

Slibtransport over de IJgeul

Eindrapport

TUDelft Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen Sectie Vloeistofmechanica



Afstudeercommissie: Prof. dr. ir. J.A. Battjes dr. ir. C. Kranenburg dr. ir. J. van de Graaff ir. J.C. Winterwerp ir. G. Loman

Voorzitter Begeleider TU Delft Begeleider TU Delft Begeleider TU Delft Extern begeleider (Sectie Vloeistofmechanica) (Sectie Vloeistofmechanica) (Sectie Waterbouwkunde) (Sectie Vloeistofmechanica) (Hydronamic bv)

> W.P.L. van der Lans studienummer 502741 Oude Delft 15 2611 BA Delft

> >

Voorwoord

Luchthaven Schiphol zit tegen de grenzen van haar groei aan. Daarom worden er plannen ontwikkeld om een uitbreiding van Schiphol in de Noordzee te realiseren. Voor één van deze plannen, de 'Siemens/Boskalis variant', is het wenselijk zand te onttrekken aan de vaargeul bij IJmuiden, de IJgeul. Langs de Nederlandse kust van de Noordzee vindt een netto stroom van slib en sediment naar het noorden plaats. Door het verbreden en verdiepen van de IJgeul kan het zijn dat het slibtransport naar het noorden zoveel afneemt dat dit ongewenste gevolgen voor de Waddenzee met zich meebrengt.

In het kader van mijn afstuderen aan de Faculteit der Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft heeft een onderzoek plaats gevonden naar de invloed van de huidige en verruimde IJgeul op het slibtransport. Dit is geschied op grond van een vergelijking tussen de huidige situatie en een extrapolatie naar de toekomstige situatie van de IJgeul op basis van een slibtransportmodel.

Het afstudeerwerk wordt verricht zowel bij de vakgroep Waterbouw, sectie Vloeistofmechanica, als bij Hydronamic b.v., een onderdeel van Baggermaatschappij Boskalis n.v. De programmatuur die gebruikt zal worden in het onderzoek, wordt door het Waterloopkundig Laboratorium in Delft (Delft Hydraulics) geleverd.

De afstudeercommissie bestaat uit:

Prof. dr. ir. J.A. Battjes	Voorzitt
dr. ir. C. Kranenburg	Begeleid
ir. J.C. Winterwerp	Begeleid
dr. ir. J. van de Graaff	Begeleid
ir. G. Loman	Extern b

oorzitter egeleider TU Delft egeleider TU Delft egeleider TU Delft xtern begeleider (Sectie Vloeistofmechanica) (Sectie Vloeistofmechanica) (Sectie Vloeistofmechanica) (Sectie Kustwaterbouw) (Hydronamic bv)

Ik wil deze personen en het Waterloopkundig Laboratorium bedanken voor hun bereidwilligheid om mij te begeleiden bij dit onderzoek.

Bram van der Lans Juni 1998

Samenvatting

Om de groei van schiphol op te kunnen vangen, wordt er gekeken naar mogelijkheden om een luchthaven op een eiland voor de kust te creeren. Er zijn meerdere varianten ontwikkeld. Bij één van deze varianten wordt het zand, dat nodig is voor het eiland, onttrokken aan de vaargeul bij IJmuiden. Deze vaargeul, de IJgeul, wordt dan beduidend dieper en breder. Dit kan grote gevolgen hebben voor het slibtransport langs de Nederlandse Noordzeekust. In deze studie worden de gevolgen van het vergroten van de IJgeul op het slibtransport onderzocht.

Het transport wordt beïnvloed door een groot aantal mechanisme en grootheden. In de waterfase zijn vooral floccuatie en hindered settling van belang. Voor de sedimentatie en erosie processen heeft de bodemschuifspanning een grote invloed. Deze bodemschuifspanning wordt opgewekt door stroming en door golven. Het slibtransport en de grootheden en mechanismen die invloed hebben op het slibtransport zijn met behulp van een computermodel te simuleren.

Er zijn in Nederland een aantal slibtransportmodellen beschikbaar, onder andere: Slib3D, Delwaq, Sutrench en een onderzoeksversie van Trisula. Voor dit onderzoek is gekozen voor het gebruik van Trisula. Dit model kan zowel de waterbeweging als het slibtransport simuleren. Daarnaast is interactie tussen het slibconcentratie en de waterbeweging in het model opgenomen. Verder is het Trisula model direct voor gebruik beschikbaar en een goede begeleiding mogelijk.

De IJgeul heeft nu een breedte van 650 meter bij de haven, tot 750 meter op 30 kilometer van de kust. In de toekomstige situatie zal de breedte variëren van 740 tot 3650 meter. De diepte neemt toe van 19 meter tot 24 meter onder het gemiddelde zeeniveau. Op dit moment vindt er netto nauwelijks sedimentatie plaats in en rond de vaargeul.

Er is voor vier verschillende locaties een model van de IJgeul gemaakt. Deze modellen zijn per locatie gemaakt met twee verschillende randvoorwaarden en met verschillende geometrie. Als randvoorwaarden is een springtij en een doodtij opgelegd. Daarnaast is er voor één locatie een simulatie gemaakt die van springtij naar doodtij verloopt. In deze simulatie is sedimentatie en erosie opgenomen.

Na gebruik van het Trisula model en een studie naar de bodemschuifspanning opgewekt door windgolven kan de volgende eindconclusie worden getrokken:

Met het verbreden van de vaargeul bij IJmuiden ontstaat er tijdens een normale springdoodtij cyclus een sliblaag aan de bodem. De massa slib in deze laag bedraagt na één cyclus 42 kg/m². In de huidige situatie heeft deze laag een massa van 18 kg/m². Dit betekent dat de sedimentatie in de toekomstige situatie tijdens normale weerscondities een factor 2 hoger wordt ten opzichte van de huidige situatie. Golven met een grote periode hebben veel invloed op het slibtransport. Het optreden van ruig en stormachtig weer is zowel in de huidige als in de toekomstige situatie voldoende om de sliblaag op de bodem te eroderen.

Er treedt jaarlijks netto geen sedimentatie op in de verruimde vaargeul van IJmuiden.

Inhoud

Voo	rwoord	i
Sam	envatting	ii
1	Inleiding	1
1.		1
1.1	Algemene achtergrond	1
1.2	Locatie probleemgebied	2
1.3	'Afstudeerproject'	3
1.4	Opzet verslag	3
2.	Probleemanalyse	4
2.1	Inleiding	4
2.2	Probleemomschrijving	4
2.3	Probleemstelling	4
2.4	Doelstelling	4
3.	Slibeigenschappen	5
3.1	Inleiding	5
3.2	Algemeen	5
3.3	Grootte en vorm	5
3.4	Flocculatie	5
3.5	Reologie	6
3.6	Slibsamenstelling in Nederland	6
4	Slibtransnartmashaniaman	7
4.	Shotransportmeenanismen	
4.1	Inleiding	7
4.2	Bodemtase	7
4.3	Uitwisselingsfase	8
4.4	Waterfase	13
5.	Slibtransportmodellen	18
5.1	Inleiding	18
5.2	Delwaq	18
5.3	Slib3D	18
5.4	Trisula-slibmodel	18
5.5	Sutrench	19
5.6	Hiswa	21
6	Keuze slihtransnortmodel	24
6.1	Inleiding	24
6.2	Ficen can de modellen	24
0.2	Eisen aan de modellen	24
0.3	Overzicht en keuzeonderbouwing	25
7.	De IJgeul	26
7.1	Inleiding	26
7.2	Locatie	26
7.3	Bodem	27
7.4	Waterstromen	29
7.5	Slib	34
7.6	Uitbreiding van de vaargeul	37
8.	Modellering IJgeul	
8.1	Inleiding	38
8.2	Het simulatiegebied	38
83	Het rekengebied	38
84	Tiidstan	41
85	Bodemaeaevens	41
8.6	De waterbeweging	42
8.7	Slibeigenschappen en _concentratie	42
0.1	should be a second seco	74

Slibtransp	oort over de IJgeul	Eindrapport	juni 1998
8.8	Golfbeweging		43
8.9	Overzicht invoerparameters Trisula	í.	44
9. R	esultaten en analyse		45
9.1	Inleiding		45
9.2	Resultaten van de Trisula berekenin	ngen	45
9.3	Bodemschuifspanning		48
9.4	Interpretatie van de resultaten		51
10. Co	onclusies en aanbevelingen		54
10.1	Inleiding		54
10.2	Conclusies		54
10.3	Aanbevelingen		55
11. Li	teratuurlijst		

Bijlagen

1. Inleiding

1.1 Algemene achtergrond

1.1.1 Inleiding

Het blijkt dat luchthaven Schiphol tegen de grenzen van haar groei aanzit. Daarom worden er plannen ontwikkeld om een uitbreiding van Schiphol te realiseren. Er zijn daarvoor alternatieven ontwikkeld. Enkele daarvan zijn:

- uitbreiding van Schiphol op de huidige locatie
- een tweede nationale luchthaven of een dependance van Schiphol op de Maasvlakte
- een tweede nationale luchthaven of een dependance van Schiphol op een kunstmatig eiland voor de kust van Nederland
- een tweede nationale luchthaven of een dependance van Schiphol op een kunstmatig eiland in het IJsselmeer

Indien er voor het derde alternatief, een eiland voor de kust, wordt gekozen staan er meerdere varianten ter beschikking. Eén van deze varianten is de zogenaamde 'Siemens/Boskalis' variant. In dit verslag wordt nader ingegaan op de effecten van de aanleg van deze variant op het slibtransport langs de Nederlandse kust bij IJmuiden.

1.1.2 'Siemens/Boskalis' variant

Bij de 'Siemens/Boskalis' variant wordt een kunstmatig eiland voor de Nederlandse kust gecreëerd. Dit eiland zal ter hoogte van Zandvoort op een afstand van ongeveer 10 kilometer uit de kust komen. De keuze van deze locatie heeft te maken met de maximale afstand tot Schiphol van 30 kilometer met het oog op reistijden en een minimale afstand tot de kust van 10 kilometer in verband met geluidoverlast. In figuur 1-1 is de locatie van het eiland weergegeven.

Voor dit eiland is 1.165.000.000 m³ zand nodig. In de huidige plannen wordt dit zand gewonnen door de toegangsgeul van de haven van IJmuiden te vergroten. Deze vaargeul, de IJgeul, krijgt dan een breedte van ongeveer 2000 meter aan de kust tot 3000 meter op 25 kilometer uit de kust. Daarnaast wordt de gehele vaargeul verdiept tot 24 meter onder het gemiddelde zeeniveau. In hoofdstuk 7 wordt meer aandacht besteed aan de veranderingen van de IJgeul.

figuur 1-1 Locatie van de Siemens/Boskalis variant. Bron: Hydronamic b.v



1.1.3 Effecten voor het slibtransport

Door het verbreden van de IJgeul zal het sedimenttransport dwars over de vaargeul veranderen. Dit geldt voor zowel het transport van zand als voor het transport van slib. Er ontstaat een potentieel gevaar op een toename van de bezinking van het slib in de vaargeul. In deze studie wordt een voorspelling gedaan met betrekking tot het transport van het slib over de vaargeul. Het transport van zand blijft buiten beschouwing. Het onderzoek naar het slibtransport wordt door middel van een bureaustudie, met behulp van een computersimulatie, verricht. Aan de hand van deze simulaties kan bepaald worden in welke mate het slibtransport over de IJgeul zal veranderen na verbreding en verdieping van de vaargeul.

1.2 Locatie probleemgebied

Zoals vermeld in paragraaf 1.1.2 wordt er zand aan de IJgeul onttrokken. Het gebied van interesse voor deze studie ligt dan ook rondom de IJgeul. De IJgeul is de toegangsgeul van het IJ en de havens van IJmuiden en Amsterdam. De IJgeul ligt in de kustzone van het Nederlandse deel van de Noordzee. De geul heeft een diepte van ongeveer 20 meter, het omringende gebied varieert in diepte van 12 tot 16 meter. De geul strekt zich uit tot 30 kilometer vanuit de kust en gaat dan over in een naderingsgebied. In hoofdstuk 7 wordt meer vermeldt over de vorm en afmetingen van de vaargeul en het naderingsgebied.

1.3 'Afstudeerproject'

In het kader van dit afstuderen aan de Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft, wordt een onderzoek opgestart naar de invloed van de huidige en van de verruimde IJgeul op het slibtransport. Het afstudeerwerk wordt verricht zowel bij de vakgroep Waterbouw, sectie Vloeistofmechanica, als bij Hydronamic b.v., een onderdeel van Baggermaatschappij Boskalis n.v. De programmatuur die gebruikt zal worden in het onderzoek, wordt door het Waterloopkundig Laboratorium in Delft (Delft Hydraulics) geleverd. Het project loopt van november 1997 tot en met juli 1998.

De afstudeercommissie bestaat uit:

Prof. dr. ir. J.A. Battjes	Voorzitter	(Sectie Vloeistofmechanica)
dr. ir. C. Kranenburg	Begeleider TU Delft	(Sectie Vloeistofmechanica)
ir. J.C. Winterwerp	Begeleider TU Delft	(Sectie Vloeistofmechanica)
dr. ir. J. van de Graaff	Begeleider TU Delft	(Sectie Kustwaterbouw)
ir. G. Loman	Extern begeleider	(Hydronamic bv)

1.4 Opzet verslag

Dit verslag is een weergave van het afstudeerproject zoals in paragraaf 1.3 besproken. Eerst wordt aandacht geschonken aan de probleemanalyse en de doelstelling, vervolgens worden in hoofdstuk 3 kort enkele belangrijke eigenschappen van slib in het algemeen behandeld. Binnen het modelleren van slibtransport zijn een aantal mechanismen zoals turbulentie opgewekt door golven en grootheden zoals valsnelheid en concentratie van belang. Deze mechanismen en grootheden worden besproken in hoofdstuk 4. Met behulp van deze mechanismen en grootheden is een model op te stellen waarmee het slibtransport door water gesimuleerd kan worden. In hoofdstuk 5 worden een aantal van deze simulatiemodellen besproken, waarna in het daaropvolgende hoofdstuk een keuze wordt gemaakt uit deze modellen. Met behulp van het gekozen simulatiemodel wordt een computermodel van de IJgeul gemaakt. Alvorens dit mogelijk is, zal eerst naar de omstandigheden van het slib, de waterbeweging etc. rond en in de IJgeul moeten worden gekeken. In hoofdstuk 7 is een overzicht van de huidige en toekomstig situatie van de IJgeul gegeven. Met behulp van het simulatiemodel en een modellering van de IJgeul zoals omschreven in hoofdstuk 8 is de nieuwe situatie van de IJgeul te bepalen. In hoofdstuk 9 zijn de resultaten die het model oplevert weergegeven en geanalyseerd. Het verslag eindigt met de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 10, gevolgd door de literatuurlijst en de bijlagen.

2. Probleemanalyse

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beknopte omschrijving gegeven van het probleem en van de doelstelling van dit afstudeerproject.

2.2 Probleemomschrijving

Voor de aanleg van een tweede nationale luchthaven in de Noordzee zijn een aantal plannen in ontwikkeling. Eén van deze plannen betreft de zogenaamde 'Siemens/Boskalis variant'. Dit plan bestaat uit de aanleg van een eiland voor de kust van Nederland verbonden met het vasteland door een snelle ondergrondse treinverbinding met Schiphol. Voor dit kunstmatige eiland is een grote hoeveelheid zand vereist. Eén van de mogelijke winplaatsen voor dit zand is de vaargeul bij IJmuiden, de 'IJgeul'. Deze reeds bestaande geul moet in dat geval verbreed en verdiept worden.

Met het verbreden en verdiepen van de IJgeul kan het zijn dat het slibtransport langs de kust van de Noordzee zal veranderen. Het is van belang voor de Waddenzee dat een significant gedeelte van het slib dat langs de kust van de Noordzee naar het noorden stroomt, de Waddenzee bereikt. De vergroting van de IJgeul zal betekenen dat het stromingsbeeld over deze geul verandert: het water gaat langzamer stromen en het slib krijgt meer kans om te bezinken en een laag op de bodem te vormen. De vraag is echter of dit proces plaatsvindt en in welke mate het transport zal veranderen.

Naar zandtransport in de Noordzee is al veel onderzoek verricht. Het is mogelijk om een goede voorspelling te geven van het zandtransport na het verbreden en verdiepen van de IJgeul. Voor het transport van slib is dit minder éénduidig het geval. De laatste jaren is het onderzoek naar slib toegenomen, maar door de complexiteit van het slib en het slibtransport en door een onvolledig beeld van het slib in de Noordzee, is het nog steeds moeilijk om een betrouwbaar model voor het transport van slib op te stellen. De samenstelling van het slib is van groot belang en heeft veel invloed op de modellering. Op dit moment is een aantal modellen voor het transport van slib in gebruik (recente en minder recente). In dit onderzoek zal met behulp van één model een vergelijking tussen de huidige situatie en de verbrede situatie van de IJgeul worden gemaakt.

2.3 Probleemstelling

In hoeverre zal het slibtransport over de IJgeul relatief veranderen na verbreding en verdieping van de IJgeul?

2.4 Doelstelling

Een kwalitatieve vergelijking tussen het slibtransport over de IJgeul in de bestaande situatie en in de situatie met een verbrede en verdiepte IJgeul. De toekomstige situatie van de IJgeul wordt bekeken door middel van extrapolatie van de huidige situatie.

3. Slibeigenschappen

3.1 Inleiding

Zoals in de doelstelling besproken, wordt er een model van de IJgeul gemaakt. Alvorens slibmodellen besproken worden zal in dit en in het volgende hoofdstuk een korte omschrijving van slib en slibtransportmechanismen gegeven worden.

3.2 Algemeen

Slib bestaat uit water vermengd met klei, zand, silt, kwarts, kleimineralen, anorganische calcium-, ijzer-, en aluminiumverbindingen en uit organische stof. De korrelgrootteverdeling hangt sterk af van de onderlinge verhouding van deze elementen en de plaats van herkomst van het slib. Ook kan de samenstelling in de tijd variëren. Het onderscheid tussen zand en slib wordt over het algemeen gelegd bij een diameter van 63 μ m. Alle deeltjes kleiner dan 63 μ m vallen onder de siltfractie. Hierin worden de deeltjes van 2 μ m tot 63 μ m aangeduid als silt en de deeltje kleiner dan 2 μ m als klei. Omdat slib uit cohesief materiaal bestaat en organische processen ook een rol spelen zijn de eigenschappen van slib wezenlijk anders dan van zand. Ook in het slibtransport spelen andere processen dan in het transport van zand.

Op de samenstelling van het slib in de Nederlandse kustzone zal later worden ingegaan. Eerst worden een aantal belangrijke eigenschappen van slib, zoals flocculatie en reologisch gedrag kort behandeld. Ook wordt de grootte en de vorm van slibdeeltjes besproken [Van Olphen, 1977].

3.3 Grootte en vorm

Door de zeer kleine afmetingen van de slibdeeltjes en de daarbij behorende grote verhouding tussen oppervlak en massa (een specifiek oppervlakte in de orde van 10^5 m²kg⁻¹ is normaal voor natuurslib) spelen de oppervlaktekrachten een belangrijke rol. De cohesieve eigenschappen treden in het bijzonder op bij de deeltjes met een afmeting kleiner dan ongeveer 2 µm. De grootte van de hierbij optredende aantrekkende en afstotende krachten tussen de deeltjes hangen zowel van de eigenschappen van de deeltjes als van de samenstelling van het water af. De valsnelheid van het slib wordt voor een belangrijk deel bepaald door flocculatie [Van Olphen, 1977].

3.4 Flocculatie

Door de Brownse beweging in water en door turbulentie botsen slibdeeltjes voortdurend met elkaar. Na dit korte contact zullen de deeltjes weer loslaten. Dit beeld verandert geheel indien een (kleine) hoeveelheid zout zich in het water bevindt. In dat geval zullen de slibdeeltjes gaan samenklonteren en vlokken vormen. Dit verschijnsel wordt *flocculatie* genoemd en heeft een grote invloed op de valsnelheid van het slib. De gevolgen van flocculatie voor het gedrag van slib zullen in paragraaf 4.4.1 besproken worden.

De Brownse beweging is alleen van belang voor deeltjes kleiner dan 1 μ m. Voor grotere deeltjes is turbulentie de drijvende kracht achter flocculatie (zie paragraaf 4.4.2). Daarnaast is het verschil in valsnelheid tussen de deeltjes en de vlokken van belang voor flocculatie. De grootte van een vlok kan oplopen tot ongeveer 500 μ m.

Flocculatie treedt ook op indien er geen zout in het systeem aanwezig is, maar dit gebeurt met een dusdanig lage snelheid dat dit te verwaarlozen is. Er kan ook flocculatie optreden ten gevolge van organisch materiaal [Van Olphen, 1977].

3.5 Reologie

De weerstand van de slibbodem tegen stromen, deformatie en veranderingen in de structuur van het slib wordt gekarakteriseerd door de reologische eigenschappen van slib. Deze eigenschappen zijn belangrijk voor de schatting van de mate van erosie, demping van de turbulentie en de voorspelling van dichtheidsstromen en vloeibare modderlagen [Berlamont et al., 1993]. Parameters die de reologie van slib bepalen zijn onder meer: sedimentconcentratie, saliniteit, mineralogisch samenstelling, percentage organisch materiaal, het specifieke oppervlakte, pH-waarde en de redoxpotentiaal.

Metingen om de reologische eigenschappen van cohesief materiaal te bepalen zijn ingewikkeld en een standaard hiervoor is nog niet beschikbaar. Gezien het feit dat in weinig modellen direct rekening gehouden wordt met de reologie van het slib, worden de reologische eigenschappen van slib in dit rapport niet verder uitgewerkt.

3.6 Slibsamenstelling in Nederland

De samenstelling van de kleimineralen blijkt nauwelijks te verschillen tussen de slibsoorten uit de Waddenzee, Noordzee, Ooster- en Westerschelde [Straaten, 1954]. Bij de Nederlandse slibsoorten bestaat 80-90% van de kleimineralen uit illiet en verder montmorilloniet (5-10%), kaoliniet (5-10%) en kwarts (<5%). Het gehalte aan organische stof kan van plaats tot plaats verschillen vertonen. Het gehalte organische stof is onder andere van invloed op de flocculatie en op de valsnelheid [Van Leussen et al., 1982].

Omdat de samenstelling van het slib langs de Nederlandse kust van de Noordzee niet veel varieert, zal aangenomen worden dat het slib een constante samenstelling heeft langs de gehele westkust van Nederland.

4. Slibtransportmechanismen

4.1 Inleiding

In het voorafgaande hoofdstuk is een aantal belangrijke eigenschappen van slib in het algemeen besproken. Daarbij is niet gekeken naar de invloeden die het slib in beweging brengen. In dit hoofdstuk worden de mechanismen beschreven die van belang zijn voor het transport van slib door water, zoals de valsnelheid, sedimentatie, erosie en golven. De gegevens gepresenteerd in dit hoofdstuk dienen als richtlijn voor het vaststellen van de minimale eisen aan een slibtransportmodel. Als eerste zullen in de paragraaf 4.2 transportmechanismen van het slib in en op de bodem besproken worden. Vervolgens in paragraaf 4.3 de mechanismen en grootheden die het slib in suspensie dan wel tot sedimentatie brengen. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een behandeling van de mechanismen en grootheden die van invloed zijn op het slib in de waterfase, zoals de valsnelheid.

