Aanslibgedrag vaargeul Amsterdam-Lelystad

Boderie, van der Wal, van Kessel en Genseberger

1202714-000

© Deltares, 2010

Titel Aanslibgedrag vaargeul Amsterdam-Lelystad

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat	1202714-000	1202714-000-ZWS-0006	79

Trefwoorden

vaargeul, slib, baggerbezwaar, model, lodingen, omputten.

Samenvatting

Voor het op diepte houden van de vaarweg Amsterdam-Lelystad vinden onderhoudsbaggerwerkzaamheden plaats. RWS-IJG wil graag kennis hebben over de aanslibbing van de diverse trajecten van de vaargeul. Naast kennis over de huidige situatie is ook kennis over de situatie in de nabije toekomst gewenst met veranderende slibgehaltes in het Markermeer als gevolg van diverse maatregelen.

Deltares heeft het slibmodel van het Markermeer aangepast voor het berekenen van natuurlijke aanslibbing in de geul. Het model is daartoe lokaal verfijnd en voorzien van een extra slibfractie. Resultaten van het model zijn vergeleken met lodinggegevens van de afgelopen 10 jaar. Op basis van de lodingen, modelberekeningen met het slibmodel en expertkennis blijkt dat de netto aanslibbing toeneemt met toenemende waterdiepte: van 5-10 cm/jaar op 6 m diepte tot 25-50 cm/jaar op 10 m diepte. De maximale opvulsnelheid bedraagt 1,5 tot 2,0 m/jaar in putten dieper dan 10 m. Naast aanslibbing vanuit de waterkolom dragen hieraan ook bij: dichtheidsstroming, zettingsvloeiing en afkalven van het talud van de put. Consolidatie treedt op na het opvullen van een put. Tussen 2 en 5 jaar na de storting is een meter bodemdaling gemeten. In de nog niet gebaggerde delen van de geul treedt er erosie van enkele centimeters per jaar op door scheepsgeïnduceerde waterbeweging.

De onderzochte verdieping (zandwinput IJburg) in de vaargeul slibt even snel dicht als de onderzochte putten buiten de vaargeul (maximaal met 2 m/jaar). De verdieping in de vaargeul slibt minder ver vol (tot circa -10 m NAP) dan een put buiten de vaargeul (tot circa -6 m NAP). Dit wordt veroorzaakt door de stroming die de geul aantrekt. Hierdoor kan ongeconsolideerd materiaal tot grotere diepte worden geërodeerd.

De natuurlijke aanslibbing blijkt gevoelig voor de jaarlijkse variatie in de meteorologie. Met name dragen meer stormen bij aan een grotere aanslibbing in de vaargeul, tot 50% in diepe delen. Aanslibbing door het jaar heen is een min of meer continu proces dat niet sprongsgewijs optreedt als gevolg van een storm. Toekomstige maatregelen in het Markermeer (de NMIJ varianten) leiden tot een iets verlaagde aanslibbing in de vaargeul. Het effect is echter vrij klein.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0	dec. 2010	ir. P.M.A. Boderie		dr. ir. E. Mosselman	l	dr.ir. A.G. Segeren	
		ir. M. van der Wal					
		dr. ir. T. van Kessel					
		dr. M. Genseberger					
Status							

definitief



Inhoud

Achtergrond Doel en vraagstelling Aanpak en leeswijzer schrijving onderzoeksmiddelen	1 2 3							
 Doel en vraagstelling Aanpak en leeswijzer schrijving onderzoeksmiddelen 	2 3							
Aanpak en leeswijzer schrijving onderzoeksmiddelen	1.2Doel en vraagstelling21.3Aanpak en leeswijzer3							
schrijving onderzoeksmiddelen								
Acagonatalibmadal	5							
Aangepast silbihodel	5							
2.1.1 Aanpassingen modelrooster hydrodynamica	5							
2.1.2 Aanpassingen slibmodel	7							
2.1.3 Simulaties	7							
2.1.4 Wind	8							
Lodinggegevens	10							
2.2.1 Meetmethode lodingen	12							
2.2.2 Presentatie van de lodinggegevens	13							
alyse slib in het Markermeer	15							
Stromingspatroon in relatie tot windrichting	15							
Bodem, sediment en slibdynamiek	16							
Zwevende stof in relatie met wind	19							
alyse slib in de vaargeul Amsterdam-Lelystad	23							
Stromingspatroon in de geul	23							
Invloed van scheepvaart op de vaargeul	25							
Indeling vaargeul in trajecten	31							
Aanslibbing in verschillende trajecten in de vaargeul	32							
Aanslibbing als functie van de diepte	37							
38								
Gevoeligheid model voor meteorologie	39							
Gevolg van inrichtingsmaatregelen op aanslibbing	40							
alyse slib in (zandwin)putten	43							
Consolidatie	43							
Zettingsvloeiing	43							
Dichtheidsströming	44							
Analyse data proetputten Markermeer	46							
Analyse diepe zandwinput in de VAL	51							
Model aanslibbingseffect diepe putten	52							
nclusies en aanbevelingen	55							
ferenties	59							
pendix(n)								
	schrijving onderzoeksmiddelen Aangepast slibmodel 2.1.1 Aanpassingen modelrooster hydrodynamica 2.1.2 Aanpassingen slibmodel 2.1.3 Simulaties 2.1.4 Wind Lodinggegevens 2.2.1 2.2.1 Meetmethode lodingen 2.2.2 Presentatie van de lodinggegevens alyse slib in het Markermeer Stromingspatroon in relatie tot windrichting Bodem, sediment en slibdynamiek Zwevende stof in relatie met wind alyse slib in de vaargeul Amsterdam-Lelystad Stromingspatroon in de geul Indeling vaargeul in trajecten Aanslibbing in verschillende trajecten in de vaargeul Indeling vaargeul in trajecten Aanslibbing als functie van de diepte 38 Gevoeligheid model voor meteorologie Gevolg van inrichtingsmaatregelen op aanslibbing alyse slib in (zandwin)putten Consolidatie Zettingsvloeiing Dichtheidsstroming Analyse data proefputten Markermeer Analyse diepe zandwinput in de VAL Model aanslibbingseffect diepe putten nclusies en aanbevelingen							

Δ	Annendix — Voorbeeld henaling van de dikte van de zachte sliblaag	Δ_1
А	Appendix – voorbeeld bepaling van de dikte van de zachte Sibiaag	A-1



В	3 Appendix B – Verschilkaarten op basis van lodinggegevens 2001 – 2010			
С	Appendix - aanpassing van het slibmodel	C-1		
	C.1 Verificatie rooster aanpassingen	C-1		
	C.2 Resultaat slibmodel	C-1		

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Op het traject van Oost- naar Noord-Nederland heeft de vaargeul Amsterdam-Lemmer niet overval voldoende diepgang om een vrije doorgang van klasse Vb beroepsvaart te garanderen. In de periode 1997-2010 is de geul door baggeren op diepte gebracht.

De achtergrond van de vraag is gelegen in het instandhoudingsplan voor de vaargeul waarin kosten van het te baggeren slib een belangrijke rol spelen. Vanuit het perspectief van beheer en de onderhoudskosten speelt bijvoorbeeld de vraag hoe groot de natuurlijke aanslibbing is en of het niet opvullen van de diepe zandwinputten de aanslibbing in de nabijgelegen vaargeul vermindert

De vaargeul Amsterdam-Lemmer voert voor een deel door het zuidelijk deel van het Markermeer. Dit rapport analyseert het traject Amsterdam tot Lelystad (VAL¹). Voor het op diepte houden van de vaargeul vinden onderhoudsbaggerwerkzaamheden plaats. Bij deze werkzaamheden wordt grond uit de geul gebaggerd tot de gewenste vaardiepte (circa -6 m NAP). De vrijkomende grond moet veelal gestort worden en dat is kostbaar en stuit bovendien vaak op bezwaren vanuit de omgeving (o.a. door Stichting Antislib Platform Gooimeer). Omdat in het zuidelijk deel van het Markermeer ook bruikbaar zand te winnen is, onderzoekt RWS-IJG de mogelijkheden om vaargeulonderhoud te combineren met zandwinning². In dat proces wordt de verwijderde grond uit de geul (het baggerbezwaar) nadat ook het zand is gewonnen (ontzanding tot een diepte van -20 of -30 m NAP) teruggestort. Voordeel is dat er geen milieubezwaar is (de grond lag er immers al) en een win-winsituatie ontstaat omdat er vermarktbaar zand gewonnen wordt. Logistiek vindt dit proces volgens het "omput"-principe plaats (dat wil zeggen er wordt in 3 putten tegelijkertijd gewerkt, in een wordt grond verwijderd, in een wordt zand gewonnen en in de derde put is al zand gewonnen zodat er grond gestort kan worden). Putten waarin grond gestort is worden door consolidatie van het gestorte materiaal dieper. Tegelijkertijd verondiepen putten door natuurlijke aanslibbing.

Onderhoud van de vaargeul en zandwinning vinden gecombineerd plaats. Bij de werkzaamheden wordt grond uit de geul gebaggerd tot de gewenste vaardiepte (circa -6 m NAP). De vrijkomende grond (het baggerbezwaar) wordt nadat het zand is gewonnen (ontzanding tot een diepte van -20 of -30 m NAP) teruggestort. Logistiek vindt dit proces volgens het "omput" principe plaats (dat wil zeggen er wordt in 3 putten tegelijkertijd gewerkt, in een wordt grond verwijderd, in een wordt zand gewonnen en in de derde put is al zand gewonnen zodat er grond gestort kan worden). Dit proces is schematisch weergegeven in Figuur 1. Putten waarin grond gestort is worden door consolidatie van het gestorte materiaal dieper, tegelijkertijd verondiepen putten door natuurlijke aanslibbing. Aan het eind van het omputproces moet de laatste put worden gevuld.

¹ In dit rapport wordt de afkorting VAL gebruikt om de vaargeul Amsterdam-Lelystad van de vaarweg Amsterdam-Lemmer aan te geven

² De realisatie van de verbetering van de vaarweg Amsterdam-Lemmer is gekoppeld aan zandwinconcessies waarbij winning geschiedt als zand benodigd is door de concessiehouder. Door gewijzigde zandbehoefte treedt vertraging op (Provincie Flevoland, 2010).

	1	2	3	4	5
	nog te ontgraven	zandwinning	ontgraven, grond verwijderen	storten	klaar op diepte
0-6					
6-12					
12-18	1				
18-24					

Figuur 1 Omputprincipe schematisch (dieptes en verhoudingen ongestoord/gestort niet op schaal). Werkrichting van links naar rechts: Er wordt in 3 putten tegelijkertijd gewerkt (kolom 1-3): in een wordt grond verwijderd, in een wordt zand gewonnen en in de derde put is al zand gewonnen zodat er grond gestort kan worden. Putten waarin grond gestort is worden door consolidatie van het gestorte materiaal dieper, tegelijkertijd verondiepen putten door natuurlijke aanslibbing.

Een typische opbouw in een zandwinput is als volgt. Van -30 tot -25 m NAP geroerd zand ("mors") daarop tot -24 m NAP zogenaamde "overflow" (zwevende stof <80 µm dat bij zandwinning "over de rand van de bak stroomt") afgevuld met grond tot -8 m. Het verschil tussen een hoeveelheid in profiel gemeten (ongeroerde) grond en dezelfde grond na ontgraving (geroerde grond) is de "uitlevering" (factor 1,35).

Volgens de ontgrondingsvergunning mag een put na zandwinning niet "open" blijven liggen maar moet deze tot -10 m (marge -8 tot -12 m NAP) worden afgevuld. De motivatie is mede gebaseerd op waterkwaliteit en ecologie (thermische stratificatie en zuurstofloosheid).

Aan het eind van het omputproces moet de laatste put worden gevuld. Maar als natuurlijke opvulling binnen afzienbare tijd (orde 10 jaar) significant bijdraagt aan het opvullen van de put is dat vergunningtechnisch aantrekkelijker dan opvullen (de bestaande vergunning kan vrij eenvoudig in tijd worden opgerekt). RWS-IJG wil graag kennis hebben over de (natuurlijke) aanslibbing van de diverse trajecten van de vaargeul, inclusief putten die nog niet zijn opgevuld.

1.2 Doel en vraagstelling

RWS-IJG wil in de vaargeul Amsterdam-Lelystad het baggerbezwaar en de opvulsnelheid van diepe zandwinputten kennen, voor de huidige situatie en ook in de nabije (10 jaar) toekomst bij veranderende slibgehaltes in het Markermeer.

De onderzoeksvragen zijn:

- wat is de aanslibsnelheid in de vaargeul, ruimtelijk gedifferentieerd in de langsrichting van de geul, waarbij onderscheid gemaakt dient te worden tussen de verschillende delen van de vaargeul, te weten:
 - (a) de vaargeul waar onderhoud gepland is (4 m).
 - (b) de vaargeul die nu op diepte is (gemiddelde diepte circa 6 m).
 - (c) diepe putten in de vaargeul die zijn opgevuld en
 - (c) de nog niet opgevulde zandwinputten.
- hoe beïnvloeden bestaande diepe zandwinputten het gedrag van aanslibbing in de directe omgeving (lees de vaargeul die nu op diepte is). Concreet is de vraag of het niet opvullen tot minder aanslibbing in de nabijgelegen vaargeul leidt.

- 3. wat is het effect van toekomstige maatregelen in het Markermeer (de NMIJ varianten) op de ruimtelijke aanslibbing in de vaargeul.
- 4. in hoeverre is het slibmodel (van Kessel e.a., 2009) geschikt, of verder geschikt te maken, voor het beantwoorden van bovenstaande vragen.

1.3 Aanpak en leeswijzer

Typisch volgt de beantwoording van de vragen uit een combinatie van lodinggegevens en berekeningen met het slibmodel, aangevuld met overige (veld)gegevens, materiedeskundigheid en ervaring. Deze aanpak biedt voldoende mogelijkheid om kritisch om te gaan met onzekerheden in kennis, modeluitkomsten en meetgegevens. Hoofdstuk 2 beschrijft de onderzoeksmiddelen.

In hoofdstuk 3 wordt de slibproblematiek van het Markermeer geschetst om dit onderzoek in perspectief te plaatsen. De analyse van de door RWS geleverde lodinggegevens van de vaargeul is te vinden in hoofdstuk 4. Tegelijkertijd met de data-analyse zijn de nodig geachte aanpassingen in het slibmodel aangebracht (hoofdstuk 2.1) en zijn met dit aangepaste model berekeningen uitgevoerd die integraal met de data-analyse in hoofdstuk 4 worden beschreven. Uit een inventarisatie van rapporten die specifiek gaan over de vaargeul en het zuidelijk deel van het Markermeer waar de vaargeul doorheen loopt, kwam een bruikbare gegevensset van proefputten (van den Brenk, 2002) naar voren. Deze gegevensset is geanalyseerd en vergeleken met meetgegevens over verdiepingen in de vaargeul. De resultaten worden in hoofdstuk 5 besproken. In hoofdstuk 6 worden conclusies uit de verschillende informatiebronnen getrokken en ontstaat een totaalbeeld van de processen in de vaargeul inclusief mechanismen als consolidatie en scheepvaart.

2 Beschrijving onderzoeksmiddelen

In deze studie is gebruik gemaakt van de volgende onderzoeksmiddelen: eerdere studies vastgelegd in rapportages, expertkennis, het aangepaste slibmodel en lodinggegevens van de vaargeul vanaf 2000. Deze laatste twee worden in dit hoofdstuk beschreven.

2.1 Aangepast slibmodel

Het huidige slibmodel (van Kessel e.a., 2009) is goed bevonden om voor korte tijdschalen (enkele jaren) de dynamiek van slib in de waterkolom te beschrijven. Minder goed bekend is hoe het model presteert in de waterbodem. Dit model voor het Markermeer-IJmeer is ook toegepast voor onderzoek van de buitendijkse ontwikkeling van Almere (Genseberger e.a., 2009) en de Toekomstagenda Markermeer-IJmeer (Vijverberg en Boderie, 2008) en Genseberger en Boderie, 2009).

Voor aanvang van de studie was de verwachting dat het huidige model zo'n 10 cm/jaar aanslibbing laat zien terwijl in de vaargeul grotere aanslibbing plaatsvindt. Met een derde (grovere) slibfractie wordt beoogd de geobserveerde aanslibbing ook in het model te reproduceren zonder daarbij de kalibratie van zwevende stof in de waterkolom te veel te verstoren. Op voorhand was ook de verwachting dat de ruimtelijke resolutie van het model in de omgeving van de vaargeul ontoereikend is om een adequate beschrijving en vergelijking met meetgegevens uit de vaargeul te maken. Daarom is het modelrooster verfijnd. Paragrafen 2.1.1 en 2.1.2 beschrijven deze aanpassingen.

