

0,
2006

Bureau-Generaal Rijkswaterstaat
RIZA
vestiging arnhem
gildemeesterplein 1, postbus 9072
6800 ed arnhem

Bureau-Generaal Rijkswaterstaat
RIZA
vestiging arnhem
gildemeesterplein 1, postbus 9072
6800 ed arnhem

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Inbouw duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers in Delft3D- 3DMOR

rapport

8 november 2006



OPDRACHTGEVER:		Rijkswaterstaat RIZA			
TITEL:		Inbouw duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers in Delft3D-3DMOR			
SAMENVATTING: <p>Bij de rivierdirecties van Rijkswaterstaat is behoefte aan een bandbreedte rondom voorspellingen van de vaarwegbodem. Een grote bron van onzekerheid die aanleiding geeft tot deze bandbreedte wordt gevormd door bodemvormen die lokale ondiepten in de vaarweg kunnen veroorzaken en bovendien mede oorzaak zijn van de ruimtelijke variatie in de bodemruwheid. In de huidige operationele modellen voor riviermorphologie, zoals Delft3D, ontbreekt echter een beschrijving van de bodemvormen. Rijkswaterstaat RIZA heeft WL Delft Hydraulics (WL) opdracht verleend voor het inbouwen en testen van duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers in Delft3D-3DMOR.</p> <p>Er zijn verschillende voorspellers geïmplementeerd voor de tijdsafhankelijke en ruimtelijk variërende duinhoogten in de hoofdgeul van een rivier en de hierop gebaseerde bodemruwheid. Hierbij is uitgegaan van een uniform sedimentmengsel. Ook is een relaxatie- en advectiemodel conform Allen (1976), dat het naijlen van bodemvormen in ruimte en tijd beschrijft, geïmplementeerd. Dit rapport beschrijft welke voorspellers zijn geselecteerd (Van Rijn, 1984; Fredsøe 1982). Tevens omvat dit rapport het functioneel en technisch ontwerp en de elementaire tests die zijn uitgevoerd.</p> <p>Met de geïmplementeerde voorspellers is een case studie uitgevoerd op basis van het morfologische model van de Waal dat in het kader van DVR is opgezet, voor de situatie tijdens het laagwater van 2003.</p>					
REFERENTIES:		Opdracht (27-03-2006, bestelnummer 4500034944)			
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1.0	Saskia van Vuren	17-10-2006		Kees Sloff	Kees Bons
2.0	Saskia van Vuren	07-11-2006		Kees Sloff	Kees Bons
PROJECTNUMMER:		Q4190			
TREFWOORDEN:		rivierduin, ruwheid, duinhoogtevoorspeller, morfologie, Delft3D			
AANTAL BLADZIJDEN:		70			
VERTROUWELIJK:		<input type="checkbox"/> JA <input checked="" type="checkbox"/> NEE			
STATUS:		<input type="checkbox"/> VOORLOPIG <input type="checkbox"/> CONCEPT <input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF			

Inhoud

1	Inleiding	1—1
1.1	Achtergrond	1—1
1.2	Doelstelling	1—1
1.3	Aanpak	1—2
1.4	Organisatie	1—2
2	Functioneel en technisch ontwerp	2—1
2.1	Functioneel Ontwerp	2—1
2.1.1	Inleiding	2—1
2.1.2	Voortplantingssnelheden van morfologische verstoringen	2—2
2.1.3	Selectie en beschrijving van bodenvormvoorspellers	2—4
2.1.4	Empirisch model voor de dynamica van bodenvormen	2—10
2.1.5	Implementatie in Delft-3D MOR	2—14
2.1.6	Definitie van presentatie van bevaarbare bodemligging	2—14
3	Implementatie en testen	3—1
3.1	Inbouwen van de voorspellers in Delft3D-3DMOR	3—1
3.1.1	Duinhoogte	3—1
3.1.2	Duinlengte	3—2
3.1.3	Ruwheidshoogte	3—2
3.1.4	Relaxatie- en advectiongedrag	3—2
3.2	Handleiding voor het gebruik duinhoogtevoorspellers	3—3
3.3	Verificatie van de nieuwe source code	3—6
3.3.1	Basistest	3—6

3.3.2	Test voor duinhoogtevoorspellers	3—6
3.3.3	Test voor ruwheidshoogtevoorspellers	3—7
3.3.4	Tests voor relaxatie en advectiongedrag	3—10
4	Case studie op de Waal	4—1
4.1	Doel van de casestudie	4—1
4.2	Beschrijving van het Waal-model	4—2
4.2.1	Rekenrooster	4—3
4.2.2	Baseline-projectie.....	4—3
4.2.3	Bodemsamenstelling.....	4—5
4.2.4	Vaste laag-optie	4—6
4.2.5	Sedimenttransportformule.....	4—6
4.2.6	Effect van bodemdwarshellingen op sedimenttransport	4—7
4.2.7	Parameters voor Delft3D-MOR	4—7
4.2.8	Randvoorwaarden.....	4—8
4.3	Parameters voor duinhoogtevoorspellers	4—9
4.4	Parameters voor het empirisch model voor dynamica van bodenvormen	4—9
4.5	Resultaten van de berekeningen.....	4—10
4.5.1	Amplitude bodenvormen	4—11
4.5.2	Relaxatiegedrag en invloed van het relaxatie- en advectionmodel	4—18
4.5.3	Ruwheidshoogte	4—21
4.5.4	Bodenvormgemiddelde bodemverandering	4—24
4.5.5	Presentatie van de bevaarbare bodemligging	4—28
5	Conclusies en aanbevelingen	5—1
6	Literatuur	6—1

Bijlagen

A	Grootte van constante in duinhoogtevoorspeller van Sieben (2004)	A-1
B	Ruwheidsvoorspeller van Van Rijn (2006).....	B-1

I Inleiding

I.1 Achtergrond

Bij de rivierdirecties van Rijkswaterstaat is behoefte aan een bandbreedte rondom voorspellingen van de vaarwegbodem. Een grote bron van onzekerheid die aanleiding geeft tot deze bandbreedte wordt gevormd door bodemvormen die lokale ondiepten in de vaarweg kunnen veroorzaken en bovendien mede oorzaak zijn van de ruimtelijke variatie in de bodemruwheid. In de huidige operationele modellen voor riviermorfologie, zoals Delft3D, ontbreekt echter een beschrijving van de bodemvormen.

Rijkswaterstaat RIZA heeft WL | Delft Hydraulics (WL) opdracht verleend voor het inbouwen en testen van twee duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers in Delft3D en het uitvoeren van een case studie.

Het modelsysteem Delft3D is voortdurend in ontwikkeling en de gevraagde werkzaamheden passen hier uitstekend in. De duinhoogtevoorspellers zijn geïmplementeerd in de nieuwste versie van Delft3D: Delft3D-FLOW met online sedimenttransport en morfologiemodule (kortweg Delft3D-3DMOR, en ook wel Delft3D-OnlineMOR genoemd). Dit sluit onder andere aan bij de ontwikkelingen in het kader van het project 'Duurzame Vaardiepte Rijndelta'.

I.2 Doelstelling

Het doel van deze studie is het implementeren van twee voorspellers voor de tijdsafhankelijke en ruimtelijk variërende duinhoogten in Delft3D-3DMOR en de hierop gebaseerde bodemruwheid. Bij deze doelstelling is uitgegaan van een uniform sedimentmengsel. Het transport over vaste lagen is buiten beschouwing gelaten.

De implementatie van de duinhoogtevoorspellers in Delft3D-3DMOR is gericht op het voorspellen van zowel de ruimtelijke als tijdsafhankelijke variatie van duinhoogten. Onder de ruimtelijke variatie wordt in dit geval verstaan dat de duinhoogten afhankelijk zijn van lokale condities (lokale condities op het betreffende moment en in de daaraan voorafgaande periode). Met naijling in tijd en ruimte is rekening gehouden door de toepassing van een model dat de dynamica (advectie en relaxatiegedrag) van bodemvormen beschrijft. Voor de bodemruwheid die op de duinhoogte is gebaseerd geldt een analoge ruimtelijke variatie en tijdsafhankelijkheid.

Met de uitbreiding van de voorspellers heeft RIZA onder andere voor ogen om:

- duinhoogten te berekenen, als karakteristieke bodemvariatie in de vaarweg, waarbij de duinhoogten passen bij het berekende sedimenttransport;
- de invloed van gradiënten in de bodemruwheid (o.i.v. duinen) op het sedimenttransport te berekenen; en
- de interactie tussen duinhoogte en bodemligging tijdens hoogwater te berekenen.

1.3 Aanpak

De werkzaamheden zijn verdeeld in drie onderdelen: de voorbereiding, de implementatie van de duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers en een case studie.

Het opstellen van een functioneel en een technisch ontwerp maakt onderdeel uit van de voorbereidingsfase. Op basis van een literatuuronderzoek is in deze fase van het project een keuze gemaakt voor de empirische duinhoogtevoorspellers die worden ingebouwd in Delft3D-3DMOR. De invloed van bodemvormen op de hydraulische ruwheid wordt ook beschreven. Tot slot wordt in deze fase het model dat het relaxatie- en advectiongedrag van bodemvormen weergeeft besproken. Er is een concreet plan gemaakt voor de presentatie van de bevaarbare bodemligging in het licht van de voorspelde duinhoogtes. Het technisch ontwerp omvat de programmeertechnische vertaling van de gemaakte keuzes, beschreven in het functioneel ontwerp, naar de implementatie ervan in Delft3D-3DMOR.

In de implementatiefase zijn de duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers daadwerkelijk ingebouwd in Delft3D-3DMOR. Het functioneel testen en verifiëren van de ingebouwde voorspellers maakt samen met een gevoeligheidsanalyse naar de invloed van de transportformule, de interactie tussen ruwheid – transport – bodemligging, en de snelheid waarmee veranderingen in bodemligging en duinhoogte optreden, onderdeel uit van deze fase.

Na de implementatie van de duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers is het concept van deze voorspellers getoetst aan metingen. Dit gebeurt in een case studie op basis van het morfologische model van de Waal dat in het kader van DVR is opgezet (Van Vuren et al., 2006). De gemeten en berekende bodemliggingen en duinhoogten op de Waal zijn vergeleken voor de situatie tijdens het laagwater van 2003. Deze vergelijking dient enerzijds als test of het concept van de voorspellers goed is voor de Nederlandse Rijntakken. Anderzijds wordt met deze vergelijking een indruk verkregen van het effect van de voorspellers op de modelresultaten. De uitkomsten zullen onder andere (kwalitatieve) informatie geven over de onzekerheid in de modelresultaten als gevolg van bodemvormen en bijbehorende ruwheden.

1.4 Organisatie

De opdracht is uitgevoerd door Saskia van Vuren en Willem Ottevanger. Voor advies maken we gebruik van de expertise van Bert Jagers, Erik Mosselman en Kees Sloff. Kees Sloff heeft tevens de review van het rapport verzorgd. Hanneke van der Klis trad op als projectleider. Het project is vanuit Rijkswaterstaat RIZA begeleid door Arjan Sieben.

2 Functioneel en technisch ontwerp

2.1 Functioneel Ontwerp

2.1.1 Inleiding

In een morfodynamisch systeem wordt onderscheid gemaakt tussen processen op verschillende schaalniveaus. De Vriend (1999) introduceert een kwalitatieve methode die geschikt is om processen op verschillende schaalniveaus en hun onderlinge interactie, in morfodynamische systemen te identificeren. In het Nederlandse Rijntakken systeem onderscheiden we de volgende schaalniveaus:

- micro-schaal – processen op kleine schaal, zoals de vorming van bodempatronen (ribbels en duinen) en gegradeerd-sediment processen;
- meso-schaal – processen op lokale trajectschaal, zoals de ontwikkeling van een bodemdwaarsverhang in rivierbochten en de pointbar-pool formatie; etc.
- macro-schaal – processen op riviertschaal, zoals de lange termijn ontwikkeling van het bodemlengteprofiel.

Met het huidige modelinstrumentarium voor riviermorfologie kunnen processen op zowel meso- als macro-schaal redelijk worden geanalyseerd. De afgelopen jaren is veel voortgang geboekt met de beschrijving van gegradeerd-sediment processen op micro-niveau. In het modelinstrumentarium ontbreekt echter een goede beschrijving van de tijdsafhankelijke en ruimtelijk variërende bodemvormen. Een goede beschrijving van deze bodempatronen op micro-schaal is onder andere van belang voor voorspellingen van het aanwezige vaarwegprofiel en het benodigde jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk. Het jaarlijkse onderhoud aan de vaarweg bestaat voor een groot deel uit het wegbaggeren van ondiepten (afvlakken van duintoppen) die tijdens hoogwater ontstaan. Om de onderhoudsinspanning in de rivier goed te kunnen voorspellen is het nodig om het modelinstrumentarium Delft3D-3DMOR verder uit te breiden.

In deze studie zijn twee empirische bodemvormvoorspellers voor de tijdsafhankelijke en ruimtelijk variërende duinhoogte in Delft3D-3DMOR geïmplementeerd, namelijk de voorspeller van Van Rijn (1984) en een voorspeller conform Fredsøe (1982), zie Sieben (2004). De keuze voor deze twee voorspellers is gebaseerd op een literatuuronderzoek, zie paragraaf 2.1.3. De meeste bodemvormvoorspellers zijn afgeleid voor een uniforme en stationaire stroming, terwijl in werkelijkheid sprake is van een niet-uniform en niet-stationair stroombeeld, waarin bodemvormen zich telkens aanpassen aan veranderende stroomcondities. Een relaxatiemodel dat het na-ijlen en de vertraagde aanpassing van bodemvormen aan nieuwe stroomcondities beschrijft, wordt besproken in paragraaf 2.1.4.

In dit hoofdstuk komt regelmatig de term ‘voortplantingssnelheid’ voor. Deze heeft betrekking op allerlei morfologische verstoringen. Alvorens in te gaan op de keuze voor de duinhoogtevoorspellers en het relatiemodel wordt hier in paragraaf 2.1.2 aandacht aan besteed.

2.1.2 Voortplantingssnelheden van morfologische verstoringen

De term voortplantingssnelheid kan betrekking hebben op verschillende type morfologische verstoringen die zich op verschillende schaalniveaus manifesteren. In Tabel 2-1 is onderscheid gemaakt in de voortplantingssnelheid van (1) verstoringen op macro-schaal in het bodemlengteprofiel, ook wel aangeduid met bodemvormgemiddelde bodemligging (2) verstoringen op meso-schaal met onder andere bankenpatronen, zoals pointbars en ondiepten bij bochtovergangen, en (3) verstoringen op micro-schaal, zoals duinen (welke veelal bodemvormen zijn genoemd in dit rapport).

Bij lage Froude-getallen ($Fr \ll 1$) planten verstoringen in het bodemlengteprofiel zich voort met een theoretische voortplantingssnelheid:

$$c = \frac{b \cdot s}{h} \quad (2-1)$$

met:

- c de theoretische voortplantingssnelheid van verstoringen met een oneindig kleine amplitude [m/s]
- h de waterdiepte [m]
- b de mate van niet-lineariteit van de stroomsnelheid u in de sedimenttransportformule, indien deze wordt uitgedrukt als functie van u , $s=f(u)$

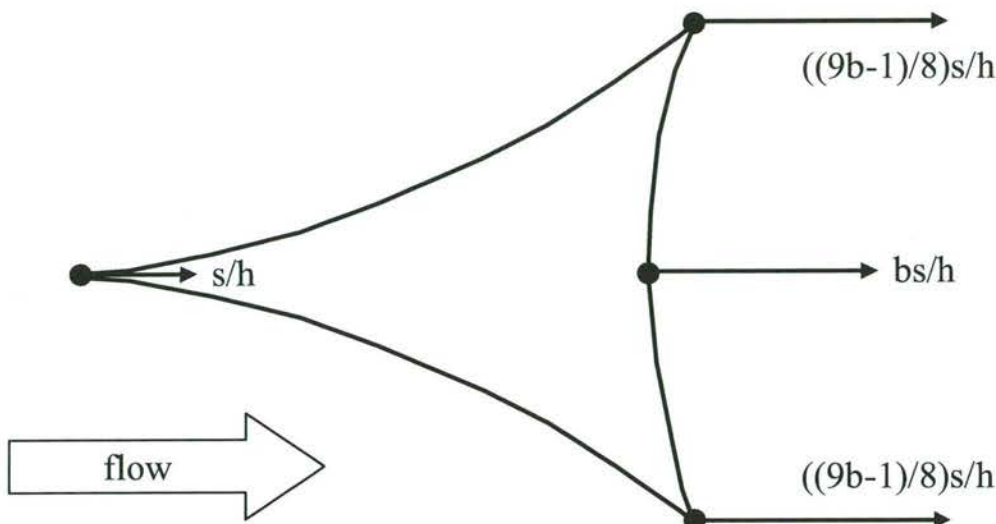
Dit is de klassieke voortplantingssnelheid van bodemstoringen in een 1D systeem (De Vries, 1959, 1965). In een vereenvoudigd 2D systeem waarin de effecten van spiraalstroom en bodemdwarshellingen op de richting van sedimenttransport verwaarloosd zijn, varieert de theoretische voortplantingssnelheid van bodemverstoringen in stroomrichting tussen de volgende waarden (De Vriend, 1985, 1987a,b):

$$c_{2D} = \frac{s}{h} \quad (a) \quad (2-2)$$

$$c_{2D} = \left((9 \cdot b - 1) / 8 \right) \frac{s}{h} \quad (b)$$

De verschillen tussen de voortplantingssnelheden zorgen ervoor dat een lokale bult sediment vervormt naar een driepuntige ster of barchaan (Figuur 2-1). Het effect van bodemdwarshellingen wordt wel meegenomen in de theorie van Struiksma et al. (1985) voor 2D bankenpatronen.

Voor duinen kan onderscheid worden gemaakt tussen de verplaatsingssnelheid van individuele duinen en de groepssnelheid van duineigenschappen van de omhullende duingroep. Conform de verplaatsingssnelheid van individuele duinen, wordt voor de groepssnelheid verondersteld dat deze evenredig is met de voortplantingssnelheid van verstoringen in de bodemvormgemiddelde bodemligging, zie Paragraaf 2.1.4.



Figuur 2-1 Golffronten van bodemverstoring in 2D systeem waarin effecten van spiraalstroom en bodemdwarshellingen op sedimenttransportrichting verwaarloosd zijn, met groottes van voortplantingssnelheden in stroomrichting.

Tabel 2-1 Type bodemvormen en voortplantingssnelheden.

Bodemvorm en schaalniveau	Type snelheid	Formule ($Fr \ll 1$)	Literatuur
<u>Macro-schaal:</u>			
- 1D-bodemlengteprofiel	Voortplantingssnelheid van kleine verstoringen	$c = b \frac{s}{h}$	De Vries (1959, 1965)
<u>Meso-schaal:</u>			
- 2DH-banken volgens De Vriend	Voortplantingssnelheid van kleine verstoringen	c_{2D} tussen de $\left(\frac{(9b-1)}{8}\right) \frac{s}{h}$ en $\frac{s}{h}$	De Vriend, 1985, 1987a,b)
- 2DH-banken volgens Struiksma et al. (o.a. pointbars, ondiepten in bochtovergangen)	Voortplantingssnelheid van kleine verstoringen	$c_{2D} = \frac{s}{h}$	Struiksma et al. (1985), Mosselman et al. (2006)
<u>Micro-schaal:</u>			
- 2DV-duinen (in spraakgebruik vaak bodemvormen)	Groepssnelheid (= advectiesnelheid) van duineigenschappen	schatting: $c_H = \gamma \cdot c$	
	verplaatsingssnelheid van individuele duinen	$w = \frac{c}{\xi}$	Jansen et al. (1979)

Bovenstaande uitdrukkingen voor de voortplantingssnelheden zijn afgeleid met de zogenaamde karakteristiekenmethode. Op basis van lineaire stabiliteitsanalyses van bodemvormen op de schaal van duinen hebben Kennedy (1963) en Fredsøe (1974) ook formules voor voortplantingssnelheden van duinen afgeleid. Deze zijn onder andere afhankelijk van de grootte van de duinen via een afhankelijkheid met de duinlengte.

In plaats van de aanname dat de groepsnelheid van duinen evenredig is met de voortplantingssnelheid van verstoringen in de bodemvormgemiddelde bodemligging, kan in vervolgonderzoek eens nader aandacht worden besteed aan dit type formulering. Verdere analyse naar voortplantingssnelheden van duinen valt hier buiten de scope van dit project.

2.1.3 Selectie en beschrijving van bodemvormvoorspellers

Om te komen tot een keuze voor twee bodemvormvoorspellers evalueren we de in de literatuur beschikbare voorspellers. Om aan te sluiten bij het project 'Duurzame Vaardiepte Rijndelta' richten we ons bij deze keuze met name op de Nederlandse situatie.

Bodemvormen, variërend van kleine ribbels tot grote rivierduinen, maken een belangrijk onderdeel uit van de morfodynamiek in de Nederlandse rivieren. De ontwikkeling van bodemvormen verschilt per riviertak in het Rijntakstelsel, als gevolg van variatie in de afvoerverdeling tussen het zomerbed en de uiterwaard en door variatie in de samenstelling van het bodemmateriaal (Wilbers, 2004). Bodemvormen ontwikkelen zich als gevolg van de interactie tussen stroming en loskorrelig bodemmateriaal (Van Rijn, 1993). *Ribbels* zijn bodemvormen met relatief kleine dimensies (hoogte en lengte in orde van centimeters, respectievelijk decimeters) en ontstaan als de stroomsnelheid iets groter is dan de kritische stroomsnelheid die nodig is om het sediment in beweging te brengen (Van Rijn, 2006). De ribbelhoogte is veel kleiner dan en vrijwel onafhankelijk van de waterdiepte. De ribbellengte kan van dezelfde orde grootte zijn als de waterdiepte. Voor de afmetingen van de ribbels is de korrelgrootte van het bodemmateriaal een belangrijke factor. *Duinen* zijn asymmetrische bodemvormen met een vlakke loefzijde en een steile lijzijde. Ze kunnen zich ontwikkelen tot bodempatronen van enkele honderden meters lang en enkele meters hoog. Bij duinvorming zijn juist de waterdiepte en snelheid belangrijk en is de korrelgrootte van het bodemmateriaal minder van belang (Van Rijn, 2006). Ribbels en kleine duinen kunnen zich over grotere duinen heen voortplanten.

Tijdens hoogwatercondities nemen de dimensies van bodemvormen, zowel de hoogte als de lengte, toe. De extra stromingsweerstand die door de bodemvormen wordt opgewekt beïnvloedt de hoogwaterstanden. De bodemvormen kunnen na een hoogwater grote obstakels vormen voor de scheepvaart. Daarmee zijn ze belangrijk voor de voorspellingen van het aanwezige vaarwegprofiel en het benodigde jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk.

In Wilbers (2004) wordt een literatuuroverzicht gegeven van formules waarmee dimensies van bodemvormen, zoals de hoogte, de lengte en de steilheid, kunnen worden voorspeld. De meeste voorspellers zijn afgeleid voor uniforme en stationaire stroomcondities. Dit betekent dat de voorspellers per stroomconditie uitgaan van een unieke duinhoogte en duinlengte. Wilbers maakt onderscheid tussen voorspellers die zijn gebaseerd op theoretische beschouwingen en overwegingen en voorspellers die empirisch zijn afgeleid (empirisch gefitte relaties) op basis van zowel data uit experimenten in laboratoriumgoten als data uit veldmetingen in rivieren en estuaria. In de voorspellers zijn de duindimensies vaak gerelateerd aan de stroomsnelheid (of de schuifspanning), de waterdiepte en de karakteristieke korreldiameter van het bodemmateriaal (D_{50} , D_{90}). Een overzicht van de voorspellers is gegeven in Tabel 2-2. Voor de bijbehorende formules verwijzen we naar Wilbers (2004) en de betreffende referenties.

Tabel 2-2 Overzicht van voorspellers voor de duinhoogte en duinlengten (Wilbers, 2004).

	Duinlengte	Duinhoogte
Theoretische voorspellers	Anderson (1953)	Tsuchiya & Ishizaki (1967)
	Tsuchiya & Ishizaki (1967)	Gill (1971)
	Yalin (1972)	Karim (1999)
Empirische voorspellers	Shinohara & Tsubaki (1959)	Shinohara & Tsubaki (1959)
	Yalin (1964)	Allen (1968)
	Allen (1968)	Ranga Ruju & Soni (1976)
	Van Rijn (1984)	Van Rijn (1984)
	Julien & Klaassen (1995)	Julien & Klaassen (1995)
		Karim (1995)

Wilbers (2004) analyseert met welke voorspellers de duindimensies in de Nederlandse Rijntakken het beste kunnen worden beschreven. Tijdens laagwatercondities, dat wil zeggen voor en na het hoogwater, geeft Karim (1995) de beste voorspellingen voor de duinhoogte en wordt de duinlengte het beste voorspeld met Tsuchiya & Ishizaki (1967). De maximale duindimensies, zowel de lengte als de hoogte, worden het beste voorspeld met Van Rijn (1984) en Shinohara & Tsubaki (1959). Het is niet mogelijk de ontwikkeling van de duindimensies gedurende de gehele hoogwatergolf met een en dezelfde formule te voorspellen.

Julien & Klaassen (1995) uiten juist kritiek op de bodemvormvoorspeller van Van Rijn (1984). Volgens Julien & Klaassen worden de duinhoogten in de meeste grote rivieren met de formule van Van Rijn (1984) onderschat en treedt afvlakking van duindimensies tot vlakbed pas later op dan deze formule beschrijft. Van Rijn (1984) veronderstelt een afhankelijkheid tussen duinhoogte en de transporttoestandparameter T (zie Vgl. 2-4), terwijl Julien & Klaassen stellen dat de duinhoogte niet significant varieert met deze parameter. Op basis van extra metingen van duindimensies tijdens het hoogwater van 1988 in de Rijn en Maas, passen Julien & Klaassen (1995) de formule van Van Rijn (1984) aan. De formule behoudt min of meer dezelfde vorm, waarbij de term die de afhankelijkheid met de transporttoestandparameter beschrijft weg valt.

De voorspeller van Julien & Klaassen (1995) wordt door Wilbers (2004) niet geselecteerd als één van de beste voorspellers. Volgens Ten Brinke et al. (1999) sluiten voorspellingen met de voorspeller van Julien & Klaassen (1995) wel goed aan bij de bodemvormdimensies die tijdens de hoogwaters van 1993 en 1995 op de Rijn zijn waargenomen. De dimensies van de beddingvormen tijdens het hoogwater van 1997 worden echter overschat.

Sieben (2004) merkt op dat in de meeste morfologische modellen voor bodemvorm-gemiddelde voorspellingen, de alluviale ruwheid en sedimenttransport met verschillende empirische formuleringen worden beschreven. Dit kan leiden tot niet-consistente combinaties van sedimenttransport en bodemruwheid. Conform Fredsøe (1982) heeft Sieben (2004) een bodemvormmodel afgeleid, waarbij de voorspelde alluviale ruwheid consistent is met het type sedimenttransportformule dat in een morfologische model wordt gebruikt.

