

Opdrachtgever:

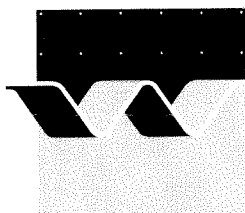
DG Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ-Middelburg

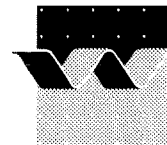
Berekening van de bodemruwheid ten
behoefte van het waterbewegingsmodel
SCALWEST voor de Westerschelde

L.C. van Rijn

December 2003



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: DG Rijkswaterstaat; Rijks-Instituut voor Kust en Zee (Middelburg)

TITEL: Berekening van de bodemruwheid ten behoeve van het waterbewegingsmodel SCALWEST voor de Westerschelde

Recent (1999, 2000 en 2002) zijn er een drietal studies uitgevoerd met het SCALWEST-model van Rijkswaterstaat naar de nauwkeurigheid van de berekende stroomsnelheden in de intergetijdegebieden van de Westerschelde.

Uit de resultaten van de studie in 1999 met het SCALWEST-model van Rijkswaterstaat naar het voorspellen van stroomsnelheden in intergetijdegebieden van de Westerschelde blijkt dat de voorspelde stroomsnelheden in deze gebieden langs de oevers veel te klein zijn in vergelijking met gemeten waarden. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een onjuiste (te grote) bepaling van de bodemruwheid in het SCALWEST-model. Aanpassing van de (lagere) bodemruwheden levert een verbetering op. Uit de studies van 2000 en 2002 blijkt dat de stroomsnelheden en dus ook de bodemruwheden van de intergetijdegebieden langs de oevers vrij goed zijn, maar dat de bodemruwheden op de intergetijde-platen nog te groot zijn, waardoor de stroomsnelheden aldaar te laag worden berekend. Er zijn aanwijzingen dat dit wordt veroorzaakt door onjuiste bepaling van de ruwheid van de aanwezige megazandribbels op de intergetijde-platen.

RIKZ van Rijkswaterstaat vertegenwoordigd door Drs. B. Kornman heeft aan Prof. Dr. Ir. L.C. van Rijn van WL gevraagd om de resultaten van deze studies te beoordelen en daarbij in het bijzonder na te gaan of de gebruikte bodemruwheidsvoorspeller wel toepasbaar is in het intergetijdegebied en waar nodig of mogelijk voorstellen voor aanpassing of verbetering van de bodemruwheidsvoorspeller te geven. De werkzaamheden betreffen:

- bestuderen van de bovengenoemde rapporten;
- evalueren van de toegepaste methoden om de bodemruwheid te voorspellen;
- rapporteren van de bevindingen in een aantal conclusies en aanbevelingen voor verbetering of aanpassing van de gebruikte of te gebruiken bodemruwheidsvoorspeller.

In Hoofdstuk 2 van deze notitie wordt een (engelstalig) overzicht gegeven van de huidige stand van zaken met betrekking tot het voorspellen van bodemruwheid in gebieden met stroming en golven over een zandige bodem.

In Hoofdstuk 3 worden de belangrijkste resultaten van de genoemde studies samengevat.

In Hoofdstuk 4 worden conclusies en aanbevelingen gegeven. De belangrijkste conclusie is dat de bodemruwheid van de (meer symmetrische) mega-zandribbels en zandduinen in de Westerschelde niet voldoende nauwkeurig kan worden weergegeven, omdat de vorm van de grotere beddingvormen (zoals mega-ribbels en duinen) niet voldoende nauwkeurig wordt weergegeven door de methode Van Rijn (1993). Aanbevolen wordt om het vormeffect nader te bepalen door middel van laboratoriumonderzoek in combinatie met calibratie van gemeten en berekende stroomsnelheden in de intergetijde-gebieden.

REFERENTIES: Opdrachtnummer 67031284

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING			
	L.C. van Rijn	December 2003			T. Schilperoort			
PROJECTNUMMER:		Z3685						
TREFWOORDEN:		Bodemruwheid Westerschelde						
INHOUD:	TEKST	ca 15	TABELLEN	3	FIGUREN	1	APPENDICES	0
STATUS:		☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF						

Inhoud

1	Inleiding en achtergrond	1—1
2	Voorspellen van bodemruwheid.....	2—1
2.1	Beschikbare methoden	2—1
2.2	Bodemruwheid gebaseerd op beddingvorm-karakteristieken	2—2
2.2.1	Bed forms and predictability	2—2
2.2.2	Bed roughness	2—5
2.3	Bodemruwheid gebaseerd op bulk parameters	2—6
2.4	Summary	2—10
3	Resultaten van eerder uitgevoerde studies met SCALWEST-model.....	3—1
3.1	Overzicht van uitgevoerde studies	3—1
3.2	Rapport juli 1999	3—1
3.3	Rapport november 2000.....	3—2
3.4	Rapport Augustus 2002.....	3—5
4	Evaluatie, conclusies en aanbevelingen	4—1
5	Referenties	5—1

I Inleiding en achtergrond

Recent zijn er een drietal studies uitgevoerd met het SCALWEST-model van Rijkswaterstaat naar de nauwkeurigheid van de berekende stroomsnelheden in de intergetijdegebieden van de Westerschelde. Deze studies betreffen:

Het SCALWEST-model in het intergetijdegebied; een eerste verkenning naar afwijkingen tussen model en veldmetingen. Rapport 99321/1115, 30 juli 1999, Svasek

ECOMORF; De modellering van de hydro-dynamica in het intergetijdegebied. Rapport 00327/1165-A647, November 2000, Svasek-Alkyon

Verbetering van het SCALWEST-model; ruwheden in het intergetijdegebied. Rapport 01513/1206, 26 augustus 2002, Svasek

Uit de resultaten van de studie in 1999 met het SCALWEST-model van Rijkswaterstaat naar het voorspellen van stroomsnelheden in intergetijdegebieden van de Westerschelde blijkt dat de voorspelde stroomsnelheden in deze gebieden langs de oevers veel te klein zijn in vergelijking met gemeten waarden. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een onjuiste (te grote) bepaling van de bodemruwheid in het SCALWEST-model. Aanpassing van de (lagere) bodemruwheden levert een verbetering op. Uit de studies van 2000 en 2002 blijkt dat de stroomsnelheden en dus ook de bodemruwheden van de intergetijdegebieden langs de oevers vrij goed zijn, maar dat de bodemruwheden op de intergetijde-platen nog te groot zijn, waardoor de stroomsnelheden aldaar te laag worden berekend. Er zijn aanwijzingen dat dit wordt veroorzaakt door onjuiste bepaling van de ruwheid van de aanwezige megazandribbels op de intergetijde-platen.

RIKZ van Rijkswaterstaat vertegenwoordigd door Drs. B. Kornman heeft aan Prof. Dr. Ir. L.C. van Rijn van WL gevraagd om de resultaten van deze studies te beoordelen en daarbij in het bijzonder na te gaan of de gebruikte bodemruwheidsvoorspeller wel toepasbaar is in het intergetijdegebied en waar nodig of mogelijk voorstellen voor aanpassing of verbetering van de bodemruwheidsvoorspeller te geven.

De werkzaamheden betreffen:

- bestuderen van de bovengenoemde rapporten;
- evalueren van de toegepaste methoden om de bodemruwheid te voorspellen;
- rapporteren van de bevindingen in een aantal conclusies en aanbevelingen voor verbetering of aanpassing van de gebruikte of te gebruiken bodemruwheidsvoorspeller.