Bij de modelberekeningen met het slibmodel worden achtereenvolgens drie stappen doorlopen:

1. Delft3D-FLOW software voor het simuleren van de waterstroming,

2. MATLAB rekenscripts gebaseerd op een strijklengte-benadering voor het berekenen van golfeffecten op de bodemschuifspanning en

3. Delft3D-WAQ software voor het samenvoegen van bodemschuifspanningen als gevolg van stroming en golven en het hiermee berekenen van (re)suspensie van slib en het simuleren van slibtransport en afgeleide grootheden als doorzicht.

Voor de 2^e stap is een kleine aanpassing in de oorspronkelijke rekenscripts aangebracht om ook een samenstelling van roosters ten gevolge van domeindecompositie (zie 2.1.1) aan te kunnen. Deze aanpassingen worden hier niet beschreven.

2.1.1 Aanpassingen modelrooster hydrodynamica

Deze paraaf beschrijft kort het hydrodynamische model dat gebruikt is voor het simuleren van slibtransport in de vaargeul van Amsterdam naar Lelystad. Het oorspronkelijke modelrooster in de buurt van de vaargeul is te grof (250 m x 250 m). Verfijning is nodig om de lokale bathymetrieveranderingen in de vaargeul en inliggende putten zo goed mogelijk te volgen. Ook liepen de roosterlijnen in het oorspronkelijke model niet parallel aan de vaargeul. Het rooster voor deze studie is lokaal verfijnd door middel van domeindecompositie.

Bij de aanpassing van het rooster is het volgende overwogen.

- de dwarsrichting van de vaargeul stelt de grootste eisen aan het rooster. Het is praktisch ondoenlijk om nog iets van het talud te schematiseren. Immers, bij een verondersteld talud van 1:5 en een diepteverschil tussen vaargeul en omgeving van 2 tot maximaal 5 m is de breedte van het te schematiseren talud slechts 10 tot 25 m;
- tegelijkertijd met een verfijning in de breedte moet, om de lengte-breedte verhouding van het rooster geen geweld aan te doen, moeten de roostercelgrootte in de langsrichting van de geul ook worden verkleind. Dat kan niet ongestraft over de hele vaargeul in verband met de rekentijd (aantal cellen neemt toe en mogelijk moet de tijdstapgrootte ook kleiner worden).

Rooster en bodemligging

In het hydrodynamische model zijn voor dit project eerst de volgende aanpassingen aangebracht:

- 1. het rooster is uitgelijnd zodat deze de vaargeul volgt in verband met lokale resolutie,
- 2. een paar dunne dammen bij Amsterdam, Muiderzand en Lelystad zijn aangepast aan de toestand anno 2010,
- 3. het rooster rondom de vaargeul is verfijnd door middel van domeindecompositie -zie de volgende paragraaf- en
- 4. de bodemligging voor bodemligging gebruikt. Dat is onjuist en zou ik in de rapportage vermijden. De roosterpunten zijn gemaakt aan de hand van 5 x 5 m² diepte bemonsteringen uit 2006 (RWS, 2010) voor lokale diepte bij vaargeul).

Domeindecompositie

Door middel van domeindecompositie is het oorspronkelijke rooster (met rekencellen van 250 m x 250 m) lokaal verfijnd in een subrooster (met rekencellen van 50 m x 40 m) met een factor 5 evenwijdig aan de vaargeul en een factor 7 dwars erop. De randen van het subdomein behorend bij dit subrooster zijn ver genoeg van de vaargeul gelegd zodat lokale effecten als gevolg van domeindecompositie geen invloed hebben op de resultaten van de simulatie in het interesse gebied. Ook moest de lokale diepte van de IJmeerputten die op een domeindecompositierand ligt enigszins aangepast worden.

Om de rekenlast voor dit model te verdelen over 8 cores van een rekennode³ en zo de rekentijd voor een simulatie periode van een jaar te reduceren tot 12 dagen, is het subdomein verder opgedeeld in 6 subdomeinen (zie Figuur 2).

Als gevolg van de lokale roosterverfijning moest ook de tijdsintegratie van Delft3D-FLOW verlaagd worden tot 1 minuut. Geverifieerd is dat het halveren van deze tijdstap tot 30 seconden geen andere simulatie resultaten geeft (zie Appendix C).

³ 2 AMD quad-core Opteron node, 2.3 Ghz per core



Figuur 2 Rekenrooster voor waterstroming en golven. De 6 subdomeinen met fijn rooster (rekencellen van 50 m x 40 m) bij de vaargeul zijn aangegeven met paarse en roze tinten.

2.1.2 Aanpassingen slibmodel

Het slibmodel is grotendeels ongewijzigd toegepast voor het nieuwe, verfijnde rooster en bijbehorende hydrodynamica. Twee elementen zijn wel gewijzigd:

- Er is een derde fractie slib toegevoegd met een hoge valsnelheid (20 m/dag = 0,23 mm/s). Deze fractie heeft tijdens rustig weer een verwaarloosbare bijdrage aan de slibconcentratie nabij het oppervlak, maar verhoogt tijdens stormachtig weer de depositieflux bij de bodem wezenlijk. De hoeveelheid sediment van deze derde fractie is gelijk gekozen aan die van de fijnste fractie en bedraagt 1/3 van middelste fractie.
- 2. In de berekende kaarten van netto depositie en erosie is de invloed van de toegepaste ruimtelijk afhankelijke bodemruwheid (op basis van schelpenkaarten) zichtbaar (van Kessel e.a., 2009). Dit maakt het effect van de vaargeul op de netto depositie soms wat moeilijker zichtbaar. Er zijn daarom ook berekeningen uitgevoerd met een uniforme bodemruwheid ten behoeve van een duidelijker kaartbeeld. De verschillende typen berekeningen leiden overigens niet tot verschillende conclusies. Na deze verificatie gebruiken we voor de resultaten in deze studie de kaartbeelden op basis van uniforme bodemruwheid.

Ter verificatie is hier het resultaat van het uitgebreide slibmodel met drie fracties vergeleken met de resultaten van het oorspronkelijke model met twee fracties (zie appendix C). De nieuwe resultaten zijn gebaseerd op het nieuwe, verfijnde rooster en zijn inclusief de derde fractie. De resultaten (piekconcentraties, ruimtelijke patronen) zijn sterk vergelijkbaar met het oorspronkelijke model. Er mag worden verwacht dat lokale details in en rondom de vaargeul met het verfijnde model beter worden beschreven.

2.1.3 Simulaties

In deze studie zijn vier simulaties met het aangepaste slibmodel gemaakt ter ondersteuning bij het beantwoorden van de onderzoeksvragen. Tabel 1 geeft een overzicht van deze simulaties.

Als basis van de berekeningen dient het jaar 2006 waarvoor het model destijds gevalideerd is. De resultaten van de drie andere simulaties worden met dit basisjaar vergeleken. De drie scenario's dienen om het volgende te onderzoeken:

- 1. Wat het effect is van een periode met andere windcondities op de aanslibbing in de VAL (s03);
- 2. Wat het effect is op aanslibbing wanneer bestaande diepe zandwinputten worden opgevuld (s04);
- 3. Wat het effect is op aanslibbing voor een toekomstige situatie waarin grootschalige inrichtingsmaatregelen in het Markermeer hebben plaatsgevonden. We hebben gekozen voor een drietal maatregelen, te weten de aanleg van een grootschalige land-waterovergang bij Lelystad tegen de Houtribdijk aan (het zogenaamde oermoeras), een grote diepe haltervormige put in het midden van het meer en een reeks eilanden die de Hoornse Hop luw maken (s05).

	s02	s03	s04	s05
doel	basis	variatie over de jaren	effect opvullen putten	effect inrichtings- maatregelen
simulatieperiode	2006, jaarsom (12 maanden)	2007-2008, kalibratieperiode (13 maanden)	2006, 2 maanden	2006, 2 maanden
Bodemtopografie	2006	2006	2006 diepe putten opgevuld	2006 met halterput
maatregelen	geen	geen	geen	oermoeras, halterput en eilanden Hoornse Hop

Tabel 1 Overzicht van de modelberekeningen.

2.1.4 Wind

Het hydrodynamische model en het slibmodel worden aangedreven door een in de tijd variabele wind. Voor de simulatie over kalenderjaar 2006 (het validatiejaar uit van Kessel e.a., 2009) en over de periode augustus 2007 – augustus 2008 (de kalibratieperiode uit van Kessel e.a., 2009) zijn uurgemiddelde waarden voor snelheid en richting van het KNMI-station Berkhout gebruikt. De in 2006 opgetreden wind wordt representatief geacht voor het langjarige windklimaat in het Markermeer. In Figuur 3 is bijvoorbeeld te zien dat het aantal keren per jaar dat een karakteristiek gekozen wind (windsnelheid daggemiddeld groter dan 8,7 m.s⁻¹) in 2006 12 keer optreedt hetgeen gelijk is aan het gemiddelde voor de periode 2000-2009 (de periode waarop de lodinggegevens betrekking hebben). In de jaren 2007 en 2008 is de frequentie van deze winden hoger (respectievelijk 18 en 16 keer per jaar). In de periode augustus 2007 – augustus 2008 is het aantal 21 wat overeenkomt met een frequentie van meer dan 19 keer per jaar.



Figuur 3 Aantal keren per jaar dat daggemiddelde windsnelheid groter is dan 8,7 m.s⁻¹ in de periode 2000-2009.

Daarnaast is er een scenario gedraaid met per dag een vaste windrichting voor een vaste windkracht van 8 Bft - 20 m/s (stormachtig). Bij de overgang naar de volgende dag verspringt deze wind 45 graden naar de volgende vaste windrichting. Voor dit scenario is de windsterkte eerst van 0 m/s naar 20 m/s opgevoerd over een inspeelperiode van 8 dagen met een constant draaiende windrichting.

2.2 Lodinggegevens

Het deel van de vaarroute Amsterdam-Lemmer dat in deze studie wordt onderzocht loopt van Amsterdam naar Lelystad. Dit traject heeft een bijbehorende kilometrering van de as van de vaargeul van 0 km tot 34 km bij Lelystad, zie Figuur 4. In deze studie is gebruik gemaakt van de bodemligging van de vaargeul, of gedeelten daarvan, voor de volgende jaren: 2001, 2002, 2003, 2006, 2008, 2009 en 2010.



Figuur 4 Kilometrering van de vaarweg Amsterdam-Lelystad.

Voor de beschikbare jaren 2001, 2002, 2003, 2006, 2009 en 2010 zijn de lodinggegevens dekkend voor de vaargeul van 0 tot 34 km (VAL 0-34km). Voor 2008 zijn alleen voor een deel van de vaargeul gegevens beschikbaar van kilometer 19 tot 21 zie Figuur 43).

In Tabel 2 is voor elke loding de begin- en einddatum van de meting aangegeven en het aantal dagen dat de meetperiode in beslag nam.

			duur	representatieve
jaar	eerste	laatste	dagen	datum
2001	05-06-200	17-02-200	2 257	10-2001
2002	02-08-200	30-08-200	2 28	08-2002
2003	3 20-06-200	09-07-200	3 19	06-2003
2006	6 21-11-200	07-02-200	7 78	12-2006
2008	3 11-08-200	11-08-200	81	08-2008
2009	08-04-200	9 08-05-200	9 30	04-2009
2010	12-03-201	0 21-05-201	0 70	04-2010

Tabel 2 Jaar, datum eerste en laatste loding en duur van de lodingen.

Voor de analyse van de lodingen worden in deze studie verschilkaarten of verschilgrafieken gemaakt, bijvoorbeeld om de aanslibsnelheden te bepalen. In eerste instantie zijn voor de jaren waarin dekkende gegevens beschikbaar zijn, verschilkaarten voor de opeenvolgende vijf perioden tussen twee lodingen in gemaakt: 2001-2002, 2002-2003, 2003-2006, 2006-2009 en 2009-2010. Omdat ook verschillen tussen andere periodes (bijvoorbeeld 2003 tot 2010) worden geanalyseerd is in *Tabel 3* aangegeven hoeveel tijd (dagen) tussen twee lodingen zit. Deze gegevens worden gebruikt bij het bepalen van de aanslibsnelheid tussen twee lodingen.

Tabel 3 Tijd (in dagen) tussen twee lodingen van verschillende jaren.

	2001	2002	2003	2006	2008	2009	2010
2001	-	-	-	-	-	-	-
2002	309	-	-	-	-	-	-
2003	626	318	-	-	-	-	-
2006	1906	1597	1280	-	-	-	-
2008	2496	2188	1870	591	-	-	-
2009	2751	2442	2125	845	255	-	-
2010	3109	2800	2483	1203	613	358	-

2.2.1 Meetmethode lodingen

De bodemligging van de vaargeul Amsterdam-Lelystad is in de periode 1990 tot 2010 met verschillende meetinstrumenten gemeten, te weten een singlebeamecholood, een GeoSwath en een multibeam echolood, zie *Tabel 4*. De oudere opnames van de bodemligging zijn met een singlebeam echolood gemaakt, bijvoorbeeld de Deso met een frequentie van 210 kHz.

Instantie	Bemonsteringsmethode	Frequentie	Celgrootte	Jaren
RDIJWSM	echolood/RTK-DGPS		200	2001
	Lodingssysteem QINSY -			
RDIJWSM	50SB(Bomasweep)/RTK/DGPS	single beam	200	2002, 2003
	Lodingssysteem QINSy - Reson	455kHz, multi		2006 en delen van 2002
RDIJWSM	8125/DGPS	beam	100	en 2003
	Lodingssysteem QINSy - Reson	240kHz, multi		
STEMA	8101/LRK	beam	100	2008
	Lodingssysteem QINSy -			
RDIJWSM	Interferrometer/LRK		100	2009
	Lodingssysteem QINSy -			
RDIJWSM	Interferrometer/NETPOS		100	2010

Tabel 4 Overzicht van de beschikbare lodingen van de VAL.

De nauwkeurigheid van een loding van de bodemligging wordt in sterke mate bepaald wordt door de nauwkeurigheid van de positie van het meetvaartuig en de hoek waaronder de apparatuur functioneert. Dit soort foutenbronnen is onderkend en beschreven (bij voorbeeld in Schuitema en Van der Werf (2007), Anonymous (2007) en Kokke (2003).

Een single-beam-echolood meet de hoogste toppen in een gebied waartegen het signaal reflecteert. Een multibeam-echolood meet de gemiddelde bodemligging in een gebied waartegen het signaal reflecteert. De Reson 8125 is een multibeam-echolood. De BS50 (Bomasweep) is een singlebeam-echolood.

Voor het uitvoeren van een bodemopname door de Meetdienst van RWS- IJG worden de meetinstrumenten eerst afgesteld op een ijklocatie met een horizontale plaat waarvan de positie nauwkeurig bekend is. Daar meten een singlebeam-echolood en een multibeamecholood beide dezelfde bodemligging. Als vervolgens de bodemligging van een zandige bodem wordt gemeten dan is het verschil tussen de signalen van beide typen echoloden het verschil tussen de top en het gemiddelde van het gebied waartegen het signaal reflecteert. Op zandige taluds (bijvoorbeeld de zijtaluds van een vaarweg) kan daardoor een kleine verschuiving optreden tussen beide signalen. Bij een vrijwel vlakke, zandige bodem zijn deze verschillen te verwaarlozen. Echter bij een zachte slibrijke bodem worden door instrumenten met verschillende meetfrequenties verschillende bodemliggingen gemeten. Volgens experts⁴ kunnen die verschillen (tot enkele decimeters) niet met een eenduidige correctie worden gecompenseerd vanwege de spreiding en variatie in die verschillen. Als na een storm een meting wordt uitgevoerd dan zijn die verschillen groter dan aan het einde van een rustige periode, waarin de slibbodem zonder beroering de tijd heeft gehad om te verdichten. De experts bevelen aan bij de analyse van de bodemliggingen zovee mogelijk met die variatie rekening te houden.

⁴ Verschillende experts zoals de heren Wim Dijkman, Tycho Busnach en Andre Grul (RWS-IJG) en Ane Wiersma, Bas Blok en Marco Kleine (allen van Deltares) en zijn geraadpleegd

Een vuistregel voor het verschil in gemeten bodemligging is dat in een meer een multibeamecholood de bodemligging 0,15 m lager meet dan een standaard singlebeam-echolood. Deze regel is toegepast bij het opzetten van het Waqua IJsselmeer-Vecht-Delta-model (Deltares, 2010). De experts van de meetdienst IJG bevelen deze correctie echter niet aan.