In dit project is er, in overleg met de opdrachtgever, voor gekozen om de voorspeller van Van Rijn (1984) in de Delft3D-3DMOR software in te bouwen. Daarnaast is het bodemvormmodel van conform Fredsøe (1982) ingebouwd. Van Rijn (1984) laat zien dat zijn formule goed aansluit bij veldmetingen uit het Rijntakkensysteem. Het bodemvormmodel conform Fredsøe (1982) sluit ook goed aan bij de metingen, zie Sieben (2004). De formuleringen zijn naar verwachting toepasbaar in studies, als het project 'Duurzame Vaardiepte Rijndelta'. De voorspeller van Van Rijn (1984) en Fredsøe (1982) worden nu in meer detail beschreven.

Voorspeller van Van Rijn (1984)

In Van Rijn (1984) worden bodemvormdimensies voorspeld als functie van stroomsnelheid en waterdiepte en karakteristieken van het bodemmateriaal. Van Rijn (1984) neemt aan dat bodemtransport het meest bepalend is voor de dimensie van bodemvormen. Bodemtransport wordt beschreven met de dimensieloze parameter voor bodemmateriaal D_* en een transporttoestandparameter T :

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

met:

- D_{50} de korreldiameter die door 50% van het bodemmateriaal wordt onderschreden [m]
 Δ de relatieve dichtheid [-]
 g de zwaartekrachtconstante [m/s^2]
 v de kinematische viscositeit [m^2/s]

$$T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*,kr})^2}{(u_{*,kr})^2} \quad (2-4)$$

met:

- u_*' de schuifspanningssnelheid gerelateerd aan de korrel [m/s]
 $u_{*,kr}$ de kritische bodemschuifspanningssnelheid afgeleid uit het Shieldsdiagram [m/s]

De bodemschuifspanningssnelheid gerelateerd aan de korrel u_* kan worden geschreven als:

$$u_*' = \left(\frac{g^{0.5}}{C'} \right) \cdot \bar{u} \quad (2-5)$$

waarin

- C' de Chézy coëfficiënt gerelateerd aan de korrels [$m^{1/2}/s$]
 g de zwaartekrachtconstante [m/s^2]
 \bar{u} de diepte-gemiddelde snelheid [m/s]

De stromingscondities in alluviale rivieren worden door Van Rijn (1984) onderverdeeld in drie klassen:

- Een laag stroomregime met een vlakbed, ribbels en duinen, met $T < 15$;
- Een overgangsstroomregime met een uitwassing van duinen, met $15 < T < 25$;
- Een hoog stroomregime met een vlakbed en antiduin, met $T > 25$.

De duinvormvoorspeller van Van Rijn (1984) is afgeleid voor de eerste twee stroomregimes, welke het meeste voorkomen in de Nederlandse Rijntakken. Naast de dimensieloze parameter voor bodemmateriaal en de transporttoestandparameter zijn de duinvormdimensies afhankelijk van de korreldiameter D_{50} en de waterdiepte. Om de empirische relaties te bepalen is data gebruikt uit laboratoriumproeven (84 experimenten) en veldmetingen (22 datasets, o.a. afkomstig van de IJssel, Waal en Rijn, Rio Parana (Argentinië), Mississippi en enkele irrigatiekanalen in Japan). Daarbij zijn de volgende selectiecriteria gehanteerd: (1) duinbodemvormen aanwezig, (2) breedte-diepte verhouding groter dan 3, (3) waterdiepte groter dan 0,1 m, en (4) transporttoestandparameter T kleiner dan 25. Aangezien er geen duidelijke correlatie werd gevonden tussen de dimensieloze parameter voor bodemmateriaal D_* en de duindimensies, is Van Rijn (1984) uitgegaan van onafhankelijkheid.

De duinhoogte H_d en duinsteilheid H_d/L_d worden als functie van de korreldiameter D_{50} , de waterdiepte h en de transporttoestandparameter T beschreven met:

$$\frac{H_d}{h} = 0,11 \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{0,3} (1 - e^{-0,5T})(25 - T) \quad (2-6)$$

$$\frac{H_d}{L_d} = 0,015 \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{0,3} (1 - e^{-0,5T})(25 - T) \quad (2-7)$$

De duinlengte L_d is gelijk aan:

$$L_d = 7,3 \cdot h \quad (2-8)$$

De relaties geven aan dat er sprake van duingroei is als $u_*' > u_{*kr}$. Tot $T \sim 3$ is er sterke groei van de duinen, daarna stabiliseren ze zich tot $T \sim 15$. Voor $T \leq 0$ en $T \geq 25$ wordt er aangenomen dat er sprake is van een situatie met een vlakbed. Maximale dimensies worden gevonden voor $T = 5$.

De bodemvormen zorgen voor extra stromingsweerstand. De hydraulische ruwheid in het zomerbed bestaat uit twee delen: de bijdrage van de korrelgrootte van bodemmateriaal en de bijdrage van bodemvormen aan de totale ruwheid. Van Rijn (1984) benadert de hydraulische ruwheid van de korrelgrootte van het bodemmateriaal voor een situatie met een vlakbed, met de volgende Nikuradse waarde k_{korrel} in [m]:

$$k_{korrel} = 3 \cdot D_{90} \quad (2-9)$$

Voor de hydraulische ruwheid die door de bodemvormen wordt opgewekt, $k_{bodemvorm}$, geeft Van Rijn (1984) de volgende formule:

$$k_{bodemvorm} = 1,1 \cdot H_d (1 - e^{-25(H_d/L_d)}) \quad (2-10)$$

De totale hydraulische ruwheid is dan gelijk aan:

$$k = k_{korrel} + k_{bodemvorm} = 3 \cdot D_{90} + 1,1 \cdot H_d (1 - e^{-25(H_d/L_d)}) \quad (2-11)$$

Duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982)

In de huidige morfodynamische modellen worden vaak voor de alluviale ruwheid als gevolg van bodemvormen en het sedimenttransport verschillende empirische formuleringen gebruikt. Deze formuleringen zijn niet altijd consistent met elkaar. Om op consistente wijze hydraulische ruwheid door bodemvormen en sedimenttransport in morfologische modellen te beschrijven, stelt Sieben (2004) conform Fredsøe (1982) een bodemvormmodel op dat gekoppeld is aan een sedimenttransportmodel dat in de morfodynamische modellen wordt gebruikt.

Uitgangspunten zijn dat: (1) de grootte van sedimenttransport volgens de formuleringen in beide modellen gelijk zijn, en dat (2) de theoretische voortplantingssnelheid van morfologische veranderingen in het morfodynamische model voor bodemvormgemiddelde voorspellingen evenredig is met de verplaatsingsnelheid van de individuele bodemvormen die met het nieuwe bodemvormmodel worden voorspeld.

Het tweede uitgangspunt is ook door Fredsøe (1982) toegepast om een analytische duinhoogtevoorspeller af te leiden. Op basis van een beschrijving van de theoretische voortplantingssnelheid van lokale veranderingen in bodemvorm-gemiddelde bodemligging en de verplaatsingsnelheid van de individuele bodemvormen, leidt Sieben (2004) uitgaande van een evenredigheid tussen beide snelheden, conform Fredsøe (1982), de volgende formule af voor duinhoogte H_d :

$$\frac{H_d}{h} = \frac{\varepsilon}{b-l-m} = \frac{\varepsilon}{\frac{u}{f(u)} \frac{\partial f(u)}{\partial u} - \frac{h}{f(h)} \frac{\partial f(h)}{\partial h} - \frac{k}{f(k)} \frac{\partial f(k)}{\partial k}} \quad (2-12)$$

met:

- h de waterdiepte [m]
- b de mate van niet-lineariteit van de stroomsnelheid u in de sedimenttransportformule, indien deze wordt uitgedrukt als functie van u, $s=f(u)$
- l de mate van niet-lineariteit van de waterdiepte h in de sedimenttransportformule, indien deze wordt uitgedrukt als functie van h, $s=f(h)$
- m de mate van niet-lineariteit van de Nikuradse ruwheidswaarde k in de sedimenttransportformule, indien deze wordt uitgedrukt als functie van k, $s=f(k)$
- ε een constante. Volgens Bijlage A kan de waarde van ε in de Nederlandse Rijntakken variëren tussen de 0,5 en 1,5.

Sieben (2004) werkt de formulering van de duinhoogtevoorspeller verder uit voor de transportformules Meyer-Peter & Müller (1948) en Engelund & Hansen (1967).

Voor de transportformule van Meyer-Peter & Müller (1948) geldt dat:

$$b = \frac{3}{1 - \frac{\theta_{kr}}{\mu\theta}}, \quad l = -\frac{b}{6}, \quad m = \frac{7b}{24} \quad (2-13)$$

zodat de duinhoogte kan worden beschreven met:

$$\frac{H_d}{h} = \frac{\varepsilon}{b-1-m} = \frac{24}{21} \frac{\varepsilon}{b} = \varepsilon \frac{24}{63} \left(1 - \frac{\theta_{kr}}{\mu\theta} \right) \quad (2-14)$$

De bodemschuifspanning θ is gelijk aan:

$$\theta = \frac{u^2}{C^2 \Delta D_{50}} \quad (2-15)$$

waarin

u de diepte-gemiddelde stroomsnelheid [m/s]

C de Chézycoëfficiënt [$m^{1/2}/s$]

Δ de relatieve dichtheid [-]

D_{50} de korreldiameter die door 50% van het bodemmateriaal wordt onderschreden [m]

De ribbelfactor μ is gelijk aan:

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{90}} \right)^{3/2} = \left(\frac{C}{18 \log \frac{12h}{3D_{90}}} \right)^{3/2} \quad (2-16)$$

met:

h de waterdiepte [m]

D_{90} de korreldiameter die door 90% van het bodemmateriaal wordt onderschreden [m]

Kortom, indien de bodemschuifspanningen veel groter zijn dan de kritische Shieldswaarde dan is de duinhoogte evenredig met de waterdiepte. Voor lage bodemschuifspanningen wordt de duinhoogte met name beperkt door de grootte van het sedimenttransport. Sieben (2004) refereert daarbij aan de Pannerdensch Kop waar grof materiaal in de buitenbocht en fijn materiaal in de binnenbocht ligt. Met vergelijking 2-14 worden dan lagere duinhoogte in de buitenbocht en hogere duinhoogten in de binnenbocht voorspeld.

Voor de transportformule van Engelund & Hansen (1967) geldt dat:

$$b = 5, \quad l = -\frac{1}{2}, \quad m = \frac{1}{2} \quad (2-17)$$

zodat de duinhoogte kan worden beschreven met:

$$\frac{H_d}{h} = \frac{\varepsilon}{5} \quad (2-18)$$

De duinhoogte is in dit geval dus alleen een functie van de waterdiepte.

Sieben (2004) beschrijft de bodemruwheid met een eenvoudige evenredigheidsrelatie van de duinhoogte:

$$k = \varsigma \cdot H_d \quad (2-19)$$

Op basis van Van Rijn (1984) neemt Sieben (2004) voor ς een waarde in de orde van 0,7 aan.

Voor een geavanceerdere vertaalslag van de bodemvorm naar een extra ruwheidsterm in de hydraulische ruwheid die door de bodemvorm wordt toegevoegd kan de formule van Van Rijn (1984), Vgl. (2-10), worden gebruikt.

Voor deze formule moet dan ook een duinlengte worden berekend. Hiervoor kan Vgl. (2-8) worden toegepast, of een combinatie van Vgl. (2-22) en (2-23). Andere ruwheidsvoorspellers waarmee bodemvormdimensies vertaald kunnen worden naar hydraulische bodemruwheid zijn Vanoni & Hwang (1967) en Yalin (1964).

Voor de implementatie van de duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982) is een afweging gemaakt tussen verwachte betrouwbaarheid en benodigde rekeninspanningen. Indien we de duinhoogtevoorspeller volgens Vgl. 2-12 implementeren, dan moeten iedere tijdstap de numerieke afgeleiden van het ruimtelijke transportveld naar de stroomsnelheid u , de waterdiepte h , en de Nikuradse waarde k worden bepaald om deze waarden vervolgens te verwerken in de duinhoogtevoorspeller. Dit kan zorgen voor een rekenintensieve exercitie. Bovendien staat 'extra' nauwkeurigheid die gegenereerd wordt met deze implementatie niet in verhouding tot de fout die gemaakt wordt met de keuze voor de waarde van de contante ε . Daarom is ervoor gekozen om de uitgewerkte duinhoogtevoorspellers van Sieben (2004) voor de transportformules Meyer-Peter & Müller (1948) en Engelund & Hansen (1967) te implementeren in Delft3D-3DMOR. Naar analogie van Sieben (2004) zouden ook voor andere transportformules, formules voor b , l en m kunnen worden afgeleid. We volstaan in dit project voor de implementatie van de uitgewerkte formules voor Meyer-Peter & Müller (1948) en Engelund & Hansen (1967).

2.1.4 Empirisch model voor de dynamica van bodemvormen

Wilbers (2004) geeft aan dat de empirische ruwheidsvoorspellers niet geschikt zijn om de dynamische ontwikkeling van bodemvormen in niet-stationaire, niet-uniforme stromingscondities in rivieren te voorspellen. In werkelijkheid worden de duindimensies op een willekeurig moment sterk beïnvloed door de stromingscondities die eerder optraden en de snelheid waarmee duinen zich ontwikkelen.

In de Rijntakken is de toe- en afname van de dimensie van duinen gerelateerd aan variaties in afvoer. Er is sprake van een sterke na-ijling van de duindimensies op de stroomcondities. Bovendien wordt de evenwichtsduindimensies die op basis van de bodemvormvoorspellers kunnen worden bepaald niet altijd bereikt doordat een piek te kort aanhoudt om de duinen helemaal te laten ontwikkelen naar hun evengewichtswaarde (Sieben & Van Essen, 2004). Maximale duinhoogten worden enkele dagen na de top van een hoogwatergolf bereikt. De na-ijlende werking van de duinlengte is over een langere periode na het bereiken van de top van de hoogwatergolf merkbaar.

Allen (1976) beschrijft de dynamica van bodemvormen met een relaxatiemodel, waarin de aanpassing van bodemvormen gerelateerd is aan het verschil tussen de dimensies van de bodemvormen voordat de stroomcondities zich aanpaste en de evenwichtsdimensies die horen bij de nieuwe stroomcondities.

De vorming van duinen kost dus tijd. Naast het relaxatiegedrag wordt de dynamica van bodemvormen ook beïnvloed door het verplaatsingsgedrag van duinen. Sieben (2006) beschrijft de dynamica van bodemvormen conform Allen (1976) met een advectionvergelijking met het relaxatieeffect in de bronterm:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{L_H}{T_H} \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{H_e - H}{T_H} \quad (2-20)$$

met

H	de duinhoogte op tijdstip t en locatie x [m]
T_H	de tijdschaal voor de tijdsafhankelijke aanpassing [s]
L_H	de lengteschaal voor de ruimtelijke aanpassing [m]
H_e	de (forcerings-) evenwichtsduinhoogte [m]

Om veranderingen in duinhoogte te beschrijven is er dus naast een empirische voorspeller voor de nieuwe evenwichtsduinhoogte, ook een tijd- en lengteschaal nodig voor de karakteristieke aanpassingsperiode en aanpassingslengte nodig.

De vraag is of de advectionsterm (de twee term van het linkerlid) in vergelijking (2-20) verwaarloosd mag worden. Deze vraag beantwoorden we met een eenvoudig rekenvoorbeeld. In een illustratieve toepassing leiden Sieben & Van Essen (2004) uit verscheidene hoogwaters uit 1982, 1988, 1993, 1995, 1997, 1998 in de Bovenrijn de karakteristieke tijdschaal T_H en de migratiesnelheid van individuele duinen af. De karakteristieke tijdschaal is 1 à 3 dagen. De migratiesnelheid tijdens hoogwater komt neer op ongeveer 43 m/dag. In het Delft3D-3DMOR model van de Nederlandse Rijntakken is de celgrootte van het rekenrooster in langsrichting ongeveer 60 m. Dat wil zeggen dat de informatie over de duinhoogte in ongeveer 1,5 dag van de ene rooster cel naar de volgende migreert. Uitgaande dat het relaxatiegedrag eenvoudig kan worden beschreven met:

$$H(t) = H_e - (H_e - H_0) e^{-\frac{t}{T_H}} \quad (2-21)$$

kan worden gezegd dat na een periode $t = T_H$ ongeveer 64% van de aanpassing is bereikt. Er kan dus niet gesteld worden dat de advectionsterm klein is ten opzichte van het relaxatiegedrag, daarom wordt in Delft3D-3DMOR de advectionsterm in vergelijking 2-20 niet verwaarloosd.

De advectionsterm in vergelijking 2-20 is afhankelijk van de karakteristieke aanpassingsperiode T_H en aanpassingslengte L_H . Wijbenga (1991) veronderstelt dat de lengteschaal recht evenredig is met de duinlengte:

$$L_H = \varphi \cdot L \quad (2-22)$$

met waarden voor φ tussen 1 en 3. De karakteristieke tijdschaal neemt hij gelijk aan:

$$T_H = L_H / w \quad (2-23)$$

met w de migratiesnelheid van individuele bodemvormen.

Sieben (2006) merkt op dat L_H en T_H afhankelijk zijn van de lokale duinkarakteristieken. Hij benadert de karakteristieke lengteschaal en tijdschaal met:

$$L_H = \zeta \cdot L_r \left(\frac{H}{H_r} \frac{s_r}{s} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$T_H = \zeta \cdot \frac{L_r}{w_r} \left(\frac{H}{H_r} \frac{s_r}{s} \right)^{1+\frac{1}{\beta}} \quad (2-24)$$

met referentiewaarden voor

L_r	de bodemvormlengte [m]
H_r	de bodemvormhoogte [m]
w_r	de migratiesnelheid van bodemvormen [m/s]
s_r	het sedimenttransport [m ² /s]

ζ, β coëfficiënten [-]

De referentiewaarden en coëfficiënten van vergelijking 2-24 kunnen worden afgeleid uit bodempeilingen die tijdens hoogwaters situaties zijn uitgevoerd, zie Sieben (2006). Voor de waargenomen hoogwaters van 1997 en 1998 in de Waal wordt voor β de waarde 2 gevonden.

De waarnemingen in de zandige Midden-Waal voor het hoogwater van 1997 resulteren in $w_r = 5,5$ m/dag en $L_r = 65$ m, terwijl voor Waaltraject direct benedenstreams van de Pannerdensch Kop (met grover sediment) de waarden $w_r = 35$ m/dag en $L_r = 52$ m worden gevonden.

Voortbouwend op dit concept komt Sieben (2006) dan uit op:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + w_r \left(\frac{H_r s}{H s_r} \right) \frac{\partial H}{\partial x} = w_r \left(\frac{H_r s}{H s_r} \right)^{1+\frac{1}{\beta}} \frac{H_e - H}{\zeta L_r} \quad (2-25)$$

Dit houdt voor het numerieke model niets anders in dan:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + c_H(H) \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{H_e - H}{T_H(H)} \quad (2-26)$$

met c_H de karakteristieke voortplantingssnelheid van duinhoogtevariaties, dat wil zeggen de groepssnelheid waarmee duineigenschappen zich over het rekengrid verplaatsen. Deze vergelijking heeft naast informatie over de voortplantingssnelheid van duinhoogtevariaties, een voorspeller nodig voor de evenwichtsduinhoogte H_e . Voor de voorspeller van de evenwichtsduinhoogte kan een van de voorgestelde formules in Paragraaf 2.1.3 gebruikt worden.

Deze vergelijking kan naar een 2D model vertaald worden door de vectoriële advectionsterm uit te schrijven (Sieben, 2006):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + c_{H_x}(H) \frac{\partial H}{\partial x} + c_{H_y}(H) \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{H_e - H}{T_H(H)} \quad (2-27)$$

In principe hoeft de voortplantingssnelheid van duinhoogtevariaties c_H niet overeen te komen met de voortplantingssnelheid van individuele bodemvormen w , of met de gemiddelde snelheid van het bodemtransport u_b (analogie met oppervlakte golven: vergelijk voortplantingssnelheid van oppervlakte golven, groepssnelheid golven en stroomsnelheid). De voortplantingssnelheid van de omhullende van alle individuele duinen samen is kleiner dan de voortplantingssnelheid van de individuele duinen. Individuele duinen verplaatsen zich sneller dan de 'duingroep'.

Conform de verplaatsingssnelheid van individuele duinen wordt voor de voortplantingssnelheid van duinhoogtevariaties aangenomen dat deze evenredig is met de voortplantingssnelheid van verstoringen in het bodemlengteprofiel. De analytische afleiding van de voortplantingssnelheid van verstoringen in het bodemlengteprofiel c , is gegeven door De Vries (1959, 1965):

$$c = u \frac{\frac{ds(u)}{du} \cdot \frac{1}{h}}{1 - Fr^2} = \frac{s \cdot b}{h \cdot (1 - Fr^2)} \quad (2-28)$$

Met:

- u diepte-gemiddelde stroomsnelheid [m/s]
- Fr het Froudegetal [-]
- h de waterdiepte [m]
- s het sedimenttransport [m²/s]
- b de mate van niet-lineariteit van de stroomsnelheid u in de sedimenttransportformule, indien deze wordt uitgedrukt als functie van u, $s=f(u)=a \cdot u^b$

De groepsnelheid is dus gelijk verondersteld aan:

$$c_H = \gamma \cdot c = \gamma \cdot \frac{s \cdot b}{h \cdot (1 - Fr^2)} \quad (2-29)$$

Naar verwachting zal c_H in dezelfde range liggen als de voortplantingssnelheid van verstoringen in het bodemlengteprofiel en banken, c en c_{2D} , zie Tabel 2-1. Coëfficiënt γ varieert in de Waal naar verwachting tussen 0,2 en 1.

Aangezien de groepssnelheid in Vgl. 2-29 afhankelijk is van het sediment transport, is het model voor de dynamica van bodemvormen als zodanig alleen te gebruiken in morfologische simulatie. Indien we de vergelijking 2-29 schrijven als functie van de stroomsnelheid, kan het model ook worden toegepast in puur hydraulische simulatie:

$$c_H = \gamma \cdot c = \gamma \cdot \frac{s \cdot b}{h \cdot (1 - Fr^2)} = \gamma \cdot b \cdot a \cdot \frac{u^b}{h \cdot (1 - Fr^2)} \quad (2-30)$$

Met deze benadering zorgen we ervoor dat naast de ruimtelijke variatie ook de tijdsafhankelijkheid van de voortplantingssnelheid van duinhoogtevariaties in het advectiemodel wordt meegenomen. Het rechtergedeelte van vergelijking 2-30 wordt in Delft3D-3DMOR geïmplementeerd. De gebruiker moet derhalve coëfficiënt γ , parameter a en de niet-lineariteitparameter b bij de modelparameters specificeren.

Voor het oplossen van de vergelijking 2-27 is naast de voortplantingssnelheid van duinhoogtevariaties ook de richting nodig. Sieben (2006) geeft aan dat de transportrichting loodrecht staat op de duinkammen. Deze richting is voorlopig echter nog onbekend. Sieben (2006) introduceert een benadering op basis van dwarsgradiënten van het transport en de duinhoogte welke in een generiek 2D model lastig te implementeren is. Voorgesteld wordt om voorlopig de richting van het bodemtransport aan te houden (inclusief eventueel spiraalstromingseffect) hoewel die richting in werkelijkheid ook weer beïnvloed wordt door de oriëntatie van de grote bodemvormen (dit effect wordt niet gemodelleerd).

Samengevat wordt het empirisch model voor de dynamica van bodemvormen volgens vergelijking 2-27 geïmplementeerd, waarbij de gebruiker de volgende modelinvoer moet specificeren:

- een constante waarde voor T_H om het relaxatiegedrag te beschrijven;
- coëfficiënt γ , parameter a en de niet-lineariteitparameter b van de stroomsnelheid u in de sedimenttransportformule, indien deze wordt uitgedrukt als functie van u, $s=f(u)=a \cdot u^b$, om het advectiegedrag volgens vergelijking 2-30 weer te geven;
- de empirische evenichtswaarde H_e volgt uit de door de gebruiker geselecteerde bodemvormvoorspellers die in paragraaf 2.1.3 zijn beschreven.

2.1.5 Implementatie in Delft-3D MOR

In Tabel 2-3 vatten we de voorstellen van te implementeren modellen in Delft3D-3DMOR samen.

Tabel 2-3 Implementatie Delft3D-3DMOR

Model implementatie		literatuur	Verwijzing formule in rapport
Bodemvormvoorspellers	Duinhoogte-model	Van Rijn (1984)	Vgl. (2-6)
		Conform Fredsøe (1982)	Uitgewerkte voorspellers volgens Sieben (2004): - afgeleid van op basis van transportformule van Meyer-Peter-Müller: Vgl. (2-14) - afgeleid van op basis van transportformule van Engelund & Hansen: Vgl. (2-18)
	Duinlengte-model	Van Rijn (1984)	Vgl. (2-8)
Ruwheidsvoorspeller		Van Rijn (1984)	Vgl. (2-9) tot (2-11)
Empirisch model voor de dynamica van bodemvormen		Conform Allen (1976)	Vgl. (2-27), met advectiongedrag volgens Vreugdenhil & De Vries (1973) Vgl. (2-28)

2.1.6 Definitie van presentatie van bevaarbare bodemligging

Naast keuze voor de duinvormvoorspellers en het empirisch model voor de dynamica van bodemvormen is de presentatie van de bevaarbare bodemligging in het licht van de voorspelde duinhoogtes een belangrijk item in deze studie. De bodemvormen kunnen na een hoogwater grote obstakels vormen voor de scheepvaart. Daarmee zijn ze belangrijk voor de voorspellingen van het aanwezige vaarwegprofiel en het benodigde jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk.

In overeenstemming met de DVR benadering kan de voor de vaarweg maatgevende bodemligging voor elke rekencel als volgt worden gedefinieerd:

$$Z_{\text{rep}}(x, t) = \bar{Z}(x, t) + \alpha \sigma(x, t) \quad (2-31)$$

met:

Z_{rep} de representatieve bodemligging voor de vaardiepte in [m]+NAP

\bar{Z} de bodemvorm-gemiddelde bodemligging [m]+NAP

σ een ruimtelijke variatie in de bodemligging [m]

α een evenredigheidsconstante (vrij te kiezen constante tussen 0 en 1)

De bodemvorm-gemiddelde bodemligging \bar{Z} wordt momenteel voorspeld door Delft3D. De ruimtelijke variatie σ , door bijdragen van bodemvormen, kan indien we uitgaan van driehoekige bodemvormen worden benaderd met:

$$\sigma = \frac{H}{\sqrt{12}} \quad (2-32)$$

Hierin is H de amplitude van de bodemvormen (hoogteverschil tussen top en trog) die volgt uit het bodemvormmodel in combinatie met één van de gekozen duinhoogtevoorspellers.

De sommatie van bodemvorm-gemiddelde bodemligging \bar{Z} en de ruimtelijke variatie $\alpha\sigma(x, t)$ is niet in de code van Delft3D geïmplementeerd.

De gebruiker kan via een nabewerking van de resultaten zelf deze sommatie maken middels het definiëren van een nieuwe variabele in Quickplot. Dit geeft de gebruiker zelf de mogelijkheid te bepalen met welke factor de amplitude van de bodemvormen wordt vermenigvuldigd, ervan uitgaande dat men niet altijd van driehoekige bodemvormen uitgaat.

