M. Chen, S. Wartel en F. De Smedt

Vrije Universiteit Brussel
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde

Water en sediment in het estuarium van de Schelde

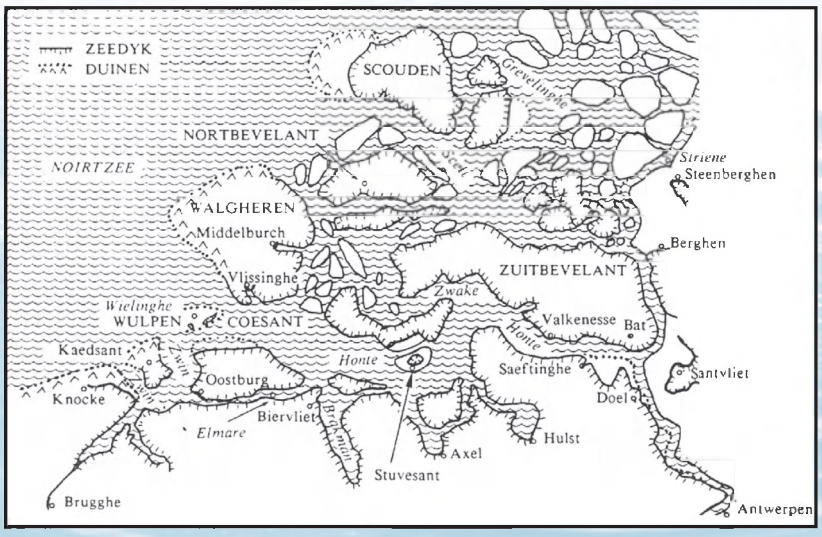
1. Inleiding

De voornaamste bedreiging voor overstromingsgevaar in de Schelde stroomafwaarts van Gent gaat uit van het getij dat tweemaal per dag vanuit zee de rivier binnendringt. Indijkingen, havenwerken en wijzigingen van de vaarroute hebben allen een invloed op de voorplanting van deze golf. Het beheer van het estuariene milieu wordt dan ook geconfronteerd met de moeilijke uitdaging om enerzijds de toegang tot de haven van Antwerpen te verzekeren, het land te beschermen tegen overstromingen en de natuurlijkheid van het estuarium te vrijwaren.

In deze bijdrage wordt een beknopt overzicht gegeven van de huidige kennis van de interacties die er bestaan tussen water en sediment in het estuarium van de Schelde en dit zowel vanuit een historisch perspectief als met een blik op de toekomst. Vooral de beweging en de afzetting van zwevende stoffen doorheen het estuarium zijn daarbij belangrijk omdat ze in aanzienlijke mate de onderhoudswerken op nadelige wijze beïnvloeden (baggerwerken) maar ook bijdragen tot de instandhouding van het milieu (slibafzetting op slikken en schorren).

De voornaamste aspecten van het onderzoek dat verricht wordt door de onderzoeksgroep Hydrologie en Waterbouwkunde van de Vrije Universiteit Brussel worden hier samengevat namelijk: (1) studie van de estuariene energie en verdeling van zwevende stoffen; (2) het fluviomariene evenwicht van de zwevende stof; (3) de lange termijn gemiddelde sedimentaangroei op slikken en schorren en (4) veldwaarnemingen en hydrologische analyse van sedimenteigenschappen en -beweging. Er worden ook enkele voorbeelden gegeven van het gebruik van wiskundige hulpmiddellen bij de beschrijving en de interpretatie van cruciale parameters voor sedimenttransport zoals het effect van de stroomsnelheid van het water op de grootte van de partikels in-situ, op hun valsnelheid, op de in-situ vlokvorming en –ontbinding, en tenslotte ook het effect op de afzetting, erosie en opwoeling van het sediment.

Figuur 1. De "Schelde" ca. 1300 (bron: Coen, 1988).

