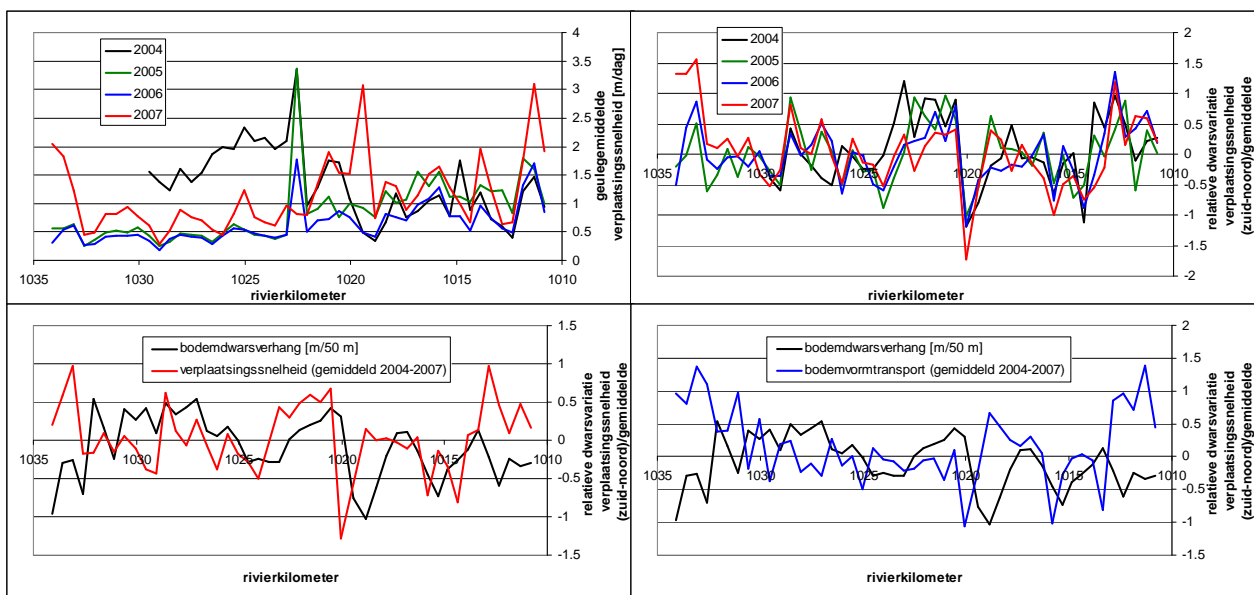
#### 5.4 Verplaatsingsnelheid

In deze sectie wordt de verplaatsingsnelheid bepaald met behulp van veranderingen tussen twee opeenvolgende bodempeilingen. Voor een aantal bodempeilingen geldt een tussenliggende periode van twee maanden, maar voor de set uit 2007 is dit één maand. Het is overigens op voorhand niet duidelijk of dit volstaat voor een rivierstuk waarin de combinatie van getij en rivierafvoer kan leiden tot tekenverschillen in verplaatsingsrichting. In Tabel 5.2 is weergegeven welke combinaties van bodempeilingen hiervoor zijn gebruikt.

traject km 1009-1023	periode [dg]	traject 1020-1035	periode [dg]
		November 2004-Juli 2004	
		November 2004-Juli 2004	122
		December 2004-November 2004	30
April 2005-Februari 2005	62		
Juni 2005- April 2005	62	Juni 2005-Maart 2005	92
		Augustus 2005- Juni 2005	62
Oktober 2005- Juni 2005	122		
		November 2005- Augustus 2005	92
April 2006-Februari 2006	62		
		Juni 2006-Maart 2006	92
Juli 2006- April 2006	92		
		Augustus 2006-Juni 2006	62
Oktober 2006- Juli 2006	92		
		November 2006- Augustus 2006	92
Februari 2007- Januari 2007	30	Februari 2007-Januari 2007	30
Maart 2007- Februari 2007	30	Maart 2007- Februari 2007	30
Mei 2007-Maart 2007	62		

**Tabel 5.2** Overzicht gebruikte bodempeilingen voor het bepalen van verplaatsingssnelheden.

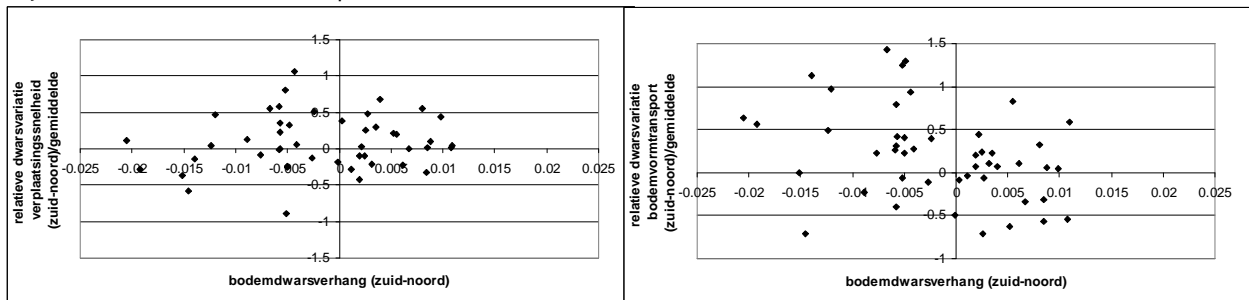
De geschatte snelheid waarmee bodemvormen verplaatsen is weergegeven in de grafiek linksboven van Fig.5.9. Deze blijkt in de orde van 0,5 á 1,5 m/dag, en dit neemt langzaam af van Oost naar West. Met bodemvormlengten die variëren van 50 m tot 150 m betekent dit een relatief grote bodemvormverplaatsing van minimaal 20% en maximaal 180% van de duinlengte binnen twee maanden. Dit is mogelijk te veel voor een nauwkeurige vaststelling van de echte verplaatsing. Immers, in de periode tussen de eerste en de tweede bodempeiling kan een serie bodemvormen 80% of 180% van de bodemvormlengte verschoven zijn. Een periode van twee maanden tussen twee peilingen is voor de Nieuwe Waterweg daarmee te lang voor een goede bepaling van alle verplaatsingssnelheden. Omdat in 2007 maandelijks is gepeild worden deze waarden weliswaar betrouwbaarder geacht, maar eigenlijk is een verificatie van verplaatsingssnelheden nodig, met een aantal wekelijkse bodempeilingen van een klein proeftraject die zijn weergegeven op een fijn bodemgrid.



**Figuur 5.9** Verplaatsingssnelheid van bodemvormen

De dwarsvariatie in de geschatte verplaatsingssnelheid is vergelijkbaar voor de verschillende jaren (grafiek rechtsboven van Fig.5.9). Een gelijk teken tussen bodemdwaarsverhang en de dwarsvariatie in verplaatsingssnelheid (grafiek linksonder van Fig.5.9) betekent een maximale verplaatsingssnelheid in de binnenbocht. Het lijkt er op dat verplaatsingssnelheid met enige naijling (circa 1 km) bij het bodemdwaarsverhang groeit in de binnenbochten. Dit is tegengesteld met de trend in duinhoogten, zodat de dwarsvariatie in bodemvormtransport (grafiek rechtsonder van Fig.5.9) uiteindelijk wat wordt onderdrukt.

Tenslotte is in Fig.5.10 de correlatie tussen bodemdwaarsverhang, verplaatsings-snelheid en bodemvormtransport weergegeven. Vanwege de naijling in verplaatsingssnelheid is er geen eenduidige relatie met het bodemdwaarsverhang. Omdat de duinhoogte sterker varieert met het bodemdwaarsverhang, laat het bodemtransport wel een trend zien; het grootste bodemvormtransport lijkt door de buitenbochten plaats te vinden.



**Figuur 5.10** Verplaatsingssnelheid en bodemvormtransport als functie van het bodemdwaarsverhang.

## 5.5 Conclusies

- In de laatste jaren is het westelijk deel van de vaargeul in de Nieuwe Waterweg verdiept. Bodemliggingen binnen de vaargeul zijn echter te beperkt voor een systeembeschrijving van de gehele Nieuwe Waterweg. Een jaarlijkse bodempeiling van het oppervlak buiten de vaargeul is essentieel voor het verwerven van systeemkennis.
- Duinhoogten zijn maximaal in de diepe buitenbochten. De grootte hiervan bedraagt ongeveer 2 tot 6 % van de waterdiepte. De duinhoogten in de vaargeul van de Nieuwe Waterweg zijn daarmee relatief klein.
- De duinlengte varieert van 50 m tot 350 m. Op het traject van km 1021-1024 komt de duinlengte overeen met 5 maal de waterdiepte, maar daarbuiten is de duinlengte groot en dus de bodemligging in de vaargeul van de Nieuwe Waterweg zeer vlak.
- In de beschouwde bodempeilingen neemt tussen km 1018 en 1025 het aandeel van zeewaarts gericht bodemvormen in de vaargeul langzaam af. De richting van de duinkammen kan daarbij ongeveer 60 graden afwijken van de richting van de vaargeulas. Om de gemiddelde richting van bodemvormen te kunnen bepalen zijn meer bodempeilingen nodig.
- De verplaatsingssnelheid neemt zeewaarts af van circa 1,5 m/dag naar 0,5 m/dag (van 0,5 naar 0,2 km/jaar). Maandelijks peilingen lijken voldoende voor het monitoren hiervan, maar een verificatie met wekelijkse peilingen is nodig om dit te kunnen concluderen

- 
- De verplaatsingssnelheid is afwisselend maximaal in binnen- en buitenbocht. Om de invloed van getij op de richting van bodenvormtransport beter te kunnen begrijpen zijn meer overlappende peilingen in een klein proeftraject nodig.

---

## Hoofdstuk 6 Bodemparameters van de Dordtsche Kil

### 6.1 Achtergrond

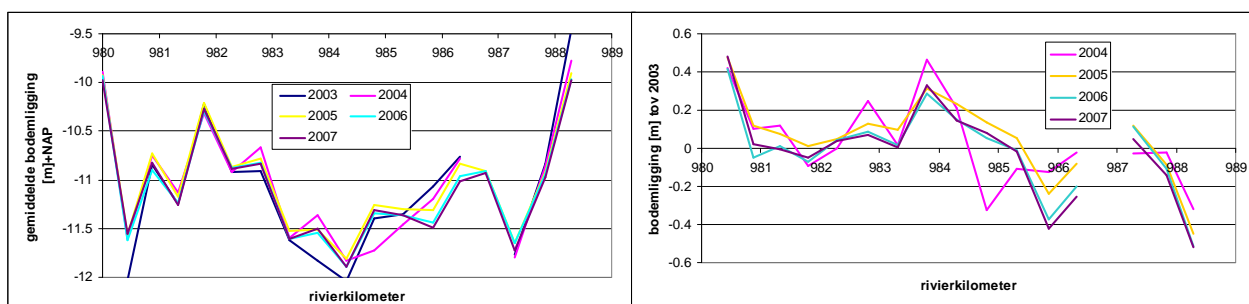
Van de Dordtsche Kil zijn de bodempeilingen beschouwd die zijn weergegeven in Tabel 6.1. Vanwege de relatief korte perioden tussen de peilingen zijn bovendien uit combinaties bodemveranderingen bepaald om verplaatsingsnelheden te kunnen schatten.

referentie bodempeiling	vergeleken met	Interval [dg]	referentie bodempeiling	vergeleken met	Interval [dg]
Februari 2003	Juni 2003	120	Maart 2006	April 2006	30
Juni 2003	September 2003	90	April 2006	Mei 2006	30
September 2003	Januari 2004	120	Mei 2006	Juni 2006	30
Januari 2004	Februari 2004	30	Juni 2006	Augustus 2006	60
Februari 2004	Juli 2004	150	Augustus 2006	September 2006	30
Juli 2004	September 2004	45	September 2006	Oktober 2006	30
September 2004	April 2005	210	Oktober 2006	November 2006	30
April 2005	Mei 2005	30	November 2006	Januari 2006	30
Mei 2005	Juli 2005	60	Januari 2006	Februari 2006	30
Juli 2005	September 2005	60	Februari 2006	Maart 2006	30
September 2005	Oktober 2005	30	Februari 2007	Maart 2007	30
Oktober 2005	November 2005	30	Maart 2007	April 2007	30
November 2005	December 2005	30	April 2007	Mei 2007	30
December 2005	Januari 2006	30	Mei 2007	Juni 2007	30
			Juni 2007	Juli 2007	30
			Juli 2007	Augustus 2007	30
			Augustus 2007	September 2007	30

Tabel 6.1 Overzicht gebruikte bodempeilingen.

### 6.2 Profielgemiddelde bodemparameters

Om een indruk te krijgen van de ruimtelijke variatie zijn de profielgemiddelde bodemparameters gemiddeld per jaar weergegeven in de volgende figuren. Uit de bodemligging (linkergrafiek van Fig.6.1) zijn de twee vaste punten herkenbaar; de Kiltunnel bij km 982-983 en de HSL tunnel bij km 986-987.

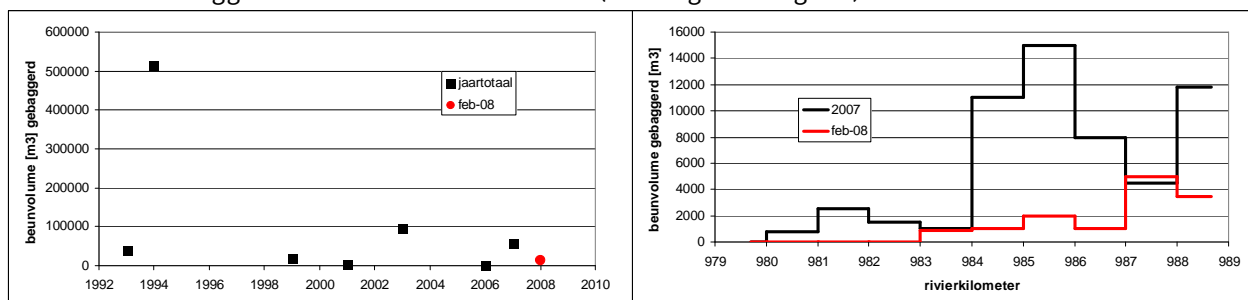


Figuur 6.1 Jaargemiddelde bodemliggingen in de Dordtsche Kil.

Uit de bodemveranderingen sinds 2003 (rechtergrafiek Fig.6.1) is te zien dat tussen 2003 en 2004 de bodemligging tussen km 982 en km 984 is gestegen, terwijl op het traject ten zuiden daarvan (km 985- km 986) de bodem is gedaald. In 2003 is de onderhoudsbodemligging verlaagd naar NAP-9.4 m, en dit ging gepaard met een toename in baggerwerk (linkergrafiek van Fig.6.2). Het is daarom waarschijnlijk dat de bodemveranderingen in de rechtergrafiek van Fig.6.1 zijn veroorzaakt door sediment van de ondiepe delen in het diepere traject van km 982,5-984,5 te storten.

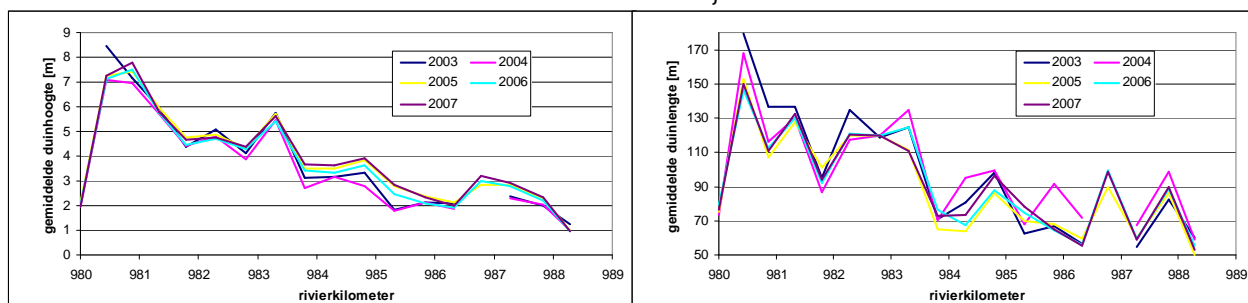
Tussen 2005 en 2004 lijkt er sprake van bodemherstel; de verhoogde bodem tussen km 982,5 en km 984,5 daalt weer. Bovendien wordt de verlaagde bodem tussen km 984,5 en km 985,5 weer opgevuld. Vermoedelijk is dit laatste grotendeels het gevolg van het storten van baggerspecie uit de sleuf van de HSL-tunnel. De aanleg van de HSL-tunnel gaat ook gepaard met een lokale bodemverlaging ten noorden van de tunnel (km 986) en een lokale bodemverhoging ten zuiden van de tunnel (km 987). Na 2005 zijn de bodemveranderingen minder groot, maar zet de trend van bodemherstel zich voort. Het in 2003 opgestorte deel tussen km 982,5 en km 984,5 erodeert. De lokale ontgroning ten noorden van de HSL-tunnel blijft voortgaan, en het stortmateriaal ten zuiden van de HSL tunnel erodeert.

In Fig.6.2 zijn de gebaggerde beunvolumen weergegeven. Behalve de extra inspanning in 2003 voor verlaging van de onderhoudsbodemligging (linkergrafiek Fig.6.2) blijkt hieruit ook het onderhoudsbaggerwerk ten zuiden van km 984 (rechtergrafiek Fig.6.2).



**Figuur 6.2** Overzicht baggergegevens Dordtsche Kil.

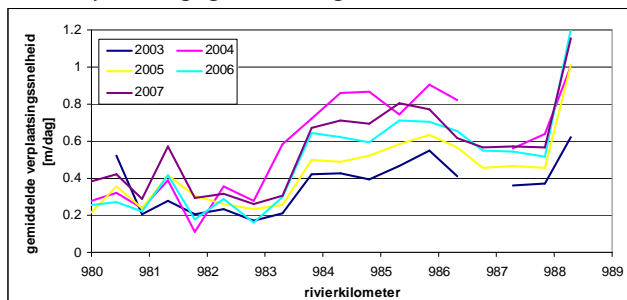
Het breedte-gemiddelde verloop in duinhoogte en duinlengte is weergegeven in Fig.6.4. Zoals beschreven in RIZA memo 2007-015 is de grote amplitude in het noordelijk deel niet te wijten aan alluviale, verplaatsende bodemvormen maar aan diepe, plaatsvast zandputten. Met uitzondering van de bodemgradiënten bij de HSL-tunnel zijn in het zuidelijk deel de bodemvormen wel grotendeels toe te schrijven aan alluviale bodemvormen. De duinhoogte hiervan is ongeveer 20% van de waterdiepte (RIZA memo 2007-015). Het verloop in bodemvormlengte geeft aan dat in het zuidelijk deel van de Dordtsche Kil de bodem minder vlak is dan in het noordelijk deel.



**Figuur 6.3** Gemiddelde hoogte en lengte van bodemvormen.



Behalve de afmetingen van de bodemvormen leveren de bodempeilingen uit Tabel 6.1 informatie over verplaatsingsnelheden. Deze zijn weergegeven in Fig.6.4.

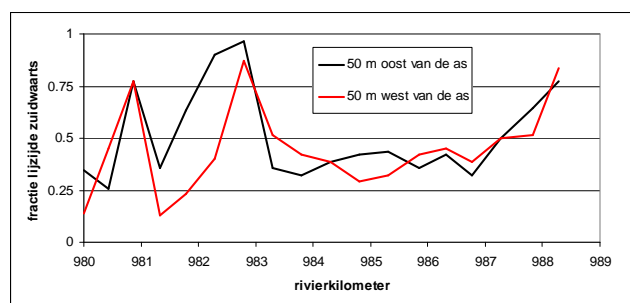


Figuur 6.4 Verplaatsingsnelheid bodemvormen.

Uit Fig.6.4 blijkt dat in het zuidelijk deel van de Dordtsche Kil de verplaatsingsnelheden een factor 3 á 4 groter zijn dan in het noordelijk deel. Dit is een indicatie dat in het zuidelijk deel de morfodynamiek aanzienlijk groter is. Opgemerkt wordt dat de waarden uit Fig.6.4 niet gecorrigeerd zijn voor bijdragen van plaatsvaste bodemvormen (Sectie 2.8). Dit betekent dat individuele verplaatsende bodemvormen een grotere verplaatsingsnelheid kennen dan de waarden uit Fig.6.4.

Uit Fig.6.3 en 6.4 blijkt een onderscheid in morfodynamiek in het traject ten noorden en ten zuiden van km 984. Dit verschil in morfodynamisch karakter is een aanduiding dat het bodemmateriaal in beide trajecten sterk afwijkt. In het zuidelijk deel is sprake van een goed gemengde mobiele zandbodem, terwijl in het noordelijk deel sprake lijkt te zijn van een vaste, hier en daar met diepe putten (zandopduikingen) onderbroken kleilaag op fijner sediment<sup>3</sup>. Als de bodemligging van de Dordtsche Kil op de langere termijn blijft dalen kan dit verschil in morfodynamiek verder toenemen.

Een indicatie van de verplaatsingsrichting van bodemvormen kan worden gegeven door te bepalen of de steile lizijde van de bodemvormen noord- of zuidwaarts is gericht. Voor de set van beschouwde bodempeilingen is in het zuidelijk deel (km 984-988) het relatieve aandeel dat zuidwaarts is gericht het kleinst (Fig.6.5). In dit traject is in de meeste gevallen het sedimenttransport dus noordwaarts gericht. Vanwege het afwijkende morfodynamisch karakter is zonder onderscheid van plaatsvaste en verplaatsende bodemvormen (Sectie 2.8) deze interpretatie minder geschikt voor het noordelijk traject. Immers, ook de plaatsvaste bodemvormen (zandputten en ontgrondingskuilen) dragen bij aan de trend in Fig.6.5, terwijl deze geen indicatie zijn van de richting van het sedimenttransport.

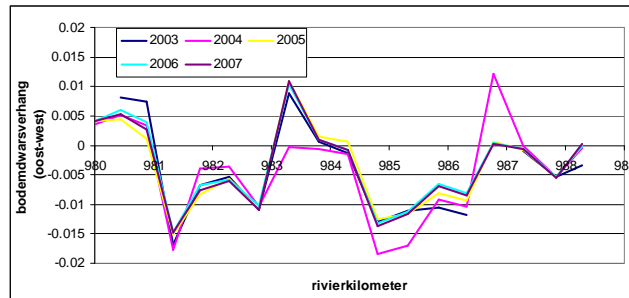


Figuur 6.5 Aandeel van bodemvormen die zuidwaarts lijken te verplaatsen.

<sup>3</sup> Een nadere analyse van bodempeilingen uit het voorjaar en najaar van 2007 geeft aan dat bij de diepe putten (zandopduikingen) de randen van de harde laag langzaam afbrokkelen (circa 3 m per jaar). Bodemvormstructuren in de diepe putten geven aan dat materiaal hieruit mobiel is.