3 Implementatie en testen

3.1 Inbouwen van de voorspellers in Delft3D-3DMOR

Het vorige hoofdstuk geeft een overzicht en selectie van voorspellers die in aanmerking komen om in Delft3D te worden ingebouwd namelijk: duinhoogte-, duinlengte-, en duinruwheidshoogtevoorspellers en het relaxatie- en advectiongedrag van duinhoogtes. In dit hoofdstuk zal worden uitgelegd hoe elk van deze aspecten in Delft3D is ingebouwd en welke keuzes daarbij gemaakt zijn. Er zal een beknopte gebruikershandleiding voor het gebruik van duinhoogtevoorspellers volgen aan de hand van een voorbeeld. Verder worden er aan het eind van dit hoofdstuk nog enkele numerieke experimenten uitgevoerd ter verificatie van de implementatie. De gehanteerde parameterwaarden in de experimenten betreffen niet altijd voor de Waal realistische waarden. De experimenten hebben met name als doel te implementatie te testen en de resultaten mogen dus niet een op een vergeleken worden met praktijk situaties in de Waal.

3.1.1 Duinhoogte

Voor de evenwichtsduinhoogte H_d zijn er een viertal voorspellers geïmplementeerd in Delft3D namelijk:

- Voorspeller van Van Rijn (1984) (Vgl. 2-6);
- Voorspeller conform Fredsøe (1982) met de uitwerking voor Meyer-Peter & Müller (1948) (Vgl. 2-14);
- Voorspeller conform Fredsøe (1982) met de uitwerking voorspeller voor Engelund-Hansen (Vgl. 2-18); en
- Een machtsrelatie afhankelijk van de lokale waterdiepte h (Vgl 3-1).

Voor de voorspeller Van Rijn (1984) (Vgl. 2-6) worden de korreldiameterpercentielen D_{50} en D_{90} uit de lokale sedimenteigenschappen gehaald, mits er met morfologie wordt gerekend. In het geval er niet met morfologie wordt gerekend is het mogelijk om een constante D_{50} en D_{90} op te geven. Voor de relatieve korrelspecifieke dichtheid is de waarde $\Delta = 1.65$ aangenomen en voor de kinematische viscositeit is de waarde $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ aangenomen.

In de beide voorspellers conform Fredsøe (1982) uitgewerkt voor Meyer-Peter & Müller (1948) (Vgl. 2-14) en uitgewerkt voor Engelund-Hansen (Vgl. 2-18) moet nog een parameter ε worden gespecificeerd (zie ook Bijlage A).

De machtsrelatie afhankelijk van de lokale waterdiepte wordt gegeven door

$$H_d = Bdf_{Ha} \cdot h^{Bdf_{Hb}} \quad (3-1)$$

waarbij Bdf_{Ha} en Bdf_{Hb} twee constante dimensieloze parameters zijn die door de gebruiker worden gespecificeerd.

3.1.2 Duinlengte

De duinlengte L_d kan worden voorspeld door Van Rijn (1984) (Vgl. 2-8) of door een machtsrelatie afhankelijk van de lokale waterdiepte h (Vgl. 3-2):

$$L_d = Bdf_{La} \cdot h^{Bdf_{Lb}} \quad (3-2)$$

De parameters Bdf_{La} en Bdf_{Lb} zijn constant en door de gebruiker op te geven.

3.1.3 Ruwheidshoogte

De implementatie van de ruwheidshoogte $k_{\text{bodemvorm}}$ ten gevolge van bodemvormen kan door middel van Van Rijn (1984) (Vgl. 2-9 – Vgl. 2-11) of een machtsrelatie afhankelijk van lokale duinhoogte H_d (Vgl. 3-3):

$$k_{\text{bodemvorm}} = Bdf_{Ra} \cdot H_d^{Bdf_{Rb}} \quad (3-3)$$

De constanten Bdf_{Ra} en Bdf_{Rb} zijn door de gebruikers te specificeren parameters en de lokale duinhoogte H_d volgt uit het berekende ruimtelijk en tijdsafhankelijke gedrag van de bodemvormen (Vgl. 2-27). Indien Bdf_{Rb} gelijk is aan 1, komt de vergelijking overeen met Vgl. 2-19 die Sieben (2004) voor de ruwheidshoogte gebruikt.

3.1.4 Relaxatie- en advectiongedrag

Voor het modeleren van advection- en relaxatiegedrag is een model conform Allen (1976), (Vgl. 2-27) in Delft3D geïmplementeerd, zie Sieben (2006). De implementatie biedt de mogelijkheid voor ofwel een constante relaxatietijd T_H (als parameter door de gebruiker te specificeren) of een in ruimte en tijd variërende relaxatietijd. In het geval van een variërende relaxatietijd T_H volgt deze T_H uit de voortplantingssnelheid voor duinhoogtevariëaties c_H en de ruimtelijke aanpassingslengte L_H (d.m.v. $T_H = L_H/c_H$). L_H moet dan als parameter worden opgeven en de voortplantingssnelheid van duinhoogtevariëaties c_H in (2-27) wordt met behulp van de volgende vergelijking uitgerekend:

$$c_{H_x}(u, h) = \frac{Bdf_{Ca} |u|^{Bdf_{Cb}-1}}{h} \quad \text{en} \quad c_{H_x}(v, h) = \frac{Bdf_{Ca} |v|^{Bdf_{Cb}-1}}{h} \quad (3-4)$$

waarbij

- u de snelheid in x-richting in [m/s],
- v de snelheid in y-richting in [m/s],
- h de waterdiepte [m],
- Bdf_{Ca} constante gebruikersparameter, en
- Bdf_{Cb} constante gebruikersparameter.

Kiest men $Bdf_{Ca} = a \cdot \gamma \cdot b$ en $Bdf_{Cb} = b$ en aannemende dat het om laagland rivieren met lage Froude getallen verkrijgen we uit Vgl. (3-4) de voortplantingssnelheid van duinhoogtevariëaties uit Vgl. 2-30. Om de richting van de advection van duinhoogtevariëaties te bepalen wordt $|u|^{Bdf_{Cb}-1}$ uitgerekend i.p.v. $u^{Bdf_{Cb}}$ (vergelijkbaar voor v). Als de parameters Bdf_{Ca} en Bdf_{Cb} en/of L_H niet worden opgegeven dan is $c_H \equiv 0$ (geen advectiongedrag). Als er geen T_H wordt gespecificeerd dan is $T_H = Dt$ (de tijdsstap), waarmee binnen enkele tijdsstappen de duinhoogte H gelijk is aan de evenwichtsduinhoogte H_d .

Met het opgeven van een morfologische factor kan ook de voortplantingssnelheid van duinhoogtevariaties en de relaxatietijd worden meegeschaald.

3.2 Handleiding voor het gebruik duinhoogtevoorspellers

Met behulp van specifieke sleutelwoorden in de master definition file (.mdf) van een Delft3D schematisatie kan een berekening worden gedefinieerd met duinhoogtevoorspellers. Een overzicht van deze sleutelwoorden en hun betekenis staan in Tabel 3-1. Aan de hand van een voorbeeld wordt uitgelegd hoe een master definition file moet worden aangepast om duinhoogtevoorspellers te gebruiken.

Tabel 3-1 Overzicht van mogelijke sleutelwoorden en waarden voor het rekenen met bodenvormvoorspellers

Sleutel woord	Omschrijving	Mogelijke waarden
Bdf	Rekenen met bodenvormvoorspellers aan of uitschakelen	#Y# #N#
BdfH	Type voorspeller voor de evenwichtsduinhoogte H_d	#VanRijn84# (Default) #Sieben04MPM# #Sieben04EH# #Machtsrelatie#
BdfHa	Bdf_{Ha} parameter voor $BdfH = \#Machtsrelatie\#$	Real(fp) (Default =0.0)
BdfHb	Bdf_{Hb} parameter voor $BdfH = \#Machtsrelatie\#$	Real(fp) (Default =1.0)
BdfEps	ϵ parameter voor $BdfH = \#Sieben04MPM\#$ of $\#Sieben04EH\#$	Real(fp) (Default =1.0)
BdfL	Voorspellertype voor de duinlengte L_d	#VanRijn84# (Default) #Machtsrelatie#
BdfLa	Bdf_{La} parameter voor $BdfL = \#Machtsrelatie\#$	Real(fp) (Default =0.0)
BdfLb	Bdf_{Lb} parameter voor $BdfL = \#Machtsrelatie\#$	Real(fp) (Default =1.0)
BdfR	Keuze mogelijkheid voor het voorspellen van de ruwheid ten gevolge bodenvormen $k_{bodemvorm}$	#VanRijn84# (Default) #Machtsrelatie#
BdfRa	Bdf_{Ra} parameter voor $BdfR = \#Machtsrelatie\#$	Real(fp) (Default =0.0)
BdfRb	Bdf_{Rb} parameter voor $BdfR = \#Machtsrelatie\#$	Real(fp) (Default =1.0)
BdfCa	Bdf_{Ca} parameter ($= a \cdot \gamma \cdot b$) voor voortplantingssnelheid van bodenvormen	Real(fp) (Default =0.0)
BdfCb	Bdf_{Cb} parameter ($= b$) voor voortplantingssnelheid van bodenvormen	Real(fp) (Default =1.0)
BdfD10	10°-percentiel van korreldiameters, wordt overruled als er met morfologie wordt gerekend.	Real(fp) (Default =0.0)
BdfD50	50°-percentiel van korreldiameters, wordt overruled als er met morfologie wordt gerekend.	Real(fp) (Default =0.0)
BdfD90	90°-percentiel van korreldiameters, wordt overruled als er met morfologie wordt gerekend.	Real(fp) (Default =0.0)

Sleutel woord	Omschrijving	Mogelijke waarden
BdfCFL	Aan of uitzetten van check voor mogelijke CFL-conditie overschrijding door advection term in duinhoogte aanpassing.	#Y# (default #N#) #N#
BdfT_H	De relaxatie tijd T_H (Als BdfL_H gedefinieerd is ($BdfL_H > 0.0$) dan volgt de relaxatie tijd uit L_H/c_H)	Real(fp) (default =Dt)
BdfL_H	De karakteristieke aanpassings lengteschaal L_H	Real(fp) (default =0.0)
BdfUni	Een uniforme waarde voor de duinhoogte d.m.v. een getal	Real(fp) (default =0.0)

In Figuur 3-1 staat een voorbeeld van een aangepaste master definition file, met daarin de volgende informatie:

- Via het sleutelwoord *BdfH* is de evenwichtsduinhoogtevoorspeller van Van Rijn (1984) (Vgl. 2-6) ingeschakeld. Deze krijgt informatie over de korreldiameters doordat *Filsed* en *Filmor* gespecificeerd zijn.
- De duinhoogtes volgen na het berekenen van het tijds- en ruimteafhankelijke gedrag (sleutelwoorden: *BdfT_H*, *BdfCa*, *BdfCb*, *BdfL_H*). Het tijds- en ruimteafhankelijke gedrag wordt geschaald middels de morfologische factor *MorFac* in het bestand waar de morfologische eigenschappen worden vastgelegd (*Filmor* = #...#).
- Het sleutelwoord *BdfL* geeft aan dat een machtsrelatie (Vgl. 3-2) met coëfficiënten *BdfLa* en *BdfLb* de duinlengte voorspelt.
- De ruwheidshoogte (met sleutelwoord *BdfR*) van deze duinen wordt ook door een machtsrelatie (vgl 3-3) bepaald met coëfficiënten *BdfRa* en *BdfRb*.
- Om de berekende ruwheid ten gevolge van duinen door te laten werken op de stroming is het noodzakelijk om het rekenen met trachytopen in te schakelen (*Trtrou* = #Y#). *Trtu* en *Trtv* geven het bestand met daarin de trachytopen per gebied. In Figuur 3-2 staat hiervan een voorbeeld [bdf.aruv] dat op 100% van het gebied trachytoop index 13 voorschrijft. Figuur 3-3 geeft dan aan hoe trachytoop index 13 overeen komt met de code 106 die intern door Delft3D geassocieerd wordt met een duinveld.

```
(...)
Filsed= #bdf.sed#           Bestand met sediment eigenschappen
Filmor= #bdf.mor#           Bestand met morfologie eigenschappen (MorFac)
Trtrou= #Y#                 Rekenen met trachytopen ingeschakeld
Trtdef= #bdf.def#           Trachytopendefinitie bestand
Trtu = #bdf.aruv#           Alluviale ruwheid bestand in u-richting
Trtv = #bdf.aruv#           Alluviale ruwheid bestand in v-richting
Bdf = #Y#                   Rekenen met bodenvormvoorspellers ingeschakeld
BdfH = #VanRijn84#          Duinhoogtevoorspeller van Van Rijn (1984)
BdfL = #Machtsrelatie#      Keuze voor duinlengtevoorspeller
BdfLa = 7.2                 La-parameter voor BdfL = #Machtsrelatie#
BdfLb = 0.9                 Lb-parameter voor BdfL = #Machtsrelatie#
BdfR = #Machtsrelatie#      Keuze voor ruwheidshoogtevoorspeller
BdfRa = 0.7                 Ra-parameter voor BdfR = #Machtsrelatie#
BdfRb = 1.0                 Rb-parameter voor BdfR = #Machtsrelatie#
BdfL_H= 120.0               Aanpassingslengte van 120 meter.
BdfCa = 3.28e-004           Ca-parameter in bodenvormsnelheid CH
BdfCb = 5.0                 Cb-parameter in bodenvormsnelheid CH
BdfCFL= #Y#                 Check voor CFL-conditie ingeschakeld
```

Figuur 3-1: Voorbeeld Master Definition File [bdf.mdf]

```
* Trachytope area U/V file (same file used for U and V directions
* in this simulation).
* One trachytope number 13 for 100% of the area fraction. Refer to
* bdf.def file for meaning of trachytope number 13.
*
1 1 22 52 13 1.0 mmin nmin mmax nmax trachytope_number percentage
```

Figuur 3-2: Voorbeeld alluviale ruwheden bestand (u en v richting) [bdf.aruv]

```
* Trachytope definition file
*
* The trachytope number (first column) is arbitrary as long as
* you use it consistently with the number in the area u/v files.
*
* The intended roughness formulation is indicated by the second
* column. In this case it is a dunefield (106)
*
13 106
```

Figuur 3-3: Voorbeeld trachytopen definitiebestand [bdf.def]

Tabel 3-2 geeft een overzicht van foutmeldingen en waarschuwingen die kunnen optreden met betrekking tot de ingebouwde duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers.

Tabel 3-2 Tabel met foutmeldingen en waarschuwingen ten gevolge van duinhoogte voorspellers

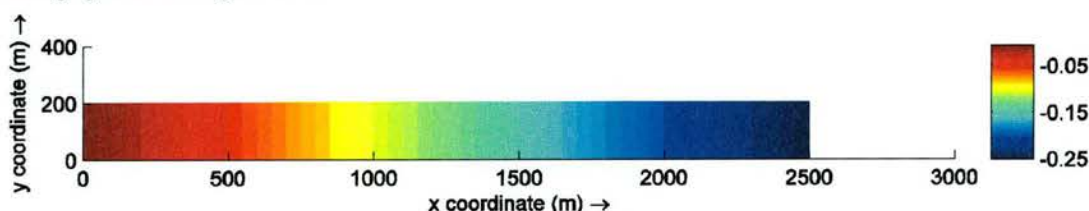
Foutmelding of Waarschuwing	Betekenis
ERROR: 'RDBEDFORMPAR: memory alloc error'	Geheugen kan niet worden vrijgemaakt.
WARNING: No bedform height predictor specified: Van Rijn 1984 chosen	Geen of onbekende BdfH gespecificeerd. Default waarde aangenomen (BdfH = #VanRijn84#).
WARNING: No bedform length predictor specified: Van Rijn 1984 chosen	Geen of onbekende BdfR gespecificeerd. Default waarde aangenomen (BdfR = #VanRijn84#).
WARNING: No bedform roughness predictor specified: Van Rijn 1984 chosen	Geen of onbekende BdfR gespecificeerd. Default waarde aangenomen (BdfR = #VanRijn84#).
WARNING : Dune height coefficients in .mdf -> Dune height = 0.0	BdfHa, BdfHb onbekend of ongeldig. Default toegekend: BdfHa = 0.0, BdfHb = 1.0
WARNING : Dune length coefficients in .mdf -> Dune length = 0.0	BdfLa, BdfLb onbekend of ongeldig. Default toegekend: BdfLa = 0.0, BdfLb = 1.0
WARNING : Dune roughness coefficients in .mdf -> Dune roughness = 0.0	BdfRa, BdfRb onbekend of ongeldig. Default toegekend: BdfRa = 0.0, BdfRb = 1.0
WARNING : Bedform adaptation timescale set equal to time step	BdfT_H onbekend of ongeldig. Default toegekend: BdfT_H = Dt
WARNING : Bedform adaptation timescale calculated as $BdfL_H * h / (BdfCa * u^BdfCb)$	BdfT_H wordt overruled en berekend op basis van $BdfL_H * h / (BdfCa * u^BdfCb)$.
WARNING : CALBF: Possible violation of CFL-condition [Keywords: BdfCa, BdfCb, MorFac]	CFL-conditie mogelijk overschreden. Mogelijke Oorzaak [BdfCa, BdfCb, MorFac of Dt].

3.3 Verificatie van de nieuwe source code

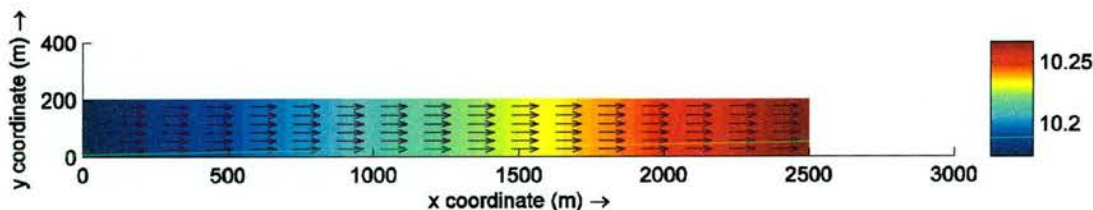
3.3.1 Basistest

Voor het testen van de nieuwe code zijn enkele numerieke experimenten gedaan. Dit zijn variaties op de volgende basistest. De test bestaat uit een rechthoekig rooster van 200 bij 2500 meter. Aan de bovenstroomse rand is een uniform debiet opgelegd van $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Benedenstrooms is de waterstand vastgelegd op 10 meter. Beide gebiedsgrenzen aan de langszijde zijn gesloten. Er is in alle tests gerekend met een tijdstap van 1 minuut.

Als er een morfologische factor (MorFac) ongelijk aan 1 wordt gebruikt dan zal deze worden gespecificeerd per test. De ruwheid volgt uit het resultaat van de duinruwheidshoogtevoorspeller, die per test zal worden gekozen, en de korrelruwheid. De bodemligging is weergegeven in Figuur 3-4 en de waterstand en het snelheidsprofiel staan weergegeven in Figuur 3-5.



Figuur 3-4: De initiële bodemligging van de basistest.



Figuur 3-5: De waterdiepte en het snelheidsveld (ongeveer 1.475 m/s) voor de basistest.

Bij de interpretatie van de verschillende testen moet rekening worden gehouden met het feit dat de gehanteerde parameterwaarden in de experimenten niet altijd voor de Waal realistische waarden betreffen. De experimenten hebben als doel te implementatie te testen. In Hoofdstuk 4 wordt een praktijktoepassing op de Waal beschreven.

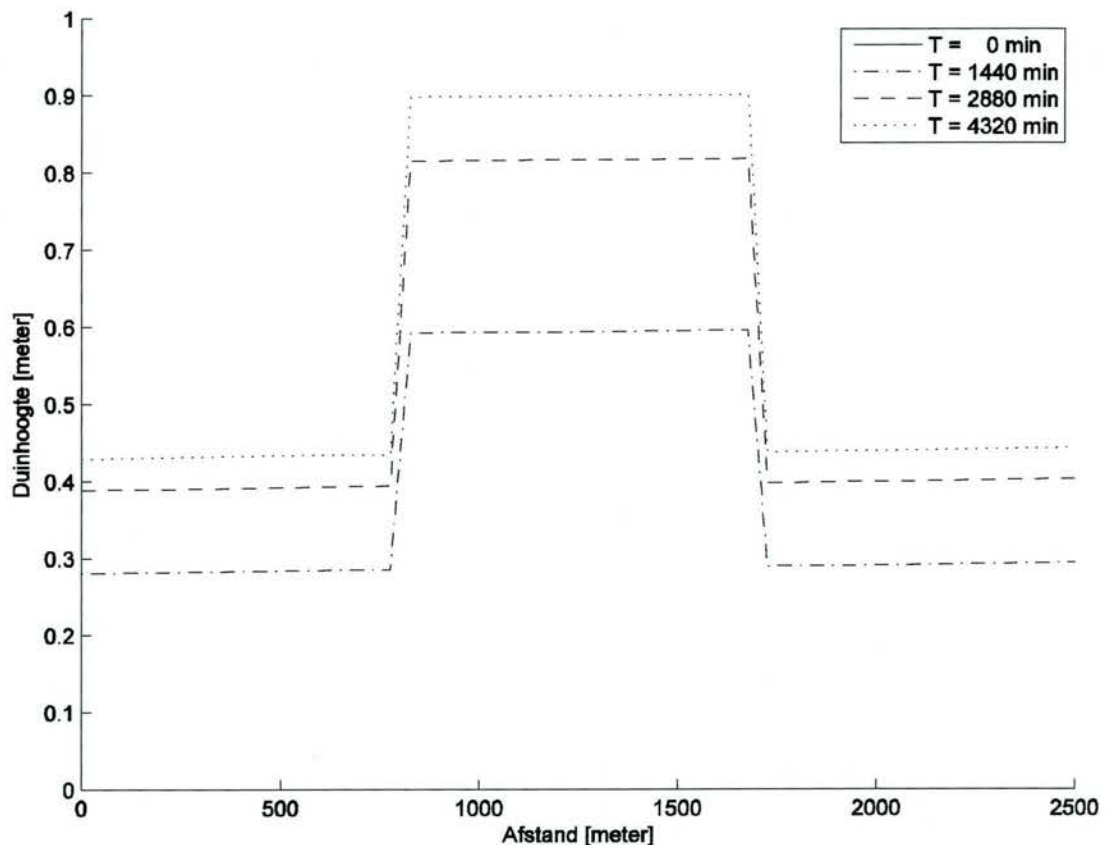
3.3.2 Test voor duinhoogtevoorspellers

De eerste variant op de basistest is het berekenen van de duinhoogte door middel van de aanpak van Van Rijn (1984). De duinlengtevoorspeller in deze simulatie is ook van Van Rijn (1984) en voor het voorspellen van de ruwheidshoogte ten gevolge van de duinvormen is ook gekozen voor Van Rijn (1984).

Deze simulatie bestaat uit een ruimtelijk variërende korreldiameter volgens vergelijking (3-5):

$$D_{50} = \begin{cases} 200\mu m & x < 825m \\ 600\mu m & 825m \leq x \leq 1725m \\ 200\mu m & x > 1725m \end{cases} \quad (3-5)$$

Voor deze berekening is gekozen voor een relaxatietijd van een dag ($T_H = 1440$ minuten = 1 dag). Er vindt geen advectiongedrag plaats. Figuur 3-6 geeft de duinhoogte in langsrichting weer voor de tijden $T = 1$ dag, $T = 2$ dagen, en op $T = 3$ dagen. Te zien is hoe de variatie in de korreldiameter D_{50} een ruimtelijk variërende duinhoogte voorspelt. De exponentiële groei van de duinhoogten, waar na de relaxatietijd T_H de duinhoogte ongeveer 64% van de evenwichtsduinhoogte heeft bereikt is ook weergegeven in Figuur 3-6.



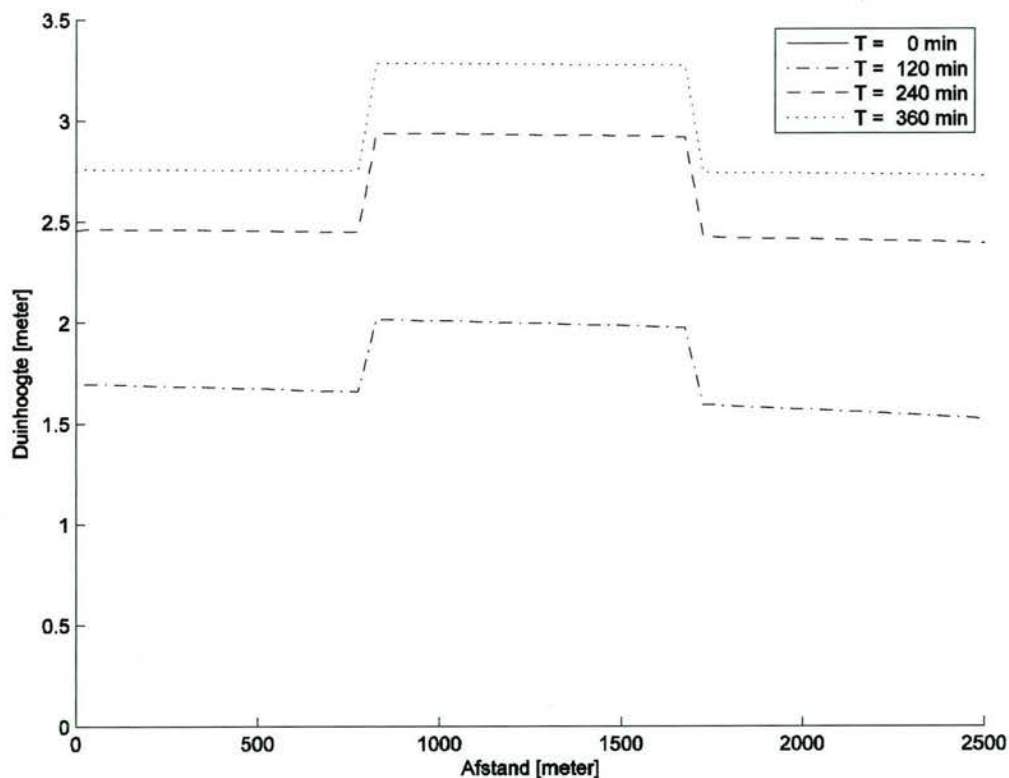
Figuur 3-6: De evolutie van de duinhoogte zoals berekend met de voorspeller van Van Rijn 1984. Er is gerekend met een relaxatietijd van $T_H = 1440$ en twee verschillende korreldiameters.