In het Markermeer ter weerszijden van de vaarweg Amsterdam-Lelystad bestaat de bodem uit een zachte toplaag. De dikte van die toplaag neemt toe van Amsterdam (tot 0,1 m) naar Lelystad (0,3 tot 0,4 m), zie Vijverberg (2008) met verschillende meetfrequenties worden verschillende hoogteliggingen van een zachte bodem gemeten en dat is een indicatie voor de aanwezigheid van een sliblaag op de bodem (zie Appendix A). In geval van een zandige bodem resulteren signalen met verschillende meetfrequenties in dezelfde bodemligging. In aanwezigheid van een sliblaag dringt een signaal met een hoge frequentie minder ver de zachte bodem in dan een signaal met een lage frequentie. Het verschil is een ruwe indicatie voor de dikte van een sliblaag. Als voorbeeld wordt genoemd dat het verschil tussen een signaal met een frequentie van 210 kHz een indicatie is voor een slibdikte van 0,05 tot 0,10 m in het Markermeer, zie (Vijverberg, 2008). En een ander voorbeeld is een multibeam-echolood die bij een frequentie van 450 kHz de ligging van de bodem meet daar waar de dichtheid ongeveer gelijk aan 1,05 kg/m³ en een GeoSwat die bij een frequentie van 310 kHz de ligging van de bodem meet daar waar de dichtheid ongeveer gelijk aan 1,1 kg/m³.

In principe moet voor slibrijke bodems rekening worden gehouden met een systematisch verschil in bodemligging van 0 tot 0,15 m door de verschillende typen instrumenten en verschillende meetfrequenties. Experts raden het op voorhand toepassen van zo'n correctie echter af. Daarom is ervoor gekozen om in deze studie de lodingen uit diverse jaren zonder correctie met elkaar te vergelijken. Uit de analyse van de logische opeenvolging van aanslibbingen berekend uit verschillen van diverse jaren wordt een indicatie van de mogelijke systematische verschil afgeleid (zie hoofdstuk 4).

De beide deelgebieden nabij de Houtribsluizen zijn in 2001 en 2002 drie keer binnen een jaar nauwkeurig gemeten met het multichannelsysteem van PAM, zie van den Brenk (2002).

Ten behoeve van de omrekening van massa's naar dichtheden is geen informatie gevonden over de dichtheden van de toplaag op de bodem van het Markermeer.

2.2.2 Presentatie van de lodinggegevens

De lodinggegevens worden in deze studie op drie manieren gepresenteerd:

- verschilkaarten kleurkaarten van de hoogteverschillen tussen jaren
- langsprofielen bodemligging in de as van de vaargeul
- dwarsprofielen dwarsprofiel van de vaargeul op een bepaalde locatie in de geul

verschilkaarten

Verschilkaarten voor vijf perioden van 2000 tot 2010 staan gepresenteerd in Appendix B (Figuur 40 tot en met Figuur 45).

Alle kaarten zijn met dezelfde legenda afgebeeld waarin relatief kleine verschillen in bodemligging (±20 cm) niet zichtbaar zijn. Uit de kaarten is op die manier goed af te lezen waar en wanneer gewerkt is in de vaargeul. Rode gebieden geven sterke afgraving/ontgronding aan (toename van de bodemdiepte), terwijl groene gebieden grote afnames van de bodemdiepte (als gevolg van stortingen) aangeven.

Het doel van de verschilkaarten was om karakteristieke trajecten en tijdsperioden van een aantal stadia in het onderhoud en het proces van omputten in de VAL te vinden (zie ook 4.3).

langsprofielen

Het diepteprofiel in langsrichting (0-34 km) van de vaargeul voor verschillende jaren is voor verschillende jaren te vinden in Figuur 47 (jaren 2000., 2002 en 2003) en in Figuur 48 (jaren 2006, 2009 en 2010), beide in Appendix B. Tot 2003 laat het langsprofiel grote bodemdiepteveranderingen zien die het resultaat zijn van de zandwinningen en omput activiteiten van Almere en IJburg. Na 2006 zijn de veranderingen in de bodemligging veel kleiner.

dwarsprofielen

Op een aantal locaties in de vaargeul zijn dwarsprofielen gemaakt (zie Tabel 5). Een aantal karakteristieke langsprofielen is opgenomen in Figuur 49 in Appendix B3. De locatie van de dwarsprofielen is ook aangegeven in de langsprofielen.

no	m	no	km	no	km
1	356,00	9	8758,65	17	21910,41
2	1483,37	10	10383,60	18	21500,00
3	3159,53	11	12836,27	19	24699,23
4	4065,68	12	15201,05	20	27975,98
5	4600,00	13	17804,71	21	29647,09
6	5666,25	14	18642,21	22	31424,18
7	7412,07	15	20200,00	23	33002,87
8	8162,88	16	20628,11		

Tabel 5 Locatie (in meters) in de VAL waar dwarsprofielen zijn gegenereerd uit de lodinggegevens

3 Analyse slib in het Markermeer

Een groot deel van de bovenste bodemlaag van het Markermeer-IJmeer bestaat uit een laag slib. Het fijne materiaal wervelt rond in het meer en dat maakt het water troebel. Op een luchtfoto is goed te zien dat het Markermeer veel troebeler is dan het IJsselmeer.

Het slib in het Markermeer bestaat voor het grootste gedeelte uit anorganisch slib dat ontstaat door erosie van de kleiige oude Zuiderzeebodem. Dit slib verplaatst zich naar de diepere delen in het oosten en zuiden van het meer. Door de aanleg van de Houtribdijk is er praktisch geen afvoer van slib.

Door de extreme oppervlakte-diepteverhouding (groot en ondiep, de vorm lijkt daarmee op een pannenkoek) is wind de dominante factor die het gedrag van het slib bepaalt.

3.1 Stromingspatroon in relatie tot windrichting

Het stromingspatroon in het Markermeer wordt voornamelijk door de wind gedomineerd. Het water aan het oppervlak en vlak daaronder stroomt met de wind mee. Het water wordt opgestuwd tegen de oever aan de overzijde van het meer. De waterstand wordt aan die kant van het meer hoger; dit heet opwaaien. Doordat het Markermeer kan worden beschouwd als een gesloten systeem (er stroomt slechts weinig water in en uit), vindt een waterstandsdaling plaats aan de luwtezijde van het meer; dit heet afwaaien. Door opwaaien aan de ene kant en afwaaien aan de andere kant ontstaat een scheefstand van de waterspiegel over het meer (Figuur 5)



Figuur 5 Schematisch overzicht van opwaaien en afwaaien in een gesloten meer.

Door deze windgeïnduceerde scheefstand ontstaat een stroming aan de bodem van het Markermeer, tegen de windrichting in. Omdat er in het Markermeer diepere en ondiepere delen bestaan, is deze stroming niet overal even sterk. In de diepere delen van het meer is de stroming voornamelijk sterk aan de bodem en tegengesteld aan de windrichting. In de ondiepere delen is dit andersom: stroming aan het wateroppervlak en met de wind mee. In Figuur 6 en Figuur 7 zijn de resultaten van een modelstudie weergegeven waarin dit patroon bij zuidwestenwind duidelijk te zien is. Stroming aan het wateroppervlak (zwarte pijlen) is aan de noordkant van het meer (ondiep deel met de wind mee). Stroming aan de bodem (witte pijlen) is aan de zuidkant van het meer (dieper deel) en tegen de wind in. Hierdoor ontstaat een drie dimensionaal circulatiepatroon. Ook bij andere windrichtingen ontstaat een soortgelijk circulatiepatroon.



Figuur 6 Stroomsnelheid en –richting aan wateroppervlak (zwarte pijlen) en aan de bodem (witte pijlen) bij een constante zuidwestenwind (10 m/s).

Figuur 7 Stroomsnelheid en –richting aan wateroppervlak (zwarte pijlen) en aan de bodem (witte pijlen) bij een constante noordzuidwestenwind (10 m/s)

3.2 Bodem, sediment en slibdynamiek

Bodemkaart met sedimenttypen

In Figuur 8 is een kaart weergegeven van de sedimenttypen van de toplaag van het Markermeer en IJsselmeer. Aan de westelijke en zuidwestelijke kant van het Markermeer bestaat de toplaag voornamelijk uit klei (< 2 µm). In het centrale deel van het Markermeer ligt



Figuur 8 Bodemkaart met sedimenttype van de toplaag van de bodem (Royal Haskoning, 2006).

vooral leem (< 50 µm, fijn materiaal bestaande uit lutum, silt en fijn zand) aan het oppervlak. In het noordoosten van het meer is een zandig gebied aanwezig, nabij Enkhuizen en de Houtribdijk. Dit gebied sluit aan bij de afzettingen in het IJsselmeer.

Aanslibbing in het Markermeer

Met de constructie van de Houtribdijk is het Markermeer afgesloten van het IJsselmeer. Hierdoor is het sedimentatie- en erosiepatroon in het meer veranderd.

Op basis van Figuur 9 kan het Markermeer worden ingedeeld in twee delen. In het westen heeft een bodemverlaging plaatsgevonden, in het oosten een verhoging. Het westen van het meer kan worden gezien als erosiegebied, het oosten als sedimentatiegebied.

Gelet op de erosie- en sedimentatiepatronen in het Markermeer, kan in de huidige situatie het meer worden opgedeeld in twee delen. Het westen van het meer is een erosiegebied en het oosten een sedimentatiegebied. Het slibmodel bevestigt dit beeld, zie van Figuur 9. In deze figuur zijn modelresultaten te zien van de bodemveranderingen binnen een jaar. Gele gebieden geven aanslibbing weer (sedimentatie), blauwe gebieden erosie.



Figuur 9 Verschilkaart (links) van de bodemdiepte van het Markermeer tussen 2001 en 1990. ыаиw is verlaging, rood is verhoging van de bodem. (Witteveen + Bos, 2004). Bodemverandering (rechts) binnen een jaar volgens het slibmodel (Van Kessel e.a., 2009).

In 2008 is een meetcampagne uitgevoerd waarin de dikte van de slappe sliblaag is gemeten. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in Figuur 10. Hierin is duidelijk te zien dat de sliblaag aan de oostkant van het meer dikker is dan aan de westkant. Volgens een meetcampagne van Rijkswaterstaat in 2000 (Figuur 10) is het percentage slib in de bodem aan deze kant van het meer ook hoger (70 – 90 %) dan aan de westkant van het meer (10 – 30 %).



Figuur 10 Dikte van de sliblaag aan het bodemoppervlak bepaald met multibeam echolood (figuur links, Vijverberg, 2008) en percentage slib in de bodem van het meer (figuur rechts, Data van een meetcampagne van Rijkswaterstaat in 2000).

3.3 Zwevende stof in relatie met wind

De hoeveelheid slib in het water is afhankelijk van de windsnelheid en -richting. Hoe harder het waait, hoe meer slib in het water terechtkomt. Dit is weergegeven in Figuur 11. Hierin zijn de resultaten uitgezet van een meetreeks van de windsnelheid en de troebelheid van het water, in het midden van het Markermeer.



Figuur 11 Troebelheid van het water (y-as), uitgezet tegen de windsnelheid (x-as). Gemeten in het midden van het meer in de periode 4-12-2007 tot 18-12-2007. (Vijverberg, 2008).

Slib wordt opgewoeld van de bodem door golven en door stroming. Golven worden in het Markermeer opgewekt door de wind. De golfhoogte en -periode zijn afhankelijk van de windsnelheid, duur van de storm en afstand waarover de wind over het wateroppervlak blaast. Al bij geringe windsnelheden ontstaan krachtige golven, die snel invloed hebben op het bodemmateriaal.

Deltares



Figuur 12 Slibconcentratie aan het wateroppervlak op 10 mei 2006 bij een windsnelheid van 4,1 m/s NO Links: metingen met remote sensing, rechts: modelresultaten (Van Kessel e.a., 2009).



Figuur 13 Slibconcentratie aan het wateroppervlak op 17 april 2006 bij een windsnelheid van 7,3 m/s W Links: metingen met remote sensing, rechts: modelresultaten (Van Kessel e.a., 2009).



Figuur 14 Slibconcentratie aan het wateroppervlak op 14 april 2006 bij een windsnelheid van 9,7 m/s NW Links: metingen met Remote Sensing, rechts: Modelresultaten (Van Kessel e.a., 2009). De witte vlekken in de linker figuur worden veroorzaakt door wolken, waardoor het satellietbeeld niet volledig is.

Hoe krachtiger de golven hoe meer slib er van de bodem wordt opgewoeld. De hoogste golven ontstaan aan de kant van het meer waar de wind naartoe blaast, dus aan de overzijde. Daardoor wordt er aan die kant van het meer het meeste slib opgewoeld en is de slibconcentratie daar het hoogst. Ook de verhouding tussen de golfhoogte en waterdiepte speelt hierin een grote rol. Dit effect is goed te zien in de figuren Figuur 12, Figuur 13, en Figuur 14. In deze figuren zijn sedimentconcentraties te zien aan het wateroppervlak over het gehele oppervlak van het meer, voor deze windrichtingen en -snelheden. De maximale sedimentconcentraties aan het wateroppervlak kunnen oplopen tot 200 mg/l.

Het slib in het water wordt nadat het is opgewoeld meegenomen door de stroming. Hierdoor verpreidt het slib in het water zich uiteindelijk over het gehele meer. Op locaties waar de golven en de stroming laag zijn (luwteplekken), bezinkt het slib en is de slibconcentratie in het wateter lager.

Doordat het slib van de bodem wordt opgewoeld kan op bepaalde momenten de slibconcentratie vlakbij de bodem hoger zijn dan aan het wateroppervlak. Vooral tijdens stormperiodes kunnen hoge slibconcentraties ontstaan aan de bodem. Dit is gemeten tijdens een meetcampagne in december 2007 en weergegeven in Figuur 15.



Figuur 15 Slibconcentratie (x-as) in de onderste 100 cm van de waterkolom, gemeten op het midden van het meer (Vijverberg, 2008). Links de situatie tijdens rustig weer, rechts tijdens een storm.

4 Analyse slib in de vaargeul Amsterdam-Lelystad

Dit hoofdstuk start met een beschouwing van twee processen die specifiek relevant zijn voor het slib in de vaargeul namenlijk stroming en invloed van scheepvaart. Daarna worden metingen en modelresultaten in verschillende trajecten van de vaargeul geanalyseerd (4.3 en 4.4). Dat leidt in paragraaf 4.5 tot een analyse van de erosie en sedimentatie als functie van de diepte. Tot slot wordt de gevoeligheid van het model voor de meteorologie (0) en inrichting (4.7) beschreven.

4.1 Stromingspatroon in de geul

In deze paragraaf kijken we naar de invloed die stormcondities hebben op de stromingspatronen in de vaargeul. We doen dat vanuit de vraag of aanslibbing een continu proces is of dat de bulk van het materiaal in de geul terechtkomt als gevolg van een beperkt aantal stormgebeurtenissen.

In het Markermeer worden tijdens een storm golven opgewekt en door opwaaien en afwaaien ontstaat aan de bodem van het meer een complex stromingspatroon (zie ook hoofdstuk 3). Deze stromingsverschijnselen dragen, naast orbitaalbeweging door windgeïnduceerde golven, bij aan de erosie van bodemmateriaal. Het bodemmateriaal bestaat uit klei en (overwegend fijn) zand. Op de bodem ligt een zachte sliblaag. Dit slib komt in suspensie en kan over grote afstanden worden getransporteerd door de resulterende stroming. Het zand zal slechts over korte afstanden kunnen worden getransporteerd, waarna het sedimenteert.

De invloed van het stromingspatroon tijdens een storm met een windkracht van 8 Bft. uit verschillende windrichtingen is onderzocht aan de hand van hydrodynamische berekeningen met het slibmodel van het Markermeer. De windrichting is systematisch gevarieerd: noord, noordoost, oost, zuidoost, zuid, zuidwest, west, en noordwest. In alle berekeningen is de windsterkte 20 m/s, dat is ongeveer 8 Bft., een storm die enkele malen per jaar voorkomt.

Bij een windrichting loodrecht op de VAL (zuidoost en noordwest):

De stroming schuin over de vaargeul resulteert in aanslibbing van de bovenstroomse rand en erosie van de benedenstroomse rand. Dit is op de desbetreffende verschilkaarten te zien (niet opgenomen in dit rapport).

vaargeul km-raai		stroomsnelheid	opmerking over de stroming
van	tot	m/s	
6,5	7,5	0,2	evenwijdig aan de as van de vaargeul,
7,5	19	0,1	wisselende richtingen met op sommige plaatsen aan de rand van de vaargeul iets hogere stroomsnelheden
19	21	0,1 tot 0,15	schuin over de vaargeul
21	29	0,05 tot 0,1	schuin over de vaargeul
29	34	0,05 tot 0,1	schuin over de vaargeul

Tabel 6 Karakteristieken stroming tijdens storm uit NW en ZO, Bft. 8.