In Hoofdstuk 2 van deze notitie wordt een (engestaltig) overzicht gegeven van de huidige stand van zaken met betrekking tot het voorspellen van bodemruwheid in gebieden met stroming en golven over een zandige bodem.

In Hoofdstuk 3 worden de belangrijkste resultaten van de genoemde studies samengevat.

In Hoofdstuk 4 worden conclusies en aanbevelingen gegeven.

2 Voorspellen van bodemruwheid

2.1 Beschikbare methoden

Nikuradse (1932) introduced the concept of an equivalent or effective sand roughness height (k_s) to simulate the roughness of arbitrary roughness elements of the bottom boundary.

Generally, four types of roughness values can be distinguished:

Grain roughness ($k_{s,\text{grain}}$)	→ sand transport modelling
Current-related bed form roughness ($k_{s,c}$)	→ flow modelling → sand transport modelling
Wave-related bed form roughness ($k_{s,w}$)	→ wave modelling → sand transport modelling
Apparent roughness (k_a)	→ flow modelling → sand transport modelling

In case of a movable bed with bed forms the effective bed roughness (k_s) mainly consists of grain roughness ($k_{s,\text{grain}}$) generated by skin friction forces and of form roughness ($k_{s,\text{form}}$) generated by pressure forces acting on the bed forms. Similarly, a grain-related bed-shear stress ($\tau_{b,\text{grain}}$) and a form-related bed-shear stress ($\tau_{b,\text{form}}$) can be defined.

The grain roughness is the roughness of the plane bed surface, which is of importance for the motion of the bed load particles and the entrainment of suspended load particles at the upstream side (stoss side) of the bed forms or at a flat bed (if bed forms are absent).

The current-related roughness is the effective roughness of the bed forms as experienced by the current (unidirectional flow). This parameter affects the depth-mean velocity and the vertical distribution of the velocity profile and hence the near-bed velocities, which are of special importance for the sand transport processes. Similarly, the wave-related roughness is the effective roughness of the bed forms as experienced by the orbital motion of the waves (oscillatory flow) in conditions when the bed forms have a length scale smaller than the orbital excursion.

The apparent roughness is the effective roughness experienced by the current when waves are superimposed on the current (wave-current interaction effects) resulting in modification of the velocity profile. Generally, the velocities are reduced in the near-bed region.

The effective bed roughness for a given bed material size is not constant but depends on the flow conditions. Analysis results of k_s -values computed from Mississippi River data (USA) show that the k_s -value strongly decreases from about 0.5 m at low velocities (0.5 m/s) to about 0.001 m at high velocities (2 m/s), probably because the bed forms become more rounded or are washed out at high velocities.

The fundamental problem of bed roughness prediction is that the bed characteristics (bed forms) and hence the bed roughness depend on the main flow and wave variables (depth, velocity, wave height and period) and sediment transport rate (sediment size). These hydraulic variables are, however, in turn strongly dependent on the bed configuration and its roughness.

Generally, two methods are being used to describe the bed roughness:

1. bed roughness (k_s) derived from the bed form characteristics (length λ , height Δ and form); method of Van Rijn (1993); method of Vanoni-Hwang (1967); $k_s = F(\Delta, \lambda, \text{shape})$
2. bed roughness (k_s) derived from bulk parameters (depth-averaged velocity u_c , peak orbital velocity U_w , ϕ = angle between wave and current motion, d_{50} of bed material); method of Engelund-Hansen (1967), White et al. (1979), Brownlie (1981); $k_s = F(u_c, U_w, \phi, d_{50})$.

Application of method 1 requires detailed information of the bed form characteristics (either from measurements in the field or from predictions). Both methods require detailed information of the spatial distribution of d_{50} of the bed material.

2.2 Bodemruwheid gebaseerd op beddingvorm-karakteristieken

2.2.1 Bed forms and predictability

Analysis of field data in rivers, estuaries and coastal seas shows the presence of various types of small-scale and large-scale bed forms.

Rivers

The morphological regimes for unidirectional flow can be classified into:

- lower transport regime with flat bed, ribbons and ridges, ripples, dunes and bars,
- transitional regime with washed-out dunes and sand waves,
- upper transport regime with flat mobile bed and sand waves (anti-dunes).

Bed forms in the lower flow regime with their crestlines approximately perpendicular (transverse) to the main flow direction are most relevant for bed roughness. These types of bed forms are called transverse bed forms, such as ripples, dunes and anti-dunes. Small-scale ripples (or mini-ripples) have a length scale much smaller than the water depth, whereas large-scale mega-ripples and dunes have a length scale much larger than the water depth. Ripples and dunes travel downstream by erosion at the upstream face (stoss side) and deposition at the downstream face (lee side).

When the velocities are somewhat larger (10-20%) than the critical velocity for initiation of motion and the median particle size is smaller than about 500 μm , small (mini) ripples are generated at the bed surface. Ripples that are developed during this stage remain small with a ripple height (Δ_r) and length (λ_r) much smaller than the water depth ($\lambda_r \ll h$). Values are in the range of $\Delta_r/d_{50} = 50$ to 200 and $\lambda_r/d_{50} = 500$ to 1000.

The characteristics of mini ripples are commonly assumed to be related to the turbulence characteristics near the bed (burst-sweep cycle). Current ripples have an asymmetric profile with a relatively steep downstream face (lee side) and a relatively gentle upstream face (stoss side). As the velocities near the bed become larger, the ripples become more irregular

in shape, height and spacing yielding strongly three-dimensional ripples. The largest ripples may have a length up to the water depth and are commonly called mega-ripples. The relative height (Δ/h) of the mega-ripples varies in the range of 0.02 to 0.06. The length of the mega-ripples varies in the range of 0.5 to 1 h.

The most typical bed form type of the lower regime is the dune-type bed form. Dunes have an asymmetrical (triangular) profile with a rather steep leeside and a gentle stoss side. A general feature of dune type bed forms is leeside flow separation resulting in strong eddy motions downstream of the dune crest and, hence, relatively large bed roughness values (k_s of the order of the dune height). The maximum dune height is in the range of 0.1 to 0.3 h. The dune height increases weakly with particle diameter for a given water depth. The length of the dunes is strongly related to the water depth with values in the range of 3 to 15 h. The generation of mini or mega-ripples on the stoss sides of the dunes is also a typical phenomenon of the lower flow regime.

It is a well-known phenomenon that the bed forms generated at low velocities are washed out at high velocities in the transitional and upper flow regimes. It is not clear, however, whether the disappearance of the bed forms is accomplished by a decrease of the bed form height, by an increase of the bed form length or both. Flume experiments (with sediment material of about 450 μm) show that the transition from the lower to the upper regime is effectuated by an increase of the bed form length and a simultaneous decrease of the bed form height. Ultimately, relatively long and smooth sand waves with a roughness equal to the grain roughness were generated.

In the transitional and upper flow regimes the sediment particles will be transported mainly in suspension. This will have a strong effect on the bed form shape. The bed forms will become more symmetrical with relatively gentle lee-side slopes. Flow separation will occur less frequently and the effective bed roughness will approach to that of a plane bed.

Bed forms with their crest parallel to the flow do also occur and are called longitudinal bed forms such as ribbons and ridges. Generally, these types of bed forms do not contribute much to the flow resistance.

