
MODELLERING VAN HET FIJNKORRELIGE SEDIMENTTRANSPORT EN DE BAGGERSPECIËLE STORTINGEN OP HET BELGISCH CONTINENTAAL PLAT

Michael Fettweis & Dries Van den Eynde

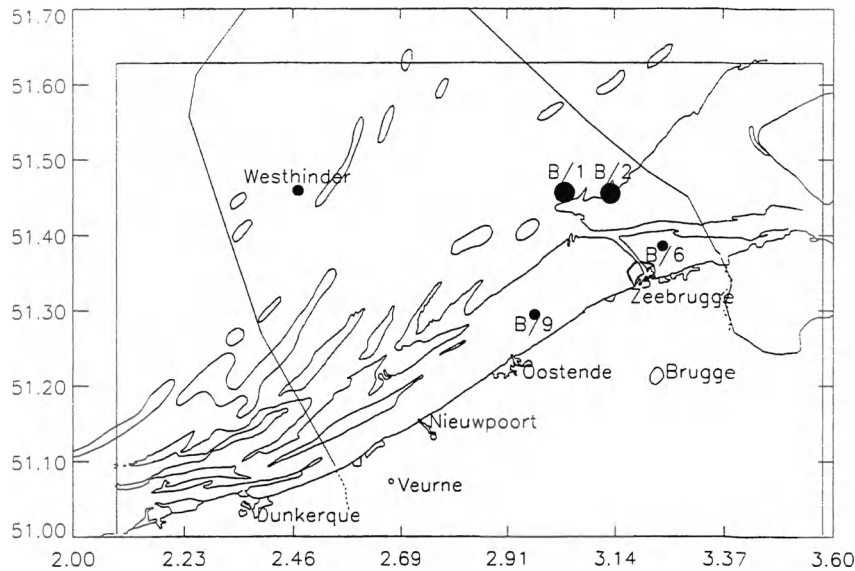
dr. Michael Fettweis & ir. Dries Van den Eynde. Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen.
Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee (BMM), Gulledele 100, 1200 Brussel
Tel: 02/773.21.32. E-mail: m.fettweis@mumm.ac.be

1. Inleiding

De selectie van één of meerdere loswallen met een hoge loswalefficiëntie is een belangrijke bekommernis voor de autoriteiten, die begaan zijn met de problematiek van de baggerspeciële lossingen in zee. Enerzijds wil men zo veel mogelijk vermijden dat het geloste materiaal terugkeert naar de plaats waar het werd gebaggerd. Anderzijds is het ook belangrijk dat de fysische, chemische en biologische effecten, die met het lossen van de eventueel verontreinigde baggerspecie gepaard gaan, zoveel mogelijk gelokaliseerd blijven. Deze bekommernis heeft het Vlaams Gewest ertoe gebracht verschillende onderzoeken te laten uitvoeren door de BMM, die de dispersie van de gestorte baggerspecie en meer algemeen het sedimenttransport voor onze kust bestuderen (Van den Eynde, 1995; Van den Eynde, 1997a; Van den Eynde & Ruddick, 1998; Fettweis & Van den Eynde, 2001).

De wateren in de Belgisch/Nederlandse kustzone worden gekarakteriseerd door een geringe diepte, een goede menging en een hoge hydrodynamische energie. Het sedimenttransport in dit gebied is complex, wat bijvoorbeeld blijkt uit de sterk dynamische zandbanken voor de kust en het transport van fijn gesuspendeerd materiaal. Het kustgebied tussen Oostende en Zeebrugge wordt gekenmerkt door een verhoogde turbiditeit. Het is in dit gebied dat de havens van Oostende en Zeebrugge en de belangrijkste vaargeulen (Pas van het Zand, Scheur) zich bevinden. Jaarlijks wordt hier ongeveer 10×10^6 ton droge stof (TDS) gebaggerd voor onderhoud van de vaargeulen en de havens.

Baggeren van sedimenten en het storten ervan in zee heeft een lokaal impact op de fysische, chemische en biologische omgeving (OSPAR Commission, 2000). 60% van het slib dat op het BCP wordt gestort is afkomstig van de havens van Zeebrugge en Oostende. Dit slib (Lauwaert, 2002) komt terug in zee terecht waar het hoofdzakelijk als suspensiemateriaal wordt getransporteerd. Storten van fijnkorrelige baggerspecie verhoogt plaatselijk de concentratie aan sedimenten in het water en kan ook de dynamica van nutriënten verstoren. Een verhoogde sedimentconcentratie beïnvloedt vooral de planten en filter-feeding organismen. Op de stortplaatsen zelf wordt uiteraard het benthos verstoord doordat het bedolven raakt onder het gestorte sediment.



Figuur 1. Belgisch Continentaal Plat, ligging van de stortplaatsen B/1 (B&W S1), B/2 (B&W S2), B/6 (B&W Zeebrugge Oost) en B/9 (B&W Oostende). Eveneens aangeduid zijn de randen van het numerieke model.

De hoeveelheid aan onderhoudsbaggerwerken is een functie van de lokale hydrodynamische condities en van zowel het natuurlijk sedimenttransport als ook de stortingen van baggerspecie en de frequentie van de baggerwerken zelf. Om de efficiëntie van de stortplaatsen in te schatten is het nodig om het natuurlijk suspensietransport te kennen. Numerieke modellen kunnen gebruikt worden om het natuurlijk sedimenttransport te simuleren. In tegenstelling met de bagger- en stortgegevens, die vrij nauwkeurig gekend zijn, is de onzekerheid of variabiliteit van de meetgegevens van het natuurlijk slibtransport groot (Van Lancker *et al.*, 2001). Dit natuurlijk sedimenttransport wordt voor een deel gevormd door de voortdurende afwisseling van erosie en sedimentatie tijdens een getij, tijdens een doortij-springtijcyclus en tijdens stormen. Het tijgebonden sedimenttransport vertoont een regelmatige variatie in tegenstelling met stormen. In het begin van een storm wordt meer slib in suspensie gebracht en getransporteerd. Na een zekere tijd zal het erodeerbare slib verdwenen zijn en het sedimenttransport dalen.

In dit artikel willen we de resultaten van simulaties met een numeriek sedimenttransportmodel voorstellen. Hierbij zal in het bijzonder het natuurlijk transport van slib, het effect van stortingen van baggerspecie hierop en de efficiëntie van de baggerplaatsen besproken worden. Vooraleer hierop in te gaan zal eerst een overzicht van de fysische toestand (sedimenttransport, baggeren, storten) gegeven worden. Vervolgens worden de modellen kort toegelicht. In het centrale deel van het artikel zullen enkele modelresultaten worden voorgesteld en besproken alvorens enkele conclusies te formuleren. We willen hier benadrukken dat enkel de fysische effecten van baggeren besproken zullen

worden, meer bepaald het transport van het gestorte materiaal en de verhoging van de turbiditeit ter hoogte van de baggerplaatsen. Biologische en chemische effecten van het storten van baggerspecie worden hier niet besproken.

2. Het fijnkorrelig sedimenttransport

2.1. 'Natuurlijke toestand'

Het vastleggen of definiëren van een 'natuurlijke' toestand is moeilijk gezien de vele menselijke ingrepen op het Belgisch Continentaal Plat (BCP) die de sedimentdynamica beïnvloeden. In de laatste tien jaren werd de vaargeul naar Zeebrugge en de Westerschelde stelselmatig verdiept tot een diepte van 13.8 tot 15.9 m GLLWS en namen de gebaggerde hoeveelheden aan slib toe. Toch kan worden vastgesteld dat het gebied tussen ongeveer Oostende en de Westerschelde reeds op de lithologische kaart van Van Mierlo (1899) werd aangeduid als zandhoudend slib en grijs slib. Van Mierlo beschrijft op een vrij uitbundige wijze het voorkomen van slib in dit gebied. Slibhoudende sedimenten in zee ontstaan volgens hem doordat, eens zich een mengeling van slib en zand zich gevormd heeft, deze mengeling door zijn cohesieve eigenschappen moeilijker erodeerbaar wordt en dus ter plaatse blijft liggen. Volgens hem bevinden zich langsheen de Belgische kust enkel tussen Blankenberge en Heist slibvelden. Zij bestaan uit zwart en grijs slib en slibhoudend zand en worden gevormd doordat zich op die plaats een ontmoetingspunt bevindt tussen de naar het oosten gerichte sedimenttransporten van maritieme oorsprong en de naar zee gerichte fluviaal sedimenttransport afkomstig uit de Schelde. De oorsprong van het maritieme slib is volgens hem te vinden in de erosie van de Franse en Engelse kusten. Dit werd veel later onder andere bevestigd door Irion & Zöllmer (1999) aan de hand van de kleimineraalassociaties in de zuidelijke Noordzee. Gilson heeft tussen 1898-1939 ongeveer 3000 sedimentstalen genomen, het merendeel gelegen in de kustzone. Deze stalen werden door hem gedetailleerd beschreven, er werden echter geen kwantitatieve analyses op uitgevoerd. Recent werden de sedimentklassen zoals gedefinieerd op de Van Mierlo kaart gecontroleerd met (enkele) stalen uit de Gilson collectie (van Loen & Houziaux, 2002).