Bij een windrichting min of meer evenwijdig aan de VAL (zuid tot west en noord tot oost):

In het gebaggerde deel van de VAL kunnen stroomsnelheden van 0,3 tot 0,5 m/s enkele keren per jaar optreden (zogenaamd schoorsteen-effect). Deze stroomsnelheden kunnen bodemmateriaal in suspensie houden en over een grotere afstand transporteren. In putten kan bodemmateriaal bezinken. De natuurlijke aanslibbing wordt daardoor geremd. Buiten de VAL en het niet gebaggerde deel van de VAL treden lagere stroomsnelheden op van 0 tot 0,15 m/s.

vaargeul km-raai		stroomsnelheid	opmerking over de stroming	
van	tot	m/s		
6,5	21	0,3 tot 0,5	evenwijdig aan de as van de vaargeul,	
21	29	0,05 tot 0,15	schuin over de vaargeul	
29	34	0,15 tot 0,25	schuin over de vaargeul	

Tabel 7 Karakteristieken stroming tijdens storm uit noord, noordoost, oost, zuidoost, zuid, zuidwest en west, 8 Bft.

Remote-sensingopnames in Figuur 16 suggereren dat na een stormgebeurtenis, de slibgehaltes in de vaargeul verhoogd worden als gevolg van aanvoer van slib uit ondiepe delen die door het schoorsteen-effect de geul in worden "getrokken".



Figuur 16 Remote sensing (links) en model (rechts) van zwevende stof na een stormgebeurtenis.

4.2 Invloed van scheepvaart op de vaargeul

Toegestane scheepstypen

De vaarweg Amsterdam-Lemmer behoort tot het hoofdvaarwegennet en is in bevaarbaarheidsklasse Va en Vb ingedeeld (zie kaart 2.2 in Rijkswaterstaat, 2009). De vaarweg langs de Noord-Hollandse oever heeft bevaarbaarheidsklasse Va. De bevaarbaarheidsklasse bepaalt de maximum afmetingen van toegestane schepen.

Bij het inschatten van het effect van scheepsbewegingen hebben op de verspreiding van zand en slib in de VAL gaan we uit van vaarwegklasse V. Dit betekent dat de maximum afmetingen van schepen die de vaarweg gebruiken zijn: breedte 11,4 m en diepgang 3,5 – 4,0 m. Het verschil tussen het maximum toegestane schip uit klasse Va en Vb vaarwegen zit in de lengte en het laadvermogen en het daarmee gerelateerde schroefvermogen, zie Tabel 8.

klass e	type	Lengte (m)	Breedte (m)	Diepgang (m)	Doorvaart hoogte (m)	Laadvermogen (ton)
Va	Groot Rijnschip	95-110	11,4	3,5	9,1	1500-3000 (klasse 6 – 7)
	Verlengd Groot Rijnschip	135	11,4	3,5	9,1	
	Europa II duwstel	95-110	11,4	3,5	9,1	1801-2450
	Europa IIa duwstel	95-110	11,4	4,0	9,1	2451-3200
	Europa II lang	125-135	11,4	4,0	9,1	3201-3950
Vb	2 baksduwstel lang	170-190	11,4	3,5-4,0	9,1	3951-7050
	Klasse Va+ Europa II lang	170-190	11,4	3,5-4,0	9,1	3351-7250

Tabel 8 De maximum afmetingen van het schepen toegestaan op vaarwegklasse Va en Vb vaarwegen (motorvaart, duwstellen en koppelverbanden (Rijkswaterstaat, 2009).

Scheepspassages

Op het telpunt bij de Houtribsluizen worden de volgende gegevens vastgelegd over de scheepvaartbewegingen: het aantal scheepspassages en het gepasseerd laadvermogen, onderscheiden naar vaarrichting. Daarnaast worden de schepen ingedeeld naar scheepstype, en wordt informatie over de herkomst- en bestemming bijgehouden (Rijkswaterstaat, 2009).

De Houtribsluizen kenden in 2007 40.000 – 60.000 scheepsbewegingen door beroeps en recreatievaart (Rijkswaterstaat, 2009). Meer dan de helft hiervan is beroepsvaart (20-30 duizend) en de rest is recreatievaart. Een deel daarvan (meer dan 8.000) bestaat uit gewichtklasse van 1,500 tot 3,000 ton en 1200 schepen hebben een tonnage groter dan 3,000 (zie Tabel 9). Ongeveer de helft van het aantal schepen is beladen. De onbeladen schepen hebben een kleinere diepgang dan de beladen schepen.

Zowel de beroepsvaart als de recreatievaart waren vrijwel gelijk verdeeld over naar Lelystad varende schepen en naar Amsterdam varende schepen. In de periode 2005 tot 2008 is het scheepvaartverkeer op de vaarroute sterk toegenomen (Rijkswaterstaat, 2009).

Als schepen naar Lemmer willen of naar Amsterdam zullen ze de Houtribsluizen moeten passeren. In het BPR (1983) is voor de sluis een maximum toegestane diepgang van 3,5 m opgenomen. Om deze reden is het plausibel voor de VAL een aflaaddiepte te hanteren van 3,5 m. Dieper kan in feite niet, doordat ze dan niet door de Houtribsluizen kunnen komen. Echter, niet alle schepen op het traject Amsterdam-Lemmer passeren de Houtribsluizen. Het scheepvaartverkeer tussen de containerterminals van Amsterdam en Lelystad vervoerde 130.000 container eenheden (TEU) in 2007 en hoeft niet de Houtribsluizen te passeren.

Tabel 9Ontwikkeling aantal passages door schepen bestemd voor vervoer van lading naar aantal en
laadvermogenklasse door de Houtribsluizen tussen 2004 en 2007 (bron is tabel 3.5 uit Rijkswaterstaat,
2009).

	klasse 6	klasse 7	klasse 8	klasse 6 tot 8				
2004	4729	3866	345	8940				
2005	3064	2363	373	5800				
2006	4234	3583	750	8567				
2007	4053	4207	1216	9476				
2008	4358	4068	1862	12296				
Klasse 6 1.500 tot 2.000 ton								
Klasse 7 2.000 tot 3.000 ton								
Klasse 8 3.000 ton en meer								

Ontwerpdiepte van de vaargeul

In de richtlijnen voor vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2005) wordt voor een normaal vaarwegdwarsprofiel een diepte van 1,4 maal de diepgang van het stilliggende maatgevende schip ten opzicht van MLW voorgeschreven. Op het Markermeer is de Maatgevende Lage Waterstand (MLW) het winterpeil -0,4 m NAP. Voor een krap profiel bedraagt deze factor 1,3. Uitgaande van een maatgevend schip met een diepgang van 3,5 tot 4 m voor vaarwegklasse Vb zal de diepte van een vaarweg tenminste 4,9 m respectievelijk 5,6 m behoren te zijn. Bij de laagste waterstand betekent dat een bodemligging op -6 m NAP. Als de VAL geheel op diepte is gebracht dan voldoet de vaarweg aan deze ontwerpregel. In de nog niet verdiepte delen van de vaarweg kunnen schepen slechts gedeeltelijk afgeladen varen, aangenomen is met een maximum diepgang van 3,5 m In een klein deel van de VAL nabij Lelystad is de bodem nog niet verdiept en daar ligt de bodem op ongeveer -4,5 m NAP (zie bv zie Figuur 47 en Figuur 48).

Schatting invloed scheepvaart

Van varende schepen is bekend dat zij in sommige omstandigheden in staat zijn de vaargeul op diepte te houden omdat zij tijdens het varen voldoende hoge stroomsnelheden en turbulentie naast en onder het schip induceren om bodemmateriaal op te wervelen en te verplaatsen. Een voorwaarde voor een permanente invloed van het scheepvaartverkeer is dat de verkeersintensiteit voldoende is en in de tijd weinig varieert.

De scheepsgeïnduceerde waterbeweging rondom een varend schip uit de beroepsvaart bestaat uit enerzijds een primaire scheepsgolf (retourstroming, waterspiegeldaling en haalgolf) en anderzijds secundaire scheepsgolven (divergerende golven, transversale golven, interferentiepieken), een boeggolf, eventueel translatiegolven en de schroefstraal door hekschroef en boegschroef (WL Delft Hydraulics, 1975).

De retourstroming, waterspiegeldaling en haalgolf worden veroorzaakt doordat het schip water verplaatst van de boeg naar het hek van het schip. De schroefstraal stuwt water in een richting tegengesteld aan de vaarrichting en daardoor verplaatst het schip. De uitslag van het roer veroorzaakt vaak een kleine afbuiging van de schroefstraal.

Aan beide verschijnselen kan worden gerekend en voor een aantal situaties zijn de stroomsnelheden in de retourstroming en in de schroefstraal berekend.

Voor een groot Rijnschip schip varend op het Zwarte Meer is in Verheij (2006) met het ontwerpprogramma DIPRO gerekend aan de retourstroomsnelheid en met een empirische formule aan de invloed van de schroefstraal op de vaarwegbodem. De beschouwde situatie bestaat uit een kanaal van 150 m breed en 4 m diep, waarin een groot Rijnschip vaart met een diepgang van 3 m, een schroefdiameter van 1,75 m en een afstand tussen de schroefsa en de zandige kanaalbodem van 2,0 m. Het schip vaart met een vaarsnelheid van 3,2 m/s (11,5 km/uur). In die situatie zijn de maximum stroomsnelheden nabij de bodem van het kanaal:

- Een maximum retourstroomsnelheid onder het schip tot 0,45 à 0,6 m/s,
- Een maatgevende stroomsnelheid als gevolg van de schroefstraal van 0,5 m/s en

De retourstroomsnelheden schalen lineair met de breedte van de vaargeul.

Op het Zwarte Meer zorgt de scheepvaart gegeven de diepte van de vaargeul van 4 m zelf voor het op diepte houden van de bodem van de vaargeul. Voorwaarden voor het op diepte houden van een vaarweg door het scheepvaartverkeer is dat de verkeersintensiteit voldoende is, de beladen schepen nauwkeurig dezelfde vaarroute volgen en dat beladen schepen in één vaarrichting dominant zijn. Door de grote breedte van de VAL (ongeveer 240 m op de bodem) wordt daar in veel mindere mate aan die voorwaarde voldaan dan in het Zwarte Meer.

De invloed van scheepvaart neemt sterk af met de waterdiepte. De maatgevende stroomsnelheid van de schroefstraal voor dit grote Rijnschip (toegepast vermogen $P_d = 1000$ kW, diameter van de schroef $D_p = 1,75$ m) is in Figuur 17 voor verschillende waarden van de verticale afstand tussen schroefas tot een zandige bodem (z_p) uitgezet. De grafiek laat zien dat de invloed van de schroefstraal tot nul is gereduceerd als de afstand van schroefas tot een zandige bodem groter dan 2,5 m is geworden. Een zandige bodem van water met een diepte van 4,5 m wordt door dit schip dus nauwelijks meer beïnvloed. Voor de invloed van de retourstroomsnelheid op de bodemligging van een zandige bodem is de volgende vuistregel afgeleid (WL Delft Hydraulics, 1984): als de lokale waterdiepte kleiner is dan 2 maal de diepgang van een binnenvaartschip dan kan de retourstroom invloed hebben op de ligging van een zandige bodem.

Zolang de verdieping van de VAL niet geheel compleet is, is de maximum diepgang van de schepen beperkt tot 3 à 3,5 m. De voorgaande opmerkingen over de schroefstraal en de retourstroom betekenen dat schepen een zandige bodem tot een waterdiepte van 5 tot 6 m kan beïnvloeden. De onverdiepte delen van de VAL hebben een waterdiepte van 4 tot 4,5 m. Daar zal het scheepvaartverkeer een niet te verwaarlozen bijdrage hebben aan de morfologische veranderingen in de bodem. Onderstaande observatie past in dit beeld.

Het stuk van de vaargeul tussen (0 en 4 km) moet nog worden aangelegd. Zuidelijk van dit tracé is een verdieping aanwezig (vanaf de lijn Pampushaven – Uitdam tot het IJ). Dit is geen vaargeul conform tracé van de vaarweg Amsterdam–Lemmer maar is ontstaan door het in een lijn varen van zandschepen die het zand van de winning nabij Lelystad naar de losplaats van IJburg gebracht hebben. In de periode 1998 tot 2002 is daar wekelijks ca. 100.000 m³ zand vervoerd over deze route. Omdat het gedeelte van de VAL nog niet aangelegd was heeft men de diepste plek gekozen en daar met steeds dieper afladen van de schepen een eigen route gecreëerd (mededeling Ger Peters).



Figuur 17 Berekende maatgevende stroomsnelheden aan de bodem als functie van de afstand van de schroefas tot de bodem (*Z_p*). Berekeningen op basis van een empirische formule (Verheij 1985) voor een schip met diepgang 3 m, schroefstraal 1,75 m en 1000 kW vermogen.

Schatting voor de VAL

We nemen aan dat bovenstaande berekeningen ook min of meer karakteristiek zijn voor de VAL. Een diepgang van 3 m lijkt gezien de situatie realistisch en betekent dat de invloed van scheepvaart voldoende moet zijn om de vaargeul tot een diepte van zo'n 4 m op diepte te houden. Met uitzondering van VAL trajecten 0 – 4 km en 22 – 34 km is de waterdiepte overal groter dan 5,5 m. Voor het verdiepte deel van de VAL is onze verwachting dat:

- de schroefstraal geen erosie van een zandige bodem van de VAL zal veroorzaken.
 Wel kan de turbulentie-intensiteit fijn ongeconsolideerd materiaal herverdelen (onder andere de "fluffy layer").
- de retourstroom zal de vaste kleibodem van de VAL niet eroderen, maar wel het materiaal dat zijdelings na een storm in de VAL tot bezinking komt. In de VAL bestaat de bodem uit klei met daarop ongeconsolideerde klei en organisch materiaal.

Het scheepvaartverkeer in de VAL zorgt voor het in beweging komen van zijdelings naar het verdiepte deel van de VAL aangevoerde materiaal (lutum, fijn zand, silt, organisch). Dat resulteert in een herverdeling van het materiaal over een dwarsdoorsnede van de VAL, zoals in Figuur 18 is aangegeven en door het aangevoerde materiaal naar een verbreding of een verdieping (put) in de vaarweg te transporteren. In een verbreding of een verdieping (put) kan het materiaal tot bezinking komen.



Figuur 18 Principe schets van de invloed van het scheepvaartverkeer op de bodemligging van de vaargeul.

Observaties

Een bekend voorbeeld waar direct aangrenzend aan de vaargeul sedimentatie optreedt is het Koevordermeer in Friesland. Aan weerszijden van de vaargeul in dat meer is door het scheepvaartverkeer een rug sediment afgezet (persoonlijke communicatie met H.J. Verheij). De situatie daar is min of meer vergelijkbaar met het Markermeer, zie schets in Figuur 18. In Figuur 19 en Figuur 20 is het effect van een varend schip in een ondiepe vaarweg te zien. De breedte van het slibspoor achter een schip aan de wateroppervlakte is ongeveer gelijk aan of groter dan de scheepsbreedte. Soms is aan de wateroppervlakte naast een schip slib te zien dat door de retourstroom is opgewerveld, bijvoorbeeld als een schip in een bocht vaart.



Figuur 19 Scheepssporen in het Ketelmeer (Anonymous).



Figuur 20 Schip in Pampushaven en opwerveling slib in de aanvaarroute (diepte is 3 tot 4 m).
4.3 Indeling vaargeul in trajecten

In deze paragraaf worden veranderingen van het diepteprofiel in de langsrichting (0-34 km) van de vaargeul (zie Figuren Figuur 46 tot en met Figuur 49) geanalyseerd. In deze figuren is te zien dat er met name vóór 2006 grote bodemdiepteveranderingen zien die het resultaat zijn van de zandwinningen van Almere en IJburg, nl:

- 21,7 30 km (Zandwinning IJburg)
- 14,2 21,7 km (Zandwinning IJburg)
- 9,5-14,2 km (Almere I)
- 5,5 9,5 km (Almere II)
- 3,9 5,5 km (Almere III)

vaargeultrajecten

Zandwinwerkzaamheden zijn door RWS gerapporteerd, zie Figuur 4. De gemelde werkzaamheden zijn ook goed terug te vinden in de verschilkaarten zoals gepresenteerd in Appendix B1. In Tabel 10 zijn beide bronnen met elkaar vergeleken.

start werk	eind werk	naam werk	VAL km	loding verschilkaarten in Appendix B1
1997	1998	VAL1	30 – 34	geen veranderingen na 2000
nog niet gestart		Zandwinning IJburg	21,7 – 30	geen veranderingen na 2000
1998	2002	Zandwinning IJburg	14,2 – 21,7	zandwinning te zien in verschilkaart
		bovenlaagverwijdering zonder zandwinning	16,3-17,8 km	geen consolidatie verwacht
1996	2001	Almere I	9,5-14,2	weinig veranderingen (0,5 m) in periode na 2001 (feitelijk vanaf 8,4km)
1995	2001	Almere II	5,5 – 9,5	omputwerkzaamheden 2001- 2003 (feitelijk tot 8,4 km)
1996	2001	Almere III	3,9 – 5,5	omputwerkzaamheden 2001- 2006
moet nog op diepte worden gemaakt		VAL4	0 – 3,9	geen veranderingen

Tabel 10 Overzicht werkzaamheden zandwinning op basis van RWS informatie uit Figuur 4

Uit de beschrijving en kaarten hebben we de volgende karakteristieke trajecten in de VAL onderscheiden:

Traject I: 0-3,9 km vaargeul nog niet op diepte (-3 m)

Diepteveranderingen zijn hier waarschijnlijk het gevolg van natuurlijke sedimentatie en erosie. Voor dit deel van de geul heeft de scheepvaart een alternatieve route, dus de invloed van scheepvaart is hier waarschijnlijk beperkt.