Estuaries

The bed forms most frequently found in tidal currents in estuaries are mega-ripples, asymmetrical sand dunes and symmetrical sand waves. Tidal currents may have an asymmetrical variation depending on the channel and shoal system. Mega-ripples have a height of the order of 0.5 to 1 m and a length of the order of the water depth (5 to 20 m). Generally, they are generated in the main flood and ebb channels with bed material sizes smaller than 300 μm . The lee slopes of the mega-ripples are approximately equal to the angle of repose (avalanche angle). The shape is typically asymmetrical in the direction of the main current. Thus, reorientation takes place with the reversal of the tide. The sand dunes and sand waves have lengths of several times the water depths. These lengths, however, are much **smaller** than those of the sand dunes in steady river flow because the tidal period is not large enough for the generation of equilibrium values. The largest bed forms do occur in areas where the river discharge is dominating the tidal discharge. Generally, the sand dunes and sand waves are found in the deeper, wider tidal channels with bed material sizes larger than about 300 μm . Sand dunes are typically asymmetrical in the direction of the dominating current velocity. Sand waves are typically symmetrical with their crests approximately midway between the troughs. The lee side angles are much smaller than the angle of repose and seldom exceed 10° . This means that flow separation will not occur yielding relatively small bed roughness values.

Sand waves are typically found in areas with symmetrical tidal currents generating an equal amount of sediments transported backward and forward over the crest on each phase of the tide.

Estimates of the dimensions of the tidal bed forms in relation to water depths (h) are, as follows:

mega-ripples : $\Delta 5 = 0.05 \text{ to } 0.1 \text{ h}$ and $\lambda 6 = 0.5 \text{ to } 2 \text{ h}$
in shallow channels
($d_{50} \leq 300 \text{ } \mu\text{m}$)

sand dunes, sand waves : $\Delta 7 = 0.1 \text{ to } 0.2 \text{ h}$ and $\lambda 8 = 3 \text{ to } 6 \text{ h}$
in deeper channels
($d_{50} = 300 - 600 \text{ } \mu\text{m}$)

Coastal seas

Generally, short wave ripples (SWR) and long wave ripples (LWR) are present in conditions with combined waves and weak currents. Sometimes, these bed forms are superimposed on large-scale sand waves/banks.

SWR are dominant for $\psi = (U_{wc})^2 / ((s-1)g d_{50})$ in the range of 50 to 150 and disappear for $\psi > 150$. SWR reformation can occur within a minute or so after flattening, when the ψ -value decrease to a value below 150 but larger than about 50. For $\psi < 50$ ripple movement is slow. SWR have the following dimensions:

- ***fine sand bed (0.1-0.3 mm)***
 - height of 0.01 to 0.03 m or $\Delta_r/d_{50} = 50 \text{ to } 300$,
 - length of 0.1 to 0.3 m or $\lambda_r/d_{50} = 500 \text{ to } 3000$,
 - steepness (Δ_r/λ_r) of 0.05 to 0.15;
- ***coarse sand bed (0.3 to 1 mm)***,
 - height of 0.03 to 0.1 m or $\Delta_r/d_{50} = 10 \text{ to } 300$,
 - length of 0.3 to 1.2 m or $\lambda_r/d_{50} = 100 \text{ to } 3000$.

LWR are low-relief bed features (steepness of about 0.01) and are always present on the bed surface, but are dominantly present for $\psi > 150$. LWR have a height of 0.01 to 0.02 m and a length of 1 to 2 m in a fine sand bed (0.1 to 0.3 mm). The origin of the LWR is not quite clear.

The U_{wc} -parameter is: $U_{wc}^2 = U_w^2 + u_c^2 + 2U_w u_c |\cos \varphi|$ with U_w = peak orbital velocity near bed = $\pi H / (T_r \sinh(2kh))$, u_c = depth-averaged current velocity, φ = angle between wave and current motion, H = wave height, $k = 2\pi/L$, L = wave length derived from $(L/T \pm u_c)^2 = gL \tanh(2\pi h/L) / (2\pi)$, $T_r = T / ((1 - (u_c T/L) \cos \varphi))$ = relative wave period, T = wave period, h = water depth.

Predictability of bed forms

The form and dimensions of the large-scale transverse dunes in rivers can be predicted rather well (within a factor of 2), but the prediction of mega-ripples is rather inaccurate at present stage of research, as sufficient field data sets of these types of bed forms are still lacking.

The form and dimensions of the large-scale mega-ripples and transverse dunes in estuaries can not be predicted with sufficient accuracy, as detailed field information is lacking.

The dimensions of the short ripples wave conditions (without current) are predictable by models to within a factor of 2. The prediction models are not able to reproduce the relatively low steepness values. Mega-ripples and large-scale dunes may be present at specific locations in combined wave and current conditions, but this is not yet predictable.

2.2.2 Bed roughness

Various types of expressions are available to estimate the effective bed roughness height (k_s) of the bed forms, if the dimensions of these bed forms are accurately known, either from measurements or predictions. These expressions relate the bed roughness (k_s) to the height (Δ), length (λ) and shape of the bed forms. Generally, the effect of the bed form shape is not explicitly included. Often, it is only indirectly included via the calibration coefficient.

As regards the smaller bed forms (mini-ripples), the shape with relatively steep lee-side slopes is almost invariant and does not need to be included as a separate parameter. The bed roughness of the smaller mini-ripples is almost fully determined by flow separation effects. The available roughness predictors for the smaller bed forms are sufficiently accurate (Van Rijn, 1993).

As regards the larger bed forms (mega-ripples and dunes) in estuaries, the bed form shape is of crucial importance for the effective bed roughness because it determines the generation of flow separation effects or not. Van Rijn (1993) has shown that the flow separation effect of sand dunes can be included by using the leeside bed slope angle of these bed forms. Tentatively, a shape correction factor of 0.7 was introduced for sand dunes in rivers (Van Rijn, 1993).

Wilbers (2004) shows that the brinkpoint level (with respect to the trough of the bed form) is a better parameter to characterise the effective bed form height for bed roughness of sand dunes in rivers. The brinkpoint is defined as the location where the flow separates from the wall. Based on analysis of flume and field data sets, the effective bed form height was found to be about 0.8Δ to 0.9Δ for dune-type bed forms. However, a general method for the inclusion of the shape effect over the whole range from asymmetric to symmetric bed forms is not yet available. This requires detailed experiments with various types of bed forms in a laboratory flume.

At present stage of research, the available bed form predictors for mega-ripples and dunes in estuaries are not sufficiently accurate. These predictors, generally, produce estimates of the bed form height and length, but do not give information of the bed form shape. This latter parameter is of special importance for the bed roughness of mega-ripples and dunes (flow separation or not) in estuaries. The shape correction factor of mega-ripples in estuaries will probably be in the range of 0.3 to 0.7 depending on the precise shape of the mega-ripples in the crest region (degree of roundness).

Since a generally-accepted method for the accurate prediction of bed form characteristics (Δ , λ and shape) in estuaries is not yet available, it is concluded that the prediction of bed roughness from predicted bed form dimensions will not lead to very accurate results at present stage of research.

More accurate bed roughness values can be obtained if the bed form dimensions are known from detailed field measurements (including the bed form shape) in combination with

detailed flow velocity measurements. This requires the detailed mapping of the bed forms in various geomorphological units of each specific system (river, estuary or coastal sea).

2.3 Bodemruwheid gebaseerd op bulk parameters

Given the fact that bed form data often is inaccurate or totally missing, it may be more attractive to relate the bed roughness (k_s) directly to bulk hydrodynamic and sediment-dynamic parameters ($k_s/d_{50}=f(\psi)$ with ψ =parameter characterizing the hydrodynamic regime). Such a method was recently developed by Van Rijn (see Van Rijn and Walstra, 2003) for combined current and wave conditions.