Een kwantitatieve schatting van de natuurlijke toestand kan gebeuren door het transport van fijnkorrelig materiaal op grotere schaal te bekijken. Het baggeren en dumpen hebben immers vooral een lokaal effect. Hieruit blijkt dat een belangrijk deel van het fijnkorrelig suspensiemateriaal afkomstig is van de Straat van Dover. Er bestaat hieromtrent een uitgebreide wetenschappelijke literatuur die door Fettweis & Van den Eynde (1999) werd samengevat. De hoeveelheden aan sedimentinput in de zuidelijke Noordzee die vermeld worden in de literatuur lopen sterk uiteen en zijn gelegen tussen $2,5-58 \times 10^6$ ton/jaar. Recentere data wijzen op een instroming naar de Noordzee van $44,4 \times 10^6$ ton/jaar. Een ander deel van het slib op het BCP is afkomstig van de dagzomende tertiaire en quartaire klei- en sliblagen. Hieromtrent bestaan weinig kwantitatieve data. Bastin (1974) schatte de erosie op minder dan $0-2,4 \times 10^6$ ton/jaar.

2.2. Menselijke verstoringen

Verdiepen van vaargeulen en bouwen van havens verandert lokaal de stroming en dus ook het sedimenttransport. De huidige toestand van verdiepte vaargeulen is niet natuurlijk en niet in evenwicht. Heden ten dage zijn de meest ingrijpende menselijke verstoring van het sedimenttransport uiteraard de baggerwerken (verdiepen van de vaargeulen) en het storten van de baggerspecie in zee. Andere verstoringen betreffen de winningen van aggregaten (zand en grint) op zee (Degrendele *et al.*, 2002). De uitbouw van de haven van Zeebrugge (zie studies uitgevoerd door Eurosense NV ter hoogte van het strand van Heist en het Zwin, 1994a, 1994b) heeft natuurlijk ook een zeer ingrijpende invloed gehad op de stranden en het sedimenttransport.

Baggerwerken hebben een belangrijke invloed. Jaarlijks worden ongeveer 10×10^6 ton droge stof (TDS) gebaggerd voor onderhoud van de vaargeulen (46%) en de havens (54%). 90% van het gebaggerd materiaal bestaat uit fijnkorrelig sediment (slib). In de havens wordt bijna uitsluitend slib gebaggerd, terwijl de specie afkomstig uit de vaargeulen ongeveer 25% zand bevat. Het gebaggerde materiaal wordt vooral op twee plaatsen in zee gestort, waarvan 50% op B/1 (i.e. B&W S1) en 30% op B/6 (B&W Zeebrugge Oost), zie Figuur 1. De hoeveelheid materiaal die gebaggerd en gestort wordt is van dezelfde grootteorde als het natuurlijk residueel sedimenttransport op het Belgisch Continentaal Plat. Het dumpen van deze baggerspecie afkomstig uit onderhoudsbaggerwerken mag echter niet worden beschouwd als een bron van slib. Door stortingen wordt het sediment enkel over een (korte) afstand verplaatst. Het is ook belangrijk erop te wijzen dat het storten van de baggerspecie geen oorzakelijk verband heeft met het voorkomen van een turbiditeitsmaximum voor de kust. De aanrijking aan suspensiemateriaal ter hoogte van de Belgische Oostkust is een natuurlijk fenomeen, dat onder andere reeds beschreven werd door Van Mierlo (1899). Het storten voor de kust op B/1, B/2 en B/6 heeft wel een invloed op de lokale concentratie aan suspensiemateriaal en kan dus ook de uitgestrektheid van het gebied met verhoogde turbiditeit vergroten.

3. Beschrijving van de numerieke modellen

3.1. Inleiding

De hier besproken toepassingen werden bekomen met het tweedimensionale sedimenttransportmodel mu-STM. De stromingen en waterstanden werden berekend met het tweedimensionaal hydrodynamische model mu-BCZ, terwijl het golfklimaat berekend werd met het mu-WAVE golfmodel. Elk van deze modellen zal kort worden toegelicht.

De keuze van het gebruik van een tweedimensionaal hydrodynamisch wordt verantwoord door het feit dat de waterkolom gedurende het hele jaar goed gemengd is en er geen belangrijke temperatuur- of saliniteitsgradiënten voorkomen. Het gebruik van een tweedimensionaal sedimenttransportmodel in plaats van een driedimensionaal model heeft verschillende oorzaken. Ten eerste blijkt uit de validatie van de sedimenttransportmodellen dat het tweedimensionale model even goede tot betere resultaten geeft dan het driedimensionale sedimenttransportmodel. Dit bleek reeds uit de validatie aan de hand van de tracerexperimenten (Van den Eynde, 1997b) en wordt bevestigd door de validatie met metingen van het materiaal in suspensie in verschillende meetpunten (Van den Eynde, 1999a, 1999b). Alhoewel het driedimensionale model 'meer fysica' bevat dan het tweedimensionale blijkt het

driedimensionale model veel gevoeliger voor verschillende modelparameters en blijkt het moeilijker af te stellen dan het tweedimensionale model.

3.2. Het hydrodynamische model mu-BCZ

Het tweedimensionale hydrodynamische model mu-BCZ berekent de dieptegeïntegreerde stroomsnelheid en de waterstanden op het modelrooster onder de invloed van de getijden en de meteorologische effecten. Het model lost de klassieke ondiep watergolfvergelijkingen op te samen met de vergelijking voor het behoud van massa. De vergelijkingen worden met een volledig expliciete eindige differentiemethode opgelost op een Arakawa-C modelrooster. De bodemspanning wordt berekend met een kwadratische wrijvingswet.

Het model is geïmplementeerd op een modelrooster, dat het Belgische Continentale Plat en de Vlaamse Banken omvat, met een resolutie van 25" x 40", wat ongeveer gelijk is aan 750 m op 750 m. Aan de open randvoorwaarden is het model gekoppeld met het hydrodynamische model mu-STORM voor de gehele Noordzee en het Kanaal (Adam, 1979; Adam & Sterling, 1984). Vier halfdagelijkse (M_2 , S_2 , N_2 , K_2) en vier dagelijkse (O_1 , K_1 , P_1 , Q_1) componenten worden gebruikt om de waterhoogten aan de open randen van dit model te berekenen waarbij het omgekeerd barometrisch effect wordt opgelegd om rekening te houden met meteorologische omstandigheden. Aan de uitstroming van de Schelde is het model gekoppeld met een ééndimensionaal model voor het Schelde-estuarium.

3.3. Het golfmodel mu-WAVE

Voor de berekening van de golven op het Belgisch Continentale Plat wordt het mu-WAVE model (Van den Eynde, 1992) gebruikt. De kern van het model bestaat uit het tweede generatie golfmodel HYPAS (Günther & Rosenthal, 1985), dat de onafhankelijke berekening van de deiningenergie voor verschillende frequenties en richtingen met behulp van een straalmethode combineert met een parametrisch zeegangmodel, dat de JONSWAP parameters en de gemiddelde zeegangsrichting als prognostische variabelen gebruikt. Een Lax-Wendroff schema wordt gebruikt om de gekoppelde vergelijkingen op te lossen.

Het model is geïmplementeerd op twee gekoppelde roosters. In de gehele Noordzee wordt een model met een resolutie van 50 km x 50 km gebruikt, terwijl in de Zuidelijke Bocht van de Noordzee een fijner modelrooster met een resolutie van 5 km x 5 km wordt gebruikt.