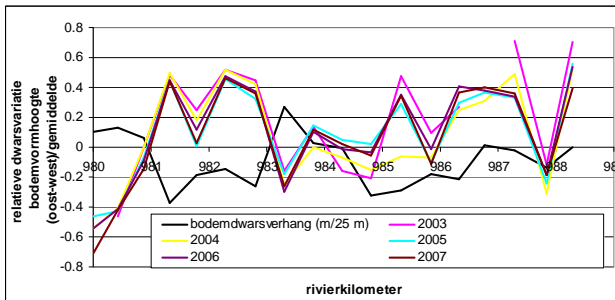
### 6.3 Dwarsvariatie in bodemparameters

Om een indruk te krijgen van de ruimtelijke structuur zijn in Fig.6.6; 6.7 en 6.8 de langsprofielen gegeven van het bodemdwaarsverhang, de dwarsvariatie in bodemvormhoogte en in verplaatsings-snelheid. Het dwarsverhang is redelijk constant; de dwarsprofielen in de Dordtsche Kil herstellen binnen een jaar van de ingrepen uit 2004.

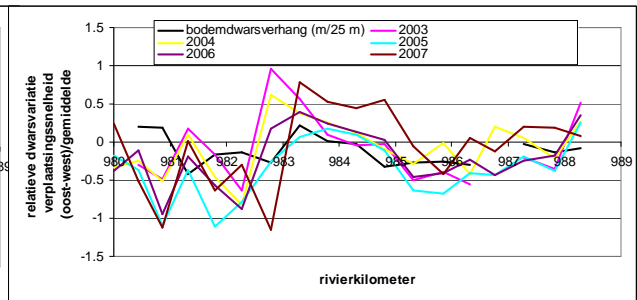


**Figuur 6.6** Langsprofiel van bodemdwaarsverhang.

De variatie van bodemvormhoogte en verplaatsingssnelheid in dwarsrichting is weergegeven in Fig.6.7. In Fig.6.7-a blijkt het teken van de variatie in bodemvormhoogte tegengesteld aan dat van het bodemdwaarsverhang. Dus, bodemvormhoogten in de Dordtsche Kil zijn maximaal in de buitenbochten. Ook hier geldt een relatief constant patroon door de jaren heen.

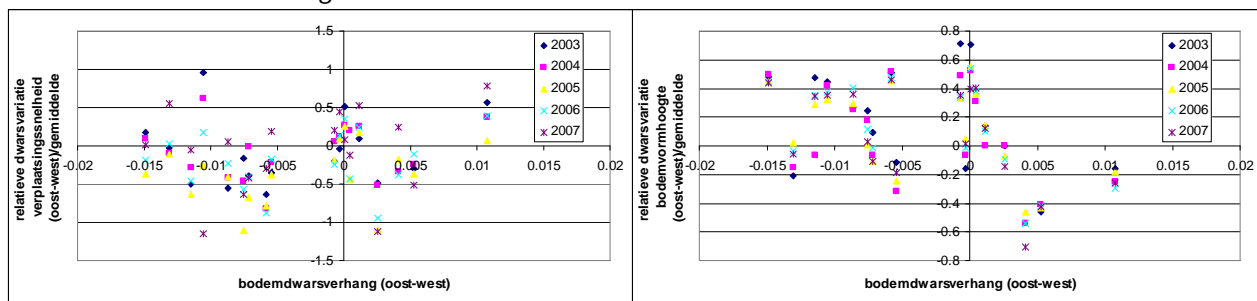


**Figuur 6.7-a** Langsprofiel van de variatie in bodemvormhoogte.



**Figuur 6.7-b** Langsprofiel van de variatie in verplaatsingssnelheid.

De variatie in verplaatsingssnelheid over het dwarsprofiel is weergegeven in Fig.6.7-b. Het teken van de variatie in verplaatsingssnelheid komt voor een aantal lokaties overeen met dat van het bodemdwaarsverhang, wat duidt op kleine trend van snellere verplaatsing in binnenbochten. Deze trend komt voor de verschillende jaren goed overeen. De bovenstaande trends zijn nog eens samengevat in Fig.6.8, waarin de variatie in dwarsrichting van verplaatsingssnelheid en bodemvormhoogte zijn uitgezet tegen het bodemdwaarsverhang.



**Figuur 6.8** Variatie in verplaatsingssnelheid en bodemvormhoogte over de breedte, als functie van het bodemdwaarsverhang.

---

## 6.4 Conclusies

In een gemiddelde bodemligging is de bijdrage van bodemvormen onderdrukt om langzame, kleinere veranderingen te kunnen analyseren. In de jaren 2003 en 2004 is de gemiddelde bodemligging in de Dordtsche Kil tussen km 982 en km 984 gestegen terwijl op het traject ten zuiden daarvan (km 985-km 986) de bodem is gedaald. Waarschijnlijk is dit veroorzaakt door bagger- en stortwerk voor het handhaven van de onderhoudsbodemligging op NAP-9.4 m. In de jaren daarna herstelt de bodemligging zich langzaam van de veranderingen in 2003 en 2004.

De meeste bodemvormen hebben de steile lizijde noordwaarts gericht. Dit duidt op een overwegend noordwaarts bodemvormtransport. Vanwege getij, en mogelijk ook scheepvaart, lijkt desondanks een diffuse component aanwezig in de morfodynamiek van de Dordtsche Kil. Hierdoor kunnen lokale bodemveranderingen zich ook zuidwaarts ontwikkelen. De ruimtelijke structuur in bodemvormen laat bovendien een groot verschil in morfodynamiek tussen het traject ten noorden van km 984 en het traject ten zuiden hiervan. In het zuidelijk deel zijn bodemvormen over de gehele rivierbodembodem goed ontwikkeld, terwijl in het noordelijk deel bodemveranderingen in grote delen minimaal zijn. Dit duidt op het voorkomen van harde (klei) lagen. Over deze harde lagen vindt bodemvormtransport plaats. Deze harde kleilagen zijn hier en daar door diepe putten worden onderbroken. In deze diepe putten is het bodemmateriaal mobiel.

---

---

## Hoofdstuk 7 Verplaatsingssnelheid van bodemvormen

### 7.1 Achtergrond

Door analyse van de groeiende voorraad multibeampeilingen in de grote rivieren groeit het inzicht in de morfodynamica van rivieren. Behalve relatief langzame *grootschalige* bodemveranderingen op trajectniveau en *kleinschaliger* aanpassingen van het dwarsprofiel zijn er lokale *bodemfluctuaties* te onderscheiden die op een veel kortere termijn (enkele weken) kunnen leiden tot snelle bodemveranderingen. Deze stroomafwaarts verplaatsende bodemfluctuaties worden geïnterpreteerd als bodemvormen met een quasi-periodiciteit en een min of meer eenduidige relatie met de lokale hydraulische en sedimentologische condities.

Het gedrag van bodemvormen beïnvloedt in kritische rivierstukken de vaardiepte en dus ook de omvang van het onderhoudsbaggerwerk. Een goede beschrijving of voorspelling van het dynamische gedrag van bodemvormen in rivieren is echter op het moment van schrijven nog nauwelijks mogelijk. In dit hoofdstuk wordt met de beschikbare bodemvormgegevens een aanzet gegeven.

De gebruikte data voor het bepalen van bodemvormverplaatsingssnelheden zijn

1. twee-wekelijkse multibeampeilingen ("*beheerspeilingen*") van de vaargeul in Bovenrijn en Waal, gedurende de laagwaterseizoenen van 2002 en 2003 ("*Bodemparameters voor het BOS Baggeren*", RIZA werkdocument 2004.124x)
2. enkele wekelijkse detailpeilingen in de binnenbocht van Brakel (RIZA memo 2007-004, "*Eerste overzicht en analyse waarnemingen bord voor de kop*")
3. dagelijkse single-beampeilingen over een 10 km traject van de Midden-Waal, gedurende het hoogwater van 1997 ("*Bodemveranderingen tijdens het hoogwater, interpretatie van single-beam peilingen in de Midden-Waal*", RIZA werkdocument 2005.134x)
4. dagelijkse multibeampeilingen over een 3 km traject rondom het splitsingspunt van de Pannerdensch Kop tijdens het hoogwater van 1998 ("*Kleinschalige morfodynamica, waarom en hoe*", RIZA werkdocument 2003.xyz)
5. tweemaal daagse multi-beampeilingen over een 3 km traject rondom het splitsingspunt van de Merwedese, gedurende het hoogwater van 2004 ("*Analyse van bodempeilingen rondom het Merwede splitsingspunt*", RIZA werkdocument 2004.145x)
6. Maandelijks bodempeilingen Nieuwe Waterweg (Hoofdstuk 5)
7. Maandelijks bodempeilingen Dordtsche Kil (Hoofdstuk 6)

De methodiek voor het bepalen van verplaatsingssnelheden is beschreven in Sectie 2.7. Daarbij wordt opgemerkt dat in dit hoofdstuk geen correctie wordt toegepast voor de invloed van plaatsvast bodemvormen (Sectie 2.8). Dit leidt mogelijk tot een onderschatting van de verplaatsingssnelheid.

### 7.2 Hypothese verplaatsingssnelheid

De verplaatsingssnelheid van bodemvormen is een indicatie van de grootte van het bodemtransport en daarmee van de snelheid van bodemveranderingen. Via een morfologische tijdschaal kan deze waarde gebruikt worden om de morfodynamica van een rivierstuk inzichtelijk te maken en numerieke modellen beter af te regelen. De verplaatsingssnelheid is echter moeizaam te bepalen; het vergt een herhalingspeiling binnen een voldoende klein tijdsinterval. Om de verplaatsingssnelheid wat

eenvoudiger te kunnen voorspellen en om de ruimtelijke structuur van een rivierbodem beter te kunnen interpreteren wordt in deze sectie een *empirische* relatie gezocht tussen bodemvormafmetingen (amplitude en golflengte) en verplaatsingssnelheid. Als willekeurig uitgangspunt wordt hiervoor een hypothetische relatie gekozen van de vorm

$$\frac{w_{hi}}{w_r} = \left(\frac{H_i}{H_r}\right)^\alpha \left(\frac{L_i}{L_r}\right)^\beta \quad (7.1)$$

met  $w_{hi}$  [m/dag] de hypothetische verplaatsingssnelheid die wordt voorspeld als functie van de actuele duinhoogte  $H_i$  [m] en de actuele bodemvormlengte  $L_i$  [m]. Deze variabelen worden geschaald met de referentiewaarden  $w_r$  [m/dag],  $H_r$  [m] en  $L_r$  [m].

De coëfficiënten  $\alpha$  en  $\beta$  uit Verg.7.1 zijn onbekend, en zullen voor de tweewekelijkse beheerspeilingen van de Waal (2002-2003) worden geschat met behulp van de kleinste-kwadraten-methode (RIZA, 2004b). Om dit met de waarnemingen te kunnen doen worden de variabelen dimensieloos gemaakt met

$$W_{hi} = \ln\left(\frac{w_{hi}}{w_r}\right); W_i = \ln\left(\frac{w_i}{w_r}\right); h_i = \ln\left(\frac{H_i}{H_r}\right) \text{ en } l_i = \ln\left(\frac{L_i}{L_r}\right) \quad (7.2-a)$$

De referentiewaarden zijn per eenduidige dataset (rivierstuk) gedefinieerd als

$$w_r = e^{\ln w_i}; H_r = e^{\ln H_i} \text{ en } L_r = e^{\ln L_i} \quad (7.2-b)$$

Veronderstel dat de fout tussen een voorspelde waarde  $w_{hi}$  en de waarneming  $w_i$  wordt gedefinieerd als  $\varepsilon_i = W_i - W_{hi}$ , zodat de standaardafwijking tussen de hypothetische en gemeten snelheid dan is te schrijven als  $\overline{\varepsilon_i^2} = \overline{(W_i - \alpha h_i - \beta l_i)^2} = \overline{W_i^2} - 2\alpha \overline{W_i h_i} - 2\beta \overline{W_i l_i} + \alpha^2 \overline{h_i^2} + \beta^2 \overline{l_i^2} + 2\alpha\beta \overline{h_i l_i}$  (7.3)

Deze standaardafwijking is minimaal als wordt voldaan aan de volgende twee voorwaarden

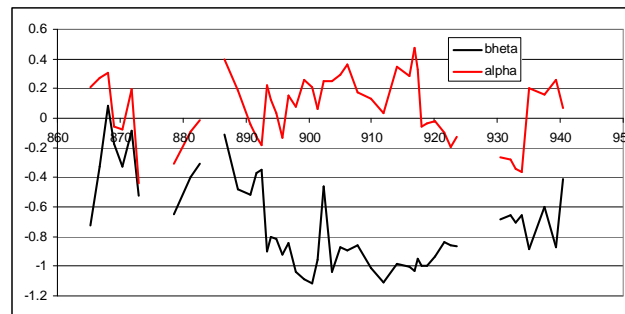
$$\frac{\partial \overline{\varepsilon_i^2}}{\partial \alpha} = -2\overline{W_i h_i} + 2\alpha \overline{h_i^2} + 2\beta \overline{h_i l_i} = 0 \quad (7.3-a)$$

$$\frac{\partial \overline{\varepsilon_i^2}}{\partial \beta} = -2\overline{W_i l_i} + 2\beta \overline{l_i^2} + 2\alpha \overline{h_i l_i} = 0 \quad (7.3-b)$$

Deze twee voorwaarden kunnen vervolgens tot expliciete uitdrukkingen voor de onbekenden  $\alpha$  en  $\beta$

$$\text{worden omgeschreven } \alpha = \frac{\overline{h_i l_i} \overline{W_i l_i} - \overline{l_i^2} \overline{W_i h_i}}{(\overline{h_i l_i})^2 - \overline{h_i^2} \overline{l_i^2}} \text{ en } \beta = \frac{\overline{h_i l_i} \overline{W_i h_i} - \overline{h_i^2} \overline{W_i l_i}}{(\overline{h_i l_i})^2 - \overline{h_i^2} \overline{l_i^2}} \quad (7.3-c)$$

Als deze uitdrukkingen worden toegepast op de beheerspeilingen in de vaargeul van de Waal (dataset 1), dan wordt een verloop voor  $\alpha$  en  $\beta$  verkregen volgens Fig.7.1.



Figuur 7.1 Langsprofiel van  $\alpha$  en  $\beta$  gefit op Waal-vaargeuldata uit 2002-2003.

---

Een pragmatische keuze op basis van Fig.7.1 is  $\alpha = 0$  en  $\beta = 1$ . Ofwel, met Verg.7.1 wordt gesteld dat

de verplaatsingssnelheid empirisch voorspeld kan worden met 
$$\frac{w}{w_r} = \left( \frac{L}{L_r} \right)^{-1} \quad (7.4)$$

Dit is een *hypothese* met een voorlopig karakter. Deze is slechts geldig totdat een voorspeller van de bodenvormverplaatsingssnelheid mogelijk is met een goede onderbouwing. In de volgende secties wordt voor een aantal rivierstukken de gemeten verplaatsingssnelheden vergeleken met empirische relatie van Verg.7.4.

### 7.3 Grootschalig gedrag vaargeul Waal 2002-2003

De beheerspeilingen in de vaargeul van de Waal (dataset nr 1 in Sectie 7.1) zijn om de twee weken uitgevoerd en op een 2,5m x 2,5m grid geprojecteerd. Van deze data is in RIZA (2004b) per deeloppevlak van 500m x 50 m de statistiek bepaald waarmee de representatieve bodenvormparameters zijn vastgesteld. Alleen de informatie uit deeloppevlakken 50 m links en rechts van de rivieras is gebruikt, om eventuele randeffecten vanuit de kribvakken zoveel mogelijk te beperken. Voor het vaststellen van de bodenvormparameters is in RIZA (2004b) een sinusvormig modelsignaal gebruikt in plaats van het meer realistisch driehoekig signaal uit Hoofdstuk 2. Omdat variabelen dimensieloos zijn gemaakt, wordt verondersteld dat dit verschil weinig invloed heeft op de verificatie van Verg.7.4.

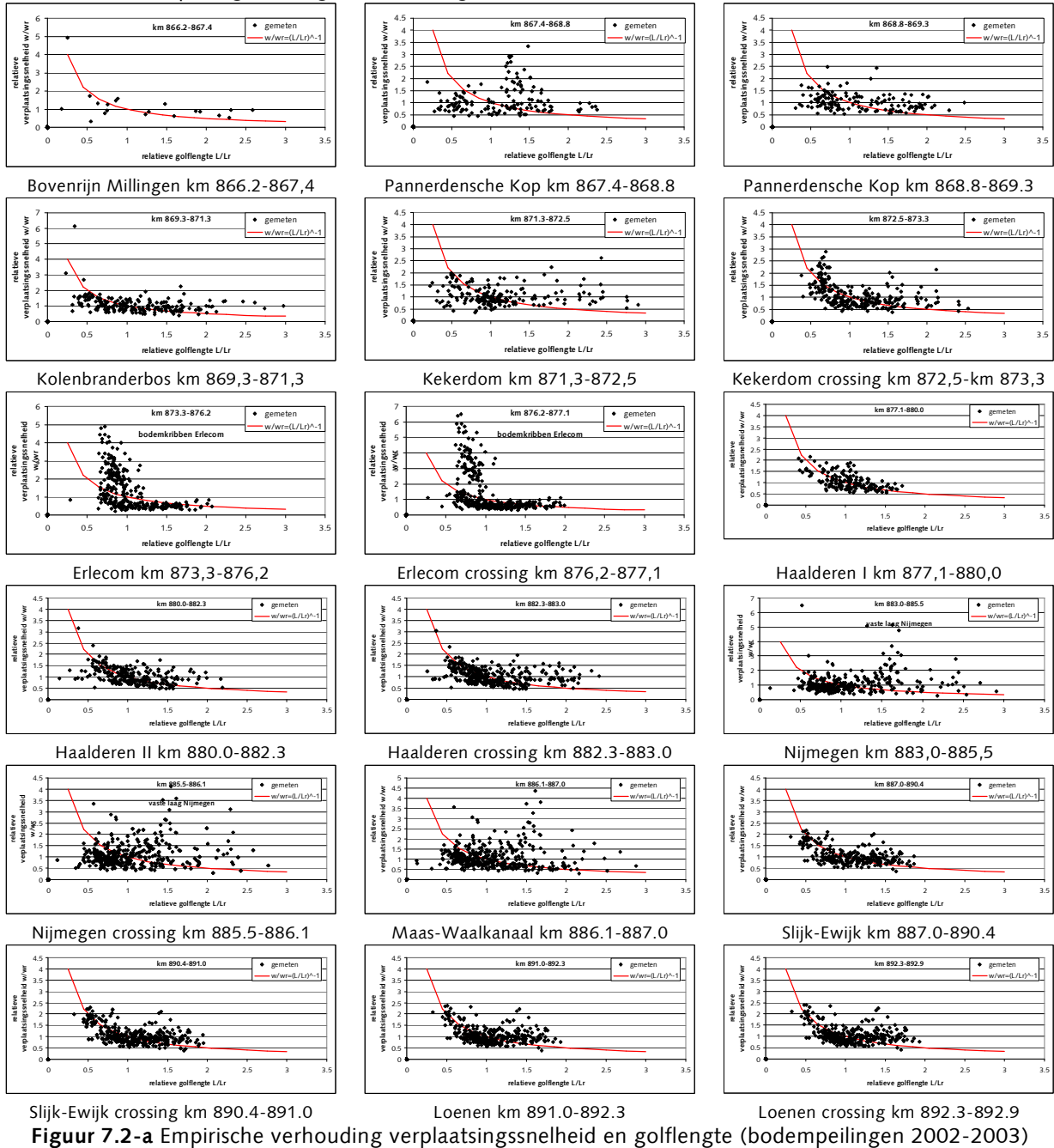
In de volgende figuren zijn bodemparameters van verschillende deeloppevlakken per morfologische eenheid (bocht of rechtstand van enkele km) gecombineerd, en vervolgens met dezelfde referentiewaarden genormaliseerd. Informatie links en rechts van de rivieras is hierdoor niet langer te onderscheiden.

Voor de Midden-Waal en Beneden-Waal geldt grofweg  $L_r=40$  m (zie ook Fig.3,5) en  $w_r=T_r/L_r=0,5$  m/dag (met  $T_r=20$  dagen, Tabel 4.3 RIZA, 2004b). Voor deze trajecten zijn bodenvormen uniform genoeg om met dezelfde referentiewaarde geschaald te kunnen worden. Echter, gezien de grotere spreiding in de waarnemingen voor de Bovenrijn en Bovenwaal, lijkt het er op dat vanwege een grotere zijdelingse sortering de schaling van bodenvormlengte en verplaatsingssnelheid in binnen- en buitenbocht kan afwijken.

In bochten met constructies (bodembodden Erlecom (km 872-875; vaste laag bij Nijmegen km 882-885, vaste laag bij St.Andries km 925-928) is zijn duidelijk twee typen bodenvormen herkenbaar.