4.2 Bodemfase

4.2.1 Consolidatie

4.2.1.1 Inleiding

Tijdens een periode van sedimentatie bezinken vlokken en los gepakte slibdeeltjes op de bodem en vormen een nieuwe sedimentlaag die concentreert en consolideert. In de tijd neemt de stijfheid van deze laag toe en daarmee de mate van erodeerbaarheid af. Een goede kennis van het consolidatieproces is dus voor het modelleren van slibtransport van belang. Aan de hand van het consolidatieproces kan bepaald worden wat de benodigde bodemschuifspanning voor erosie is. Nadat het consolidatieproces in het algemeen is besproken, zal gekeken worden naar theorieën voor consolidatie, vervolgens worden enkele consolidatiemodellen bekeken.

4.2.1.2 Het consolidatie proces

Tijdens het consolideren treedt het water dat zich tussen de slibvlokken bevindt, naar buiten. Hierdoor kan het slib dichter op elkaar gestapeld worden en ontstaat er een sterkere sliblaag. De snelheid waarmee het slib consolideert is afhankelijk van de laagdikte van het ongeconsolideerde slib en de permeabiliteit van het slib. Indien er slechts een dun laagje slib aanwezig is, zal het proces snel verlopen. Bij een laagdikte van enkele millimeters is één dag al voldoende om het slib te laten consolideren tot een sterke laag.

4.2.1.3 Theorieën

De mate van consolidatie kan voorspeld worden indien de permeabiliteit (de waterflux door een bepaald oppervlak) en de korrelspanning (totale druk verminderd met de waterdruk) in de tijd bekend zijn. Geen van deze parameters is echter een eenvoudige functie van de samenstelling van het slib. De parameters zullen daarom beide op empirische wijze bepaald moeten worden [Berlamont, 1993].

Er zijn twee fundamenteel verschillende benaderingen voor het modelleren van de consolidatie van slib:

De eerste benadering is gebaseerd op sedimentatie. In dit model blijft de massa van de vaste deeltjes behouden en de verticale uitwisseling wordt gemodelleerd als zakkingflux. De aanname over de invloed van lokale dichtheid van het slib in suspensie op de valsnelheid (door hindered settling) is van belang.

De tweede benadering is gebaseerd op behoud van massa van het poriënwater en brengt een relatie aan tussen de samendrukking van deeltjes en de verticale drukgradiënt via de permeabiliteit. Indien de druk op de deeltjes wordt opgesplitst in korrelspanning en waterspanning blijkt dat alleen de laatste invloed heeft op het transport van water. Dit gecombineerd met het behoud van watermassa, geeft de vergelijking van Gibson. Deze stelt een relatie tussen permeabiliteit en korrelspanning als functie van het poriëngetal.

Het eerste model is een vereenvoudiging van het tweede model. Het eerste model is meer gangbaar voor situaties met suspensie, het tweede model voor situaties waarbij het slib een grote dichtheid heeft (zoals een vloeibare modderlaag).

4.2.1.4 Modellen

Er zijn enkele consolidatiemodellen ontwikkeld. In deze modellen wordt gewerkt met empirische algoritmes en deze modellen zijn gebaseerd op een gegeven evolutie van de concentratie in de tijd. Het modelleren van consolidatie op zich brengt niet veel problemen met zich mee, maar het doorrekenen van het model vergt enige tijd. Dit is het gevolg van de kleine verticale stap die nodig is om het proces te discretiseren Teisson et al., 1993].

Naast de twee consolidatiemodellen beschreven in paragraaf 4.2.1.3, wordt soms ook gebruik gemaakt van meer empirische modellen. Een voorbeeld hiervan is het model gebruikt door Teisson [Teisson, 1991]. Hierin wordt de bodem gezien als een uit meerdere lagen opgebouwde sliblaag. Met de diepte neemt de mate van consolidatie per laag steeds verder toe. Indien er sedimentatie optreedt, wordt de bovenste laag dikker. Na een bepaalde tijd zal de bovenste laag een deel van zijn geconsolideerde materiaal 'afstaan' aan de daaronder liggende laag, die op zijn beurt een gedeelte afstaat aan de daaronder liggende laag, etc. Bij erosie neemt de dikte van de bovenste laag af. De andere lagen blijven dan intact, totdat de bovenste laag geheel geërodeerd is.

4.3 Uitwisselingsfase

4.3.1 Sedimentatie

Voor de sedimentatie is het noodzakelijk dat de bodemschuifspanning onder een bepaalde grens komt. Er wordt in dat geval sediment (slib) afgezet en de concentratie in de waterkolom zal afnemen. Voor sedimentatie geldt volgens Krone [Krone, 1962]:

$$\frac{dm}{dt} = C_b W_s \frac{(\tau_s - \tau)}{\tau_s} \qquad (\tau < \tau_s)$$
(4-1)

Hierin is:

m	massa sediment op de bodem	(g/m^2)
t	tijd	(s)
τ	bodemschuifspanning	(N/m^2)
τ_s	kritieke schuifspanning voor sedimentatie	(N/m^2)
Cb	slibconcentratie nabij de bodem	(g/m^3)
W_s	valsnelheid	(m/s)

De kritieke schuifspanning wordt bepaald door het slib. Ook de slibvlokgrootte en de valsnelheid spelen een rol bij de grootte van τ_s . Een grotere slibvlok zal sneller op de bodem blijven liggen dan een kleinere slibvlok. Over het algemeen ligt de kritieke schuifspanning voor sedimentatie tussen 0.04 en 0.15 N/m² [Verlaan et al., 1992].

Uit onderzoek van onder andere Metha blijkt dat er ook sedimentatie optreedt indien de schuifspanning groter is dan de kritieke schuifspanning voor sedimentatie. Deze nieuwe beschrijvingen bevatten constanten die met name bij niet-stationaire stromingscondities niet eenduidig te bepalen zijn [Moser et al., 1991]. Op deze nieuwe beschrijvingen wordt in dit onderzoek niet verder ingegaan.

4.3.2 Erosie

4.3.2.1 Inleiding

Bij erosie wordt materiaal vanuit de bodem in suspensie gebracht. Dit treedt op indien de bodemschuifspanning groter is dan de kritieke bodemschuifspanning voor erosie. De bodemschuifspanning wordt veroorzaakt door stroming en door golven. Dit laatste effect zal later besproken worden. Door erosie zal de concentratie in de waterkolom toenemen. In de literatuur wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten erosie: oppervlakteerosie en massa-erosie. Bij oppervlakte-erosie treden de slibvlokken afzonderlijk in suspensie, bij massa-erosie komen grote brokken sediment in één keer in suspensie. Oppervlakte-erosie is een gedraineerd proces. Dit houdt in dat door het binnentreden van water in de bodem, de slibvlok door een onderdruk uit de bodem wordt meegenomen. Massa-erosie is een ongedraineerd proces; de bodemschuifspanning is zo groot dat de drainage geen rol meer speelt.

4.3.2.2 Oppervlakte-erosie

De grootte van de oppervlakte-erosie wordt vaak evenredig met de bodemschuifspanning gesteld. De volgende betrekking van Partheniades wordt veel gebruikt [Partheniades, 1962]:

$$\frac{dm}{dt} = -M \frac{(\tau - \tau_e)}{\tau_e} \qquad (\tau > \tau_e)$$
(4-2)

hierin is:

m	massa sediment op de bodem	(g/m^2)
М	erosieconstante	(g/m^2s)
t	tijd	(s)
τ	bodemschuifspanning	(N/m^2)
τ_{e}	kritieke schuifspanning voor erosie	(N/m^2)

De grootte van M en τ_e worden bepaald door het soort slib en de mate van consolidatie van het bodemmateriaal. Voor veel slib soorten kan worden volstaan met M≈10⁻³ g/m²s en $\tau_e \approx 0,2-0,6$ N/m² [Verlaan, et al., 1992]. Deze betrekking wordt vooral gebruikt voor goed geconsolideerde bodems met een uniforme sterkte over de dikte van de sliblaag. Bij een bepaalde watersnelheid zal er spraken zijn van een constante erosie. Ook voor een ongeconsolideerde bodem is deze betrekking te gebruiken. In dat geval moet de laag dun zijn en moet er sprake zijn van een uniforme sterkteverdeling over de dikte van de sliblaag. De situatie met een dikke ongeconsolideerde sliblaag of een sliblaag die al gedeeltelijk geconsolideerd is wordt behandeld in paragraaf 4.3.2.4.

4.3.2.3 Massa-erosie

Bij massa-erosie verweekt de bodem onder invloed van golven en ten gevolge van turbulente drukfluctuaties [Verlaan et al., 1992]. Hierdoor neemt de kritieke erosieschuifspanning significant af. Bodemverweking of fluidisatie is een direct gevolg van periodieke drukfluctuaties die golven teweeg brengen. Hierdoor kunnen plotseling grote stukken bodemmateriaal los komen en in suspensie raken. Erosiesnelheden bij massa-erosie zijn een orde van grootte hoger dan bij oppervlakte-erosie.

Voor massa-erosie kan in principe dezelfde formule gebruikt worden als voor oppervlakte-erosie. Massa-erosie treedt over het algemeen pas op bij bodemschuifspanningen die veel hoger liggen dan bij oppervlakte-erosie. De kritieke bodemschuifspanningen verschillen per bodem en zijn sterk afhankelijk van de dichtheid van de bodem. Ter illustratie is in figuur 4-1 een voorbeeld gegeven van de relatie tussen dichtheid en kritieke bodemschuifspanning voor oppervlakte-erosie en massa-erosie. Het voorbeeld betreft een laag slib uit een meer met een vrij hoge fractie organisch materiaal [Metha, 1991]. In de situatie rondom de IJgeul zal over het algemeen weinig massaerosie plaatsvinden, omdat er in dat gebied vrijwel geen slibbodem aanwezig is [Alphen, 1990]. In het gebied ten noorden van de IJgeul is er echter wel een (kleine) hoeveelheid

Slibtrans	port	over	de	IJgeul	

Eindrapport

juni 1998

slib in de bovenste 20 centimeter van de bodem (zie hoofdstuk 7) en ook in de IJgeul zelf kan zich een sliblaag vormen.

figuur 4-1 Relatie tussen de bodem afschuifsterkte en de bodemdichtheid. Het betreft slib met een hoge concentratie organisch materiaal [Metha, 1991]



4.3.2.4 Licht geconsolideerde bodem

In sommige gevallen kan er spraken zijn van een zachte, gelaagde slibbodem. Dit houdt in dat de bodem in enige mate geconsolideerd is. In dat geval kan met het model van Parchure gewerkt worden [Parchure, 1984]:

$$\frac{dm}{dt} = -\varepsilon_f e^{\alpha (\tau - \tau_s(z))^{\beta}} \qquad (\tau > \tau_s)$$
(4-3)

hierin is:

m	massa sediment op de bodem	(g/m^2)
ε _f	vlokerosiesnelheid	$(g/m^2/s)$
α	coëfficiënt	$(N/m^2)^{-\beta}$
β	exponent	(-)
τ_s	schuifsterkte van de slibbodem	(N/m^2)
z	hoogte ten opzichte van referentie niveau	(m)

Meer informatie over consolidatieprocessen en -modellering is reeds behandeld in paragraaf 4.2.1.

4.3.3 Bodemschuifspanning

4.3.3.1 Inleiding

De grootte van erosie en sedimentatie wordt onder andere bepaald door de bodemschuifspanning. In de voorgaande paragrafen is behandeld wat het effect van bodemschuifspanning op het slibtransport is. Hierbij is geen onderscheid gemaakt tussen bodemschuifspanning opgewekt door golven en opgewekt door stroming. In deze paragraaf wordt de herkomst van de bodemschuifspanning besproken.

4.3.3.2 Bodemschuifspanning opgewekt door golven.

Voor korte golven gelden de volgende vergelijkingen:

$$u = \frac{\omega H}{2} \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t)$$
(4-4)

$$w = \frac{\omega H}{2} \frac{\sinh(k2)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t)$$
(4-5)

hierin is:

u	horizontale snelheidscomponent	(m/s)
w	verticale snelheidscomponent	(m/s)
ω	hoekfrequentie	(s^{-1})
Т	periode	(s)
Н	golfhoogte	(m)
k	golfgetal	(m^{-1})
λ	golflengte	(m)
h	waterdiepte	(m)
t	tijd	(s)
Z	hoogte ten opzichte van de bodem	(m)

De horizontale snelheid aan de bodem veroorzaakt door een korte golf, is:

$$u = \frac{\omega H}{2} \frac{1}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \tag{4-6}$$

De maximale snelheid aan de bodem wordt dan:

$$\hat{u}_o = \frac{\omega H}{2} \frac{1}{\sinh(kh)} \tag{4-7}$$

De maximale bodemschuifspanning als gevolg van golven in een turbulente situatie is [Velden, 1989]:

$$\hat{\tau}_w = \frac{\rho f_w}{2} \hat{u}_o^2 \qquad (4-8)$$

Voor f_w zijn vele betrekkingen bekend. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen een hydraulisch ruwe en gladde bodem. In het geval van een ruwe bodem geldt voor f_w [Winterwerp, 1998]:

$$\frac{\hat{X}_o}{z_o} < 47,1:$$
 $f_w = 0.3$ (4-9)

$$\frac{\hat{X}_o}{z_o} \ge 47,1: \qquad f_w = 0.00251e^{9,94 \left(\frac{z_o}{\hat{X}_o}\right)^{-0.19}}$$
(4-10)

met

$$\hat{X}_o = \frac{\hat{u}_o}{\omega} \tag{4-11}$$

$$z_o = \frac{r}{30} \tag{4-12}$$

hierin is:

Xo	orbitale uitwijking op de bodem	(m)
Zo	ruwheidshoogte	(m)
r	ribbelhoogte	(m)

Slibtransport over de IJgeul Eindrapport	juni 1998
--	-----------

In slibtransportmodellen worden in sommige gevallen andere formules gebruikt. Deze wijken in basis echter niet veel af van de hier gegeven betrekkingen. Ook deze modellen maken onderscheid tussen een hydraulisch gladde en hydraulisch ruwe bodem.

Door de invloed van golven ontstaat er een grenslaag aan de bodem gedefinieerd door:

$$\partial_w = \frac{2\kappa}{\omega} \sqrt{u_{*b}^2 + u_{*w}^2} \tag{4-13}$$

hierin is:

δ	dikte van de door golven geïntroduceerde grenslaag	(m)
к	Von Karman coëfficiënt	(-)
u*b	bodemschuifspanning snelheid ten gevolge van stroming	(m/s)
u _{*w}	bodemschuifspanning snelheid ten gevolge van golven	(m/s)

Boven deze grenslaag is de invloed van de golven op de turbulentie verwaarloosbaar. Golven hebben dus vooral invloed op de bodemschuifspaning en niet zozeer op de turbulentie in de waterkolom [Grant en Madsen, 1979].

4.3.3.3 Bodemschuifspanning opgewekt door stroming

Voor bodemschuifspanning ten gevolge van stroming kan een vergelijkbare formule als voor bodemschuifspanning ten gevolge van golven worden opgesteld:

$$\tau_c = \rho u_*^2 \tag{4-14}$$

hierin is:

$\tau_{\rm c}$	bodemschuifspanning opgewekt door stroming	(N/m^2)
u+	bodemschuifspanning snelheid	(m/s)

met

$$u_* = u \frac{\sqrt{g}}{C} \tag{4-15}$$

en

$$C = 18Log \frac{12h}{r} \tag{4-16}$$

hierin is:

u	diepte gemiddelde snelheid	(m/s)
С	Chézy waarde	$(m^{1/2}/s)$
h	waterdiepte	(m)
r	ribbelhoogte	(m)

4.3.3.4 Bodemschuifspanning opgewekt door stroming en golven

Wanneer bodemschuifspanning zowel door stroming als door golven wordt opgewekt, wordt de totale bodemschuifspanning gevonden door:

$$\tau_{cw} = \tau_c + \frac{1}{2}\hat{\tau}_w \tag{4-17}$$

4.4 Waterfase

4.4.1 Valsnelheid

4.4.1.1 Inleiding

De valsnelheid van een deeltje wordt bepaald door de korreldiameter, de viscositeit van het water, de dichtheid van het water en van het slib en de versnelling van de zwaartekracht. In tegenstelling tot niet-cohesief materiaal speelt bij slib ook de concentratie een rol. Door flocculatie verandert de relatieve dichtheid van het slib ten opzichte van die van het water. In de literatuur wordt een onderscheid gemaakt tussen hoge en lage concentraties.

4.4.1.2 Lage concentratie

Door het optreden van flocculatie zal bij lage concentraties de valsnelheid toenemen met de concentratie. Bij hoge concentraties is dit niet het geval. Voor de valsnelheid bij lage concentraties geldt in het geval van flocculatie en een constante viscositeit en valversnelling [Van Leussen, 1994]:

$W_{s,L} =$	$= \alpha c^{\beta}$	(4-18)
hierin is:		
W _{s,L}	valsnelheid	(m/s)
С	concentratie	(g/l)
α	coëfficiënt	$(m^{1-3\beta}kg^{-\beta}s^{-1})$
β	constante	(-)

De exponent β kan variëren tussen 0,6 en 3,0. Er is nog weinig bekend over de fysische, chemische en biologische achtergrond van de verschillen tussen de resultaten van slib uit verschillende locaties. In figuur 4-2 is voor een aantal verschillende slibsoorten de relatie tussen concentratie en valsnelheid gegeven [Eisma et al., 1997]. Via het flocculatieeffect worden de korreldiameter en dichtheid door de concentratie bepaald. De concentratie is dus, zoals te zien in de formule, van groot belang voor de valsnelheid van het slib. Bij hogere concentraties zal de valsnelheid daarom ook hoger zijn. Het effect van flocculatie speelt een rol bij concentraties van de orde 10 mg/l tot enkele gram per liter.





4.4.1.3 Hoge concentratie

Bij hoger wordende concentraties neemt de valsnelheid minder snel toe en zal op dan duur zelfs afnemen. Dit is het gevolg van de terugstroming van de door de slibvlok verplaatste vloeistof. Ook andere effecten zoals het botsen van deeltjes spelen een rol. Dit effect wordt *hindered settling* genoemd. Bij hogere concentraties geldt [Leussen, 1994]:

$$w_{s,H} = (1 - kc)^{\beta} w_s \tag{4-19}$$

hierin is:

W _{s.H}	valsnelheid	(m/s)
Ws	valsnelheid in een stilstaande vloeistof	(m/s)
β	constante	(-)
k	constante	$(m^{3}kg^{-1})$

In deze formule is $k\approx 0,008 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Het Reynolds korrelgetal is van invloed op β waarvoor in het algemeen geldt: $3 < \beta < 5$. In de meeste gevallen is $\beta \approx 5$. De effectieve valsnelheid blijft door de bovenstaande effecten bij concentraties vanaf 2 à 3 g/l vrijwel constant en zal bij concentraties vanaf 20 g/l zelfs afnemen. In figuur 4-3 is een voorbeeld van de hindered settling gegeven voor slib uit het Severn Estuarium [Verlaan et al., 1992].



Zoals uit figuur 4-3 blijkt is het afhankelijk van de te verwachten slibconcentratie of hindered settling een rol speelt. In het gebied rondom de IJgeul zal de concentratie over het algemeen echter zo laag zijn dat hier geen sprake is van hindered settling.

Alhoewel de bovenstaande relaties door veel onderzoekers gehanteerd worden, zijn er ook situaties bekend waarbij de in-situ valsnelheid en de concentratie geen correlatie vertonen. Een voorbeeld daarvan is de Atchafalaya Bay. In dit geval heeft het slib een relatief zeer lage cohesie. Voor verdere details zie [Heltzel et al., 1987].

4.4.1.4 Saliniteit

Naast de concentratie van het slib is ook de hoeveelheid zout in het water van belang. Dit bepaalt immers in hoeverre de slibdeeltjes vlokken zullen vormen (zie paragraaf 3.4). In het algemeen wordt aangenomen dat een zeer kleine hoeveelheid zout in het water al voldoende is om flocculatie te veroorzaken. In sommige estuaria in Europa en in Noord-Amerika is dat echter niet het geval. Dit wordt veroorzaakt door het relatief hoge aandeel van organisch materiaal (dood of levend) in het slib.

figuur 4-3 Valsnelheid als functie van de concentratie voor slib uit het Severn Estuarium [Verlaan, 1992] Een beschrijving van het effect van zout in het water op de valsnelheid van slib is [Uittenbogaard, 1996]:

$$w_{s,S}(S) = \frac{1}{2} w_{s,o} \left[\left(\frac{w_{s,m}}{w_{s,o}} + 1 \right) - \left(\frac{w_{s,m}}{w_{s,o}} - 1 \right) \cos \left(\frac{\pi S}{S_c} \right) \right] \qquad S < S_c \qquad (4-20)$$
$$w_{s,S}(S) = w_{s,m} \qquad S \ge S_c : \qquad (4-21)$$

hierin is:

S	saliniteit	(ppt)
Sc	saliniteit bij volledige flocculatie	(ppt)
W _{s,o}	valsnelheid bij S=0	(m/s)
W _{s,m}	valsnelheid bij S=S _c	(m/s)

4.4.2 Turbulentie

Tenslotte heeft ook de turbulentie van het water invloed op de valsnelheid van de slibdeeltjes. Een bruikbare benadering voor de invloed van turbulentie is [Van Leussen, 1994, Uittenbogaard, 1996]:

$$w_{s,T} = w_s \frac{1 + aG}{1 + bG^2}$$
(4-22)

hierin is:

Ws	valsnelheid bij G=0	(m/s)
W _{s.T}	valsnelheid	(m/s)
a	empirische coëfficiënt	(s)
b	empirische coëfficiënt	(s^{2})
G	dissipatie parameter volgens:	(s ⁻¹)
	$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{v}}$	
ν	kinematische viscositeit	(m^2/s)
3	turbulente energie dissipatiesnelheid	(m^2/s^3)

Door de hoge turbulente energiedissipatie in de onderste laag van de waterkolom is de dissipatie parameter G groter aan de bodem dan in de rest van de waterkolom. Hierdoor kan het zijn dat de vlokken weer opgebroken worden. Het effect hiervan wordt afgebeeld in figuur 4-4 uit [Malcherek en Zielke, 1996]. Hierin is te zien dat ten gevolge van flocculatie aanvankelijk de valsnelheid toeneemt, waarna deze door vlokafbraak afneemt. Daarna neemt de valsnelheid verder af ten gevolge van de toeneemende turbulentie. Deze fase wordt ook wel omschreven als *break up*. Tijdens de break up worden de vlokken gedeeltelijk afgebroken, hierdoor neemt de relatieve dichtheid toe, maar de valsnelheid neemt af. Een voorbeeld van de bovenstaande vergelijking is gegeven in figuur 4-4 met daarbij als waarden voor a en b resp. 0,3 s en 0,03 s².

Eindrapport

figuur 4-4 Invloed van de dissipatie parameter G op de valsnelheid van vlokken [Malcherek en Zielke, 1996]



4.4.3 Verzadigingsconcentratie

De slibconcentratie in suspensie of in de bodem is bepalend voor het type transportmechanisme dat zal optreden. Zoals uit paragraaf 4.4.1 blijkt is de slibconcentratie in suspensie van invloed op de vlokgrootte en daarmee op de valsnelheid. De slibconcentratie in de bodem bepaalt of er al dan niet sprake is van een vloeibare modderlaag. Ook is het bepalend voor de mate van consolidatie van de slibbodem. Een verdere beschrijving van de slibconcentratie in de Nederlandse kustzone en rond de IJgeul is gegeven in paragraaf 7.5.1.