3.3.3 Test voor ruwheidshoogtevoorspellers

Voor het testen van de ruwheidshoogtevoorspellers is een tweede variant op de basistest uitgevoerd. In deze simulatie is gerekend met de duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982) met de uitwerking voor Meyer-Peter & Müller (1948) (Vgl. 2-14). De constante ε is gelijk aan 1. Voor de ruwheidshoogte ten gevolge van duinen is uitgegaan van een machtsrelatie gegeven door Vgl. (3-3) met $Bdf_{Rb}=1$ voor verschillende Bdf_{Ra} . De relaxatietijd T_H in deze simulatie bedraagt 1440 minuten en er is gerekend met een morfologische factor $MorFac = 12$. Er is ook een ruimtelijke variatie gespecificeerd in de korreldiameters gespecificeerd volgens vergelijking (3-6):

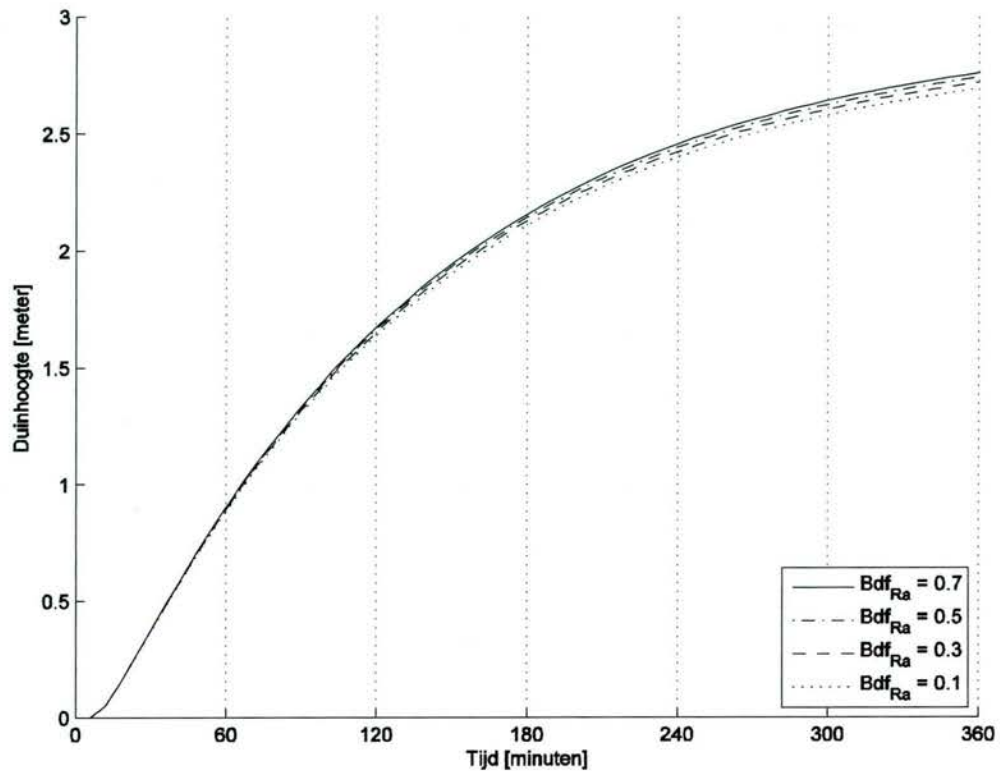
$$D_{50} = \begin{cases} 2mm & x < 825m \\ 1mm & 825m \leq x \leq 1725m \\ 2mm & x > 1725m \end{cases} \quad (3-6)$$

De groei van de duinhoogtes in de loop van de tijd is in Figuur 3-7 weergegeven. In Figuur 3-7 is te zien dat de hoogte van de duinen richting de evenwichtsduinhoogte groeit.

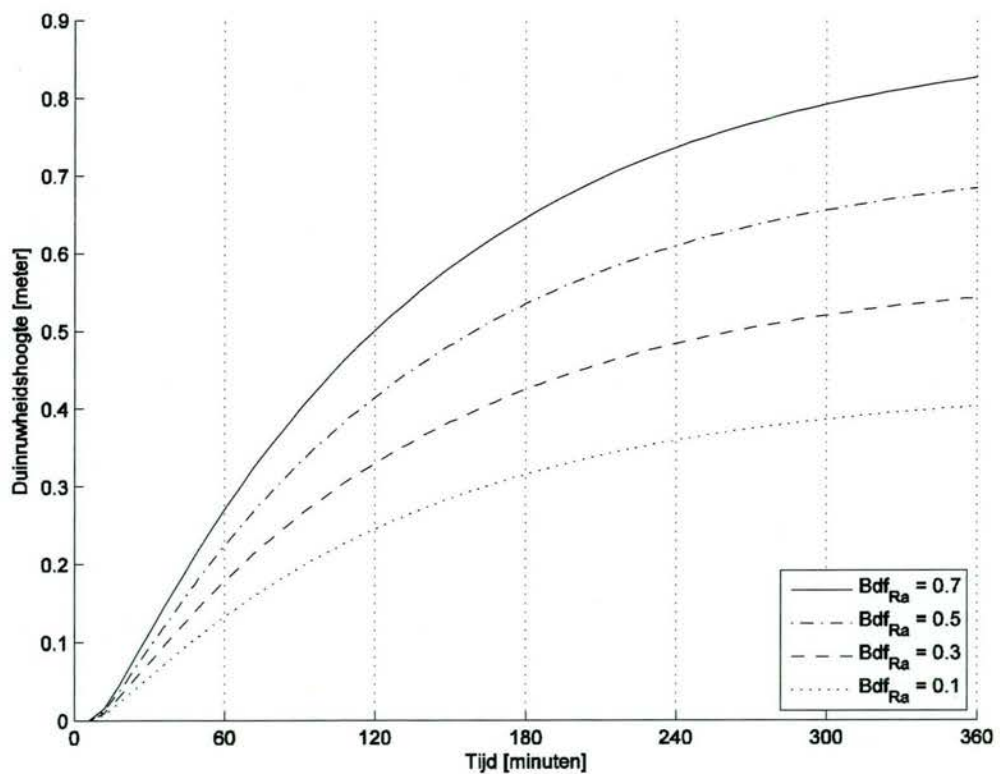


Figuur 3-7: De duinhoogte zoals berekend met de duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982) met de uitwerking voor Meyer-Peter & Müller (1948).

De grafieken Figuur 3-8 en Figuur 3-9 laten de evolutie zien van de duinruwheidshoogte en de duinhoogte op $(x,y) = (500m, 100m)$ voor verschillende Bdf_{Ra} . Te zien is dat de duinhoogte zich langzaam aanpast richting de evenwichtsduinhoogte die afhankelijk is van de korreldiameter. De terugkoppeling van de duinruwheidshoogtes is niet van grote invloed op de daarmee samenhangende groei van de duinhoogtes (zie Figuur 3-8 en 3-9), wat ook volgt uit de vergelijkingen 2-14 t/m 2-16.



Figuur 3-8: De evolutie van de duinhoogte voorspeld met de duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982) met de uitwerking voor Meyer-Peter & Müller (1948), (Vgl. 2-14), voor variërende Bdf_{Ra} .

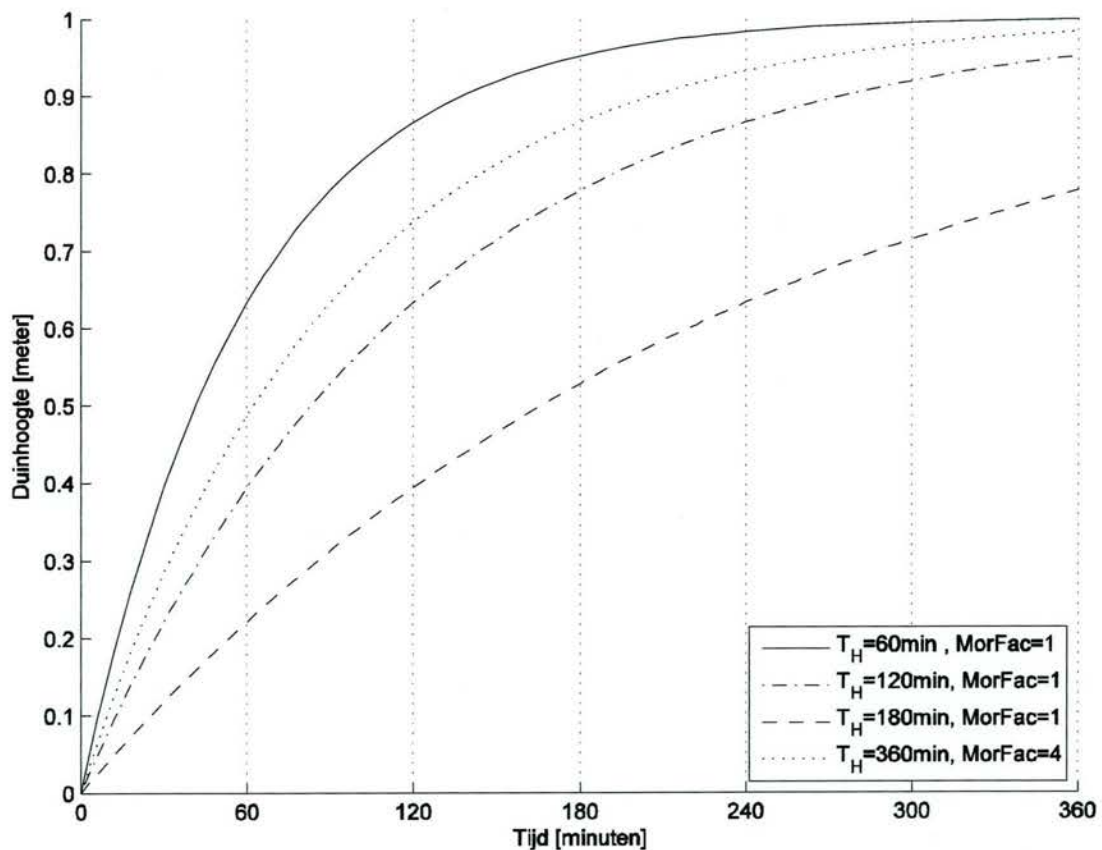


Figuur 3-9: De evolutie van de duinruwheidshoogte die op basis van een machtsrelatie (3-3) voor variërende Bdf_{Ra} is voorspeld.

3.3.4 Tests voor relaxatie en advectiongedrag

Test 1

De eerste case voor het bestuderen van de effecten van het relaxatie gedrag gaat uit van een duinhoogtevoorspeller op basis van een machtsrelatie via vergelijking (3-1), met de coëfficiënten $Bdf_{Ha} = 1$ en $Bdf_{Hb} = 0$. Er wordt geen duinlengte of ruwheid ten gevolge van duinen berekend. In Figuur 3-10 is duidelijk te zien hoe na een periode $T_H/MorFac$ de duinen zich tot ongeveer 63% van de evenwichtsduinhoogte hebben aangepast.

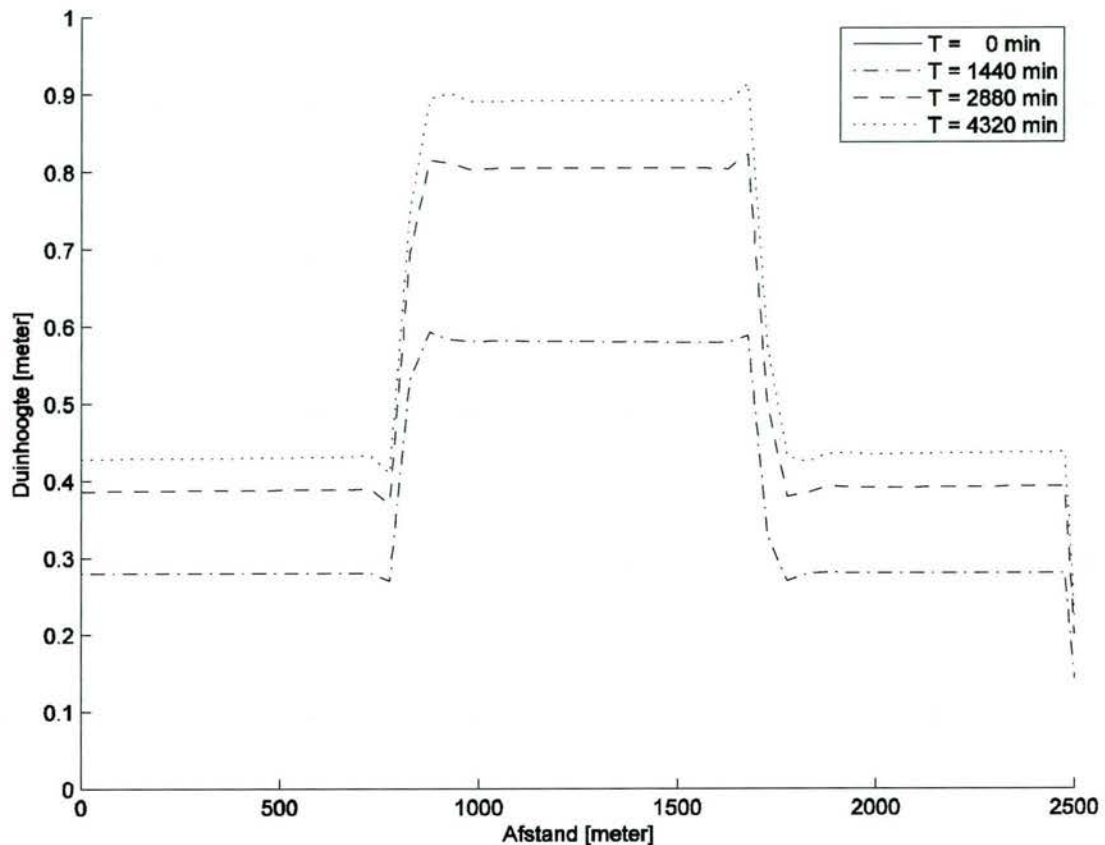


Figuur 3-10: De groei van de duinhoogte op locatie $(x,y) = (500m, 100m)$ waarbij de evenwichtsduinhoogte $H_d = 1$ voor verschillende relaxatietijden T_H en morfologische factoren MorFac.

Test 2

In deze variant van de basistest is een ruimtelijke aanpassing geïntroduceerd. Er is gerekend met de duinhoogte-, duinlengte- en de duinruwheidshoogtevoorspeller van Van Rijn (1984). Er is een ruimtelijk variërende korreldiameter gedefinieerd volgens vergelijking (3-5). Verder is de advectionssnelheid bepaald via vergelijking (3-4) met de coëfficiënten $Bdf_{Ca} = 3.28 \cdot 10^{-4}$ en $Bdf_{Cb} = 5.0$. Voor de aanwezige stroomcondities komt dit neer op een voortplantingssnelheid van duinhoogtevariëaties c_H van ongeveer 20 meter per dag. De ruimtelijke aanpassingslengte L_H is gelijk gesteld aan 20 meter, waaruit volgt $T_H \approx 1$ dag.

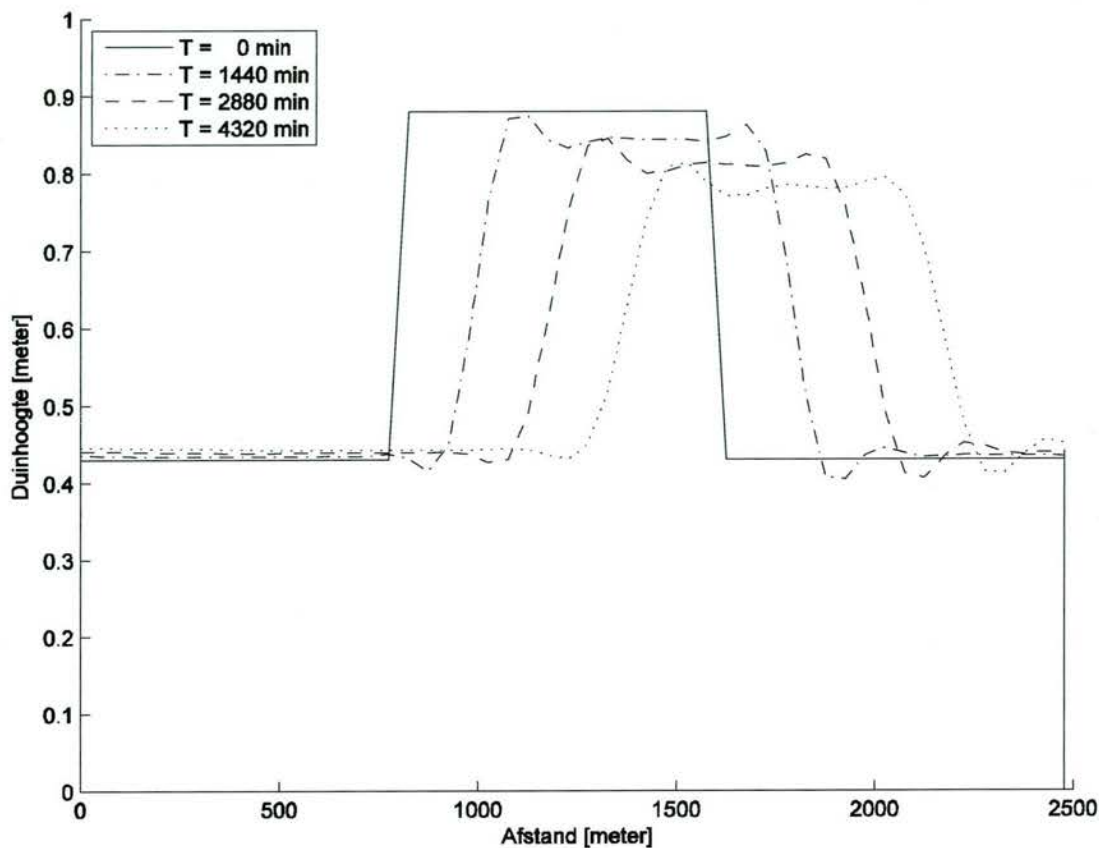
Figuur 3-11 laat zien dat voor dit experiment het relaxatiegedrag meer van invloed is op de duinhoogte dan het advectiongedrag.



Figuur 3-11: Ruimtelijke aanpassing op basis van Van Rijn (1984) met $Bdf_{Ca} = 3.28 \cdot 10^{-4}$, $Bdf_{Cb} = 5.0$ en een ruimtelijke aanpassingslengte $L_H = 20$ m.

Test 3

In de derde test gaan we uit van een initieel ruimtelijk variërende duinhoogte. Op het gehele gebied is een constante korreldiameter D_{50} aanwezig. De advectionssnelheid wordt bepaald met behulp van Vgl. (3-4), met de coëfficiënten $Bdf_{Ca} = 3.28 \cdot 10^{-3}$ en $Bdf_{Cb} = 5.0$. De resulterende advectionssnelheid is ongeveer 200 meter per dag. We kiezen een aanpassingslengte $L_H = 2000$ m waaruit zal volgen dat de relaxatietijd $T_H \approx 10$ dagen. In Figuur 3-12 is te zien dat in dit experiment het advectiongedrag dominant is in het beschrijven van de evolutie van de duinhoogte. Er wordt nog even opgemerkt dat dit dus niets zegt over de mate waarin het advectiongedrag in een praktijkvoorbeeld dominant is.



Figuur 3-12: Ruimtelijke aanpassing op basis van Van Rijn (1984) met $Bdf_{Ca} = 3.28 \cdot 10^{-3}$, $Bdf_{Cb} = 5.0$ en een ruimtelijke aanpassingslengte $L_H = 2000 \text{ m}$.

4 Case studie op de Waal

4.1 Doel van de casestudie

Na de implementatie van de duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers en het model voor de dynamica van bodemvormen, is het concept van deze voorspellers getoetst aan metingen. Hiertoe is een casestudie uitgevoerd met het morfologische model van de Rijntakken dat in het kader van DVR is opgezet (Van Vuren et al., 2006). Opgemerkt wordt dat het model niet uitvoerig gekalibreerd is en dat de modelberekeningen slechts een ruwe benadering geven van de bodemvormgemiddelde bodem. De invloed van de duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers op modelresultaten is geanalyseerd voor (1) de duinhoogtevoorspeller van Van Rijn (1984) en (2) duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982) met de uitwerking voor Meyer-Peter & Müller (1948), zie Sieben (2004).

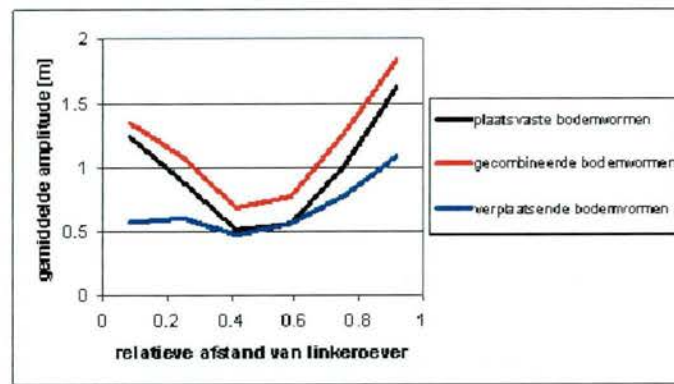
Berekeningen zijn uitgevoerd met het deeldomein voor de Waal van het DVR model. Het deelmodel wordt in Sectie 4.2 kort toegelicht. In de berekeningen is de laagwaterperiode van 2003 doorgerekend. Modelinstellingen ten aanzien van de duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers zijn gegeven in Sectie 4.3. De volgende berekeningen zijn uitgevoerd:

1. Berekening met de duinhoogte- en ruwheidsvoorspeller van Van Rijn (1984):
 - a) met en b) zonder het model voor de dynamica van bodemvormen conform Allen (1976)
2. Berekening met de duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982) met de uitwerking voor Meyer-Peter & Müller (1948) en de ruwheidsvoorspeller volgens Vgl. 2-19:
 - a) met en b) zonder het model voor de dynamica van bodemvormen conform Allen (1976)
3. Berekening zonder duinhoogtevoorspeller en zonder het bodemvormdynamica-model. In deze berekening is de alluviale ruwheidsvoorspeller van Van Rijn (2006) toegepast, zie Bijlage B. Dit is de ruwheidsdefinitie die in de Baseline-schematisatie is opgenomen en in de eerste testberekeningen met het DVR model is toegepast, zie Bijlage B.

Voorafgaand aan deze berekeningen is een modelsimulatie uitgevoerd om het model morfologisch te laten inspelen en fouten die door de beginschematisatie (in bijvoorbeeld de schematisatie van de bodemvormgemiddelde bodem) en de modelinstellingen zijn geïntroduceerd, te verwijderen. Om het model voldoende morfologisch te laten inspelen is een periode van 2 jaar doorgerekend met een constante en morfologisch representatieve afvoer van 1600 m³/s. De ‘inspeel-berekening’ is uitgevoerd met het model zonder duinhoogtevoorspeller en zonder het model voor de dynamica van bodemvormen conform Allen (1976).

De berekende bodemliggingen en duinhoogten op de Waal zijn vergeleken met metingen tijdens de laagwaterperiode van 2003, zie Sectie 4.5.

Rijkswaterstaat RIZA heeft hiertoe ‘bewerkte’ meetgegevens beschikbaar gesteld van een voorjaars- en een najaarspeiling, respectievelijk van peilingen in week 14 en in week 49 van 2003. De ‘bewerkte’ gegevens betreffen (1) bodemvormgemiddelde bodemliggingen en (2) amplituden van bodemvormen langs de rivier op 6 locaties in het dwarsprofiel (langs de linker- en rechter oever, links en rechts op de Waal, en links en rechts van de rivieras. De amplituden betreffen de combinatie van de amplituden van plaatsvast en verplaatsende bodemvormen. In Figuur 4-1 is te zien dat het amplitude-aandeel van de plaatsvast bodemvormen langs de oevers erg groot is, zie Sieben (2004a). Met Delft3D worden de amplituden van verplaatsende bodemvormen berekend. Voor de vergelijking van de metingen worden de metingen langs de oeverlijnen buiten beschouwing gelaten. Alleen de waarden op minimaal 50 m van de normaallijnen zijn meegenomen in de vergelijking. Tevens moet gerealiseerd worden dat slechts een deel van de amplituden te relateren is aan de verplaatsende bodemvormen.



Figuur 4-1. Onderscheid in parameters van over de Waal-gemiddelde plaatsvast en verplaatsende bodemvormen voor oriëntatiepeiling 2003 [Bron: Sieben (2004a)].

De bodemvormgemiddelde bodemligging van de peiling van week 14 is gebruikt als beginbodemligging in het ‘inspeelmodel’. De ingespeelde situatie vormt samen met de amplituden van de bodemvormen van de peiling van week 14 de beginconditie van de modelberekeningen 1 tot en met 3.

4.2 Beschrijving van het Waal-model

De bouw van het morfologisch van het deeldomein van de Waal is uitvoerig beschreven in Van Vuren et al. (2006). Na het opzetten van het rekenrooster, is de modelschematisatie in twee stappen opgezet. De eerste stap betreft het aanmaken van de hydraulische schematisatie van het model met behulp van Baseline. Er is gebruikt gemaakt van Baseline-versie 3.3 en de basisschematisatie die is toegepast in de PKB-studie en de Hydraulische Randvoorwaarden 2001. In de tweede stap zijn vervolgens de bestanden voor de bodemsamenstelling, de vaste lagen (inclusief winterbed en oevers), de randvoorwaarden en de sedimenttransportformules aangemaakt om het model geschikt te maken voor morfologische berekeningen.

Voor een uitgebreide beschrijving van het rooster, de Baseline-projectie en de modelschematisatie wordt verwezen naar Van Vuren et al. (2006).

Een korte samenvatting volgt hieronder. Wijzigingen ten opzichte van het DVR model uit Van Vuren et al. (2006) zijn hieronder ook besproken.

4.2.1 Rekenrooster

Het rekenrooster van het deelmodel van de Waal strekt zich uit over een lengte van 86 km van de Pannerdensch Kop (km 867) tot aan Werkendam (km 953), en bestrijkt zowel het zomerbed als het winterbed. De waterbeweging kan over het gehele rooster worden berekend. Het morfologisch actieve deel is beperkt tot het zomerbed. Het zomerbed wordt aan weersijden begrensd door normaallijnen, die zijn gedefinieerd als denkbeeldige lijnen over de koppen van kribben langs de rivier. De roosterlijnen volgen de normaallijnen langs de rivier om onregelmatigheden in de waterbeweging, die tot morfologische verstoringen kunnen leiden, te voorkomen. Het rekenrooster voor de Boven-Waal in Figuur 4-2 laat zien dat de roosterlijnen de normaallijnen goed volgen.