3.4. Het sedimenttransportmodel mu-STM

3.4.1. Het numerieke model

Het tweedimensionale sedimenttransportmodel mu-STM is een Lagrangiaans model, dat is gebaseerd op de Second-Moment methode (de Kok, 1994). In deze methode wordt al het materiaal in een roostercel voorgesteld door één rechthoekige massa, met zijden parallel aan het modelrooster, dat wordt gekarakteriseerd door zijn nulde moment (de totale massa), zijn eerste momenten (het massacentrum) en zijn tweede momenten (de uitgebreidheid van de rechthoek). De advectie in het modelrooster kan nu worden uitgevoerd door het advecteren van elk van de zijden van

de rechthoek. Na elke tijdstap wordt er alle massa in een rooster cel terug samengenomen tot één rechthoekige massa. Door het gebruik van deze methode wordt er minder numerieke diffusie geïntroduceerd in de modelresultaten dan bij klassieke Euleriaanse modellen. Het model kan rekening houden met verschillende sedimentklassen. In de hier besproken toepassingen wordt enkel met de fractie $<63 \mu\text{m}$ (slib) rekening gehouden.

3.4.2. Erosie, sedimentatie en consolidatie

Het gedrag en het transport van het sediment wordt in belangrijke mate bepaald door de erosie, sedimentatie en resuspensie van het materiaal. Deze processen worden in eerste instantie gestuurd door de aan de bodem optredende bodemspanning. In het mu-STM model wordt deze bodemspanning berekend met de formulering van Bijker (1966), een eenvoudige formulering waarbij de spanning wordt berekend onder het gecombineerde effect van stromingen en golven.

In de literatuur worden ingewikkelde formuleringen voorgesteld voor de modellering van de erosie en sedimentatie van het materiaal, die afhangen van verschillende parameters. Deze formuleringen zijn echter steeds plaatsgebonden en gevoelig voor parameters, die weinig gekend zijn. Daarom worden in het huidige model eenvoudige formuleringen toegepast. De erosie wordt gemodelleerd volgens Ariathurai-Partheniades (Ariathurai, 1974) terwijl de sedimentatie wordt berekend via de formule van Krone (1962). De hoeveelheid materiaal die wordt geërodeerd is bijgevolg een functie van een erosieconstante M [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$] en van een kritische bodemspanning voor erosie τ_s [Pa], terwijl de sedimentatie afhangt van de valsnelheid van de sedimentpartikels w_s [mm/s] en van de kritische bodemspanning voor depositie τ_d [Pa].

In het model wordt de kritische bodemspanning voor erosie afhankelijk gemaakt van de consolidatie van het gesedimenteerde materiaal. Onderzoek naar de afzetting en consolidatie van niet homogene cohesieve sedimenten (slib/zand mengsels) hebben aangetoond dat het zandgehalte een grote invloed heeft op deze erosiedrempel (Torfs *et al.*, 1996; Williamson & Torfs, 1996). Lou & Ridd (1997) hebben een model voor verschillende sedimentfracties bestaande uit actieve lagen boven op een onbeweegbare bodem voorgesteld. Aangezien in het hier beschreven model enkel de fractie kleiner dan $63 \mu\text{m}$ beschouwd wordt, wordt een ander concept van actieve lagen en bodem gebruikt. De vorming van een cohesieve sedimentlaag is het gevolg van het neerslaan van partikels en de consolidatie ervan. Deze processen veranderen de erosiegevoeligheid van de bodem en zijn geïmplementeerd in de actieve lagen van het model. Het consolidatiemodel steunt op het werk van Hayter (1986), Le Normant (1995) en Williamson & Torfs (1996). Elke laag wordt gekenmerkt door een droge dichtheid en een ouderdom. Indien het sediment in een bepaalde laag een zeker ouderdom bereikt heeft dan 'valt' het in de volgende laag die een hogere dichtheid heeft. De droge dichtheid bepaalt de kritische schuifspanning voor erosie. De onderste actieve laag heeft dezelfde kritische erosieschuifspanning als de bodemlaag. De bodemlaag is geen actieve laag, er kan geen materiaal in sedimenteren. Indien geen materiaal in de actieve laag aanwezig is, kan er wel materiaal (slib) uit eroderen, overeenkomstig het slibgehalte in de bodem (zie Figuur 2). De bodemlaag kan zo een (onuitputtelijke) bron van sedimenten zijn.

De kritische schuifspanning voor erosie van kustslib kan variëren tussen 0,1 en 2 Pa (Berlamont *et al.*, 1993) en wordt berekend als een functie van de dichtheid van het sediment. In het model worden waarden voor van 0,5 Pa

(vers slib) en 0,79 Pa (na 48 uren) gebruikt. De schuifsterkte van de bodemlaag bedraagt 1,5 Pa. Voor 100% slib bedraagt de erosieconstante 0,00012 kg/m²/s. In sedimenten met een lager slibgehalte (enkel in de bodemlaag) wordt de erosieconstante vermenigvuldigd met de slibfractie. De valsnelheid is constant en bedraagt 1 mm/s. Deze waarde houdt impliciet rekening met flocculatie processen (Brenon & Le Hir, 1999). Typische waarden voor de kritische depositieschuifspanning, die in een laboratorium werden gemeten variëren tussen 0,05 en 0,2 Pa (Berlamont *et al.*, 1993). Hier werd een waarde van 0,5 Pa gebruikt. Een hoge waarde bevordert afzetting van slib. Resultaten van validatieberekeningen waarin de modelresultaten vergeleken worden met in situ metingen worden besproken in Van den Eynde (1999a).

3.4.3. Randvoorwaarde en initiële conditie

Kennis van de concentratie van het suspensiemateriaal (SPM) in het water ter hoogte van de randen van het model is nodig bij het opstellen van de randvoorwaarde van het sedimenttransportmodel. Het implementeren van een realistische randvoorwaarde is van belang bij langdurige berekeningen, met als doel het opstellen van een sedimentbalans. Op die manier kan de natuurlijke situatie worden gesimuleerd en kan het belang van de stortingen van baggerspecie worden geëvalueerd.

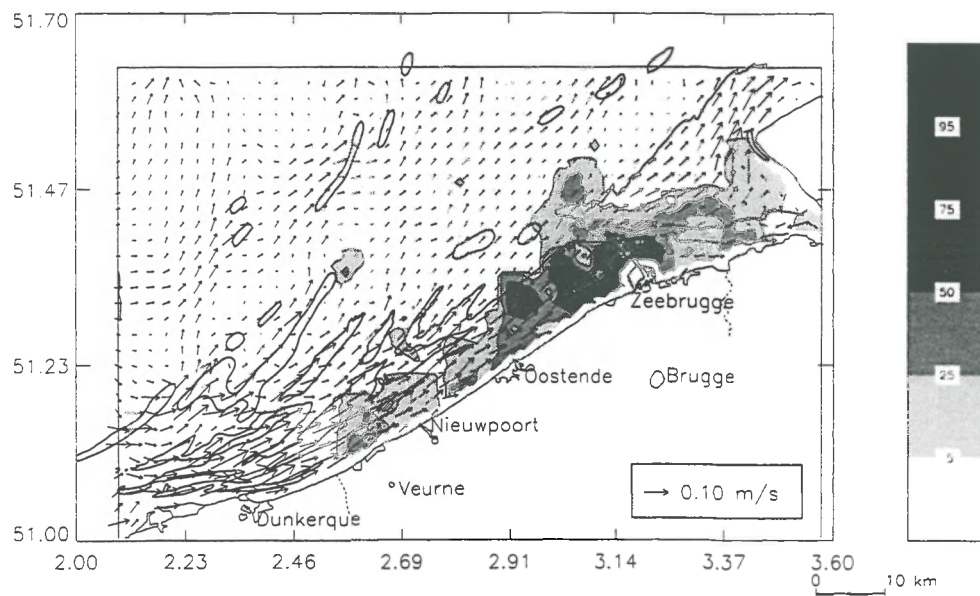
Het belangrijkste brongebied van het suspensiemateriaal in de zuidelijke Noordzee is het Engels Kanaal. De slibconcentratierandvoorwaarde werd opgesteld met behulp van metingen uit het BMM Monitoring Programma 1976-1996 en metingen gepubliceerd in de literatuur of in rapporten (Eisma & Kalf, 1987, Gossé, 1977; Groenendijk, 1992; Gullentops *et al.*, 1976; Salden, 1998). Gebaseerd op deze bronnen werden volgende gemiddelde suspensieconcentraties opgesteld langs de open randen (Fettweis & Van den Eynde, 2000): Scheldemonding 50 mg/l; noordelijke rand: 5 mg/l in het westen toenemend naar 50 mg/l in het oosten; westelijke rand van 10 mg/l dichtbij de kust afnemend tot 5 mg/l in zee.