Volgens [Winterwerp, 1998] is er voor iedere stromingssituatie een slibconcentratie te bepalen waarboven het slib niet meer in suspensie gehouden kan worden. Deze bovengrens wordt de verzadigingsconcentratie genoemd en kan voor stationaire stroming worden omschreven door:

$$C_s \propto \frac{\rho}{g} \frac{U_*^3}{hW_*} \tag{4-23}$$

hierin is:

Cs	verzadigingsconcentratie	(kg/m^3)
ρ	dichtheid water	(kg/m^3)
U.	schuifspanning snelheid	(m/s)
h	waterdiepte	(m)
Ws	valsnelheid	(m/s)

Voor getijstroming geldt:

$$C_s \propto \frac{\rho}{g} \frac{U^{8/3}}{hW_s^{2/3}}$$
 (4-24)

hierin is:

U maximale stroomsnelheid (m/s) Een waterkolom met een dieptegemiddelde concentratie slib onder de verzadigingsconcentratie kan het slib in suspensie houden. De hierboven gegeven formules geven een indicatie van deze verzadigingsconcentratie aan. In de situatie van de IJgeul geldt als waarde voor C_s tijdens doodtij C_s \approx 35 kg/m³.

4.4.4 Getijdewerking

Als waterbewegingsmechanisme is het getijde van groot belang voor het slibtransport. Vaak zorgen golfbewegingen voor het in suspensie brengen en houden van het slib. Het getij heeft een grote invloed op het verplaatsen van het slib. Dit geldt vooral indien het getij asymmetrisch is en dus een netto stroming heeft. In de Nederlandse kustzone heeft het gemiddeld getij een netto stroming naar het noorden. In paragraaf 7.4.1 wordt een gedetailleerde beschrijving van het getij rond de IJgeul gegeven.

4.4.5 Windgolven en stormen

Windgolven hebben invloed op de bodemschuifspanning. In de waterkolom zal als gevolg van golfbeweging de hoeveelheid sediment variëren. Het effect van golven op slibtransport wordt vooral bepaald door het 'opwoelen' van het slib op de bodem. Hierdoor komt er meer slib in de waterkolom. Het effect van golven op een eventuele stroming, en daarmee het horizontale slibtransport, is veel kleiner. De golfbeweging heeft dus vooral invloed op het in suspensie brengen van materiaal.

Door deze invloed kan de bovenste laag van de bodem vloeibaar worden (verweken) en in suspensie komen. Als gevolg van de asymmetrie van de ondiepwatergolf kan er een netto transport optreden. Dit treedt echter alleen in significante mate op indien de golfperiode van dezelfde of hogere orde is dan de tijd nodig voor bezinking en resuspensie [Dronkers et al., 1990]. Met behulp van de formules zoals geformuleerd in paragraaf 4.3.3 kan de invloed van golven op het slibtransport bepaald worden. In hoofdstuk 9 wordt hierover meer informatie gegeven.

4.4.6 Dichtheidsstromen

Evenals bij het getij zijn dichtheidsstromen vooral van belang voor de waterbeweging. Zoals in hoofdstuk 7 zal blijken, treedt er een netto transport op van oppervlaktewater naar het noorden en aan de bodem een stroming naar de kust toe gericht. Deze laatste stroming zorgt ervoor dat bezonken slib weer dicht bij de kust in suspensie wordt gebracht. De noordwaartse stroming zorgt vooral voor een verplaatsing van het slib langs de kust.

Verder kan het zoetere water via de flocculatie van invloed zijn op de valsnelheid van het slib. Door de verschillen tussen de saliniteit van het zoute en het zoetere water kunnen dichtheidstromen van invloed zijn op de valsnelheid (zie paragraaf 4.4.1.4). Er kunnen hierdoor lokaal verschillen optreden in valsnelheid.

5. Slibtransportmodellen

5.1 Inleiding

Om het transport van slib door water te simuleren zijn een aantal modellen in Nederland beschikbaar. In dit hoofdstuk worden drie sedimenttransportmodellen beschreven. Waarvan er één ook als waterbewegingsmodel gebruikt kan worden. Dit model kan worden gebruikt om de invoer van de waterbeweging voor de slibtransportmodellen te genereren. Verder wordt er aandacht besteed aan een golfmodel. Dit model kan gebruikt worden om de golfparameters te bepalen die van invloed kunnen zijn op het slibtransport.

5.2 Delwaq

Delwaq is een waterkwaliteitsmodel ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium in Delft. Het Delwaq model is niet in staat om waterbeweging te modelleren. Daarom moet het model naast een waterbewegingsmodel worden gebruikt. Een veel gebruikt model hiervoor is Trisula.

Delwaq is gebaseerd op het behoud van massa. Naast het simuleren van slib is Delwaq ook in staat om andere eigenschappen van het water te simuleren zoals temperatuur en zoutgehalte. De basis voor de modellering van het slibtransport in Trisula en in Delwaq is hetzelfde, waarbij in Delwaq geen invloed van de slibbeweging op de waterbeweging aanwezig is. Zie ook paragraaf 5.4.2.

5.3 Slib3D

Delft3D is een slibmodel van het R.I.K.Z. De basis van Slib3D wordt gevormd door de statistische momenten methode om het slibtransport te beschrijven. Het voordeel van deze statistische momenten methode is een goede weergave van scherpe gradiënten in de sedimentconcentratie. Een goede koppeling tussen de waterbeweging en de slibbeweging is door de momenten methode niet mogelijk.

5.4 Trisula-slibmodel

5.4.1 Inleiding

Trisula is een 3D waterbewegingsmodel van het Waterloopkundig Laboratorium in Delft. Trisula kan rekenen met dichtheidsstromen, Coriolis krachten, getijdestroming, horizontale drukgradiënten, windschuifspanningen aan het oppervlak en zout- en warmtetransport. Voor meer gedetailleerde modelleringen van de waterkwaliteit wordt Trisula vaak gekoppeld aan Delwaq (zie paragraaf 5.2). Er is ook een onderzoeksversie van Trisula beschikbaar waarin een slibtransportmodule is opgenomen. Het watertransportmodel in deze versie is niet veranderd ten opzichte van andere Trisula versies. Van de slibtransport module is ook de code beschikbaar. Hierdoor is het mogelijk enige veranderingen in het model aan te brengen.

5.4.2 Modelbasis voor het slibtransport

Er zijn twee Trisula-varianten voor het slibtransport beschikbaar. De eerste variant kent geen sedimentatie en erosie, de tweede variant geen demping van de turbulentie door hoge concentraties. Als eerste wordt de variant zonder sedimentatie behandeld, daarna de variant met sedimentatie en erosie.

Om het cohesieve karakter van slib te modelleren is het mogelijk een concentratieafhankelijke valsnelheid te definiëren. Hierdoor is het mogelijk de valsnelheid met de concentratie te laten variëren. Indien een constante valsnelheid wordt opgegeven, reduceert het model met betrekking tot de valsnelheid tot een niet-cohesief model. Een verhoogde concentratie van het slib veroorzaakt echter een demping van de turbulentie en daarmee van de verticale menging van het slib. Uitwisseling van slib in de waterkolom vindt plaats door middel van transport tussen aaneengesloten lagen. Omdat slibtransport op een kleine schaal werkt, zijn voor een realistisch slibmodel relatief meer lagen nodig dan bij een watertransportmodel. Het effect van golven op het slibtransport is niet in de module opgenomen, evenmin als erosie of sedimentatie aan de bodem. Het effect van golven kan worden bekeken aan de hand van de door golven opgewekte bodemschuifspanning. Erosie en sedimentatie worden bepaald door de concentratie en de bodemschuifspanning in de onderste laag van het Trisula-slibmodel te bekijken. Hierover wordt meer vermeld in hoofdstuk 9. Een uitwisseling tussen de bodem en de waterkolom vindt er niet plaats. Het Trisulaslibmodel kan dus geen morfologische veranderingen simuleren. Een uitgebreide beschrijving van de slibtransportmodule in Trisula kan worden gevonden in [Uittenbogaard, et al., 1996]. De modellering van de waterbeweging in Trisula alsmede het gebruikte rekenschema wordt nader omschreven in paragraaf 5.4.3.

In de Trisula-variant met sedimentatie en erosie, worden de sedimentatie en erosie formules volgens Partheniades en Krone gebruikt. Een uitgebreide omschrijving van deze formules is reeds gegeven in hoofdstuk 4. Demping op de turbulentie door een hoge concentratie is in deze Trisula-variant uitgeschakeld.

5.4.3 Modelbasis voor de waterbeweging

De waterbewegingsvergelijkingen in Trisula de zijn gebaseerd op ondiepwatervergelijkingen. Deze vergelijkingen worden in bijlage A beschreven. Door als uitgangspunt de ondiepwatervergelijkingen te nemen, worden er twee belangrijke restricties aan het programma opgelegd. Ten eerste wordt de verticale versnelling niet goed meengenomen. Ten tweede kunnen plotselinge veranderingen in de bodemtopografie niet worden gevolgd. De vloeistof is onsamendrukbaar en dichtheidsvariaties worden verwaarloosd in de bewegingsvergelijkingen behalve in de buoyancy term (de Boussinesq benadering).

Verticale turbulente viscositeit en diffusiviteit worden gemodelleerd door stromingsafhankelijke coëfficiënten. Trisula bevat verschillende turbulentiemodellen: een algebraïsch model, het k-L model en het k-turbulentie model. De horizontale turbulente diffusiecoëfficiënten zijn constant in de ruimte en in de tijd.

5.4.4 Numeriek schema

De impulsvergelijkingen, gebruikt in Trisula, worden vertikaal over de lagen geïntegreerd. Hierdoor ontstaat er een stelsel vergelijkingen met een 2DH karakter. Het koppelen van twee opeenvolgende lagen gebeurt door middel van verticale advectie en diffusie. De vergelijkingen worden opgelost door een impliciete methode (Crank Nicolson). Hierdoor is een grote tijdsintegratiestap mogelijk zonder dat het systeem instabiel wordt.

In het horizontale vlak wordt een 'staggered grid' gebruikt in combinatie met een 'alternating direction implicit' schema (A.D.I.)

5.5 Sutrench

5.5.1 Inleiding

Sutrench is een tweedimensionaal verticaal wiskundig model voor sedimentatie in kanalen en geulen door stroming en golven. Oorspronkelijk is Sutrench geschreven voor niet-cohesief sediment, maar sinds 1995 is er ook een module voor het transport van cohesief sediment opgenomen. Evenals Trisula kan Sutrench zowel de waterbeweging als het sedimenttransport simuleren. Voor de waterbeweging wordt gebruik gemaakt van snelheidsprofielen over de diepte. Een uitgebreidere beschrijving van Sutrench kan onder andere gevonden worden in [Van Rijn et al., 1985].

5.5.2 Modelbasis

Sutrench werkt langs een stroombaan en is losgekoppeld van de waterbeweging. In Sutrench wordt aangenomen dat de lokale stroomsnelheid en concentratie constant zijn over de breedte (loodrecht op de stroomrichting). Verder gaat het model uit van een stationaire toestand. De continuïteitsvergelijking wordt in dat geval:

$$\frac{\partial}{\partial x}(buc) + \frac{\partial}{\partial z}(b(w - w_s)c) - \frac{\partial}{\partial z}(b\varepsilon_{s,CW}\frac{\partial c}{\partial z}) = 0$$
(5-1)

Hierin is:

b	breedte van de stroombaan	(m)
u	gemiddelde lokale stroomsnelheid in x-richting	(m/s)
с	gemiddelde lokale concentratie	(kg/m^3)
w	gemiddelde lokale stroomsnelheid in z-richting	(m/s)
Ws	valsnelheid	(m/s)
ES,CW	sediment mixing coëfficiënt	(m^2/s)

Om de gemiddelde lokale stroomsnelheid in de x-richting te bepalen werkt Sutrench met verticale snelheidsprofielen. Er zijn twee versies van Sutrench voor het bepalen van het snelheidsprofiel: één model voor gecompliceerde stroming zonder golven en één model voor geleidelijk variërende stromingen met golven. Voor een gecompliceerd stroombeeld wordt het k-turbulentie model gebruikt. Dit model is een redelijk nauwkeurige methode om de stroomprofielen uit te rekenen. Het vergt echter bij een lange simulatieduur veel rekentijd. Om deze tijd te beperken, wordt gebruik gemaakt van het zogenaamde PROFILE model. Voor een geleidelijk variërend stroombeeld wordt een logaritmisch snelheidsprofiel gebruikt.

Het Profile model maakt gebruik van de aanname dat het snelheidsprofiel van een niet uniforme stroming beschreven kan worden als een lineaire combinatie van een logaritmisch profiel ten gevolge van de wand (bodem) stroming en een profiel ten gevolge van de drukgradiënt. Het stromingsprofiel wordt dan beschreven door:

$$u = A_1 u_h \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) + u_h \left[1 - A_1 \ln\left(\frac{h}{z_o}\right)\right] \left[2\left(\frac{z - z_o}{h - z_o}\right)' - \left(\frac{z - z_o}{h - z_o}\right)\right]^{2t}$$
(5-2)

hierin is:

A_1	dimensieloze variabele	(-)
uh	stroomsnelheid aan het oppervlak	(m/s)
z	hoogte ten opzichte van referentie niveau	(m)
Zo	hoogte waarop snelheid nul is $(z_0=0.03 k_s)$	(m)
h	waterdiepte	(m)
t	parameter	(-)

In deze formule kunnen de drie onbekenden A_1 , t en u_h gevonden worden met behulp drie van extra vergelijkingen, namelijk:

- een vergelijking voor het debiet
- een vergelijking voor de t-parameter
- een vergelijking voor de snelheid bij het oppervlakte uh

$$Q = b \int_{z_o}^h u dz \tag{5-3}$$

verandert de bovenstaande vergelijking in:

$$Q = A_1 \left[-1 + \ln\left(\frac{h}{z_o}\right) \right] bhu_h + \left[1 - A_1 \ln\left(\frac{h}{z_o}\right) \right] \left[\frac{3t+1}{2^t+3t+1} \right] bhu_h \tag{5-4}$$

De parameter t wordt bepaald met behulp van de volgende vergelijking:

$$\frac{-1 + \ln\left(\frac{h}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{0.5h}{z_o}\right)} \cong 0.16t^2 - 0.29t + 1.02$$
(5-5)

Tenslotte wordt de ruimtelijke afgeleide van uh gegeven door:

$$\frac{du_h}{dx} = \alpha_1 \frac{u_{h,e}}{h} - \alpha_2 \frac{u_h}{h} - \alpha_3 \frac{u_h}{b}$$
(5-6)

Hiermee is het volledige snelheidsprofiel bepaald. De coëfficiënten α_1 , α_2 en α_3 worden gebruikt om het model te kalibreren. Het transport van slib wordt gemodelleerd volgens de formules van [Krone, 1962] en [Partheniades, 1962] zoals omschreven in paragraaf 4.3.1 en paragraaf 4.3.2 [Van Rijn et al., 1985].

5.5.3 Numeriek schema

Om de basisvergelijking op te lossen wordt gewerkt met een eindige elementen methode, gebaseerd op de Galerkin-methode. Het systeem wordt opgedeeld in een aantal elementen met eindige afmetingen. Naar de bodem toe worden de afmetingen van de elementen steeds kleiner. Hierdoor neemt de nauwkeurigheid in gebieden met een grotere gradiënt toe. Tussen de knooppunten van de elementen worden de onbekende variabelen gezien als lineaire functie van de plaats. Vervolgens worden voor elke knoop de coëfficiënten van de onbepaalde variabelen bepaald en worden deze tenslotte met behulp van een matrix opgelost.

5.6 Hiswa

5.6.1 Inleiding

Het model HISWA, een acroniem voor *Hindcast Shallow water Waves*, is een numeriek model dat gebruikt kan worden om realistische golfparameters te verkrijgen in onder andere kustgebieden. De basis van het model wordt gevormd door de spectrale actiebalans. Een uitgebreide beschrijving van Hiswa kan worden gevonden in [Booij et al., 1996] en in [Holthuijsen et al., 1989].

5.6.2 Modelbasis

Hiswa is gebaseerd op het denkbeeld van een spectrale actiebalans. Indien er geen stroming aanwezig is, verandert deze balans in een spectrale energiebalans. In de energiebalans wordt er vanuit gegaan dat voor elke spectrale golfcomponent van het golfveld de energieverandering gelijk is aan het netto effect van de windgroei, energiedissipatie door de bodem, etc. In veel golfmodellen wordt één golfcomponent gevolgd en de effecten van de wind, bodem etc. op de golfcomponent berekend en verwerkt. In een spectraal model kan dit proces herhaald worden voor alle spectrale golfcomponenten waarna uiteindelijk een volledig tweedimensionaal spectrum gevormd kan worden.

Hiswa heeft twee punten waarin het afwijkt van de hierboven beschreven methode: het golfveld wordt niet beschreven met een volledig gediscretiseerd tweedimensionaal spectrum en de golfbeweging wordt niet gevolgd langs de golfstraal maar over een van tevoren gekozen rooster. In elke spectrale richting worden twee variabelen bepaald: een frequentie geïntegreerde energiedichtheid en een gemiddelde frequentie. Beide eigenschappen variëren in de ruimte. Hiswa berekent deze variatie door integratie van lokale effecten (zoals wind, bodem en stroming), waarbij er wordt meebewogen met de groepsnelheid. De berekeningen worden voor elke golfcomponent uitgevoerd met behulp van de volgende twee vergelijkingen:

$$\frac{\partial}{\partial x}(c_x^*A_o) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y^*A_o) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_{\theta}^*A_o) = T_o$$
(5-7)

$$\frac{\partial}{\partial x}(c_x^{**}A_1) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y^{**}A_1) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_{\theta}^{**}A_1) = T_1$$
(5-8)

hierin is:

 $A_0 = 0^{de}$ orde moment van het actie dichtheidsspectrum

 A_1 1^{de} orde moment van het actie dichtheidsspectrum

T₀ bronterm

T₁ bronterm

De brontermen T₀ en T₁ vertegenwoordigen de effecten van:

- refractie
- windgroei
- dissipatie ten gevolge van de bodem
- dissipatie ten gevolge van het breken
- dissipatie ten gevolge van stroming
- dissipatie ten gevolge van vegetatie

5.6.3 Numeriek schema

Hiswa maakt gebruik van een rechthoekige rekenruimte met een rechthoekig rooster. Het schema is expliciet in de x-y ruimte (leap-frog) en impliciet in de θ ruimte (backward Euler). Door het expliciete schema in de x-y ruimte is het model alleen stabiel onder bepaalde voorwaarden.

Aan de bovenstroomse rand moet voor elk punt een golfconditie gegeven worden. Aan de zijranden moet de mate van reflectie opgegeven worden. Hiswa kan ook genest worden in een ander model; dan worden de randvoorwaarden uit dat model gehaald.

5.6.4 Beperkingen

Beperkingen van het Hiswa model zijn:

- Hiswa werkt met een frequentie-geïntegreerd spectrum.
- Hiswa is een stationair model met betrekking tot de basisvergelijkingen en de geofysische aandrijfkrachten. Dit betekent dat Hiswa alleen gebruikt kan worden voor golven met een relatief korte verblijfstijd in het probleemgebied.
- Diffractie is niet gemodelleerd in Hiswa.
- Diepte en stromingen moeten voor de aanvang van een berekening aan Hiswa worden opgegeven.

6. Keuze slibtransportmodel

6.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is een overzicht gegeven van een aantal verschillende beschikbare slibmodellen. Daarnaast zijn het waterbewegingsmodel Trisula en het golvenmodel Hiswa besproken. In dit hoofdstuk wordt een onderbouwing gegeven voor de keuze van de te gebruiken modellen. Eerst wordt een aantal eisen aan de modellen behandeld, waarna er per model een aantal voor- en nadelen gegeven wordt. Tenslotte bevat de laatste paragraaf een overzicht en de keuzeonderbouwing.

6.2 Eisen aan de modellen

6.2.1 Waterbeweging

Voor het modelleren van de IJgeul is het belangrijk dat de waterbeweging op een realistische wijze gesimuleerd wordt. Vooral de getijbeweging en in het bijzonder de reststroom, is van grote invloed op het transport van slib. Omdat er in de nieuwe situatie van de IJgeul mogelijk een laagje slib op de bodem gevormd zal worden is het van belang dat de invloed van deze laag slib op de turbulentie in het model wordt opgenomen. Door de laag slib op de bodem dempt de turbulentie waardoor er nog meer slib op de bodem terecht zal komen, wat weer invloed heeft op de turbulentie.

Om het getij goed te kunnen simuleren moet het model tijdsafhankelijk zijn. Een stationaire situatie doet zich immers niet voor bij een model met een getij als randvoorwaarde.

Verder moet het mogelijk zijn om een eventuele zijwaartse stroming in een model op te kunnen nemen. Dit om een deel van de driedimensionale structuur van de waterstroming in de IJgeul ten gevolge van de dichtheids- en warmtestroming op te kunnen nemen.

6.2.2 Slibtransport

Het model moet in staat zijn het slibtransport en de eigenschappen die karakteristiek zijn voor slib te kunnen simuleren, zoals de invloed van de concentratie op de valsnelheid. Daarnaast moet het mogelijk zijn om met het model te bepalen hoeveel slib er erodeert of sedimenteert. Ook moet het met het model mogelijk zijn om een goede verdeling van het slib in de waterkolom te kunnen nabootsen.

6.2.3 Koppeling tussen waterbeweging en slibtransport

Zoals reeds eerder vermeld zal het sediment in de waterkolom van invloed kunnen zijn op de waterbeweging en andersom. Hierdoor is het van belang dat het model dat gebruikt gaat worden deze koppeling biedt. Bij het gebruik van een apart model voor de waterbeweging en een apart model voor het slibtransport vervalt de mogelijkheid van deze terugkoppeling. Dit geldt zowel voor het gebruik van Delwaq (W.L.) als voor Slib3D (RIKZ). Ook een directe koppeling tussen Slib3D en een waterbewegingsmodel is door het gebruik van de statistische momentenmethode in Slib3D niet mogelijk. Een voordeel van deze statistische momentenmethode is overigens een goede weergave van scherpe gradiënten in de sedimentconcentratie. Dit voordeel is voor het probleem van de IJgeul echter niet van belang.

6.3 Overzicht en keuzeonderbouwing

In tabel 6-1 is een overzicht opgenomen van de belangrijkste eigenschappen van de verschillende slibtransportmodellen. Verder zijn een aantal criteria opgenomen die los van het algoritme van het model staan

tabel 6-1 Overzicht van mogelijkheden en beperkingen van verschillende transport modellen

	Slib3D	Delwaq	Sutrench	Trisula research
erosie	+	+	+	+
sedimentatie	+	+	+	+
flocculatie	+	+	 .	+
hindered settling	+	+		+
koppeling tussen slib en waterbeweging	-		-	+
scherpe concentratiegradiënten	+	0	0	0
rekensnelheid	+	+	+	0
langs stroombaan	-	-	+	0
beschikbaarheid	0	+	+	+
begeleiding	-	+	-	+

Zoals uit de bovenstaande tabel blijkt voldoet Trisula aan een groot deel van de eisen. Ook Delwaq voldoet aan een veel eisen. De andere twee modellen blijven echter niet ver achter Trisula en Delwaq. Er zijn een aantal belangrijke redenen waarom in deze studie voor Trisula gekozen is.