Het rekenrooster is opgezet in Rijksdriehoekcoördinaten en heeft de volgende karakteristieken:

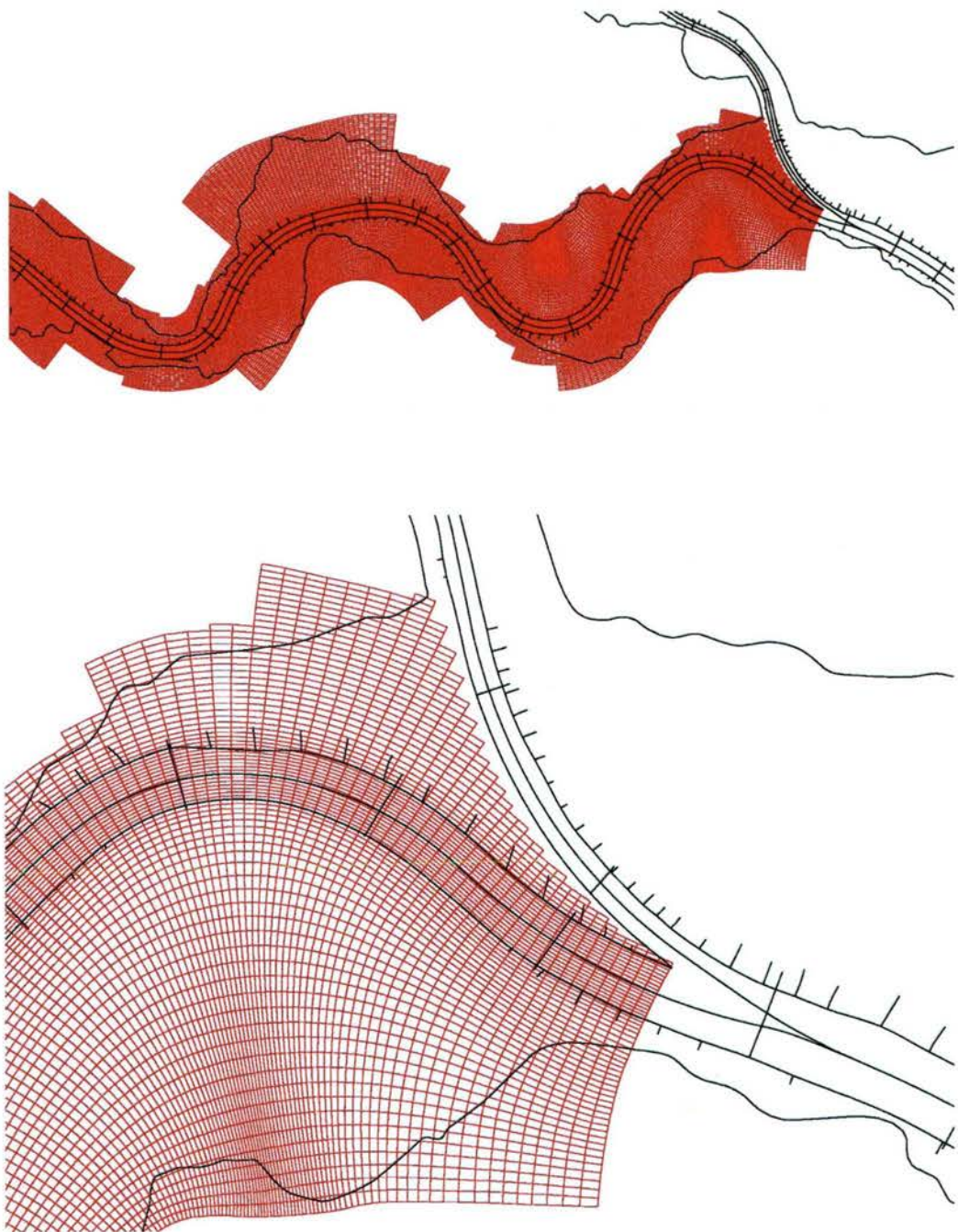
- Totaal aantal cellen van het rekenrooster is gelijk aan 122 x 1401;
- Zomerbed:
 - aantal cellen in dwarsrichting is 16;
 - breedte per cel ~ 20 m;
 - lengte per cel ~ 60 m.
- Winterbed:
 - aantal cellen in dwarsrichting, links van het zomerbedrooster maximaal 63;
 - aantal cellen in dwarsrichting, rechts van het zomerbedrooster maximaal 43;
 - breedte per cel ~ 25 – 86 m;
 - lengte per cel ~ 10 – 150 m.

4.2.2 Baseline-projectie

Met behulp van Baseline zijn gegevens van de bodemgeometrie, de hydraulische ruwheden, de kribben, kades en overlaten en de modelbegrenzing, geprojecteerd op het rekenrooster.

Riviergeometrie

In het oorspronkelijke DVR model vormen de bodempeilingen van 1997 de basis van de bodemgeometrie in het zomerbed. In deze studie is de bodemschematisatie in het zomerbed vervangen door de bodemvormgemiddelde bodemligging die is afgeleid uit de voorjaarspeilingen in week 14 van 2003. De bodemvormgemiddelde bodemligging van 2003 is beschikbaar op een rooster van 50 m x 500 m en is geprojecteerd op het veel fijnere rekenrooster van het Waal model.



Figuur 4-2. Rekenrooster voor de Boven-Waal.

Ruwheidsdefinitie

In het DVR model wordt de ruwheid in het alluviale zomerbed beschreven met de ruwheidsvoorspeller van Van Rijn (2006). Deze voorspeller beschrijft de hydraulische bodemruwheid onder variërende stroomcondities. De toepassing van de voorspeller van Van Rijn resulteert in ruimtelijk variërende Nikuradse-ruwheidswaarden die ook nog in de tijd kunnen variëren. In Baseline is deze ruwheidsdefinitie opgenomen.

Per riviertraject tussen MSW stations zijn de parameters van de ruwheidsvoorspeller van Van Rijn gespecificeerd. Met deze voorspeller wordt de hydraulische ruwheid in het alluviale zomerbed niet bepaald op basis van de dimensies van de bodemvormen, maar wordt de bodemruwheid bepaald als functie van de waterdiepte en de mobiliteitsparameter T (zie Bijlage B).

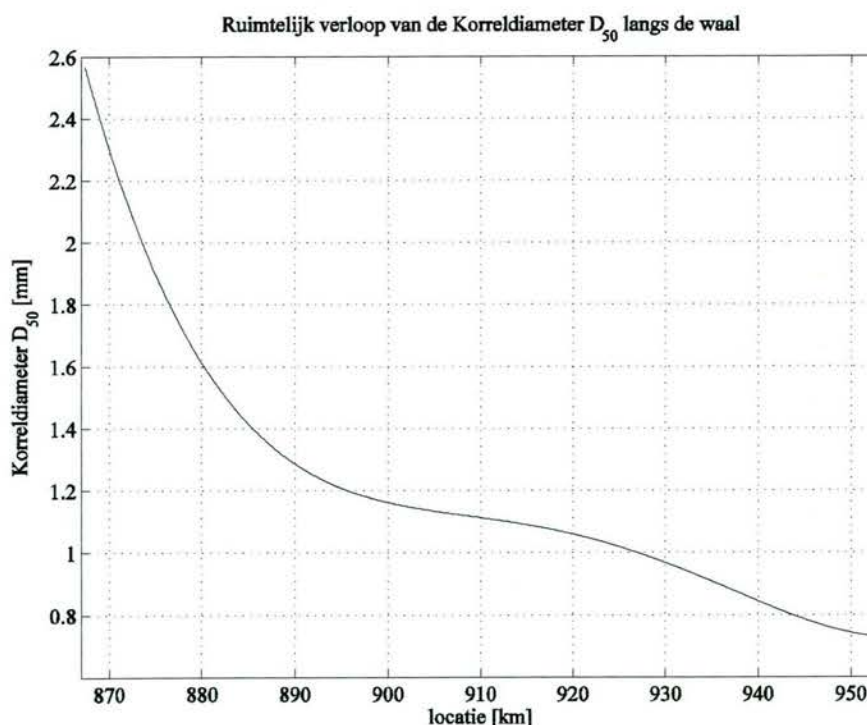
In de uiterwaarden is de hydraulische ruwheid gerelateerd aan de aanwezige vegetatietypen of “ecotopen” en hun ruimtelijke verdeling. Baseline bevat ruimtelijk variërende Nikuradse-coëfficiënten in de vorm van ruwheidstabellen. De ruwheden van bepaalde vegetatietypen hebben echter niet altijd een vaste waarde, maar zijn afhankelijk van de inundatiediepte. Dit is het geval voor struwelen, bosachtige ecotopen en heggen. Het analytische model van Klopstra et al (1997) is toegepast voor de ruwheid van overstroomde vegetatie.

Kribben, kades en overlaten

Kades, kribben en andere obstakels zijn in het model als overlaten (“weirs”) geschematiseerd. Hoogwatervrije terreinen en bandijken zitten als ondoorlaatbare dammetjes (“thin dams”) in het model.

4.2.3 Bodemsamenstelling

Het bodemmateriaal is met uniform sediment geschematiseerd. Op basis van drie meetcampagnes (1976, 1984 en 1995) is een ruimtelijk verloop van de mediane korreldiameter D_{50} langs de Waal bepaald. Het verloop van de korreldiameter is weergegeven in Figuur 4-3.



Figuur 4-3. Ruimtelijk verloop van de mediane korreldiameter langs de Waal.

4.2.4 Vaste laag-optie

Overeenkomstig de aanpak in eerdere studies (Sloff & Jagers, 2004a,b) is in het model de vaste-laagoptie toegepast. Het concept van een vaste of niet-erodeerbare laag is dat er wel sedimentatie en erosie kan optreden, maar dat erosie belemmerd wordt daar waar de vaste laag bloot komt te liggen. Met behulp van de vaste-laagoptie zijn de uiterwaarden tot aan de kribkoppen vastgelegd.

4.2.5 Sedimenttransportformule

In het DVR model is de bodemtransportformule van Meyer-Peter & Müller gebruikt om het sedimenttransport te beschrijven:

$$s = 8\alpha D_{50} \sqrt{\Delta g D_{50}} (\mu\theta - \theta_k)^{2/3} \quad (4-1)$$

met

- α = de kalibratiefactor (-); $\alpha = 0,4$
- g = de versnelling ten gevolge van de zwaartekracht ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
- Δ = de relatieve massadichtheid van sediment (-); $\Delta = 1,65$
- D_{50} = de mediane korreldiameter van het bodemmateriaal (m)
- μ = de ribbelfactor (-)
- θ = de Shieldsparameter (-)
- θ_k = de kritieke Shieldsparameter voor begin van beweging (-); $\theta_k = 0,047$

De ribbelfactor wordt bepaald met

$$\mu = \min \left(\left(\frac{C}{C_{90}} \right)^{1.5}; 1,0 \right) \quad (4-2)$$

$$C_{90} = 18 \log \left(\frac{12h}{3D_{90}} \right)$$

waarin

- C = de Chézycoëfficiënt voor hydraulische ruwheid ($\text{m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$)
- C_{90} = de Chézycoëfficiënt voor hydraulische korrelruwheid van D_{90} ($\text{m}^{1/2}\cdot\text{s}^{-1}$)
- D_{90} = de sedimentkorrelgrootte die door 90% van het sedimentmengsel wordt onderschreden (m)
- h = de waterdiepte (m)

De Shieldsparameter wordt berekend met

$$\theta = \left(\frac{u}{C} \right)^2 \frac{1}{\Delta D_{50}} \quad (4-3)$$

waarin

u = de stroomsnelheid (ms^{-1})

4.2.6 Effect van bodemdwarshellingen op sedimenttransport

Een voorname factor in 2D morfologie is de parameter $f_s(\theta)$ die het effect beschrijft van bodemdwarshellingen op de richting van sedimenttransport (Struiksma et al, 1985). Talmon et al (1995) geven hiervoor de relatie

$$f_s(\theta) = 9 \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{0,3} \sqrt{\theta} = A_{\text{shld}} \cdot \theta^{B_{\text{shld}}} \quad (4-4)$$

Hierin zijn A_{shld} en B_{shld} invoerparameters voor het model. Voor coëfficiënt A_{shld} is een waarde 0,8 genomen, voor coëfficiënt B_{shld} een waarde 0,5.

4.2.7 Parameters voor Delft3D-MOR

Een aantal belangrijke parameterinstellingen is gerelateerd aan de specifieke opzet van Delft3D-3DMOR. Deze hebben te maken met de wijze waarop de morfologische veranderingen in het model worden berekend. Het gaat hierbij om de *dichtheid van sediment*, de *rekentijdstap*, de *hydraulische inspeelperiode* en de *morfologische factor*.

In Delft3D-3DMOR wordt de bodemligging na elke hydraulische tijdstap aangepast. Na elke tijdstap wordt de sedimentbalans opgelost en wordt de verandering in de sedimentmassa op de rivierbodem berekend. Deze verandering in massa wordt vertaald naar een volumeverandering. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de *dichtheid van het bodemmateriaal (inclusief poriën)*. De droge sedimentdichtheid in het model is gelijk aan 1600 kg/m^3 . De volumeverandering wordt gebruikt om de bodemveranderingen te bepalen. De *rekentijdstap* is gelijk aan 0,2 minuten.

Het duurt vaak enige tijd voordat het stroombeeld zich heeft aangepast aan nieuwe hydrodynamische condities. Erosie en sedimentatie worden tijdens deze aanpassingsperiode vaak niet goed weergegeven. In het model kan een *inspeelperiode* worden gedefinieerd. Pas na het verstrijken van deze inspeelperiode worden de morfologische veranderingen in het systeem voor de eerste keer berekend. De inspeelperiode is 1 dag.

Morfologische ontwikkelingen spelen zich op een veel grotere tijdschaal af dan de aanpassingen in het stroombeeld. Morfologische ontwikkelingen zouden dus met een grotere tijdstap berekend worden dan hydrodynamische ontwikkelingen. In Delft3D-3DMOR worden de waterbeweging en de morfologie echter tegelijkertijd opgelost. Om dan toch recht te doen aan de verschillende tijdschalen wordt de snelheid van de morfologische veranderingen opgeschaald met een *morfologische factor*. Elke tijdstap worden de hoeveelheden erosie en sedimentatie met deze factor vermenigvuldigd. De factor moet zodanig worden gekozen dat de morfologische verandering per tijdstap kleiner is dan 5% van de waterdiepte. Op deze wijze worden ‘versnelde’ morfologische veranderingen op een dynamische manier meegenomen in de hydrodynamische berekening, met een aanzienlijke reductie van de rekentijd als gevolg. In het model is de morfologische factor gelijk aan 100.

4.3 Parameters voor duinhoogtevoorspellers

Met betrekking tot de parameters voor de duinhoogtevoorspellers moeten alleen voor de duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982) met de uitwerking voor de transportformule van Meyer-Peter & Müller (Vgl. 2-14) parameters worden gespecificeerd. De constante ε dient door de gebruiker te worden gespecificeerd. In de Nederlandse Rijntakken kan deze constante variëren tussen de 0,5 en 1,5 (zie Bijlage A). Met de gegevens uit Bijlage A (Tabel A-1 en de formules A-4 en A-5) kan de waarde van de constante ε op de Waal worden geschat. Bij een afvoer van 1900 m³/s bij Lobith, is de verhouding u^*/w op de Waal ongeveer gelijk aan 0,57. De waarde van de constante ε komt dan ongeveer neer op 1. Deze waarde wordt tijdens de testsimulaties in Delft3D aangehouden.

4.4 Parameters voor het empirisch model voor dynamica van bodemvormen

Het model dat de dynamica van bodemvormen beschrijft, Vgl. 2-27, vraagt om de specificatie van parameters die het relaxatiegedrag en het advectiongedrag beschrijven.

Parameter relaxatiegedrag: Tijdschaal T_H

De tijdschaal T_H beschrijft de aanpassingssnelheid van bodemvormen in de tijd en is een tijdsafhankelijke parameter. Tijdens lage afvoeren is de sedimenttransportcapaciteit laag en verlopen morfologische processen traag. De tijdschaal is in dat geval klein. Tijdens hogere afvoeren passen de bodemvormen zich sneller aan. De tijdschaal T_H is gelijk aan:

$$T_H = L_H / c_H \quad (4-6)$$

De karakteristieke lengteschaal L_H dient door de gebruiker te worden gespecificeerd. De voortplantingssnelheid van duinhoogtevariëaties c_H , wordt online met behulp van Vgl. 2-30 in het model berekend en is een functie van de waterdiepte en de stroomsnelheid. Deze afhankelijkheid zorgt er voor dat de aanpassingssnelheid van bodemvormen in de tijd varieert.

Om de karakteristieke lengteschaal L_H af te schatten is overeenkomstig Vgl. 2-22 evenredigheid met de duinlengte L verondersteld. Wijbenga (1991) stelt dat de waarden voor ϕ in Vgl. 2-22 variëren tussen 1 en 3. Indien voor ϕ een waarde 2 wordt aangehouden en van duinlengten in de orde van 45 m wordt uitgegaan, is de karakteristieke lengteschaal gelijk aan 90 m.

Parameters advectiongedrag

Met betrekking tot het advectiongedrag moeten de coëfficiënt γ , parameter a en de niet-lineariteitsparameter b worden gespecificeerd, zie Vgl. 2-30. Tijdens de implementatie is gekozen om het aantal invoerparameters te reduceren tot twee parameters. De eerste parameter is het product van de coëfficiënt γ , parameter a en niet-lineariteitsparameter b , de tweede parameter betreft de niet-lineariteitsparameter b .

Er wordt aangenomen dat de coëfficiënt γ varieert tussen de 0,2 en 1. In de testsimulatie is coëfficiënt γ gelijk gekozen aan 1.

Het sedimenttransport is in het model beschreven met de formule van Meyer-Peter & Müller (1948). Indien de sedimenttransportcapaciteit wordt uitgedrukt in een algemene functie van de snelheid tot de macht b : $s = f(u) = a \cdot u^b$, dan is voor de Meyer-Peter & Müller transportformule de niet-lineairiteitsparameter b een functie van de kritische Shieldsparameter, de Shieldsparameter en de ribbelfactor, namelijk:

$$b = \frac{3}{1 - \frac{\theta_{kr}}{\mu\theta}} \quad (4-7)$$

Met:

- μ de ribbelfactor, zie Vgl. 4-2
- θ de Shieldsparameter, zie Vgl. 4-3
- θ_{kr} de kritische Shieldsparameter

De niet-lineairiteitsparameter b en de vermenigvuldigingsfactor a zijn geschat op basis van de 'gemiddelde' modelresultaten aan het einde van de inspeelsimulatie met de morfologisch representatieve afvoer van $1600 \text{ m}^3/\text{s}$:

- snelheid $u \sim 1,05 \text{ m/s}$;
- waterdiepte $h \sim 6 \text{ m}$;
- korreldiameter $D_{50} \sim 0,0015 \text{ m}$;
- ribbelfactor $\mu \sim 0,43$;
- Shieldsparameter $\theta \sim 0,27$.

De parameters a en b komen bij deze afvoer overeen met $1,9 \cdot 10^{-5}$ en 5,1. Het product van deze parameters en coëfficiënt γ is dan gelijk aan $9,711 \cdot 10^{-5}$. Dit resulteert volgens Vgl. 2-30 in een advectionssnelheid van de duingroep van ongeveer $1,8 \text{ m /dag}$. De verplaatstings-snelheid van individuele bodemvormen komt dan neer op ongeveer $2 - 3,6 \text{ m /dag}$ (zie Bijlage A, Vgl. A-2 uit Jansen et al. 1979).

4.5 Resultaten van de berekeningen

De berekende en gemeten relatieve bodemvormgemiddelde bodemveranderingen tussen week 14 en week 49 zijn met elkaar vergeleken. Daarnaast is een vergelijking gemaakt tussen de berekende en gemeten duinhoogten in week 49. Onder duinhoogte wordt het verschil tussen trog en top verstaan.

De vergelijkende analyse dient enerzijds als test of het concept van de voorspellers goed is voor de Nederlandse Rijntakken. Anderzijds wordt met deze vergelijking een indruk verkregen van het effect van de voorspellers op de modelresultaten. De uitkomsten geven onder andere (kwalitatieve) informatie over de onzekerheid in de modelresultaten als gevolg van bodemvormen en bijbehorende ruwheden.

4.5.1 Amplitude bodemvormen

De amplitude van de bodemvormen aan het einde van de laagwaterperiode in 2003 zijn weergegeven in Figuur 4-5 tot en met Figuur 4-9. De figuren geven zowel de berekende als gemeten amplituden weer.

Figuur 4-5 toont de lengteprofielen op 6 locaties in het dwarsprofiel (langs de rechter en linker oever, en links en rechts op de Waal en links en rechts van de rivieras) van de berekende en gemeten duinhoogten in week 49. Daarnaast is de initiële amplitude in week 14 (het begin van de berekening) in de figuren te zien.

Figuur 4-6 en Figuur 4-7 tonen de amplitude van de bodemvormen voor een traject in de omgeving van Tiel en één in de omgeving van Ochten.

Het verloop van de amplitude in het dwarsprofiel is voor drie locaties, weergegeven in Figuur 4-8: een locatie op de Boven-Waal - Haalderen (km 878), een locatie op de Midden-Waal - Ochten (km 905) en een locatie op de Beneden-Waal - Tiel (km 915).

Tot slot geeft Figuur 4-9 het verband tussen de bocht en de amplitude weer voor het Waaltraject tussen km 900 en km 920.

Verloop van de amplitude van de bodemvormen in dwarsrichting

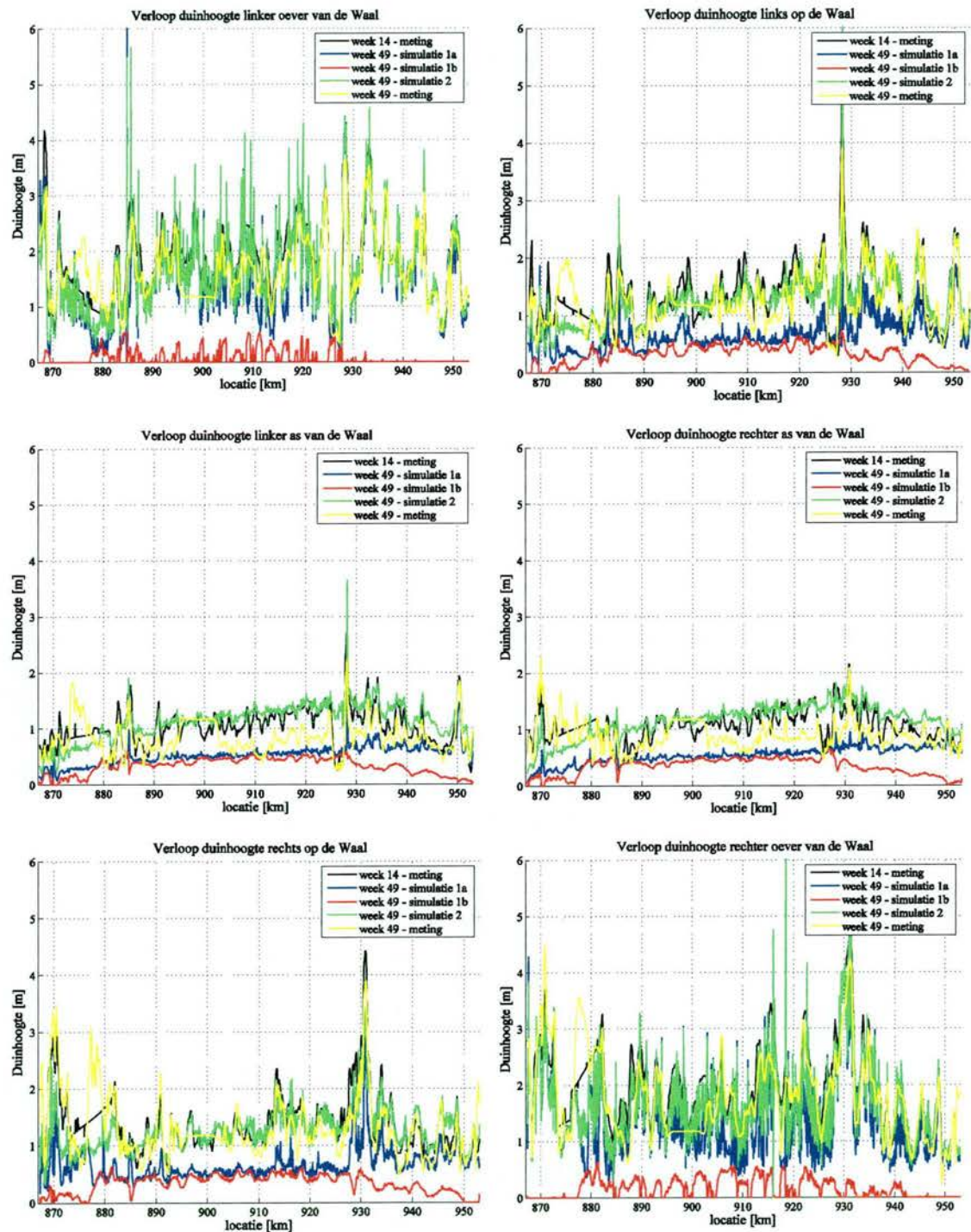
De duinhoogtevoorspellers (Vgl. 2-6 en Vgl. 2-14) waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd laten zien dat de amplituden rechtevenredig zijn met de waterdiepte. Op grond hiervan wordt verwacht dat de amplituden van de bodemvormen van de buitenbocht in de richting van de binnenbocht afnemen.

De figuren laten zien dat de amplituden van de bodemvormen in de buitenbochten groter zijn dan die in de binnenbochten. Figuur 4-9 toont de afhankelijk van de duinamplitude met de bochtstraal. Bij een bocht naar links zijn de amplituden aan de rechter zijde (de buitenbocht) van de rivier groter dan die aan de linker zijde. In Figuur 4-6 en Figuur 4-7 is te zien dat de amplitude in de 'ondiepe' binnenbocht nog altijd groter dan die in de hoofdgeul. Langs de oevers van het zomerbed worden aan het einde van de laagwaterperiode duinhoogten gemeten en berekend oplopend tot 3-4 meter, zie Figuur 4-5. Dergelijke onrealistisch hoge waarden worden zowel uit de metingen als uit de berekeningen afgeleid. Echter, aan deze grote duinhoogten liggen voor de metingen andere oorzaken ten grondslag dan voor de berekeningen.

Met betrekking tot de metingen is reeds aangegeven dat de duinamplituden bestaan uit de combinatie plaatsvasten en verplaatsende bodemvormen. Het amplitude-aandeel van de plaatsvasten bodemvormen langs de oevers erg groot is, zie Figuur 4-1 (Sieben (2004a)). Voor de vergelijking van de metingen worden de metingen langs de oeverlijnen verder buiten beschouwing gelaten.

Een grote amplitude van de bodemvormen langs de oeverzone in de berekeningen duidt op relatief hoge transporten. Gebleken is dat in dit ongeijkte model de oeverzones initieel sterk eroderen door het ontbreken van niet erodeerbare lagen ter plaatse van de kribkoppen (taluds van de krib).

De hiermee samenhangende grote transporten zijn overigens van tijdelijke aard. Het wordt aanbevolen om de modelberekeningen te herhalen met een goed afgeregeld model, waarbij de vaste laag in de richting van het zomerbed met 1 cel is uitgebreid.