Current-related roughness of movable bed $k_{s,c}$

It is assumed that the bed roughness of movable ripples (SWR) in natural conditions is approximately equal to the ripple height: $k_{s,c}=\Delta_r$. Furthermore, it is assumed that ripples (SWR) are fully developed with a height equal to $\Delta_r=150d_{50}$ for $\psi \leq 50$ in the lower wave-current regime and that the ripples (SWR) disappear with $\Delta_r=0$ for $\psi \geq 250$ in the upper wave-current regime (sheet flow conditions). In the former case the bed roughness is fully determined by form roughness, while in the latter case the roughness is fully determined by the moving grains in the sheet flow layer. LWR may be present in the upper regime, but the form roughness of LWR is assumed to be zero (no vortex generation). In line with this, it is proposed that the current-related roughness of small-scale ripples is given by:

$$\begin{aligned} k_{s,c,r} &= 150d_{50} && \text{for } \psi \leq 250 \text{ (lower wave-current regime, SWR ripples)} \\ k_{s,c,r} &= 20d_{50} && \text{for } \psi \geq 250 \text{ (upper wave-current regime, sheet flow)} \\ k_{s,c,r} &= (182.5 - 0.65\psi)d_{50} && \text{for } 50 < \psi < 250 \text{ (linear approach in transitional regime)} \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

with: ψ = mobility parameter $= U_{wc}^2 / ((s-1)gd_{50})$, $(U_{wc})^2 = (U_w)^2 + u_c^2 + 2(U_w)(u_c)|\cos \phi|$

U_w = peak orbital velocity near bed $= \pi H_s / (T_p \sinh(2kh))$, u_c = depth-averaged current velocity, ϕ = angle between wave and current motion, H_s = significant wave height, $k=2\pi/L$, L = wave length derived from $(L/T_p \pm u_c)^2 = gL \tanh(2\pi h/L) / (2\pi)$,

$T_r = T_p / ((1 - (u_c T_p / L) \cos \phi))$ = relative wave period, T_p = peak wave period, h = water depth.

Eq. (2.3.1) includes the grain roughness and is assumed to be valid for relatively fine sand with d_{50} in the range of 0.1 to 0.5 mm. An estimate of the bed roughness for coarse particles ($d_{50} > 0.5$ mm) can be obtained by using Eq. (2.3.1) for $d_{50}=0.5$ mm. Thus, $d_{50}=0.5$ mm for $d_{50} \geq 0.5$ mm resulting in a maximum bed roughness height of 0.075 m (upper limit). The lower limit will be $k_{s,c}=20d_{50}=0.002$ m for sand with $d_{50} \leq 0.1$ mm.

Mega-ripples and/or dunes may be present on the bed if certain threshold values are exceeded. (h =water depth > 1 m and u_c =depth-averaged velocity > 0.3 m/s). The physical bed form roughness ($k_{s,c,mr}$) of the mega-ripples and dunes is roughly of the order of half the

mega-ripple height and can be roughly expressed as (grain roughness is neglected; only form roughness):

Mega-ripples

$$\begin{aligned} k_{s,cmr} &= 0.0002\psi h & \text{and } 0 \leq \psi \leq 50 & \text{and } h > 1 \text{ and } u_c > 0.3 \\ k_{s,cmr} &= (0.0125 - 0.00005\psi)h & \text{and } 50 < \psi < 250 & \text{and } h > 1 \text{ and } u_c > 0.3 \\ k_{s,cmr} &= 0 & \text{and } \psi \geq 250 & \text{and } h > 1 \text{ and } u_c > 0.3 \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

Dunes (in rivers)

$$\begin{aligned} k_{s,c,d} &= 0.0004\psi h & \text{and } 0 \leq \psi \leq 100 & \text{and } h > 1 \text{ and } u_c > 0.3 \\ k_{s,c,d} &= (0.05 - 0.0001\psi)h & \text{and } 100 < \psi < 500 & \text{and } h > 1 \text{ and } u_c > 0.3 \\ k_{s,c,d} &= 0 & \text{and } \psi \geq 500 & \text{and } h > 1 \text{ and } u_c > 0.3 \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Eq. (2.3.2) yields: $k_{s,c,mr}=0$ for $\psi=0$, $k_{s,c,mr}=0.01h$ for $\psi=50$ and $k_{s,c,mr}=0$ for $\psi=250$. Hence, the maximum value is $k_{s,c,mr}=0.01h$.

Eq. (2.3.3) yields: $k_{s,c,d}=0$ for $\psi=0$, $k_{s,c,d}=0.04h$ for $\psi=100$ and $k_{s,c,d}=0$ for $\psi=500$. Hence, the maximum value is $k_{s,c,d}=0.04h$.

The total physical current-related roughness ($k_{s,c}$) is:

$$k_{s,c} = \left(k_{s,c,r}^2 + k_{s,c,mr}^2 + k_{s,c,d}^2 \right)^{0.5} \quad (2.3.4)$$

When mega-ripples and/or dunes are present, these values should be added to the physical bed roughness of the small-scale ripples by quadratic summation, see Eq. (2.3.4).

The current-related friction coefficient (based on the Darcy-Weisbach approach: $f=8g/C^2$) can be computed as:

$$f_c = \frac{8g}{\left(18 \log \left(\frac{12h}{k_{s,c}} \right) \right)^2} = \frac{0.24}{\left(\log \left(\frac{12h}{k_{s,c}} \right) \right)^2} \quad (2.3.5)$$

Figure 2.3.1 shows the current-related ripple roughness ($k_{s,c,r}$) and the wave-related ripple roughness ($k_{s,w,r}$) as a function of the mobility parameter (ψ). The values range from 0.015 and 0.075 m for $\psi < 50$ and from 0.002 m to 0.01 m for $\psi > 250$; linear interpolation for intermediate values. The effects of mega-ripples and dunes are not included.

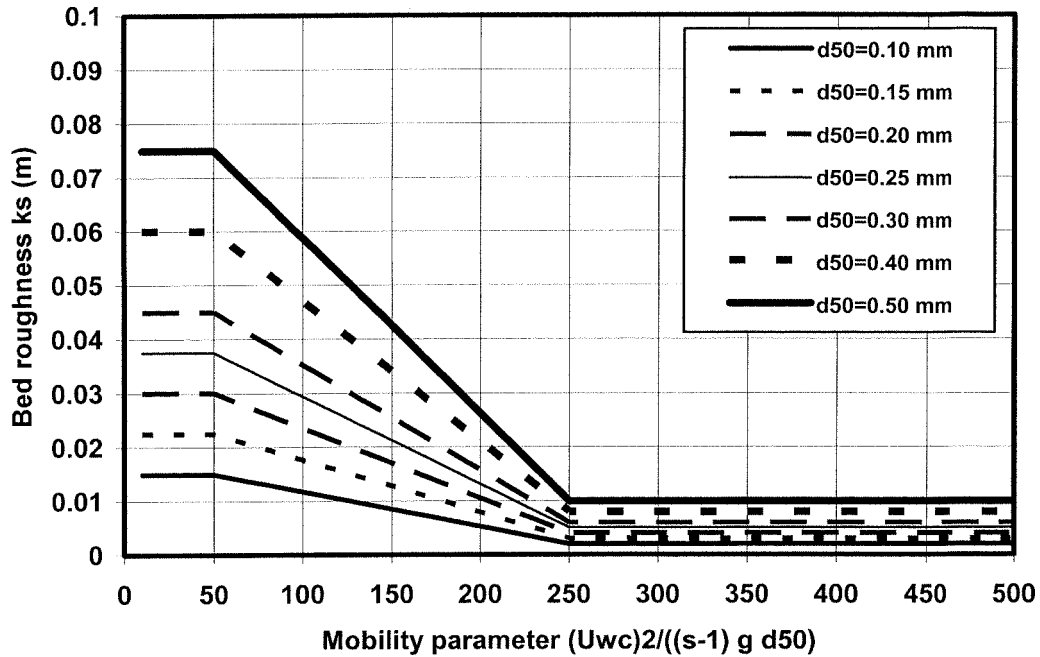


Figure 2.3.1 *Current-related ($k_{s,c,r}$) and wave-related ripple ($k_{s,w,r}$) roughness as function of mobility parameter for sand in the range of 0.1 to 0.5 mm; small-scale bed forms (no mega-ripples)*