Ten eerste bevat Trisula de koppeling tussen slibconcentratie en waterbeweging. De voordelen hiervan zijn al eerder in dit hoofdstuk vermeld. Ten tweede is voor het gebruik van een ander model dan Trisula een extern waterbewegingsmodel nodig. Hierom zal Trisula alsnog gebruikt moeten worden. De keuze om dan gelijk Trisula te gebruiken als slibtransportmodel ligt voor de hand. Tenslotte speelt ook de beschikbaarheid van de programmatuur een rol; Trisula en Delwaq zijn beide ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium. Door de nauwe samenwerking tussen het Waterloopkundig Laboratorium en de Technische Universiteit Delft is een goede begeleiding mogelijk.

7. De IJgeul

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de gegevens over de IJgeul in de huidige situatie en in de toekomstige situatie behandeld. Deze gegevens dienen als basis voor het te gebruiken model en in de verdere studie naar het slibtransport over de IJgeul.

7.2 Locatie

De IJgeul is de toegangsgeul voor de havens van IJmuiden en Amsterdam. De geul bestaat uit twee delen. Het eerste deel, een geul met een trapeziumvormige doorsnede, loopt vanuit de haven van IJmuiden in een rechte lijn de zee in. Halverwege deze geul bevindt zich een draaicirkel voor de scheepvaart. Het tweede deel is het naderingsgebied. Deze loopt vanuit het zeeuiteinde van de geul onder een hoek naar het zuidwesten verder de zee in. Dit naderingsgebied wordt richting het westen breder. In figuur 7-1 is een overzicht van de IJgeul met naderingsgebied weergegeven. Deze figuur is uitvergroot in bijlage B te vinden. Hierin is de locatie van het eiland van de 'Siemens/Boskalis'-variant niet aangegeven. Deze locatie wordt wel weergegeven in hoofdstuk 1 Verder is de uitbreiding van de IJgeul in de figuur aangegeven in de vorm van het gearceerde gebied. Hierover zijn meer details te vinden in paragraaf 7.6.



figuur 7-1 Weergave van de huidige IJgeul met rechts IJmuiden en links het naderingsgebied. Het gearceerde gebied is de geplande uitbreiding van de IJgeul. De locaties van de doorsneden uit figuur 7-2 zijn aangegeven met AA', BB' en CC'. Bron: Hydronamic b.v

> Voor het modelleren van het slibtransport zal alleen gekeken worden naar de IJgeul zelf en niet naar de effecten van het verbreden en verdiepen van het naderingsgebied. Omdat het grootste gedeelte van het slib zich in een gebied tot ongeveer 30 kilometer uit de kust bevindt (zie paragraaf 7.5.1) en omdat de veranderingen aan het bodemprofiel van het naderingsgebied relatief klein zijn, zie doorsnede C-C' in figuur 7-2, is deze aanname gerechtvaardigd. In figuur 7-2 zijn drie doorsneden van de vaargeul weergegeven. Hierin is de vaargeul in de huidige toestand (de bovenste lijnen) en in de toekomstige toestand (onderste lijnen) te zien.

figuur 7-2 Doorsneden van de huidige IJgeul en de toekomstige IJgeul. Bron: Hydronamic b.v.



7.3 Bodem

7.3.1 Diepte

De diepte van de IJgeul ligt over de gehele lengte op -19 m t.o.v. NAP¹. De diepte van de omringende bodem varieert van -12 tot -16 m. De geul loopt door een aantal banken zoals de Uiterrib en de Smal Agt. Deze ribben zijn hoger dan de hun omringende bodem. Een overzicht van de ribben rondom de IJgeul is te vinden in figuur 7-3.

¹ Alle dieptes in dit hoofdstuk zijn gerelateerd aan NAP. In het vervolg van dit hoofdstuk zal de referentie naar het NAP niet meer worden vermeld.

Eindrapport

figuur 7-3 Geomorfologie van de Nederlandse Noordzee bij IJmuiden. Bron: Rijkswaterstaat.



7.3.2 Bodemmateriaal

Op de Nederlandse Noordzeebodem zijn slechts op enkele plaatsen zandlagen aanwezig die een grote hoeveelheid slib bevatten. Veelal zijn deze lagen lokaal en hebben een relatief lage concentratie slib in de bodem (maximaal 20%). In figuur 7-4 is een overzicht van het percentage slib in de bovenste 20 cm van de bodem rond de IJgeul gegeven [Van Alphen, 1990]. Hierin is te zien dat ten zuiden van de IJgeul nauwelijks slib in de bodem zit. Ten noorden van de IJgeul bevindt zich een soort pluim van slib in de bodem (2-10%), in de IJgeul zelf bevindt zich voor 10-20% slib in de bovenste 20 cm van de bodem. Bij deze pluim is de stortlocatie voor het slib dat uit de haven van IJmuiden wordt verwijderd.

Het merendeel van de Nederlandse kustbodem bestaat uit fijn tot grof zand met een korreldiameter tussen 100 en 500 $\mu m.$

figuur 7-4 Percentage slib in de bovenste 20 cm van de Nederlandse Noordzee



Eindrapport

7.4 Waterstromen

7.4.1 Getij

In de Noordzee bevindt zich een getijstroming. Voor de Nederlandse kust is vooral de invloed van getij in de noordzuid richting van belang. Het getij wordt gedomineerd door de M_2 component, maar ook andere componenten spelen een rol. De bijdrage van de componenten M_2 , S_2 en M_4 aan de horizontale stroomsnelheid wordt in figuur 7-5 weergegeven voor Noordwijk en Egmond. Hierin is te zien dat de hoofdrichting van de verschillende getijcomponenten in de noord-zuid as ligt [Van der Giessen et al., 1990].

EGMOND NOORDWIJK → 25 cuvs Z5 cm/s SURFACE M₂ MID-COLLMN ROTION 5 envie - sana _ SURFACE S2 MID - COLUMN воттом W - San's 5 cm/s (1 SURFACE (): Μ, MID - COLUMN d. воттом 5 60 2) 5 Lun 20 60

figuur 7-5 Getijdestromingsellipsen van de belangrijkste harmonische getij componenten voor verschillende dieptes op twee locaties in juni 1984 In figuur 7-6 is een overzicht van de dieptegemiddelde getijellipsen voor de Nederlandse kust gegeven.



figuur 7-6 Variatie van de dieptegemiddelde getijdestroming langs de Nederlandse kust [Ven der Giessen et al., 1990]

Uit [Van der Giessen et al., 1990] blijkt verder dat op tien kilometer uit de kust de amplitude van de stroomsnelheid bij springtij varieert tussen de 80-100 cm/s aan het oppervlak en 75-80 cm/s aan de bodem. Hierbij is de stroming naar het noorden overheersend. Bij doodtij is deze maximale snelheid over het algemeen de helft van de snelheid bij springtij. In paragraaf 4.4.3 is ingegaan op de invloed van het getij op het slibtransport.

Waterstanden bij IJmuiden worden weergeven in figuur 7-7. Het betreft hier het gemiddelde getij gemeten bij IJmuiden haven over de periode van 1985 tot 1995.

Voor de verschillende componenten van het getij rondom de IJgeul is een overzicht gegeven in tabel 7-1 en tabel 7-2. De gegevens in deze tabel zijn ontleend aan metingen van het RIKZ, het WL, het OCN en Maris. Alleen de componenten M_2 , M_4 en S_2 zijn opgenomen in de tabel.
figuur 7-7 Gemeten gemiddeld getij bij IJmuiden. Hoogtes in cm weergegeven. Bron: [Rijksinstituut voor Kust en Zee, 1990]



component	amplitude (cm)	fase (°)	periode (°/uu
M ₂	45.33	104.35	29.38
M4	3.44	192.08	58.78
S ₂	14.95	160.13	30.00

meetpunt MP161 te IJmuiden. Bron: North Sea Tidal Data cd-rom. tabel 7-2

Getijcomponenten voor het horizontale getij bij het

tabel

7-1

Getijcomponenten voor het verticale getij bij het meetpunt MP161 te IJmuiden. Bron: North Sea Tidal Data cd-rom.

component	amplitude (cm)	fase (°)	periode (°/uur)
M ₂	71.91	123.11	29.38
M ₄	22.15	184.45	58.78
S ₂	18.96	190.71	30.00

7.4.2 Dichtheidsstromen

Een groot gedeelte van de stroming langs de Nederlandse Noordzeekust wordt beïnvloed door de uitstroom van het zoete water van de rivieren de Rijn, de Maas en de Schelde. Hierdoor wordt een dichtheidsstroom dwars op de kustlijn veroorzaakt. Ten gevolge van de rotatie van de aarde resulteert deze dichtheidsstroom in een netto noordwaartse oppervlaktestroming. Dicht aan de kust is deze stroming een van de belangrijkste aspecten van het transport van slib [Dronkers et al., 1990].

De verspreiding van het Rijnwater in de Nederlandse kustzone vindt plaats binnen een strook waarvan de breedte noordwaarts van de uitstromingspunten geleidelijk afneemt van 20-25 kilometer voor de kust van Zuid-Holland tot 10-15 kilometer bij de Kop van Noord-Holland. Ook in de zuidwaartse richting neemt de breedte van de zoetwaterpluim af tot 15 kilometer bij Goeree [Van der Giessen et al., 1989].

Over het algemeen blijft de dikte van de minder zoute bovenlaag beperkt tot 4 à 8 meter vergeleken met de circa 20 meter diepe waterkolom. Stratificatie van de 20 kilometer brede kuststrook wordt echter alleen frequent waargenomen binnen 40 kilometer ten noorden van de Nieuwe Waterweg. Dit betekent dat in het gebied rondom de IJgeul stratificatie alleen optreedt bij zeer hoge afvoer uit de rivieren. Ook uit figuur 7-8 blijkt dat de invloed van zoete Rijnwater alleen onder extreme omstandigheden stratificatie ter plaatse van de IJgeul veroorzaakt.

Eindrapport

figuur 7-8 Grootte van het gestratificeerde gebied onder gemiddelde en extreme omstandigheden [Van der Giessen et al., 1990].



Ter illustratie is figuur 7-9 als een voorbeeld opgenomen waarin de stratificatie van Noordwijk en Egmond weergegeven zijn [Van der Giessen et al., 1990]. Wat opvalt in figuur 7-9 is een tweede 'pluim' van zoeter water aan de kust bij Egmond. Mogelijk is deze pluim afkomstig van het zoete water uit IJmuiden.

figuur 7-9 Verdeling van gemeten dichtheidsverschillen op 18 juni 1984 bij Egmond en Noordwijk [Van der Giessen et al., 1990].



Het ontbreken van een sterke stratificatie betekent echter niet dat de dichtheidsstromen voor de IJgeul niet van belang zijn. Zoals reeds door [Dronkers et al., 1990] is vermeld, is deze dichtheidsstroom in combinatie met de rotatie van de aarde een belangrijke component voor de stroming naar het noorden. Ook de kustwaartse stroming aan de bodem is van belang voor het slibtransport. Deze treedt al op bij kleine dichtheidsverschillen en heeft voor de kust van IJmuiden een snelheid van 2,5 tot 3,5 cm/s. Door deze stroming komt het slib dat verder van de kust bezinkt weer in suspensie en wordt naar de kust getransporteerd. In figuur 7-10 is de driedimensionale structuur van een maandgemiddelde stroming bij Noordwijk en Egmond weergegeven.



Naast de uitstroom van zoet water uit de Rijn etc. zijn er nog andere invloeden die voor dichtheidsstromen kunnen zorgen. Door het uitstromende zoete water van het IJ is het mogelijk dat er gelaagdheid in de omgeving van de IJgeul voorkomt. Ook de invloed van het warmere koelwater van de Hoogovens bij IJmuiden kan merkbaar zijn. Door een combinatie van zout zeewater met zoet- en relatief warm water is het zelfs mogelijk dat er een drielagensysteem ontstaat. Dit alles resulteert in een landwaarts gerichte stroming aan de bodem. De afvoer van het IJ bedraagt via spuien en schutwater ongeveer 100 m³/s.

7.4.3 Windgolven

Een groot aandeel van het golvenspectrum van de Nederlandse kust wordt geleverd door golven met een periode tussen 3 en 9 seconden. De significante golfhoogte kan bij een periode 9 seconden oplopen van tot 3 meter. In gebieden met een diepte van 30 meter of minder zijn deze golven in staat fijn bodemmateriaal in suspensie te brengen. De frequentie van voorkomen per jaar als functie van de golfhoogte en de golfrichting wordt in bijlage C gegeven. De bijbehorende golfperiode is ook te vinden in bijlage C. Hieruit blijkt dat de golven met de grootste periode te verwachten zijn uit het noordwesten. Uit [Korevaar, 1990] is een aantal golfrozen overgenomen in bijlage D. Deze golfrozen geven de kans van voorkomen van wind uit 12 richtingen weer. Ze bestrijken de periode van 1961 tot en met 1980. In de figuur is duidelijk de invloed van het jaargetijde te zien.

figuur 7-10 Dimensionale structuur van de maandelijks gemiddelde reststroming gebaseerd op observaties in juni 1984 [Van der Giessen et al., 1990]. In het Nederlandse kustgebied hebben windgolven uit het noorden en uit het noordwesten langere perioden en grotere golfhoogtes dan golven uit andere richtingen. In figuur 7-11 is de maximale bodemsnelheid u_b ten gevolge van noordelijke en zuidelijke wind uitgezet tegen de kans op overschrijden. Te zien is dat de golven uit het noorden een grotere bodemsnelheid veroorzaken in verhouding tot golven uit het zuiden.

figuur 7-11 Overschrijdings-frequentie van de maximale stroming ub aan de bodem ten gevolge van golven veroorzaakt door noordelijke en zuidelijke wind in het Nederlandse kustgebied [Dronkers, 1990]



7.5 Slib

7.5.1 Concentratie

7.5.1.1 Inleiding

De concentratie van slib in suspensie varieert met de afstand tot de kust, de hoogte boven de bodem, de tijd van het jaar en de weersomstandigheden. In deze paragraaf wordt de slibconcentratie tijdens stormcondities en tijdens normale weersomstandigheden bekeken. Onder normale weercondities zal ook de concentratie als functie van de afstand tot de kust en de hoogte boven de bodem besproken worden.

De metingen die tot nu toe verricht zijn, hebben over het algemeen plaatsgevonden tijdens milde weersomstandigheden. Hierdoor ontstaat er een vertekend beeld van de concentratie slib in de waterkolom. Ook de herkomst van het slib in de Noordzee is een tot op heden nog niet volledig opgelost vraagstuk. De in deze paragraaf gegeven concentraties zullen daarom met enige voorzichtigheid bekeken moeten worden. Gezien het feit dat er weinig gegevens met betrekking tot de slibconcentratie rondom de IJgeul beschikbaar zijn, zullen de gegevens gepresenteerd in deze paragraaf voor het modelleren van de IJgeul gebruikt worden. Met behulp van deze gegevens zal in paragraaf 8.7 een representatieve concentratie voor het model bepaald worden.

7.5.1.2 Concentratie tijdens storm

Na periodes van sterke aanhoudende wind, is de hoeveelheid sediment in het water aanzienlijk toegenomen. Een ruwe schatting wordt gegeven in [Dronkers et al., 1990] en komt neer op een verdubbeling van de slibconcentratie tijdens storm in verhouding tot rustige weersomstandigheden. Deze schatting is echter nog niet met veldwaarnemingen onderbouwd. Schattingen van [Winterwerp, 1997] komen uit op een jaargemiddelde slibconcentratie van 100-200 mg/l voor een 20-30 km brede strook langs de Nederlandse kust van de Noordzee. Indien de slibconcentratie onder normale omstandigheden rond de 20-30 mg/l is, dan betekent dit dat de slibconcentratie tijdens en na een storm circa 600 mg/l moet bedragen. In dat geval is de invloed van golven dus beduidend groter dan gesuggereerd in [Dronkers et al., 1990].

7.5.1.3 Concentratie onder normale condities

Uit [Van Alphen, 1990] blijkt dat het merendeel van het slib dat zich in de Nederlandse kustzone bevindt, in de eerste 10 kilometer geconcentreerd is (zie figuur 7-12 en figuur 7-13). Vooral de aan de bodem landinwaarts gerichte dichtheidsstroming is een oorzaak voor de hogere concentratie slib aan de kust (zie paragraaf 7.4.2). Indien niet naar de concentratie maar naar het transport gekeken wordt, blijkt dat ongeveer 75% van het slibtransport binnen de eerste 30 kilometer plaats vindt. Ook uit [Salden, 1996] blijkt dat naar de kust toe de concentratie slib sterk toeneemt: van 6,0 mg/l op 30 km uit de kust, via 9,0 mg/l op 5 km tot 20,0 mg/l op 5 km uit de kust.



In [Visser et al., 1991] staan dieptegemiddelde slibconcentratieprofielen voor een groot gedeelte van de Nederlandse kust. De metingen voor deze profielen zijn verricht in de periode van 1975-1983 met een tweewekelijks interval. Hieruit blijkt duidelijk de afhankelijkheid van de afstand tot de kust, maar ook de afhankelijkheid van de periode van het jaar. In de winter zijn over het algemeen de concentraties hoger dan in de zomer. Verder blijkt uit [Visser et al., 1991] dat de verschillen over de Nederlandse kustzone niet erg groot zijn. De waarden gevonden door Visser komen goed overeen met de waarden gemeten in het NOWESP² programma. In figuur 7-14 is de concentratie van slib voor de Nederlandse kust weergegeven. Hierin staan N en E voor respectievelijk Noordwijk en Egmond. De linkerwaarde geeft de concentratie op 1 km vanuit de kust weer. De afstand tot de kust loopt vervolgens op van 2 kilometer via 4, 10, 20, 30, 50 tot 70 kilometer uit de kust. De gevonden concentraties gelden bij milde weercondities.

figuur 7-12 Dieptegemiddelde concentratie slib als functie van de afstand tot de kust. Gemiddeld over de periode 1975-1983.{Van Alphen, 1990]

figuur 7-13 Cumulatief langstransport van slib gebaseert op metingen uit de eerste zes maanden van 1976 en een veronderstelde waarde voor de reststroming van 5 cm/s [Van Alphen, 1990].

² North West European Shelf Programme

figuur 7-14 Gemiddelde concentratie in de Nederlandse kustzone voor de winter(1) en de zomer (III) tijdens mild weer. Noordwijk en Egmond worden weergegeven door resp N en E. De afstand tot de kust neemt van links naar rechts toe volgens 1,2,4,10,20,30,50,70 km. [Visser et al., 1991]



De concentratie van slib in suspensie is afhankelijk van de hoogte boven de bodem. Dichtbij de bodem is de concentratie veel groter dan aan het oppervlak. Ter illustratie is figuur 7-15 opgenomen. Dit is een weergave van het bereik van de metingen van slibconcentratie aan de Nederlandse kust [Dronkers et al.,1990].

depth [m] o 5 NEAP-TIDE SPAING-TIDE MEAN-TIDE 10 15 đ 0.1 0.2 0 0.1 0.2 0 0.1 0.2 kg m*3 - kg m-3 ▶ kg m⁻³ - -

Andere metingen zijn onder het NOWESP programma verricht. Hierbij is onder andere de slibconcentratie in het Noordzeewater gemeten. Deze metingen zijn verricht in de periode 1973-1993. Deze gegevens zijn verkregen via in-situ metingen, satelliet metingen en interpolatie. Een gedetailleerde beschrijving is te vinden in [Radach et al., 1997] en [Raaphorst et al., 1998]. De gevonden data zijn opgenomen in tabel 7-3.

Noordwijk	0-10 km	10-40 km	40-70 km
wintergemiddelde	22.25	9.13	7.68
zomergemiddelde	9.59	8.71	6.15
jaargemiddelde	15.13	8.72	6.85

figuur 7-15 Verticale sediment concentratie profielen. Aangegeven zijn de gebieden waarbinnen de meeste metingen vielen. De metingen vonden plaats op verschillende locaties voor de Nederlandse kust. [Dronkers et al., 1990]

Diepte-

concentratie

7-3

slib bij Noordwijk in mg/l [Raaphorst et al., 1998].

tabel

gemiddelde

7.5.2 Valsnelheid

Over de valsnelheid van het slib in en rond de IJgeul is weinig bekend. Metingen van [Van Leussen, 1994] geven voor slib in de Noordzee op 50 kilometer uit de kust van Hoek van Holland een gemiddelde valsnelheid van 0,5 mm/s. Zoals uit paragraaf 4.4.1 blijkt is het verloop van de valsnelheid als functie van de concentratie niet eenduidig vast te stellen en verschilt het veel per locatie. Desondanks wordt voor het slib in de IJgeul verondersteld dat het een valsnelheid van 0,5 mm/s heeft.

7.5.3 Consolidatie

Zoals ook omschreven in paragraaf 4.2.1 is consolidatie sterk afhankelijk van het slibsoort, de tijdsduur en de krachten die tijdens het consolideren op de bodem worden uitgeoefend. Als maatgevende waarde voor geconsolideerd slib wordt voor de Noordzee een kritieke bodemschuifspanning voor erosie gehanteerd van τ_e =0,4-0,6 N/m². Door de kleine laagdikte van het slib op de bodem van de Noordzee is het mogelijk voor het water in deze laag om snel uit de laag de treden. Hierdoor vindt een snelle consolidatie plaats. In één dag kan de laag slib al een sterkte hebben van τ_e =0,4 N/m².

7.5.4 Aanslibbing IJgeul

In de huidige situatie treedt er netto geen aanslibbing op. Gedurende doodtij vindt er aanslibbing plaats. Tijdens springtij of een storm wordt deze dunne laag slib weer geërodeerd. Concrete getallen over de aanslibbing van de IJgeul in de huidige situatie zijn er op dit moment niet te geven. In de haven van IJmuiden vindt er wel aanslibbing plaats, volgens [Winterwerp, 1997] treedt er in de Nieuwe Buitenhaven van IJmuiden een aanslibbing op van 4 meter/jaar bij met een dichtheid van ρ =1200 kg/m³.

7.6 Uitbreiding van de vaargeul

Zoals ook in figuur 7-2 is weergegeven, zal de toekomstige vaargeul bij IJmuiden over de gehele lengte van de geul verdiept worden tot 24 meter onder de gemiddelde waterstand. Daarnaast zal de vaargeul verbreed worden met een breedte op de bodem van de geul van 500 meter bij de haven tot 2050 meter op 30 kilometer uit de kust. Op het niveau van de omliggende bodem krijgt de geul een breedte van 750 meter bij de haven tot 3650 meter op 30 kilometer uit de kust.

Het naderingsgebied krijgt eveneens een diepte van 24 meter. De breedte van dit gebied zal oplopen tot ongeveer 12 kilometer. Naar dit gebied zal in deze studie niet worden gekeken. Hierover wordt meer vermeld in paragraaf 8.2.

8. Modellering IJgeul

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de rand- en beginvoorwaarden voor het modelleren van de IJgeul besproken. Om het slibproces rondom en in de IJgeul te modelleren wordt eerst het simulatiegebied gedefinieerd. Binnen dit simulatiegebied worden een viertal dwarsdoorsneden van de IJgeul genomen, binnen deze gebieden is een 2-DV model (het rekengebied) gemaakt. In dit hoofdstuk zal het simulatiegebied alsmede het rekengebied nader worden beschreven. Daarnaast worden de rand- en beginvoorwaarden gegeven.

8.2 Het simulatiegebied

Zoals omschreven in hoofdstuk 7 bestaat de IJgeul uit een vaargeul en een naderingsgebied. Het probleemgebied voor deze studie is vooral de vaargeul; het naderingsgebied wordt buiten beschouwing gelaten.