De bodemlaag wordt gebruikt als beginvoorwaarde voor de modelsimulaties. Het concept van bodemlaag steunt op de veronderstellingen dat de sedimenten geconsolideerd zijn, het zand en slib goed gemengd zijn, de sedimenten enkel kunnen eroderen indien de bovenliggende actieve lagen leeg zijn en de erosie van het slib uit de bodem evenredig is met het slibgehalte in de bodem. Dit laatste wordt bereikt door de erosieconstante te vermenigvuldigen met het slibgehalte. Het slibgehalte werd berekend in elke roostercel door een afstand gewogen interpolatie gebruikmakend van de korrelgrootteanalyses van ongeveer 1400 bodemstalen (Figuur 2). In de bodemlaag kan geen sediment afgezet worden.

4. Modelsimulaties en resultaten

4.1. De natuurlijke situatie

De distributie van het suspensiemateriaal wordt beïnvloed door een reeks met elkaar verweven processen, zoals temperatuur en biologische activiteit, resuspensie en depositie, hydrodynamica en turbulentie, mineralogische samenstelling, chemische eigenschappen, aggregaatforming en flocculatie. Het relatieve belang van elk van deze processen is moeilijk te kwantificeren, deels wegens gebrek aan observaties en deels wegens de complexe aard van de processen en de koppeling tussen elkaar. In Tabel 1 is de massabalans voor een simulatie van de natuurlijke toestand (jaar 1999) opgesteld. Het betreft hier de integratie over het hele modelgebied (dus ook buiten de kustzone), wat de hoge input aan sedimenten via erosie in het model verklaart. Een deel van de output via de noordelijke en de oostelijke randen van het model is afkomstig van deze erosie. De sedimentatie aan slib in het model heeft een juiste grootteorde. De waarde is echter lager dan de jaarlijkse gebaggerde hoeveelheid aan slib. Dit is het gevolg van het feit dat de havens, die belangrijke sedimentatiegebieden zijn, niet in het modelrooster opgenomen zijn.



Figuur 2: Slibgehalte in de oppervlakte sedimenten (gewicht %). De vectoren geven het residueel water transport over 1999 (met meteorologische effecten).

Het voorkomen van slibvelden geassocieerd met turbiditeitsmaxima in een gebied met hoge hydrodynamische energie is reeds het onderwerp geweest van diverse studies. De in deze studies gegeven verklaringen steunen allen op een zogenoemde 'hydrodynamische val', waarin het uit de Franse kustzone komende suspensiemateriaal gevangen wordt. Deze val is een neer of een divergerende of convergerende residuele stroming- of transportpatroon (Bastin, 1973; Nihoul, 1975; Gullentops *et al.*, 1976; Malherbe, 1991). Steunend op de modelresultaten, geven we een andere verklaring (Fettweis & Van den Eynde, 2001): het turbiditeitsmaximum ontstaat door de aanvoer van het suspensiemateriaal via de Straat van Dover, het ondiepe karakter van het gebied, de specifieke hydrodynamische eigenschappen en de afname in grootte van de residuele watertransportvector vanaf de Frans/Belgische grens naar Zeebrugge. Het is als het ware een slibopstopping en geen slibval. Het turbiditeitmaximum is verbonden met het voorkomen van de slibvelden en omgekeerd. In Figuren 3 en 4 worden getijgemiddelde slibconcentraties gedurende een dood- en een springtij getoond.

4.2. Dispersie van baggerspecie na dumping in zee

4.2.1. Opeenvolgende dumpingen

Simulaties met opeenvolgende dumpingen van baggerspecie op drie stortplaatsen (B/1, B/2 en B/6) werden uitgevoerd voor het jaar 1999. De data van de dumpingen werden gerangschikt per storttijdstip en per stortplaats en gecorrigeerd om enkel rekening te houden met de slibfractie. De data werden opgevraagd bij de afdeling Waterwegen Kust, Administratie Waterwegen en Zeewezen, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. Tijdens het baggerjaar 1999 werden in de vaargeulen, naast onderhoudsbaggerwerken ook verdiepingsbaggerwerken uitgevoerd. Dit materiaal bevat een veel grotere zandfractie dan het materiaal afkomstig uit onderhoudsbaggerwerken. Hiermee werd rekening gehouden bij de bepaling van de slibfractie van het gestort materiaal. De baggerspeciéstortingen worden in het model gesimuleerd door op het gegeven tijdstip de hoeveelheid slib op de stortplaats in suspensie in het model te brengen.

De simulaties kunnen enkel een indicatie geven van de processen die zich werkelijk afspelen, omdat er in het model nieuw materiaal ingebracht wordt. In werkelijkheid wordt tijdens het onderhoudsbaggeren en storten het sediment enkel verplaatst over een zekere afstand. Enkel tijdens verdiepingsbaggerwerken wordt 'nieuw' materiaal opgegraven en gestort. Vermits dit sediment voornamelijk uit zand bestaat zal de invloed op de turbiditeit en het fijnkorrelig sedimenttransport gering zijn. Het nieuwe slib dat in het rooster gebracht wordt om de stortingen te simuleren beïnvloedt uiteraard ook de massabalans, zie Tabel 1. Ondanks de verschillen kunnen de simulaties gebruikt worden om de lokale fysische effecten van het storten van baggerspecie te bekijken, *i.e.* de verhoogde turbiditeit en de grotere aanslibbing rond de stortplaatsen, in de vaargeulen en in de kustzone ten westen en ten oosten van Zeebrugge.

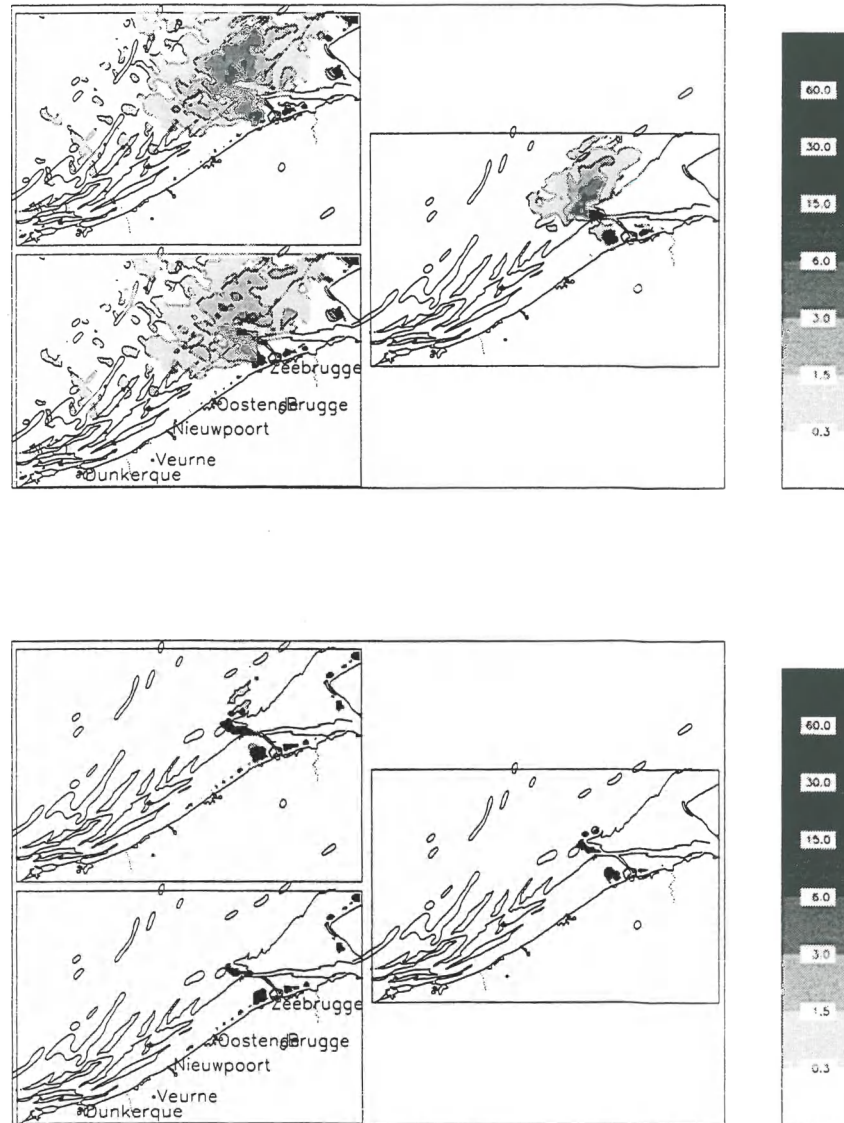
Tabel 1: Massabalans (in 10⁶ ton droge stof) voor een simulatie van de 'natuurlijke' toestand (i.e. zonder storten, nr 1) en een simulatie met storten van slib (nr 2) op B/1, B/2 en B/6 voor het jaar 1999. +: invoer; -: uitvoer of immobilisatie; erosie: erosie van de bodemlaag; sedim: sedimentatie in de actieve modellagen; susp.: hoeveelheid slib in suspensie (netto).