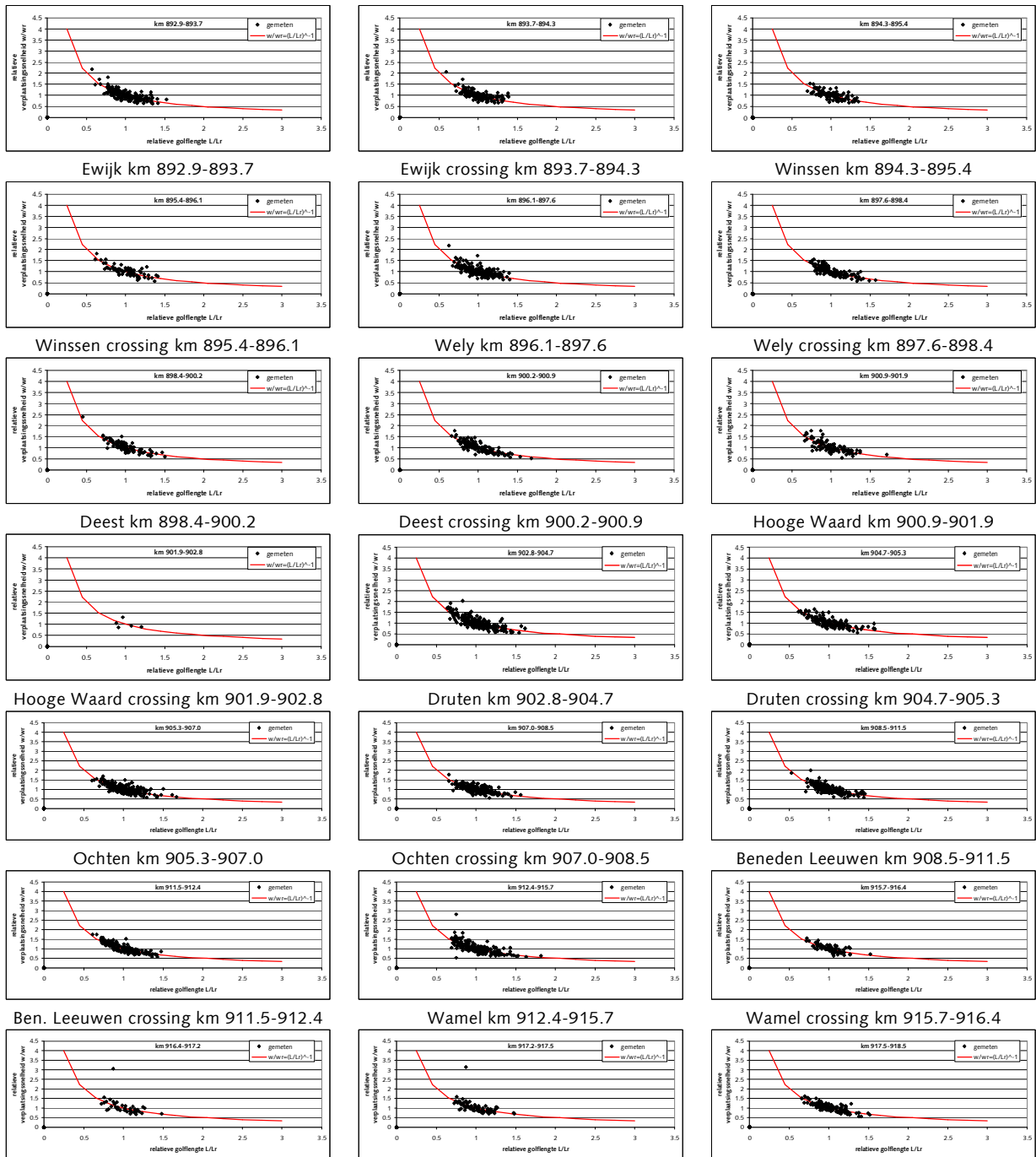
Ondanks de grote spreiding kan met Fig.7.2 worden gesteld dat de hypothetische lijn van Verg.7.4 inderdaad representatief is voor de gemiddelde trend van waargenomen verplaatsingssnelheden in de Waal. Aan Fig.7.2 en Fig.7.1 ligt dezelfde data ten grondslag, dus Fig.7.2 is slechts een illustratie en niet een verificatie van de hypothese.

Dataset 1, bodempelingen vaargeul Waal, laagwaterseizoen 2002-2003

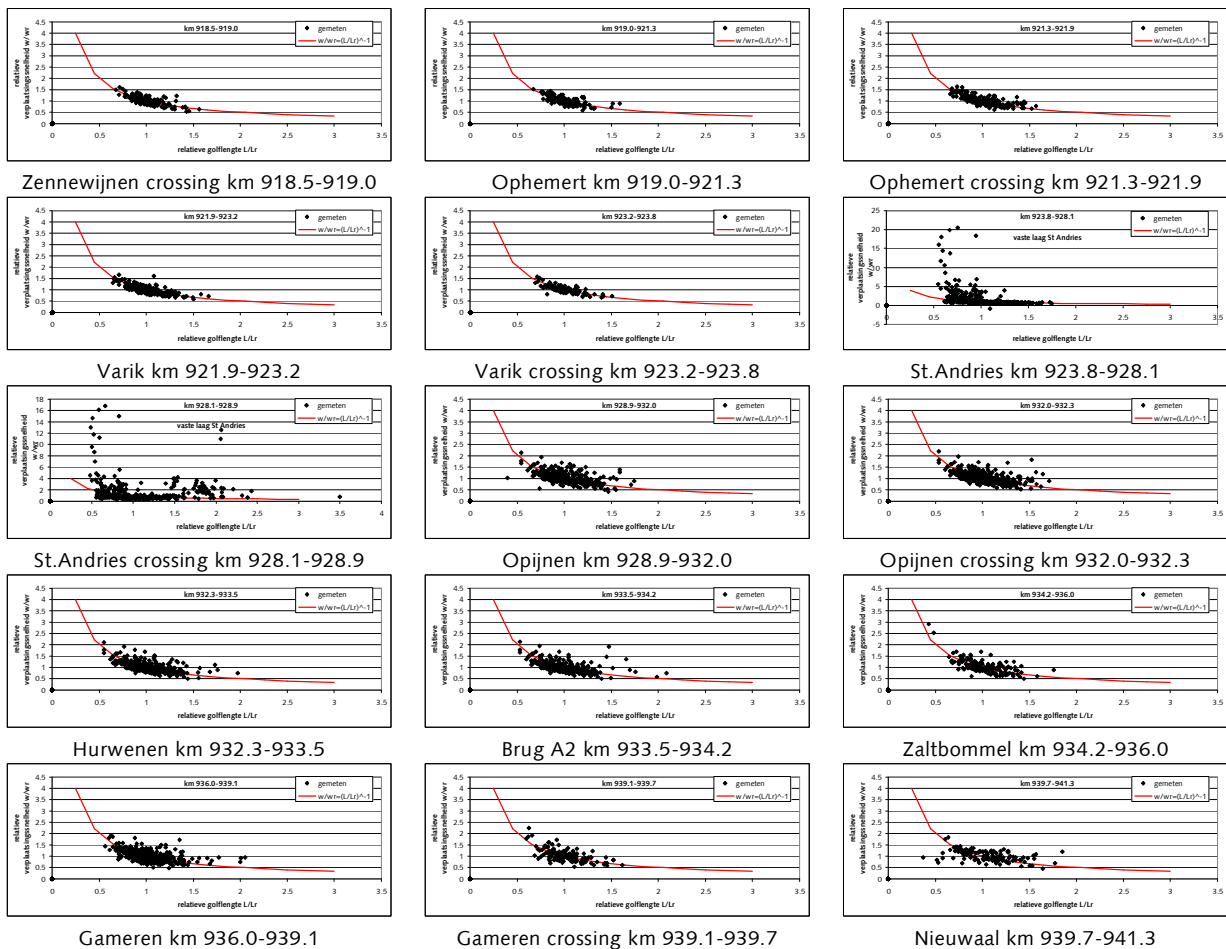


**Figuur 7.2-a** Empirische verhouding verplaatsingssnelheid en golflengte (bodempelingen 2002-2003)





Passewaay km 916.4-917.2      Passewaay crossing km 917.2-917.5      Zennewijnen km 917.5-918.5  
**Figuur 7.2-b** Empirische verhouding bodemvormen Waal (bodempelingen 2002-2003).



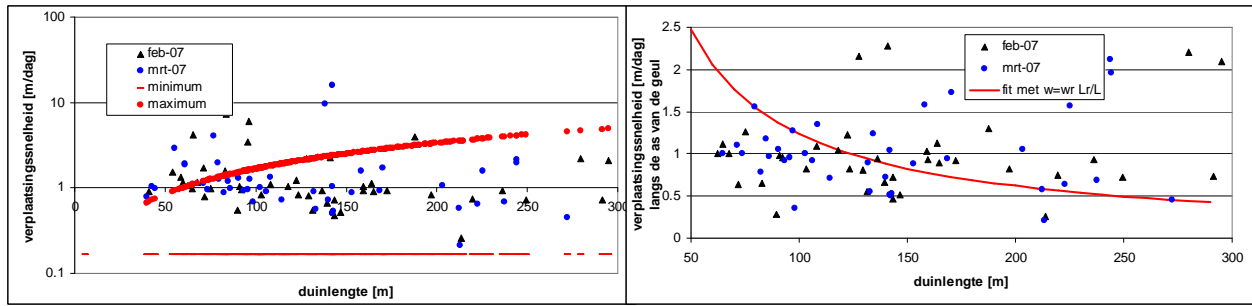
Gameren km 936.0-939.1 Gameren crossing km 939.1-939.7 Nieuwaal km 939.7-941.3  
**Figuur 7.2-c** Empirische verhouding bodemvormen Waal (bodempelingen 1999-2003).

## 7.4 Maandelijkse peilingen Nieuwe Waterweg

Om te beoordelen of de empirische relatie van Verg.7.4, die voor de MiddenWaal en BenedenWaal gemiddelde trends weergeeft ook voor andere rivierstukken voldoet worden hier verplaatsingsnelheden uit de Nieuwe Waterweg beschouwd. In 2007 zijn maandelijks enkele bodempelingen in de Nieuwe Waterweg uitgevoerd (Hoofdstuk 5). Uit de bodemveranderingen kunnen verplaatsingsnelheden worden geschat die zijn weergegeven in Fig.7.3. Het betreft alleen de waarnemingen in een 50 m zone rondom de as van de vaargeul, omdat hier de overlap tussen de verschillende peilingen maximaal is.

In Hoofdstuk 2 is met Verg.2.13-d een criterium geformuleerd voor realistische boven- en ondergrenzen van de geschatte verplaatsingsnelheden. Deze grenzen worden in de linkergrafiek van Fig.7.3 met rode symbolen aangegeven. De ondergrens, gebaseerd op de resolutie van het bodemgrind is niet beperkend voor deze dataset. De bovengrens geeft echter aan dat een aantal waarden te hoog zijn voor een goede schatting. Dit betekent dat de tussenliggende periode (30 dg) eigenlijk wat te lang is voor een goede bepaling van alle verplaatsingsnelheden. De overgebleven waarden laten in de rechtergrafiek van Fig.7.3 met grote spreiding een gemiddeld lagere verplaatsingsnelheid voor grotere duinlengten zien.

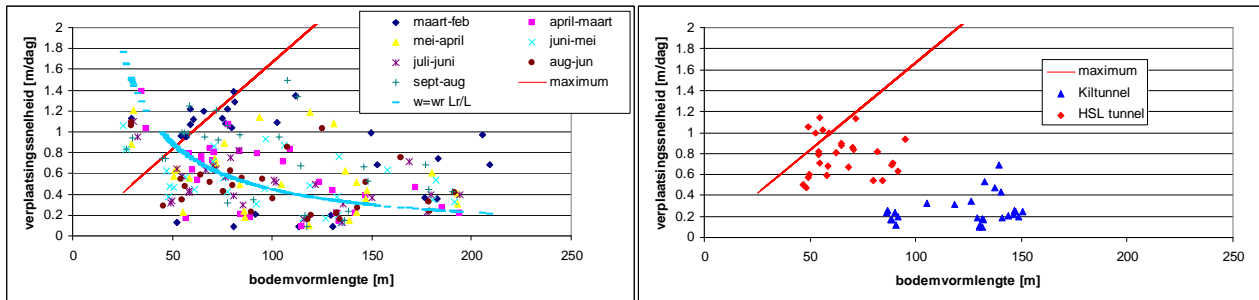
De hypothese van Verg.7.4 wordt in de rechtergrafiek van Fig.7.3 weergegeven met de rode lijn. Deze lijn is getrokken met de referentiewaarden  $w_r=0,89$  m/dag en  $L_r=139$  m.



**Figuur 7.3** Overzicht verplaatsingssnelheden voorjaar 2007 in de vaargeul van de Nieuwe Waterweg.

### 7.5 Maandelijkse peilingen Dordtsche Kil

Behalve in de Nieuwe Waterweg zijn in 2007 ook maandelijkse bodempeilingen in de Dordtsche Kil uitgevoerd (Hoofdstuk 6). De verplaatsingssnelheden langs de as van de rivier zijn weergegeven in de linkergrafiek van Fig.7.6. De rode lijn geeft de bovengrens van realistische waarden aan (Verg.2.13-d). Ook voor de Dordtsche Kil is voor een aantal lokaties een maand te lang om bodemvormen goed te kunnen volgen. In de linkergrafiek van Fig.7.4 is de hypothese van Verg.7.4 weergegeven met de blauwe lijn. De bijbehorende referentiewaarden zijn  $w_r=0,5$  m/dag en  $L_r=88,6$  m.



alluviale rivierbodem

ter plekke van tunnels

**Figuur 7.4** Verplaatsingssnelheden Dordtsche Kil.

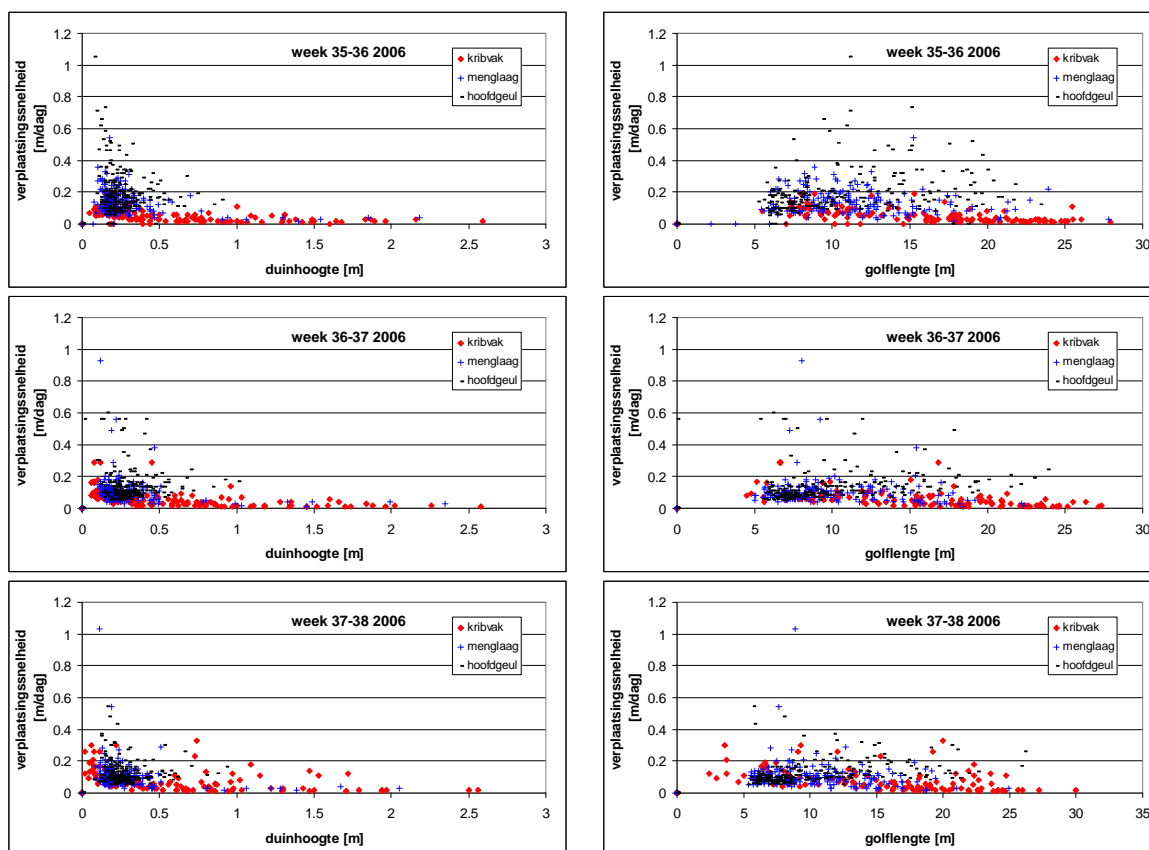
In de linkergrafiek zijn de gegevens ter plekke van de Kiltunnel en de HSL-tunnel weggelaten; deze zijn weergegeven in de rechtergrafiek. De bodemvormlengte wordt hier vooral bepaald door de plaatsvastе ontgrondingskuilen en zijn daarom niet representatief voor verplaatsende bodemvormen. Wel kan worden geconcludeerd dat ter plekke van de HSL-tunnel in het zuiden de verplaatsingssnelheden een factor vier groter zijn dan ter plekke van de Kiltunnel.

### 7.6 Detailmetingen binnenbocht Waal

De volgende dataset betreft een binnenbocht van de Waal, die net als de vorige datasets van de Waal, Nieuwe Waterweg en Dordtsche Kil is gepeild buiten het hoogwaterseizoen (dataset nr 2 uit Sectie 7.1). Deze dataset is echter gericht op kleinschalige processen. De peilingen in de binnenbocht bij Brakel omvatten een rivierstuk van bijna 1 km lengte (km 946-947). Voor het bepalen van de bodemvormparameters zijn de waarnemingen geprojecteerd op een regelmatig 1m x1m grid. Van deze vergride waarnemingen is vervolgens per 20m x 20m deeloppervlak de bodemstatistiek bepaald. Deze bodemstatistiek is vervolgens met de methodiek van Hoofdstuk 2 gebruikt om karakteristieke

bodemvormafmetingen te berekenen. Meer informatie over de bodempeilingen is te vinden in RIZA memo 2007-004.

De absolute waarden van verplaatsingssnelheid, duinhoogte en bodemvormlengte zijn weergegeven in Fig.7.5. Uit de grootte van de bodemvormlengte blijkt onder andere dat met een hogere dataresolutie kleinere bodemvormen kunnen bepaald dan met grootschaliger analyses (Sectie 7.2). De waarnemingen uit het kribvak, de hoofdgeul en de overgangszone hiertussen ("menglaag" 60 m vanaf de normaallijn) zijn afzonderlijk weergegeven. De verplaatsingssnelheden zijn het kleinst in het kribvak, en in de overgangszone van vergelijkbare grootte als aan de rand van de hoofdgeul.



**Figuur 7.5** Overzicht verplaatsingssnelheden binnenbocht Waal (Brakel, km 942).

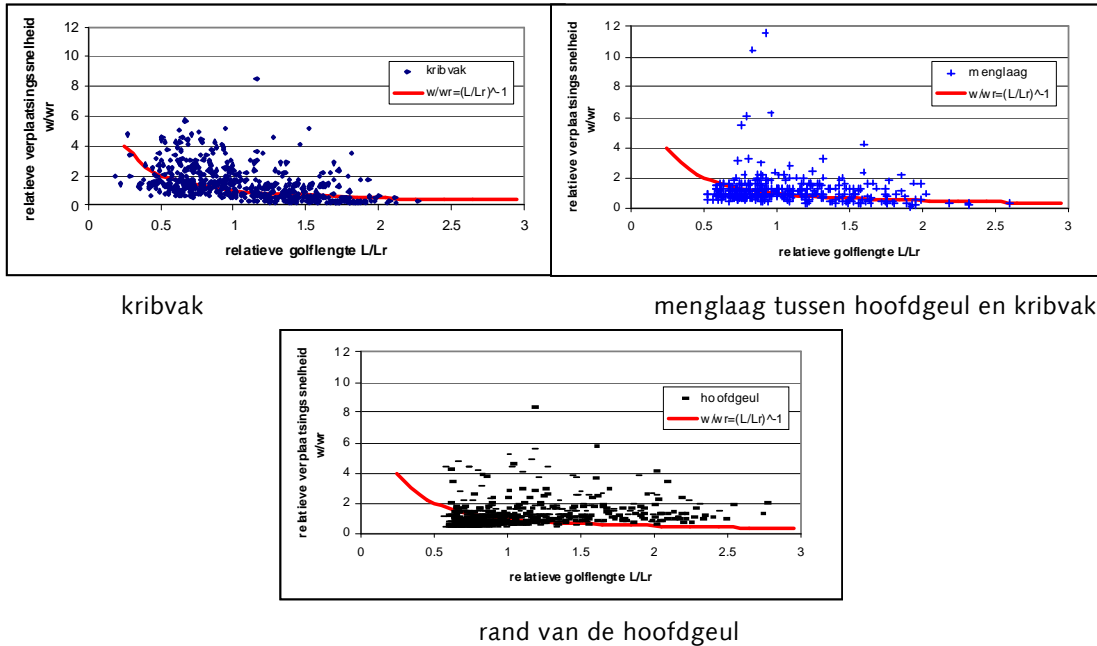
De dimensieloze (genormaliseerde) waarnemingen staan met het hypothetisch verloop weergegeven in Fig.7.6. De gebruikte referentie waarden zijn vermeld in Tabel 7.1

	verplaatsingssnelheid $w_r$ [m/dag]	bodemvormlengte [m]
rand van de hoofdgeul	0,13	9,5
menglaag tussen hoofdgeul en kribvak	0,09	9,6
kribvak	0,06	13,2

**Tabel 7.1** Gebruikte referentiewaarden binnenbocht Brakel.

Uit de grootte van de referentiewaarden blijkt de verplaatsingssnelheid in het kribvak grofweg 46% te zijn van de verplaatsingssnelheid in de hoofdgeul. In de overgangszone ("menglaag") bedraagt de verplaatsingssnelheid circa 69% van de verplaatsingssnelheid aan de rand van de hoofdgeul.

Met veel spreiding volgt de hypothetische relatie van Verg.7.4 ook de gemiddelde trend in deze kleinschaliger bodemvormen.

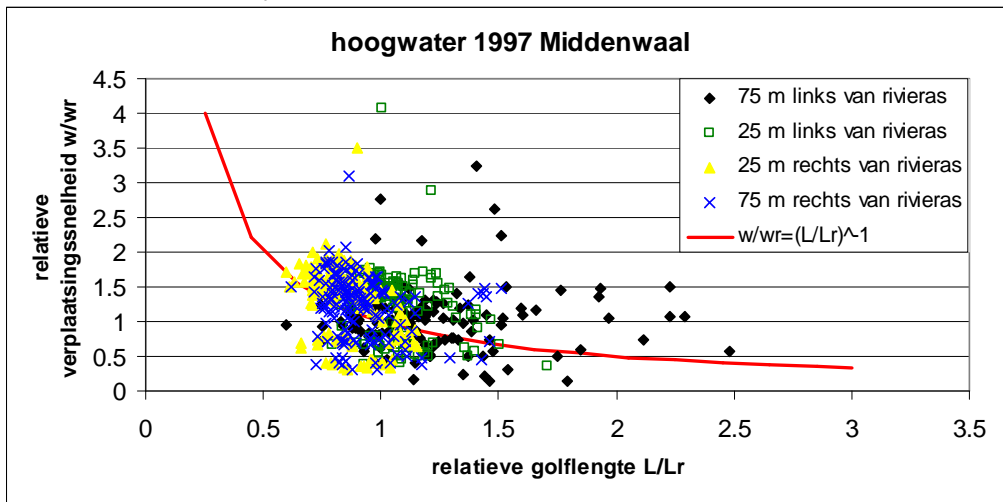


Figuur 7.6 Verplaatsingssnelheid binnenbocht bij Brakel.