De vaargeul zelf is op te delen in vier gebieden. Het eerste gebied loopt van de haven tot ongeveer 5 km uit de kust. Hierin verandert de vaargeul nauwelijks ten opzichte van de huidige situatie. Tevens vindt het grootste gedeelte van het slibtransport langs de kust in de eerste zone plaats. Het tweede gebied loopt tot het verbrede gedeelte van de IJgeul. In deze zone veranderen de dimensies van de vaargeul aanzienlijk, zowel in de breedte als in de diepte. Hier vindt ook een groot gedeelte van het slibtransport plaats. Het derde gebied is de keerzone, waarin vooral de diepte van de geul verandert. Zoals uit paragraaf 7.5.1 blijkt vindt hier ongeveer 5-10 % van het slibtransport plaats. Het laatste gebied loopt tot aan het naderingsgebied. Het bevindt zich van ongeveer 12 tot 30 kilometer uit de kust. Ook hier veranderen de dimensies van de vaargeul aanzienlijk. Het slibtransport in deze zone is ongeveer 30 % van het totale transport langs de Nederlandse Noordzeekust. In figuur 8-1 is een overzicht van de zones weergegeven. Deze afbeelding is ook uitvergroot te vinden in bijlage E.

Voor ieder gedefinieerd gebied is een langsdoorsnede genomen. Deze doorsnede wordt representatief voor de hele zone verondersteld. In de volgende paragraaf wordt besproken welke dimensies een doorsnede heeft en wat de grootte van het rekenrooster is.



8.3

8.3.1 Inleiding

Het rekengebied

Zoals in paragraaf 8.2 besproken, wordt de IJgeul in een aantal zones opgedeeld. Voor iedere zone worden één model gemaakt. Deze modellen lopen zo veel mogelijk langs natuurlijke stroombanen (zie paragraaf 8.6). Elk hiervan kan vergeleken worden met een stroomgoot met twee lange, gesloten zijwanden en twee korte eindwanden met een opgelegde getijbeweging. In wezen is het Trisulamodel een 3D model, maar door de korte zijde krijgt het model het karakter van een 2DV-model. In figuur 8-2 is de locatie van de rekengebieden weergegeven.

figuur 8-1 Opdeling van de IJgeul in vier rekengebieden. figuur 8-2 Illustratief overzicht van locaties van rekengebieden.



8.3.2 Lengte en breedte

De lengte van het model wordt bepaald aan de hand van een aantal voorwaarden. Ten eerste moet in het interessegebied een evenwichtsprofiel ontstaan zijn. Dit houdt in dat een slibdeeltje dat het systeem via de rand binnenkomt, voldoende tijd heeft om te kunnen bezinken voordat het slibdeeltje het interessegebied bereikt heeft. Er geldt dan:

$$L_s = \frac{h}{W_s} U_{rest} \tag{8-1}$$

hierin is:

Ls	afstand van rand tot interessegebied	(m)
h	waterdiepte	(m)
Ws	valsnelheid van een slibdeeltje	(m/s)
Urest	reststroming van het getij	(m/s)

Iets dergelijks geldt ook voor de turbulentie. Aan de randen wordt een uniform stromingsprofiel gegenereerd. Dit profiel moet door middel van turbulentie ontwikkelen tot een logaritmische evenwichtsprofiel. Voor de turbulentie afstandschaal geldt:

$$L_m = \frac{h^2 u}{\varepsilon_z} \approx \frac{20h^2 u}{0.1hu} = 200h \tag{8-2}$$

hierin is:

L_m	afstand van rand tot interessegebied	(m)
h	waterdiepte	(m)
u	stroomsnelheid	(m/s)
εz	turbulente viscositeit	(m ² /s)

Tenslotte mag een slibdeeltje dat zich in het interessegebied bevindt, niet tijdens één getijcyclus buiten het rekengebied komen. Hierdoor kan het gebeuren dat een evenwicht concentratieprofiel bij het instromen weer verandert in een concentratieprofiel zoals door de randvoorwaarde opgelegd. De afstand tussen de rand en het interessegebied is daarom minimaal de binnen één getijperiode door een slibdeeltje afgelegde weg. In formule:

$$L_{getij} = \alpha_{getij} \int_{\frac{1}{4}T}^{\frac{3}{4}T} u dt$$
(8-3)

hierin is:

Lgetij	afstand van rand tot interessegebied	(m)
agetij	constante 1-2	(-)
T	getijperiode	(h)
u	horizontale snelheidcomponent van het getij	(m/s)

De afstand van het interessegebied tot de rand is minimaal de maximale waarde van L_s , L_m en L_{getij} . Uit berekeningen³ blijkt dat L_s =300 m, L_m =2400 m, en L_{getij} =11.500 m. Als minimale afstand van de IJgeul tot de rand van het rekengebied wordt daarom 11.500 m genomen. In de huidige situatie heeft de IJgeul een breedte van 600 meter, in de toekomstige situatie een breedte van 3500 meter. De lengte van het rekengebied wordt op 27.000 meter gesteld. In het brede gedeelte van de IJgeul, waar de keerzone zich bevindt, is de breedte in de toekomstige situatie 6000 meter. De lengte van het model wordt in dit geval 30.000 meter.

Het rekengebied heeft een breedte van 90 meter. Dit komt neer op drie cellen van 30 meter per cel. In theorie is één cel al voldoende – er blijft dan een 2DV model over – maar om de effecten van de randen te minimaliseren is gekozen voor een groter rooster. De lengte van 30 meter per cel wordt in de volgende paragraaf nader toegelicht.

8.3.3 Roostergrootte

Het rekengebied zoals in paragraaf 8.3.2 gedefinieerd bestaat uit een eindig aantal cellen. Om een nauwkeurig beeld te krijgen van het slibtransport en de waterbeweging in het interessegebied, is gekozen voor een celgrootte van 35 meter⁴ in het horizontale vlak. Over de lange zijde van het model kunnen de cellen naar de randen toe in grootte toenemen, omdat daar een minder gedetailleerd rooster al voldoende informatie geeft. Daarnaast is het buitengebied vooral bedoeld als 'inspeelzone', een fijn rooster is daar niet noodzakelijk. Twee opeenvolgende cellen mogen qua grootte niet meer dan 10% van elkaar verschillen. Er wordt een verlopend rooster gebruikt. De buitenste cellen hebben een grootte van 500 meter, de binnenste cellen een grootte van 30 meter. Het rooster is weergegeven in bijlage G. Voor de diepte wordt ook een verlopend rooster gebruikt. Het model bestaat uit 20 lagen met een dikte van 0,05% oplopend tot 25.41% van de totale waterdiepte. De dikte van een laag wijkt nooit meer dan 40% van de dikte van de omliggende lagen af.

³ In dit hoofdstuk zullen geen berekeningen getoond worden. Hiervoor wordt verwezen naar bijlage F.

⁴ Een overzicht van alle invoer gegevens voor het model van de IJgeul is te vinden in bijlage I

8.4 Tijdstap

Bij een gekozen afstand tussen de roosterpunten behoort een maximale grootte van de tijdstap. Een kleine afstand tussen de roosterpunten vraagt ook om een kleine tijdstap. De orde van grootte van de tijdstap kan worden bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x}\sqrt{2gh} \approx 5 - 10 \tag{8-4}$$

Hierin is:

Δt	tijdstap	(s)
Δx	afstand tussen roosterpunten	(m)
h	waterdiepte	(m)
g	gravitatie versnelling	(m/s ²)

Deze eis is voor Trisula geen stabiliteiteis, maar een maat voor de nauwkeurigheid van het model. In het rekenrooster is de minimale stapgrootte 30 meter binnen de vaargeul, met een diepte van 25 meter, en 50 meter buiten de vaargeul, bij een diepte van 12 meter. Dit betekent dat bij een roostergrootte van 50 meter buiten de IJgeul een maximale tijdstap van ongeveer 16-32 seconden hoort. Bij een roostergrootte van 30 meter in de vaargeul geldt voor $\Delta t \approx 8-16$ seconden. Om de simulatieduur te beperken wordt er gekozen voor een tijdstap van 15 seconden (0,25 minuut).

8.5 Bodemgegevens

8.5.1 Ruwheid

Er wordt gerekend met een Chézy-waarde C=65 m^{1/2}/s op de bodem bij de IJgeul. Dit komt overeen met een ribbelhoogte k=0,20 cm.

8.5.2 Topografie

De IJgeul wordt geschematiseerd als een trapeziumvormige geul met vlakke wanden en bodem. Ook de bodem rondom de IJgeul wordt vlak verondersteld. Van de kust af loopt de bodem naar beneden. Gezien het feit dat het rekengebied slechts uit smalle stroken van 90 meter breed bestaat, wordt in ieder model de bodem horizontaal verondersteld. De gegevens om de diepte van de vaargeul en de omliggende bodem te bepalen, worden aan figuur 7-2 ontleend. In figuur 8-3 wordt ter illustratie een doorsnede van het model weergegeven.



figuur 8-3 Voorbeeld van een doorsnede van de IJgeul. Als voorbeeld is genomen de doorsnede van de toekomstige situatie van de IJgeul in zone 2.

8.6 De waterbeweging

Voor de waterbeweging worden het M_2 en M_4 getij gebruikt. De gegevens voor dit getij zijn ontleend aan gegevens van het WL en het RIKZ. Deze gegevens bevatten alleen de waterstand en de stroomsnelheid in één punt. De faseverschuiving tussen twee locaties op de Noordzee (de zuid en de noordrand van het model) zijn gevonden met behulp van het kuststrookmodel van het RIKZ. De gevonden faseverschuiving uit het kuststrookmodel zijn omgerekend naar het hier gebruikte model. De gevonden waarden voor het getij zijn opgenomen in bijlage H.

De stromingsrichting van het getij is evenwijdig aan de lange zijden van het model. Deze lange zijden zijn een 'gesloten rand'; dit betekent dat er geen uitwisseling van water of slib over deze randen van het model plaats vindt. Aan de korte zijden van het model vindt wel uitwisseling plaats. Via deze randen wordt het getij opgelegd. De uitwisseling van het slib wordt besproken in de volgende paragraaf.

Om tot een handzaam model te komen zijn een aantal aannamen met betrekking tot de waterbeweging gemaakt:

Ten eerste impliceert het gebruik van een recht 2DV model dat alle stroming loodrecht op de lengte richting van de vaargeul plaats vindt. Zoals omschreven in paragraaf 7.4 heeft het getij verder van de kust af een ellipsvormig verloop. In het model van de IJgeul wordt echter uitgegaan van een recht verloop van het getij. Hierdoor verdwijnen stromingseffecten in de lengte richting van de vaargeul. Deze leveren echter een kleine bijdrage aan het transport van slib en kunnen daarom verwaarloosd worden. De resultaten van het model zullen door deze verwaarlozing een conservatief beeld geven.

Indien, zoals in dit model, alleen naar de hoofdrichting van het getij wordt gekeken, is ook de invalshoek van het getij ten opzichte van de vaargeul van belang. Met behulp van berekeningen volgens een methode beschreven in [Bijker, 1980] is eenvoudig te bepalen of de invloed van deze hoek van groot belang is. Uit deze berekeningen blijkt dat de hoek van het getij voldoende groot is ten opzichte van de vaargeul om te kunnen aannemen dat de stroming loodrecht op de geul staat. De stroomsnelheid is in het model daardoor een fractie groter dan in werkelijkheid zal optreden.

Ten derde houdt het model geen rekening met de contractiestroming langs de havendammen van IJmuiden. Door deze contractiestroming neemt de snelheid direct zee inwaarts van de haven toe. Hierdoor neemt de sedimentatie in dat gebied af. Wederom geeft het model hierdoor een conservatieve schatting van de werkelijkheid.

Tenslotte zijn in het model geen effecten van dichtheidstromen vanuit de haven of ten gevolge van het zoetere water uit de Maas in rekening gebracht. Deze stromingen zijn te bepalen met behulp van een 3D-model. Het gebruik van een 3D model neemt voor dit onderzoek teveel tijd in beslag.

8.7 Slibeigenschappen en –concentratie

8.7.1 Valsnelheid

In Trisula is het mogelijk om naast een constante valsnelheid ook de effecten van flocculatie en hindered settling op de valsnelheid een rol te laten spelen. Dit gebeurt aan de hand van de volgende vergelijking:

$$w_s = w_{s,ref} \left(\frac{C_{tot}}{C_{ref}}\right)^m \left(1 - \frac{C_{tot}}{C_{soil}}\right)^5$$
(8-5)

Hierin is:

Ws	valsnelheid	(m/s)
W _{s,ref}	referentie valsnelheid	(m/s)
Ctot	aanwezige hoeveelheid slib	(kg/m^3)
Cref	referentie concentratie flocculatie	(kg/m^3)
Csoil	referentie concentratie hindered settling	(kg/m^3)
m	coëfficiënt	(-)

 C_{ref} geeft aan bij welke concentratie de maximale valsnelheid wordt bereikt ten gevolge van flocculatie. C_{soil} geeft de concentratie waarbij het water met slib overgaat in een laag vloeibare modder. Voor de exponent m geldt over het algemeen m ≈ 1 .

In het model van de IJgeul worden zowel de effecten van flocculatie als van hindered settling weggelaten. Door de lage concentratie slib zal hindered settling geen rol spelen (zie paragraaf 4.4.1.3). Ook voor flocculatie zijn de optredende concentraties te laag.

De valsnelheid in het model van de IJgeul krijgt een waarde van 0.5 mm/s, Voor de andere parameters van de valsnelheid geldt: $w_{refs}=0.5$ mm/s, $C_{ref}=1$ en $C_{soil}=10^5$.

8.7.2 Sedimentatie en erosie

In Trisula is het niet mogelijk om sedimentatie en erosie te simuleren. Het is echter wel mogelijk om aan de hand van de slibconcentratie in de onderste laag te bepalen of er sedimentatie dan wel erosie plaats zal vinden. In hoofdstuk 9 wordt hier meer aandacht aan besteed.

Omdat er geen sedimentatie plaats vindt, is er ook geen consolidatie in het model opgenomen. Voor consolidatie geldt ook dat er meer aandacht aan besteed wordt in hoofdstuk 9.

8.7.3 Concentraties

Zoals beschreven in paragraaf 7.5.1 geldt voor het slib bij IJmuiden een dieptegemiddelde concentratie van 20-30 mg/l aan de kust tot 5-10 mg/l op 30 kilometer uit de kust. De concentratie die in het model wordt gebruikt is sterk van invloed op het gedrag van het slib in het model. Verder varieert de concentratie aanzienlijk onder andere weer- of jaargetijdencondities. Gezien het feit dat het niet éénduidig is vast te stellen welke concentratie optreedt, wordt in alle modellen C=25 mg/l aangehouden. Hierdoor zijn de resultaten tussen de modellen beter met elkaar te vergelijken. Om een vloeiende overgang te creëren tussen de instromende en de uitstromende concentraties in het model, wordt een Theather-Harleman tijd van 150 minuten aangehouden.

8.8 Golfbeweging

In paragraaf 7.4 is beschreven welk golfklimaat er in het gebied heerst. Aan de hand van deze gegevens worden de condities bepaald die maatgevend zijn voor de IJgeul. Met deze representatieve golven wordt de bodemschuifspanning ten gevolge van golven bepaald. Dit gebeurt met behulp van de formules zoals beschreven in paragraaf 4.3.3.

Op de bodemschuifspanning zijn vooral golven met een grote golfperiode en dus met een grote golflengte van belang. Deze golven komen hoofdzakelijk uit de noordwestelijke richting (240°-330°). Golven vanuit 180°-360° hebben over het algemeen de grootste golfhoogte. De golfhoogte is ook van belang voor de bodemschuifspanning, maar in mindere mate dan de golflengte. In paragraaf 9.3 wordt een overzicht gegeven van de bodemschuifspanning opgewekt door golven vanuit verschillende richtingen en met verschillende golfhoogten en –periode.

8.9 Overzicht invoerparameters Trisula

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste parameters die het model bevat. Een gedetailleerd overzicht is gegeven in bijlage I.

Parameter	Symbool	Waarde	Opmerkingen
waterdiepte	h	variabel	situatie afhankelijk
stroomsnelheid	U	variabel	situatie afhankelijk
getijde	-	M ₂ ,M ₄ ,S ₂	
Chézy	Zo	65 m ^{1/2} /s	
waterdichtheid	ρ _w	1020 kg/m ³	
sedimentdichtheid	ρ _s	2650 kg/m ³	
initiële sediment concentratie	Co	25 mg/l	
valsnelheid	Ws	0,5 mm/s	
hindered settling	-	nee	
flocculatie	-	nee	
water-bodem uitwisseling	-	nee	
Prandtl-Schmidt nummer	στ	0,7	
wind	-	nee	
golven	-	nee	
dichtheidsgradiënten	-	nee	
buoyancy effecten	-	ja	
turbulente viscositeit hor.		1,0 m ² /s	
ondergrens turbulente viscositeit vert.		10 ⁻⁶ m ² /s	
turbulente diffusie hor.	ε _h	1,4 m ² /s	
ondergrens turbulente diffusie vert.	ε _v	10 ⁻⁶ m ² /s	
aantal lagen		20	
laagdikte	Δz	variabel	zie bijlage I
celgrootte x-richting	Δx	30 m	
celgrootte y-richting	Δу	variabel	zie bijlage I
tijdstap	Δt	0,25 min.	
simulatieduur	Т	5100 min	
T. Harleman tijdsduur	T _H	150 min.	

tabel 8-1 Overzicht van de meest belangrijke parameters van het Trisula model. Een gedetailleerd overzicht is te vinden in bijlage I

9. Resultaten en analyse

9.1 Inleiding

Met het vergroten van de IJgeul neemt naast de breedte ook de diepte van de geul toe. Dit betekent dat er potentieel meer slib in de geul kan bezinken. In de vaargeul met de huidige dimensies is er geen netto sedimentatie van het slib uit de Noordzee. Of dat in de toekomstige situatie ook zo blijft, wordt in dit hoofdstuk bekeken. Om een goed beeld van de sedimentatie en de erosie van het slib in de toekomstige situatie te krijgen, is een model van de IJgeul gemaakt. Met behulp van Trisula zijn simulaties van het IJgeulmodel gemaakt. Er zijn twee varianten van Trisula gebruikt: één met sedimentatie en erosie en één zonder sedimentatie en erosie. Daarnaast is er een studie naar de optredende bodemschuifspanning gedaan. Samen met de resultaten van de beide Trisulamodellen levert dit voldoende informatie om een voorspelling te doen over het slibtransport over de toekomstige IJgeul.

Aan het eind van dit hoofdstuk wordt een interpretatie van de resultaten gegeven. Met behulp van deze interpretatie worden in het volgende hoofdstuk de conclusies getrokken. Eerst bevat dit hoofdstuk een samenvatting van de belangrijkste resultaten van de computersimulaties. De resultaten zelf zijn opgenomen in bijlage J.

9.2 Resultaten van de Trisula berekeningen

9.2.1 Algemeen

Om een overzicht te krijgen van het slibtransport over de IJgeul, is er voor gekozen om naar een tweetal punten binnen het computermodel te kijken. Het eerste punt ligt in het midden van het model en daardoor in het midden van de dwarsdoorsnede van de IJgeul. Het tweede punt ligt ten zuiden van de IJgeul. Hierdoor wordt een beeld verkregen van de sedimentatie in de vaargeul en de sedimentatie buiten de vaargeul. Deze laatste dient als referentie niveau.

In tabel 9-1 en in tabel 9-2 is een overzicht gegeven van de slibconcentratie in de onderste laag en de maximale bodemschuifspanning per locatie. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen springtij en doodtij en tussen de huidige en de toekomstige situatie. Voor de concentratie is een marge aangegeven waarbinnen de waarden van het laatste gesimuleerde getij vallen. Er is over een periode van 7 getijde gesimuleerd. Ook voor de bodemschuifspanning is gekeken naar de waarden gevonden voor het laatste getij. Hierdoor hebben effecten ten gevolge van het inspelen van het model geen invloed meer. Deze resultaten zijn verkregen uit de Trisula variant zonder sedimentatie en erosie. De resultaten van de Trisula variant met sedimentatie en erosie zijn te vinden in paragraaf 9.2.4

tabel 9-1 Overzicht van de slibconcentratie in de onderste laag (C) en de maximale bodemschuifspanning (τ_{cm}) tijdens springtij. Er is onderscheid gemaakt tussen de huidige (H) en de toekomstige situatie (T).

situatie	Doodtij				
	buiten geul		in geul		
	C (g/l)	τ _{cm} (Pa)	C (g/l)	τ_{cm} (Pa)	
Н	2-50	0,14	90 - 105	0,001	
Т	2-50	0,15	65 - 80	0,001	
Н	3-55	0,14	85 - 100	0,007	
Т	2-47	0,15	118-138	0,003	
Н	0-37	0,19	80 - 90	0,009	
Т	0-33	0,17	56 - 62	0,007	
Н	0-35	0,17	70 - 90	0,005	
Т	0-25	0,14	72 - 80	0,007	
	situatie H T H T H T H T H T	situatie Doodtij buiten ge C (g/l) H 2-50 T 2-50 H 3-55 T 2-47 H 0-37 T 0-33 H 0-35 T 0-25	situatie Doodtij buiten geul $C (g/l)$ $\tau_{cm}(Pa)$ H 2-50 0,14 T 2-50 0,15 H 3-55 0,14 T 2-47 0,15 H 0-37 0,19 T 0-33 0,17 H 0-35 0,14	$\begin{tabular}{ c c c c } \hline & Doodtij \\ \hline & buiten geul & in geul \\ \hline & C (g/l) & $$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$	

Bij het beoordelen van de gevonden waarden zoals vermeld in de bovenstaande tabellen, moet met de volgenden punten rekening worden gehouden:

Ten eerste is in deze versie van Trisula geen sedimentatie en erosie opgenomen. Dit betekent dat het bezonken slib geen bodem vormt maar in de onderste laag van het model terechtkomt. Hierdoor neemt de concentratie in de onderste laag sterk toe. Dit heeft tot gevolg dat de turbulentie die door de bodem wordt opgewekt, sterk wordt gedempt. Met een vermindering van de turbulentie neemt ook de concentratie in de onderste laag toe. Dit geeft een vertekend beeld van de optredende bodemschuifspanning. In werkelijkheid vormt het slib dat bezinkt een zeer dun laagje op de bodem. Dit laagje slib heeft een veel kleinere dikte dan de ribbels die zich op de zandbodem bevinden. Deze ribbels zullen ervoor zorgen dat er turbulentie gegenereerd wordt en de bodemschuifspanning hoger ligt dan volgens het model gevonden wordt. Daarnaast moet bij de bodemschuifspanning ten gevolge van stroming de bodemschuifspanning opgewekt door golven opgeteld worden.

Door het ontbreken van sedimentatie en erosie in deze versie van Trisula ontbreekt ook de consolidatie. Hierdoor wordt tijdens periodes met een hoge stroomsnelheden in de onderste laag de volledige concentratie slib weer in suspensie gebracht. In werkelijkheid kan het zijn dat een gedeelte van het slib niet meer wordt opgewoeld maar een vast laagje op de bodem vormt.

zone	situatie	Springtij				
		buiten geul		in geul		
		C (g/l)	τ _{cm} (Pa)	C (g/l)	τ _{cm} (Pa)	
1	Н	0,0-1,75	0,70	0,0-1	0,31	
	Т	0,0-1,75	0,70	0,0-2	0,22	
2	Н	0,0-1,80	0,70	0,0-1,25	0,30	
	Т	0,0-0,75	0,67	0,0-15	0,15	
3	Н	0,0-2,5	0,70	0,0-2,15	0,39	
	Т	0,0-8,7	0,55	0,0-17	0,20	
4	Н	0,0-1	0,75	0,0-1	0,56	
	Т	0,0-2,25	0,75	0,0-1,2	0,30	

tabel 9-2 Overzicht van de slibconcentratie in de onderste laag (C) en de maximale

bodemschuifspanning (τ_{cm}) tijdens springtij Er is onderscheid gemaakt tussen de huidige situatie (H) en de toekomstige situatie (T).