Nr	invoer		uitvoer			storten	susp
	W-rand	erosie	N-rand	Schelde	sedim.		
1	+8.09	+10.62	-10.66	-0.39	-6.43	-	1.23
2	+8.09	+10.53	-15.40	-0.40	-7.98	+6.47	1.31

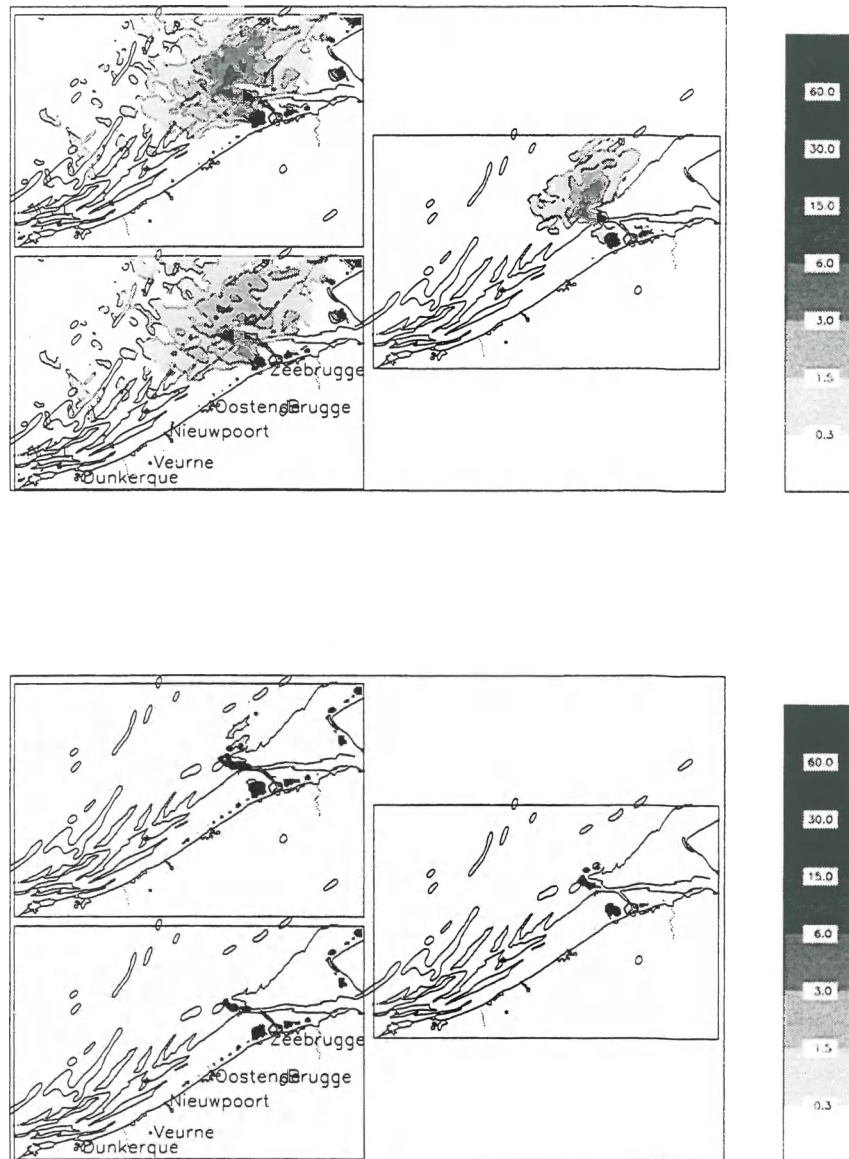
Uit de simulatieresultaten blijkt dat ongeveer 75% van het gestorte slib het model weer verlaat langs de randen, 25% van dit slib wordt afgezet in het model of bevindt zich in suspensie (1.63 miljoen ton). De verhoogde slibafzetting ten gevolge van dit extra slib is deels gesitueerd in de nabijheid van de stortplaatsen (zie Figuur 4).

De tijgemiddelde slibconcentratie- en slibafzettingskaarten met en zonder stortingen tezamen met de verschilkaarten worden in Figuur 3 en 4 getoond. De modelresultaten laten zien dat het storten op B/1 de slibconcentratie doet toenemen in een cirkel met straal van ±10-20 km rond de stortplaats. De tijgemiddelde slibconcentratie stijgt met ongeveer 50 tot 100 mg/l afhankelijk van de stortfrequentie en -hoeveelheid. Ter hoogte van de stortplaats B/6 zijn de verschillen in turbiditeit met en zonder storting geringer. De resultaten laten ook zien dat de slibafzetting ten noorden van de Vlakte van de Raan toeneemt. Een deel van dit afgezette slib wordt terug in suspensie gebracht tijdens een springtij wat verantwoordelijk is voor de toename in turbiditeit en de uitgestrektheid van deze 'vlek'. Ondanks de grote hoeveelheden aan slib die gestort werden, neemt de slibafzetting in de vaargeulen nauwelijks toe t.o.v. een simulatie zonder storten. Dit resultaat is in overeenstemming met de resultaten uit het VESTRAM project (Van den Eynde, 1999b) en laat toe om te besluiten dat het gestorte materiaal elders werd afgezet of het modeldomein heeft verlaten.