Wave-related roughness of movable bed $k_{s,w}$

As regards the wave-related bed roughness, only bed forms (ripples) with a length scale of the order of the wave orbital diameter near the bed are relevant. Bed forms (mega-ripples, ridges, sand waves) with a length scale much larger than the orbital diameter do not contribute to the wave-related roughness. It is assumed that the wave-related roughness of movable small-scale ripples (SWR) in natural conditions is approximately equal to the ripple height: $k_{s,w} = \Delta_r$. Furthermore, it is assumed that ripples (SWR) are fully developed with a height equal to $\Delta_r = 150d_{50}$ for $\psi \leq 50$ in the lower wave-current regime and that the ripples (SWR) disappear with $\Delta_r = 0$ for $\psi \geq 250$ in the upper wave-current regime (sheet flow conditions). In the former case the bed roughness is fully determined by form roughness, while in the latter case the physical roughness is fully determined by the moving grains in the sheet flow layer. LWR may be present in the upper regime, but the form roughness of LWR is assumed to be zero (no vortex generation).

In line with this, it is proposed that the wave-related roughness of small-scale ripples is given by:

$$\begin{aligned}
 k_{s,w,r} &= 150d_{50} && \text{for } \psi \leq 250 \text{ (lower wave-current regime, SWR ripples)} \\
 k_{s,w,r} &= 20d_{50} && \text{for } \psi \geq 250 \text{ (upper wave-current regime, sheet flow)} \\
 k_{s,w,r} &= (182.5 - 0.65\psi)d_{50} && \text{for } 50 < \psi < 250 \text{ (linear approach in transitional regime)}
 \end{aligned}
 \tag{2.3.6}$$

with: ψ = mobility parameter= $U_{wc}^2/((s-1)g d_{50})$, $(U_{wc})^2 = (U_w)^2 + u_c^2 + 2(U_w)(u_c) |\cos \phi|$ U_w = peak orbital velocity near bed= $\pi H_s/(T_r \sinh(2kh))$, u_c = depth-averaged current velocity, ϕ = angle between wave and current motion, H_s = significant wave height, $k=2\pi/L$, L = wave length derived from $(L/T_p \pm u_c)^2 = gL \tanh(2\pi h/L)/(2\pi)$, $T_r = T_p/((1-(u_c T_p/L)\cos\phi))$ = relative wave period, T_p = peak wave period, h = water depth.

Eq. (2.3.6) includes grain roughness and is assumed to be valid for relatively fine sand with d_{50} in the range of 0.1 to 0.5 mm (see Figure 2.3.1). An estimate of the bed roughness for coarse particles ($d_{50} > 0.5$ mm) can be obtained by using Eq. (2.3.6) for $d_{50} = 0.5$ mm. Thus, $d_{50} = 0.5$ mm for $d_{50} \geq 0.5$ mm resulting in a maximum bed roughness height of 0.075 m (upper limit). The lower limit will be $k_{s,w} = 20d_{50} = 0.002$ m for sand with $d_{50} \leq 0.1$ mm.

The wave-related friction coefficient can be computed as:

$$f_w = \exp \left(5.2 \left(\frac{A_w}{k_{s,w}} \right)^{-0.19} - 6 \right) \quad (2.3.7)$$

Apparent bed roughness for flow over a movable bed

It is proposed to use the existing expression (Van Rijn, 1993):

$$\frac{k_a}{k_{s,c}} = \exp \left(\frac{\gamma U_w}{u_c} \right) \text{ and } \left(\frac{k_a}{k_{s,c}} \right)_{MAX} = 10 \quad (2.3.8)$$

with: $\gamma = 0.8 + \phi - 0.3\phi^2$ and ϕ = angle between wave direction and current direction (in radians between 0 and π ; $0.5\pi = 90^\circ$, $\pi = 180^\circ$). Characteristic γ -values are $\gamma = 0.8$ for 0, $\gamma = 1$ for $\pi = 180^\circ$ and $\gamma = 1.63$ for $0.5\pi = 90^\circ$. The γ -value is maximum $\gamma = 1.63$ for $\phi = 0.5\pi = 90^\circ$.

Eq. (2.3.8) should only be applied to the small-scale ripples (SWR). The mega-ripples and/or dunes should be excluded.

The current-related apparent friction coefficient (based on the Darcy-Weisbach approach: $f = 8g/C$) can be computed as:

$$f_{c,a} = \frac{8g}{\left(18 \log \left(\frac{12h}{k_a} \right) \right)^2} = \frac{0.24}{\left(\log \left(\frac{12h}{k_a} \right) \right)^2} \quad (2.3.9)$$

It should be realized that the proposed method based on bulk parameters has not yet been verified in a detailed way. The expressions are intuitive rather than exact. Field research focussing on the roughness of bed forms (mini-ripples and mega-ripples) is required to verify/improve the method.

2.4 Summary

The effective bed roughness in estuaries can be determined either from known bed form dimensions (including the shape) or from bulk parameters.

As regards the smaller bed forms (mini-ripples), the shape with relatively steep lee-side slopes is almost invariant and does not need to be included as a separate parameter. The bed roughness of the smaller mini-ripples is almost fully determined by flow separation effects. The available predictors for the dimensions and roughness of these smaller bed forms based on bulk parameters are sufficiently accurate (Van Rijn, 1993; Van Rijn and Walstra, 2003).

As regards the larger bed forms (mega-ripples and dunes) in estuaries, the bed form shape is of crucial importance for the effective bed roughness because it determines the generation of flow separation effects or not. This effect can be included by using a shape correction factor.

At present stage of research, the available bed form predictors for mega-ripples and dunes in estuaries are not sufficiently accurate. These predictors, generally, produce estimates of the bed form height and length, but do not give information of the bed form shape. The shape correction factor of mega-ripples in estuaries will probably be in the range of 0.3 to 0.7 depending on the precise shape of the mega-ripples in the crest region (degree of roundness).

Since a generally-accepted method for the accurate prediction of bed form characteristics (Δ , λ and shape) in estuaries is not yet available, it is concluded that the prediction of bed roughness from predicted bed form dimensions will not lead to very accurate results at present stage of research.

More accurate bed roughness values can be obtained if the bed form dimensions are known from detailed field measurements (including the bed form shape) in combination with detailed flow velocity measurements. This requires the detailed mapping of the bed forms in various geomorphological units of each specific system (river, estuary or coastal sea).

Given the fact that bed form data often is inaccurate or totally missing, it may be more attractive to relate the bed roughness (k_s) directly to bulk hydrodynamic and sediment-dynamic parameters ($k_s/d_{50}=f(\psi)$ with ψ =parameter characterizing the hydrodynamic regime). Such a method was recently developed by Van Rijn (see Van Rijn and Walstra, 2003) for combined current and wave conditions. However, the proposed method needs extensive verification as regards the predicted roughness values for mega-ripples and dunes in estuaries and seas.