9.2.2 Doodtij

Tijdens doodtij treedt er in de geul sedimentatie op. De bodemschuifspanning ten gevolge van stroming wordt in het model nooit groter dan $\tau_{cm}=0,01 \text{ N/m}^2$. Dit is altijd lager dan de bovengrens voor de kritische bodemschuifspanning voor erosie. Dit betekent dat er na een bepaalde tijd een laagje slib op de bodem kan ontstaan. Of dit laagje sterk genoeg zal worden om tijdens springtij niet te eroderen, wordt bekeken in paragraaf 9.4. Ook in de toekomstige situatie zal er in de geul sedimentatie optreden.

Buiten de geul is niet direct sprake van sedimentatie. Tijdens een periode met lage stroomsnelheden treden er hoge slibconcentraties in de onderste laag op. Wanneer de stroomsnelheden met kentering (van vloed naar eb en andersom) weer toenemen, dan neemt de bodemschuifspanning toe. Hierdoor wordt het slib weer is suspensie gebracht. Dit is te zien aan de op dat moment lage concentraties in de onderste laag. De optredende bodemschuifspanningen zijn echter niet groter dan 0,19 N/m². Dit is lager dan de ondergrens voor de kritische bodemschuifspanning voor erosie, waardoor het niet zeker is dat al het slib weer in suspensie zal komen. De bodemschuifspanning blijft in de meeste gevallen echter boven de bovengrens voor de kritische bodemschuifspanning voor sedimentatie (τ_s =0,04-0,15 N/m²). Dit betekent dat er slechts in kleine mate sedimentatie optreedt. Erosie vindt niet plaats.

9.2.3 Springtij

Bij springtij nemen de stroomsnelheden sterk toe en daarmee neemt ook de bodemschuifspanning opgewekt door de stroming toe. Deze bodemschuifspanning zorgt ervoor dat in de huidige situatie het slib in de onderste laag van de waterkolom in suspensie komt. Buiten de geul is de bodemschuifspanning aanzienlijk hoger dan in de geul. Op beide plaatsen zal deze in de huidige situatie groot genoeg zijn om een gedeelte van de sliblaag op de bodem te eroderen.

Bij een verdiepte IJgeul wordt de bodemschuifspanning bijna gehalveerd ten opzichte van de huidige situatie. Daarmee komt de bodemschuifspanning rond de ondergrens voor de kritische bodemschuifspanning voor erosie te liggen. Dit betekent dat de mate van consolidatie van het slib, dat tijdens doodtij wordt afgezet, bepaalt of het slib geheel of gedeeltelijk zal eroderen. Dit wordt verder uitgewerkt in paragraaf 9.4.

9.2.4 Spring- doodtij cyclus

Naast simulaties met doodtij of springtij, is er ook een simulatie verricht die een periode van spring- naar doodtij beslaat. Deze simulatie is uitgevoerd met behulp van de Trisula variant met sedimentatie en erosie. De simulatie is, vanwege de lange rekenduur, alleen in zone 2 gemaakt. Met behulp van deze simulatie is het effect van de verdiepte IJgeul op de sedimentatie en de erosie binnen een spring-doodtij cyclus te bepalen. In figuur 9-1 zijn de resultaten van de simulatie. In beide figuren is het op tijdstip 30 springtij en op tijdstip 42 doodtij. In bijlage J zijn beide figuren opgenomen voor de gehele simulatie.



figuur 9-1 Spring- doodtij cyclus voor de huidige situatie van de IJgeul.

In de huidige situatie treedt er zowel in als buiten de geul sedimentatie op. Buiten de vaargeul is deze sedimentatie minimaal (ongeveer 0,10 cm per 25 dagen) maar binnen de vaargeul is de aanslibbing een factor 10 groter (ongeveer 1,3 cm per 25 dagen). Er wordt gerekend met een dichtheid ρ =1400 kg/m³ voor het geconsolideerde slib. Tijdens springtij neemt de massa slib op de bodem af, maar een volledige erosie wordt binnen de vaargeul niet bereikt. Dit is in de grafiek te zien aan de waarden op tijdstip 55. Dit betekent dat er in de huidige situatie slib op de bodem van de IJgeul moet worden aangetroffen.

figuur 9-2 Spring- doodtij cyclus voor de toekomstige situatie van de IJgeul.



In figuur 9-2 is een toename van de massa afgezet sediment op de bodem per vierkante (oppervlakte) meter te zien. Dit geldt zowel voor binnen de geul als daarbuiten. Per spring-doodtij cyclus neemt deze massa toe met ongeveer 42 kg/m² binnen en 13 kg/m² buiten de vaargeul. Dit komt overeen met een toename van de laagdikte van het slib op de bodem van 0,030 m respectievelijk 0,009 m per 25 dagen.

9.3 Bodemschuifspanning

9.3.1 Bodemschuifspanning veroorzaakt door stroming

Bodemschuifspanning in de geul wordt zowel door stroming als door golven opgewekt. Het aandeel van de stroming op de bodemschuifspanning is met behulp van Trisula bepaald. Zoals reeds in paragraaf 9.2.1 vermeldt, wordt de bodemschuifspanning beïnvloed door de slibconcentratie in de onderste laag van de waterkolom. Bij een hoge concentratie neemt de bodemschuifspanning af. Door het laagje ongeconsolideerde slib is er geen harde bodem meer aanwezig die de bodemschuifspanning kan opwekken. De bodemschuifspanning zoals berekend door Trisula, geeft in het geval van hoge concentraties een vertekend beeld. Indien geen sediment in de waterkolom aanwezig is, gelden voor de bodemschuifspanning de formules zoals vermeld in paragraaf 4.3.3. De berekende bodemschuifspanning opgewekt door alleen stroming op verschillende dieptes, met spring- en doodtij wordt weergegeven in tabel 9-3.

Met doodtij liggen de berekende waarden uit tabel 9-3 hoger dan de waarden gevonden met Trisula. Op dat moment is de slibconcentratie aan de bodem immers hoog en dempt dat de bodemschuifspanning berekend met behulp van Trisula. Tijdens springtij zijn de verschillen relatief kleiner. Nog steeds liggen de berekende waarden hoger dan de waarden gevonden met Trisula.

tabel 9)-3	Berek	ende
bodemsch	uifspan	ning	
opgewekt	door	stron	ming
zonder	invloe	ed	van
slibconcer	itratie	in	de
onderste	laag	van	de
waterkolo	m.		De
bodemsch	uifspan	ning	is
gegeven in	N/m^2 .		

zone	diepte	doodtij			springtij		
		buiten	huidig	toek.	buiten	huidig	toek.
1	12 m	0,24	0,09	0,05	0,98	0,35	0,21
2	12 m	0,24	0,09	0,05	0,98	0,35	0,21
3	14 m	0,24	0,12	0,07	0,94	0,47	0,28
4	16 m	0,23	0,15	0,09	0,91	0,62	0,37

9.3.2 Bodemschuifspanning veroorzaakt door golven

Door het optreden van windgolven neemt de bodemschuifspanning toe. De mate van toename is afhankelijk van de waterdiepte en de golflengte. Dit is reeds beschreven in paragraaf 4.3.3. In paragraaf 7.4.3 is het golfklimaat gegeven dat voor het gebied rondom de IJgeul geldt. Met behulp van deze gegevens en de formules voor de bodemschuifspanning opgewekt door korte golven, is een overzicht te maken van de grootte van de bodemschuifspanning bij een diepte van 19 m als functie van de golfperiode en de golfamplitude weergeven. In figuur 9-4 is bodemschuifspanning weergeven bij een diepte van 24 meter. Door de gegevens uit deze figuren te combineren met de frequentie van voorkomen van golfperiode met bijbehorende richting is het volgende te constateren.

Ten eerste komen de meeste golven uit de richting van 180° tot 240°. Ook golven uit het noordwesten en uit het noordoosten komen zeer regelmatig voor. Deze veel voorkomende golven hebben een bijbehorende periode tussen 3,7 en 4,5 seconden. Dit betekent dat de meest voorkomende golven instaat zijn om een bodemschuifspanning tot 0,7 N/m² en tot 0,1 N/m² bij een diepte van 19 meter respectievelijk 24 meter te veroorzaken. De hierbij optredende golfamplitude ligt onder 1 meter.

bodemschuifspanning bij een diepte van 19 m 2.125 2 1.875 1.75 1.625 1.5 1.375 E tude 1.25 1.125 1 0.875 0.75 0.625 0.5 0.375 0.25 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5 golfperiode (s) □0.0-0.1 □0.1-0.2 □0.2-0.3 □0.3-0.4 □0.4-0.5 □0.5-0.6 □0.6-0.7 □0.7-0.8 0.8-0.9 0.9-1.0

figuur 9-3 Bodemschuifspanning bij een diepte van 19 meter als functie van de golfperiode en de golfamplitude. Waarden boven 0,4 N/m² worden niet weergegeven. Golven met een grotere periode komen hoofdzakelijk uit de noordoostelijke richting. Deze golven hebben een amplitude die kan oplopen tot ongeveer 6,5 seconden. Dit geeft in combinatie met de golfamplitude van 2 meter, een bodemschuifspanning groter dan 1 N/m². Ongeveer 5 dagen per jaar komen deze grote golven voor. Zoals echter uit figuur 9-3 en figuur 9-4 blijkt zijn golven met een periode vanaf 4,5 seconden respectievelijk vanaf 5,5 seconden bij een amplitude van 1 meter al voldoende om een bodemschuifspanning op te wekken groter dan 0,4 N/m² (de ondergrens van de kritische bodemschuifspanning voor erosie). Golven met een dergelijke periode of groter komen ongeveer 35 dagen per jaar voor.



9.3.3 Bodemschuifspanning veroorzaakt door stroming en golven

Samen met de bodemschuifspanning opgewekt door stroming geeft de bodemschuifspanning opgewekt door golven een bodemschuifspanning volgens:

$\tau_{cw} = \tau_{c} + \frac{1}{2} \tau_{w}$	(9-1)
hierin is:	
τ_{cw} bodemschuifspanning	(N/m^2)
τ_c bodemschuifspanning opgewekt door stroming	(N/m^2)
τ_w bodemschuifspanning opgewekt door golven	(N/m^2)

In tabel 9-4 en in tabel 9-5 is een overzicht gegeven van de optredende bodemschuifspanning tijdens doodtij en springtij in de huidige en de toekomstige situatie. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen normale weercondities, ruige weercondities en storm.

figuur 9-4 Bodemschuifspanning bij een diepte van 19 meter als functie van de golfperiode en de golfamplitude. Waarden boven 0,4 N/m² worden niet weergegeven.

Eindrapport

Uitgaande van een kritische bodemschuifspanning voor erosie van $0,4 \text{ N/m}^2$ en voor sedimentatie van $0,1 \text{ N/m}^2$ kan uit tabel 9-4 worden geconcludeerd dat tijdens doodtij het slib onder normale weercondities zal sedimenteren. Met springtij treedt er onder normale weersomstandigheden geen sedimentatie noch erosie op. Onder ruige golfcondities (golfperiode is 5,5 seconden, golfamplitude is 1,5 meter) en onder stormconditie verandert dit beeld. De bodemschuifspanning neemt toe tot 0,50-0,70 N/m² onder ruige omstandigheden en 5 N/m² onder storm omstandigheden. Dit is voldoende om al het aanwezige slib op de bodem te eroderen en in suspensie te brengen.

De mate waarin het neergeslagen slib in de IJgeul weer zal eroderen, is afhankelijk van de kans van voorkomen van deze grotere golfperiodes.

golfconditie	Situatie	$\tau_{\rm c}$ (N/m ²)	$\tau_w (N/m^2)$	τ_{cw} (N/m ²)	frequentie (d/j)
normaal	Huidig	0,01	0,7	0,36	
	Toekomstig	0,01	0,1	0,06	
ruig	Huidig	0,01	1*	0,51	35
	Toekomstig	0,01	1*	0,51	
storm	Huidig	0,01	10*	5*	5
	Toekomstig	0,01	10*	5*	

tabel 9-5 Overzicht van de bodemschuifspanning opgewekt door stroming en golven onder verschillende weerscondities tijdens springtij.

tabel 9-4 Overzicht van de bodemschuifspanning opgewekt door stroming en golven onder verschillende

tijdens

weerscondities

doodtij.

golfconditie	Situatie	$\tau_{\rm c}$ (N/m ²)	$\tau_w (N/m^2)$	τ_{cw} (N/m ²)	frequentie (d/j)
normaal	Huidig	0,33	0,7	0,68	
	Toekomstig	0,19	0,1	0,24	
ruig	Huidig	0,33	1*	0,83	35
	Toekomstig	0,19	1*	0,69	
storm	Huidig	0,33	10*	5	5
	Toekomstig	0,19	10*	5	

⁴ orde van grootte

9.4 Interpretatie van de resultaten

9.4.1 Huidige situatie

Uit de simulaties blijkt dat er tijdens doodtij slib op de bodem zal bezinken. Tijdens springtij kan een gedeelte van dit slib weer eroderen. De totale slibafzetting bij een initiële uniforme concentratie van 25 mg/l bedraagt per 25 dagen 0,005 meter buiten en 0,013 meter in de vaargeul. Indien er geen erosie door golven optreedt, komt dit overeen met een jaarlijkse aanslibbing van 0,073 meter en 0,190 meter.

Door het optreden van grotere golven tijdens ruig en stormachtig weer, zal een op de bodem aanwezige sliblaag eroderen. Deze golven kunnen een bodemschuifspanning opwekken groter dan 0,50 N/m². Dit is meer dan de kritische bodemschuifspanning voor erosie (τ_e =0,40 N/m²). Deze golven komen met grote regelmaat voor in de Nederlandse kustzone. Hierdoor treedt er jaarlijks netto nauwelijks aanslibbing op. Dit komt overeen met de huidige situatie zoals omschreven in hoofdstuk 7.

9.4.2 Toekomstige situatie

Met het veranderen van de dimensies van de vaargeul, neemt zowel tijdens doodtij als tijdens springtij de slibconcentratie in de vaargeul toe. Er blijft sediment op de bodem van de vaargeul liggen. Uit de simulaties met sedimentatie en erosie blijkt dat de toename van sediment in de vaargeul 42 kg/m² per 25 dagen bedraagt. Buiten de vaargeul neemt het sediment op de bodem met slechts 12 kg/m² toe. Dit geldt bij een initiële uniforme concentratie van 25 mg/l. Neemt de concentratie toe, dan zal ook de sedimentatie in de vaargeul toenemen. Omdat de simulaties veel tijd vergen, zijn er geen simulaties gemaakt met een veranderende concentratie.

Door het optreden van golven neemt, zoals uit paragraaf 9.3 blijkt, de bodemschuifspanning toe. Met normaal weer is deze toename niet voldoende om in de nieuwe, verdiepte IJgeul sedimentatie te voorkomen. Bij toenemende golfperiode en golfhoogte is de optredende bodemschuifspanning wel voldoende om het slib op de bodem in suspensie te brengen.

Het optreden van slibsedimentatie in de nieuwe vaargeul is dus sterk afhankelijk van de golfcondities rondom de IJgeul.

9.4.3 Beperkingen van het model

Om het slibtransport over de vaargeul bij IJmuiden te onderzoeken is een model van de huidige situatie gemaakt. Dit model is gebruikt als hulpmiddel bij het onderzoek. Een model is echter een geschematiseerde weergave van de werkelijkheid. Bij het maken van een model worden een aantal aannamen gedaan. Door deze aannamen wordt een model hanteerbaar, maar dient de uitkomst van het model ook met zorg gebruikt te worden. In deze paragraaf worden een aantal kantekeningen geplaatst bij de verkregen resultaten zoals omschreven in paragraaf 9.4.1 en paragraaf 9.4.2.

Ten eerste wordt in het model alleen met een initiële uniforme concentratie van 25 mg/l gerekend. In de Noordzee waargenomen concentraties variëren van vrijwel 0 mg/l tot 600 mg/l. Een hogere concentratie kan leiden tot een grotere sedimentatie. Dit betekent dat de potentiële aanslibbing veel hoger ligt dan in dit onderzoek naar voren komt. Hoge concentraties komen echter alleen voor bij stormachtig weer, wanneer de bodemschuifspanning ook groot is. Deze hoge concentraties zijn waarschijnlijk een gevolg van het eroderen van het sliblaagje dat op de bodem gevormd is. Een laagje slib (δ =0,005 meter, ρ =1400 kg/m³) die in suspensie gebracht wordt, komt overeen met een concentratie van ongeveer 600 mg/l bij een waterdiepte van 12 meter.

Lagere concentraties leiden tot een kleinere potentiële sedimentatie. Het model geeft in dit geval een overschatting van de sedimentatie.

Omdat met slechts één concentratie gerekend wordt, is het moeilijk een absolute waarde voor de verandering in het slibtransport te geven. De concentratie is niet afhankelijk van de golfconditie en wordt constant gehouden. Er kan slechts een orde van grootte van de relatieve verandering van het transport van slib gegeven worden.

Ten tweede is er geen onderzoek verricht naar veranderingen in het golfklimaat bij een verbrede IJgeul. De gevolgen van een vergrote IJgeul voor het golfklimaat kan met behulp van bij voorbeeld Hiswa bepaald worden. Door het verdiepen van de IJgeul kan het zijn dat grote golven uit het westen dichter bij de kust kunnen komen. Dit betekent, dat er meer erosie zal optreden dan in deze studie wordt verondersteld.

Indien een laagje slib op bodem niet consolideert, neemt de opgewekte bodemschuifspanning af als gevolg van de verhoogde concentratie in de onderste laag van de waterkolom. Omdat in werkelijkheid deze laag zal consolideren, vormt dit laagje een nieuwe bodem op de oorspronkelijke zandbodem. Deze nieuwe bodem is in staat via de bodemschuifspanning turbulentie op te wekken waardoor het slib in de waterkolom in suspensie gehouden kan worden. De Trisula-variant is niet instaat om sedimentatie te simuleren. Dit betekent dat de bodemschuifspanning gevonden met behulp van Trisula lager ligt dan in werkelijkheid zal optreden. Daarmee samenhangend wordt de concentratie met het computermodel overschat ten opzichte van de werkelijkheid. Dit geldt niet voor de Trisula-variant met sedimentatie en erosie. In deze variant is de demping door de concentratie weggelaten. Slibtransport over de IJgeul

Eindrapport

juni 1998

10. Conclusies en aanbevelingen

10.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de conclusies met betrekking tot het onderzoek gegeven. Daarnaast worden enige aanbevelingen gedaan. De doelstelling van het onderzoek is een kwalitatieve vergelijking te maken tussen het slibtransport over de IJgeul in de bestaande situatie en in de situatie met een verbrede en verdiepte IJgeul. De toekomstige situatie wordt bekeken door middel van extrapolatie van de huidige situatie.

10.2 Conclusies

10.2.1 Huidige situatie

Het model geeft de sedimentatie en erosie in de huidige situatie van de IJgeul goed weer. Er is netto nauwelijks sedimentatie in en rond de IJgeul. Tijdens doodtij bezinkt er slib op de bodem en vormt een sliblaag. Met springtij erodeert deze laag slib bijna geheel. Per spring-doodtij cyclus neemt de slibmassa op de bodem in de geul toe met 18 kg/m². Dit komt overeen met een laagdikte van 0,013 meter bij een dichtheid van 1400 kg/m³. Buiten de vaargeul neemt de slibmassa op de bodem per cyclus toe met 2 kg/m² (0,0014 meter).

De invloed van windgolven in het model is van groot belang op de erosie en dus op de netto sedimentatie in de IJgeul. Tijdens storm omstandigheden treden er hoge slibconcentraties op. Dit komt overeen met de door [Winterwerp, 1997] veronderstelde concentraties. Weercondities met golven die voldoende bodemschuifspanning opwekken voor erosie komen gemiddeld 35 dagen per jaar voor. Door de invloed van de golven op de bodemschuifspanning is er netto jaarlijks geen sedimentatie in en buiten de geul.

10.2.2 Toekomstige situatie

Onder normale weersomstandigheden treedt er met doodtij sedimentatie op in de vaargeul. De stroming is tijdens springtij onvoldoende sterk om de sliblaag te kunnen eroderen, maar sterk genoeg om sedimentatie te voorkomen. Zonder stormcondities levert dit netto een jaarlijkse aanslibbing van 0,44 meter op. Binnen de geul neemt de slibmassa per cyclus toe met 42 kg/m². Buiten de vaargeul verandert er weinig in de netto sedimentatie per spring-doodtij cyclus en blijft de massa toename per cyclus laag.

Evenals in de huidige situatie heeft de bodemschuifspanning opgewekt door golven grote invloed op het eroderen van de sliblaag op de bodem. Tijdens ruig weer en tijdens storm wordt de bodemschuifspanning met doodtij en met springtij groot genoeg om het slib te eroderen. Door de invloed van de windgolven blijft de netto jaarlijkse sedimentatie nul.

10.2.3 Eindconclusie

Met het verbreden van de vaargeul bij IJmuiden ontstaat er tijdens een normale springdoodtij cyclus een sliblaag aan de bodem. De massa slib in deze laag bedraagt na één cyclus 42 kg/m². In de huidige situatie heeft deze laag een massa van 18 kg/m². Dit betekent dat de sedimentatie in de toekomstige situatie tijdens normale weerscondities een factor 2 hoger wordt ten opzichte van de huidige situatie. Golven met een grote periode hebben veel invloed op het slibtransport. Het optreden van ruig en stormachtig weer is zowel in de huidige als in de toekomstige situatie voldoende om de sliblaag op de bodem te eroderen.

Er treedt jaarlijks netto geen sedimentatie op in de verruimde vaargeul van IJmuiden.

10.3 Aanbevelingen

Rond de haven van IJmuiden treden contractiestromen op. Deze hebben invloed op het transport van slib over de vaargeul. In deze zone dicht bij de haven komen de hoogste concentraties voor. Zoals al eerder beschreven wordt er aangenomen dat de verhoogde stroomsnelheid een grotere erosie betekent en dus geen probleem is voor het slibtransport. Nader onderzoek zal deze aanname onderbouwen moeten.

Ook ontstaan er rondom de haven van IJmuiden dichtheidstromen. Hierdoor verandert het relatief eenvoudige stromingsbeeld in een complexe stroming. De invloed van deze dichtheidstromen zijn moeilijk te modelleren omdat hierbij een groot rekengebied noodzakelijk is. De dichtheidstromen zijn vooral aan de kust en bij de haven van belang voor het slibtransport. Een gedetailleerd model waarin dichtheidstromen zijn opgenomen kan een beter beeld geven van het slibtransport over de vaargeul.

In het model is aangenomen dat de hoofdrichting van de getijstroming loodrecht op de IJgeul staat. In werkelijkheid varieert de richting met het getij. Samen met de dichtheidstromen kan dit in een gedetailleerd model worden gesimuleerd.

Zoals uit de conclusie blijkt is de invloed van windgolven op het slibtransport groot. In deze studie is met behulp van lineaire golftheorie een schatting van de optredende bodemschuifspanning gemaakt. Met behulp van een golfmodel zoals Hiswa kan een nauwkeuriger beeld van de golven rondom de IJgeul verkregen worden.