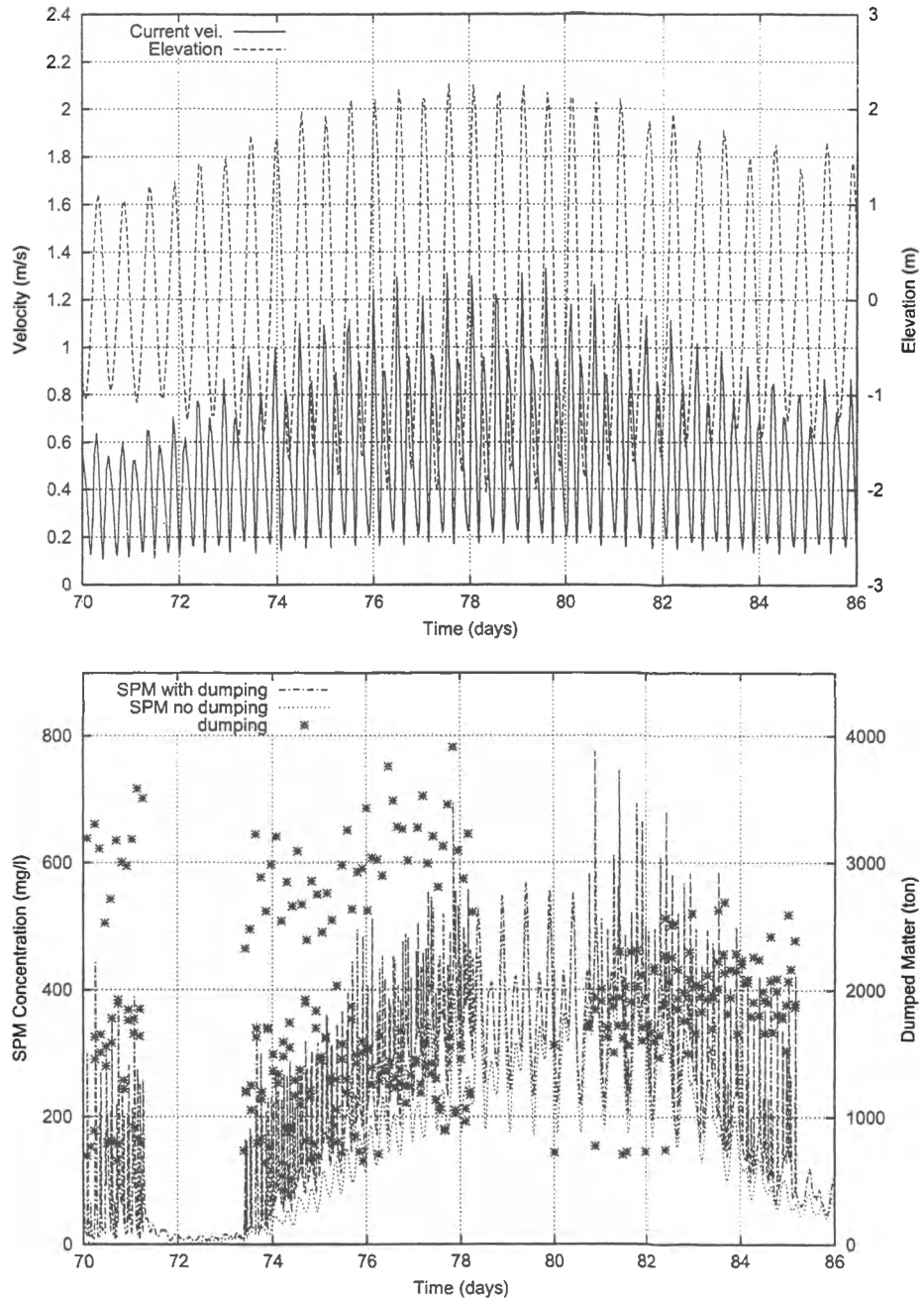
In Figuren 5 tot 7 wordt gedurende een periode van 16 dagen (tussen doortij en springtij) het verloop van de stroomsnelheid, de waterstand en de slibconcentratie met en zonder stortingen getoond in de drie beschouwde stortplaatsen. Ook de stortingen en de hoeveelheid materiaal dat gestort werd wordt in de Figuren getoond. Het betreft hier uiteraard 'roostercel'-gemiddelde waarden: de hoeveelheid gestort materiaal na storten wordt verspreid over een hele roostercel en dus over een volume van 750 x 750 x waterdiepte [m³]. Bij een waterdiepte van 15 m komt een storting van 1000 ton slib dus overeen met een plotse toename van de slibconcentratie in de roostercel met ongeveer 120 mg/l. Uit de figuren blijkt dat gedurende perioden met veel stortingen de slibconcentratie in het water sterk toeneemt (zie bijvoorbeeld dag 70-71 in Figuur 5, dag 82 in Figuur 7)



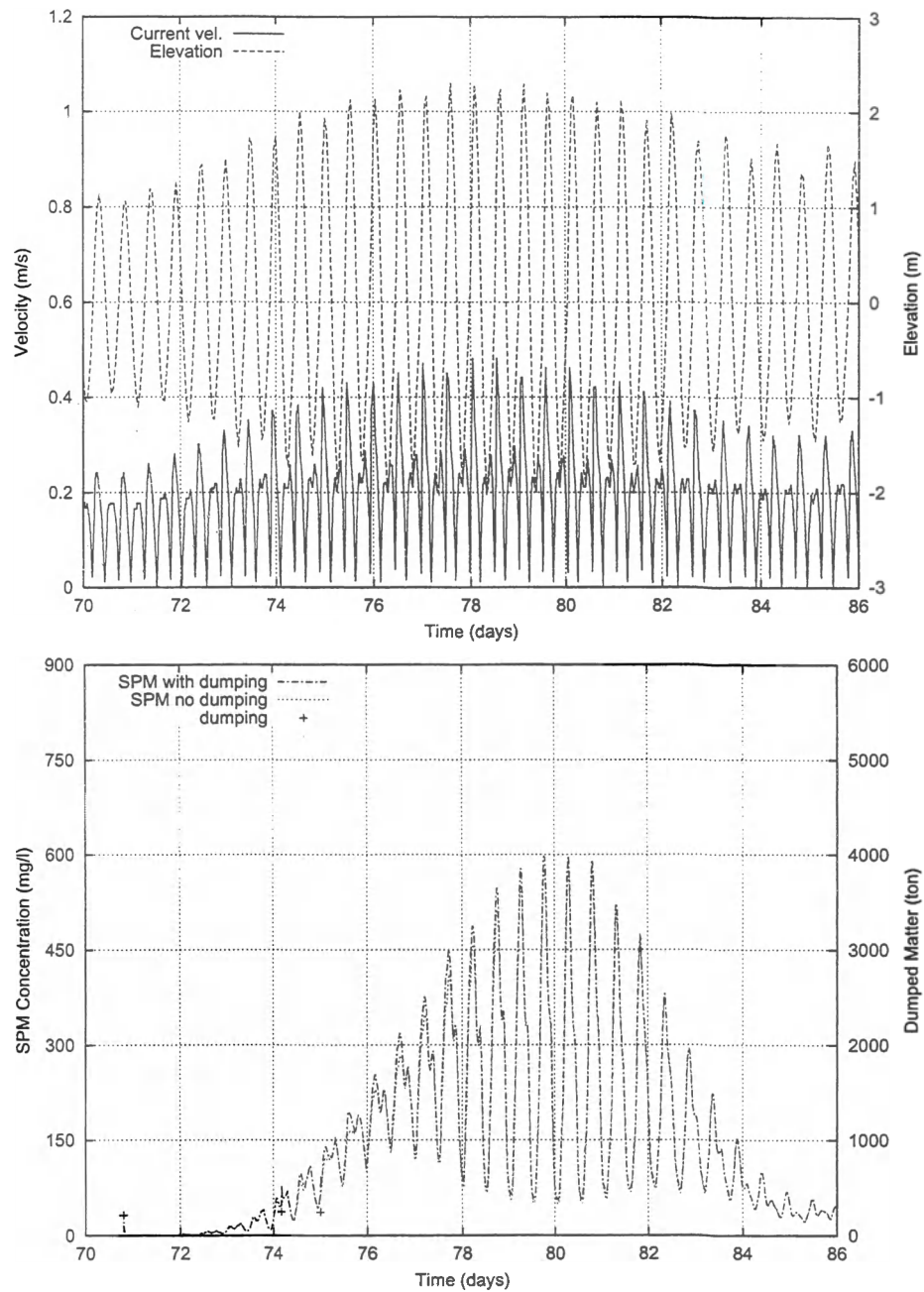
Figuur 3. Getij-gemiddelde slijbconcentratie (mg/l). (a) doottij (14/03/99) en (b) springtij (20/03/99). Per figuur: linksonder is de 'natuurlijke' toestand, linksboven de toestand met stortingen op B/1, B/2, B/6 en rechts is het verschil tussen beiden.