Figuur 4-5. Berekende en gemeten duinhoogten langs de Waal in week 49



Duinhoogten afgeleid uit metingen

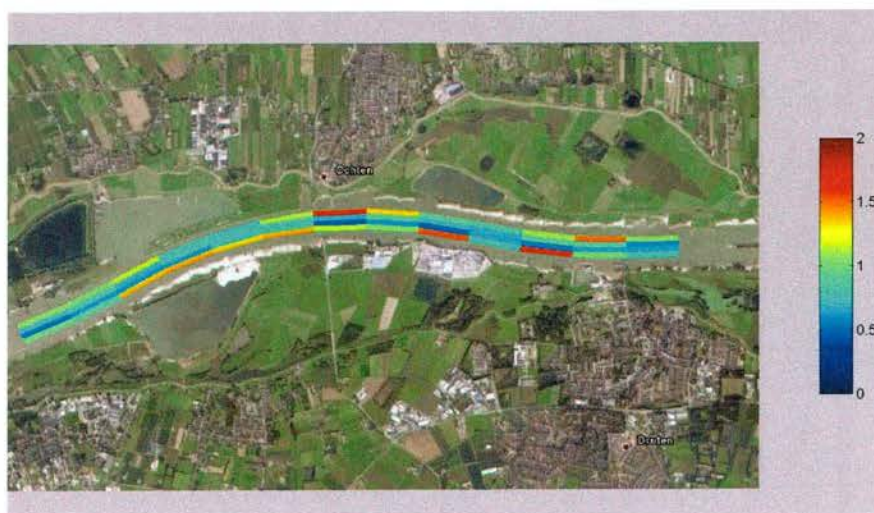


Duinhoogten volgens uit simulatie 1a (duinhoogtevoorspeller van Van Rijn (1984))



Duinhoogten volgens uit simulatie 2 (duinhoogtevoorspeller van conform Fredsøe (1982))

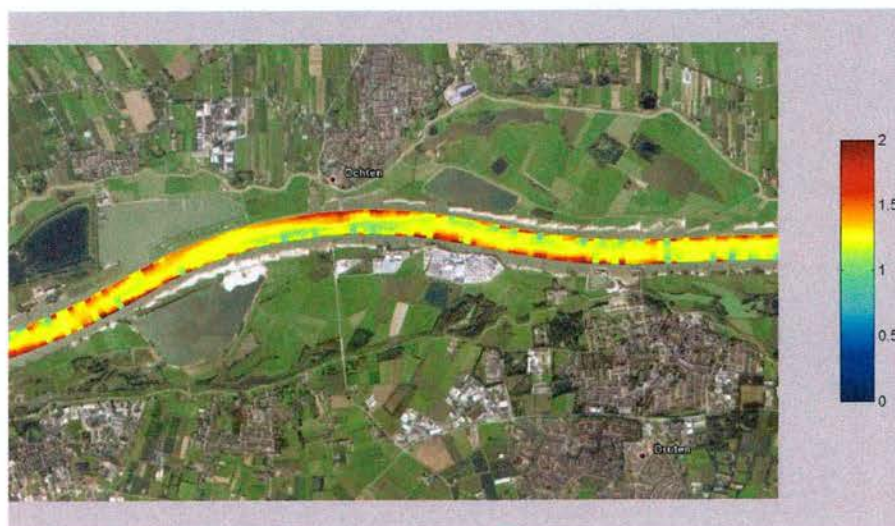
Figuur 4-6. Gemeten en berekende duinhoogten in week 49 op het Waaltraject in de omgeving van Tiel



Duinhoogten afgeleid uit metingen

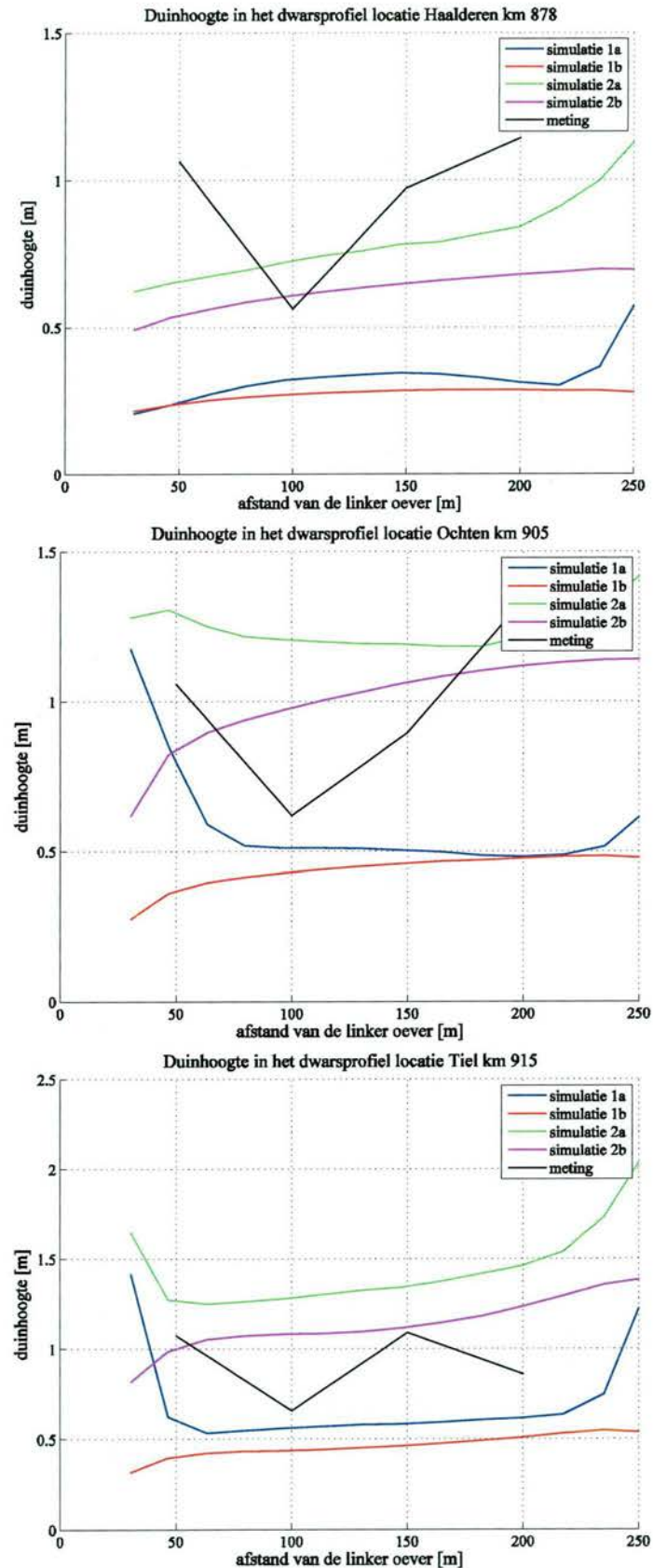


Duinhoogten volgend uit simulatie 1a (duinhoogtevoorspeller van Van Rijn (1984))

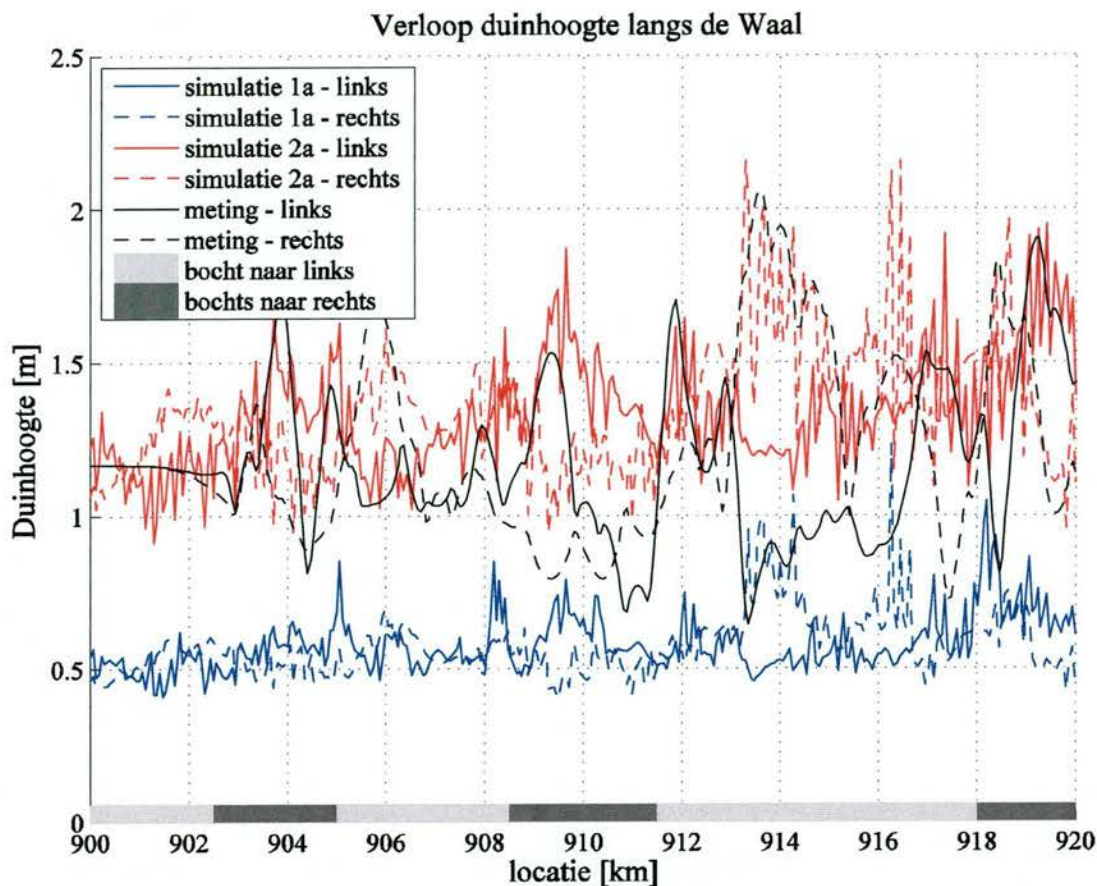


Duinhoogten volgend uit simulatie 2 (duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982))

Figuur 4-7. Gemeten en berekende duinhoogten in week 49 op het Waaltraject in de omgeving van Ochten



Figuur 4-8. Gemeten en berekende duinhoogten in week 49 op drie locaties in de Waal – Haalderen (km 878), Ochten (km 905) en Tiel (km 915)



Figuur 4-9. Gemeten en berekende duinhoogten links en rechts op de rivier in week 49 en de afhankelijkheid met de bochtstraal

In Sloff & Jagers (2004a) werd in het Waalmodel van Lent ook erosie aan de randen van de hoofdgeul voorspeld. Tijdens de kalibratie constateerden zij dat de gemeten bodemligging in de hoofdgeul in de omgeving van Lent aanzienlijk lager lag dan met de berekeningen werd voorspeld. In de diepe buitenbocht zijn de kribben relatief hoog. Bij hoge kribben is er sprake van een kribtalud met een aanzienlijke breedte dat in de modelschematisatie niet wordt meegenomen. Aangezien in het model dit deel van de hoofdgeul alluviaal was, erodeerde de bodem langs de kribben. In werkelijkheid kan deze zone echter niet eroderen en zorgt het voor een kleiner doorstroomprofiel waardoor de bodem in de hoofdgeul dieper ligt. Door in het model de vaste laag met 1 cel uit te breiden in de richting van de rivieras werd voorkomen dat in het Delft3D model de taludzone erodeerde. Een dergelijke aanpassing is in het DVR model ook nodig om erosie van de taludzone te vermijden.

Effect van de verschillende duinhoogtevoorspellers

De figuren laten zien dat er een groot verschil is tussen de amplituden die met de voorspeller van Van Rijn (1984) en Fredsøe (1982) worden berekend.

De amplituden die met de voorspeller van Van Rijn worden berekend blijven achter bij de metingen.

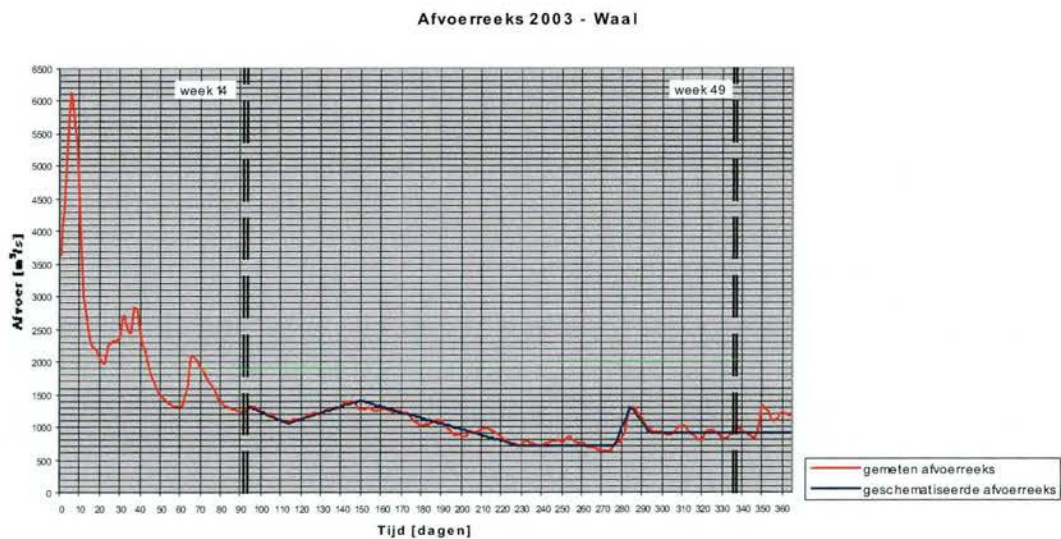
Dit betekent dat bijvoorbeeld na 5 dagen hydrodynamica 500 dagen morfologie zijn doorgerekend.

4.2.8 Randvoorwaarden

De randvoorwaarden bestaan uit afvoeren en morfologische condities op de bovenrand en waterstanden op de benedenrand.

Op de bovenrand van het model is een afvoertijdreeks opgelegd die is afgeleid uit de waargenomen afvoerreeks van 2003. De gemeten en geschematiseerde afvoerreeks zijn weergegeven in Figuur 4-4.

Aangezien de snelheid van de morfologische veranderingen wordt opgeschaald met een *morfologische factor* van 100, is de afvoerreeks die in het Delft3D is opgelegd 'samengedrukt' tot een periode van $251 \text{ dagen} / 100 = 2,51 \text{ dagen}$.



Figuur 4-4. Gemeten, geschematiseerde en opgelegde afvoerreeks op de instroomrand van de Waal

Op de benedenranden in de Waal is een waterstand-afvoerrelatie gebruikt die door RIZA is afgeleid uit middels een interpolatie van DONAR-gegevens:

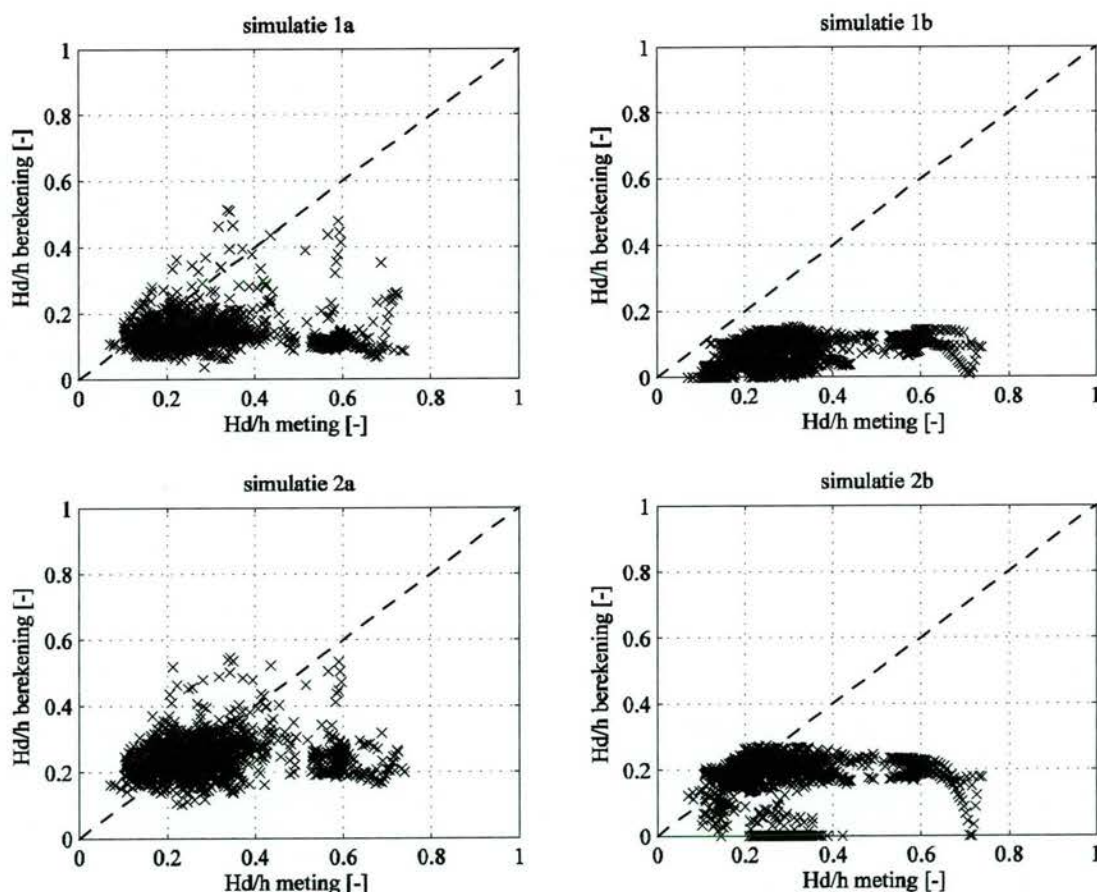
$$h_{953.2} = 4,5 \left(\frac{Q_{\text{waal}}}{1515} \right)^{0,12} - 3,7 \quad (4-5)$$

waarin de index van de waterstand h de riviervaknummer aanduidt op de benedenrand en de index van de afvoer Q de riviervaknummer.

Dit sluit aan bij de bevindingen van Julien & Klaassen (1995) die stellen dat de duinhoogten in de Nederlandse Rijntakken met de voorspeller van Van Rijn (1984) worden onderschat. Wilbers (2004) geeft aan dat de maximale duindimensies tijdens hoogwater het beste voorspeld kunnen worden met Van Rijn (1984), maar dat tijdens laagwatercondities andere duinhoogtevoorspellers tot betere resultaten leiden.

De voorspeller conform Fredsøe (1982) lijkt juist de amplituden van de bodemvormen in de Waal te overschatten. Met betrekking tot deze voorspeller is voor de constante ε een waarde van 1 gekozen. In de Nederlandse Rijntakken kan deze waarde variëren tussen de 0,5 en 1,5. De waarde voor de constante ε is aan de hoge kant. Er wordt aangeraden gevoeligheid van de modelresultaten voor de constante ε in een vervolgstudie nader te onderzoeken.

In Figuur 4-10 is de verhouding tussen de ratio van duinhoogte H_d en waterdiepte h volgens uit de metingen en de berekeningen weergegeven voor het lengteprofiel langs de as van de rivier. Uit de figuur blijkt dat de overeenkomsten tussen berekeningen en metingen relatief slecht zijn. Voorzichtig kan worden gesteld dat de resultaten iets beter worden wanneer het model van de bodemvormdynamica conform Allen (1976) wordt toegepast (simulatie 1a en 2a).



Figuur 4-10. Verhouding tussen de ratio duinhoogte H_d – waterdiepte h tussen de berekeningen en de metingen

4.5.2 Relaxatiegedrag en invloed van het relaxatie- en advectiemodel

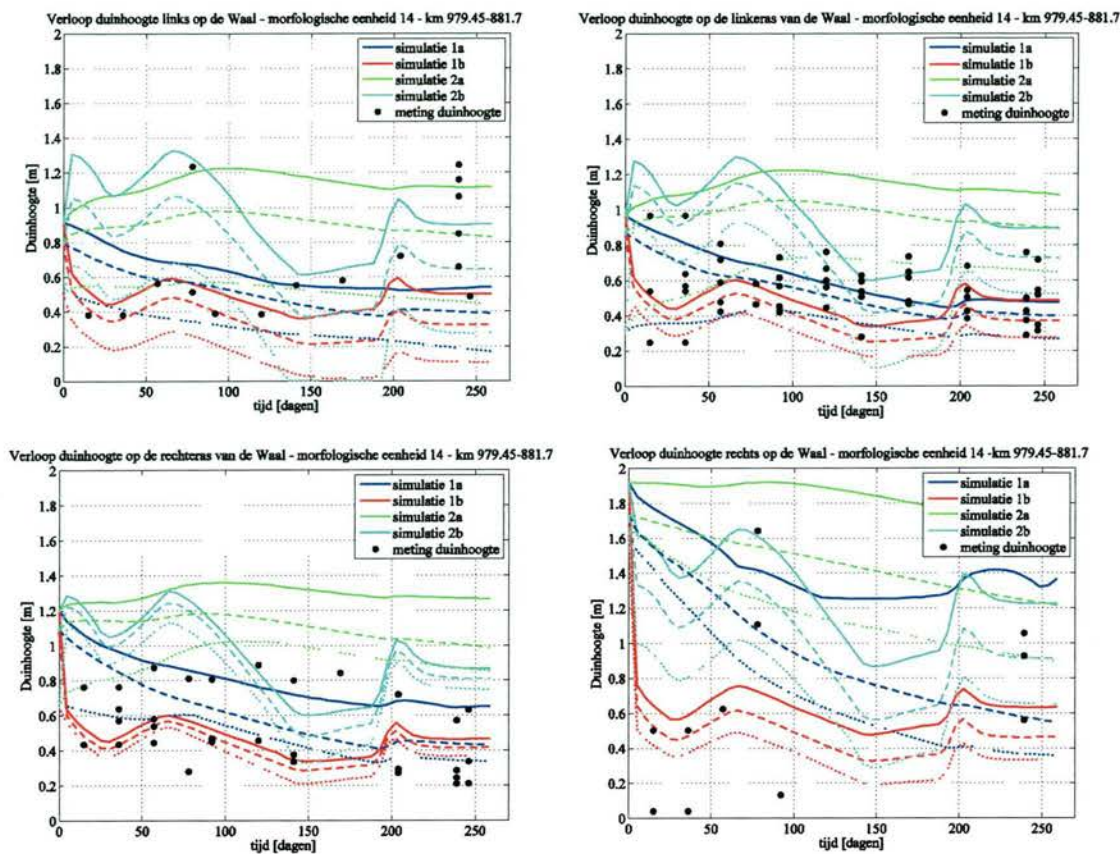
Rijkswaterstaat RIZA heeft voor drie morfologische eenheden de tijdsafhankelijke ontwikkeling van de amplituden van de bodemvormen tijdens de laagwaterperiode van 2003 aangeleverd:

- Morfologische eenheid 14 – Haalderen – traject tussen km 879,45 – 881,7;
- Morfologische eenheid 32 – Hoogewaard crossing – traject tussen km 901,2 – 902,1;
- Morfologische eenheid 49 – St. Andries – Waaltraject tussen km 923 – 927,1.

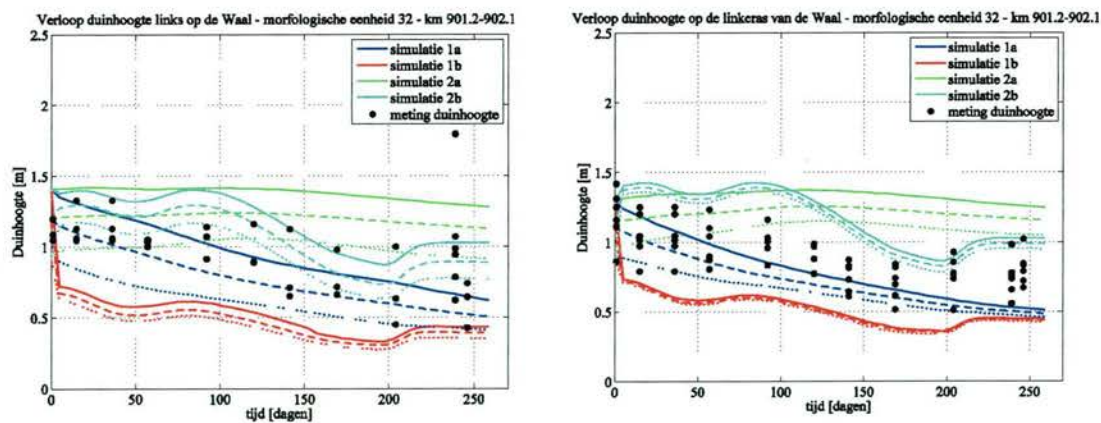
Figuur 4-11 tot en met Figuur 4-13 tonen het naijlen van de amplituden van de bodemvormen in de tijd voor metingen en berekeningen. Het verloop van de amplituden is weergegeven als functie van het aantal dagen na het begin van de berekening (week 14). Met betrekking tot de berekeningen zijn de minimale (stippellijnen), maximale (getrokken lijnen) en gemiddelde (streeplijnen) van de berekende amplituden in de betreffende morfologische eenheid weergegeven. In simulatie 1b en 2b is aangenomen dat de amplituden zich instantaan aanpassen aan de nieuwe omstandigheden, dat wil zeggen dat er verondersteld wordt dat binnen één tijdstap de evenwichtduinhoogten zijn bereikt. In simulatie 1a en 2a wordt het gedrag beschreven met het relaxatie- en advectiemodel. Het relaxatiegedrag zorgt voor een ‘vertraagde’ aanpassing van de amplitude naar de evenwichtswaarde. Uit alle figuren blijkt dat de duinhoogten een eind aan de laagwatercondities zijn aangepast.

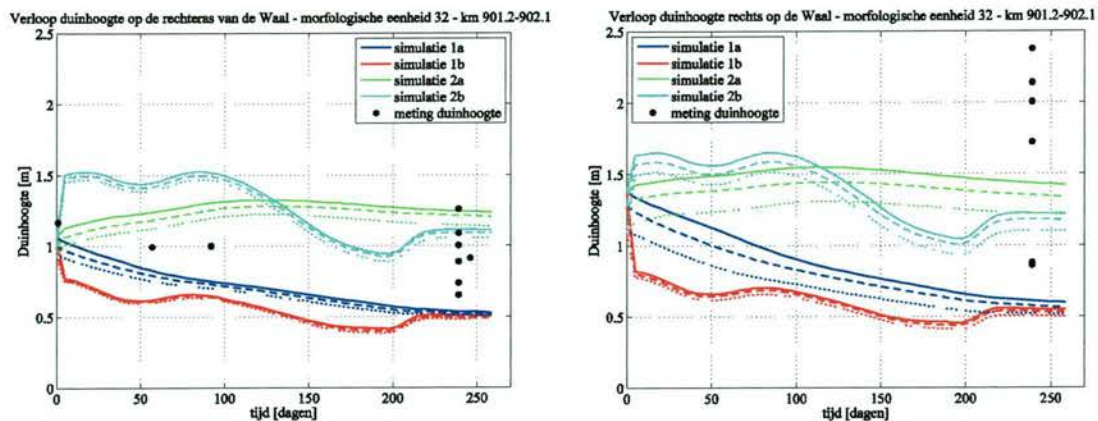
Een maat voor de snelheid waarmee de duinkarakteristieken zich in de tijd aanpassen is de karakteristieke tijdschaal. De karakteristieke tijdschaal is gelijk aan de karakteristieke lengteschaal gedeeld door de voortplantingssnelheid van duinhoogtevariëaties, zie Vgl. 4-5. Met de gekozen modelinstellingen in Paragraaf 4.4 komt de karakteristieke tijdschaal voor de morfologisch karakteristieke afvoer van $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ neer op ongeveer $90 \text{ m} / 1,8 \text{ m} / \text{dag} \sim 50$ dagen. Bij een constante afvoer van $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ is na 50 dagen dus ongeveer 64% van de aanpassing bereikt. In Figuur 4-4 is te zien dat tijdens de laagwaterperiode van 2003 de afvoer flink lager is dan $1600 \text{ m}^3/\text{s}$. De aanpassing zal daardoor trager verlopen. Het aantal dagen tussen week 14 en week 49 is ongeveer 270. De duinhoogte in de modelberekeningen heeft zich tijdens de laagwaterperiode een eind aangepast aan het nieuwe ‘evenwicht’. In de berekening met de voorspeller conform Fredsøe (1982) neemt de duinhoogte in eerste instantie toe, terwijl de afvoer al aan het afnemen is.