11. Literatuurlijst

- Alphen, J.S.L.J. v., (1990), A mud balance for Belgium-Dutch coastal waters between 1969 and 1986, Netherlands Journal of Sea Research, 25, p19-30, The Netherlands.
- Berlamont, J., Ockenden, M., Toorman, E., Winterwerp, J. (1993), Characterization of cohesive sediments properties, in: Coastal Engineering v21 n 1-2 Dec 1993, p 105-128.
- Bijker, E.W. (1980), Sedimentation in Channels and Trenches, Proceedings 17th International Conference on Coatsal Engineering, Sydney, Volume II, chapter 104, p. 1708-1718
- Booij, N., Holthuijsen, L.H. (1996), HISWA user manual, Delft University of technology, Delft, The Netherlands.
- Borst, J.C., Verbeek, H., Heuvel, Tj. v., Spanhoff, R. (1992), Stroomprofielen (1987-1988) ten behoeve van de Stroomatlas Europoort, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Den Haag, The Netherlands.
- Bosman, J.J. (1986), Some aspects of sediment concentrations in the surfzone, Results of measurements at Groote Keeten until February 1986, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Burt, T.N., Parker, W.R., Watts, J., Eds. (1997), Cohesive Sediments, John Wiley & Sons, Proc. 4th Nearshore end Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference INTERCOH'94, Wallingford, England, UK.
- **Cornelisse, J.M., Kuijper, C., Winterwerp, J.C. (1990)**, Sedimentatie en erosie van China-clay onder getijdeomstandigheden, Verkennend onderzoek in de carrousel, Rijkswaterstaat, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Cornelisse, J.M., Kuijper, C., Winterwerp, J.C. (1993), Toepassing vloksterkteverdeling in DELWAQ en gevoeligheidsonderzoek, Rijkswaterstaat, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Cornelisse, J.M., Verbeek, H., Kuijper, C., Winterwerp, J.C. (1992), *Experiments* with surface waves on natural mud, Rijkswaterstaat, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Dronkers, J., Alphen, J.S.L.J. v., Borst, J.C. (1990), Suspended Sediment Transport in the Southern North Sea, in Coastal and Estuarine Studies, vol. 38, R.T. Cheng (red.), Springer-Verlag, New York, USA.
- Eisma, D., Dyer, K.R., Leussen, W. v. (1997), The in-situ determination of settling velocities of suspended fine-grained sediment- a review, in Cohesive Sediments (1997), Burt et al. (red.), John Wiley & Sons, Wallingford, England, UK.
- Giessen, A. v.d., Ruijter, W.P.M. d., Borst, J.C. (1990), *Three-dimensional current* structure in the Dutch coastal zone, Netherlands Journal of Sea Research, Elsevier Science, The Netherlands.
- Giessen, A. v.d., Ruijter, W.P.M. d., Verbeek, H. (1989), Driedimensionale dichtheidsstructuur in de Nederlandse kustzone, Rijkswaterstaat, Den Haag, The Netherlands.
- Grant, W.P., Madsen, O.S. (1979), Combined wave and current interaction with a rough bottom, Journal of Geophysical Research, Vol. 84, no. C4, p 1797-1808
- Heltzel, S.B., Teeter, A.M. (1987), Settling of cohesive sediments, in Coastal sediments 1987, Kraus, N.C., et al., ASCE: 63-70.

- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Herbers, T.H.C. (1989), A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, Coastal Engineering, vol 13, p. 23-54
- Hunt, J.N. ed. (1997), *Gravity Waves in Water of Finite Depth*, Computational Mechanics Publications, Southhampton, UK.
- Kessel, T. v. (1997), Communications on Hydraulic end Geotechnical Engineering, Generation and transport of subaqueous fluid mud layers, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Korevaar, C.G. (1990), North Sea Climate, based on observations from ships and lightvessels, KNMI, Kluwer academic publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Kranenburg, C.(1994), Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, An entrainment model for fluid mud, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Krone, R.B. (1962), Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes, University of California, USA.
- Kuijper, C. (1992), Sedimentation and consolidation of mud, A Literature survey, Rijkswaterstaat, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Kuijper, C., Cornelisse, J.M., Winterwerp, J.C. (1993), *Erosiegedrag van Haringvlietslib*, Experimenteel onderzoek in het erosiecircuit, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Leussen, W. v., Allersma, E., Dollee, A.W., et. al. (1982), Onderzoek naar de transportmechanismen van slib in zout/zout omstandigheden IV, Werkplan Slibonderzoek middellange termijn, Rijkswaterstaat, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Leussen, W. van (1994), Estuarine Macroflocs and their role in fine-grained sediment transport, University of Utrecht, The Netherlands.
- Malcherek, A., Zielke, W. (1996), The Role of marcoflocs in estuarine sediment dynamics and its numerical modeling, in: Estuarine and coastal modeling, proceedings of the 4th International Conference, Malcolm, L. et al (red), ASCE, New York.
- Merckelbach, L.M. (1996), Sedimentation in the Maasmond, a correlation analysis, Rijkswaterstaat, Directie Noordzee, Den Haag, The Netherlands.
- Metha, A.J. (1991), *Review notes on cohesive sediment erosion*, in: Coastal Sediments 1991, Kraus, N.C., et al., ASCE, New York, USA.
- Moser, G.M., Kuijper, C., Dreumel, P.F. v., Linden, M. v.d. (1991), Integrale zandslib modellering voor het noordelijk deltabekken, Rijkswaterstaat, Waterloopkundig laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Olphen, H. v. (1977), An Introduction to Clay Colloid Chemistry. For clay Technologists, Geologists and Soil Scientists, second edition, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Parchure, T.M. (1984), Erosial behavior of deposited cohesive sediment, University of California, USA.
- Partheniades, E. (1962), A Study of Erosion and Deposition of Cohesive Soils in Salt Water. University of California, USA.
- Raaphorst, W. v., Philippart, C.J.M., Smit, J.P.C., Dijkstra, F.J. (1998), Distribution of suspended particulate matter in the North Sea as inferred from NOAA/AVHRR reflectance images and in situ observations, preliminary paper for Journal of Sea Research, 1998.
- Radach, G., Gekeler, J., Kleinow, O. (1997), *NOWESP Data Sets*, Technical Report, 3rd edition, Rijkswaterstaat, Den Haag, The Netherlands.

- Rijksinstituut voor Kust en Zee (1991), gemiddelde getijkromme, 1991.0, RIKZ, Den Haag, The Netherlands
- Rijkswaterstaat (1990), Optimalisatie en management van het civiel-technisch beheer van de vaargeulen naar Rotterdam en IJmuiden, Rijkswaterstaat Directie Noordzee, Den Haag, The Netherlands.
- Rijn, L.C. v., Tan, G.L. (1985), Sutrench-model, Two-dimensional vertical mathematical model for sedimentation in dredged channels and trenches by currents and waves, Rijkswaterstaat, communications 41, Den Haag, The Netherlands.
- Ruijter, W.P.M. de, Postma, L., Kok, J.M. de (?), Transport Atlas of the Southern North Sea, Rijkswaterstaat, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Salden, R.M., Mulder, H.P.J. (1996), De Slibbalans voor de Nederlandse kustwateren onder invloed van slibonttrekking als gevolg van strengere kwaliteitstoetsing van baggerspecie, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Rijkswaterstaat, Den Haag, The Netherlands.
- Straaten, L.M.J.U. v. (1954), Composition and structure of recent marine sediments in the Netherlands, Leidse Geologische Mededelingen, Leiden, The Netherlands.
- **Teisson, C. (1991),** *Cohesive suspended sediment transport,* Feasibility and limitations of numerical modeling, in: Journal of Hydralic Research v29 n 6 1991, p 755-769.
- Teisson, C., Ockenden, M., Le Hir, P., Kranenburg, C., Hamm, L. (1993), Cohesive sediment transport processes, in: Coastal Engineering v21 n 1-3 Dec 1993, p 129-162.
- Uittenbogaard, R.E., Winterwerp, J.C., Kester, J.A.Th.M. v., Leepel, H. (1996), 3D Cohesive sediment transport, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Velden, E.T.J.M. v. d. (1989), Coastal Engineering (vol II), Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Verlaan, P.A.J., Spanhoff, R. (1992), *Slibconcentractieprofielen*, Oceanographic Company of the Netherlands, The Netherlands.
- Visser, M., De Ruijter, W.P.M., Postma, L. (1991), The distribution of suspended matter in the Dutch coastal zone, Netherlads Journal of Sea Research, 27, p127-143, The Netherlands.
- Winterwerp, J.C. (1997), Slibbalans Noordzee tijdens stormomstandigheden, uit: Slibbalans Noordzee tijdens stormomstandigheden, NCK workshop disciplinegroep Slib, NCK, The Netherlands.
- Winterwerp, J.C. (1998), SILTMAN, Analysis of field measurements, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, The Netherlands.
- Zijlema, M. (1997), TRIWAQ three-dimensional incompressible shallow flow model, (voorlopige versie) Rijksinstituut voor Kust en Zee, Rijkswaterstaat, Den Haag, The Netherlands.

Bijlagen

Bijlage A.	Trisula ondiepwatervergelijkingen	ii
Bijlage B.	De IJgeul	viii
Bijlage C.	Windgolven	ix
Bijlage D.	Golfrozen	xii
Bijlage E.	Zoneverdeling in de IJgeul	xvi
Bijlage F.	Berekeningen	xvii
Bijlage G.	Het rooster	xx
Bijlage H.	Modellering van het getij bij IJmuiden	xxi
Bijlage I.	Invoer gegevens voor Trisula	xxiii
Bijlage J.	Resultaten Trisula	xxvi

Bijlage A Trisula ondiepwatervergelijkingen

In deze bijlage wordt de afleiding van de ondiepwatervergelijkingen gegeven. De algemene vorm van de continuïteitsvergelijking voor vloeistoffen luidt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w \right) = 0 \tag{A-1}$$

In deze vergelijking zijn u, v en w de stroom snelheden in x, y en z richting. De bewegingsvergelijkingen in algemene vorm zijn als volgt:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uw) = \rho F_x$$
(A-2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v w) = \rho F_y$$
(A-3)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u w) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2) = \rho F_z$$
(A-4)

In deze afleiding kan voor de krachten in de bovenstaande vergelijking de volgende termen worden meegenomen:

- de Coriolis kracht
- de zwaartekracht
- de drukkracht
- de wrijvingskracht
- de windkracht

De bijdragen van deze termen aan F_x, F_y en F_z zijn als volgt:

Coriolis kracht:
$$F_x := 2\Omega_3 v - 2\Omega_2 w$$
, $F_y := 2\Omega_1 w - 2\Omega_3 u$, $F_z := 2\Omega_2 u - 2\Omega_1 v$ (A-5)

(A-6)

Zwaartekracht:
$$F_x := 0$$
 $F_y := 0$ $F_z := -g$

Drukkracht:
$$F_x := -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$
 $F_y := -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$ $F_z := -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ (A-7)

Wrijvingskracht (moleculaire viscositeit): $F_x := v\Delta u$ $F_y := v\Delta v$ $F_z := v\Delta w$ (A-8)

Hierin is $\Delta := \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ en v de kinematische viscositeitscoëfficiënt.

De bodem- en windwrijving worden behandeld na de verticale integratie van de horizontale componenten van de bewegingsvergelijking.

De andere krachttermen worden in de bewegingsvergelijkingen ingevoerd. Dit leidt tot:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u w) = \rho(2\Omega_3 v - 2\Omega_2 w) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho v \Delta u$$
(A-9)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v w) = \rho(2\Omega_1 w - 2\Omega_3 u) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho v \Delta v$$
(A-10)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u w) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w^{2}) = \rho(2\Omega_{2}u - 2\Omega_{1}v) - \rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho v \Delta w$$
(A-11)

In de verdere afleiding wordt ρ constant verondersteld. Er is in deze afleiding alleen interesse voor de getijdebewegingen. De turbulente fluctuaties dienen daarom te worden gescheiden van de getijde oscillaties. Daarvoor wordt het snelheidsveld (u,v,w) gesplitst in een gemiddelde waarde $(\overline{u,v,w})$ en een fluctuerend gedeelte (u',v',w').

Dit gebeurd zodanig dat $\overline{u} = \frac{1}{T} \int_{t}^{t+T} u dt$ en.

Hierbij wordt aangenomen dat het mogelijk is om het tijdsgemiddelde interval T zo groot te maken dat de fluctuaties verdwijnen maar T ook zo klein te maken dat belangrijke getijdevariaties niet significant worden beïnvloed.

Hierdoor worden de volgende resultaten verkregen:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$
 (A-12)

met $\overline{u^2} = \overline{u}^2 + \overline{u'^2}$ levert dit

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{u}^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{uv} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{uw} \right) =$$

$$= 2\Omega_3 \overline{v} - 2\Omega_2 \overline{w} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + v\Delta \overline{u} - \frac{1}{T} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \int_{t}^{t+T} u^{2} dt + \frac{\partial}{\partial y} \int_{t}^{t+T} u^{2} v dt + \frac{\partial}{\partial z} \int_{t}^{t+T} u^{2} w dt \right\}$$
(A-13)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{uv} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{v}^2 \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{vw} \right) =$$

$$= 2\Omega_1 \overline{w} - 2\Omega_3 \overline{u} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial y} + v\Delta \overline{v} - \frac{1}{T} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \int_{t}^{t+T} u \cdot v \cdot dt + \frac{\partial}{\partial y} \int_{t}^{t+T} v \cdot^2 dt + \frac{\partial}{\partial z} \int_{t}^{t+T} v \cdot w \cdot dt \right\}$$
(A-14)

$$\frac{\partial \overline{w}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{uw} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{vw} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w}^2 \right) =$$

$$= 2\Omega_2 \overline{u} - 2\Omega_1 \overline{v} - g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial z} + v\Delta \overline{w} - \frac{1}{T} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \int_{t}^{t+T} u^* w^* dt + \frac{\partial}{\partial y} \int_{t}^{t+T} v^* w^* dt + \frac{\partial}{\partial z} \int_{t}^{t+T} w^{*2} dt \right\}$$
(A-15)

De laatste term in deze drie laatste vergelijkingen volgt uit de niet-lineariteit van de bewegingsvergelijkingen. Aangezien zij vergelijkbare invloed hebben op het model worden deze termen geschreven als moleculaire diffusie. Dit resulteert in:

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{u^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{uv} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{uw} \right) = 2\Omega_3 \overline{v} - 2\Omega_2 \overline{w} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \left(v + v_T \right) \Delta \overline{u}$$
(A-16)

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{u} \bar{v} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{v}^2 \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{v} \bar{w} \right) = 2\Omega_1 \bar{w} - 2\Omega_3 \bar{u} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \left(v + v_T \right) \Delta \bar{v}$$
(A-17)

$$\frac{\partial \overline{w}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{uw} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\overline{vw} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w}^2 \right) = 2\Omega_2 \overline{u} - 2\Omega_1 \overline{v} - g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial z} + \left(v + v_T \right) \Delta \overline{w}$$
(A-18)

De laatste vergelijking wordt vereenvoudigd. Bij vergelijking van de ordes van grootte van de verschillende termen, waarbij wordt meegenomen dat de horizontale schalen vele malen groter zijn dan de verticale, blijkt als eerste benadering te gelden:

$$-g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \tag{A-19}$$

Deze hydrostatische benadering schept de mogelijkheid om de druk uit de twee andere vergelijkingen te elimineren. Eerst wordt de waterdiepte en het waterniveau gedefinieerd als volgt: h is de afstand tussen de bodem en het referentiesvlak. ξ is de afstand tussen het waterniveau en het referentievlak. De diepte is dan H=h+ ξ

Met p_a is de atmosferische druk geeft integratie van de laatste formule:

$$p = \rho g(\xi - z) + p_a \tag{A-20}$$

Variaties in de atmosferische druk zijn klein vergeleken met pg
 waardoor geldt:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial \xi}{\partial x} \text{ en } \frac{\partial p}{\partial y} = \rho g \frac{\partial \xi}{\partial y}$$
(A-21)

De vergelijkingen worden nu ook over de verticaal geïntegreerd maar daarvoor worden eerst de diepte gemiddelde horizontale snelheden \tilde{u} en \tilde{v} gedefinieerd.

$$\widetilde{u} = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\xi} u dz \qquad \widetilde{v} = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\xi} v dz \qquad (A-22)$$

Het scheidingsvlak tussen lucht en water wordt gegeven met de volgende vergelijking:

 $\xi(x,y,t) = z$. Wanneer voor $z = \xi$ de volgende vergelijking geldt blijft dit deeltje in het oppervlak.

$$\frac{\partial\xi}{\partial t} + \frac{\partial\xi}{\partial x} + \frac{\partial\xi}{\partial y} = \overline{w}$$
(A-23)

Voor de bodem geldt de volgende vergelijking:

-h(x,y,t) = z. Met de relatie z=-h volgt dan:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} = -\overline{w}$$
(A-24)

De volgende integratie formule wordt in de komende berekeningen gebruikt:

$$\int_{-h}^{\xi} \frac{\partial f}{\partial \eta} dz = \frac{\partial}{\partial \eta} \int_{-h}^{\xi} f dz - f(\xi) \frac{\partial \xi}{\partial \eta} + f(-h) \frac{\partial h}{\partial \eta}$$
(A-25)

Integratie van de continuïteitsvergelijking geeft:

$$\int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} dz + \int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} dz = 0$$
 (A-26)

$$\int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} dz + \overline{w} \Big|_{-h}^{\xi} = 0$$
 (A-27)

$$\int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} dz + \overline{w}(x, y, \xi, t) - \overline{w}(x, y, -h, t) = 0$$
(A-28)

Uit (A-28) volgt met (A-23) en (A-24):

$$\int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} dz + \frac{\partial \xi}{\partial t} + \overline{u}(x, y, \xi, t) \frac{\partial \xi}{\partial x} + \overline{v}(x, y, \xi, t) \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} + \overline{u}(x, y, -h, t) \frac{\partial h}{\partial x} + \overline{v}(x, y, -h, t) \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$
(A-29)

Met:

$$\frac{\partial}{\partial x}\widetilde{u}H = \frac{\partial}{\partial x}\int_{-h}^{\xi}\overline{u}dz = \int_{-h}^{\xi}\frac{\partial}{\partial x}\overline{u}dz + \overline{u}(x, y, \xi, t)\frac{\partial\xi}{\partial x} + \overline{u}(x, y, -h, t)\frac{\partial h}{\partial x}$$
(A-30)

$$\frac{\partial}{\partial y}\tilde{v}H = \frac{\partial}{\partial y}\int_{-h}^{\xi} v dz = \int_{-h}^{\xi} \frac{\partial}{\partial y} v dz + v(x, y, \xi, t) \frac{\partial \xi}{\partial y} + v(x, y, -h, t) \frac{\partial h}{\partial x}$$
(A-31)

en
$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial t}$$
 volgt:
 $\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (H\tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tilde{v}) = 0$ (A-32)

Wanneer de verandering van de bodem in tijd wordt verwaarloosd geldt: $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$

Daardoor vinden we:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (H\tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tilde{v}) = 0$$
(A-33)

Voor de afleiding van de bewegingsvergelijkingen in u en v richting worden de niet-lineaire vergelijkingen (A-16) en (A-17) geïntegreerd. Dit heeft wat meer voeten in aarde. De afleiding wordt hier alleen voor de u richting (vergl. A-16)opgeschreven. De termen van deze vergelijking worden een voor een uitgeschreven:

$$\int_{-h}^{\xi} \frac{\partial \overline{u}}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\xi} \overline{u} dz - \overline{u}(x, y, \xi, t) \frac{\partial \xi}{\partial t} - \overline{u}(x, y, -h, t) \frac{\partial h}{\partial t} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} (H\widetilde{u}) - \overline{u}(x, y, \xi, t) \frac{\partial \xi}{\partial t} - \overline{u}(x, y, -h, t) \frac{\partial h}{\partial t}$$
(A-34)

Bij het uitschrijven van de volgende term wordt gebruik gemaakt van:

$$\overline{u} = \widetilde{u} + \widehat{u} \text{ en omdat } \int_{-h}^{\xi} \widehat{u} dz = 0 \text{ vinden we:}$$

$$\int_{-h}^{\xi} \frac{\partial}{\partial x} \overline{u}^2 dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\xi} \widetilde{u}^2 dz - \overline{u}^2 (x, y, \xi, t) \frac{\partial \xi}{\partial x} - \overline{u}^2 (x, y, -h, t) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\xi} \widehat{u}^2 dz =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} H \widetilde{u}^2 - \overline{u}^2 (x, y, \xi, t) \frac{\partial \xi}{\partial x} - \overline{u}^2 (x, y, -h, t) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\xi} \widehat{u}^2 dz \qquad (A-35)$$

Op dezelfde wijze vinden we:

$$\int_{-h}^{\xi} \frac{\partial}{\partial y} \overline{uv} dz = \frac{\partial}{\partial y} H\widetilde{u}\widetilde{v} - \overline{uv}(x, y, \xi, t) \frac{\partial \xi}{\partial y} - \overline{uv}(x, y, -h, t) \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\xi} \hat{u}\hat{v} dz$$
(A-36)

en:

$$\int_{-h}^{\xi} \frac{\partial}{\partial z} \overline{uwdz} = \overline{uw}(x, y, \xi, t) - \overline{uw}(x, y, -h, t)$$
(A-37)

Verder wordt nu voor de analyse van het rechterlid aangenomen dat de verticale snelheden veel kleiner zijn dan de horizontale. In de Coriolis termen wordt daarom de term $2\Omega_2 w$ en de term $2\Omega_1 w$ verwaarloost. Tevens wordt de term $2\Omega_3$ geschreven als f. Integratie van het rechterlid geeft dan:

$$\int_{-h}^{\xi} f v dz = f H \tilde{v}$$
(A-38)

$$\int_{-h}^{\xi} g \frac{\partial \xi}{\partial x} dz = Hg \frac{\partial \xi}{\partial x}$$
(A-39)

en:

$$\int_{-h}^{\xi} (v + v_T) \Delta \overline{u} dz = \int_{-h}^{\xi} (v + v_T) \left(\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2} \right) dz + (v + v_T) \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \Big|_{z=\xi} - (v + v_T) \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \Big|_{z=-h}$$
(A-40)

Het combineren van deze laatste vergelijkingen en het gebruiken van de vergelijkingen (A-23) en (A-24) levert voor vergelijking (A-16) het volgende:

$$\frac{\partial}{\partial t}H\widetilde{u} + \frac{\partial}{\partial x}H\widetilde{u}^{2} + \frac{\partial}{\partial y}H\widetilde{u}\widetilde{v} = fH\widetilde{v} - g\frac{\partial\xi}{\partial x}H + (v + v_{T})\frac{\partial\widetilde{u}}{\partial z}\Big|_{z=\xi} - (v + v_{T})\frac{\partial\widetilde{u}}{\partial z}\Big|_{z=-h} + \left[(v + v_{T})\int_{-h}^{\xi}\left(\frac{\partial^{2}\widetilde{u}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}\widetilde{u}}{\partial y^{2}}\right)dz - \frac{\partial}{\partial x}\int_{-h}^{\xi}\hat{u}^{2}dz - \frac{\partial}{\partial y}\int_{-h}^{\xi}\hat{u}\hat{v}dz\right]$$
(A-41)

In deze vergelijking wordt de term voor $z=\xi$ gebruikt om de bodem invloeden te beschrijven, en de term voor z=-h voor de beschrijving van de wind invloeden. Dit geeft:

$$\left(\nu + \nu_T\right) \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \bigg|_{z=\xi} = \frac{\rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_w}$$
(A-42)

$$\left(\mathbf{v} + \mathbf{v}_T\right) \frac{\partial \widetilde{u}}{\partial z}\Big|_{z=-h} = g\widetilde{u} \frac{\sqrt{\widetilde{u}^2 + \widetilde{v}^2}}{C^2}$$
(A-43)

De turbulente factoren worden samen genomen:

$$\left(\mathbf{v}+\mathbf{v}_{T}\right)\int_{-h}^{\xi} \left(\frac{\partial^{2} \widetilde{u}}{\partial x^{2}}+\frac{\partial^{2} \widetilde{u}}{\partial y^{2}}\right) dz - \frac{\partial}{\partial x}\int_{-h}^{\xi} \hat{u}^{2} dz - \frac{\partial}{\partial y}\int_{-h}^{\xi} \hat{u} \hat{v} dz = Ha\Delta \widetilde{u}$$
(A-44)

We krijgen nu:

$$\frac{\partial}{\partial t} H\widetilde{u} + \frac{\partial}{\partial x} H\widetilde{u}^{2} + \frac{\partial}{\partial y} H\widetilde{u}\widetilde{v} =$$

$$= fH\widetilde{v} - g \frac{\partial \xi}{\partial x} H + Ha\Delta\widetilde{u} + \frac{\rho_{a}C_{d}W_{x}\sqrt{W_{x}^{2} + W_{y}^{2}}}{\rho_{w}} - g\widetilde{u} \frac{\sqrt{\widetilde{u}^{2} + \widetilde{v}^{2}}}{C^{2}}$$
(A-45)

Met gebruikmaking van (A-33) en na delen door H blijft de volgende vergelijking over:

$$\frac{\partial \widetilde{u}}{\partial t} + \widetilde{u}\frac{\partial \widetilde{u}}{\partial x} + \widetilde{v}\frac{\partial \widetilde{u}}{\partial y} - f\widetilde{v} + g\frac{\partial \xi}{\partial x} + g\widetilde{u}\frac{\sqrt{\widetilde{u}^2 + \widetilde{v}^2}}{C^2(h+\xi)} - a\Delta\widetilde{u} - \frac{\rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_w(h+\xi)} = 0$$
(A-46)

Wanneer deze procedure voor de vergelijking in v richting wordt herhaald volgt:

$$\frac{\partial \widetilde{v}}{\partial t} + \widetilde{u}\frac{\partial \widetilde{v}}{\partial x} + \widetilde{v}\frac{\partial \widetilde{v}}{\partial y} + f\widetilde{u} + g\frac{\partial \xi}{\partial y} + g\widetilde{v}\frac{\sqrt{\widetilde{u}^2 + \widetilde{v}^2}}{C^2(h+\xi)} - a\Delta\widetilde{v} - \frac{\rho_a C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho_w(h+\xi)} = 0$$
(A-47)

Deze twee vergelijkingen samen met:

$$\frac{\partial\xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (H\tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tilde{v}) = 0$$
 (A-48)

-144

zijn de ondiepwatervergelijkingen.
Bijlage B De IJgeul



Bijlage C Windgolven

Frequentie van voorkomen per jaar als functie van de golfperiode en de richting van herkomst.