## 7.7 Hoogwatergegevens Bovenrijn, Waal en Merwedde

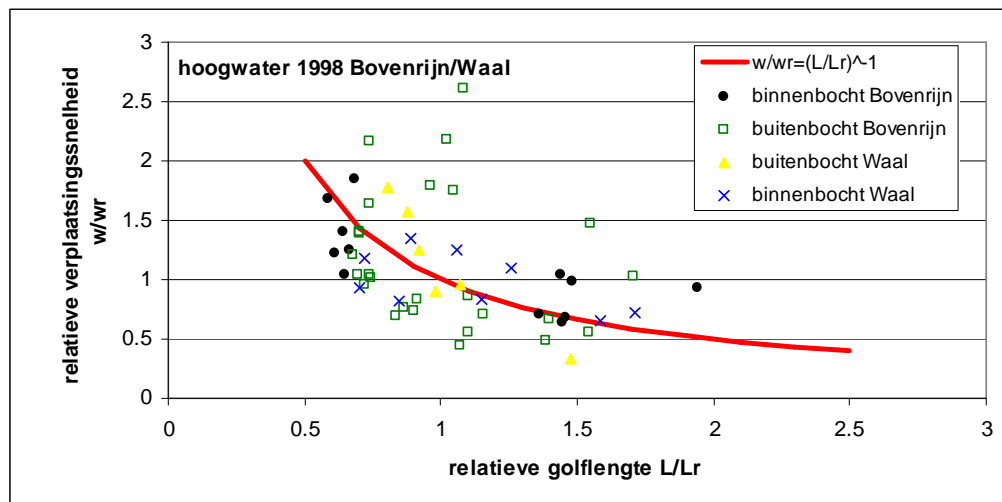
Voor het analyseren van bodemvormen tijdens hoogwater zijn voor dit rapport drie datasets beschikbaar. De eerste dataset bestaat uit single-beampeilingen in een aantal langsvaarten van het Middenwaal traject km 900-910 (dataset nr 3 uit Sectie 7.1). De peilingen zijn gedurende het hoogwater uitgevoerd, op vier dagen tijdens de was, twee dagen met piekafvoer en op vijf dagen bij de val. Om voldoende ruimtelijke dekking te krijgen zijn door middel van een onregelmatig driehoeksnet vanuit de min of meer evenwijdige single-beam langsvaarten extra punten geïnterpoleerd op een grid van 2m x 2m. Van deze bodemdata is voor elk bodemoppervlak van 500m x 500m de statistiek bepaald. Met behulp van een sinusvormig modelsignaal zijn vervolgens voor elk bodemoppervlak de karakteristieke bodemvormafmetingen berekend (RIZA, 2005).

In Fig.7.7 zijn voor vier langraaien de resultaten weergegeven, met referentiewaarden  $w_r=4,89$  m/dag en  $L_r=67$  m. De rode lijn is de hypothese van Verg.7.4. Er is weliswaar geen tegenspraak tussen de rode lijn en de gemiddelde trend van metingen, maar de waarnemingen zijn in de presentatie van Fig.7.7 echter uniform om de voorspelde variatie goed te kunnen verifiëren.



Figuur 7.7 Verplaatsingssnelheden hoogwater 1997 in de Middenwaal.

De tweede dataset van een hoogwater betreft de dagelijkse bodempeilingen rondom de Pannerden-  
sche Kop tijdens het hoogwater van 1998 (dataset nr 4 in Sectie 7.1). Deze multibeampeilingen zijn  
geprojecteerd naar een 1m x1m grid. De bodemvormparameters zijn uiteindelijk per deeloppervlak van  
500m x 50m bepaald (RIZA, 2003). Alleen voor de meest gevulde deeloppervlakken zijn de gegevens  
weergegeven in Fig.7.8. De hypothese van Verg.7.4 komt overeen met de gemiddelde trend. Het  
verschil in referentiewaarden tussen Waal en Bovenrijn (Tabel 7.2) geeft het verschil in morfodynamica  
van beide takken weer.



Figuur 7.8 Verplaatsingssnelheden hoogwater 1998 in Bovenrijn en Waal.

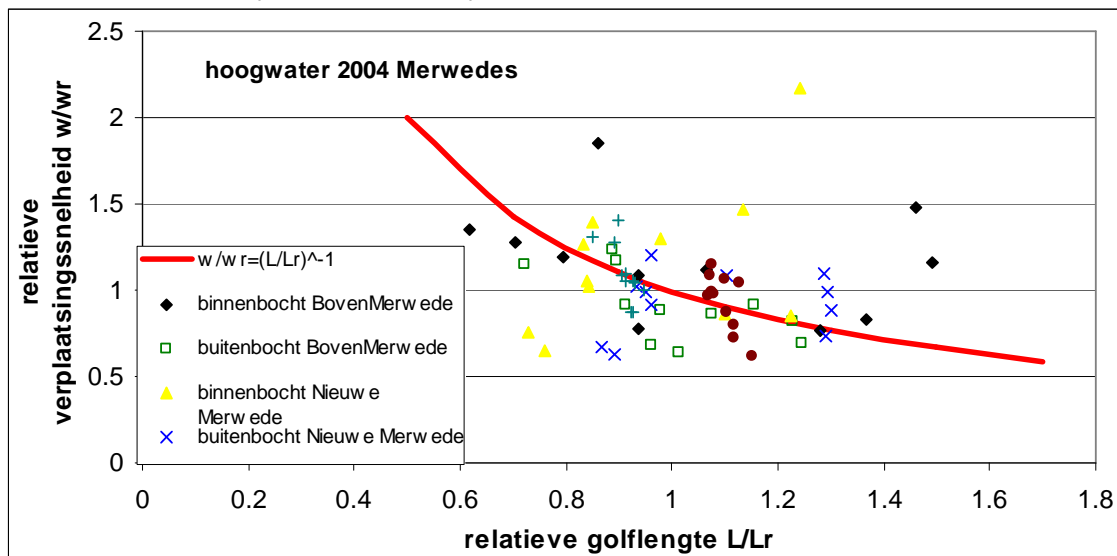
	verplaatsingssnelheid [m/dag]	bodemvormlengte [m]	duinhoogte [m]
Bovenrijn	34	55	0,85
Waal	41	86	0,82

Tabel 7.2 Referentiewaarden hoogwater 1998 in Bovenrijn en Waal.

Voor de referentiewaarden, die het zwaartepunt van de waarnemingen karakteriseren, kan worden gesteld dat de verplaatsing tussen twee peilingen overeenkomt met de halve bodemvormlengte. Dit betekent dat grofweg de helft van de waarnemingen een dagelijkse peiling onvoldoende is voor een betrouwbare bepaling van de verplaatsingsnelheid.

Tijdens dit hoogwater is ook gemeten in de Middenwaal bij km 909-910. Deze waarden zijn hier niet gerapporteerd. De trend in deze dataset is eveneens een lagere verplaatsingsnelheid voor grotere bodemvormlengten, met referentiewaarden die vergelijkbaar zijn met de waarden van Fig.7.7.

De derde beschikbare dataset betreft bodempeilingen bij het splitsingspunt van de Merwedetijdens het hoogwater van 2004 (dataset nr 5 in Sectie 7.1). De gebruikte bodempeilingen zijn opnieuw geprojecteerd op een regelmatig 1m x1m grid, en de bodemvormparameters zijn bepaald voor een deelopervlak van 500m x 50m (RIZA, 2004c). De genormaliseerde waarnemingen zijn in Fig.7.11 vergeleken met het hypothetische verloop.



**Figuur 7.9** Verplaatsingsnelheden hoogwater 2004 rondom splitsingspunt het Oude Wiel (Bovenmerwede, Benedenmerwede en Nieuwe Merwede).

De referentiewaarden voor Fig.7.9 zijn weergegeven in Tabel 7.3. Het verschil in referentiewaarden kan duiden op een verschil in morfodynamisch gedrag van de verschillende takken. Het aantal waarnemingen is echter te beperkt om dit definitief te concluderen.

	Verplaatsingsnelheid [m/dag]	Golflengte [m]	Duinhoogte [m]
BovenMerwede	1,16	63	0,37
BenedenMerwede	0,68	95	0,92
Nieuwe Merwede	0,78	97	0,70

**Tabel 7.3** Referentiewaarden hoogwater 2004 in de Merwedetijdens.

## 7.8 Toepassing model verplaatsingssnelheid

Met de beschikbare gegevens en de toegepaste methodiek wordt in de voorgaande secties geconcludeerd dat de verplaatsingssnelheid van bodemvormen over het algemeen afneemt voor grotere golf lengten. De spreiding in de waarnemingen laten verschillende formuleringen toe, maar pragmatisch wordt Verg.7.4 als *voorlopig* uitgangspunt gebruikt.

Bodemtransport  $s$  [ $\text{m}^2/\text{dag}$ ] per eenheid van breedte wordt in bijvoorbeeld Jansen *et al.* (1979) gedefinieerd als  $s = \gamma(1-p)w_r H$  (7.5)

met  $\gamma$  [-] een coëfficiënt  $\gamma$  die in Jansen *et al.* (1979) wordt geschat op  $\gamma \approx 0,7$  en met  $p$  [-] de porositeit van de rivierbodem ( $p \approx 0,4$ ). In combinatie met de empirische relatie van Verg.7.4 leidt het bodemvormtransportmodel van Verg.7.5 tot

$$s = \gamma(1-p)w_r L_r \frac{H}{L} \quad (7.6)$$

De verhouding  $H/L$  is daarmee een maat voor het bodemvormtransport geworden. Om te onderzoeken of Verg.7.6 en de transportvoorspeller van bijvoorbeeld Meyer-Peter en Müller (1948) gelijkvormig zijn wordt met  $\gamma=0,7$ ;  $p=0,4$ ;  $w_r=0,5$  m/dag en  $L_r=40$  m (Fig.3.5) het bodemtransport voorspeld met

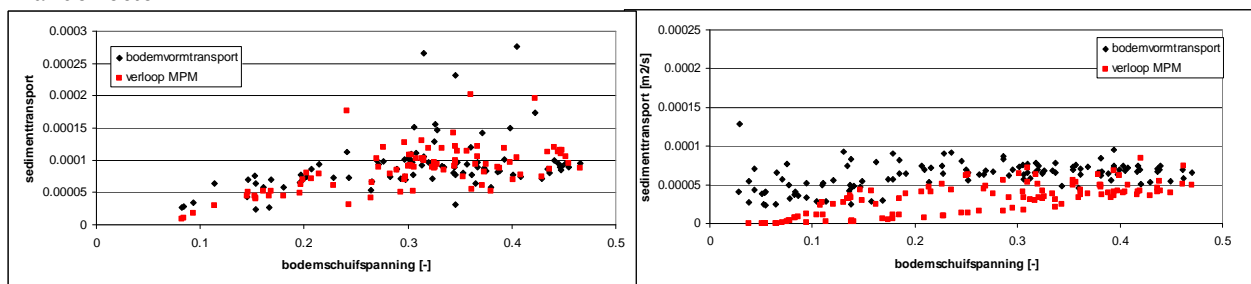
$$s_{bv} \propto \xi [\gamma(1-p)w_r L_r] \frac{H}{L} \approx \xi 10^{-4} \frac{H}{L} \text{m}^2/\text{s} \quad (7.7)$$

Hierin is de coëfficiënt  $\xi$  een evenredigheidsconstante. In Fig.7.10 is het bodemtransport volgens Verg.7.7 (met  $\xi=30$ ) weergegeven voor Waal en IJssel samen met het sedimenttransport zoals

$$\text{voorspeld door Meyer-Peter en Müller (1948) met } s = (1-p)k \sqrt{g \Delta D_{50}^3} (\mu\theta - \theta_{cr})^{3/2} \quad (7.8)$$

met	$D_{50}$	[m]	korrel diameter waarvan 50% van het bodemmengsel grover is
	$g$	[ $\text{m}/\text{s}^2$ ]	gravitatieconstante
	$k$	[-]	empirische constante; $k=13,3$
	$p$	[-]	porositeit in rivierbodem
	$s$	[ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	volumiek sedimenttransport per eenheid van breedte
	$\theta$	[-]	relatieve bodemschuifspanning
	$\mu$	[-]	fractie van bodemschuifspanning uitgeoefend op sedimentkorrels; $\mu=0,7$
	$\Delta$	[-]	specifiek sedimentgewicht onder water; $\Delta=1,65$

De linkergrafiek van Fig.7.10 heeft betrekking op de Waal, de rechtergrafiek betreft de IJssel. Voor de Waal komt Verg.7.7 beter overeen met MPM dan voor trajecten van de IJssel met een lagere relatieve bodemschuifspanning. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de waargenomen bodemvormen in het smalle en afgepleisterde traject van de Bovenijssel niet allemaal representatief zijn voor het sedimenttransport bij gemiddelde afvoer, en voor een deel veroorzaakt kunnen zijn door plaatsvast randeffecten.



Waal

IJssel

Figuur 7.10 Vergelijking bodenvormmodel (Verg.7.7) met MPM.



Behalve voor de grootte van het bodemvormtransport (Verg.7.7) is de empirische relatie van Verg.7.4 nuttig voor het schatten van een tijdschaal voor lokaal bodemherstel na baggeren of storten. Lokale bodemveranderingen worden voor een groot deel bepaald door verplaatsing of ontwikkeling van

bodemvormen. De bijbehorende tijdschaal kan daarom gedefinieerd worden als  $T = \frac{L}{w}$  (7.10)

De golflengte kan met Verg.7.4 en 7.5 worden uitgedrukt als  $\frac{L}{L_r} = \frac{s_r}{s} \frac{H}{H_r}$  (7.11)

Zodat de tijdschaal (Verg.7.10) voor lokale bodemveranderingen luidt

$$\frac{T}{T_r} = \left(\frac{L}{L_r}\right)^2 = \left(\frac{s}{s_r}\right)^{-2} \left(\frac{H}{H_r}\right)^2 \quad (7.12)$$

met	$H$	[m]	actuele duinhoogte
	$H_r$	[m]	duinhoogte voor een referentie situatie
	$T$	[s]	actuele duinhoogte relaxatie tijdschaal
	$T_r$	[s]	duinhoogte relaxatie tijdschaal voor een referentie situatie
	$s$	[m <sup>2</sup> /s]	actueel bodemtransport
	$s_r$	[m <sup>2</sup> /s]	bodemtransport voor een referentie situatie
	$w$	[m/s]	actuele bodemvormverplaatsingssnelheid
	$w_r$	[m/s]	bodemvormverplaatsingssnelheid voor een referentie situatie

De tijdschaal kan met Verg.7.12 dus berekend worden met een voorspeller voor duinhoogte en een voorspeller voor sedimenttransport. De afvoerafhankelijkheid van de tijdschaal kan met Verg.7.12 verder worden ingeschat. Ten behoeve van het inzicht kan Verg.7.12 voor de volgende twee extreme situaties worden uitgewerkt.

#### i) grootschalige, uniforme stroming (lengteschaal minstens 20 km)

Veronderstel dat voor een riviertraject met uniforme stroming en voldoende mobiel bodemmateriaal

$$\text{geldt } \frac{s}{s_r} = \left(\frac{u}{u_r}\right)^b = \left(\frac{a}{a_r}\right)^{b/2} \text{ en } \frac{H}{H_r} \approx \frac{a}{a_r} \text{ met } O(b)=5 \quad (7.13-a)$$

$$\text{De tijdschaal (Verg.7.12) kan in dat geval worden benaderd met } \frac{T}{T_r} \approx \left(\frac{a}{a_r}\right)^{2-b} \approx \left(\frac{a}{a_r}\right)^{-3} \quad (7.13-b)$$

Verg.7.13-b suggereert dat de tijdschaal afneemt (snellere veranderingen) voor grotere waterdiepten, wat op deze schaal overeenkomt met grotere afvoeren.

#### ii) kleinschalige stroming met vaste waterstand

Verg.7.13-b is alleen geldig voor *grootschalig* uniforme stroming, waarbij een toename in waterdiepte overeenkomt met een grotere afvoer. Voor *lokale* dieptevariëaties is niet langer Verg.7.13-a geldig, maar kan, met een rigid-lid benadering voor de waterstand, worden gebruikt

$$\frac{s}{s_r} = \left(\frac{u}{u_r}\right)^b = \left(\frac{a}{a_r}\right)^{-b} \quad (7.14-a)$$

Als dit wordt gecombineerd met een evenwichtswaarde voor duinhoogten volgens  $\frac{H}{H_r} \approx \frac{a}{a_r}$  dan

$$\text{wordt de tijdschaal (Verg.7.12) benaderd met } \frac{T}{T_r} = \left(\frac{a}{a_r}\right)^{2(b+1)} = \left(\frac{a}{a_r}\right)^{12} \quad (7.14-b)$$

Deze uitdrukking duidt er op dat de tijdschaal sterk reageert op *lokale* diepteveranderingen; een lokale verdieping (grotere diepte) leidt tot een aanzienlijk grotere tijdschaal (langzamer aanpassing). Deze niet-lineariteit leidt ertoe dat bodemvormen in de rivier sneller reageren op verondiepingen (na bijvoorbeeld storten) dan op verdiepingen (na bijvoorbeeld baggeren).

---

## 7.9 Conclusies

De grootte van de verplaatsingssnelheid van bodemvormen is een maat voor de snelheid waarmee bodemveranderingen zich voltrekken. Dit kan bijvoorbeeld van belang zijn bij het inschatten van de effectiviteit van baggeren en storten, maar ook bij het inschatten van bodemveranderingen door uiterwaardverruiming (RIZA 2005c). De bodemparameters uit deze studie laten een kleinere verplaatsingssnelheid voor langere bodemvormen zien.

Met het empirische verband voor verplaatsingssnelheden uit dit hoofdstuk kan uit een bodempeiling uiteindelijk ook de snelheid van bodemveranderingen worden geschat. Dit geeft niet alleen inzicht waarmee het beheer en onderhoud kan worden verbeterd, maar het kan ook worden gebruikt ter verificatie van modellen om bodemliggingen en duinhoogten (daarmee vaardiepten) beter te voorspellen.

---

## Hoofdstuk 8 Belangrijkste conclusies

### 8.1 Algemeen

Voor een *duurzaam* beleid en een *optimaal* beheer van rivieren is informatie over ontwikkelingen in de rivierbodem essentieel. Bijvoorbeeld:

- *veiligheid* tegen overstromen vergt kennis over het dynamische doorstroomprofiel en de hydraulische bodemruwheid in het zomerbed
- een betrouwbare *vaarweg* vergt kennis over waterdiepten in binnenbochten en rechtstanden, inclusief lokale dieptebeperkingen door bodemvormen
- *bodemkwaliteit* wordt grotendeels bepaald door de verdeling van zand en slib in het systeem, en de menging hiervan in de toplaag
- de *stabiliteit* van de bodemligging beïnvloedt de stabiliteit van constructies en oevers

De monitoring van een aantal riviertakken in Nederland staat op een kwalitatief hoog niveau. Dit betekent dat veel informatie beschikbaar is over de morfodynamiek van rivierbodems. Deze informatie kan gebruikt worden voor bijvoorbeeld

- systeemanalyse voor het vaststellen van referentiesituaties lange-termijn (bodem)ontwikkelingen
- monitoring door systeembeschrijving voor maatregelen (bv. rivierverruiming, vaarwegverbetering, natuurvriendelijke oevers) beheer en onderhoud
- advisering op korte termijn (veelal interpretatie van verschillende bodemkaarten)
- advisering op wat langere termijn door bouw en verificatie van modellen hydraulische modellen voor waterstanden morfologische modellen voor waterstanden en bodemliggingen

Dit rapport is gericht op het eenduidig beschrijven van morfodynamiek door introductie van bodemparameters. Deze bodemparameters geven informatie over

- lange-termijn bodemontwikkelingen<sup>4</sup> die aansluiten op historische databases
- ontwikkeling van dwarsprofielen (bochten, rechtstanden, splitsingspunten)
- mobiliteit van bodemmateriaal in langs- en dwarsprofielen (grootte en richting van het bodemvormtransport (ook in getijdegebieden) en de mate van mening met de ondergrond)
- bodemstatistiek in vaargeul (kans op mgd) en de snelheid van herstel na baggeren en storten

---

<sup>4</sup> Dit is eveneens nodig voor gegevens over beheer (baggeren en storten) korrelgrootten en sedimenttype.

---

## 8.2 Eerste indruk van bodemparameters

De definitie van de bodemparameters is beschreven in Hoofdstuk 2. Het betreft

- i) een gemiddelde bodemligging waarmee de variatie in bochten en rechtstanden kan worden gevolgd
- ii) een karakteristieke bodemvorm (duinhoogte, duinlengte, vorm, richting en verplaatsingssnelheid) op basis van het waargenomen bodemrelief.

Om een indruk te geven van de informatie die hiermee wordt verkregen is de methodiek in de hoofdstukken 3 tot en met 7 toegepast op verschillende rivierstukken. Hiervoor is een geautomatiseerde procedure gebruikt die in FORTRAN code is weergegeven in Bijlage A.

Het blijkt dat de eigenschappen van verschillende riviertrajecten met de bodemparameters goed en eenduidig gekarakteriseerd kunnen worden, en dat de gevonden duinhoogten redelijk overeenkomen met empirische voorspellers. Het is voor een goede interpretatie van de morfodynamiek wel van belang om een onderscheid te maken tussen plaatsvaste en verplaatsende bodemvormen.

Over een riviertak varieert de ruimtelijke structuur van bodemvormen aanzienlijk. In de bovenstroomse trajecten van Bovenrijn, Waal en IJssel, maar ook in het Noordelijk deel van de Dordtsche Kil duiden de afwijkende bodemparameters op een lagere mobiliteit van de rivierbodem. Dit betekent ook dat de grootte van sedimenttransport significant varieert in een riviertak. Bij een volledig mobiele rivierbodem is de duinhoogte en verplaatsingssnelheid van bodemvormen maximaal in de buitenbochten. In rivierstukken met minder mobiele rivierbodem kan het beeld hiervan afwijken.

In de vaargeul van de Nieuwe Waterweg wijken de afmetingen van bodemvormen af van die in Waal en IJssel; het getij en een afwijkende bodemgesteldheid (minder geconsolideerde slibafzettingen) kunnen hiervan de oorzaak zijn. Voor het in beeld brengen van transportstromen door de Nieuwe Waterweg zijn meer peilingen nodig, gedurende de verschillende fasen van het getij.

De (redelijk stabiele) ruimtelijke structuur van de bodemligging in bochtige trajecten, die zo belangrijk is voor het gebruik van de vaarweg, is goed herkenbaar. Opvallend is dat deze ruimtelijke structuur niet alleen aanwezig is in de gemiddelde bodemligging maar ook in de karakteristieke afmetingen van bodemvormen.

De rotatie van duinkammen geeft een indruk van de variatie in verplaatsingssnelheid over de breedte. Deze informatie is bijvoorbeeld geschikt voor het schatten van de bodemtransportverdeling bij splitsingspunten, een snelle interpretatie van het systeem bij expert judgement uitspraken en/of het verifiëren van berekende sedimenttransportverdelingen.