Traject II: 21,7 – 30 km nog niet op diepte (-4 m)

Naast natuurlijke sedimentatie en erosie speelt scheepvaart hier zeker een rol, omdat dit traject in het verlengde van de vaargeul ligt die op diepte is en dit traject op de vaarweg naar Lelystad haven ligt.

Traject III: 30 – 34 km op diepte (-5 a -5,5 m)

Dit traject is vóór 1998 op diepte gemaakt. Het oostelijk deel van dit traject ligt binnen de haven van Lelystad.

Traject IV: 16,3 – 17,8 km op diepte (-6 m)

Van het traject 16,3 tot 17,8 is bekend dat hier tijdens uitvoering van de zandwinning van IJburg (14,2 tot 21,7 km) geen vergraving is geweest omdat er geen zand winbaar was in door aanwezigheid van een stroomgeul. De stroomgeul is herkenbaar in het diepteprofiel (-7 m). In dit traject is het daardoor zeker dat consolidatie de metingen niet beïnvloed.

Traject V: 8,5-14,2 km Almere I en 14,2-16,3 km IJburg nu op diepte (-7 tot -10 m)

De zandwinning is op dit traject voor 2001 al afgerond. Het effect van consolidatie is waarschijnlijk nog aanwezig maar relatief beperkt van invloed op de gemeten aanslibbing.

Traject VIa: 3,9 – 8.,5 (Almere II en III) en VIb 17,8 – 21,7 km (IJburg) nu op diepte (- 8 tot -11 m)

Op dit traject is de afgelopen 10 jaar veel grond verzet. Daarom is het niet goed mogelijk om aanslibsnelheden uit de lodingegevens af te leiden. Direct na het storten zijn diepteveranderingen waarschijnlijk gedomineerd door consolidatie, na verloop van tijd domineren sedimentatie en erosie. Door de gemiddeld grotere diepte is erosie als gevolg van natuurlijke processen en scheepvaart waarschijnlijk beperkt.

Traject VII: 20-21,5 km diepe zandwinput zonder storten

Diepteveranderingen in zandwinputten die na winning van het zand open zijn blijven liggen zijn het gevolg van bruto natuurlijke sedimentatie (er vindt zeker geen erosie plaats). Zie hoofdstuk 5 waar diepte putten worden behandeld.

4.4 Aanslibbing in verschillende trajecten in de vaargeul

In deze paragraaf worden bodemveranderingen gepresenteerd die zijn berekend uit lodinggegevens over de periode 2003-2010⁵. Deze periode geeft een betrouwbaar beeld van de aanslibbing in relatie tot de ontwikkeling in de tijd en in relatie tot de werkzaamheden in de geul. Ter verificatie is ook de aanslibsnelheid op basis van de periode 2009-2010 toegevoegd. Deze periode is relatief kort en de bodemveranderingen zijn klein. Daardoor is de spreiding en relatieve fout van de data groter. De bodemveranderingen in Figuur 25 zijn als puntenwolk weergegeven.

In Figuur 23 laat voor de periode 2003 - 2010 en voor de periode 2009 - 2010 een langsprofiel van de bodemverandering zien. Het traject 3,9 tot 8,4 (Almere II en III) is weggelaten (grijs) omdat daar tot 2003 nog verdiepingen plaatsvinden. Om dezelfde reden is ook het traject 20-21,7 km niet beschouwd.

⁵ Omdat voor een deel van het vaargeultraject twijfel bestaat over de 2006-lodingen (er lijkt interpolatie te hebben plaatsgevonden van 22 tot 28,5 km) is hier gewerkt de periode 2003-2010. Eventuele afwijkingen in 2006 spelen dan geen rol. Globaal stemt het beeld van de bodemveranderingen voor de periode 2003-2010 goed overeen met de beelden uit de perioden 2003-2006 en 2006-2009 (niet gepresenteerd).

Deltares



Figuur 21Bodemverandering (cm/jaar) berekend uit ongecorrigeerde lodinggegevens 2003-2010 en 2009-2010 en de waterdiepte voor de periode 2009-2010.

In Figuur 25 is de jaarlijkse aanslibbing uit lodingen te zien samen met de door het model berekende bodemverandering. De lodingen hebben betrekking op de periode 2003-2010, het model is karakteristiek voor het jaar 2006.



Figuur 22 Bodemverandering (+: aanslibbing, -:erosie in m/jaar) in de VAL volgens het model (2006) en de lodinggegevens over de periode 2003 – 2010.

Traject I: 0-3,9 vaargeul nog niet op diepte (ondiep -3 m)

In het traject tot 4 km is de gemeten aanslibbing uit lodingen gelijk aan nul. Ook het slibmodel berekent dat er op dit traject netto geen aanslibbing plaatsvindt. Het traject is te ondiep voor netto natuurlijke sedimentatie.

Traject II: 21,7 – 30 km nog niet op diepte (-4,5 m)

Voor het traject 21,7 tot 30 km volgt uit de lodingen dat hier lichte erosie plaatsvindt, variërend tussen -4 en -2 cm/jaar. Het slibmodel berekent voor dit traject ongeveer een netto sedimentatie van 0 tot 1 cm/jaar.

Erosie door scheepvaart zit niet in het model en verklaart waarschijnlijk het verschil tussen de gemeten en de berekende aanslibbing. Scheepvaart kan zeker invloed hebben bij een vaargeuldiepte van 4,5 m en er zijn voldoende scheepvaartbewegingen op dit traject.

Traject III: 30 – 34 km op diepte (-5 a -5,5 m) (gedeelte op diepte nabij Lelystad haven)

De gemeten aanslibbing van 30 tot 31,5 km is positief (1 cm/jaar). Van 21,7 tot 31,5 km neemt de diepte toe van 4,7 tot 5,5 m, de bijbehorende aanslibbing berekend uit lodingen varieert van -5 cm/jaar (erosie) tot +1 cm/jaar (aanslibbing). Het slibmodel voorspelt voor het hele traject ongeveer 0 tot 1 cm aanslibbing. Hieruit kan afgeleid worden dat erosie door scheepvaart bij een diepte van 5,5 m nihil is en bij 4,7 m waterdiepte zo'n 5 cm/jaar slib bijdraagt.

In het traject 30 tot en met 34 vond verdieping plaats in de periode 1998 tot 1999. Na oplevering hebben geen werkzaamheden meer plaatsgevonden. De vaargeul ligt hier over een breedte van 150 m op een diepte van ongeveer -5,25 m NAP. In het traject, inclusief de haven van Lelystad, is over enkele jaren 2001 – 2002 detail informatie beschikbaar over de bodemligging van de vaargeul (drie keer gemeten in de periode van juni 2001 tot augustus 2002), zie Figuur 23.

De veranderingen in de haven (31,5 tot 34 km) zijn interessant omdat daar de invloed door stormen kleiner is dan buiten de haven. Binnen de luwte van de havendam dan (31,5 km) voorspelt het slibmodel iets meer sedimentatie als gevolg van minder erosie dankzij golfluwte. De gemeten verschillen in Figuur 23 laten echter zien dat in de haven (31,5 tot 34 km) géén aanslibbing plaatsvindt. Effecten die het verschil tussen binnen en buiten de haven kunnen verklaren: (1) de aanvoer van slib door opwaaien tijdens een storm is beperkt tot de ingang van de haven en (2) er is een netto debiet van IJsselmeerwater door de Houtribsluizen waardoor slib uit de haven kan worden getransporteerd en mogelijk buiten de haven wordt afgezet. Gezien de diepte van de haven (5,5 m) is het effect van scheepvaart waarschijnlijk beperkt tenzij extra scheepsbewegingen in de haven als gevolg van aanlegmanoeuvres voor extra turbulentie in het water zorgen waardoor slib minder kans tot sedimenteren krijgt.

4.2 Animatie deelgebied VALoo1



Figuur 23 Bodemdieptes in VAL 30-34, gemeten met het multichannel-systeem van PAM voor juni 2001 (links) en augustus 2003 (rechts). Data van oktober 2001 zijn niet afgebeeld.

Traject IV: 16,3 – 17,8 km op diepte (-6 m)

In dit traject heeft geen zandwinning plaatsgevonden. Op dit traject is volgens RWS alleen de bovenlaag verwijderd tot een diepte van -8,5 m in 2001. In het traject dat niet is vergraven is over de hele periode (2001-2010) aanslibbing gemeten, ongeveer 90 cm in 10 jaar. De bodemverandering varieert ruimtelijk van 2 tot 10 cm/jaar. Ook voor periodes die niet worden gepresenteerd vinden we vergelijkbare aanslibsnelheden (5 cm/jaar voor 2003-2006 en 8 cm/jaar voor 2006-2009).

Het slibmodel voorspelt een aanslibbing van 5 tot 6 cm/jaar voor dit traject wat goed overeenkomt met de metingen.

Traject V: 8,5-17,8 km (zandwinning Almere I en deel IJburg) nu op diepte (-7 tot -10 m)

In Figuur 24 is de bodemverandering voor dit traject van de VAL in meer detail te zien:

- In de periode vóór 2001 is gewerkt om de sectie 8,5 16,8 km op de gewenste diepte te maken (8 à 10 m) in het kader van VAL (8,5-14) en IJburg (14-16,8).
- In het deel van 8,5 tot 10,5 km is nu het diepste deel. Hier verondiept de geul van 2001 tot 2002 met ongeveer 0,5 tot 1 meter. In het volgende jaar (2003) verdiept de geul echter weer bij benadering 0,5 m tot zo'n 9,5 m. Dit is waarschijnlijk het effect van consolidatie van onderliggende grond. Als gevolg van de werkzaamheden van Almere 1 en 2 was de bodem in 2003 nog niet stabiel en is in de periode 2003-2006 verder gedaald. Het slibmodel overschat de verondiepingen die als gevolg van consolidatie lager zijn.
- Op het traject 10 tot 16,8 km verandert netto verdieping in netto verondieping, het kantelpunt zit bij 13,8 km (vergelijk 2003 met 2009 in Figuur 21). Mogelijk is de ondergrond in het oostelijk deel van dit traject minder aan consolidatie onderhevig waardoor consolidatie en aanslibbing samen tot een netto aanslibbing leiden (orde 10 cm/jaar). Het slibmodel voorspelt ook dergelijke aanslibsnelheden. Daaruit is af te leiden dat consolidatie in het oostelijk deel (14 16,3 km) nihil is. Mogelijk maskeert ook dichtheidsstroming (beschreven in paragraaf Error! Reference source not found.) nog een deel van de aanwezige consolidatie.
- In Figuur 49 (Appendix B3) is voor lengtekilometer 8,8 het verloop van het dwarsprofiel in de tijd gegeven. Opvallend is de verandering van de vorm van het bodemprofiel aan de zuidkant van de geul (de noordzijde is niet bemeten tot omliggend bodemniveau). Het initieel rechte profiel uit 2001 (talud bij benadering 1:1,6) wordt in de loop der jaren (2002, 2003) steeds minder steil (~1:3). Vanaf 2006 verdwijnt ook de vlakke bodem. De invloed

van scheepvaart op deze diepte wordt uitgelsoten. De suggestie is dat afkalving van de randen randen voor het profiel verantwoordelijk is. De aanslibsnelheid berekend uit de dwarsprofielen van 2006 tot 2009 varieert van 30 cm/jaar aan de randen tot 20 cm/jaar in het midden van het profiel. Gemiddeld over de periode 2003-2010 is de netto aanslibbing als gevolg van consolidatie lager.



Figuur 24 Detail van de bodemligging voor het traject V (8,5 – 18 km) van de VAL in de periode 2001-2010.

Traject VIa: 3,9 - 8,5 (Almere II en III) nu op diepte (- 8 tot -11 m)

In Figuur 47 (Appendix 3a) is de bodemverandering voor dit traject van de VAL in meer detail te zien.

- In 2001 vond tussen 7 en 8 km zandwinning plaats. Opvulling van deze put gebeurde in 2002 met grond afkomstig uit het traject 6-7 km. Van 2003 tot 2006 werd verlaging van de bodem gemeten, waarschijnlijk als gevolg van netto consolidatie. Sinds 2006 is het profiel tamelijk stabiel. Consolidatie en sedimentatie zijn dan waarschijnlijk in balans.
- In 2003 is tussen 6 en 7 km zand gewonnen tot dieptes variërend van 10 tot 15 m. Na het op diepte brengen van de vaargeul is de diepte sinds 2006 constant. Consolidatie en sedimentatie zijn waarschijnlijk ook hier in balans.
- Tussen 2003 en 2006 is in de vaargeul van 4 tot 6 km op diepte gebracht. Er is geen zand gewonnen en er is daarna dus geen sprake van consolidatie. De gemeten aanslibbing tussen 2006 en 2009 (niet gepresenteerd) bedraagt ongeveer 5 cm/jaar. Van 2009 tot 2010 (Figuur 26) is de gemeten aanslibbing groter, gemiddeld over het traject 15 cm/jaar. Vergeleken met traject I (diepte 3 tot 3,5 m) is een hogere netto aanslibbing te verwachten bij een diepte van 7,5 m.

Traject VIb 17,8 – 21,7 km (IJburg) nu op diepte (- 8 tot -11 m)

In Appendix 3a, Figuur 48, is de bodemverandering voor dit traject van de VAL in meer detail te zien.

- In 2002 zijn zandwinputten gegraven tussen 20 en 21,75 km. Het omputten voor de zandwinning van IJburg is van van west naar oost uitgevoerd
- Metingen voor 2008 (alleen beschikbaar tussen 20-21,8 km) laten zien dat de opvulling van alle zandwinput op dit traject sinds 2008 stabiliseert. De netto opvulling van het traject 20-22 km in de periode sinds de aanleg (2001) tot 2006 is sinds 2008 sterk verminderd bij een vaargeuldiepte van -10 m. Deze data worden verder geanalyseerd in hoofdstuk 5
- In de periode van 2001 tot 2002 is gewerkt om de sectie 18-20 km op de gewenste diepte te brengen. De werkdijken zijn goed zichtbaar bij 19, 19,5 en 20 km. Er is geen zand gewonnen, dus consolidatie beïnvloedt de ligging van de profielen niet. Een dwarsprofiel bij langskilometer 18,6 km (Appendix 3c, Figuur 49) laat zien dat de aanslibbing voor de periode 2006-2010 ongeveer 25 cm/jaar is bij een diepte van 9 m. Vergeleken met traject VIa in de periode 2006-2010 (7,5 m diep, 10 cm/jaar) is de hogere netto aanslibbing bij 9 m volgens verwachting
- In het traject 20 tot 21,7 km is de gemeten bodemverandering veel hoger dan met het model berekend wordt.

4.5 Aanslibbing als functie van de diepte

In Figuur 25 is de gemeten aanslibbing uitgezet als functie van diepte (dezelfde metingen staan in Figuur 21 uitgezet tegen de langsrichting van de vaargeul). De bodemverandering in de periode 2003-2010 correleert positief met de diepte, de diepere delen laten meer netto aanslibbing zien. Tot dieptes van 5,5 meter vindt netto geen aanslibbing in de verschillende trajecten van de VAL plaats.



Figuur 25 Puntenwolk van de aanslibsnelheid en curve van de zuivere aanslibbing als functie van de waterdiepte.