Periode als functie van de golfhoogte en de richting

In de onderstaande grafiek is een zijaanzicht van de vorige grafiek gegeven



Periode als functie van de golfhoogte en de richting

Bijlage D Golfrozen

WAVE ROSE

January 1961 - 1980 (wave height in 0.5M values) Area: 52.0N - 52.9N, 3.0E - 4.9E N = 985



WAVE ROSE

April 1961 - 1980 (wave height in 0.5M values) Area: 52.0N - 52.9N, 3.0E - 4.9E N = 900







300 = 0.2% 0.90 = 0.0% 180 = 0.0% 2/0 = 0.0%030 = 0.0% 120 = 0.0% 210 = 0.0% 300 = 0.0%060 = 0.0% 150 = 0.0% 240 = 0.0% 330 = 0.4%

360 = 3.2%090 = 0.2%180 = 0.0%270 = 0.9%030 = 0.8%120 = 0.0%210 = 2.1%300 = 1.8%060 = 0.1%150 = 0.1%240 = 2.4%330 = 3.0%



150 = 0.0% 120 = 0.0% 240 = 0.0% 330 = 0.0%

WAVE ROSE

July 1961 - 1980 (wave height in 0.5M values) Area: 52.0N - 52.9N, 3.0E - 4.9E N = 695







300 = 0.0% 120 = 0.0% 110 = 0.0% 110 = 0.0%300 = 0.0% 120 = 0.0% 210 = 0.0% 300 = 0.1%060 = 0.0% 150 = 0.0% 240 = 0.0% 330 = 0.0%


060 = 0.0% 150 = 0.0% 240 = 0.0% 330 = 0.0%

~~~

### WAVE ROSE

240

210

180

360 = 0.2% 090 = 0.0% 180 = 0.0% 270 = 0.2% 

October 1961 - 1980 (wave height in 0.5M values) Area: 52.0N - 52.9N, 3.0E - 4.9E N = 1049



150



| 360 =  | 0.0% | 090 = | 0.0% | 180 = | 0.0% | 270 =        | 0.1% |
|--------|------|-------|------|-------|------|--------------|------|
| 030 == | 0.0% | 120 = | 0.0% | 210 = | 0.0% | 300 ≈        | 0.0% |
| 060 =  | 0.0% | 150 = | 0.0% | 240 = | 0.0% | 330 <b>=</b> | 0.0% |

060

, 120

060

120

15%

090

15%

090





# Bijlage F Berekeningen

1. Ls

$$L_s = \frac{h}{w_s} U_{rest}$$

(F-1)

hierin is:

- 0,5.10<sup>-3</sup> m/s 0,004 m/s

Dit geeft:

L<sub>s</sub>=96 m

2. Lm

$$L_{m} = \frac{h^{2}u}{\varepsilon_{z}} \approx \frac{20h^{2}u}{0.1hu} = 200h$$
hierin is:  

$$L_{m} = \text{afstand van rand tot interessegebied}$$
(F-2)

12 m

| -m | anstand van fand for interessegeored |      |
|----|--------------------------------------|------|
| h  | waterdiepte                          | 12 m |

Dit geeft:

L<sub>m</sub>=2400 m

3. Lgetij

$$L_{getij} = \alpha_{getij} \int_{\frac{1}{4}T}^{\frac{3}{4}T} u dt$$
(F-3)
hierin is:

h

| L <sub>getij</sub> | afstand van rand tot interessegebied        | (m)   |
|--------------------|---------------------------------------------|-------|
| α <sub>getij</sub> | constante 1-2                               | (-)   |
| T                  | getijperiode                                | (h)   |
| u                  | horizontale snelheidcomponent van het getij | (m/s) |
|                    |                                             |       |

met:

$$u(t) = u_o + u_1 \cos(T_1 t + \psi_1) + u_2 \cos(T_2 t + \psi_2)$$
(F-4)

-----

hierbij zijn de volgende waarden gehanteerd:

|                | springtij  | doodtij    |
|----------------|------------|------------|
| uo             | 0,004 m/s  | 0,004 m/s  |
| ui             | 0,6028 m/s | 0,3038 m/s |
| u <sub>2</sub> | 0,0344 m/s | 0,0344 m/s |
| T <sub>1</sub> | 29,39      | 29,39      |
| T <sub>2</sub> | 58,78      | 58,78      |
| $\psi_1$       | 47,69 °    | 47,69 °    |
| Ψ2             | 296,78 °   | 296,78 °   |

Na integratie van (F-3) kan de weg van een deeltje in de tijd worden bepaald. Deze is weergegeven in figuur F-1 en figuur F-2 voor springtij en doodtij. Te zien is dat de afgelegde weg bij springtij maatgevend is. Er geldt dan:

 $L_{getij}$ =8558 x 1 à 2 = 8558 à 17.116



figuur F-1 Afgelegde weg van een deeltje tijdens springtij.





4. Tijdstap

$$\frac{\Delta t}{\Delta x}\sqrt{2gh}\approx 5-10$$

Hierin is:

| Δt         | tijdstap                     |                       |
|------------|------------------------------|-----------------------|
| $\Delta x$ | afstand tussen roosterpunten | variërend             |
| h          | waterdiepte                  | variërend             |
| g          | gravitatie versnelling       | 9,89 m/s <sup>2</sup> |

Buiten de vaargeul geldt een roostergrootte van 50 meter met een water diepte van 12 meter. Dit geeft een maximale tijdstap van:

 $\Delta t = 50 \text{ x} (5 \text{ à } 10) \text{ x} (2 \text{ x } 9,89 \text{ x } 12)^{-1/2} = 16 \text{ à } 32 \text{ seconden}$ 

Binnen de vaargeul is de roosterafstand 35 meter en de waterdiepte maximaal 25 meter. Dit betekent voor de maximale tijdstap:

 $\Delta t = 35 \text{ x} (5 \text{ à } 10) \text{ x} (2 \text{ x} 9,89 \text{ x} 25)^{-1/2} = 8 \text{ à } 16 \text{ seconden}$ 

xix

(F-5)

# Bijlage G Het rooster

----



### Bijlage H Modellering van het getij bij IJmuiden

In het Trisula-model wordt het getij met behulp van de volgende twee formules gemodelleerd:

$$h(t) = h_o + h_1 \cos(T_1 t + \varphi_1) + h_2 \cos(T_2 t + \varphi_2) + h_3 \cos(T_3 t + \varphi_3) + \dots$$
(H-1)

$$u(t) = u_o + u_1 \cos(T_1 t + \psi_1) + u_2 \cos(T_2 t + \psi_2) + u_3 \cos(T_3 t + \psi_3) + \dots$$
(H-2)

hierin is:

| h | waterhoogte      | (m)                |
|---|------------------|--------------------|
| u | stroomsnelheid   | (m/s)              |
| Т | hoeksnelheid     | (s <sup>-1</sup> ) |
| φ | faseverschuiving | (-)                |
| ψ | faseverschuiving | (-)                |
| t | tiid             | (s)                |

In het modelleren zoals omschreven in hoofdstuk 8 is er onderscheid gemaakt tussen verschillende zones van de IJgeul. Daarnaast is er met twee verschillende Trisula-varianten gewerkt. In deze bijlage wordt eerst het doodtij en het springtij apart voor verschillende zones behandeld. Vervolgens wordt het getij voor de spring-doodtij cyclus in zone 2 behandeld.

### 1. Springtij en doodtij apart

Op basis van de getijcomponenten zoals omschreven in hoofdstuk 7.4.1 wordt een enkel- en een tweedaags getij opgesteld. De fase verschuivingen zijn verkregen uit het kuststrookmodel van het RIKZ. De waarden voor de parameters in (H-1) en (H-2) zijn opgenomen in de onderstaande twee tabellen. De parameters vanaf index 3 zijn op nul gesteld.

|           | $h_0(m)$ | h <sub>1</sub> (m) | $h_2(m)$ | $T_1(s^{-1})$ | $T_2(s^{-1})$ | φ <sub>1</sub> (-) | φ <sub>2</sub> (-) |
|-----------|----------|--------------------|----------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|
| doodtij   | 0,083    | 0,5295             | 0,9087   | 29,39         | 58,78         | 333,55             | 203,40             |
| springtij | 0,083    | 0,2215             | 0,2215   | 29,39         | 58,78         | 333,55             | 203,40             |

tabel H-1 parameters voor zone 1, 2 en 4 met betrekking tot de waterstand

|           | u <sub>0</sub> (m/s) | u <sub>1</sub> (m/s) | u <sub>2</sub> (m/s) | $T_1(s^1)$ | $T_2(s^{-1})$ | ψ1 (-) | ψ <sub>2</sub> (-) |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|---------------|--------|--------------------|
| doodtij   | 0,004                | 0,3038               | 0,0344               | 29,39      | 58,78         | 47,69  | 296,78             |
| springtij | 0,004                | 0,6028               | 0,0344               | 29,39      | 58,78         | 47,69  | 296,78             |

tabel H-2 parameters voor zone 1, 2 en 4 met betrekking tot de stroomsnelheid

Het model van zone 3 is iets langer dan de modellen van de andere zones. Hierdoor veranderen de faseverschuivingen ten opzichte van de ander zones. In zone 3 wordt  $\psi_1$ =63,23 en  $\psi_2$ = 327,69.

### 2. Spring-doodtij cyclus

Voor de spring-doodtij cyclus wordt met drie getijcomponenten gewerkt:  $M_2$ ,  $M_4$  en  $S_2$ . De parameters voor formules (H-1) en (H-2) worden gegeven in tabel H-3. De parameters vanaf index 4 zijn op nul gesteld.

| h <sub>0</sub> | 0,083  | (m)                |
|----------------|--------|--------------------|
| hı             | 0,719  | (m)                |
| h <sub>2</sub> | 0,221  | (m)                |
| h <sub>3</sub> | 0,189  | (m)                |
| T <sub>1</sub> | 29,39  | (s <sup>-1</sup> ) |
| T <sub>2</sub> | 58,78  | (s <sup>-1</sup> ) |
| T <sub>3</sub> | 30,00  | (s <sup>-1</sup> ) |
| φ1             | 333,55 | (-)                |
| φ <sub>2</sub> | 203,40 | (-)                |
| φ3             | 333,55 | (-)                |

| <b>u</b> <sub>0</sub> | 0,004  | (m)                |
|-----------------------|--------|--------------------|
| u <sub>1</sub>        | 0,4533 | (m)                |
| <b>u</b> <sub>2</sub> | 0,0344 | (m)                |
| u <sub>3</sub>        | 0,1495 | (m)                |
| T <sub>1</sub>        | 29,39  | (s <sup>-1</sup> ) |
| T <sub>2</sub>        | 58,78  | (s <sup>-1</sup> ) |
| T <sub>3</sub>        | 30,00  | (s <sup>-1</sup> ) |
| Ψι                    | 56,29  | (-)                |
| Ψ2                    | 319,99 | (-)                |
| W3                    | 59,29  | (-)                |

tabel H-3 Parameters voor spring-doodtij cyclus

## Bijlage I Invoer gegevens voor Trisula

### 1. Diepte gegevens

In de onderstaande tabellen worden de dimensies van de dwarsdoorsneden van de IJgeul voor de verschillende zones gegeven. De eerste tabel geldt voor de huidige situatie, de tweede voor de toekomstige situatie.

|        | diepte buiten geul (m) | diepte in geul (m) | lengte tot geul (m) | lengte helling (m) | lengte geul (m) |
|--------|------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| zone 1 | 12                     | 19                 | 13.232              | 70                 | 500             |
| zone 2 | 12                     | 19                 | 13.207              | 70                 | 550             |
| zone 3 | 14                     | 19                 | 14.602              | 50                 | 2800            |
| zone 4 | 16                     | 19                 | 13.182              | 30                 | 680             |

tabel I-1 Dimensies van de verschillende doorsneden in de huidige situatie.

|        | diepte buiten geul (m) | diepte in geul (m) | lengte tot geul (m) | lengte helling (m) | lengte geul (m) |
|--------|------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| zone 1 | 12                     | 24                 | 13.182              | 120                | 500             |
| zone 2 | 12                     | 24                 | 11.737              | 1200               | 1230            |
| zone 3 | 14                     | 24                 | 13.022              | 1000               | 4060            |
| zone 4 | 16                     | 24                 | 11.732              | 800                | 2040            |

tabel 1-2 Dimensies van de verschillende doorsneden in de toekomstige situatie.

### 2. Roostergrootte

Het verloop van het rooster in de lengterichting voor de zones 1, 2 en 4 is in tabel I-3 weergegeven. Voor zone 3 is het verloop in tabel I-4 opgenomen. In de breedterichting is de roosterafstand altijd 35 meter.

| veld startgrootte (m) |     | aantal cellen | vergrotingsfactor |  |
|-----------------------|-----|---------------|-------------------|--|
| 1                     | 500 | 17            | 1                 |  |
| 2                     |     | 28            | 0,9094            |  |
| 3                     |     | 23            | 1                 |  |
| 4                     |     | 28            | 1,0996            |  |
| 5                     |     | 17            | 1                 |  |

tabel I-3 Het rooster in de lengterichting voor zone 1, 2 en 4.

| veld | startgrootte (m) | aantal cellen | vergrotingsfactor |  |
|------|------------------|---------------|-------------------|--|
| 1    | 500              | 22            | 1                 |  |
| 2    |                  | 28            | 0,9094            |  |
| 3    |                  | 23            | 1                 |  |
| 4    |                  | 28            | 1,0996            |  |
| 5    |                  | 22            | 1                 |  |

tabel I-4 Het rooster in de lengterichting voor zone 3.

Het verticale rooster is gegeven in tabel I-5. Laag 1 bevindt zich boven in de waterkolom, laag 20 is de onderste laag. De dikte is gegeven als percentage van de waterhoogte.

| laag | dikte (%) |
|------|-----------|
| 1    | 25,41     |
| 2    | 21,34     |
| 3    | 15,25     |
| 4    | 10,89     |
| 5    | 7,78      |
| 6    | 5,56      |
| 7    | 3,97      |
| 8    | 2,83      |
| 9    | 2,02      |
| 10   | 1,45      |

| laag | dikte (%) |
|------|-----------|
| 11   | 1,03      |
| 12   | 0,74      |
| 13   | 0,53      |
| 14   | 0,38      |
| 15   | 0,27      |
| 16   | 0,19      |
| 17   | 0,14      |
| 18   | 0,10      |
| 19   | 0,07      |
| 20   | 0,05      |

tabel I-5 Verticale roosterverdeling voor alle modellen.

### 3. Waterbeweging

De waterbeweging is beschreven in bijlage H

### 4. Overige gegevens

De overige gegevens die nodig zijn als invoer in Trisula zijn opgenomen in de onderstaande tabel.

| Parameter                      | Symbool        | Waarde                      | Opmerkingen           |
|--------------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------|
| waterdiepte                    | h              | variabel                    | situatie afhankelijk  |
| stroomsnelheid                 | U              | variabel                    | situatie afhankelijk  |
| getijde                        | -              | $M_2, M_4, S_2$             | cyclisch              |
| Chézy                          | C              | $65 m^{1/2}/s$              |                       |
| dichtheid van het water        | ρ <sub>w</sub> | 1020 kg/m <sup>3</sup>      |                       |
| dichtheid van het sediment     | ρ <sub>s</sub> | 2650 kg/m <sup>3</sup>      |                       |
| initiële sediment concentratie | Co             | 25 mg/l                     |                       |
| valsnelheid                    | Ws             | 0,5 mm/s                    |                       |
| hindered settling              |                | nee                         |                       |
| flocculatie                    | -              | nee                         |                       |
| water-bodem uitwisseling       | -              | variabel                    | 2 Triusla-SED versies |
| Prandtl-Schmidt nummer         | σ <sub>T</sub> | 0,7                         |                       |
| wind                           | *              | nee                         |                       |
| golven                         | -              | nee                         |                       |
| invloed dichtheidsstromen      | ~              | nee                         |                       |
| buoyancy effecten              | -              | variabel                    | 2 Triusla-SED versies |
| turbulente viscositeit hor.    |                | 1,0 m <sup>2</sup> /s       |                       |
| ondergrens turbulente          |                | $10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s |                       |
| viscositeit vert.              |                |                             |                       |
| turbulente diffusie hor.       | ε <sub>h</sub> | 1,4 m <sup>2</sup> /s       |                       |
| ondergrens turbulente diffusie | ε <sub>v</sub> | $10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s |                       |
| vert.                          |                |                             |                       |
| kritieke bodemschuifspanning   | $\tau_s$       | 0,1 N/m <sup>2</sup>        | alleen voor versie    |
| voor sedimentatie              |                |                             | met sedimentatie      |
| kritieke bodemschuifspanning   | τ <sub>e</sub> | 0,2 N/m⁻                    | alleen voor versie    |
| voor erosie                    |                | 0.001                       | met sedimentatie      |
| erosieconstante                | M              | 0,001 kg/m <sup>-</sup> s   | alleen voor versie    |
| aantal lagen                   |                | 20                          | Inci scumentatic      |
| laandikte                      | -<br>          | variabel                    |                       |
| celgrootte v richting          |                | 20 m                        |                       |
| colgrootte v. richting         |                | JO III                      |                       |
| ceigrooue y-richting           | Δy             | variabel                    |                       |
| ujustap                        |                | 0,25 min.                   |                       |
| simulatieduur                  | 1<br>T         | 5100 min                    | / getij cycli         |
| I. Harleman tijdsduur          | 1 <sub>H</sub> | 150 min.                    |                       |

tabel I-6 Overige invoer gegevens voor het Trisula model.

-

### **Bijlage J** Resultaten Trisula

Bij het weergeven van de resultaten van de simulaties worden codes gebruikt. Deze codes zijn te vinden in de hoek rechtsonder aan elke bladzijde en geven aan om welke simulatie het gaat. Verder geven deze codes aan welke grootheid wordt afgebeeld. De codes zijn volgens de volgende methode opgebouwd:

LGS#

hierin is:

L de locatie van de simulatie:

- 1 zone 1
- 2 zone 2
- 3 zone 3
- 4 zone 4
- G de getij situatie:
  - D doodtij
    - S springtij

S de situatie:

- H huidige situatie
- T toekomstige situatie
- # het nummer van de afbeelding
  - 5 concentratie en bodemschuifspanning in punt (3,30)
  - 9 concentratie en bodemschuifspanning in punt (3,60)

Elke bladzijde bevat twee grafieken. De bovenste grafiek geeft de slibconcentratie in de onderste laag van het model weer. Deze wordt gegeven vanaf het begin van de simulatie tot en met t=5100 min. Dit zijn 7 getijde cycli. Op de verticale as is de concentratie in kg/m<sup>3</sup> (=g/l) weergegeven. Het tweede figuur bevat de opgewekte bodemschuifspanning in hetzelfde punt als waarvan de concertratie wordt gegeven. De horizontale as is gelijk aan de horizontale as van de concentratie. De verticale as geeft grootte van de bodemschuifspanning in N/m<sup>2</sup>.

In een aantal figuren (zoals bijvoorbeeld in figuur 1sh5) varieert de concentratie sterk in de tijd. Hierbij geeft de bodemschuifspanning een periodiek verloop. Dit wordt bepaald door het getij. Op momenten dat de stroomsnelheden hoog zijn, is de bodemschuifspanning ook hoog is. Een hoge bodemschuifspanning zorgt voor een verdeling van het slib over de waterkolom. De concentratie in de onderste laag is dan klein. Neemt de stroomsnelheid af, dan vermindert ook de bodemschuifspanning. De concentratie in de onderste laag wordt dan weer groter. In deze situaties is de optredende bodemschuifspanning voldoende groot om het slib in de onderste laag over de hele waterkolom te verspreiden. Er kan dan gesteld worden dat er geen sedimentatie optreedt.

In andere figuren (zoals bijvoorbeeld figuur 1dh9) is de bodemschuifspanning lager door de lagere stroomsnelheden. De bodemschuifspanning neemt dan snel af met als gevolg een toenemende concentratie in de onderste laag. Dit heeft weer effect op de bodemschuifspanning. In de figuur is te zien dat de bodemschuifspanning snel naar nul nadert. Het slib in de onderste laag wordt niet meer over de hele waterkolom verdeeld en de concentratie neemt snel toe. Er kan dan sedimentatie plaatsvinden.






























