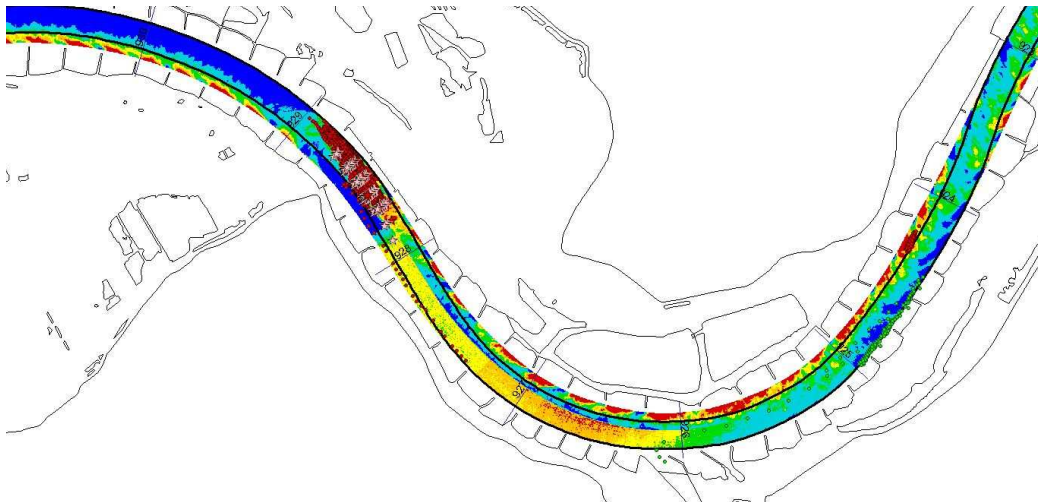
Langere bodemgolven komen volgens de gebruikte methodiek gemiddeld overeen met een lagere verplaatsingssnelheid. Deze trend is waarneembaar in verschillende datasets. Op basis hiervan kan een tijdschaal voor lokale bodemveranderingen worden geformuleerd, en kan een inschatting worden gemaakt van de grootte van het bodemtransport. Om te onderzoeken of het gebruik van de fictieve karakteristieke bodemvormafmetingen niet leidt tot schijnbare correlatie, zou de hypothese dat *de verplaatsingssnelheid omgekeerd evenredig is met duinlengte* met een andere methodiek geverifieerd moeten worden.

---

### 8.3 Perspectieven voor toepassing

De gebruikte methodiek maakt een snelle en eenduidige verwerking van multibeamdata tot overzichtelijke parameters mogelijk, die conceptueel<sup>5</sup> en praktisch<sup>6</sup> passen bij rekenresultaten van numerieke modellen voor de simulatie van riviermorfologie. De bodemparameters leiden tot een verbeterde en uitgebreide systeembeschrijving die kan worden gebruikt om meer inzicht in rivierbodempliggingen te verwerven, en om de nieuwe generatie morfologische modellen krachtiger en betrouwbaarder te maken. Een paar voorbeelden zijn:

- de duinhoogten karakteriseren de morfodynamiek van de bodemhoogte. Deze waarde kan in combinatie met een tijdsgemiddelde bodempligging gebruikt worden om effectieve vaardiepten (bij OLR) te presenteren (zie voorbeeld in Fig.8.1). Een dergelijk overzicht geeft een goede indruk van de effectieve ruimte in de vaargeul.
- de duinhoogten geven een indicatie van de mobiliteit van de rivierbodem, bijvoorbeeld voor het identificeren van hardere lagen in de ondergrond (bv afpleistering in bovenstroomse trajecten, harde kleilagen in benedenstroomse trajecten)
- de duinhoogte, duinlengte en duinkamrichting kunnen worden gebruikt om met bodempeilingen het bodemtransport te schatten. Dit inzicht kan worden gebruikt om een optimale bagger- en stort strategie te formuleren.



**Figuur 8.1** Gemiddelde vaardiepte in de Waal bij St.Andries, inclusief de invloed van bodemvormen (Johan van Essen, RWS-WD).

- de duinhoogte levert een indicatie voor de menging van sediment in de toplaag van de rivierbodem (grind, zand, slib)

---

<sup>5</sup> Het onderscheid in gemiddelde bodempligging en bodemvormen op basis van verschillende tijd- en lengteschaal wordt ook in de operationele modellen voor riviermorfologie gebruikt.

<sup>6</sup> De resultaten worden net als numerieke resultaten op een grid gepresenteerd.

- 
- de richting van bodemvormen kan worden gebruikt om de verdeling van bodemvormtransport over de breedte vast te stellen. Hiermee kan de verdeling van bodemtransport bij splitsingspunten worden geschat. Bovendien levert dit een goede verificatie mogelijkheid voor de simulatie van bodemliggingen in rivierbochten met numerieke modellen.
  - In getij-gebieden kan de grootte en richting van sedimenttransport variëren. Met de karakteristieke bodemvormparameters kan het inzicht hierin toenemen.
  - De bodemvormafmetingen en de oriëntatie van duinkammen kunnen de uiteindelijke richting van sedimenttransport beïnvloeden (WL Delft Hydraulics, 2008). Dit is van belang voor de voorspelling van bodemliggingen in binnen- en buitenbochten. Omdat deze parameters binnen een riviertak aanzienlijk variëren, dient de beschrijving van dit proces in modellen van één of meer riviertakken verbeterd worden. De bodemparameters leveren hiervoor de juiste informatie.

---

## Referenties

- Battjes, J.A. (1988); Korte golven, B76, paragraaf 7.3.1, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
- Fredsoe, J. (1982); Shape and dimensions of stationary dunes in rivers, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.108, No.HY 8.
- Jansen, P. Ph.; L. van Bendegom, J. van den Berg, M. de Vries en A. Zanen (1979) *Principles of river engineering, The non-tidal alluvial river*. DUM, 509 p.
- Meyer-Peter, E. en R. Müller (1948); Formulas for bed-load transport, Proceedings Second Congress IAHR Stockholm, Sweden.
- Rijn, L.C. van (1984); Sediment transport Part III: bed forms and alluvial roughness, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.110, No.12.
- RIZA (2003); Kleinschalige morfodynamica, waarom en hoe, RIZA werkdocument 2003.xyz.
- RIZA (2004a); Ruimtelijke variaties in duinhoogte, RIZA werkdocument 2004.166x.
- RIZA (2004b); Bodemparameters voor het BOS Baggeren, RIZA werkdocument 2004.124x.
- RIZA (2004c); Analyse van bodempeilingen rondom het Merwede splitsingspunt, RIZA werkdocument 2004.145x
- RIZA (2005a); Voorspelinstrument duurzame vaarweg, functioneel ontwerp, RIZA werkdocument 2005.058x.
- RIZA (2005b); Ontgrondingskuilen in de Waal, RIZA werkdocument 2005.082x
- RIZA (2005c); Morfologische effecten van herinrichting, PKB Ruimte voor de Rivier, RIZA werkdocument 2005.044x.
- RIZA (2005d); Bodemveranderingen tijdens het hoogwater, interpretatie van single-beam peilingen in de Midden-Waal, RIZA werkdocument 2005.134x
- RIZA Memo 2000-023 *morfokronkels, schatten van evenwichtsbodemliggingen in bochten*
- RIZA Memo 2006-014, *bed level changes during flood, a case study of the river Waal*
- RIZA Memo 2006-023, *Stuurboord 2006 Analyse grootschalige en lokale morfodynamica Westerschelde, pilot inzet Waal-methode ter ondersteuning van beheer.*
- RIZA Memo 2007-004, *Eerste overzicht en analyse waarnemingen bord voor de kop*
- RIZA Memo 2007-005, *Bodemvormen en transportrichting*
- RIZA Memo 2007-013, *Bodemparameters Merwede*
- Struiksmā, N.; K.W. Olesen; C.Flokstra en H.J. de Vriend (1985); Bed deformation in curved-alluvial channels, Journal of Hydraulic Research Vol.23, No.1, blz 57-79.

---

Sieben, J. (1997) Modeling of hydraulics and morphology of mountain rivers, proefschrift TU Delft.

Vries, M. de (1965); Considerations about non-steady bed load transport in open channels, Proceedings IAHR Leningrad, 3.81-3.88.

WL Delft Hydraulics (2006); Verbetering 1-D Rijntakkenmodel vanaf Andernach, Q4130.

WL Delft Hydraulics (2008a); Onderzoek Morfologie Rijn, Maas en Benedenrivieren, Zand-slib modellering en verkenning sedimenttransportrichting, Q4400.

WL Delft Hydraulics (2008b); Voorspelinstrument duurzame vaarweg, Reducing computation time, Q4357.20

WL Delft Hydraulics (2008c); Voorspelinstrument duurzame vaarweg, Calibration of the multi-domain model, Q4357.20



## Bijlage A Automatische procedure voor de bepaling van bodemparameters (Fortran code)

```

ccc  programma voor bewerken bodempeilingen in x,y,z, invoer
ccc  met als uitvoer per rekencel de bodemparameters
ccc
ccc  program bedchar
c
ccc  declaraties
c
ccc  nt      = maximum aantal punten per rekencel
ccc  np      = maximum aantal peilingen
ccc  nna     = maximum aantal roostercellen in n richting
ccc  nma     = maximum aantal roostercellen in m richting
ccc  nima    = maximum aantal punten per roostercel in n-richting
ccc  mima    = maximum aantal punten per roostercel in m-richting
c
ccc  parameter (nt=1000000)
ccc  parameter (np=30)
ccc  parameter (nma=951)
ccc  parameter (mma=14)
ccc  parameter (npp=4)
c set 1 Waal
c parameter (nma=511)
c parameter (mma=8)
c parameter (nima=4500)
c parameter (mima=4500)
c parameter (nrst=4500)
c set 2 (IJssel fijn)
c parameter (nma=951)
c parameter (mma=14)
c parameter (nima=500)
c parameter (mima=500)
c parameter (nrst=4500)
ccc parameter (nima=4000)
ccc parameter (mima=4000)
ccc parameter (nrst=6000)
ccc parameter (nrunname=1000)
c let op: nima=mima gebruiken
dimension drunid(np), drunidn(np), dtime(np), nrcl(nt), mrcl(nt),
+ ncl(nt), mcl(nt), ncln(nt), mcln(nt), ncount(nma, mma),
+ numrn(nma, mma), ncountn(nma, mma), jmn1(npp), jmn2(npp),
+ numr(nma, mma), runname(nrunname), jra(nrst), jrn(nrst),
+ ncorind(nt), mcorind(nt), indroos(nma, mma), nnflag(nma, mma),
+ indroon(nma, mma), rcfil(nrst), rcfiln(nrst),
+ nrm(mima), mrang(mima), nrm(mima), nnr(mima, nima),
+ nrang(mima, nima), nrm(mima), nmrang(mima), nrm(mima),
+ nnr(mima, nima), nmrang(mima, nima), numym(nma, mma),
+ numxm(nma, mma), numxp(nma, mma), numyp(nma, mma),
+ numl3p(nma, mma), numl3m(nma, mma), num24p(nma, mma),
+ num24m(nma, mma)
c
real
+ xx(nt), xy(nt), xz(nt), gdzxm(nt), Gradx, Grady,
+ xxn(nt), xyn(nt), xzn(nt), gdzym(nt), Rgzyp(nma, mma),
+ xxr(nma, mma), xyr(nma, mma), Rgzxm(nma, mma), Rgzxp(nma, mma),
+ aver(nma, mma), rsigm(nma, mma), Rgzym(nma, mma),
+ gzxm(nma, mma), vzxm(nma, mma), gzym(nma, mma), vzym(nma, mma),
+ rzxm(nma, mma), rzym(nma, mma), rzxy(nma, mma),
+ dzm(nma, mma), dzv(nma, mma),
+ dis1(npp), dis2(npp),
+ ax(nma, mma), axx(nma, mma), axy(nma, mma), ay(nma, mma),
+ ayy(nma, mma), azz(nma, mma), azy(nma, mma),
+ xh1(nma, mma), yh1(nma, mma), xh2(nma, mma), yh2(nma, mma),
+ xh3(nma, mma), yh3(nma, mma), xh4(nma, mma), yh4(nma, mma),
+ ramplil(nma, mma), rampli2(nma, mma), Ggradx(nma, mma),
+ Ggrady(nma, mma), Ggzxm(nma, mma), Ggzym(nma, mma),
+ Ggzxp(nma, mma), Ggzyp(nma, mma), Gzzm(nma, mma),
+ xxl(nima, mima), xyl(nima, mima),
+ xzl(nima, mima), xxnl(nima, mima),
+ xxlabd(nima, mima), xylabd(nima, mima),
+ xzlabd(nima, mima),
+ xynl(nima, mima), xznl(nima, mima),
+ rnind(nt), rmind(nt), rnindn(nt), rmindn(nt), Xdis(5),

```

```

+      rnindmin(nrst),rnindmax(nrst),rmindmin(nrst),
+      rmindmax(nrst),Ggzxpa(nma,mma),Rgzxpa(nma,mma),
+      Ggzypa(nma,mma),Rgzypa(nma,mma),Ggzxma(nma,mma),
+      Rgzxma(nma,mma),Ggzyma(nma,mma),Rgzyma(nma,mma),
+      Ggi13p(nma,mma),Ggi13m(nma,mma),Ggi24p(nma,mma),
+      Ggi24m(nma,mma),Rphil3(nma,mma),
+      rsumx(nma,mma),rsumy(nma,mma)
c
integer ncount,ncountn,jmn1,jmn2, numr,numrn, p1,p2,p3,p4,
+      numxm,numxp,numym,numyp,numl3p,numl3m,num24p,num24m
c
character drunid*6, drunidn*6,cifil0*8, cifil*25, runid*7,
+      cufil*10, cufiln*10,cufil2*18,cufil3*20,cufil4*24,cufil5*20,
+      cufil6*20,cufil7*20,cdum*3,runname*3,ccfil*10,cdfil*13,
+      cdfiln*13, cufil3*9, rcfil*8, rcfiln*8,chardum*8,ccdum*8,cccum*9
c
ccc bestand bestemd voor mededelingen
c
open (50,file='status.run',status='unknown')
RPI=2.0*ACOS(0.0)
c
runname(1)='000'
runname(2)='001'
runname(3)='002'
...
runname(998)='997'
runname(999)='998'
runname(1000)='999'
c
ccc naam van runid-file
c
ccc openen runid-file
c
open (20,file='data.txt',status='old',iostat=ios)
if (ios.ne. 0) then
write (50,'(/3a)') 'Geen data.txt gevonden !'
goto 999
endif
c
ccc inlezen runid-file
c
read (20,*)
read (20,*)
read (20,*) rscale
read (20,*)
read (20,*) multiple
read (20,*)
c
nrunm = 0
do 20 i = 1, nt
if (i.gt. nt) then
write (50,'(/3a)') 'In bestand ', cifil0, ' meer waarden dan parameter NT !'
write (50,'(a)') 'Programma wordt afgebroken !!!'
goto 999
endif
if (multiple.eq.1) then
read (20,*, end=21) drunid(i),drunidn(i),dtime(i)
else
read (20,*,end=21) drunid(i)
endif
nrunm = nrunm + 1
20 continue
21 continue
c
ccc sluiten van runid-file
c
close (20)
c
ccc openen rooster file
c
open (30,file='rooster.txt',status='old',iostat=ios)
if (ios.ne. 0) then
write (50,'(/3a)') 'Geen rooster.txt gevonden !'
goto 999
endif

```

```

c
cc  inlezen rooster coördinaten
c
      nmax=0
      mmax=0
      nmin=100000
      mmin=100000
      xpuntmin=5000000
      ypuntmin=5000000
      xpuntmax=0
      ypuntmax=0
      read (30,*)
      do 25 i= 1 , (nma*mma)
      read (30,*,end=26) dum,dum,ndum,ndum,ncor,ncor,xroos,yroos
      if ((ncor.le.nma).and.(mcor.le.mma)) then
        xxr(ncor,mcor)=xroos
        xyr(ncor,mcor)=yroos
        if (nmax.lt.ncor) then
          nmax=ncor
        endif
        if (mmax.lt.mcor) then
          mmax=mcor
        endif
        if (nmin.gt.ncor) then
          nmin=ncor
        endif
        if (mmin.gt.mcor) then
          mmin=mcor
        endif
        if (xpuntmin.gt.xroos) then
          xpuntmin=xroos
        endif
        if (xpuntmax.lt.xroos) then
          xpuntmax=xroos
        endif
        if (ypuntmin.gt.yroos) then
          ypuntmin=yroos
        endif
        if (ypuntmax.lt.yroos) then
          ypuntmax=yroos
        endif
      else
        write (50,*) 'roostercoördinaten te groot, programma wordt afgebroken!'
        go to 999
      endif
25 continue
26 continue
      close (30)
      ds=sqrt((xxr(nmin,mmin)-xxr(nmin+1,mmin))**2+
+ (xyr(nmin,mmin)-xyr(nmin+1,mmin))**2)
      dn=sqrt((xxr(nmin,mmin)-xxr(nmin,mmin+1))**2+
+ (xyr(nmin,mmin)-xyr(nmin,mmin+1))**2)
      xpuntmin=xpuntmin-sqrt(ds**2+dn**2)
      ypuntmin=ypuntmin-sqrt(ds**2+dn**2)
      xpuntmax=xpuntmax+sqrt(ds**2+dn**2)
      ypuntmax=ypuntmax+sqrt(ds**2+dn**2)
c
ccc bepaal hoekpunten per cel
c
      do 2671 ni = nmin,nmax
      do 2672 mi = mmin,mmax
        if ((ni.gt.nmin).and.(ni.lt.nmax).and.(mi.gt.mmin).and.
+ (mi.lt.mmax)) then
          x1=(xxr(ni,mi)+xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-1,mi-1)+xxr(ni,mi-1))/4.
          x2=(xxr(ni,mi)+xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-1,mi+1)+xxr(ni,mi+1))/4.
          x3=(xxr(ni,mi)+xxr(ni,mi+1)+xxr(ni+1,mi+1)+xxr(ni+1,mi))/4.
          x4=(xxr(ni,mi)+xxr(ni,mi-1)+xxr(ni+1,mi-1)+xxr(ni+1,mi))/4.
          y1=(xyr(ni,mi)+xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-1,mi-1)+xyr(ni,mi-1))/4.
          y2=(xyr(ni,mi)+xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-1,mi+1)+xyr(ni,mi+1))/4.
          y3=(xyr(ni,mi)+xyr(ni+1,mi)+xyr(ni+1,mi+1)+xyr(ni,mi+1))/4.
          y4=(xyr(ni,mi)+xyr(ni+1,mi)+xyr(ni+1,mi-1)+xyr(ni,mi-1))/4.
        endif
        if ((ni.eq.nmin).and.(mi.gt.mmin).and.(mi.lt.mmax)) then
          x3=(xxr(ni,mi)+xxr(ni+1,mi)+xxr(ni+1,mi+1)+xxr(ni,mi+1))/4.
          x4=(xxr(ni,mi)+xxr(ni+1,mi)+xxr(ni+1,mi-1)+xxr(ni,mi-1))/4.

```

```

y3=(xyr(ni,mi)+xyr(ni+1,mi)+xyr(ni+1,mi+1)+xyr(ni,mi+1))/4.
y4=(xyr(ni,mi)+xyr(ni+1,mi)+xyr(ni+1,mi-1)+xyr(ni,mi-1))/4.
x1=2*xxr(ni,mi)-x3
y1=2*xyr(ni,mi)-y3
x2=2*xxr(ni,mi)-x4
y2=2*xyr(ni,mi)-y4
endif
if ((ni.eq.nmax).and.(mi.gt.mmin).and.(mi.lt.mmax)) then
x1=(xxr(ni,mi)+xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-1,mi-1)+xxr(ni,mi-1))/4.
x2=(xxr(ni,mi)+xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-1,mi+1)+xxr(ni,mi+1))/4.
y1=(xyr(ni,mi)+xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-1,mi-1)+xyr(ni,mi-1))/4.
y2=(xyr(ni,mi)+xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-1,mi+1)+xyr(ni,mi+1))/4.
x4=2*xxr(ni,mi)-x2
y4=2*xyr(ni,mi)-y2
x3=2*xxr(ni,mi)-x1
y3=2*xyr(ni,mi)-y1

endif
if ((ni.gt.mmin).and.(ni.lt.nmax).and.(mi.eq.mmin)) then
x2=(xxr(ni,mi)+xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-1,mi+1)+xxr(ni,mi+1))/4.
y2=(xyr(ni,mi)+xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-1,mi+1)+xyr(ni,mi+1))/4.
x3=(xxr(ni,mi)+xxr(ni+1,mi)+xxr(ni+1,mi+1)+xxr(ni,mi+1))/4.
y3=(xyr(ni,mi)+xyr(ni+1,mi)+xyr(ni+1,mi+1)+xyr(ni,mi+1))/4.
x4=2*xxr(ni,mi)-x2
y4=2*xyr(ni,mi)-y2
x1=2*xxr(ni,mi)-x3
y1=2*xyr(ni,mi)-y3

endif
if ((ni.gt.mmin).and.(ni.lt.nmax).and.(mi.eq.mmax)) then
x1=(xxr(ni,mi)+xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-1,mi-1)+xxr(ni,mi-1))/4.
x4=(xxr(ni,mi)+xxr(ni+1,mi)+xxr(ni+1,mi-1)+xxr(ni,mi-1))/4.
y1=(xyr(ni,mi)+xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-1,mi-1)+xyr(ni,mi-1))/4.
y4=(xyr(ni,mi)+xyr(ni+1,mi)+xyr(ni+1,mi-1)+xyr(ni,mi-1))/4.
x2=2*xxr(ni,mi)-x4
y2=2*xyr(ni,mi)-y4
x3=2*xxr(ni,mi)-x1
y3=2*xyr(ni,mi)-y1

endif
if ((ni.eq.mmin).and.(mi.eq.mmin)) then
x3=(xxr(ni+1,mi+1)+xxr(ni,mi+1)+xxr(ni,mi)+xxr(ni+1,mi))/4.
xp4=(xxr(ni+1,mi+1)+xxr(ni+2,mi+1)+
+   xxr(ni+2,mi)+xxr(ni+1,mi))/4.
y3=(xyr(ni+1,mi+1)+xyr(ni,mi+1)+xyr(ni,mi)+xyr(ni+1,mi))/4.
yp4=(xyr(ni+1,mi+1)+xyr(ni+2,mi+1)+
+   xyr(ni+2,mi)+xyr(ni+1,mi))/4.
xp2=(xxr(ni+1,mi+1)+xxr(ni,mi+1)+
+   xxr(ni,mi+2)+xxr(ni+1,mi+2))/4.
yp2=(xyr(ni+1,mi+1)+xyr(ni,mi+1)+
+   xyr(ni,mi+2)+xyr(ni+1,mi+2))/4.
x1=2*xxr(ni,mi)-x3
y1=2*xyr(ni,mi)-y3
x4=2*xxr(ni+1,mi)-xp4
y4=2*xyr(ni+1,mi)-yp4
x2=2*xxr(ni,mi+1)-xp2
y2=2*xyr(ni,mi+1)-yp2
endif
if ((ni.eq.nmax).and.(mi.eq.mmin)) then
x2=(xxr(ni,mi)+xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-1,mi+1)+xxr(ni,mi+1))/4.
y2=(xyr(ni,mi)+xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-1,mi+1)+xyr(ni,mi+1))/4.
x1p=(xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-2,mi)+
+   xxr(ni-2,mi+1)+xxr(ni-1,mi+1))/4.
y1p=(xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-2,mi)+
+   xyr(ni-2,mi+1)+xyr(ni-1,mi+1))/4.
x3p=(xxr(ni-1,mi+1)+xxr(ni-1,mi+2)+
+   xxr(ni,mi+2)+xxr(ni,mi+1))/4.
y3p=(xyr(ni-1,mi+1)+xyr(ni-1,mi+2)+
+   xyr(ni,mi+2)+xyr(ni,mi+1))/4.
x3=2*xxr(ni,mi+1)-x3p
y3=2*xyr(ni,mi+1)-y3p
x1=2*xxr(ni-1,mi)-x1p
y1=2*xyr(ni-1,mi)-y1p
x4=2*xxr(ni,mi)-x2
y4=2*xyr(ni,mi)-y2