3 Resultaten van eerder uitgevoerde studies met SCALWEST-model

3.1 Overzicht van uitgevoerde studies

De resultaten van de eerder uitgevoerde studies zijn beschreven in de volgende drie rapporten:

Het SCALWEST-model in het intergetijdegebied; een eerste verkenning naar afwijkingen tussen model en veldmetingen. Rapport 99321/1115, 30 juli 1999, Svasek

ECOMORF; De modellering van de hydro-dynamica in het intergetijdegebied. Rapport 00327/1165-A647, November 2000, Svasek-Alkyon

Verbetering van het SCALWEST-model; ruwheden in het intergetijdegebied. Rapport 01513/1206, 26 augustus 2002, Svasek

De resultaten beschreven in deze drie rapporten zijn hieronder kort samengevat.

3.2 Rapport juli 1999

Dit rapport heeft als centrale doelstelling na te gaan in hoeverre het SCALWEST-model in staat is om de stroming in het intergetijdegebied (vooral de slikken langs de oevers) correct te voorspellen, waarbij als modelkenmerken de volgende fysische parameters zijn beschouwd:

- stroomsnelheden en -richtingen in een aantal lokaties op de slikken;
- maximale eb- en vloed stroomsnelheden (eb/vloed dominantie);
- variatie van de stroomsnelheden over de doottij-springtij cyclus;
- ruimtelijke verdeling van de stroomsnelheden in ondiepe gebieden.

Tevens moet duidelijk worden wat de mogelijke oorzaken van verschillen tussen modelberekeningen en meetresultaten zijn.

De gebruikte meetresultaten betreffen metingen uitgevoerd in 1996 op een vijftal lokaties op verschillende slikken in het Westerschelde-gebied: Bath-west, Waarde-oost, Zuidgors-west, Zuidgors-oost en Paulinaolder. Per locatie zijn er 2 of 3 meetposities met 1 of 2 snelheidspunten in de vertikaal (maximale waterdiepte ca 3 m). De lokale bodemligging is bepaald met behulp van waterpassingen.

Het gebruikte SCALWEST-model is een 2DH model van de Westerschelde. De model karakteristieken zijn:

- diepte-gemiddelde stroomsnelheden;

- bodemgegevens van 1996 voor geulen en platen; oudere bodemgegevens teruggaand tot 1990 voor de ondiepe gebieden langs de oevers;
- kromlijinig rooster met ca 75000 roosterpunten; roosterafstand in breedterichting varieert van 10 tot 400 m en in lengterichting van 40 tot 700 m.

De modelbodem is lokaal aangepast in de gebieden waar de (slik)metingen zijn uitgevoerd. De gemeten punt-snelheden zijn vertaald naar diepte-gemiddelde stroomsnelheden uitgaande van een logaritmische snelheidsverdeling over de waterdiepte.

Uit vergelijking van de gemeten en berekende stroomsnelheden en -richtingen in de diverse slikgebieden van de Westerschelde blijkt globaal het volgende:

- de berekende waterstanden in de slikgebieden zijn ca 0.1 tot 0.2 m te hoog;
- de berekende stroomsnelheden zijn aanzienlijk te laag (factor 1.5 tot 2) in de meeste slikgebieden met uitzondering van meetpunt 5 in gebied Zuidgors-west en meetpunt 4 in gebied Waarde-oost;
- tijdens doottij komen de berekende ebsnelheden beter overeen met de meetwaarden dan de vloedsnelheden; tijdens springtij zijn zowel de berekende ebsnelheden als de vloedsnelheden niet correct;
- de doottij-springtij variaties worden door het model goed weergegeven, net zoals de eb- en vloed-dominantie;
- de relatieve afwijkingen zijn het grootst in de hogergelegen punten, als gevolg van de relatief kleine snelheden in deze gebieden, waardoor kleine absolute fouten resulteren in grote relative fouten.

Op basis van analyse van de afwijkingen tussen berekende en gemeten resultaten zijn de volgende mogelijke oorzaken te geven:

- de roosterafstanden van 50 tot 100 m in de slikkengebieden zijn te grof om het aanwezige kleinschalige geulen- en platenpatroon goed weer te geven; de kleinere geulen worden niet goed weergegeven; een algehele verlaging van de bodem met 0.3 m geeft hogere modelsnelheden (ca 40% hoger, als resultaat van een gevoeligheidsberekening met het model);
- de bodemruwheid in de slikkengebieden (bodem hoger dan -1 m NAP) is gelijkgesteld aan die van de hoofdgeulen en platen; een gelijkmatige ruwheidsverlaging (ca 50%) in de slikkengebieden geeft hogere modelsnelheden (ca 50%); door met een lokale ruwheid te rekenen kunnen de snelheden nog verder worden verbeterd;
- andere effecten (droogval-schematisatie, verhoogde turbulente uitwisselingscoëfficiënt, verkleinde tijdstap) hebben weinig of geen invloed.

De aanbevelingen zijn:

- plaatsafhankelijke bodemruwheid (op basis van luchtfoto's) aanbrengen in het model;
- roosterverfijning in de perifere slikkengebieden aanbrengen in het model.

3.3 Rapport november 2000

De doelstellingen van deze studie zijn globaal:

- inzicht in de nauwkeurigheid van de stroming met en zonder golven in intergetijdegebieden;

- nagaan welke verbeteringen er mogelijk zijn;
- implementeren van verbeteringen en nagaan wat de resultaten van de verbeteringen zijn.

Een aantal nieuwe stroommetingen op de Molenplaat (1996 en 1997) zijn toegevoegd aan het eerdere meetbestand (zie Rapport juli 1999). De Molenplaat ligt tussen het Middelgat en de Overloop van Hansweert. De meetlocatie bevindt zich op de oever van de secundaire kortsluit-geul langs de Molenplaat. De berekende ebsnelheden zijn te groot; de berekende vloodsnelheden zijn redelijk goed. Het tijdstip van kenteren van de stroming op hoogwater wordt niet correct weergegeven.

Om tot een betere beschrijving van de bodemruwheid te komen, is er een geomorfologische kaart van de Westerschelde gemaakt, waarin het gebied is opgedeeld in een aantal subgebieden met verschillende morfologie (beddingvormen op basis van luchtfoto's). Met behulp van luchtfoto's en bestaande kennis (veelal uit rivieren; Van Rijn, 1993) zijn er schattingen gemaakt van het type en de afmetingen van de beddingvormen in de verschillende subsystemen (zie Tabellen 3.1, 3.2 en 3.3)

Morf. Eenheid	Dynamiek	bedvorm	afkorting		oppervlak (ha)	Bedding hoogte (m)	Lengte van de bedding vorm (m)	bijzonderheid
Plaat/Slik (P)	Laag energetisch	vlak	P1a1	zand	1596	<0,05 m		
			P1a2	slibrijk zand	1228	<0.05 m		
			P1a3	slibrijk	1594	<0.05 m		
	Hoog energetisch	gegolfd	P2a		475	< 0,25 m	> 10 m	Golfge-stuurd
		megaribbels	P2b1	2D	985	> 0,25 m	<25 m	u _{max} <0,8 m/s
			P2b2	3D	575	> 0,25 m	<25 m	u _{3d} >u _{2d}
		vlak	P2c		922	< 0,25 m	> 25 m	u < u _{3d}
	Ruggen		P3		23			geïsoleerd
	Water		P4		4			
Kreek			K		517			
Hard substraat			H		308			veen
Duin			D		38			Wind-invloed
Schor			S		2588			begroeid
Totaal					10922			