De spreiding van de gegevens in de figuur is groot omdat alle metingen zijn gebruikt, ook die waarvan bekend is dat ze door consolidatie of scheepvaart zijn beïnvloed. In Tabel 11 is de aanslibsnelheid en bijbehorende waterdiepte gegeven voor delen van de vaargeul die

waarschijnlijk niet door scheepvaart en consolidatie zijn verstoord. Deze aanslibsnelheden uit de tabel zijn uitgezet in de figuur en de curve erdoor bepaalt de zuivere aanslibsnelheid als functie van de diepte.

traject	periode	cm/jaar	diepte NAP			
IV – km 16,3 – 17,8	2003-2010	5-8	-6			
III – km 30-40 km	2003-2010	5	-5,5			
Vla – km 4-6	2003-2010	5-15	-7,5			
VIb – km 18,6	2006-2010	25-35	-8,6			

Tabel 11 Aanslibsnelheden voor delen van de vaargeul waar invloed van scheepvaart en consolidatie naar

4.6 Gevoeligheid model voor meteorologie

In Figuur 26 is het verschil in bodemverandering tussen het basisjaar 2006 en de periode augustus 2007 – augustus 2008 weergegeven. Het verschil is behoorlijk groot. In 2007-2008 slibt het over het jaar aanzienlijk meer aan dan in 2006. Dit verschil is goed te verklaren uit de het grotere aantal stormen die in de periode augustus 2007 – augustus 2008 voorkomen, namelijk 1,75 x zoveel (21 ten opzichte van 12 in het kalenderjaar 2006, zie paragraaf 2.1.4). De extra sedimentatie manifesteert zich het sterkst in de diepe putten (8 tot 14 m). In delen van de vaargeul die dieper zijn dan 6 m is de extra aanslibbing significant hoger (1,5 tot 2 x) hetgeen overeenkomt met 5 cm/jaar extra slib. In ondiepere delen (0-6 km en 22-28 km) is er geen verschil in aanslibbing tussen beide jaren.

Als gevolg van stormen kan ook extra erosie optreden. Dat is kennelijk het geval in het traject 30-31,5 km, vlak voor de haven. Hier vindt bij een waterdiepte van 5 m (in het model) zelfs meer erosie op jaarbasis plaats (2-3 cm).

In de praktijk kan de opbouw van het baggerbezwaar van de vaargeul van jaar tot jaar dus aanzienlijk verschillen. Gegeven de waargenomen wind is wel te voorspellen hoe groot de afwijking zal zijn van het langjarige gemiddelde.



Figuur 26 Bodemverandering (+: aanslibbing, -:erosie in meters per jaar) in de langsrichting van de VAL voor twee verschillende jaren (2006 en 2007-2008). De waterdiepte (m) is op de rechter y-as weergegeven.

4.7 Gevolg van inrichtingsmaatregelen op aanslibbing

De aanleg van nieuwe constructies in het Markermeer, zoals luwtedammen, eilanden of een moeras, zullen de circulatiepatronen beïnvloeden.

In verschillende modelstudies zijn de effecten van dit soort constructies op stromingspatronen onderzocht. In Figuur 27 zijn de resultaten weergegeven voor een zuidwestenwind na aanleg van een luwtedam bij Marken en een moeras aan de Houtribdijk. De dam en het moeras zorgen ervoor dat het circulatiepatroon zich meer concentreert in het midden van het meer. Ook de stroomsnelheden worden lokaal hoger.



Figuur 27 Stroomsnelheid en -richting bij een constante zuidwestenwind, na aanleg van een dam bij Marken en een moeras aan de Houtribdijk.

In Figuur 28 is het verschil tussen s02 en s05 te zien. Het verschil is niet erg groot, wel is de aanslibbing in s05 (met toekomstige inrichtingsmaatregelen) kleiner. Dit is te verklaren door de maatregelen die hebben geleid tot lagere slibconcentraties in het midden van het Markermeer. Als gevolg van de inrichtingsmaatregelen is in de eerste twee maanden van 2006 de gemiddelde slibconcentratie verlaagd van 89,9 naar 84,2 (-6%).

Verder is het zo dat op basis van de modelberekeningen de sedimentatie een continu proces lijkt. Na stormen gaat de aanslibbing wel wat sneller, maar het is niet zo dat er buiten de stormen om nauwelijks aanslibbing plaatsvindt.

Deltares



Figuur 28 Bodemverandering (+: aanslibbing, -:erosie in meters per 2 maanden) in de langsrichting van de VAL voor 2006 met de basisbodemligging van 2006 en na inrichtingsmaatregelen in het meer (oermoeras, put en luwtemaatregelen Hoornse Hop).

5 Analyse slib in (zandwin)putten

Dit hoofdstuk start met een beschouwing van drie processen die specifiek relevant zijn voor de aanslibbing in (zandwin)putten, te weten consolidatie, zettingsvloeiing en dichtheidsstroming (paragrafen 5.1 tot en met 5.3). Daarna wordt de aanslibbing in twee diepe putten buiten de vaargeul in het Markermeer (paragraaf 5.4) vergeleken met aanslibbing in een zandwinput in de vaargeul (paragraaf 5.5).

5.1 Consolidatie

Een typische opbouw in een zandwinput is als volgt: Van -30 tot -25 m geroerd zand ("mors") daarop tot -24 m zogenaamde "overflow" (zwevende stof <80 μ m dat bij zandwinning "over de rand van de bak stroomt") afgevuld met grond tot -8 m NAP. Het verschil tussen een hoeveelheid in profiel gemeten (ongeroerde) grond en dezelfde grond na ontgraving (geroerde grond) is de "uitlevering" (factor 1,35).

Lodingen laten zien dat, nadat de vaargeulbodem op diepte is gebracht, door het storten van grond in een zandwinput consolidatie optreedt. Tegelijkertijd vindt ook sedimentatie plaats. Uit de vergelijking tussen gemodelleerde en gemeten bodemligging is geen duidelijke noodzaak voor nader onderzoek naar consolidatie gebleken. Het is ook niet de verwachting dat met de beperkte gegevens nauwkeurige consolidatiesnelheden bepaald kunnen worden. Er zijn geen veld of laboratoriummetingen bepaald tijdens deze studie. Voor zover bekend zijn nooit goede metingen naar het consolidatiegedrag van slib uitgevoerd. De bovengenoemde metingen zijn wel uitgevoerd om hier zicht op te krijgen, maar dat is niet goed gelukt. De Project Manager van IJburg (Van Oord / Boskalis), de heer Wilbert Bolderkamp, heeft deze metingen laten doen. Hier is echter geen rapport van beschikbaar.

Omdat ook geen informatie over bodemeigenschappen van de gestorte grond bekend is, hebben we consolidatie verder niet bestudeerd en is geen consolidatiemodel ingezet.

5.2 Zettingsvloeiing

Zettingvloeiing is het verschijnsel dat een verzadigde zandmassa zich gedraagt als een vloeistof als gevolg van het wegvallen van de korrelspanning. Dit kan voorkomen in diepe baggerputten als fijne losgepakte zandlagen zijn afgedekt door een kleilaag en de diepte van de put groter is dan 10 m ten opzichte van de omringende bodem (WL Delft Hydraulics, 1975). In de vaargeul kunnen deze vloeiingen alleen in diepe putten optreden. Op andere locaties van de VAL zullen geen zettingsvloeiingen op kunnen treden.

Als zettingsvloeiingen zijn opgetreden dan is de kans groot dat de uitvoerder van de uitvoering van baggerwerkzaamheden weet dat ze zijn opgetreden.

Afkalving van het talud is het grootst als de put het diepst is. Vlak na aanleg is er bijvoorbeeld 2 x 25 m vertikaal talud ten opzichte van 200 m vaargeulbodembreedte. Als er 40 cm afkalving optreedt leidt dat tot een gemiddelde bodemverhoging in de put van 10 cm. Uit dwarsprofielen (zie Figuur 49) van de vaargeul die reeds op diepte is gemaakt blijkt afkalving relatief groot. Een bijdrage van 1 of 2 decimeter bodemhoging van de vaargeul is reëel.

5.3 Dichtheidsstroming

In de afstudeerscriptie van Vijverberg (2008) is gekeken naar de te verwachten effecten van dichtheidsstroming na een grote verdieping in het Markermeer. Geconcludeerd wordt:

- Dichtheidsstroming zorgt voor een verhoging van de aanslibbing. In de studie wordt op basis van modelberekeningen maximaal 20% van de sedimentatie aan dichtheidsstroming toegeschreven en 80% aan sedimentatie vanuit het water. Kanttekening is dat de modelschematisaties hier invloed gehad kunnen hebben. Cs (cesium) metingen in sediment in en rondom de proefputten suggereren dat er geen of minder netto sedimentatie rondom de putten optreedt, mogelijk als gevolg van (dichtheid)stroming richting de put.
- In ieder geval neemt de aanslibbing van grover slib door Dichtheidsstroming toe, dichtheidsstromen hebben veel minder effect op de fijnere fractie slib, omdat deze langzamer uitzakt en er daardoor minder snel verticale dichtheidsgradiënten ontstaan. Uit metingen gedaan in de toplaag van het slib in bestaande putten, blijkt dat de putten veel fijne slibfracties hebben ingevangen. Waarschijnlijk verklaart dat ook de hoge Cs gehaltes die in het sediment van de proefputten gemeten zijn.

De kans op het optreden van een Dichtheidsstroming wordt door de sedimentconcentratie nabij de bodem bepaald. Een hoge sedimentconcentratie is een voorwaarde voor het optreden van Dichtheidsstromingen. Metingen geven aan dat slibconcentraties tot 700 mg/l gemeten zijn bij zo'n 11 m/s vlak nadat een storm van 16 m/s was gepasseerd. Vijverberg (2009) schat voor slibgehaltes van 1000 mg/l in de onderste 10 cm van de waterkolom een maximale dichtheidsstroming van 0,02 m/s in horizontale richting. De geometrie van een verdieping (put of vaargeul) bepaalt hoeveel slib er via dichtheidsstroming ingevangen kan worden.

Hieronder volgt een eenvoudige inschatting voor proefputten A en B (zie paragraaf 5.4) op basis van deze dichtheidsstroming van 0,02 m/s en een maximale slibconcentratie bij de bodem van 1000 mg/l (Figuur 15). Tijdens een storm wordt dan 0,02 m/s x 1000 mg/l x 0,1 m = 0,002 kg/s per meter lengte van de verdieping getransporteerd. Voor een ronde put met een diameter van 300 m komt dat overeen met 1,88 kg/s. Gesteld dat een storm 26 uur aanhoudt levert dat na consolidatie (bij een aangenomen sedimentdichtheid van 450 kg/m³) 0,55 cm slib in de put op. Bij een gemiddelde van 18 stormen per jaar (5-percentiel windsnelheid is 10 à 11 m/s) is de berekende bijdrage die dichtheidsstroming levert geschat op 10 cm/jaar. Bij lagere slibconcentraties (700 mg/l) neemt zowel de snelheid van de dichtheidgeïnduceerde stroming af alsmede de hoeveelheid slib die ermee wordt getransporteerd af. De geschatte waarden zijn daarom waarschijnlijk eerder maximale dan typische waarden.

Naarmate de put kleiner is neemt de bijdrage van dichtheidsstroming toe, zie Figuur 29. Voor een rechthoekige verdieping van 200 m breed, die model kan staan voor de vaargeul, is de maximale bijdrage van dichtheidsstroming op dezelfde manier berekend en komt uit op 7 cm/jaar, waarbij aangenomen is dat dichtheidsstroming van de twee lange zijdes van de verdieping gelijktijdig plaatsvindt.

Deltares



Figuur 29 Maximale aanslibsnelheid als gevolg van dichtheidsstroming Is functie van diameter van een ronde put.

Uit de verschilplaatjes, zie voorbeeld in Figuur 30, lijken bepaalde sedimentatiepatronen (rood omlijnd) bij de pijlen in die figuur te wijzen op het optreden van dichtheidsstromingen in het middendeel van de VAL, en dan hoofdzakelijk aan het noordwesttalud van de vaarweg.

Daarnaast blijkt uit Figuur 39 dat er sedimentatie optreedt op het noordwesttalud van de vaarweg en lichte erosie op het zuidoosttalud van de vaarweg (lichtblauwe gebieden in Figuur 39).



Figuur 30 Mogelijke locaties waar sedimentatie door dichtheidstromen kan zijn opgetreden lengtekilometer ±16 en ±17 km.

Samenvattend stellen we dat:

• De bijdrage van dichtheidsstroming aan de totale aanslibbing in kleine verdiepingen relatief belangrijker is dan in grote verdiepingen.

- In de proefputten kan de dichtheidsstroming maximaal (afhankelijk van de diameter) tot 15 cm/jaar bijdragen.
- In de vaargeul lijkt dichtheidsstroming op basis van de gegeven loding aan de noordwestzijde van de geul voor te komen.
- De berekende maximale bijdrage in de vaargeul is 7 cm/jaar, waarbij aangenomen is dat dichtheidsstroming van de twee lange zijdes van de verdieping gelijktijdig plaatsvindt.

5.4 Analyse data proefputten Markermeer

Literatuur

Proefputten A en B zijn in 1984 aangelegd in het Markermeer om te onderzoeken of het talud van een put van invloed is op stratificatieverschijnselen. Hiervoor zijn de putten cirkelvormig aangelegd met een talud van 1:10 (Put A) en 1:3 (Put B). De locatie van de putten is weergegeven in Figuur 31. De putten liggen buiten de vaargeul.



Figuur 31 Locatie van proefputten A en B (in cirkels) in het Markermeer (figuur overgenomen uit Vijverberg, 2008). De coördinaten van de proefput zijn Put A ((x=147553, y=503361) en Put B (x=146055, y=500012).

Analyse data

In Figuur 32 is de aanslibsnelheid van proefputten A en B op basis van de ruwe data (Tabel 12) van het diepteverloop in de putten (van den Brenk, 2002) berekend. Daarbij zijn de aanslibsnelheden weergegeven als functie van de einddiepte tussen twee dieptemetingen in.

Daarnaast is een marginale correctie uitgevoerd door de diepte van de put ten opzichte van NAP om te rekenen naar waterdiepte (daarbij is in de winter een peil van -0,4 m en in de zomer een peil van -0,2 m NAP gehanteerd).

Uit Figuur 32 blijkt dat bij een put dieper dan 8 m de aanslibsnelheid ongeveer 2 m/jaar bedraagt, bij een ondiepere put neemt de aanslibsnelheid af tot ongeveer 0,2 tot 0,5 m/jaar. De overgang van de hoge aanslibsnelheid naar een lagere aanslibsnelheid vindt plaats bij een put met een diepte van 6 tot 8 m ofwel een put die 3 tot 5 meter lager is dan zijn omgeving.

Tabel 12 Berekening van aanslibsnelheden in proefputten A en B op basis van de originele dieptemetingen (van den Brenk, 2002) in kolommen 2 en 4. Bij de omrekening van NAP naar waterdiepte is in de winter een peil van 0.4 m op in de zomer oon poil van 0.2 m NAB gebruikt

· · · ·											
datum	diepte (m NAP)	datum	diepte (m NAP)	aanslibl	bing (m)	tijdsperiod	le (jaren)	aanslibsr (cm/ja	nelheid aar)	gemide waterdie	delde pte (m)
Α	Α	В	В	Α	В	Α	в	Α	в	Α	в
feb-84	21.50	feb-84	20.00								
jun-86	17.00	jan-87	15.04	4.50	4.96	2.33	2.92	193	170	18.8	17.7
jan-87	15.68	sep-90	7.42	1.32	7.62	0.59	3.67	224	208	16.5	10.8
jan-92	7.95	jan-92	7.31	7.73	0.11	5.00	1.33	155	8	11.4	7.6
aug-96	6.22	aug-96	6.03	1.72	1.27	4.59	4.59	38	28	7.3	6.3
nov-98	5.51	okt-98	5.63	0.72	0.40	2.25	2.17	32	19	5.5	5.4
sep-99	5.48	jul-99	5.04	0.03	0.59	0.83	0.75	4	78	5.7	5.5



Figuur 32 Aanslibsnelheid van de putten A en B als functie van de waterdiepte (data van den Brenk, 2002).

Aanslibbing als functie van de waterdiepte

In deze paragraaf wordt met een conceptueel model de netto aanslibbing als functie van de diepte benaderd. De uitgangspunten en instellingen van dit vereenvoudigde model zijn dezelfde als in het slibmodel (Van Kessel e.a., 2009). Omwille van de eenvoud speelt wateren slibtransport en consolidatie geen rol. Het principe is het volgende. De aanslibsnelheid in de put is het netto resultaat van het aangevoerde materiaal (waaronder sedimentatie vanuit de waterkolom) en de afvoer vanuit de put als gevolg van erosie.

Sedimentatie is afhankelijk van de slibconcentratie en de valsnelheid van het slib en daarmee onafhankelijk van de waterdiepte. De aanslibbing als gevolg van sedimentatie (F', kg/(m².s)) wordt berekend uit het product van een karakteristieke, over het jaar constant genomen, slibconcentratie (c) van 90 mg/l en een bijbehorende valsnelheid (w_s, 0,3 mm/s \cong 26 m/dag⁶):

$$F' = w_c \times c$$

Erosie vindt alleen plaats wanneer door golfwerking of stroming het sediment wordt opgewoeld. De erosieflux is berekend met de veronderstelling dat er voldoende materiaal voor erosie aanwezig is in de toplaag, volgens de volgende vergelijking waarbij $M_0 = 4 \times 10^{-5}$ kg/(m².s) \cong 32 kg/(m²/jaar):

 $M' = M_0 \times \max(0, \tau / \tau_{crit} - 1)$

waarbij τ de berekende bodemschuifspanning en τ_{crit} de kritische bodemschuifspanning voor erosie (0,05 Pa) is. De waarde van τ is berekend met actuele windcondities voor het jaar 2006 en voor de periode 2007-2008 bij een strijklengte van 10 km en als functie van de waterdiepte.