```

```

endif
if ((ni.eq.nmax).and.(mi.eq.mmax)) then
  x1=(xxr(ni,mi)+xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-1,mi-1)+xxr(ni,mi-1))/4.
  y1=(xyr(ni,mi)+xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-1,mi-1)+xyr(ni,mi-1))/4.
  x2p=(xxr(ni-1,mi)+xxr(ni-2,mi)+
+   xxr(ni-2,mi-1)+xxr(ni-1,mi-1))/4.
  y2p=(xyr(ni-1,mi)+xyr(ni-2,mi)+
+   xyr(ni-2,mi-1)+xyr(ni-1,mi-1))/4.
  x4p=(xxr(ni,mi-1)+xxr(ni-1,mi-1)+
+   xxr(ni-1,mi-2)+xxr(ni,mi-2))/4.
  y4p=(xyr(ni,mi-1)+xyr(ni-1,mi-1)+
+   xyr(ni-1,mi-2)+xyr(ni,mi-2))/4.
  x3=2*xxr(ni,mi)-x1
  y3=2*xyr(ni,mi)-y1
  x2=2*xxr(ni-1,mi)-x2p
  y2=2*xyr(ni-1,mi)-y2p
  x4=2*xxr(ni,mi-1)-x4p
  y4=2*xyr(ni,mi-1)-y4p
endif
if ((ni.eq.nmin).and.(mi.eq.mmax)) then
  x4=(xxr(ni,mi)+xxr(ni+1,mi)+xxr(ni+1,mi-1)+xxr(ni,mi-1))/4.
  y4=(xyr(ni,mi)+xyr(ni+1,mi)+xyr(ni+1,mi-1)+xyr(ni,mi-1))/4.
  x2=2*xxr(ni,mi)-x4
  y2=2*xyr(ni,mi)-y4
  x1p=(xxr(ni,mi-1)+xxr(ni+1,mi-1)+
+   xxr(ni+1,mi-2)+xxr(ni,mi-2))/4.
  y1p=(xyr(ni,mi-1)+xyr(ni+1,mi-1)+
+   xyr(ni+1,mi-2)+xyr(ni,mi-2))/4.
  x3p=(xxr(ni+1,mi)+xxr(ni+2,mi)+
+   xxr(ni+1,mi-1)+xxr(ni+2,mi-1))/4.
  y3p=(xyr(ni+1,mi)+xyr(ni+2,mi)+
+   xyr(ni+1,mi-1)+xyr(ni+2,mi-1))/4.
  x1=2*xxr(ni,mi-1)-x1p
  y1=2*xyr(ni,mi-1)-y1p
  x3=2*xxr(ni+1,mi)-x3p
  y3=2*xyr(ni+1,mi)-y3p
endif
  xh1(ni,mi)=x1
  yh1(ni,mi)=y1
  xh2(ni,mi)=x2
  yh2(ni,mi)=y2
  xh3(ni,mi)=x3
  yh3(ni,mi)=y3
  xh4(ni,mi)=x4
  yh4(ni,mi)=y4
2672 continue
2671 continue
write (50,*) 'Rooster goed gelezen en verwerkt !'
noutput=nrunm+1000
jl=33333333
do 101 nrun = 1 , nrunm
  if (multiple.eq.0) then
    print *, 'peiling nr ', drunid(nrun)
  else
    print *, 'peiling nr ', drunid(nrun), ' en nr ', drunidn(nrun)
  endif
c
ccc toekennen van beginwaarden aan statistiekparameters
c
do 261 jn=1,nmax
  do 262 jm=1,mmax
    indroos(jn,jm)=0
    indroon(jn,jm)=0
    ncount(jn,jm)=0
    ncountn(jn,jm)=0
    aver(jn,jm)=0.0
    rsigm(jn,jm)=0.0
    gzxm(jn,jm)=0.0
    rzxm(jn,jm)=0.0
    vzxm(jn,jm)=0.0
    gzym(jn,jm)=0.0
    rzym(jn,jm)=0.0
    rzxy(jn,jm)=0.0
    vzym(jn,jm)=0.0

```

```

dzm( jn, jm)=0.0
dzv( jn, jm)=0.0
numr( jn, jm)=0
numrn( jn, jm)=0
ax( jn, jm)=0.0
axx( jn, jm)=0.0
axy( jn, jm)=0.0
ay( jn, jm)=0.0
aay( jn, jm)=0.0
azz( jn, jm)=0.0
azy( jn, jm)=0.0
Ggzxm( jn, jm)=0.0
Ggzym( jn, jm)=0.0
Ggzxp( jn, jm)=0.0
Ggzyp( jn, jm)=0.0
Rgzxm( jn, jm)=0.0
Rgzym( jn, jm)=0.0
Rgzxp( jn, jm)=0.0
Rgzyp( jn, jm)=0.0
rsumx( jn, jm)=0.0
rsumy( jn, jm)=0.0
rampli2( jn, jm)=0.0
Ggradx( jn, jm)=0.0
Ggrady( jn, jm)=0.0
Gzzm( jn, jm)=0.0
262 continue
261 continue
do 361 jn=1,nima
nrm( jn)=0
nnrm( jn)=0
nrn( jn)=0
nrrm( jn)=0
mrang( jn)=0
nmrang( jn)=0
do 362 jm=1,mima
xxl( jn, jm)=0.0
xyl( jn, jm)=0.
xzl( jn, jm)=0.
xxnl( jn, jm)=0.
xynl( jn, jm)=0.0
xznl( jn, jm)=0.0
xxlabd( jn, jm)=0.0
xylabd( jn, jm)=0.0
xzlabd( jn, jm)=0.0
nrang( jn, jm)=0
nmrang( jn, jm)=0
nnr( jn, jm)=0
nnnr( jn, jm)=0
362 continue
361 continue
noutput=noutput+20
jl=jl+100
c
ccc openen invoerbestanden
c
ndeel=0
nwrite=0
ii=0
nant=0
do 26202 nsam = 1,nma
cufil = '123456.000'
write ( cufil (1:6), '(6a)') drunid(nrun)
write ( cufil (8:10), '(3a)') runname(nsam)
j91=100000+nrun*10000+nsam
open (j91,file=cufil,status='old',iostat=ios)
if (ios .ne. 0) then
go to 26202
endif
ndeel=ndeel+1
print * , ' inlezen en rangschikken puntdata uit bestand ',
+ cufil
read (j91,*) cdum
do 22 i = 1 , nt
c Winssen optie
c read (j91,*, end=23) cccdum,ccdum,xxx, xxy, xxz

```

```

read (j91,*,end=23) xxx,xyy,xxz
      xxz=rscale*xxz
      if ((xxx.lt.xpuntmin).or.(xxx.gt.xpuntmax).or.
+      (xyy.lt.ypuntmin).or.(xyy.gt.ypuntmax)) then
          go to 22
      endif
      nant=nant+1
      dismin=10.*sqrt(ds**2+dn**2)
c
ccc verdelen puntdata over roostercellen, en toekennen interne m,n coördinaten
c
      ncel=0
      mcel=0
      ncelmin=10000
      mcelmin=10000
      ncelmax=0
      mcelmax=0
      do 2231 ni = nmin , nmax
          do 2230 mi = mmin , mmax
              x1=xh1(ni,mi)
              y1=yh1(ni,mi)
              x2=xh2(ni,mi)
              y2=yh2(ni,mi)
              x3=xh3(ni,mi)
              y3=yh3(ni,mi)
              x4=xh4(ni,mi)
              y4=yh4(ni,mi)
              ddintm=max(sqrt((x2-x1)**2+(y2-y1)**2),
+              sqrt((x3-x4)**2+(y4-y3)**2))
              ddintn=max(sqrt((x4-x1)**2+(y4-y1)**2),
+              sqrt((x3-x2)**2+(y3-y2)**2))
              if (x4.ne.x1) then
                  angle=ATAN((y4-y1)/(x4-x1))
              else
                  angle=RPI/2.
              endif
              if (x1.gt.x2) then
                  xxrmax=x1
                  xxrmin=x2
              else
                  xxrmax=x2
                  xxrmin=x1
              endif
              if (xxrmax.lt.x3) then
                  xxrmax=x3
              endif
              if (xxrmax.lt.x4) then
                  xxrmax=x4
              endif
              if (xxrmin.gt.x3) then
                  xxrmin=x3
              endif
              if (xxrmin.gt.x4) then
                  xxrmin=x4
              endif
              if (y1.gt.y2) then
                  yyrmax=y1
                  yyrmin=y2
              else
                  yyrmax=y2
                  yyrmin=y1
              endif
              if (yyrmax.lt.y3) then
                  yyrmax=y3
              endif
              if (yyrmax.lt.y4) then
                  yyrmax=y4
              endif
              if (yyrmin.gt.y3) then
                  yyrmin=y3
              endif
              if (yyrmin.gt.y4) then
                  yyrmin=y4
              endif
              if ((xxx.lt.xxrmin).or.(xxx.gt.xxrmax).or.(xyy.lt.yyrmin).

```

```

+         or.(xxy.gt.yyrmax)) then
go to 2230
else
    dist1=sqrt((xxx-x1)**2+(xxy-y1)**2)
    dist2=sqrt((xxx-x2)**2+(xxy-y2)**2)
    dist3=sqrt((xxx-x3)**2+(xxy-y3)**2)
    dist4=sqrt((xxx-x4)**2+(xxy-y4)**2)
    discelm=sqrt((x1-x3)**2+(y1-y3)**2)
    disdum=sqrt((x2-x4)**2+(y2-y4)**2)
    if (discelm.lt.disdum) then
        discelm=disdum
    endif
    distpuntm=dist1
    if (distpuntm.lt.dist2) then
        distpuntm=dist2
    endif
    if (distpuntm.lt.dist3) then
        distpuntm=dist3
    endif
    if (distpuntm.lt.dist4) then
        distpuntm=dist4
    endif
    dist=(dist1+dist2+dist3+dist4)/4.
    if ((dist.le.dismin).and.(distpuntm.le.(1.1*discelm))) then
        ncel=ni
        mcel=mi
        dismin=dist
        rncor=(xxy-y1)*SIN(angle)+(xxx-x1)*COS(angle)
        rmcor=(xxy-y1)*COS(angle)-(xxx-x1)*SIN(angle)
        mindex=INT(1000.*rmcor)
        nindex=INT(1000.*rncor)
    endif
endif
2230 continue
2231 continue
    if ((ncel*mcel).ne.0) then
        if (indroos(ncel,mcel).eq.0) then
            ii=ii+1
            indroos(ncel,mcel)=ii
            rcfil(ii)='o000.000'
            write ( rcfil(ii) (2:4), '(3a)') runname(mcel)
            write ( rcfil(ii) (6:8), '(3a)') runname(ncel)
            jra(ii)=ii+345679
            open (jra(ii),file=rcfil(ii), status='unknown',iostat=ios)
        endif
        write (jra(indroos(ncel,mcel)),*) ncel,mcel,rncor,rmcor,xxx,
+         xxy,xxz
    endif
22 continue
23 continue
close (j91)
c
ccc sluit bestanden
c
    if (i.eq.nt) then
        write (50,*) 'Van bestand ',cufil,' zijn slechts nt= ',nt,
+         ' waarden ingelezen.'
    endif

26202 continue
inmmax=ii
do 23000 ji=1,inmmax
    close (jra(ji))
23000 continue

c
ccc verdelen puntdata van nieuwe peiling over roosterzellen, en toekennen interne m,n coördinaten
c

    if (multiple.eq.1) then
        ndeel=0
        ii=0
        do 26203 nsam = 1,nma
            cufiln = '123456.000'
            write ( cufiln (1:6), '(6a)') drunidn(nrun)

```



```

write ( cufiln (8:10), '(3a)') runname(nsam)
jk=300000+nrun*10000+nsam
open (jk,file=cufiln,status='old',iostat=ios)
if (ios .ne. 0) then
  goto 26203
endif
read (jk,*) cdum
print *, '      inlezen en rangschikken puntdata uit bestand ',
+ cufiln

nndeel=nndeel+1
do 221 i = 1 , nt
c Winssen optie
c      read (jk,*, end=231) cccdum,ccdum,xxx, xxy, xxx
      read (jk,*, end=231) xxx, xxy, xxz
      xxz=rscale*xxz
      if ((xxx.lt.xpuntmin).or.(xxx.gt.xpuntmax).or.
+      (xxy.lt.ypuntmin).or.(xxy.gt.ypuntmax)) then
        go to 221
      endif
dismin=10.*sqrt(ds**2+dn**2)
ncel=0
mcel=0
ncelmin=10000
mcelmin=10000
ncelmax=0
mcelmax=0
do 2211 ni = nmin , nmax
do 2210 mi = mmin , mmax
  x1=xh1(ni,mi)
  y1=yh1(ni,mi)
  x2=xh2(ni,mi)
  y2=yh2(ni,mi)
  x3=xh3(ni,mi)
  y3=yh3(ni,mi)
  x4=xh4(ni,mi)
  y4=yh4(ni,mi)
  ddintm=max(sqrt((x2-x1)**2+(y2-y1)**2),
+      sqrt((x3-x4)**2+(y4-y3)**2))
  ddintn=max(sqrt((x4-x1)**2+(y4-y1)**2),
+      sqrt((x3-x2)**2+(y3-y2)**2))
  if (x4.ne.x1) then
    angle=ATAN((y4-y1)/(x4-x1))
  else
    angle=RPI/2.
  endif
  if (x1.gt.x2) then
    xxrmax=x1
    xxrmin=x2
  else
    xxrmax=x2
    xxrmin=x1
  endif
  if (xxrmax.lt.x3) then
    xxrmax=x3
  endif
  if (xxrmax.lt.x4) then
    xxrmax=x4
  endif
  if (xxrmin.gt.x3) then
    xxrmin=x3
  endif
  if (xxrmin.gt.x4) then
    xxrmin=x4
  endif
  if (y1.gt.y2) then
    yyrmax=y1
    yyrmin=y2
  else
    yyrmax=y2
    yyrmin=y1
  endif
  if (yyrmax.lt.y3) then
    yyrmax=y3
  endif
endif
endif

```

```

        if (yyrmax.lt.y4) then
            yyrmax=y4
        endif
        if (yyrmin.gt.y3) then
            yyrmin=y3
        endif
        if (yyrmin.gt.y4) then
            yyrmin=y4
        endif
+   if ((xxx.lt.xxrmin).or.(xxx.gt.xxymax).or.(xxy.lt.yyrmin).
        or.(xxy.gt.yyrmax)) then
        go to 2210
    else
        dist1=sqrt((xxx-x1)**2+(xxy-y1)**2)
        dist2=sqrt((xxx-x2)**2+(xxy-y2)**2)
        dist3=sqrt((xxx-x3)**2+(xxy-y3)**2)
        dist4=sqrt((xxx-x4)**2+(xxy-y4)**2)
        discelm=sqrt((x1-x3)**2+(y1-y3)**2)
        disdum=sqrt((x2-x4)**2+(y2-y4)**2)
        if (discelm.lt.disdum) then
            discelm=disdum
        endif
        distpuntm=dist1
        if (distpuntm.lt.dist2) then
            distpuntm=dist2
        endif
        if (distpuntm.lt.dist3) then
            distpuntm=dist3
        endif
        if (distpuntm.lt.dist4) then
            distpuntm=dist4
        endif
        dist=(dist1+dist2+dist3+dist4)/4.
        if ((dist.le.dismin).and.(distpuntm.le.discelm)) then
            ncel=ni
            mcel=mi
            dismin=dist
            rncor=(xxy-y1)*SIN(angle)+(xxx-x1)*COS(angle)
            rmcor=(xxy-y1)*COS(angle)-(xxx-x1)*SIN(angle)
            mindex=INT(1000.*mcor)
            nindex=INT(1000.*ncor)
        endif
    endif
2210 continue
2211 continue
    if (((ncel*mcel).ne.0).and.(indroos(ncel,mcel).ne.0)) then
        if (indroon(ncel,mcel).eq.0) then
            ii=ii+1
            indroon(ncel,mcel)=ii
            rcfiln(ii)='n000.000'
            write ( rcfiln(ii) (2:4), '(3a)') runname(mcel)
            write ( rcfiln(ii) (6:8), '(3a)') runname(ncel)
            jrn(ii)=ii+545679
            open (jrn(ii),file=rcfiln(ii), status='unknown',iostat=ios)
        endif
        write (jrn(indroon(ncel,mcel)),*) rncor,rmcor,xxx,xxy,xxz
    endif
221 continue
231 continue
    close (jk)
26203 continue
        inmmaxn=ii
c
ccc sluit alle bestanden
c
        do 26204 ji=1,inmmaxn
            close (jrn(ji))
26204 continue
        endif
        if (multiple.eq.0) then
            write (50,*) 'Van peiling ',drunid(nrun),' zijn ',ndeel,
+ ' bestanden verwerkt'
        else
            write (50,*) 'Van ',drunid(nrun),' zijn ',ndeel,
+ ' en van ',drunidn(nrun),' zijn ',ndeel,' bestanden verwerkt.'

```

```

endif
nwrite=1
if (ndeel.eq.0) then
  go to 101
endif
c
ccc analyseer elke puntwaarde per roostercel
c
print *, '      analyse puntwaarden'
ict=1
do 271 ij= 1 , inmmax
  do 3330 nmc = 1, mima
    nrm(nmc)=0
    nrn(nmc)=0
    mrang(nmc)=0
    nrm(nmc)=0
    nrrn(nmc)=0
    nmrang(nmc)=0
  do 3331 nnc = 1, nima
    xxl(nmc,nnc)=0.
    xyl(nmc,nnc)=0.
    xzl(nmc,nnc)=0.
    nnr(nmc,nnc)=0
    xxnl(nmc,nnc)=0.
    xyyl(nmc,nnc)=0.
    xznl(nmc,nnc)=0.
    nnnr(nmc,nnc)=0
3331    continue
3330    continue
    rnindmax(ij)=-100000000.
    rnindmin(ij)=100000000.
    rmindmax(ij)=-100000000.
    rmindmin(ij)=100000000.
    jrr=ij+9900000
    open (jrr,file=rcfil(ij),status='old',iostat=ios)
    if (ios.ne. 0) then
      goto 271
    endif
    do 3333 i = 1, nt
      read (jrr,*,end=3334) ncl(ij),mcl(ij),rnind(i),
+      rmind(i),xx(i),xy(i),xz(i)
      if (rnindmax(ij).lt.rnind(i)) then
        rnindmax(ij)=rnind(i)
      endif
      if (rmindmax(ij).lt.rmind(i)) then
        rmindmax(ij)=rmind(i)
      endif
      if (rnindmin(ij).gt.rnind(i)) then
        rnindmin(ij)=rnind(i)
      endif
      if (rmindmin(ij).gt.rmind(i)) then
        rmindmin(ij)=rmind(i)
      endif
      ijmax=i
3333    continue
3334    continue
    close (jrr,status='delete')
    if (rnindmin(ij).ge.rnindmax(ij)) then
      go to 33351
    endif
    ncormin=nima
    mcormin=mima
    ncormax=1
    mcormax=1
    inrm=0
    do 3335 i = 1, ijmax
      if ((rnindmax(ij).ne.rnindmin(ij)).and.
+      (rmindmax(ij).ne.rmindmin(ij))) then
        ncor=INT((rnind(i)-rnindmin(ij))*nima/(rnindmax(ij)-rnindmin(ij)))
        mcor=INT((rmind(i)-rmindmin(ij))*mima/(rmindmax(ij)-rmindmin(ij)))
        if (mcor.eq.0) then
          mcor=1
        endif
        if (ncor.eq.0) then

```

```

        ncor=1
    endif
    if (mcor.gt.mima) then
        mcor=mima
    endif
    if (ncor.gt.nima) then
        ncor=nima
    endif
    ncorind(i)=ncor
    mcorind(i)=mcor
    xxl(ncor,mcor)=xx(i)
    xyl(ncor,mcor)=xy(i)
    xzl(ncor,mcor)=xz(i)
    if (ncormin.gt.ncor) then
        ncormin=ncor
    endif
    if (mcormin.gt.mcor) then
        mcormin=mcor
    endif
    if (ncormax.lt.ncor) then
        ncormax=ncor
    endif
    if (mcormax.lt.mcor) then
        mcormax=mcor
    endif
endif
c
ccc rangschikken coordinaten
c
    if (inrm.lt.mima) then
        inrm=inrm+1
    endif
    nrm(inrm)=mcor
    nflag=0
do 33341 ii=1,inrm
    if ((nrm(ii).eq.mcor).and.(ii.lt.inrm)) then
        inrm=inrm-1
        go to 33342
    endif
    if ((nrm(ii).gt.mcor).or.(nflag.eq.1)) then
        if (nflag.eq.0) then
            nflag=1
            nherstel=mcor
        else
            nherstel=ndum
        endif
        ndum=nrm(ii)
        nrm(ii)=nherstel
    endif
    mrang(nrm(ii))=ii
33341 continue
33342 continue
    nrn(mcor)=nrn(mcor)+1
    if (nrn(mcor).le.nima) then
        nnr(mcor,nrn(mcor))=ncor

        nflag=0
        do 33343 ii=1,nrn(mcor)
            if ((nnr(mcor,ii).gt.ncor).or.(nflag.eq.1)) then
                if (nflag.eq.0) then
                    nflag=1
                    nherstel=ncor
                else
                    nherstel=ndum
                endif
                ndum=nnr(mcor,ii)
                nnr(mcor,ii)=nherstel
            endif
33343 continue
        else
            nrn(mcor)=nrn(mcor)-1
            nnr(mcor,nrn(mcor))=ncor
            write (50,*) 'Aantal punten op rij ',mcor,' binnen rekencel',
+             ncl(ij),mcl(ij),' overschrijdt ',nima
        endif