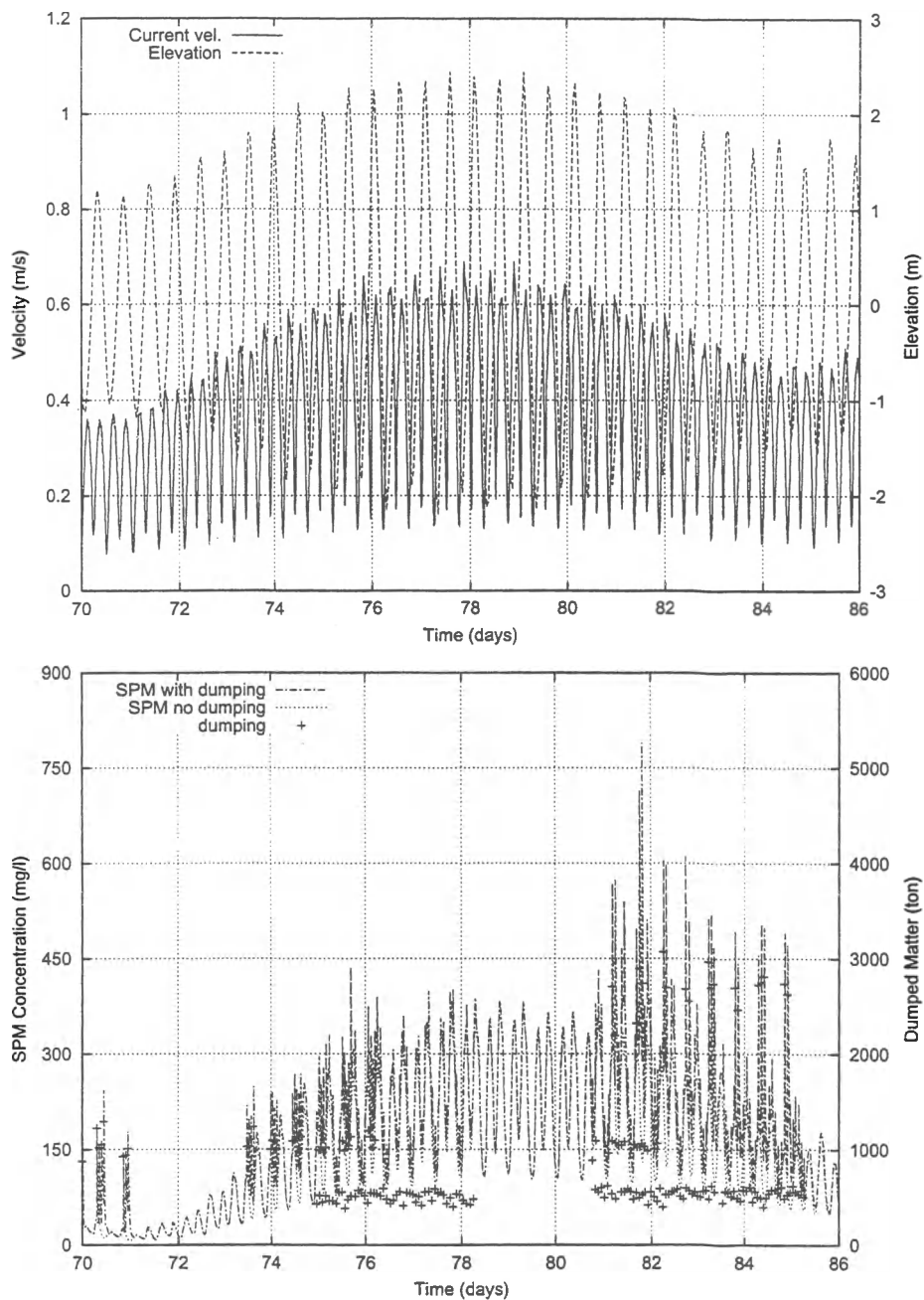
Figuur 4. Getij-gemiddeld slibafzetting (kg/m^2) (a) doortij (14/03/99) en (b) springtij (20/03/99). Per figuur: links onder is de 'natuurlijke' toestand, linksboven de toestand met stortingen op B/1, B/2, B/6 en rechts is het verschil tussen beiden.



Figuur 5. Stortplaats B/1, 11-27/03/1999. (a) Waterstand en Stroomsnelheid (b) Slibconcentratie (SPM) met en zonder stortingen van baggerspecie.



Figuur 6. Stortplaats B/2, 11-27/03/1999. (a) Waterstand en Stroomsnelheid (b) Slibconcentratie (SPM) met en zonder stortingen van baggerspecie (er werd enkel 3 keer gestort gedurende de beschouwde periode).



Figuur 7. Stortplaats B/6, 11-27/03/1999. (a) Waterstand en Stroomsnelheid (b) Slibconcentratie (SPM) met en zonder stortingen van baggerspecie.

4.2.2. Efficiëntie van stortplaatsen

De stortplaats B/6 is dichtbij de baggerplaatsen (de haven van Zeebrugge) gelegen en een deel van het gestorte materiaal zal terugstromen naar de baggerplaats. Uit simulaties en tracerexperimenten blijkt dat ook een deel van het materiaal dat op B/1 gestort wordt terugkeert naar de kustzone (Van den Eynde, 2002). De efficiëntie van de huidige baggerplaatsen is dus beperkt en er treedt bovendien recirculatie op. Kan de hoeveelheid aan het te baggeren materiaal significant verminderd worden door de stortplaatsen te verleggen?

De verhouding tussen de hoeveelheid materiaal die jaarlijks gebaggerd en gestort wordt en de hoeveelheid materiaal die jaarlijks op natuurlijke wijze het BCP binnenkomt en langs de Belgische kustzone stroomt, geeft een indicatie over de invloed van de locatie van de stortplaatsen op de te baggeren hoeveelheid. Een grote verhouding is een indicatie dat het baggeren van de vaargeulen en havens een belangrijk proces is in de Belgische kustwateren. Is deze verhouding evenwel klein dan is het dumpen van de baggerspecie een onbelangrijk proces ten opzichte van de natuurlijke opvulling van de baggerplaatsen. Dit zou dan kunnen betekenen dat de keuze van de ligging van de stortplaatsen van ondergeschikt belang is.

De verhouding wordt berekend aan de hand van de baggergegevens, die vrij nauwkeurig gekend zijn, en het uit literatuurdata geschatte residuele slijbtransport op het BCP. Zoals in 2.1 vermeld, variëren de literatuurgegevens sterk en is er dus een grote onzekerheid betreffende deze gegevens. Gebruik makend van de baggergegevens en van de literatuurdata (storten/input+erosie) wordt een waarde voor de verhouding verkregen van 0,36. Met de modelresultaten (storten/input+erosie+storten) bedraagt de verhouding 0,26. Deze getallen wijzen enerzijds op het feit dat een substantieel deel van het slijb van het 'natuurlijk' sedimenttransport betrokken wordt in de baggeroperatie. Door efficiëntere stortplaatsen te kiezen ver uit de kust zou de te baggeren hoeveelheid kunnen dalen. De hieruit resulterende baten moeten echter vergeleken worden met de hogere kosten tengevolge van een langere vaarweg en de relatief grotere biologische en chemische impact ten opzichte van het storten in een omgeving die reeds van natuur uit een hoge turbiditeit heeft. Anderzijds duiden de verhoudingen ook aan dat de grote sedimentaanvoer op het BCP altijd voor grote aanslibbing van de havens en van de vaargeulen verantwoordelijk zal zijn.

5. Fysische effecten van baggerspeciëstortingen

In het onderliggende artikel werd een overzicht gegeven van de modellering van het natuurlijk en het door mensen beïnvloede sedimenttransport. Uit de resultaten van het onderzoek kunnen volgende (voorlopige) conclusies getrokken worden:

- De hydrodynamische condities zijn zodanig dat er zich een natuurlijk turbiditeitsmaximum ter hoogte van de Oostkust bevindt. Dit turbiditeitsmaximum kan best omschreven worden als een opstopping van het sedimenttransport afkomstig uit de Straat van Dover en gaande in noordoostelijke richting.
- Tengevolge van de verhoogde turbiditeit ontstaan lokaal 'natuurlijke' of door mensen veroorzaakte (in havens en vaargeulen) slijbafzettingen.
- Het storten van de gebaggerde specie doet lokaal de slijbconcentratie stijgen.

- Recirculatie van het gestorte materiaal naar de baggerplaatsen is belangrijker bij stortplaatsen B/6 en B/9 dan bij B/1 en B/2. Omdat er zich echter een (natuurlijk) turbiditeitsmaximum ter hoogte van de kust bevindt, lijkt het dat de te baggeren hoeveelheden weinig zullen veranderen bij een verandering van de positie van de stortplaatsen.
- De positie van de stortplaatsen lijkt van ondergeschikt belang bij het beschouwen van de efficiëntie van de baggerwerken.

Dankbetuiging

Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Administratie Waterwegen en Zeewezen, Afdeling Maritieme Toegang.