Sedimentatie (F') en erosie (M') zijn omgerekend naar de hoeveelheid slib in de bodem uitgedrukt in m/jaar. Daarbij is een dichtheid van 450 kg/m³ aangenomen.

Het vereenvoudigde model veronderstelt een constante valsnelheid en concentratie over het jaar terwijl in werkelijkheid zowel de concentratie als de valsnelheid hoger zijn tijdens stormen, zodat dan meer sedimentatie optreedt. De keuze van beide parameters zijn, hoewel enigszins arbitrair, realistisch gekozen. De voorspelde aanslibsnelheid komt overeen met de range 1 - 2 m/jaar. Uit de data blijkt de gemeten aanslibbing 2 m /jaar te zijn.

In Figuur 33 zijn sedimentatie, erosie en netto sedimentatie apart weergegeven. Te zien is dat sedimentatie (F') in het conceptuele model onafhankelijk van de diepte is en bij de gekozen instelling leidt tot een aanslibbing van zo'n 2 m/jaar. De berekende erosie (M') hangt sterk af van de waterdiepte en de erosiesnelheid als gevolg van windgolven neemt af van de maximale waarde bij 5,5 m diep water tot nagenoeg geen erosie voor water dieper dan 7,5 m.

Het gevolg is dat de berekende netto aanslibbing (F'- M') als functie van de diepte een steile curve laat zien waarbij:

- Sedimentatie en erosie in balans zijn voor ondiep water tot zo'n 5,5 tot 6 m. De netto aanslibbing is daar verwaarloosbaar.
- Als gevolg van een sterke afname van erosie de aanslibbing sterk toeneemt tussen 5 en 7 m.
- Aanslibbing bij 7 a 8 meter waterdiepte maximaal is.

We vergelijken de berekende netto aanslibbing met de gemeten aanslibbing in de beide proefputten (Figuur 34). Het volgende valt op:

⁶ De mediane valsnelheid voor bodemslib van het Markermeer in het labortorium gemeten na deflocculatie (Blok, 2008) varieert tussen 0,6 en 5 mm.s⁻¹

- De aanslibbing in de diepe (> 10 m) gedeeltes van de proefputten is wat groter (150-225 cm/jaar) dan volgens het theoretisch model (1 a 2 m/jaar) mogelijk is.
- De aanslibbing in de ondiepe (5-6 m) delen van de proefput komt redelijk goed overeen met de waarden die met het theoretisch model worden gevonden (géén aanslibbing als de waterdiepte < 5,5 m).
- De steile curve stemt overeen met de data. Metingen zijn relatief onbetrouwbaar bij kleine verschillen.

Conclusies

Op basis van de dieptemetingen uit de proefputten is het gerechtvaardigd om aan te nemen dat aanslibbing in de put grotendeels verklaard kan worden met sedimentatie van slib uit de waterkolom. Deze conclusie is mede gebaseerd op de gegeven onzekerheid in de dichtheid van de fluffy laag die is verondersteld.

Gezien de onzekerheden die van den Brenk (2002) rapporteert⁷ bij interpretatie van oude lodingdata van de put, is de onzekerheid in de voorspelde aanslibsnelheid van 1-2 m/jaar niet verontrustend.

Andere transportmechanismen, zoals dichtheidsstroming, kunnen een rol hebben gespeeld bij aanslibbing van de put maar zijn kwantitatief waarschijnlijk ondergeschikt aan sedimentatie vanuit de waterkolom. In paragraaf 5.3 is de maximale bijdrage van dichtheidsstroming geschat op 15 cm/jaar.

Het slibmodel (hoofdstuk 5) voorspelt in diepe putten buiten de vaargeul minder aanslibbing dan wordt gemeten. In Vijverberg en Boderie (2008) bedroeg de berekende aanslibbing in een stervormige put in het midden van het Markermeer zo'n 30 cm/jaar. Onderzocht moet worden hoe dit komt. Veldgegevens over de slibsamenstelling in putten zijn daarbij nodig. Zulke gegevens leveren dan betrouwbaardere waarden voor de bruto depositie en de dichtheid van het bodem materiaal. Met name de relatie tussen de hoeveelheid slib in kg/m² berekend met het model en de dikte van de sliblaag in het veld kent nu een grote onzekerheid.

Verder kan overwogen worden een gevoeligheidsanalyse uit te voeren tussen de twee manieren van waarop het model de diepte dimensie kan schematiseren (sigma versus zlagen). Hoewel het aandeel van dichtheidgedreven stroming (van zeer slibrijk water) aan de bodem niet groot is ingeschat, is het in dat geval ook gerechtvaardigd om dichtheidsstroming in zo'n gevoeligheidsanalyse mee te nemen.

Gevoeligheid conceptueel model

Het verschil in erosieflux tussen twee verschillende jaren (kalenderjaar 2006 vergeleken met de periode augustus 2007- september 2008) is relatief klein. Er treedt in 2007-2008 als gevolg van meer stormen op gelijke diepte meer bruto erosie op. Het effect van meer stormen op de netto sedimentatie hangt naast de toename van de bruto erosie ook af van de verandering van de bruto sedimentatie. Als gevolg van meer turbulentie verandert de slibconcentratie in het meer en daarmee de sedimentatieflux in de vaargeul. In paragraaaf 5.6 wordt met het slibmodel het netto effect voor sedimentatie berekend.

Deltares

⁷ De eerste beschikbare meting na de oplevering in 1984 is een detailloding uit 1987 met een singlebeam echoloodsysteem waarvan bij gebrek aan digitale data de bestaande dieptekaarten zijn gedigitaliseerd, wat tot een vermindering van de nauwkeurigheid leidde. Omdat beide putten in de periode 1987 tot 1999 meerdere keren gemeten zijn met verschillende meetsystemen (vaartuigen en sensoren) en resoluties (aantal metingen per oppervlakte eenheid), is een directe vergelijking niet mogelijk. Daarom is binnen elke put een vak gedefinieerd waarbinnen de verschillende metingen op dezelfde manier geïnterpoleerd konden worden. Beide vakken liggen in het centrum van de put en hebben een oppervlakte van 10.000 m².



Figuur 33 Berekende sedimentatie (F'), erosie (M') en netto aanslibbing (F'-M') voor bodemschuifspanning = 0,05 $N.m^{-2}$ in 2006 als functie van de waterdiepte. Berekend met vereenvoudigd conceptueel slibmodel. Gevoeligheid is geïllustreerd aan de hand van netto aanslibbing voor 2006 voor moeilijker (τ = 0,1 Pa) erodeerbaar slib en netto aanslibbing voor het jaar 2007-2008 (τ = 0,05 Pa).



Figuur 34 Aanslibsnelheid van twee proefputten als functie van de waterdiepte aan het eind van de periode waarover de aanslibsnelheid in de put bepaald is (data uit van den Brenk, 2002) vergeleken met aanslibbing volgens een vereenvoudigd model.

5.5 Analyse diepe zandwinput in de VAL

Volgens opgave van RWS is de zandwinput IJburg in de vaargeul (21,5 km) op natuurlijke wijze opgevuld. Het dwarsprofiel van km 21 is te zien in Figuur 49 in Appendix 3. Het valt op dat de snelle initiële aanslibbing op een diepte van zo'n 10 m sinds 2008 tot stand is gekomen. Sinds 2008 is de aanslibbing nog zo'n 50 cm /jaar (bij een gemiddelde diepte van zo'n 10 à 11 m). De verdieping in de vaargeul bij kilometer 20,2 geeft een vergelijkbaar opvulgedrag.

In Figuur 35 is de aanslibsnelheid voor beide putten uitgezet tegen de diepte. De aanslibsnelheid neemt sterk toe (van 50 tot 200 cm/jaar) als de diepte van de put toeneemt van 10 tot 11 á 12 m. De curve vertoont een even steil gedrag als werd gevonden voor putten buiten de vaargeul in het Markermeer (paragraaf 5.4).

Opvallend is dat de maximale aanslibsnelheid gelijk is in beide type putten. Vooral de diepte waarbij de opvulsnelheid toeneemt verschilt flink en is significant hoger voor de put in de vaargeul. Aanslibbing in relatief kleine ronde putten in het Markermeer neemt toe als de diepte groter is dan zo'n 6 à 7 m, bij een grotere put in de vaargeul gebeurt dat pas bij dieptes groter dan 10 à 11 m. In de put in de vaargeul verwachten we dat door de redelijke grote lengte ten opzichte van de breedte een hogere stroomsnelheid doordringt tot op de bodem van de verdieping. Het model toont die stroming ook aan bij hoge windsnelheden. Hierdoor ontstaan extra erosie en extra transport ten opzichte van de situatie waarin alleen golven in de put doordringen. Het hydrodynamisch model voorspelt bodemschuifspanningen als gevolg van zulke stroming in 2006 die voldoende hoog zijn om de extra erosie te verklaren.

De conclusie is dat de onderzochte verdieping (zandwinput) in de vaargeul met dezelfde aanslibsnelheid dichtslibt als de onderzochte putten buiten de vaargeul (maximaal met 2 m/jaar) maar dat de evenwichtsdiepte beduidend lager (-10 m NAP) ligt dan voor de put buiten de vaargeul (-6 m NAP).



Figuur 35 Aanslibsnelheid als functie van de waterdiepte voor een diepe put in de vaargeul op kilometer 21,5 vergeleken met de putten A en B.

5.6 Model aanslibbingseffect diepe putten

In Figuur 36 is het verschil tussen modelberekening s02 en s04 weergegeven. Het verschil is erg klein. Alleen op de plaats van de opgevulde punt neemt de aanslibbing marginaal (1 mm) af. Het uitstralende effect naar de omgeving lijkt zeer beperkt te zijn. Volgens het model heeft opvullen van de putten dus geen wezenlijke gevolgen voor de aanslibbing in de omgeving. De vraag is nog wel of we het model hierin kunnen geloven, want bepaalde mechanismen zitten er niet in (dichtheidsstroming naast depositie vanuit de waterkolom).

De vraag of het niet opvullen van een diepe put in de vaargeul tot minder aanslibbing in de nabijgelegen vaargeul leidt, is daarmee niet eenduidig te beantwoorden. Op basis van de relatie tussen waterdiepte en aanslibsnelheid die uit metingen volgt, wordt een veel groter effect van opvulling verwacht (minimaal in de orde van decimeters per jaar). Metingen aan een bestaande verdieping in de vaargeul bevestigen dat zo'n verdieping met de verwachte snelheid dichtgeslibd tot -10 m NAP. Het is duidelijk dat door de verdieping er extra materiaal wordt vastgelegd, maar het is nog maar helemaal de vraag waar dit vandaan komt. In geval van dichtheidsstromingen zal een belangrijk deel inderdaad vanuit de naastgelegen geul komen, maar als dit vanuit suspensie komt zorgt de put alleen voor een lokaal iets lagere concentratie en dus ook iets lagere aanslibbing. Dit laat het model ook zien. Indien het materiaal afkomstig is uit zettingsvloeiingen of afkalven van het talud verkleint het de aanslibbing niet, maar wel de omringende diepte. De vraag is of dit wel gewenst is, maar in ieder geval is dit moeilijk precies te voorspellen (en dus te ontwerpen).



Figuur 36 Bodemverandering (+: aanslibbing, -:erosie in meters in 2 maanden) in de langsrichting van de VAL voor 2006 met de basisbathymetrie van 2006 en het opvullen van twee diepe putten.

6 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van deze studie worden de volgende conclusies getrokken over het onderhoud van de vaargeul Amsterdam-Lelystad.

- Bij een diepte van -4 m NAP is het onderhoud verwaarloosbaar. Dit komt enerzijds omdat bij deze diepte de natuurlijke sedimentatie en erosie zo goed als in evenwicht zijn, anderzijds omdat eventuele dunne afzettingen (tot 5 cm/jaar) door scheepvaart weer worden geërodeerd.
- Bij een verdieping tot -6 m NAP neemt het onderhoud beperkt toe. Dit komt enerzijds doordat golven bij deze waterdiepte minder effectief zijn om afzettingen te eroderen, anderzijds doordat de invloed van scheepvaart op deze diepte verwaarloosbaar wordt. De verwachte aanslibbing bij een geuldiepte van -6 m NAP is 5 tot 10 cm/jaar. Met een geullengte van 30 km en een geulbreedte van 140 m is dit equivalent met een baggerbezwaar van circa 200.000 m3/jaar.
- Diepe putten in de vaargeul hebben een positieve maar beperkte invloed op de aanslibbing elders in de geul, dat wil zeggen deze vermindert in geringe mate. Een diepe put met als enig doel om het onderhoud aan de vaargeul te verminderen is daarom waarschijnlijk niet rendabel. Wel is de vaargeul een goede locatiekeuze indien er vanwege andere doelen (bijvoorbeeld zandwinning) een put moet worden gemaakt. Afhankelijk van de diepte van de put zal deze in een aantal jaren dichtslibben tot een diepte van circa -10 m NAP in de geul, waarna de aanslibsnelheid sterk afneemt. Een put met een constructiediepte van -20 m NAP heeft hiervoor 5 tot 7 jaar nodig

Op basis van de lodingen, modelberekeningen en expertkennis kunnen de volgende conclusies worden getrokken over de bodemveranderingen in de vaargeul Amsterdam-Lelystad.

De natuurlijke aanslibbing die plaatsvindt in de delen van de vaargeul ondieper dan 4 m is in de orde van 0 tot 5 cm per jaar. Echter, door de scheepsgeïnduceerde waterbeweging wordt er in delen of perioden met veel scheepvaartverkeer een lichte erosie van 0 tot 5 cm per jaar waargenomen.

In delen van de vaargeul die nu op diepte zijn (gemiddelde diepte circa 6 m) is de natuurlijke aanslibbing in de ordegrootte van 5 tot 10 cm per jaar. Scheepvaart is op deze diepte niet meer van invloed op het sedimentatie- en erosiegedrag, zodat de natuurlijke aanslibbing gelijk is aan het baggerbezwaar.

In delen van de vaargeul waar de diepe putten met grond zijn opgevuld, hangt de natuurlijke aanslibbing, net als elders, af van de diepte waarop de put is afgewerkt. Bij een afwerking tot een diepte van 10 m moet rekening worden gehouden met een aanslibbing van 25 tot 50 centimeter per jaar. Bij verhoogde gehaltes slib in de waterkolom van de vaargeul, bijvoorbeeld als gevolg van baggerwerkzaamheden of stortingen, kan de aanslibbing hoger zijn. Consolidatie zorgt na storten in een diepe put ervoor dat het bodemniveau nog een tijd lang daalt. In deze studie is niet met een model gerekend aan consolidatie. Lodinggegevens uit de zandwinput van Almere II suggereren initiële consolidatiesnelheden van meer dan 0,5 m/jaar, afnemend naar 20-30 cm/jaar voor een periode tot 5 jaar na storting.

Diepte (m)	Natuurlijke	Erosie door		
	sedimentatie (m/jaar)	scheepvaart		
		(m/jaar)		
3-3,5	0	potentieel hoog		
4	0-0,05	0 – 0,05		
6	0,05 – 0,10	0		
6–8,5	0,10 – 0,15	0		
8,5 – 10	0,25 – 0,50	0		
> 10	tot 1,5 à 2	0		

Buiten de vaargeul neemt in een diepe put de netto aanslibbing vrij plots sterk af wanneer de diepte kleiner wordt dan 6 tot 7 m. Dat komt door de sterke afname van erosie met de diepte. Slib dat in de put wordt ingevangen en beneden de erosiedrempel komt, kan er niet meer uit ontsnappen. De aanslibbing is dan gelijk aan de bruto sedimentatie. Modelberekeningen ondersteunen de vorm en ligging van deze scherpe grens.

De onderzochte verdieping in de vaargeul (zandwinput IJburg) slibt met maximaal 2 m per jaar dicht. Dat is even snel als de onderzochte putten buiten de vaargeul. De diepte waarbij een omslag plaatsvindt naar langzamere netto aanslibbing is circa -10 m NAP. Dit is beduidend dieper dan voor kleine putten buiten de vaargeul (omslag bij -6 à -7 m NAP). Een put kan stroming aantrekken, het model laat zien dat zo'n stroming in de geul daadwerkelijk ontstaat en sterk genoeg is om ongeconsolideerd materiaal in de put in de geul te eroderen tot een diepte van -10 m NAP.