Tabel 3.1 Indeling geomorfologische kaart met verschillende geomorfologische gebieden

Morf. Eenheid	Dynamiek	beddingsvorm	afk.		d90	Bedding hoogte (m)	Lengte van de bedding vorm (m)	bijzonderheden
Plaat/Slik (P)	Laag energetisch	Vlak	P1a1	Zand	0.000360	0.025	0.13	
			P1a2	slibrijk zand	0.000180	0.02	0.08	
			P1a3	Slibrijk	0.000040	0.01	0.05	
	hoog energetisch	Gegolfd	P2a		0.000400	0.20	15	
		Megaribbels	P2b1	2D	0.000400	0.50	20	
			P2b2	3D	0.000400	1.00	20	
		Vlak	P2c		0.000400	0.05	100	
	ruggen		P3		0.000400	0.05	60	In stroomrichting kleine ribbels
	water		P4		0.000400	0.15	5	gemiddelde waarde aangenomen
Kreek			K		0.000400	0.15	5	gemiddelde waarde aangenomen
Hard substraat			H		0.040000			veen
Duin			D		0.000200			
Schor			S		0.300000			begroeiing

Tabel 3.2 Afmetingen van beddingvormen in verschillende geomorfologische gebieden

morf. Eenheid	Dynamiek	Beddingvorm	afk.		k' (m)	k'' (m)	k totaal (m)	Bijzonderheden
Plaat/Slik (P)	Laag energetisch	Vlak	P1a1	Zand	0.0011	0.0191	0.0202	
			P1a2	Slibrijk zand	0.0005	0.0154	0.0159	
			P1a3	Slibrijk	0.0001	0.0076	0.0078	
	Hoog energetisch	Gegolfd	P2a		0.0012	0.0437	0.0449	
		Megaribbels	P2b1	2D	0.0012	0.1789	0.1801	
			P2b2	3D	0.0012	0.5494	0.5506	
		Vlak	P2c		0.0012	0.0005	0.0017	
	Ruggen		P3		0.0012	0.0008	0.0020	
	Water		P4		0.0012	0.0900	0.0912	
Kreek			K		0.0012	0.0900	0.0912	
Hard substraat			H		0.1200		0.1200	Schatting van totale ruwheid
Duin			D		0.0006		0.0006	idem
Schor			S				0.6000	k=2d ₉₀

Tabel 3.3 Bodemruwheid van beddingvormen in verschillende geomorfologische gebieden

De bodemruwheden van de laag-dynamische plaat/slik-gebieden (P1 in Tabel 3.3) variëren globaal van 0.01 tot 0.02 m ($C=50$ tot $57 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$).

De bodemruwheden van de hoog-dynamische plaat/slik-gebieden met ribbelvormige beddingvormen (P2 in Tabel 3.3) variëren globaal van 0.05 tot 0.55 m ($C=45$ tot $25 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$). Toepassing van bodemruwheden met een waarde van 0.55 m betekent dat de bodemruwheid op die locaties aanzienlijk toeneemt ten opzichte van het oorspronkelijke model (SCALWEST-model).

De bodemruwheden van de ruggen en water van de plaat/slik-gebieden met beddingvormen (P3 en P4 in Tabel 3.3) hebben een ruwheid van resp. 0.002 m en 0.09 m ($C=68$ tot $38 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$).

Deze waarden zijn ingevoerd in het SCALWEST-model voor het intergetijdengebied. De ruwheden van de overige delen van het model zijn niet gewijzigd. De berekende stroomsnelheden met dit aangepaste model zijn groter (0.25 tot 0.5 m/s) op de slikken, waar de ruwheid is verlaagd en kleiner (0.25 tot 0.5 m/s) in die gebieden (met mega-ribbels) waar de ruwheid is vergroot (bijv. Plaat van Ossenisse). De berekende snelheden ter plaatse van het nieuwe meetpunt Molenplaat zijn iets minder goed met het nieuwe ruwheidsveld (vloedsnelheden nemen iets toe).

In deze studie zijn ook berekeningen van het golfhoogteveld in de Westerschelde en de door golfwerking opgewekte stromingen (breken van golven op de plaatranden en verschillen in golf set-up) uitgevoerd, waarbij golf-stroominteractie in eerste instantie is verwaarloosd. De orbitaalsnelheden in de ondiepe plaat- en slikgebieden kunnen van belang voor het aanpassen van de lokale beddingvormen en dus voor de lokale bodemruwheid. Bij latere berekeningen van het golfhoogteveld is het stroomveld wel meegenomen bij de golfhoogteberekeningen (SWAN-model). De invloed van de golfwerking op de bodemruwheid van het stromingsmodel is niet meegenomen.

De belangrijkste conclusies van de studie zijn:

- de gewijzigde bodemruwheden op de slikken hebben geleid tot betere overeenkomst van berekende en gemeten stroomsnelheden op de slikken;
- de gewijzigde bodemruwheden op de platen hebben geleid tot een minder goede overeenkomst van berekende en gemeten stroomsnelheden op de platen (althoewel er maar meetwaarden van 1 plaat, Molenplaat, zijn gebruikt).

De aanbevelingen zijn:

- analyseren van alle metingen in de ondiepe delen van de Westerschelde;
- verder afregelen van bodemruwheid in de ondiepe delen;
- implementeren van de White-Colebrook formulering in het SCALWEST-model; waardoor de effective bodemruwheid (k_s) kan worden opgelegd als invoerparameter in plaats van de C-waarde of n-waarde.

3.4 Rapport Augustus 2002

De doelstellingen van dit rapport zijn:

- het afregelen van het bestaande SCALWEST-model (met bodem 1996) met metingen in het intergetijdengebied (fase 1);
- het bouwen en afregelen van het nieuwe SCALWEST-model met bodem 2000 (fase 2).

Aanpak:

- kombergende gebieden: alleen globale afregeling;
- slikken: de lokale bodemligging en de lokale bodemruwheid moeten worden afgeregeld;
- platen: de lokale bodemruwheid en ook de bodemruwheid van de naastliggende hoofdgeulen moeten worden afgeregeld (i.v.m faseverschillen).

Conclusies:

- op basis van de geomorfologische kaart van 1996 is er voor elke geomorfologische eenheid een bodemruwheid bepaald. Deze waarden zijn op basis van de beschikbare metingen verder afgeregeld (vooral de eenheden: plaat/slik, laag slib);
- op basis van het aangepaste bodemruwheidsveld in het intergetijdegebied treedt er over het algemeen een verbetering op van de berekende stroomsnelheden in die gebieden; in 18 van de 24 meetpunten zijn de stroomsnelheden verbeterd (met gemiddeld 64%), in 4 meetpunten zijn de stroomsnelheden min of meer gelijk gebleven, in 6 meetpunten zijn de stroomsnelheden slechter geworden (met gemiddeld 21%);
- over het algemeen zijn de berekende stroomsnelheden nog steeds te laag (vooral tijdens vloed);
- de stroomsnelheden op de platen worden maar in geringe mate beïnvloed door de bodemruwheid van de hoofdgeulen; deze bodemruwheid van de hoofdgeulen is daarom niet verder afgeregeld;
- de stroomsnelheden in de laag-dynamische intergetijdegebieden zijn groter geworden door toepassing van lagere bodemruwheden; de stroomsnelheden in de hoog-dynamische intergetijdegebieden (met mega-ribbles) zijn kleiner geworden door toepassing van hogere bodemruwheden.