```

```

3335 continue
33351 continue
      if (multiple.eq.1) then
        inrmn=0
        jnr=ij+6900000
        chardum=rcfil(ij)
        write ( chardum (1:1), '(3a)') 'n'
        open (jnr,file=chardum,status='old',iostat=ios)
        if (ios .ne. 0) then
          goto 4446
        endif
        do 4443 in = 1, nt
          read (jnr,*,end=4444) rnindn(in),rmindn(in),xxn(in),xyn(in),
+             xzn(in)
          ijnmax=in
4443   continue
4444   continue
        close (jnr,status='delete')
        if ((rnindmax(ij).le.rnindmin(ij)).or.
+         (rmindmax(ij).le.rmindmin(ij))) then
          go to 271
        endif

        do 4445 i = 1, ijnmax
          ncor=INT((rnindn(i)-rnindmin(ij))*nima/
+         (rnindmax(ij)-rnindmin(ij)))
          mcor=INT((rmindn(i)-rmindmin(ij))*mima/
+         (rmindmax(ij)-rmindmin(ij)))
          if (mcor.le.0) then
            mcor=1
          endif
          if (ncor.le.0) then
            ncor=1
          endif
          if (ncor.gt.nima) then
            ncor=nima
          endif
          if (mcor.gt.mima) then
            mcor=mima
          endif
          xxnl(ncor,mcor)=xxn(i)
          xynl(ncor,mcor)=xyn(i)
          xznl(ncor,mcor)=xzn(i)

c
ccc rangschikken coordinaten nieuwe peiling
c
      if (inrmn.lt.mima) then
        inrmn=inrmn+1
      endif
      nnrn(inrmn)=mcor
      nflag=0
      do 43341 ii=1,inrmn
        if ((nnrn(ii).eq.mcor).and.(ii.lt.inrmn)) then
          inrmn=inrmn-1
          go to 43342
        endif
        if ((nnrn(ii).gt.mcor).or.(nflag.eq.1)) then
          if (nflag.eq.0) then
            nflag=1
            nherstel=mcor
          else
            nherstel=ndum
          endif
          ndum=nnrn(ii)
          nnrn(ii)=nherstel
        endif
        nmrang(nnrn(ii))=ii
43341 continue
43342 continue
      nnrn(mcor)=nnrn(mcor)+1
      if (nnrn(mcor).le.nima) then
        nnr(mcor,nnrn(mcor))=ncor
        nflag=0
        do 43343 ii=1,nnrn(mcor)

```

```

        if ((nnnr(mcor,ii).gt.ncor).or.(nflag.eq.1)) then
            if (nflag.eq.0) then
                nflag=1
                nherstel=ncor
            else
                nherstel=ndum
            endif
            ndum=nnnr(mcor,ii)
            nnnr(mcor,ii)=nherstel
        endif
43343 continue
        else
            nnrn(mcor)=nnrn(mcor)-1
            nnnr(mcor,nnrn(mcor))=ncor
            write (50,*) 'Aantal punten op rij ',mcor,' binnen rekencel',
+             ncl(ij),mcl(ij),' overschrijdt ',nima
        endif
4445 continue
4446 continue
        ninrm=inrmn
        endif

        do 270 id = 1,ijmax
            if ((rnindmax(ij).le.rnindmin(ij)).or.
+             (rmindmax(ij).le.rmindmin(ij))) then
                go to 270
            else
                ncor=ncorind(id)
                mcor=ncorind(id)
                n1=ncor
                m1=mcor
            c
ccc zoek dichtsbijzijnde punten in elk kwadrant
            c
ccc eerste en vierde kwadrant (rechts en linksboven)
            c
                nrf=0
                rin1a=90000000000.
                rin1b=90000000000.
                rin4a=90000000000.
                rin4b=90000000000.
                n1a=0
                n1b=0
                n4a=0
                n4b=0
                m1a=0
                m1b=0
                m4a=0
                m4b=0
                namr=nrm(mrang(m1))

                do 4448 jmi=mrang(m1),inrm
                    nrow=0
                    mi=nrm(jmi)
                    if ((mi.eq.m1).and.(nrn(mi).eq.1)) then
                        go to 4448
                    endif
                    ndis=(mi-m1)**2
                    ndis1=(n1a-n1)**2+(m1a-m1)**2
                    ndis4=(n4a-n1)**2+(m4a-m1)**2
                    if ((ndis.gt.ndis1).and.(ndis.gt.ndis4).and.(nrow.ne.0)) then
                        go to 44482
                    endif
                    do 44480 ii=1,nrn(mi)
                        ni=nnr(mi,ii)
                        if ((mi.eq.m1).and.(ni.eq.n1)) then
                            go to 44480
                        endif
                    nd=ni-n1
                    if (nd.lt.0) then
                        if (n4a.eq.0) then
                            n4a=ni
                            m4a=mi
                        else
                            n4b=n4a

```

```

                m4b=m4a
                n4a=ni
                m4a=mi
            endif
            else
            if (n1a.eq.0) then
                n1a=ni
                m1a=mi
            else
                n1b=n1a
                m1b=m1a
                n1a=ni
                m1a=mi
                nrow=1+nrow
            endif
        endif
    if ((n1a+n1b+n4a+n4b).eq.0) then
        go to 44480
    endif
    if (n1a.ne.0) then
        r1a=SQRT((xxl(n1a,mi)-xxl(n1,m1))**2+(xyl(n1a,mi)-xyl(n1,m1))**2)
    else
        r1a=100000000.
    endif
    if (n1b.ne.0) then
        r1b=SQRT((xxl(n1b,mi)-xxl(n1,m1))**2+(xyl(n1b,mi)-xyl(n1,m1))**2)
    else
        r1b=100000000.
    endif
    if (n4a.ne.0) then
        r4a=SQRT((xxl(n4a,mi)-xxl(n1,m1))**2+(xyl(n4a,mi)-xyl(n1,m1))**2)
    else
        r4a=100000000.
    endif
    if (n4b.ne.0) then
        r4b=SQRT((xxl(n4b,mi)-xxl(n1,m1))**2+(xyl(n4b,mi)-xyl(n1,m1))**2)
    else
        r4b=100000000.
    endif
    if (r1a.lt.r1b) then
        rop=r1a
        nop=n1a
        mop=mi
        ros=r1b
        nos=n1b
        mos=mi
    else
        rop=r1b
        nop=n1b
        mop=mi
        ros=r1a
        nos=n1a
        mos=mi
    endif
    if ((rop.lt.rinla).and.(rop.lt.100000000.)) then
        if (rinla.lt.rinlb) then
            rinlb=rinla
            ninlb=ninla
            minlb=minla
        endif
        rinla=rop
        ninla=nop
        minla=mop
    endif
    if ((ros.lt.rinlb).and.(ros.lt.100000000.)) then
        rinlb=ros
        ninlb=nos
        minlb=mos
    endif
    if (r4a.lt.r4b) then
        rop=r4a
        nop=n4a
        mop=mi
        ros=r4b
        nos=n4b
    endif

```

```

mos=mi
else
rop=r4b
nop=n4b
mop=mi
ros=r4a
nos=n4a
mos=mi
endif
if ((rop.lt.rin4a).and.(rop.lt.1000000.)) then
  if (rin4a.lt.rin4b) then
    rin4b=rin4a
    nin4b=nin4a
    min4b=min4a
  endif
  rin4a=rop
  nin4a=nop
  min4a=mop
endif
if ((ros.lt.rin4b).and.(ros.lt.1000000.)) then
  rin4b=ros
  nin4b=nos
  min4b=mos
endif
if (nrow.eq.2) then
  go to 4448
endif
44480 continue
4448 continue
44482 continue
c
ccc tweede en derde kwadrant (rechts en linksonder)
c
  nrf=0
  rin2a=9000000000.
  rin2b=9000000000.
  rin3a=9000000000.
  rin3b=9000000000.
  n2a=0
  n2b=0
  n3a=0
  n3b=0
  m2a=0
  m2b=0
  m3a=0
  m3b=0
  if (mrang(m1).le.1) then
    mrangmax=mrang(m1)
  else
    mrangmax=mrang(m1)-1
  endif
do 4449 jj=1,mrangmax
  nrow=0
  jmi=mrangmax+1-jj
  mi=nrn(jmi)
  if ((m1.eq.m1).and.(nrn(mi).eq.1)) then
    go to 4449
  endif
  ndis=(mi-m1)**2
  rdis1=((n2a-n1)**2+(m2a-m1)**2)
  rdis4=((n3a-n1)**2+(m3a-m1)**2)
  if ((ndis.gt.rdis1).and.(ndis.gt.rdis4).and.(nrow.ne.0)) then
    go to 4449
  endif
do 44490 ii=1,nrn(mi)
  ni=nnr(mi,ii)
  if ((mi.eq.m1).and.(ni.eq.n1)) then
    go to 44490
  endif
  nd=ni-n1
  if (nd.lt.0) then
    if (n3a.eq.0) then
      n3a=ni
      m3a=mi
    else

```



```

                n3b=n3a
                m3b=m3a
                n3a=ni
                m3a=mi
            endif
            else
            if (n2a.eq.0) then
                n2a=ni
                m2a=mi
            else
                n2b=n2a
                m2b=m2a
                n2a=ni
                m2a=mi
                nrow=1+nrow
            endif
        endif
    if ((n2a+n2b+n3a+n3b).eq.0) then
        go to 44490
    endif
    if (n2a.ne.0) then
        r2a=SQRT((xxl(n2a,mi)-xxl(n1,m1))**2+(xyl(n2a,mi)-xyl(n1,m1))**2)
    else
        r2a=100000000.
    endif
    if (n2b.ne.0) then
        r2b=SQRT((xxl(n2b,mi)-xxl(n1,m1))**2+(xyl(n2b,mi)-xyl(n1,m1))**2)
    else
        r2b=100000000.
    endif
    if (n3a.ne.0) then
        r3a=SQRT((xxl(n3a,mi)-xxl(n1,m1))**2+(xyl(n3a,mi)-xyl(n1,m1))**2)
    else
        r3a=100000000.
    endif
    if (n3b.ne.0) then
        r3b=SQRT((xxl(n3b,mi)-xxl(n1,m1))**2+(xyl(n3b,mi)-xyl(n1,m1))**2)
    else
        r3b=100000000.
    endif
    if (r2a.lt.r2b) then
        rop=r2a
        nop=n2a
        mop=mi
        ros=r2b
        nos=n2b
        mos=mi
    else
        rop=r2b
        nop=n2b
        mop=mi
        ros=r2a
        nos=n2a
        mos=mi
    endif
    if ((rop.lt.rin2a).and.(rop.lt.100000000.)) then
        if (rin2a.lt.rin2b) then
            rin2b=rin2a
            nin2b=nin2a
            min2b=min2a
        endif
        rin2a=rop
        nin2a=nop
        min2a=mop
    endif
    if ((ros.lt.rin2b).and.(ros.lt.100000000.)) then
        rin2b=ros
        nin2b=nos
        min2b=mos
    endif
    if (r3a.lt.r3b) then
        rop=r3a
        nop=n3a
        mop=mi
        ros=r3b
    endif

```

```

        nos=n3b
        mos=mi
        else
rop=r3b
        nop=n3b
        mop=mi
        ros=r3a
        nos=n3a
        mos=mi
        endif
        if ((rop.lt.rin3a).and.(rop.lt.10000000.)) then
            if (rin3a.lt.rin3b) then
                rin3b=rin3a
                nin3b=nin3a
                min3b=min3a
            endif
            rin3a=rop
            nin3a=nop
            min3a=mop
        endif
        if ((ros.lt.rin3b).and.(ros.lt.10000000.)) then
            rin3b=ros
            nin3b=nos
            min3b=mos
        endif
        if (nrow.eq.2) then
            go to 4449
        endif
44490 continue
4449 continue
44492 continue
        jflag1=1
        if (((nin1a*nin2a).ne.0).and.((rin1a+rin2a).lt.2000.)) then
            X1=xxl(nin1a,min1a)-xxl(n1,m1)
            Y1=xyl(nin1a,min1a)-xyl(n1,m1)
            Z1=xzl(nin1a,min1a)-xzl(n1,m1)
            X2=xxl(nin2a,min2a)-xxl(n1,m1)
            Y2=xyl(nin2a,min2a)-xyl(n1,m1)
            Z2=xzl(nin2a,min2a)-xzl(n1,m1)
            if (X1*Y2.ne.X2*Y1) then
                C1zx=(Z1*Y2-Z2*Y1)/(X1*Y2-X2*Y1)
                C1zy=(Z2*X1-Z1*X2)/(X1*Y2-X2*Y1)
                XM1=SQRT((X1+X2)**2+(Y1+Y2)**2)
            else
                jflag1=0
                C1zx=0.
                C1zy=0.
            endif
        else
            jflag1=0
        endif
        jflag2=1
        if (((nin3a*nin4a).ne.0).and.((rin3a+rin4a).lt.2000.)) then
            X1=xxl(nin3a,min3a)-xxl(n1,m1)
            Y1=xyl(nin3a,min3a)-xyl(n1,m1)
            Z1=xzl(nin3a,min3a)-xzl(n1,m1)
            X2=xxl(nin4a,min4a)-xxl(n1,m1)
            Y2=xyl(nin4a,min4a)-xyl(n1,m1)
            Z2=xzl(nin4a,min4a)-xzl(n1,m1)
            if (X1*Y2.ne.X2*Y1) then
                C2zx=(Z1*Y2-Z2*Y1)/(X1*Y2-X2*Y1)
                C2zy=(Z2*X1-Z1*X2)/(X1*Y2-X2*Y1)
                XM2=SQRT((X1+X2)**2+(Y1+Y2)**2)
            else
                jflag2=0
                C2zx=0.
                C2zy=0.
            endif
        else
            jflag2=0
        endif
        jflag3=1
        if (((nin3a*nin2a).ne.0).and.((rin3a+rin2a).lt.2000.)) then
            X1=xxl(nin3a,min3a)-xxl(n1,m1)
            Y1=xyl(nin3a,min3a)-xyl(n1,m1)

```

```

Z1=xzl(nin3a,min3a)-xzl(n1,m1)
X2=xxl(nin2a,min2a)-xxl(n1,m1)
Y2=xyl(nin2a,min2a)-xyl(n1,m1)
Z2=xzl(nin2a,min2a)-xzl(n1,m1)
  if (X1*Y2.ne.X2*Y1) then
    C3zx=(Z1*Y2-Z2*Y1)/(X1*Y2-X2*Y1)
    C3zy=(Z2*X1-Z1*X2)/(X1*Y2-X2*Y1)
    XM3=SQRT((X1+X2)**2+(Y1+Y2)**2)
  else
    jflag3=0
    C3zx=0.
    C3zy=0.
  endif
endif
else
  jflag3=0
  endif
endif
jflag4=1
if (((nin4a*nin1a).ne.0).and.((rin4a+rin1a).lt.2000.)) then
  X1=xxl(nin4a,min4a)-xxl(n1,m1)
  Y1=xyl(nin4a,min4a)-xyl(n1,m1)
  Z1=xzl(nin4a,min4a)-xzl(n1,m1)
  X2=xxl(nin1a,min1a)-xxl(n1,m1)
  Y2=xyl(nin1a,min1a)-xyl(n1,m1)
  Z2=xzl(nin1a,min1a)-xzl(n1,m1)
  if (X1*Y2.ne.X2*Y1) then
    C4zx=(Z1*Y2-Z2*Y1)/(X1*Y2-X2*Y1)
    C4zy=(Z2*X1-Z1*X2)/(X1*Y2-X2*Y1)
    XM4=SQRT((X1+X2)**2+(Y1+Y2)**2)
  else
    jflag4=0
    C4zx=0.
    C4zy=0.
  endif
endif
else
  jflag4=0
  endif
endif

  if ((jflag1+jflag2+jflag3+jflag4).eq.0) then

jflag1=1
if (((nin1a*nin3a).ne.0).and.((rin1a+rin3a).lt.2000.)) then
  X1=xxl(nin1a,min1a)-xxl(n1,m1)
  Y1=xyl(nin1a,min1a)-xyl(n1,m1)
  Z1=xzl(nin1a,min1a)-xzl(n1,m1)
  X2=xxl(nin3a,min3a)-xxl(n1,m1)
  Y2=xyl(nin3a,min3a)-xyl(n1,m1)
  Z2=xzl(nin3a,min3a)-xzl(n1,m1)
  if (X1*Y2.ne.X2*Y1) then
    C1zx=(Z1*Y2-Z2*Y1)/(X1*Y2-X2*Y1)
    C1zy=(Z2*X1-Z1*X2)/(X1*Y2-X2*Y1)
    XM1=SQRT((X1+X2)**2+(Y1+Y2)**2)
  else
    jflag1=0
    C1zx=0.
    C1zy=0.
  endif
endif
else
  jflag1=0
  endif
endif
jflag2=1
if (((nin4a*nin2a).ne.0).and.((rin4a+rin2a).lt.2000.)) then
  X1=xxl(nin4a,min4a)-xxl(n1,m1)
  Y1=xyl(nin4a,min4a)-xyl(n1,m1)
  Z1=xzl(nin4a,min4a)-xzl(n1,m1)
  X2=xxl(nin2a,min2a)-xxl(n1,m1)
  Y2=xyl(nin2a,min2a)-xyl(n1,m1)
  Z2=xzl(nin2a,min2a)-xzl(n1,m1)
  if (X1*Y2.ne.X2*Y1) then
    C2zx=(Z1*Y2-Z2*Y1)/(X1*Y2-X2*Y1)
    C2zy=(Z2*X1-Z1*X2)/(X1*Y2-X2*Y1)
    XM2=SQRT((X1+X2)**2+(Y1+Y2)**2)
  else
    jflag2=0
    C2zx=0.
    C2zy=0.
  endif
endif
endif
endif

```

```

        endif
    else
        jflag2=0
    endif
    jflag3=1
    if ((nin1a*nin1b).ne.0).and.((rin1a+rin1b).lt.2000.) then
        X1=xxl(nin1a,min1a)-xxl(n1,m1)
        Y1=xyl(nin1a,min1a)-xyl(n1,m1)
        Z1=xzl(nin1a,min1a)-xzl(n1,m1)
        X2=xxl(nin1b,min1b)-xxl(n1,m1)
        Y2=xyl(nin1b,min1b)-xyl(n1,m1)
        Z2=xzl(nin1b,min1b)-xzl(n1,m1)
        if (X1*Y2.ne.X2*Y1) then
            C3zx=(Z1*Y2-Z2*Y1)/(X1*Y2-X2*Y1)
            C3zy=(Z2*X1-Z1*X2)/(X1*Y2-X2*Y1)
            XM3=SQRT((X1+X2)**2+(Y1+Y2)**2)
        else
            jflag3=0
            C3zx=0.
            C3zy=0.
        endif
    else
        jflag3=0
    endif
    jflag4=1
    if ((nin2a*nin2b).ne.0).and.((rin2a+rin2b).lt.2000.) then
        X1=xxl(nin2a,min2a)-xxl(n1,m1)
        Y1=xyl(nin2a,min2a)-xyl(n1,m1)
        Z1=xzl(nin2a,min2a)-xzl(n1,m1)
        X2=xxl(nin2b,min2b)-xxl(n1,m1)
        Y2=xyl(nin2b,min2b)-xyl(n1,m1)
        Z2=xzl(nin2b,min2b)-xzl(n1,m1)
        if (X1*Y2.ne.X2*Y1) then
            C4zx=(Z1*Y2-Z2*Y1)/(X1*Y2-X2*Y1)
            C4zy=(Z2*X1-Z1*X2)/(X1*Y2-X2*Y1)
            XM4=SQRT((X1+X2)**2+(Y1+Y2)**2)
        else
            jflag4=0
            C4zx=0.
            C4zy=0.
        endif
    else
        jflag4=0
    endif
    endif
c
ccc bepaal bodemgradient
c
    if (jflag1.eq.1) then
        dzxm=C1zx
        dzym=C1zy
    else
        if (jflag2.eq.1) then
            dzxm=C2zx
            dzym=C2zy
        else
            if (jflag3.eq.1) then
                dzxm=C3zx
                dzym=C3zy
            else
                if (jflag4.eq.1) then
                    dzxm=C4zx
                    dzym=C4zy
                else
                    dzxm=0.
                    dzym=0.
                endif
            endif
        endif
    endif
    endif
    gdzxm(ict)=dzxm
    gdzym(ict)=dzym
    nrcl(ict)=ncl(ij)
    mrcl(ict)=mcl(ij)

```

```

        ict=ict+1
        dz=0.0
        if (multiple.eq.1) then
c
ccc zoek dichtsbijzijnde bodempunt in nieuwe bodemfile
c
        if (ninrm.eq.0) then
            nnflag(ncl(ij),mcl(ij))=0
            nf1=0
            nf2=0
            nf3=0
            nf4=0
            go to 45493
        else
            nnflag(ncl(ij),mcl(ij))=1
        endif

        igrens=1
        do 4570 i=1,ninrm
            if (nnrm(i).ge.m1) then
                igrens=i
                go to 4571
            endif
4570 continue
4571 continue
c
ccc zoek dichtsbijzijnde punten in elk kwadrant
ccc eerste en vierde kwadrant (rechts en linksboven)
c
        nrow=0
        nrf=0
        rinla=900000000.
        rin4a=900000000.
        nla=0
        n4a=0
        mla=0
        m4a=0
        do 4548 jmi=igrens,ninrm
            mi=nnrm(jmi)
            ndis=(mi-m1)**2
            ndis1=(nla-n1)**2+(mla-m1)**2
            ndis4=(n4a-n1)**2+(m4a-m1)**2
            if ((nrow.ne.0).and.(ndis.gt.ndis1).and.(ndis.gt.ndis4)) then
                go to 45482
            endif
            do 45480 ii=1,nnrn(mi)
                ni=nnnr(mi,ii)
                nd=ni-n1
                if (nd.lt.0) then
                    n4a=ni
                    m4a=mi
                else
                    if (nla.ne.0) then
                        nrow=1+nrow
                    endif
                    nla=ni
                    mla=mi
                    if ((mi.eq.m1).and.(ni.eq.n1)) then
                        ninla=ni
                        minla=mi
                        XA=xxnl(ninla,minla)-xxl(n1,m1)
                        YA=xynl(ninla,minla)-xyl(n1,m1)
                        ZA=xznl(ninla,minla)-xzl(n1,m1)
                        XdisA=SQRT(XA**2+YA**2)
                        if (XdisA.eq.0.) then
                            nf1=1
                            nf2=0
                            nf3=0
                            nf4=0
                            go to 45493
                        endif
                    endif
                endif
            do 45480
                if ((nla+n4a).eq.0) then
                    go to 45480