De beste schatting van de aanslibbingsnelheden in de diepste putten in de vaargeul op basis van lodinggegevens bedraagt 1,5 à 2,0 m per jaar. Zandwinputten dieper dan 10 m vullen met maximaal deze snelheid op. Hierbij zij opgemerkt dat de dichtheid van deze snel opbouwende en typisch slibrijke laag waarschijnlijk een stuk lager is dan van ondiepere afzettingen. In diepe putten vindt immers geen agitatie van de bodem plaats, waardoor een ijle skeletstructuur (dat wil zeggen lage pakkingsgraad) toch stabiel kan zijn, dit in tegenstelling tot ondiepere delen.

Het slibmodel (van Kessel e.a., 2009) is geschikt gemaakt voor het bereken van aanslibbing in de vaargeul. Daartoe is een derde grovere slibfractie toegevoegd en is het modelrooster in de vaargeul verfijnd. Het model is geschikt voor het berekenen van natuurlijke aanslibbing vanuit de waterfase. Het model is op dit moment niet geschikt voor het bereken van dichtheidstromen, consolidatie en zettingsvloeiing.

Drie bijdragen aan het opvulproces in diepe putten blijken relevant, namelijk (1) natuurlijke aanslibbing vanuit de waterkolom, (2) dichtheidsstroming en (3) zettingsvloeiing en afkalven van het talud. Het proces van natuurlijke aanslibbing uit de waterkolom wordt zeer waarschijnlijk goed met het model beschreven. De berekende bijdrage is maximaal in de orde van 20 cm/jaar (op basis van twee met het model gesimuleerde jaren). De bijdrage van dichtheidsstroming is geschat en is maximaal zo'n 10 cm/jaar. De bijdrage van materiaal uit het talud is het grootst als de put het diepst is en wordt dan geschat op 20 cm/jaar. De drie processen samen bedragen 50 cm/jaar. Dit houdt in dat de sedimentdichtheid (450 kg/m3) die bij de omrekening van aanslibbing in kg/m2 naar sedimentdikte gebruikt wordt, te hoog is. Als aangenomen wordt dat de met loding gemeten sedimentdikte niet verder geconsolideerd is dan 200 kg/m³ (ongeveer waterdichtheid 1,1 kg/m³) dan vertegenwoordigen de drie processen samen jaarlijks 125 cm slib, wat goed overeenkomt met de gemeten opvulsnelheid

op basis van lodinggegevens. Een dergelijke lage dichtheid kan fysisch goed verklaard worden. Er wordt aanbevolen om eens het dichtheidsprofiel in een natuurlijk dichtslibbende put in het Markermeer te meten, bij voorkeur meerdere jaren achtereen.

Aanslibbing blijkt gevoeliger voor de jaarlijkse variatie in de meteorologie dan op voorhand ingeschat. Met name het groter aantal stormen in de periode 2007-2008 leidt tot hogere slibconcentraties in het Markermeer waardoor ook de aanslibbing in de vaargeul groter is. In diepe delen is de sedimentatie 50% hoger en het effect neemt af bij geringere waterdiepte. In de ondiepe delen van de vaargeul is er geen extra aanslibbing in een jaar met meer stormen. Dit is goed te verklaren, omdat in ondiepe delen ook het effect van resuspensie toeneemt bij een groter aantal stormen. In diepe of luwe gebieden domineert echter de toename van de depositieflux t.g.v. de gemiddeld hogere concentratie in de waterkolom tijdens een hoogdynamische periode.

Aanslibbing blijkt door het jaar heen een min of meer continu proces dat niet sprongsgewijs optreedt als gevolg van een storm.

Toekomstige maatregelen in het Markermeer (de NMIJ-varianten) leiden tot een iets verlaagde aanslibbing in de vaargeul voor het onderzochte jaar 2006. Waarschijnlijk is het reducerende effect op de aanslibbing groter als de berekening voor een periode met meer stormen uitgevoerd zou worden. Omdat de maatregelen niet gericht zijn op het verminderen van de concentratie slib in het zuidelijk deel van het Markermeer is het verwachte effect ook dan echter klein.

De vraag of het niet opvullen van een diepe put in de vaargeul tot minder aanslibbing in de nabijgelegen vaargeul leidt, is niet eenduidig te beantwoorden. Het effect dat met het model berekend word is klein, namelijk circa enkele centimeters per jaar minder aanslibbing op de plek van de opgevulde put en enkele millimeters per jaar in de omgeving. Op basis van de relatie tussen waterdiepte en aanslibsnelheid die uit metingen volgt, wordt een veel groter effect van opvulling verwacht (minimaal in de orde van decimeters per jaar). Metingen aan een bestaande verdieping in de vaargeul bevestigen dat zo'n verdieping met de verwachte snelheid dichtgeslibd tot -10 m NAP. Het is duidelijk dat door de verdieping er extra materiaal wordt vastgelegd, maar het is nog maar helemaal de vraag waar dit vandaan komt. In geval van dichtheidsstromingen zal een belangrijk deel inderdaad vanuit de naastgelegen geul komen, maar als dit vanuit suspensie komt zorgt de put alleen voor een lokaal iets lagere concentratie en dus ook iets lagere aanslibbing. Dit laat het model ook zien. Indien het materiaal afkomstig is uit zettingsvloeiingen of afkalven van het talud verkleint het de aanslibbing niet, maar wel de omringende diepte. De vraag is of dit wel gewenst is, maar in ieder geval is dit moeilijk precies te voorspellen (en dus te ontwerpen).

Het slibmodel voorspelt in diepe putten buiten de vaargeul minder aanslibbing dan wordt gemeten, ondanks de toevoeging van een derde sedimentfractie met een hogere valsnelheid. Onderzocht moet worden hoe dit komt. Veldgegevens over de slibsamenstelling in putten zijn daarbij nodig. Zulke gegevens leveren dan betrouwbaarder waarden voor de bruto depositie en de dichtheid van het bodem materiaal. Met name de relatie tussen de hoeveelheid slib in kg/m² berekend met het model en de dikte van de sliblaag in het veld kent nu een grote onzekerheid.

Verder kan overwogen worden een gevoeligheidsanalyse uit te voeren tussen de twee manieren van waarop het model de diepte dimensie kan schematiseren (sigma versus zlagen). Hoewel het aandeel van dichtheidgedreven stroming (van zeer slibrijk water) aan de bodem niet groot is ingeschat, is het in dat geval ook gerechtvaardigd om dichtheidsstroming in zo'n gevoeligheidsanalyse mee te nemen

7 Referenties

Wageningen, Nederland.

Anonymous, 2007. Memo RWS Vaklodingen, 2007.

Brenk, van den S., 2002. Sedimentatie onderzoek vaargeulen op basis van lodinggegevens, 2003. Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied.

Blok, B., 2008. Monitoring Markermeer, Datarapport. Deltares rapport, G0200.10.

BPR, 1983. Politiereglement, (1983). Besluit van 26 oktober 1983, tot vaststelling van een reglement houdende bepalingen ter voorkoming van aanvaring of aandrijving op de openbare wateren in het Rijk, die voor de scheepvaart openstaan. http://wetten.overheid.nl/BWBR0003628/geldigheidsdatum 03-12-2010.

Duin, E.H.S. van, 1992. Sediment transport, light and algal growth in the Markermeer. A twodimensional water quality model for a shallow lake. PhD-Thesis. Landbouwuniversiteit

Genseberger, M. en P.M.A. Boderi, 2009. Scenario's hydrodynamica en slibtransport Toekomstbeeld Markermeer-IJmeer. Deltares report 1200097-007-VEB-0005, Delft, The Netherlands.

Genseberger, M., M. van der Wal, D. F. Burger, and T.van Kessel , 2009. Model quickscan to test Almere City extension options. Deltares report 1200424, Delft, The Netherlands.

Kessel, T. van, G.J. de Boer, and P.M.A. Boderie, 2009. Calibration suspended sediment model Markermeer. Deltares report Q4612, Delft, The Netherlands.

Kokke, J.M.M., 2003. Inventarisatie informatiebronnen Fysisch Meetnet. Achtergronddocument bij de rapportage van het project Evaluatie Fysische Meetnet MWTL). Werkdocument RIKZ/IT-2003.006.

Lenselink G. and U. Menke, 1995. Geologische en bodemkundige atlas van het Markermeer. Rijkswaterstaat, Directie IJsselmeergebied, Lelystad. ISBN 90-369-1148-6.

Provincie Flevoland, 2010. Verbeteren vaargeul IJsselmeer (Amsterdam-Lemmer). MIRT Projectenboek 2011 | 128.

Riza, 2006. Slibproblematiek Markermeer. Verdiepingsslag en maatregelen slibproblematiek Markermeer - Analyse kennisleemten en inventarisatie maatregelen. Auteurs van Ledden, M. Gerrits (Royal Haskoning), G.W.R, van Kessel, T. en E. Mosselman (Deltares). Riza rapport nummer 9R3456.A0.

Rijkswaterstaat (1986). The Closure of tidal basins: closing of estuaries, tidal inlets and dike breaches. J. C. Huis 't Veld and W. van Aalst. Delft University Press, 1984 - 743 pagina's.

Rijkswaterstaat, 2005. Richtlijnen Vaarwegen RVW 2005. Adviesdienst Verkeer en Vervoer Tweede gecorrigeerde druk, november 2006. ISBN 90-369-3630-6.

Rijkswaterstaat, 2009. Scheepvaartinformatie Hoofdvaarwegen Editie 2009. Dienst Verkeer en Scheepvaart (DVS), Augustus 2009. <u>http://www.rijksoverheid.nl/documenten-en-</u> <u>publicaties/rapporten/2009/08/01/scheepvaartinformatie-hoofdvaarwegen-editie-2009.html</u>

Rijkswaterstaat, (2010). Lodingbestanden ontvangen van André Grul, Lodingenbeheer WSM RWS).

Schuitema, L. en Van der Werf, A., 2007. Artefacten in multibeam echosounder data herkennen, bepalen en voorkomen. Noordelijke Hogeschool Leeuwarden sectie Hydrografie. Rapport nummer AGI-2007-GPMP-016.

Verheij, H. J., 2006. Aanslibbing Vaargeul Zwarte Meer., WL Delft Hydraulics, Delft Rapportnummer Q4371.03.

Vijverberg, T., 2008. Mud dynamics in the Markermeer, silt traps as a mitigation measure for turbidity, Msc thesis, May 2008 TU Delft.

Vijverberg T. en P.M.A. Boderie, 2008. Analyse scenarioberekeningen Markermeer. Deltares report Q4613, Delft, The Netherlands.

Vijverberg. T., Winterwerp, J.C., Aarninkof, S.G.J. and H. Drost, 2009. Fine sediment dynamics in a shallow lake and implication for hydraulic works. Ocean Dynamics. DOI 10.1007/s10236-010-0322-2.

Witteveen + Bos, 2004). Quick scan slibproblematiek Markermeer en Eem- en Gooimeer, Witteveen en Bos, project nummer Rw1390-1, author Van Leeuwen, Deventer.

WL Delft Hydraulics, 1984. Invloed van scheepvaart op de bodemligging van een alluviale rivier, M1517, delen I en II, Delft

WL Delft Hydraulics, 1975. Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen – Schroefstralen en de stabiliteit van bodem en oevers onder invloed van de stroomsnelheden in de schroefstraal. Rapport M1115 deel VII en deel XII.

A Appendix – Voorbeeld bepaling van de dikte van de zachte sliblaag

Een voorbeeld van de bepaling van de dikte van een zachte laag met een dual-frequency singlebeam echolood in het Markermeer is in Figuur 37 getoond (Vijverberg, 2008). De meting is met frequenties van 33 kHz en 210 kHz uitgevoerd. De rode lijn in Figuur 37 is met een hoge frequentie gemeten en de blauwe lijn is met een lage frequentie gemeten. Het verschil tussen beide bodemliggingen is 0,05 tot 0,1 m en dat is een maat voor de dikte van de zachte laag op de bodem. Opgemerkt wordt dat het om een groot aantal metingen op dezelfde horizontale locatie gaat die achter elkaar genomen zijn zonder dat daarbij voor de verticale positie van het meetschip is gecorrigeerd. Het verschilsignaal is echter, met uitzondering van een aantal uitbijters, redelijk constant.



Figuur 37 Voorbeeld van twee registraties van de bodemligging gemeten met een dual frequency echo sounder in het Markermeer.

B Appendix B – Verschilkaarten op basis van lodinggegevens 2001 – 2010



Figuur 38 Lodinggegevens georganiseerd per deelgebied van de VAL.



Figuur 39 Verschil in diepte (m) tussen twee jaren in deelgebied 7 (lengtekilometer 0 tot 4,5).



Figuur 40 Verschil in diepte (m) tussen twee jaren (let op de lengte van de periode verschilt) voor deelgebied 6 (lengtekilometer 4,5 tot 9,5).



Figuur 41 Verschil in diepte (m) tussen twee jaren (let op de lengte van de periode verschilt) voor deelgebied 5 (lengtekilometer 9,5 tot 14,5).


Figuur 42 Verschil in diepte (m) tussen twee jaren (let op de lengte van de periode verschilt) voor deelgebied 4 (lengtekilometer 14,5 tot 19).



Figuur 43 Verschil in diepte (m) tussen twee jaren (let op de lengte van de periode verschilt) voor deelgebied 3 (lengtekilometer (19 tot 24). Dit deelgebied heeft, als enige, ook data voor 2008.



Figuur 44 Verschil in diepte (m) tussen twee jaren (let op de lengte van de periode verschilt) voor deelgebied 2 (lengtekilometer 24 tot 29).



Figuur 45 Verschil in diepte (m) tussen twee jaren (let op de lengte van de periode verschilt) voor deelgebied 1 (lengtekilometer 29 tot 34).





Figuur 46 Bodemhoogte in de langsrichting van de hele vaargeul voor de jaren 2001-2010. De positie in de langrichting waar dwarsprofielen beschikbaar zijn is aangegeven



Figuur 47 Bodemhoogte in de langsrichting van de vaargeul 4-9 km voor de jaren 200-2010. De positie in de langrichting waar dwarsprofielen beschikbaar zijn is aangegeven.



Figuur 48 Bodemhoogte in de langsrichting van de vaargeul 17-22 km voor de jaren 2001-2010. De positie in de langrichting waar dwarsprofielen beschikbaar zijn aangegeven.



B3 Appendix – Dwarsprofielen VAL

Figuur 49 Dwarsprofielen in de vaargeul voor diverse locaties.

C Appendix - aanpassing van het slibmodel

Het slibmodel is een toepassing van Delft3D-FLOW en Delft3D-WAQ.

C.1 Verificatie roosteraanpassingen

Als gevolg van de lokale roosterverfijning moest ook de tijdstap van de ADI-tijdsintegratie van Delft3D-FLOW verlaagd worden tot 1 minuut. Geverifieerd is dat het halveren van deze tijdstap tot 30 seconden geen andere simulatieresultaten geeft (zie Figuur 50).



Figuur 50 Verificatie tijdstap voor observatiepunt bij Kuil van Marken (in fijnere rooster).

C.2 Resultaat slibmodel

Ter verificatie is hier het resultaat van het uitgebreide slibmodel met drie fracties vergeleken met de resultaten van het oorspronkelijke model met twee fracties. De nieuwe resultaten mogen in de waterkolom maar weinig afwijken van de oude resultaten omdat die zijn gevalideerd aan meetpalen en remotesensingdata (van Kessel e.a., 2009).

Figuur 51 toont de berekende slibconcentratie als functie van de tijd in het station Markermeer Midden. Zowel de oorspronkelijke als de nieuwe resultaten zijn zichtbaar. De nieuwe resultaten zijn gebaseerd op het nieuwe, verfijnde rooster en zijn inclusief de derde fractie. Uit Figuur 51 blijkt dat de resultaten sterk vergelijkbaar zijn. De piekconcentraties van de nieuwe berekening zijn iets hoger vanwege de bijdrage van de derde fractie. Verder zijn de verschillen minimaal.

Figuur 52 toont het berekende ruimtelijke patroon van de slibconcentratie voor beide simulaties. De ruimtelijke patronen zijn sterk gelijkend, ook op andere tijdstippen (hier niet getoond). De lokaal hogere resolutie heeft derhalve geen invloed op de grootschalige slibverspreiding, conform de verwachting. Er mag worden verwacht dat lokale details in en rondom de vaargeul met het verfijnde model beter worden beschreven (zie bijvoorbeeld Figuur 53). Zonder lokale waarnemingen kan dit echter niet onomstotelijk worden aangetoond.



Figuur 51 Berekende zwevendstofconcentratie (mg/L) in Markermeer Midden, periode januari – juni 2006. Blauw = oude berekening; Groen = nieuwe berekening.



Figuur 52 Berekende zwevendestof concentratie (mg/l) op 17 maart 2006. Links = nieuwe berekening; Rechts = oude berekening.



Figuur 53 Berekende zwevendstof concentratie (mg/L) op 17 maart 2006 voor een detail locatie in de vaargeul. Links = nieuwe berekening; Rechts = oude berekening.