Op basis van de metingen kan worden afgevraagd of de relaxatie niet sneller had moeten verlopen. Een gevoeligheidsanalyse kan inzicht geven in de gevoeligheid van de ontwikkeling van de duinhoogten voor de gekozen modelparameters van het bodemvormdynamicamodel. Daarnaast zal het aanpassingsgedrag tijdens een hoogwaterperiode afwijken van dat tijdens laagwater. Nader onderzoek naar de parameterinstelling tijdens verschillende condities is daarom vereist.

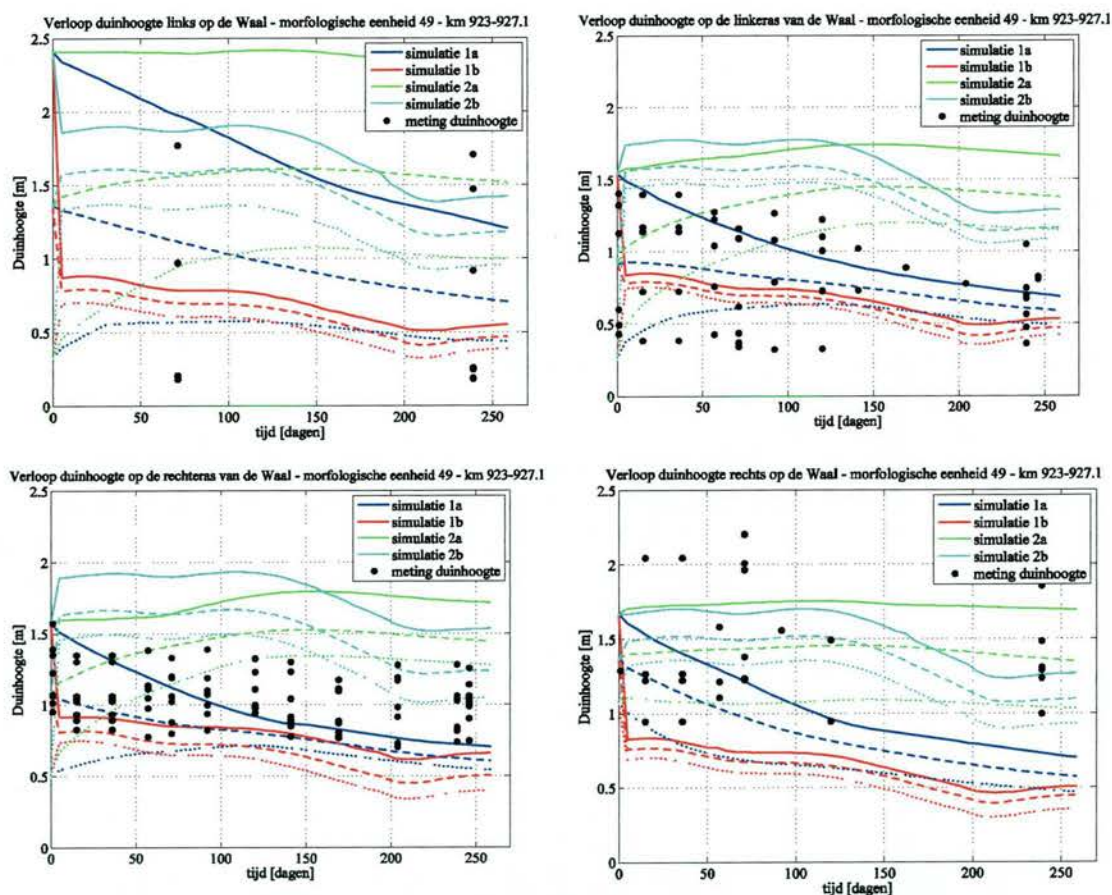


Figuur 4-11. Het tijdsafhankelijk gedrag van bodemvormen op Waaltraject km 979.45 – 881.7 van morfologische eenheid 14 – Haalderen, op basis van metingen (punten) en berekeningen (lijnen): minimale (stippellijnen), maximale (getrokken lijnen) en gemiddelde amplituden (streeplijnen)





Figuur 4-12. Het tijdsafhankelijk gedrag van bodemvormen op het Waaltraject km 901.2-902.1 van morfologische eenheid 32 – Hoogwaard crossing, op basis van metingen (punten) en berekeningen (lijnen): minimale (stippellijnen), maximale (getrokken lijnen) en gemiddelde amplituden (streeplijnen)



Figuur 4-13. Het tijdsafhankelijk gedrag van bodemvormen op het Waaltraject km 923-927.1 van morfologische eenheid 49 – St. Andries, op basis van metingen (punten) en berekeningen (lijnen): minimale (stippellijnen), maximale (getrokken lijnen) en gemiddelde amplituden (streeplijnen)

4.5.3 Ruwheidshoogte

De bodemvormen zorgen in werkelijkheid voor extra stromingsweerstand. De invloed van bodemvormen op de in de hydraulische ruwheid is in Delft3D berekeningen meegenomen op basis van Vgl 2-10 en Vgl 2-19. De hydraulische ruwheid in het zomerbed bestaat uit twee delen: de bijdrage van de korrelgrootte van bodemmateriaal en de bijdrage van bodemvormen aan de totale ruwheid.

Een eerste inschatting van de te verwachte ruwheidshoogten is gemaakt op basis van de gemeten waterstanden. Indien wordt uitgegaan van een vereenvoudigde situatie, waarin de rivier wordt geschematiseerd als een rechte rivier met een rechthoekige doorsnede met een uniforme breedte en een constante afvoer, kan de hydraulische ruwheid als volgt worden afgeschat:

$$C = \frac{Q}{h^{3/2} \cdot i_b^{1/2} \cdot B} \quad (4-8)$$

$$C = 18 \log \left(\frac{12 \cdot h}{k} \right) \rightarrow k = \frac{12 \cdot h}{\frac{C}{10^{18}}}$$

Het verloop van de waterdiepten is bepaald op basis van de gemeten waterstanden en bodemvormgemiddelde bodemligging in het najaar van 2003, zie Figuur 4-14. Uitgaande van:

- breedte $B \sim 260$ m;
- waterdiepte $h \sim 4$ m;
- afvoer $Q \sim 900$ m³/s;
- verhang $i_b \sim 1 \cdot 10^{-4}$.

is de hydraulische ruwheid bij benadering gelijk aan:

$$C = \frac{Q}{h^{3/2} \cdot i_b^{1/2} \cdot B} \approx \frac{900}{4^{3/2} \cdot (1 \cdot 10^{-4})^{1/2} \cdot 260} \approx 43 \text{ m}^{1/2} / \text{s}$$

$$C = 18 \log \left(\frac{12 \cdot h}{k} \right) \rightarrow k = \frac{12 \cdot h}{\frac{C}{10^{18}}} \approx 0.2 \text{ m}$$

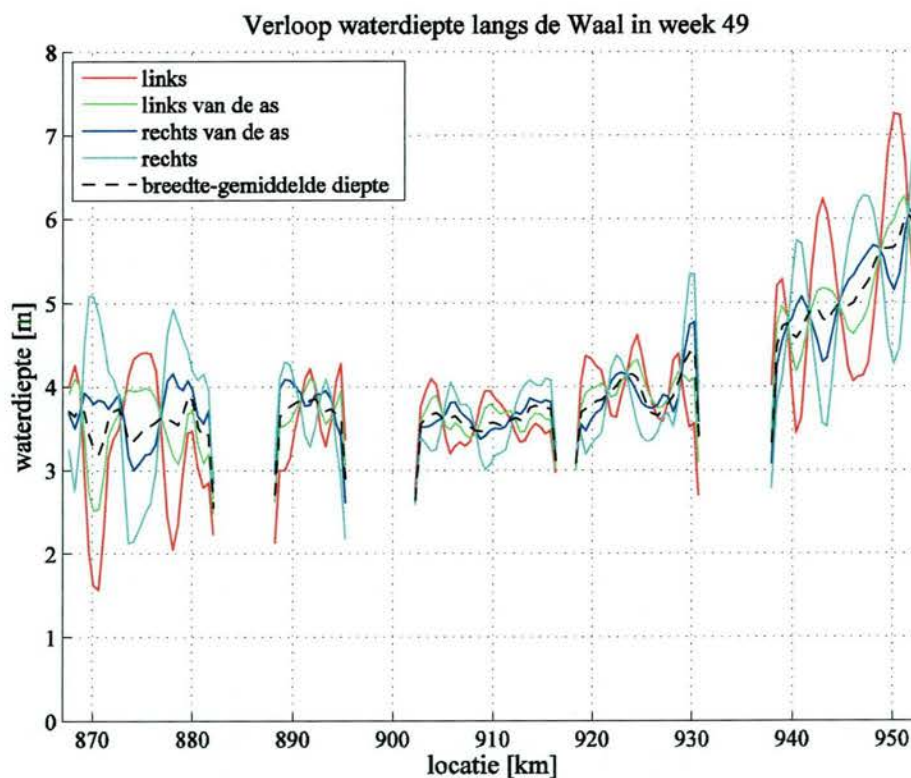
Deze afgeschatte ruwheid is vergeleken met de hydraulische ruwheid ten gevolge van de bodemvormen volgend uit de berekeningen in Figuur 4-15. De figuur laat zien dat de duinhoogten op basis van de voorspeller conform Fredsøe (1982) resulteren in veel te hoge ruwheidshoogten. De ruwheidshoogten die volgen uit de berekening met de voorspeller van Van Rijn (1984) zijn wel van dezelfde orde grote als de uit metingen afgeleide ruwheidshoogte. Echter, zoals eerder aangegeven, worden de duinhoogten met de voorspeller van Van Rijn (1984) onderschat.

De vertaalslag van duinhoogten naar ruwheidshoogten is kennelijk gecompliceerder dan met de ruwheidsvoorspellers Vgl. 2-10 en 2-19 wordt gesuggereerd.

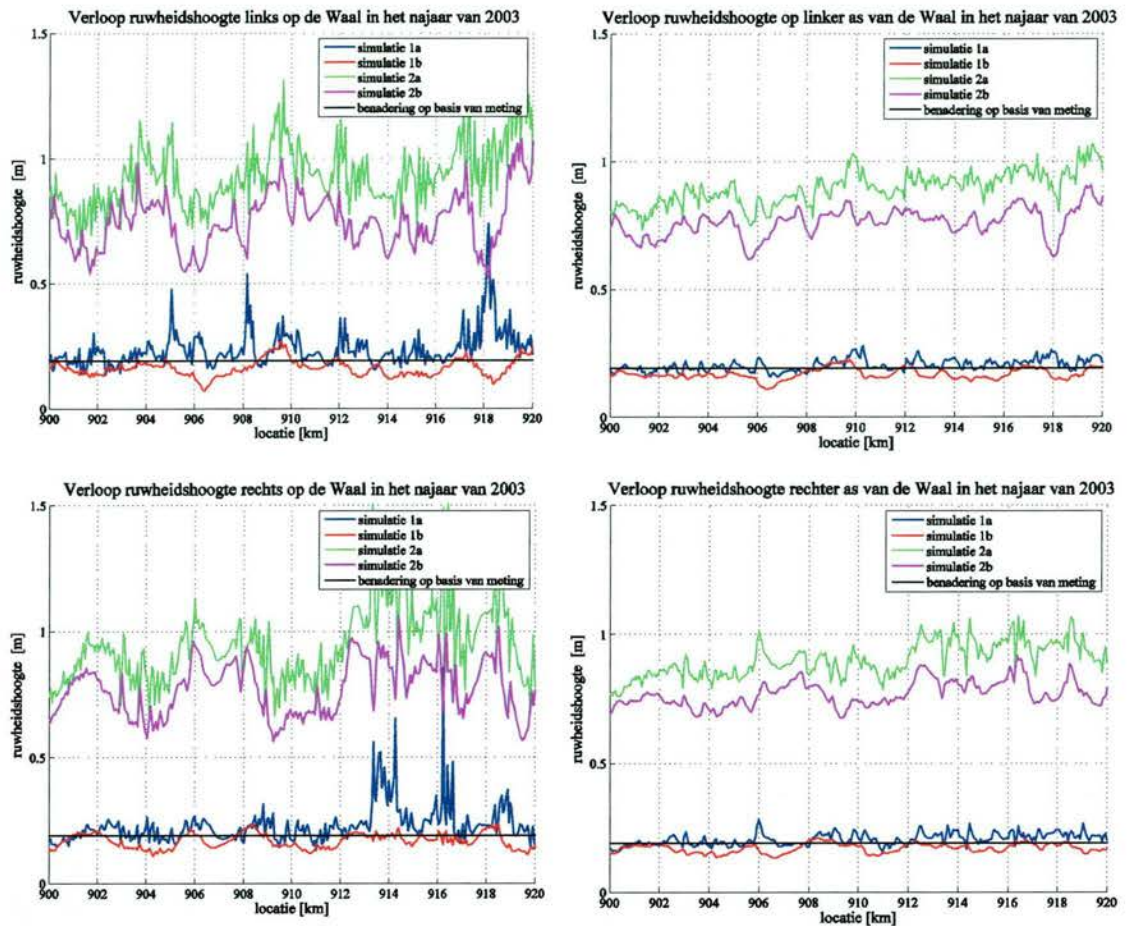
De duinhoogten tellen in bovengenoemde situatie via de ruwheidsvoorspellers Vgl. 2-10 en 2-19 te hard door in de hydraulische ruwheid. Als van een gemiddelde duinhoogte H_d van 1,5 m en een ruwheidshoogte van 0,2 m wordt uitgegaan, dan zou de constante ζ gelijk moeten zijn aan 0,13 in plaats van 0,7.

Een mogelijke verklaring is dat tijdens laagwater wellicht niet de langgerekte duinen die na het hoogwater zijn overgebleven bepalend zijn voor de hydraulische ruwheid, maar dat de hydraulische ruwheid meer wordt bepaald door de ribbelpatronen die zich bovenop die duinen vormen. Onderzoek wordt aanbevolen naar een ruwheidsvoorspeller waarbij onderscheid wordt gemaakt naar de bijdrage van verschillende type bodemvormen aan de totale bodemvormruwheid. Van Rijn maakt bijvoorbeeld in zijn nieuwe ruwheidsvoorspeller (2006) onderscheid in drie typen bodemvormen (ribbels, mega-ribbels en duinen), die de hydraulische ruwheid afzonderlijk kunnen beïnvloeden.

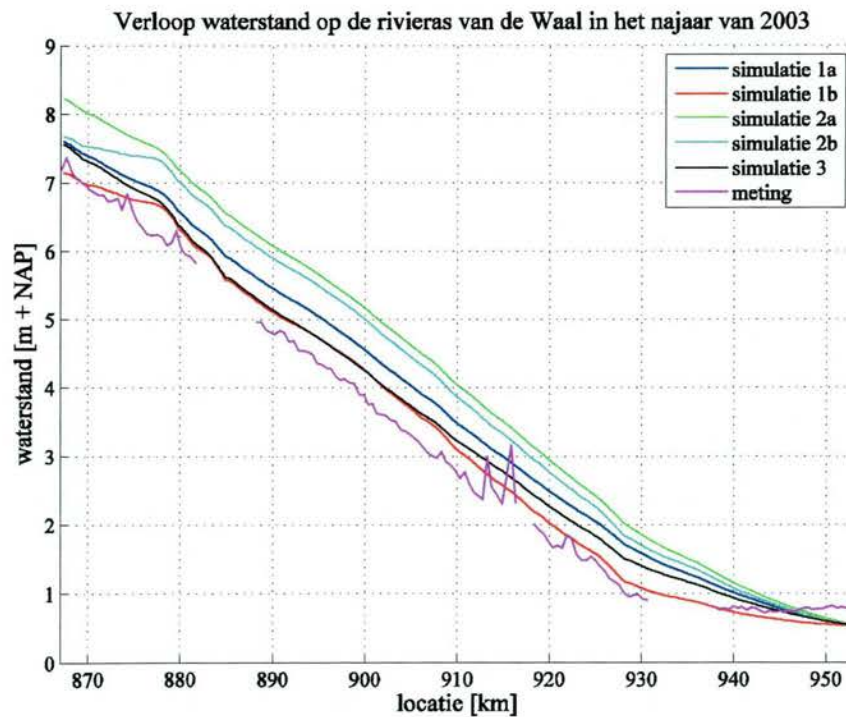
Het effect van de hydraulische ruwheid op de waterbeweging is weergegeven in Figuur 4-16. De te hoge hydraulische ruwheid met de voorspeller conform Fredsøe (1982) resulteert in te grote waterstanden.



Figuur 4-14. Het verloop van de gemeten waterdiepte in het najaar van 2003



Figuur 4-15. Het verloop van de ruwheidsduinhoote in het najaar van 2003



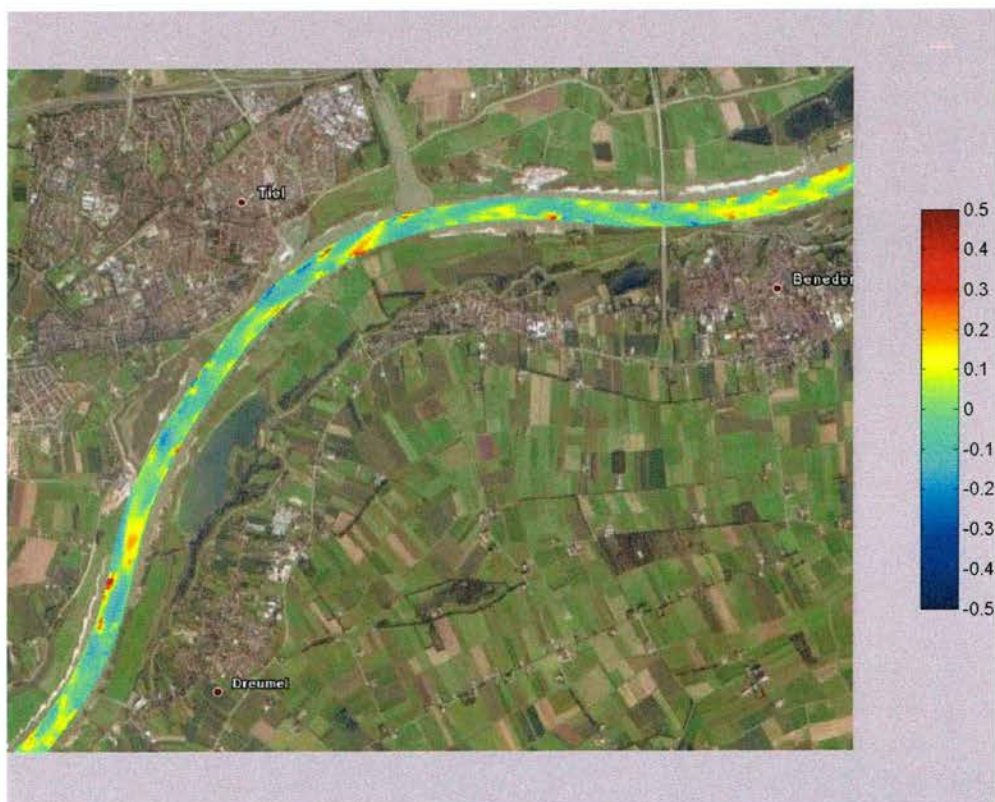
Figuur 4-16. Het verloop van de waterstand op de rivieras in het najaar van 2003 (week 49)

4.5.4 Bodenvormgemiddelde bodemverandering

Het effect van de duinhoogtevoorspellers op de bodenvorm-gemiddelde bodemverandering is ook onderzocht. De duinhoogten beïnvloeden de stromingsweerstand. Dit effect is meegenomen door terugkoppeling van de duinhoogten op de hydraulische bodemruwheid in het model in te bouwen. Figuur 4-17 toont de ‘gemeten’ bodemveranderingen. Figuur 4-18 geeft de bodenvormgemiddelde bodemveranderingen weer die volgt uit de berekeningen met de duinhoogtevoorspeller van Van Rijn (1984) en conform Fredsøe (1982) (resp. simulatie 1a en 2a), en de berekening zonder duinhoogtevoorspellers en zonder het bodenvormdynamica-model (simulatie 3). Figuur 4-19 geeft de bodemveranderingen voor 4 langspatiële profielen. Uit de figuren blijkt dat er wel kleine locale verschillen zijn, maar dat deze redelijk beperkt blijven.



Figuur 4-17. Berekende bodenvormgemiddelde bodemveranderingen tussen week 14 en week 49 op het Waaltraject in de omgeving van Tiel



Bodemvormgemiddelde bodemverandering volgend uit simulatie 1a (duinhoogtevoorspeller Van Rijn (1984))

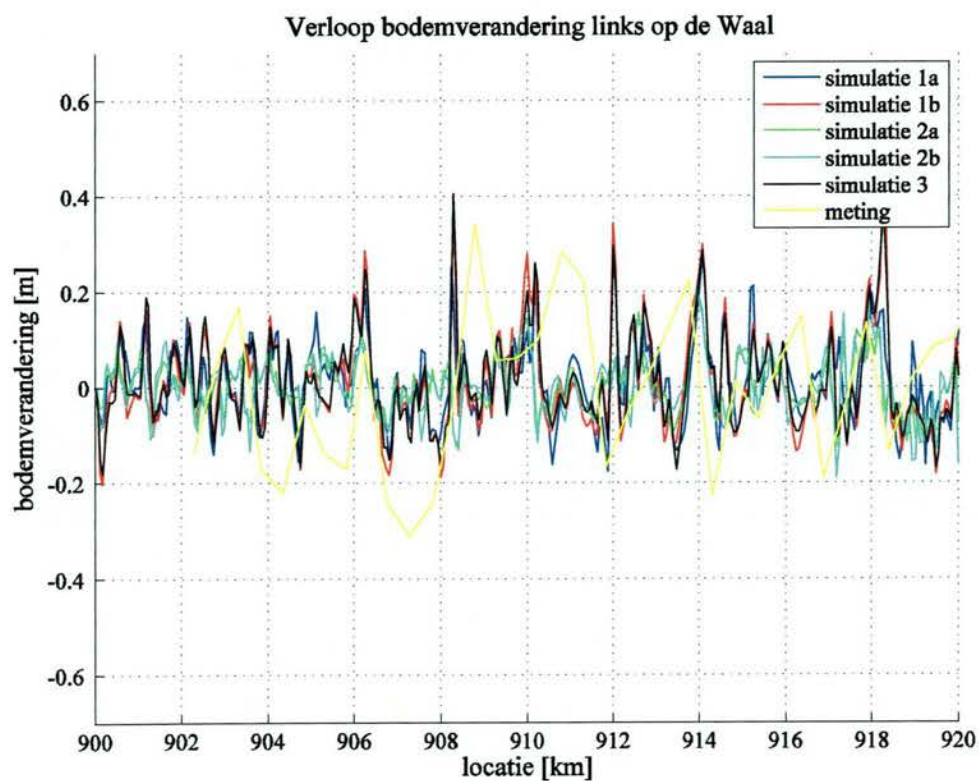


Bodemvormgemiddelde bodemverandering volgend uit simulatie 2 (duinhoogtevoorspeller conform Fredsøe (1982))

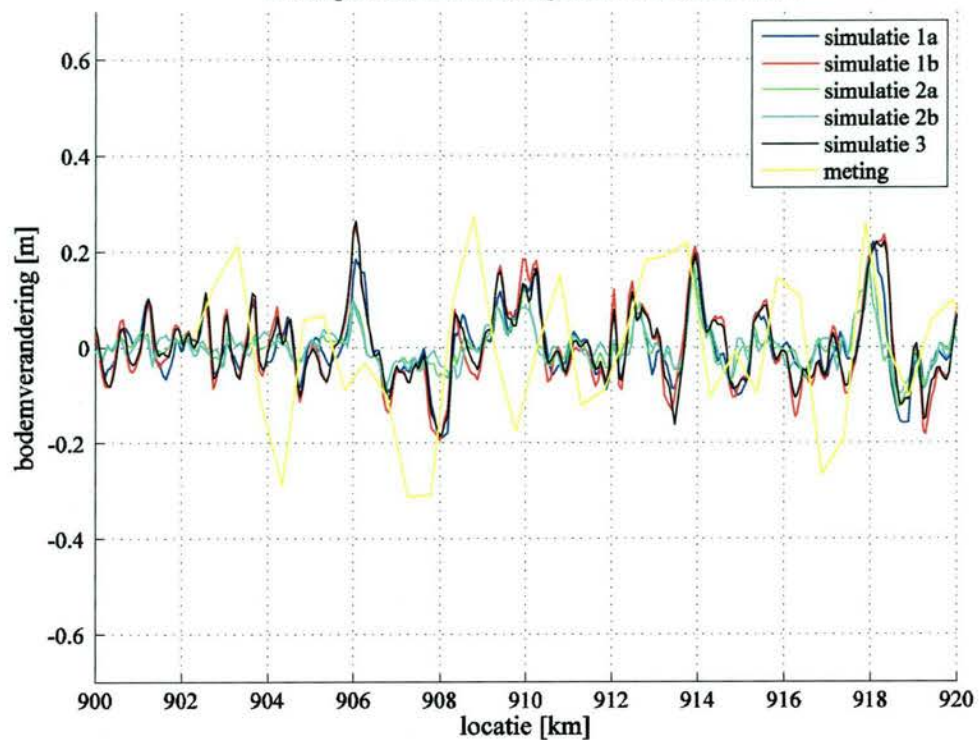


Bodemvormgemiddelde bodemverandering volgens uit simulatie 3 (zonder duinhoogtevoorspeller)

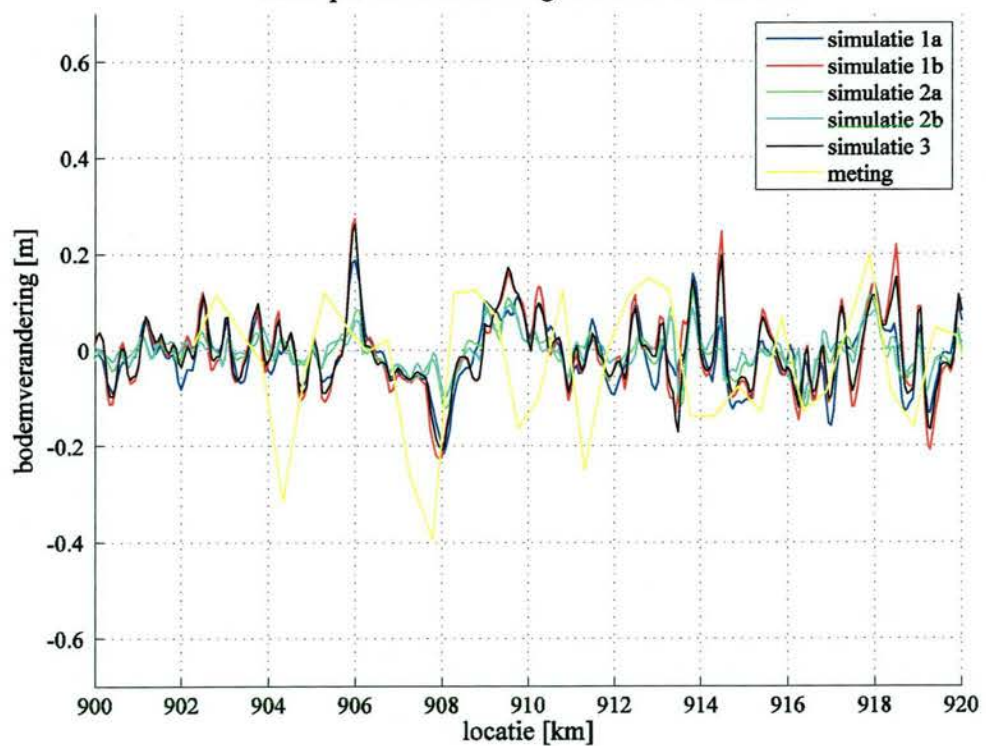
Figuur 4-18. Berekende bodemvormgemiddelde bodemveranderingen tussen week 14 en week 49 op het Waaltraject in de omgeving van Tiel