Referenties

- Adam, Y., 1979. Belgian real-time system for the forecasting of currents and elevations in the North Sea. In J.C.J. Nihoul (Ed.): *Marine forecasting: predictability and modelling in ocean hydrodynamics*. Elsevier Oceanography Series 25, 411-425.
- Adam, Y. & A. Sterling, 1987. La prévision des marées-tempêtes le long de la Côte Belge. *Extrait des Annales des Travaux Publics de Belgique*, 2, 105-115.
- Ariathurai, C.R., 1974. A finite element model for sediment transport in estuaries. Ph.D. Thesis, University of California, Davis.
- Bastin, A., 1973. Natural radioactive tracers and their use in Belgium. *Tracer Techniques in Sediment Transport*. Technical Report Nr. 145, IAEA, Vienna.
- Bastin, A., 1974. Regionale sedimentologie en morfologie van de zuidelijke Noordzee en het Schelde estuarium. Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 91 pp.
- Berlamont, J., M. Ockenden, E. Toorman & J. Winterwerp, 1993. The characterisation of cohesive sediment properties. *Coastal Engineering*, 21, 105-128.
- Bijker, E.W., 1966. The increase of bed shear in a current due to wave motion. In: *Proc. 10th Conf. Coastal Eng.*, Tokyo, 746-765.
- Brenon, I. & P. Le Hir, 1999. Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): Identification of formation processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, 525-544.
- Degrendele, K., M. Roche & P. Schotte, 2002. Project Zandwinningen: Monitoring van de impact van zandwinning op de morfologie van de bodem. In: V. Van Lancker et al. (eds.). *Kustzonebeheer vanuit geo-ecologische en economische invalshoek*. Genootschap van Geologen van de Universiteit Gent en VLIZ. Oostende, 16-17 mei 2002. VLIZ special Publication 10, Oostende, Belgium.
- de Kok, J.M., 1994. Numerical modelling of transport processes in coastal waters. Ph.D. Thesis, Universiteit Utrecht, 158 pp.
- Eisma, D. & J. Kalf, 1987. Dispersal, concentration and deposition of suspended matter in the North Sea. *Journal of the Geological Society of London*, 144, 161-178.
- EUROSENSE, 1994a. Bufferzone Heist Sedimentdynamica. Metingen van spring- naar doottij (9-16 feb. 1993) en bij storm (18-20 feb. 1993). KDN 94.004, Eurosense, Wommel.
- EUROSENSE, 1994b. Vooroever Zwin, Sedimentdynamica. KDN 94.005.
- Fettweis, M. & D. Van den Eynde, 1999. Bepaling van de Sedimentbalans voor de Belgische Kustwateren. *Activiteitsrapport 1: Literatuurstudie*. BMM-rapport SEBAB/1/XX/199912/NL/AR/1, 35 pp.
- Fettweis, M. & D. Van den Eynde, 2000. Bepaling van de Sedimentbalans voor de Belgische Kustwateren, *Activiteitsrapport 2: Berekeningen met sedimenttransportmodellen*. SEBAB/1/MF/200006/NL/AR/2, MUMM, Brussels.

- Fettweis, M. & D. Van den Eynde. 2001. Bepaling van de Sedimentbalans voor de Belgische Kustwateren. Eindrapport. BMM-rapport SEBAB/1/MF/200103/NL/ER/1, 33 pp.
- Gossé, J.G., 1977. A preliminary investigation into the possibility of erosion in the area of the Flemish Banks. FA 7702, RIKZ.
- Groenendijk, F.C., 1992. Distribution in time and space of fresh water and suspended matter in the Dutch coastal zone. DGW-92.021, RIKZ.
- Gullentops, F., M. Moens, A. Ringelé & R. Sengier, 1976. Geologische kenmerken van de suspensie en de sedimenten. In: J.C.J. Nihoul & F. Gullentops (Eds.), Project Zee - Projet Mer, Volume 4: Sedimentologie. Science Policy Office, Brussels, 1-137.
- Günther & Rosenthal, 1985. The hybrid parametrical (HYPAS) wave model. In: Ocean wave modelling, Swamp group. Plenum Press, New York, 211-214.
- Hayter, E.J., 1986. Estuarial sediment bed model. In: A.J. Mehta (Ed.), Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies 14, 326-359.
- Irion, G. & V. Zöllmer, 1999. Clay mineral associations in fine-grained surface sediments of the North Sea. Journal of Sea Research, 41, 119-128.
- Krone, R.B., 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Final Report, Hydr. Eng. Lab. en Sanitary Eng. Research Lab., Univ. California, Berkeley.
- Lauwaert, B. 2002. Het beheer van de niet-levende rijkdommen op het Belgisch continentaal plat. In: V. Van Lancker et al. (eds). Kustzonebeheer vanuit geo-ecologische en economische invalshoek. Genootschap van Geologen van de Universiteit Gent en VLIZ. Oostende, 16-17 mei 2002. VLIZ special Publication 10, Oostende, Belgium.
- Le Normant, C., 1995. Modélisation numérique tridimensionnelle de processus de transport des sédiments cohésifs en environnement estuarien. Ph.D. Thesis, Institut National Polytechnique, Toulouse, 237 pp.
- Lou, J. & P.V. Ridd, 1997. Modelling of suspended sediment transport in coastal areas under waves and currents. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 45(1), 1-16.
- Malherbe, B., 1991. A case study of dumping of dredged material in open areas. Terra et Aqua, 45, 5-32.
- Nihoul, J.C.J., 1975. Effect of tidal stress on residual circulation and mud deposition in the Southern Bight of the North Sea. Review of Pure and Applied Geophysics, 113, 577-591.
- OSPAR Commission 2000. Quality Status Report 2000, Region II – Greater North Sea. OSPAR Commission, London. 136 + xiii pp.
- Salden, R.M., 1998. Een model voor het transport van slib in de Nederlandse kustzone. Een hulpmiddel naar scenario studies naar kustuitbreidingsplannen. Rapportage van SILTMAN deelprojecten 11 & 14. OS-98.119X, RIKZ.
- Torfs, H., H. Mitchener, H. Huysentruyt & E. Toorman, 1996. Settling and consolidation of mud/sand mixtures. Coastal Engineering, 29, 27-45.
- Van den Eynde, D., 1992. mu-WAVE: an operational wave forecasting system for the Belgian coast. In: Proc. 3rd Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, May 19-22, 1992, Montréal, Canada, 313-324.
- Van den Eynde, D., 1995. Project "Sedimenttransportmodel", Executive summary. BMM/STM/ER, MUMM, Brussels.
- Van den Eynde, D., 1997a. Project "Sedimenttransportmodel - Fase II", Eindrapport. STM2/1/DVDE/199709/NL/ER/1, MUMM, Brussels.
- Van den Eynde, D., 1997b. Validatie van de sedimenttransportmodellen mu-STM, mu-STMF en mu-STM3. BMM-rapport STM2/1/DVDE/199709/TR/5, 117 pp.
- Van den Eynde, D. & K. Ruddick, 1998. Validatie en Exploitatie van Sediment Transport Modellen: Activiteitsrapport 1-2. BMM-rapport, VESTRAM/1/DVDE/199912/NL/TR/1.
- Van den Eynde, D., 1999a. Calibratie en validatie van de sedimenttransportmodellen mu-STM en mu-STM3. BMM-rapport VESTRAM/1/199903/TR/1, 68 pp.
- Van den Eynde, D., 1999b. Toepassing van het sedimenttransportmodel mu-STM voor het beheer van baggerspeciestortingen. BMM-rapport VESTRAM/1/DVDE/199912/NL/TR/2, 61 pp.
- Van den Eynde, D., 2002. Interpretation of tracer experiments with fine-grained dredging material at the Belgian Continental Shelf by the use of numerical models. (in preparation)

- Van Lancker, V., J. Lanckneus, G. Moerkerke, D. Van den Eynde, M. Fettweis, M. de Batist & P. Jacobs. 2001. Investigation of the natural sand transport on the Belgian continental shelf (BUDGET). Final report. Federal Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs (OSTC), 104 + 87 pp. Annex.
- van Loen, H. & J.-S. Houziaux. 2002. The collection of Gustave Gilson as a reference framework for the Belgian marine fauna: feasibility study. Federal Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs (OSTC), Sustainable Management of the North Sea. 47 pp.
- Van Mierlo, C.-J., 1899. La carte lithologique de la partie méridionale de la mer du Nord. Bulletin de la Société Belge de Géologie, Paléontologie, et Hydrologie, XII, 2nde série (tome III), 219-265.
- Williamson, H. & H. Torfs, 1996. Erosion of mud/sand mixtures. Coastal Engineering, 29, 1-25.