Aanbevelingen:

- het bodemruwheidsveld is afgeregeld op basis van een zeer beperkte set veldmetingen; deze dataset moet worden uitgebreid door het uitvoeren van nieuwe metingen in de intergetijdegebieden;
- het SCALWEST-model moet worden verbeterd door het invoeren van verschillende bodemruwheden voor eb en vloed;
- verder optimaliseren van de geomorfologische kaart en bijbehorende bodemruwheden.

4 Evaluatie, conclusies en aanbevelingen

Evaluatie en conclusies

De gebruikte methode voor het voorspellen van de bodemruwheid in de Westerschelde volgens Van Rijn (1993) is afgeleid voor rivieren en gaat uit van optelling van de ruwheid van de verschillende typen beddingvormen (korrels, mini-ribbels, mega-ribbels, zandduinen, zandgolven, etc.).

De bodemruwheid van de mini-ribbels kan voldoende nauwkeurig worden weergegeven, omdat de vorm en afmetingen van de kleinere beddingvormen zoals aanwezig in de Westerschelde niet veel zullen afwijken van die in rivieren.

De bodemruwheid van de (meer symmetrische) mega-ribbels en zandduinen in de Westerschelde kan niet voldoende nauwkeurig worden weergegeven, omdat de vorm van de grotere beddingvormen (zoals mega-ribbels en duinen) niet voldoende nauwkeurig wordt weergegeven door de methode Van Rijn (1993). Toepassing van de bestaande relatie kan resulteren in een forse overschatting van de effectieve bodemruwheid van de meer symmetrische mega-ribbels in estuaria. In de huidige aanpak wordt het vormeffect globaal weergegeven door de bodemruwheid van mega-ribbels en duinen met een factor van 0.7 te vermenigvuldigen. Deze factor is te groot voor relatief symmetrische beddingvormen, waarbij loslaten van de stroming niet of minder zal optreden. Dit kan worden verbeterd door nadere studie naar het vormeffect (op basis van laboratorium- en veldonderzoek); het vormeffect kan op eenvoudige wijze worden weergegeven door een nader te bepalen vormfunctie; deze vormfunctie kan worden bepaald door middel van laboratoriumonderzoek in combinatie met calibratie van gemeten en berekende stroomsnelheden in de intergetijdegebieden. Aangezien er nu onvoldoende gedetailleerde laboratorium- en veldgegevens beschikbaar zijn (ook niet in de literatuur), vereist deze aanpak wel een relatief grote veldmeetinspanning in een aantal karakteristieke deelgebieden van de Westerschelde.

Met betrekking tot de gebruikte methode om de beddingvormen in de Westerschelde af te schatten, kan het volgende worden opgemerkt:

- het opstellen van een geomorfologische kaart met kenmerkende beddingvormen per deelgebied en bijbehorende bodemruwheden is een goede methode om meer greep te krijgen op de stromingsweerstand; voor nauwkeurige bepaling van de beddingvormen volgens deze methode is het noodzakelijk om over gedetailleerde informatie van de afmetingen en specifieke vorm van de beddingvormen in elk deelgebied te beschikken;
- de gebruikte classificatie van de grotere beddingvormen zoals mega-ribbels en duinen (blz. 8 van rapport November 2000) is afkomstig van rivieren en kan niet zonder meer worden gebruikt voor estuaria met getijstroming; de hoogte en lengte de mega-ribbels en duinen in de intergetijdegebieden zullen kleiner zijn dan die in rivieren door het oscillerende karakter van de getijstroming (groei naar evenwicht kan onvoldoende optreden); ook de vorm van de mega-ribbels in estuaria zal sterk afwijkend zijn van de min of meer driehoekige en asymmetrische vorm van mega-ribbels in rivieren.

Met betrekking tot de gebruikte methode om de bodemruwheid in het SCALDIS-model weer te geven worden de conclusies van de eerdere rapporten uit 1999, 2000 en 2002 onderschreven:

- de toepassing van C-waarden of n-waarden in het SCALWEST-model is niet geschikt voor het nauwkeurig weergeven van de bodemruwheid in de ondiepe intergetijdegebieden; de bodemruwheid moet worden opgegeven door middel van k_s -waarden (Nikuradse-waarden; $C=5.75g^{0.5}\log(12h/k_s)$), zoals aanbevolen in de eerdere studies (zie rapporten 1999, 2000 en 2002);
- het fijnmazige systeem van toevoergeultjes en overstromingsplaten in de intergetijdegebieden zal op realistische wijze moeten worden geschematiseerd (voldoende klein rekenrooster), zoals aanbevolen in de eerdere studies (zie rapporten 1999, 2000 en 2002).

Aanbevelingen

De toepassing van een geomorfologische kaart biedt voldoende mogelijkheden om de lokale beddingvormen en bijbehorende bodemruwheden af te schatten. Deze aanpak kan nog verder worden verfijnd op basis van veldmetingen (luchtfoto's, visuele inspecties, enz.; stroomsnelheidsmetingen). Daarbij moet vooral aandacht worden besteed aan de vorm en afmetingen van de grotere beddingvormen in de hoog-dynamische gebieden.

In de intergetijde-gebieden kunnen globaal de volgende type beddingvormen worden onderscheiden:

1. vlak bed in slibrijke laag-dynamische gebieden;
2. kleine mini-ribbels in zandige laag-dynamische gebieden;
3. grote mega-ribbels in zandige hoog-dynamische gebieden,
 - a) symmetrisch,
 - b) asymmetrisch.

De bodemruwheid van elk type kan worden vastgesteld door het meten en analyseren van stroomsnelheidsvertikalen rondom de periode van maximum stroom in een aantal proefgebieden.

In de hoog-dynamische gebieden met grote mega-zandribbels moeten er snelheidsvertikalen (met een vaste drie-poot opstelling) op verschillende lokaties langs de beddingvorm worden gemeten, zodat het wel of niet optreden van stroomloslating kan worden bepaald. Het vormeffect op de bodemruwheid kan worden weergegeven door middel van een vormfunctie.

De bodemruwheid in de laag-dynamische gebieden kan verder worden afgeregeld op basis van gemeten diepte-gemiddelde stroomsnelheden op diverse locaties.

In een latere fase kan op basis van een voldoende groot databestand van waarnemingen ook worden getracht om een ruwheidsvoorspeller te maken waarbij de k_s -waarde wordt weergegeven als functie van waterdiepte, korreldiameter en stroomsnelheid (zie 2.3). De afmetingen en vorm van de beddingvormen worden dan niet meer expliciet meegenomen. Dit vereist eveneens een relatief grote meetinspanning in een aantal karakteristieke hoofdgeulen en intergetijdegebieden.

5 Referenties

Brownlie, W.R., 1981. Flow depth in sand-bed channels. Technical Memo 81-3, W.H. Keck laboratory, California Institute of Pasadena, USA

Engelund, F. and Hansen, E., 1967. A monograph on sediment transport. Technisk Forlag, Copenhagen, Denmark

Nikuradse, J., 1932. Gesetzmässigkeiten der Turbulente Strömung in Glatten Rohren. Ver. Deut. Ing. Forschungsheft 356

Vanoni, V and Hwang, L., 1967. Relation between bed forms and friction in streams. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY3

Van Rijn, L.C. van, 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, The Netherlands

Van Rijn, L.C. and Walstra, D.J.R., 2003. Modelling of sand transport in DELFT3D. Report Z3624, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands

White, w., Paris, E. and Bettess, R., 1979. A new general method for predicting the frictional characteristics of alluvial streams. H.R.S. Wallingford, Report No. It 187, UK

Wilbers, A., 2004. The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes. Doctoral Thesis, Department of Physical Geography, University of Utrecht, Utrecht, The Netherlands