```

```

endif

if (n1a.ne.0) then
r1a=SQRT((xxnl(n1a,mi)-xxl(n1,m1))**2+
+ (xynl(n1a,mi)-xyl(n1,m1))**2)
else
r1a=100000000.
endif
if (n4a.ne.0) then
r4a=SQRT((xxnl(n4a,mi)-xxl(n1,m1))**2+
+ (xynl(n4a,mi)-xyl(n1,m1))**2)
else
r4a=100000000.
endif
if ((r1a.lt.rin1a).and.(r1a.lt.1000000.)) then
rin1a=r1a
nin1a=n1a
min1a=m1a
endif
if ((r4a.lt.rin4a).and.(r4a.lt.1000000.)) then
rin4a=r4a
nin4a=n4a
min4a=m4a
endif
if (nrow.eq.2) then
go to 4548
endif
45480 continue
4548 continue
45482 continue
c
ccc tweede en derde kwadrant (rechts en linksonder)
c
nrow=0
nrf=0
rin2a=900000000.
rin3a=900000000.
n2a=0
n3a=0
m2a=0
m3a=0

if (igrens.gt.1) then
igrens=igrens-1
endif
do 4549 jj=1,igrens
jmi=igrens+1-jj
mi=nnrm(jmi)
ndis=(mi-m1)**2
ndis2=(n2a-n1)**2+(m2a-m1)**2
ndis3=(n3a-n1)**2+(m3a-m1)**2
if ((nrow.ne.0).and.(ndis.gt.ndis2).and.(ndis.gt.ndis3)) then
go to 45492
endif
do 45490 ii=1,nnrn(mi)
ni=nnr(mi,ii)
if ((mi.eq.m1).and.(ni.eq.n1)) then
go to 45490
endif
nd=ni-n1
if (nd.lt.0) then
n3a=ni
m3a=mi
else
if (n2a.ne.0) then
nrow=1+nrow
endif
n2a=ni
m2a=mi
if ((mi.eq.m1).and.(ni.eq.n1)) then
nin1a=ni
min1a=mi
XA=xxnl(nin1a,min1a)-xxl(n1,m1)
YA=xynl(nin1a,min1a)-xyl(n1,m1)
ZA=xznl(nin1a,min1a)-xzl(n1,m1)

```

```

XdisA=SQRT(XA**2+YA**2)
if (XdisA.eq.0.) then
  nf1=1
  nf2=0
  nf3=0
  nf4=0
  go to 45493
endif
endif
endif
if ((n2a+n3a).eq.0) then
  go to 45490
endif
if (n2a.ne.0) then
r2a=SQRT((xxnl(n2a,mi)-xxl(n1,m1))**2+
+ (xynl(n2a,mi)-xyl(n1,m1))**2)
  else
  r2a=100000000.
  endif
if (n3a.ne.0) then
r3a=SQRT((xxnl(n3a,mi)-xxl(n1,m1))**2+
+ (xynl(n3a,mi)-xyl(n1,m1))**2)
  else
  r3a=100000000.
  endif
if ((r2a.lt.rin2a).and.(r2a.lt.10000000.)) then
  rin2a=r2a
  nin2a=n2a
  min2a=m2a
endif
if ((r3a.lt.rin3a).and.(r3a.lt.10000000.)) then
  rin3a=r3a
  nin3a=n3a
  min3a=m3a
endif
if (nrow.eq.2) then
  go to 4549
endif
45490 continue
4549 continue
45492 continue
nf1=1
nf2=1
nf3=1
nf4=1
if (nin1a.ne.0) then
XA=xxnl(nin1a,min1a)-xxl(n1,m1)
YA=xynl(nin1a,min1a)-xyl(n1,m1)
ZA=xznl(nin1a,min1a)-xzl(n1,m1)
  else
if (nin1b.ne.0) then
  XA=xxnl(nin1b,min1b)-xxl(n1,m1)
  YA=xynl(nin1b,min1b)-xyl(n1,m1)
  ZA=xznl(nin1b,min1b)-xzl(n1,m1)
  else
  XA=0.
  YA=0.
  ZA=0.
  nf1=0
  endif
endif
if (nin2a.ne.0) then
XB=xxnl(nin2a,min2a)-xxl(n1,m1)
YB=xynl(nin2a,min2a)-xyl(n1,m1)
ZB=xznl(nin2a,min2a)-xzl(n1,m1)
  else
if (nin2b.ne.0) then
  XB=xxnl(nin2b,min2b)-xxl(n1,m1)
  YB=xynl(nin2b,min2b)-xyl(n1,m1)
  ZB=xznl(nin2b,min2b)-xzl(n1,m1)
  else
  XB=0.
  YB=0.
  ZB=0.
  nf2=0

```

```

        endif
    endif
    if (nin3a.ne.0) then
XC=xxnl(nin3a,min3a)-xxl(n1,m1)
YC=xynl(nin3a,min3a)-xyl(n1,m1)
ZC=xznl(nin3a,min3a)-xzl(n1,m1)
    else
        if (nin3b.ne.0) then
XC=xxnl(nin3b,min3b)-xxl(n1,m1)
YC=xynl(nin3b,min3b)-xyl(n1,m1)
ZC=xznl(nin3b,min3b)-xzl(n1,m1)
        else
XC=0.
YC=0.
ZC=0.
nf3=0
        endif
    endif
    if (nin4a.ne.0) then
XD=xxnl(nin4a,min4a)-xxl(n1,m1)
YD=xynl(nin4a,min4a)-xyl(n1,m1)
ZD=xznl(nin4a,min4a)-xzl(n1,m1)
    else
        if (nin4b.ne.0) then
XD=xxnl(nin4b,min4b)-xxl(n1,m1)
YD=xynl(nin4b,min4b)-xyl(n1,m1)
ZD=xznl(nin4b,min4b)-xzl(n1,m1)
        else
XD=0.
YD=0.
ZD=0.
nf4=0
        endif
    endif
    endif
XdisA=SQRT(XA**2+YA**2)
XdisB=SQRT(XB**2+YB**2)
XdisC=SQRT(XC**2+YC**2)
XdisD=SQRT(XD**2+YD**2)
c
ccc bepaal bodemverandering
c
45493 continue
zzn=0.
Xtot=0.0
    if (nf1.ne.0) then
        if (XdisA.gt.0.01) then
            zzn=zzn+ZA/XdisA
            Xtot=Xtot+1./XdisA
        else
            Xtot=1.
            zzn=ZA
            nf2=0
            nf3=0
            nf4=0
        endif
    endif
    if (nf2.ne.0) then
        if (XdisB.gt.0.01) then
            zzn=zzn+ZB/XdisB
            Xtot=Xtot+1./XdisB
        else
            Xtot=1.
            zzn=ZB
            nf3=0
            nf4=0
        endif
    endif
    if (nf3.ne.0) then
        if (XdisC.gt.0.01) then
            zzn=zzn+ZC/XdisB
            Xtot=Xtot+1./XdisB
        else
            Xtot=1.
            zzn=ZB
            nf4=0
        endif
    endif

```



```

        endif
    endif
    if (nf4.ne.0) then
        if (XdisD.gt.0.01) then
            zzn=zzn+ZD/XdisD
            Xtot=Xtot+1./XdisD
        else
            Xtot=1.
            zzn=ZD
        endif
    endif
    endif
    if (Xtot.ne.0.) then
        dz=zzn/Xtot
    else
        dz=0.
    endif
    endif
    endif
c
ccc bepaal statistiek per roostercel
c
    dx=xxl(n1,m1)-xxr(ncl(ij),mcl(ij))
    dxx=dx**2
    dy=xyl(n1,m1)-xyr(ncl(ij),mcl(ij))
    dyy=dy**2
    dxy=dx*dy
    dzx=xzl(n1,m1)*dx
    dzy=xzl(n1,m1)*dy
    ncount(ncl(ij),mcl(ij))=ncount(ncl(ij),mcl(ij))+1
    aver(ncl(ij),mcl(ij))=aver(ncl(ij),mcl(ij))+xzl(n1,m1)
    rsign(ncl(ij),mcl(ij))=rsign(ncl(ij),mcl(ij))+xzl(n1,m1)**2
    gzxm(ncl(ij),mcl(ij))=gzxm(ncl(ij),mcl(ij))+dzzxm
    gzym(ncl(ij),mcl(ij))=gzym(ncl(ij),mcl(ij))+dzym
    ax(ncl(ij),mcl(ij))=ax(ncl(ij),mcl(ij))+dx
    axx(ncl(ij),mcl(ij))=axx(ncl(ij),mcl(ij))+dxx
    axy(ncl(ij),mcl(ij))=axy(ncl(ij),mcl(ij))+dxy
    ay(ncl(ij),mcl(ij))=ay(ncl(ij),mcl(ij))+dy
    ayy(ncl(ij),mcl(ij))=ayy(ncl(ij),mcl(ij))+dyy
    azx(ncl(ij),mcl(ij))=azx(ncl(ij),mcl(ij))+dzz
    azy(ncl(ij),mcl(ij))=azy(ncl(ij),mcl(ij))+dzy
    if (multiple.eq.1) then
        dzm(ncl(ij),mcl(ij))=dzm(ncl(ij),mcl(ij))+dz
        dzv(ncl(ij),mcl(ij))=dzv(ncl(ij),mcl(ij))+dz*dz
        vzxm(ncl(ij),mcl(ij))=vzxm(ncl(ij),mcl(ij))+dzzxm*dz
        vzym(ncl(ij),mcl(ij))=vzym(ncl(ij),mcl(ij))+dzym*dz
        rzxm(ncl(ij),mcl(ij))=rzxm(ncl(ij),mcl(ij))+dzzxm**2
        rzym(ncl(ij),mcl(ij))=rzym(ncl(ij),mcl(ij))+dzym**2
        rzxy(ncl(ij),mcl(ij))=rzxy(ncl(ij),mcl(ij))+dzym*dzzxm
        ncountn(ncl(ij),mcl(ij))=ncountn(ncl(ij),mcl(ij))+1
    endif
    if ((ict.gt.(nant/10-1)).and.(ict.lt.(nant/10+1))) then
        print *, '          10 %'
    endif
    if ((ict.gt.(2*nant/10-1)).and.(ict.lt.(2*nant/10+1))) then
        print *, '          20 %'
    endif
    if ((ict.gt.(3*nant/10-1)).and.(ict.lt.(3*nant/10+1))) then
        print *, '          30 %'
    endif
    if ((ict.gt.(4*nant/10-1)).and.(ict.lt.(4*nant/10+1))) then
        print *, '          40 %'
    endif
    if ((ict.gt.(5*nant/10-1)).and.(ict.lt.(5*nant/10+1))) then
        print *, '          50 %'
    endif
    if ((ict.gt.(6*nant/10-1)).and.(ict.lt.(6*nant/10+1))) then
        print *, '          60 %'
    endif
    if ((ict.gt.(7*nant/10-1)).and.(ict.lt.(7*nant/10+1))) then
        print *, '          70 %'
    endif
    if ((ict.gt.(8*nant/10-1)).and.(ict.lt.(8*nant/10+1))) then
        print *, '          80 %'
    endif
    if ((ict.gt.(9*nant/10-1)).and.(ict.lt.(9*nant/10+1))) then
        print *, '          90 %'

```

```

        endif
    endif
270 continue
271 continue
    print *, '          100 %'
c
ccc bepaal met fit per cel gemiddelde en gradienten van lineaire component
c
do 33 ni = nmin , nmax
do 34 mi = mmin , mmax
    if (ncount(ni,mi).eq.0) then
        go to 34
    endif
    rsigm(ni,mi)=rsigm(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    aver(ni,mi)=aver(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    gzxm(ni,mi)=gzxm(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    gzym(ni,mi)=gzym(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    rdx=ax(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    rdx=axx(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    rdy=axy(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    rdy=ayy(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    rdz=axz(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    rdz=azy(ni,mi)/ncount(ni,mi)
    rnoemer=(rdxy-rdx*rdy)**2-(rdxx-rdx**2)*(rdyy-rdy**2)
    rtellera=(rdxy-rdx*rdy)*2*(rdzy-rdy*aver(ni,mi))
+   -(rdyy-rdy**2)*(rdzx-rdx*aver(ni,mi))
    rtellerb=(rdxy-rdx*rdy)*(rdzx-rdx*aver(ni,mi))
+   -(rdxx-rdx**2)*(rdzy-rdy*aver(ni,mi))
    if (rnoemer.ne.0.) then
        Grady=rtellerb/rnoemer
        Gradx=rtellera/rnoemer
        zzm=aver(ni,mi)-Gradx*rdx-Grady*rdy
        Eps=rsigm(ni,mi)-2.*zzm*aver(ni,mi)+zzm**2+
+   Gradx**2*rdxx+Grady**2*rdyy+2.*Gradx*Grady*rdxy+
+   -2.*Gradx*rdzx-2.*Grady*rdzy+2.*zzm*(Gradx*rdx+Grady*rdy)
        if (Eps.lt.0.0) then
            Eps=0.
        else
            Eps=sqrt(12.*Eps)
        endif
    else
        zzm=999.
        Eps=-999.
        Gradx=999.
        Grady=999.
    endif
    rampli2(ni,mi)=Eps
    Ggradx(ni,mi)=Gradx
    Ggrady(ni,mi)=Grady
    Gzzm(ni,mi)=zzm
c
ccc bepaal positieve en negatieve bodemgradient tov lineaire component
c
Ggzxm(ni,mi)=0.
Ggzxp(ni,mi)=0.
Ggzym(ni,mi)=0.
Ggzyp(ni,mi)=0.
Ggi13p(ni,mi)=0.
Ggi13m(ni,mi)=0.
Rgzxpa(ni,mi)=0.
Rgzypa(ni,mi)=0.
numl3p(ni,mi)=0
numl3m(ni,mi)=0
Ggi24p(ni,mi)=0.
Ggi24m(ni,mi)=0.
Rphi13(ni,mi)=0.
num24p(ni,mi)=0
num24m(ni,mi)=0
Rgzxm(ni,mi)=0.
Rgzxp(ni,mi)=0.
Rgzym(ni,mi)=0.
Rgzyp(ni,mi)=0.
numxm(ni,mi)=0
numxp(ni,mi)=0

```

```

        numym(ni,mi)=0
        numyp(ni,mi)=0
34 continue
33 continue
    do 35 id= 1, (ict-1)
        ni=nrcl(id)
        mi=mrcl(id)
        dumx=1000.*(gdzxm(id)-Ggradx(ni,mi))
        dumy=1000.*(gdzym(id)-Ggrady(ni,mi))
c        dumx=gdzxm(id)-gzxm(ni,mi)
c        dumy=gdzym(id)-gzym(ni,mi)
ccc vergelijkking gradienten
        dumgs=SQRT(dumx**2+dumy**2)
        if (dumy.ne.0.) then
            dumt=180.*ATAN(dumx/dumy)/RPI
        else
            if (dumx.ge.0) then
                dumt=90.
            else
                dumt=-90.
            endif
        endif
c    sommeer richtingsvectoren
        if (dumgs.ne.0.) then
            dumx=dumx/dumgs
            dumy=dumy/dumgs
        endif
        rsumx(ni,mi)=rsumx(ni,mi)+dumx
        rsumy(ni,mi)=rsumy(ni,mi)+dumy
    35 continue
c
ccc bepaal hoek met sommatie van richtingsvectoren
c
    do 351 ni=nmin,nmax
    do 352 mi=mmin,mmax
        if (rsumy(ni,mi).ne.0.) then
            dumt=180.*ATAN(rsumx(ni,mi)/rsumy(ni,mi))/RPI
        else
            if (rsumx(ni,mi).ge.0) then
                dumt=90.
            else
                dumt=-90.
            endif
        endif
        Rphi13(ni,mi)=dumt
        if (Rphi13(ni,mi).lt.0.) then
            Rphi13(ni,mi)=Rphi13(ni,mi)+360.
        endif
        if (Rphi13(ni,mi).ge.360.) then
            Rphi13(ni,mi)=Rphi13(ni,mi)-360.
        endif
    352 continue
    351 continue
    do 354 id= 1, (ict-1)
        ni=nrcl(id)
        mi=mrcl(id)
        dumx=gdzxm(id)-Ggradx(ni,mi)
        dumy=gdzym(id)-Ggrady(ni,mi)
c        dumx=gdzxm(id)-gzxm(ni,mi)
c        dumy=gdzym(id)-gzym(ni,mi)
ccc vergelijkking gradienten
c
        dumgs=SIN(RPI*Rphi13(ni,mi)/180.)*dumx+
+        COS(RPI*Rphi13(ni,mi)/180.)*dumy
        if (dumgs.ge.0.) then
            Rgzxp(ni,mi)=Rgzxp(ni,mi)+dumgs
            numxp(ni,mi)=numxp(ni,mi)+1
        else
            Rgzxm(ni,mi)=Rgzxm(ni,mi)+dumgs
            numxm(ni,mi)=numxm(ni,mi)+1
        endif
        gdzxm(id)=0.
        gdzym(id)=0.
    354 continue
c

```

```

ccc open de uitvoerbestanden
c
  j2=j1+1
  cufil2 = drunid(nrun) // 'results.txt'
  open (j2,file=cufil2,status='unknown',iostat=ios)
  if (multiple.eq.0) then
  write (j2,*) 'x y n m number bedlevel[cm]+NAP amplitude[cm]
+ length[cm] Ltrough/Ltotal azimuth[grd] celerity[cm/day]
+ transport[cm2/day] ',drunid(nrun)
  else
  write (j2,*) 'x y n m number bedlevel[cm]+NAP amplitude[cm]
+ length[cm] Ltrough/Ltotal azimuth[grd] celri[cm/day]
+ celerity[cm/day]
+ transport[cm2/day] ',drunidn(nrun),'-',drunid(nrun)
  endif
  j5=j2+1
  cufil5 = drunid(nrun) // 'direction.txt'
  open (j5,file=cufil5,status='unknown',iostat=ios)
  if (multiple.eq.0) then
  write (j5,*) 'x y azimuth est-migrationrate[cm/day]',
+ drunid(nrun)
  else
  write (j5,*) 'x y azimuth migrationrate[cm/day] ',
+ drunidn(nrun),'-',drunid(nrun)
  endif
c
ccc bepaal bodemparameters en schrijf uitvoer
c
  do 36 ni = nmin , nmax
  do 37 mi = mmin , mmax
    if (ncount(ni,mi).eq.0) then
      nzzm=999
      rs=999.
      write (j2, '(f12.2,a,f12.2,a,i4,a,i4,a,i5)')
+ xxr(ni,mi),' ',xyr(ni,mi),' ',ni,' ',mi,' ',ncount(ni,mi)
      go to 37
    endif
    nz = INT(100.*aver(ni,mi))
    nzzm = INT(100.*Gzzm(ni,mi))
    neps = INT(100.*rampli2(ni,mi))
    if (Rgzxm(ni,mi).ne.0) then
      rmmax=-rampli2(ni,mi)*numxm(ni,mi)/Rgzxm(ni,mi)
    else
      rmmax=999.
    endif
    if (Rgzxp(ni,mi).ne.0) then
      rpmax=ramplic2(ni,mi)*numxp(ni,mi)/Rgzxp(ni,mi)
    else
      rpmax=999.
    endif
    if (rpmax.gt.rmmax) then
      rphi=Rphi13(ni,mi)
      rp1=rpmax
      rp2=rmmax
    else
      rphi=Rphi13(ni,mi)+180.
      if (rphi.gt.360.) then
        rphi=rphi-360.
      endif
      rp1=rmmax
      rp2=rpmax
    endif
    rlengup=rp1
    rlengdo=rp2
    rleng=rlengdo+rlengup
    if (rleng.ne.0.) then
      rasim=rlengdo/rleng
    else
      rasim = 999.
    endif
    nml= INT (100*rleng)

    if (multiple.eq.0) then
      cel=ABS(rasim-0.5)
      nozc=0

```

```

nnzc=0
nnzcl=0
else
noz=0
nnzc=0
nnzcl=0
if ((ncountn(ni,mi).eq.0).or.(nflag(ni,mi).eq.0)) then
write (50,*) 'In rekencel (' ,ni,',' ,mi,')
+ geen overlap gevonden tussen ',drunid(nrun),' en ',drunidn(nrun)
nflagcel=0
else
nflagcel=1
dzm(ni,mi)=dzm(ni,mi)/ncountn(ni,mi)
dzv(ni,mi)=dzv(ni,mi)/ncountn(ni,mi)-dzm(ni,mi)**2
celdu=dtime(nrun)*(
+ rzxm(ni,mi)*(sin(Rphil3(ni,mi)*RPI/180.))**2+
+ rzym(ni,mi)*(cos(Rphil3(ni,mi)*RPI/180.))**2+
+ rzxy(ni,mi)*sin(2.*Rphil3(ni,mi)*RPI/180.)/ncountn(ni,mi)
celdu=celdu*celdu
celdu=sqrt(celdu)
if (celdu.ne.0.) then
if (dzv(ni,mi).ge.0) then
celri=SQRT(dzv(ni,mi)/celdu)
else
celri=999.
endif
else
celri=999.
endif

endif
endif
if ((multiple.eq.1).and.(nflagcel.eq.0)) then
else
nnz=INT(100.*celri)
noz=INT (rphi)
write (j5,'(f12.2,a,f12.2,a,i12,a,i12)')
+ xxr(ni,mi),' ',xyr(ni,mi),' ',noz,' ',nnz
rs=0.7*rampli2(ni,mi)*celri*10000.
nrs = INT(rs)
endif
write (j2,'(f12.2,a,f12.2,a,i4,a,i4,a,i5,a,i8,a,i8,a,i8,a,f5.2,a,i8,a,i8,a,i8)')
+ xxr(ni,mi),' ',xyr(ni,mi),' ',ni,' ',mi,' ',ncount(ni,mi),
+ ' ',nzzm,' ',neps,' ',nnl,' ',rasim,' ',noz,' ',nnz,' ',nrs

37 continue
36 continue
close (all)
101 continue
999 continue

write (50,'(/a)') 'programma geeindigd !!!'
close (all)
c
ccc einde van programma
c
end

```

---