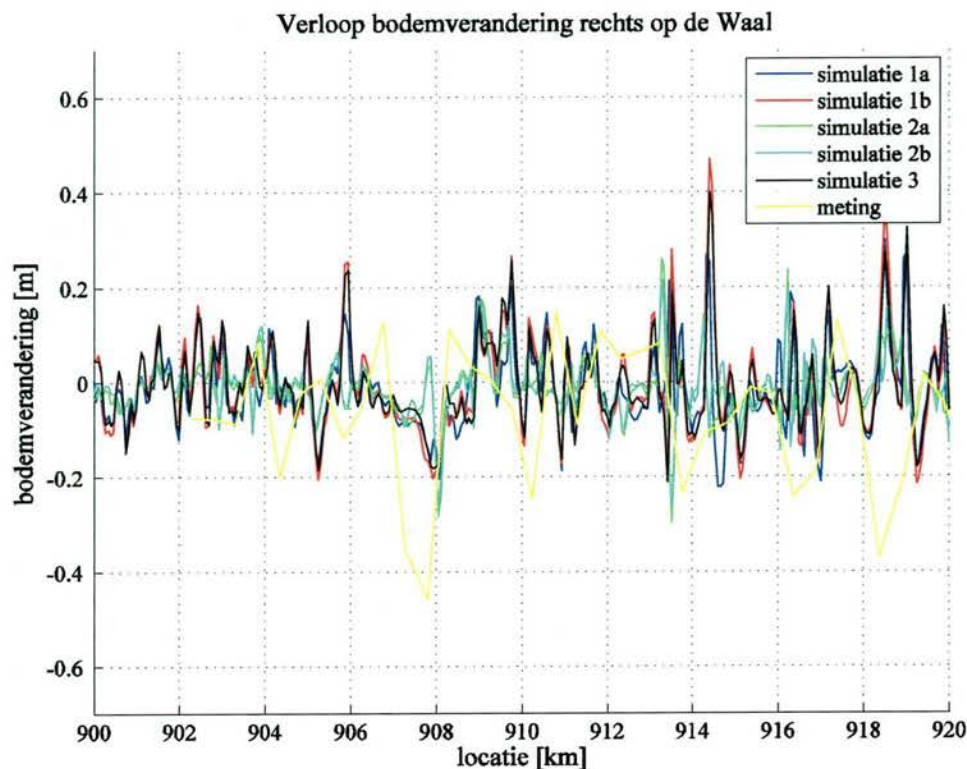


Verloop bodemverandering linker as van de Waal



Verloop bodemverandering rechter as van de Waal

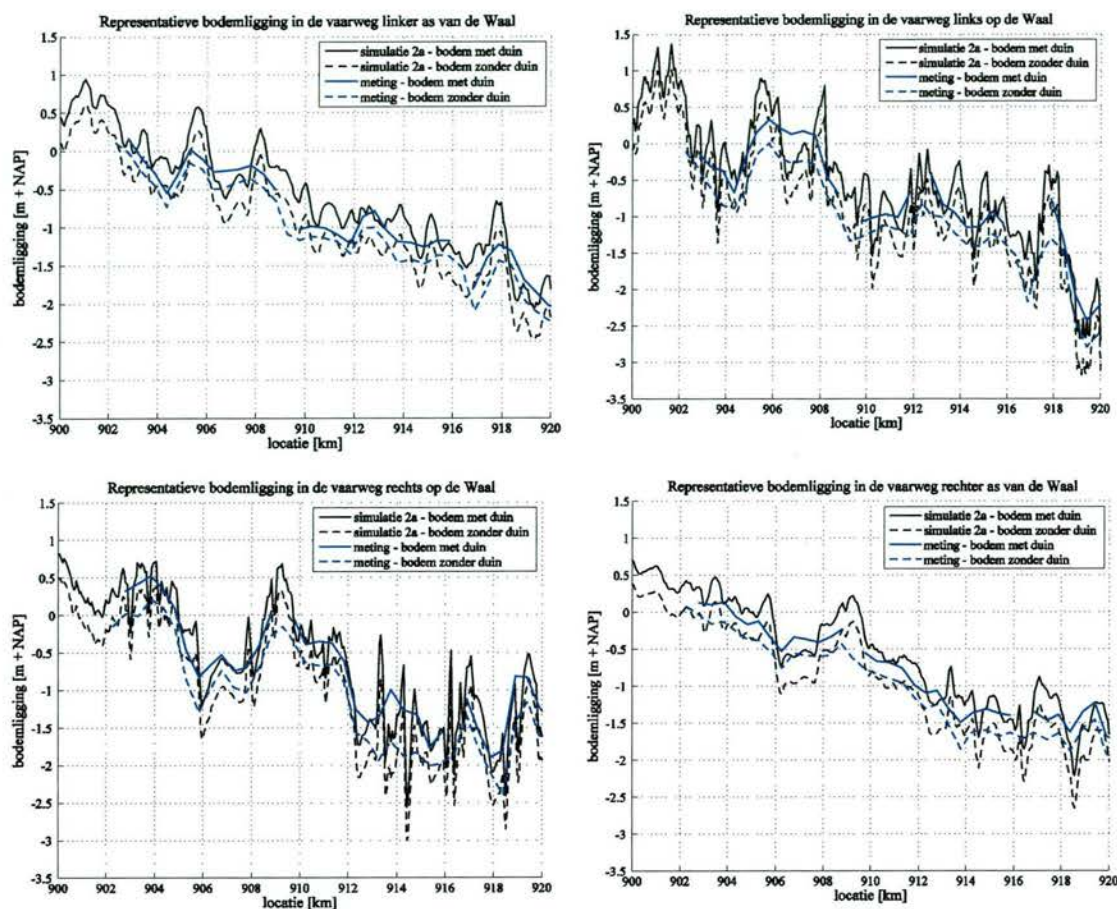




Figuur 4-19. Berekende en waargenomen bodemvormgemiddelde bodemveranderingen tussen week 14 en week 49 op het Waaltraject tussen km 900 en km 920

4.5.5 Presentatie van de bevaarbare bodemligging

De bevaarbare bodemligging is gedefinieerd als de som van de bodemvorm-gemiddelde bodemligging en een bandbreedte gevormd door bodemvormen (zie paragraaf 2.1.6). Ter illustratie toont Figuur 4-20 de bevaarbare bodemligging volgend uit de metingen en de berekeningen met de voorspeller conform Fredsøe (1982). Deze bevaarbare bodemligging is van belang voor de voorspellingen van het aanwezige vaarwegprofiel en het benodigde onderhoudsbaggerwerk. In de figuur is ook de bodemvormgemiddelde bodemligging zonder de bandbreedte voor de bodemvormen weergegeven. Voor de projectie van de duinhoogte op de bodemvormgemiddelde bodem is Vgl. 2-31 toegepast. Hierbij is voor de evenredigheidsconstante α de waarde 1 gebruikt.



Figuur 4-20. Presentatie van de bevaarbare bodempligging: metingen en berekeningen in week 49

5 Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport beschrijft de implementatie en het testen van duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers in Delft3D-3DMOR. Voorspellers van Van Rijn (1984) en Fredsøe (1982) met de uitwerking voor sedimenttransport volgens Meyer-Peter & Müller (1948) en Engelund & Hansen (1947) (zie Sieben (2004)) zijn geïmplementeerd. Ook is een relaxatie- en advectiemodel conform Allen (1976), dat het naijlen van bodemvormen in ruimte en tijd beschrijft, toegevoegd. Dit rapport omvat het functioneel en technisch ontwerp en de elementaire tests die zijn uitgevoerd.

Met de geïmplementeerde voorspellers is een casestudie uitgevoerd op basis van het morfologische model van de Waal dat in het kader van DVR is opgezet, voor de situatie tijdens het laagwater van 2003.

De belangrijkste conclusies en aanbevelingen zijn hieronder samengevat.

- Uit de testen met de duinhoogtevoorspellers blijkt dat de voorspellers op juiste wijze zijn geïmplementeerd in Delft3D-3DMOR. De casestudie op de Waal laat zien dat de voorspeller van Van Rijn (1984) de amplituden van duinhoogten onderschat, terwijl met de voorspeller van Fredsøe (1982) te grote amplituden worden voorspeld. De onderschatting met Van Rijn (1984) is in overeenstemming met de bevindingen van Julien & Klaasen (1995). Ook Wilbers (2004) merkt op dat hoewel Van Rijn (1984) goed voldoet tijdens hoogwatersituaties, deze in minder mate voldoet voor laagwateromstandigheden. Met betrekking tot de overschatting van duindimensies met Fredsøe (1982) wordt aangeraden om de gevoeligheid van parameterinstellingen op modelresultaten in een vervolgstudie te analyseren.
- De amplituden van de bodemvormen in zowel binnen- als buitenbochten lijken aan de hoge kant. Onrealistisch hoge waarden worden zowel uit de metingen als uit de berekeningen afgeleid. Echter, aan deze grote duinhoogten liggen voor de metingen andere oorzaken ten grondslag dan voor de berekeningen:
 - Met betrekking tot de metingen kan worden gezegd dat de gemeten duinamplituden bestaan uit de combinatie plaatsvasten en verplaatsende bodemvormen. Het amplitude-aandeel van de plaatsvasten bodemvormen langs de oevers is erg groot. Voor de analyse zijn de metingen langs de oeverlijnen daarom niet representatief en zijn ze verder in het rapport buiten beschouwing gelaten.
 - Een grote amplitude van de bodemvormen langs de oeverzone in de berekeningen duidt op relatief hoge transporten. Gebleken is dat in dit ongeijkte model de oeverzones initieel sterk eroderen door het ontbreken van niet erodeerbare lagen ter plaatse van de kribkoppen (taluds van de krib). De hiermee samenhangende grote transporten zijn overigens van tijdelijke aard. Het wordt aanbevolen om de modelberekeningen te herhalen met een goed afgeregeld model, waarbij de vaste laag in de richting van het zomerbed met 1 cel is uitgebreid.

- Het is belangrijk om rekening te houden met het relaxatie- en advectiongedrag van bodemvormen in de voorspellingen. Op basis van de metingen kan worden afgevraagd of de relaxatie tijdens de laagwater-casestudie niet sneller had moeten verlopen. Er wordt aanbevolen om de gevoeligheid van de ontwikkeling van de duinhoogten voor de gekozen modelparameters van het bodemvormdynamicamodel in een vervolgonderzoek te onderzoeken. Het aanpassingsgedrag tijdens een hoogwaterperiode zal afwijken van dat tijdens laagwater. Nader onderzoek naar de parameterinstelling tijdens verschillende condities (hoogwater, laagwater, overgangscondities) is daarom vereist.
- De in deze studie toegepaste vertaalslag van duinhoogten naar ruwheidshoogten geeft te hoge ruwheidshoogten met de voorspeller conform Fredsøe (1982). De ruwheidshoogten volgend uit de berekening met de voorspeller van Van Rijn (1984) zijn wel van dezelfde orde grootte als een uit metingen afgeleide ruwheidshoogte. Echter de duinhoogten worden met de voorspeller van Van Rijn (1984) onderschat, terwijl die berekend met Fredsøe (1982) wel redelijk voldoen. De vertaalslag van duinhoogten naar ruwheidshoogten is gecompliceerder dan in de huidige studie is meegenomen. De duinhoogten tellen via de ruwheidsvoorspellers te hard door in de hydraulische ruwheid. Zo zijn bijvoorbeeld bij laagwater niet de langzaam verdwijnende grote hoogwaterduinen maatgevend voor de ruwheid, maar kleine bodemvormen die na het hoogwater zijn ontstaan op deze grote duinen. Onderzoek wordt aanbevolen naar een ruwheidsvoorspeller waarbij onderscheid wordt gemaakt naar de bijdrage van verschillende type bodemvormen aan de totale bodemvormruwheid.

6 Literatuur

- Allen, J. R. L., 1968. The nature and origin of bed form hierarchies. *Sedimentology*, 10, 161-182.
- Allen, J. R. L., 1976. Computational models for dune time-lag: general ideas, difficulties and early results. *Sedimentary Geology*, 16, 225-279.
- Anderson, A. G., 1953. The characteristics of sediment waves formed by flow in open channels. In: *Proceedings of the Third Midwestern Conference on fluid mechanics*, 379-395.
- De Vriend, H.J., 1985. *Flow formulation in mathematical models of 2DH morphological changes*. TOW-Progress report R1747-5, Delft Hydraulics Laboratory, August 1985.
- De Vriend, H.J., 1987a. Analysis of 2DH morphological evolutions in shallow water. *Journal of Geophysical Research*, No.92, pp. 3877-3893.
- De Vriend, H.J., 1987b. 2DH mathematical modelling of morphological evolutions in shallow water. *Coastal Engineering*, Vol.11, pp.1-27.
- De Vries, M., 1959. *Transients in bedload-transport (basic considerations)*. Report R3, Delft Hydr. Lab.
- De Vries, M., 1965. Considerations about non-steady bed-load transport in open channels. *Proc. 11th Congress IAHR*, Leningrad (also Delft Hydr. Lab. Publ. No.36).
- Engelund, F. & Hansen, E., 1967. *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Copenhagen.
- Engelund, F. 1970. Instability of erodible beds, *Journal of Fluid Mechanics*, 42(2)
- Fredsøe, J., 1982. Shape and dimensions of stationary dunes in rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol.108, HY8.
- Fredsøe, J. 1974. On the development of dunes in erodible channels. *Journal of Fluid Mechanics*. 64(1), 1-16
- Gill, M. A., 1971. Height of sand dunes in open channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 97, 2067-2074.
- Julien, P. Y. & Klaassen, G. J., 1995. Sand-dune geometry of large rivers during floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(9), 657-663.
- Karim, F., 1995. Bed configurations and hydraulic resistance in alluvial channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121, 15-25.
- Karim, F., 1999. Bed-form geometry in sand-bed flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 1253-1261.
- Kennedy, J.F., 1963, The mechanics of dunes and antidunes in erodible bed channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 16(4).

- Meyer-Peter, E. & Müller, R., 1948. Formulas for bed load transport. In: *Proceedings of the 2nd Congress IAHR (Vol. 2, p. 39-64)*. Stockholm.
- Mosselman, E., Tubino, M. & Zolezzi, G., 2006. The overdeepening theory in river morphodynamics: two decades of shifting interpretations. *Accepted for River Flow 2006 – International Conference on Fluvial Hydraulics*. 6-8 September 2006, Lisbon, Portugal.
- Mosselman, E., & Sloff, K., 1998. Probleemanalyse ijking Delft3D voor Pannerdensch Kop. Rapport Q2460, WL | Delft Hydraulics, november 1998.
- Ranga Raju, K. G. & Soni, J. P., 1976. Geometry of ripples and dunes in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, 14, 241-249.
- Shinohara, K. & Tsubaki, T., 1959. On the characteristics of sand waves formed upon the beds of open channels and rivers. *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, 7, 15-45.
- Sieben J. & Van Essen, J. A. F., 2004. *Bodemveranderingen tijdens hoogwater, interpretatie van peilingen bij de Pannerdensch Kop*. RIZA werkdokument 2004.211x. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.
- Sieben, J., 2004a. *De Waalbodem in de peiling*. RIZA werkdokument 2004.186x. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.
- Sieben, J. 2004. *Ruimtelijke variaties in duinhoogte*. RIZA werkdokument 2004.166x. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.
- Sieben, J., 2006. *Bed level changes during flood, a case study of the river Waal*. RIZA werkdokument 2006.014. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.
- Sloff, C.J. & Mosselman, E., 1998. *Vorbereiding ijking Rijntakkenmodel*. Rapport Q2460, WL | Delft Hydraulics, november 1998.
- Sloff, C.J. & Jagers, H. R. A., 2004a. *2D morfologische berekeningen Lent*. Rapport Q3560.00, WL | Delft Hydraulics.
- Sloff, C.J. & Jagers, H. R. A., 2004b. *Tweedimensionale bodemveranderingen in de vaarweg van de Waal*. Rapport Q3811.00, WL | Delft Hydraulics.
- Struiksmā, N., Olesen, K. W., Flokstra, C. & de Vriend, H.J., 1985. Bed deformation in curved alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.23, No.1, pp.57-79
- Ten Brinke, W. B. M., Wilbers, A. W. E. & Wesseling, C., 1999. Dune growth, decay and migration rates during a large-magnitude flood at a sand and mixed sand-gravel bed in the Dutch Rhine river system. In: *Fluvial Sedimentology VI, Special Publication of the International Association of Sedimentologists* (Ed. by N. D. Smith & J. Rodgers), 28, 15-32
- Tsuchiya, A. & Ishizaki, K., 1967. In: *Proceedings of the 12th congress of the international association of hydraulic research*. No 1., 479-486.
- Vanoni, V. A. & Hwang, L. S., 1967. Relation between bed forms and friction in streams. *Journal of Hydraulic Divisions*, 93(3), 121-144

- Van Rijn, L. C., 1984. Sediment transport; Part 3: bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 1733-1754.
- Van Rijn, L. C., 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas* (update 2006). Aqua Publications. The Netherlands.
- Van Rijn, L. C., 2006. A unified view of sediment transport by currents and waves, Part I: Initiation of motion, bed roughness and bed load transport. Submitted to *Journal Hydraulic Engineering*, ASCE
- Vreugdenhil, C.B. & De Vries, M., 1973. *Analytical approaches to non-steady bedload transport*. DHL Res. report S 78-IV.
- Wilbers, A., 2004. *The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes*. Netherlands Geographical studies 323, Utrecht, ISSN 0169-4839
- Wijbenga, J. H. A., 1991. Analyse proto-type metingen (niet-) permanente ruwheid. Q1302. WL | Delft Hydraulics.
- Yalin, M. S., 1964. Geometrical properties of sand waves. *Journal of the Hydraulic Division*, 90, 105-119.
- Yalin, M. S., 1972. *Mechanics of sediment transport*. Pergamon Press, Oxford.
- Zeekant, J., 1983. Enkele hydraulische en morfologische parameters van de Nederlandse Rijntakken. Nota 83.12, TOW nr. A35, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost.

A Grootte van constante in duinhoogtevoorspeller van Sieben (2004)

Jansen et al. (1979, p. 97) leggen een relatie tussen bodemtransport en de verplaatsingssnelheid van bodemvormen:

$$s_b = \alpha s = \zeta w H \quad (\text{A-1})$$

waarin

H	duinhoogte (m)
s	totaaltransport van sediment per eenheid van breedte (m ² /s)
s _b	bodemtransport van sediment per eenheid van breedte (m ² /s)
w	verplaatsingssnelheid van bodemvormen (m/s)
α	aandeel van bodemtransport in het totale sedimenttransport (-)
ζ	volume-aandeel van sediment in de transportlaag tussen duintoppen en -dalen (-)

Volgens Jansen et al. (1979, p. 97) bedraagt de waarde van ζ ongeveer 0,6.

Verondersteld wordt dat de voortplantingssnelheid van 1D verstoringen in de bodemvormgemiddelde bodemligging evenredig is met de verplaatsingssnelheid van bodemvormen (Jansen et al., 1979, p. 101):

$$c = \xi w \quad (\text{A-2})$$

waarin

c	voortplantingssnelheid van 1D verstoringen in de bodemvorm-gemiddelde bodemligging (m/s)
ξ	verhouding tussen de voortplantingssnelheid van 1D verstoringen in de bodemvorm-gemiddelde bodemligging en de verplaatsingssnelheid van bodemvormen (-)

Hierbij betreffen de 1D verstoringen in de bodemvormgemiddelde bodemligging verstoringen in het bodemlengteprofiel. De 2D voortplantingssnelheid van verstoringen in bodemvormgemiddelde bankenpatronen is beduidend kleiner. Volgens Jansen et al (1979, p. 101) heeft ξ een waarde van $0,7 \pm 0,2$.

Eliminatie van w uit Vergelijkingen (A-1) en (A-2) levert

$$c = \varepsilon \frac{s}{H} \quad (\text{A-3})$$

met

$$\varepsilon = \frac{\alpha \xi}{\zeta} \quad (\text{A-4})$$

Dit is de constante in de duinhoogtevoorspeller van Sieben (2004).

De waarde van α laat zich schatten aan de hand van een vereenvoudiging van de empirische formule die gebruikt is door Sloff & Mosselman (1998, p. B-10):

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 & \text{als } \frac{u_*}{w} &\leq 0,4 \\ \alpha &= 0,62 - 0,951 \log\left(\frac{u_*}{w}\right) & \text{als } 0,4 < \frac{u_*}{w} &\leq 4,5 \\ \alpha &= 0 & \text{als } \frac{u_*}{w} &> 4,5 \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

waarin

u_* schuifspanningssnelheid (m/s)
 w valsnelheid van sediment (m/s)

Tabel A-1 is overgenomen uit de tabellen van Zeekant (1983). Uit deze tabel valt af te lezen dat de verhouding u_*/w in de Nederlandse Rijntakken voor morfologisch relevante afvoeren kan variëren tussen 0,2 en 1,1. De bijbehorende waarden van α zijn dan volgens Formules (A-5) gelijk aan respectievelijk 1,0 en 0,6.

Samengevat geldt $0,6 \leq \alpha \leq 1$, $\zeta \approx 0,6$ en $\xi = 0,7 \pm 0,2$. Daaruit volgt dat ε kan variëren tussen 0,5 en 1,5.

Tabel A-1. Waarden van de verhouding tussen schuifspanningssnelheid en valsnelheid voor morfologisch relevante afvoeren in de Nederlandse Rijntakken (Zeekant, 1983).

Riviertak	Traject	Snelheidsverhouding u_* / w	
		1950 m ³ /s Lobith	3200 m ³ /s Lobith
Bovenrijn	Lobith – Pannerdensch Kop	0,25	0,32
Waal	Pannerdensch Kop – Nijmegen	0,35	0,41
	Nijmegen – Dodewaard	0,56	0,66
	Dodewaard – Tiel	0,66	0,77
	Tiel – St. Andries	0,64	0,77
	St. Andries – Zaltbommel	0,63	0,77
	Zaltbommel – Herwijnen	0,56	0,76
IJssel	IJsselkop – De Steeg	0,20	0,23
	De Steeg – Doesburg	0,29	0,33
	Doesburg – Dieren	0,29	0,34
	Dieren – Zutphen	0,51	0,59
	Zutphen – Deventer	0,77	0,91
	Deventer - Olst	0,68	0,84
	Olst – Wijhe	0,88	1,13
	Wijhe – Katerveer	0,81	1,06
	Katerveer - Kampen	0,64	0,87
PK-Nederrijn	Pannerdensch Kop - Doornenburg	0,24	0,32
	Doornenburg - IJsselkop	0,27	0,37
	IJsselkop – Arnhem	0,30	0,48
	Arnhem – Driel	0,21	0,54
	Driel – Lekskensveer	0,36	0,64
	Lekskensveer – Grebbe	0,31	0,63
	Grebbe - Remmerden	0,27	0,58
	Remmerden – Eck en Wiel	0,21	0,68
	Eck en Wiel – Amerongen	0,36	0,96
	Amerongen – Wijk bij Duurstede	0,32	0,85
	Wijk bij Duurstede – Culemborg	0,35	0,82
	Culemborg – Hagestein	0,37	0,82

B Ruwheidsvoorspeller van Van Rijn (2006)

De ruwheidsvoorspeller van Van Rijn (2006) is al in Delft-3D MOR geïmplementeerd. In Van Rijn (2006) wordt voor de hydraulische ruwheid die door de bodemvormen wordt geïnduceerd, onderscheid gemaakt in drie typen bodemvormen:

- ribbels;
- mega-ribbels;
- duinen.

Ribbels

De hydraulische ruwheid door ribbels en de korrelgrootte van het bodemmateriaal is beschreven met:

$$k_{\text{ribbel+korrelgrootte}} = f_{cs} \cdot D_{50} \cdot (85 - 65 \cdot \tanh(0,015(\psi - 150))) \quad (\text{B-1})$$

met

- f_{cs} een factor gerelateerd aan de grootte van het sediment
 D_{50} de korreldiameter die door 50% van het bodemmateriaal wordt onderschreden
 Ψ de mobiliteitsparameter

De factor gerelateerd aan de grootte van het sediment wordt beschreven met:

$$f_{cs} = \left(0,25 \cdot \frac{D_{\text{gravel}}}{D_{50}} \right), \text{ met } f_{cs} = 1 \text{ als } D_{50} \leq 0,25 \cdot D_{\text{gravel}} \text{ en } D_{\text{gravel}} = 0,002 \text{ m} \quad (\text{B-2})$$

De mobiliteitsparameter in een situatie zonder golven is gelijk aan:

$$\Psi = \frac{u^2}{((s-1)gD_{50})} \quad (\text{B-3})$$

met

- u de diepte-gemiddelde stroomsnelheid
 s de korrelspecifieke dichtheid, ρ_s/ρ_w

Mega-ribbels

In Van Rijn (2006) is de hydraulische ruwheid niet bepaald op basis van de dimensies van de bodemvormen, maar is gekozen voor een directe parametrisatie van de hydraulische ruwheid. De bodemruwheid van mega-ribbels is een functie van de waterdiepte en de mobiliteitsparameter:

$$k_{\text{megaribbel}} = 0,00002 \cdot f_{fs} \cdot h \cdot (1 - e^{-0,05\psi})(550 - \psi) \quad (\text{B-4})$$

met

$$f_{cs} = \left(\frac{D_{50}}{1,5D_{\text{sand}}} \right), \text{ met } f_{cs} = 1 \text{ als } D_{50} \geq 1,5 \cdot D_{\text{sand}} \text{ en } D_{\text{sand}} = 0,000062 \text{ m} \quad (\text{B-5})$$

Duinen

De bodemruwheid van duinen is ook een directe functie van de waterdiepte en de mobiliteitsparameter en is niet gerelateerd aan de bodemvormdimensies:

$$k_{\text{duinen}} = 0,00008 \cdot f_{\text{fs}} \cdot h \cdot (1 - e^{-0,02\psi})(600 - \psi) \quad (\text{B-6})$$

Indien mega-ribbels en duinen voorkomen in combinatie met kleinschalige ribbelpatronen, is de totale hydraulische ruwheid gelijk aan:

$$k_{\text{totaal}} = \left[(k_{\text{korrelgrootte+ribbels}})^2 + (k_{\text{megaribbels}})^2 + (k_{\text{duinen}})^2 \right]^{0,5} \quad (\text{B-7})$$



WL | Delft Hydraulics

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

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