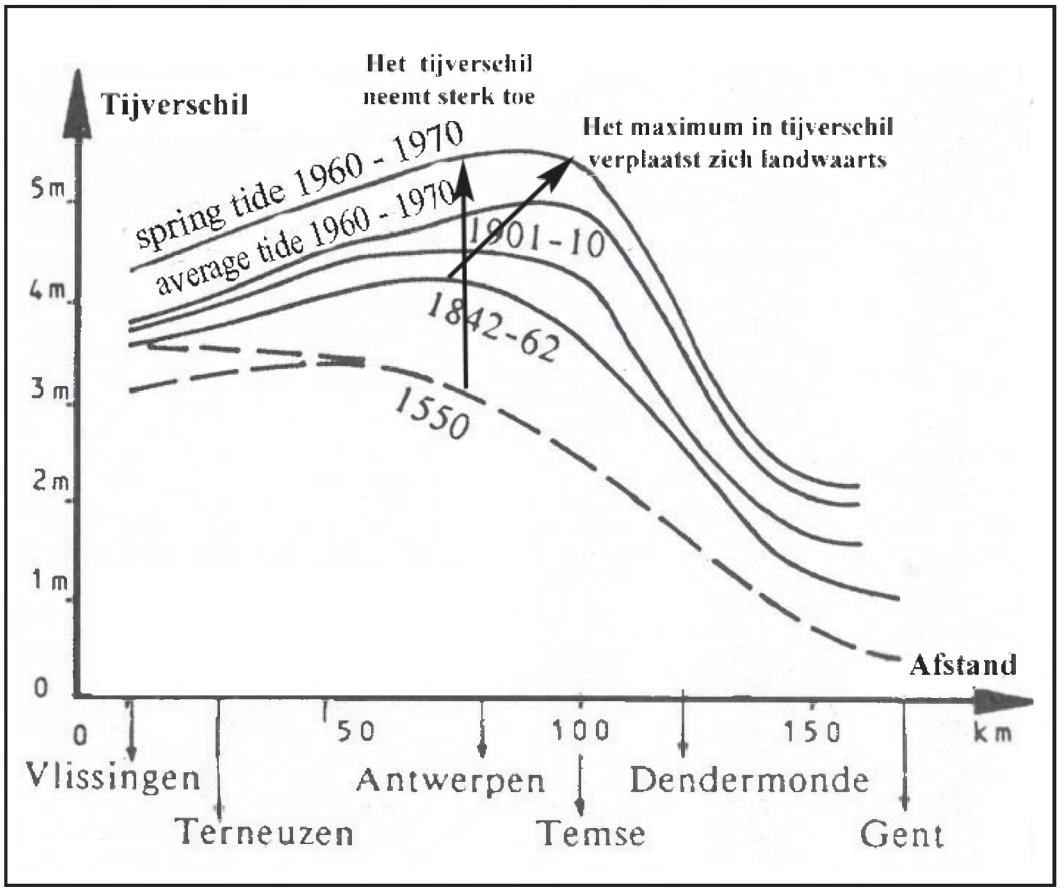


2. Estuariene energie en sedimentaire processen

Het landschap van de Schelde zoals we het vandaag kennen is ontstaan uit een rivier die ten noorden van Antwerpen in een erg ondiep waddengebied, doorsneden met brede tijgeulen, uitmondde. De Schelde stroomde langs Zandvliet verder noordwaarts langs Bergen op Zoom om ter hoogte van Rotterdam in de Maas uit te monden. Het is duidelijk dat de tijgolf toen niet doordrong tot in Antwerpen, dat op meer dan 100 km van de monding lag. In een volgende fase ontstond de Oosterschelde, een verbrede zeearm die tot nabij Bergen-op-Zoom reikte en de noordwaarts stromende Schelde aftapte. Voor het getij in de Schelde zal dit weinig veranderd hebben. In de veronderstelling dat het tijverschil in de monding van de primitieve Oosterschelde ongeveer hetzelfde was als vandaag (2.5 tot 3 m) bleef ter hoogte van de Schelde hiervan niet veel over gelet op de grote komberging die er bestond in de Oosterschelde met zijn vele vertakkingen en uitgestrekte slikke- en schorregebieden. In zulk gebied moest toen wel een belangrijke energieverstrooiing optreden met een snelle daling van het tijverschil als gevolg. Uit documenten blijkt dat de Honte tot het einde van de XIV^{de} eeuw (figuur 1) een vrij onbelangrijke en ondiepe geul was, niet eens geschikt voor de grotere scheepvaart (Coen, 1988). Minstens tot dan, en misschien zelfs nog later, was er geen sprake van enige noemenswaardige tijactiviteit in de omgeving van Antwerpen. Tijdens deze beginperiode is er dus geen of hoogstens een klein tijverschil in de Schelde op Belgisch grondgebied en moet men rekening houden met lage concentraties aan zwevende stof.

Pas in de XV^{de} eeuw dringt de Honte (oostelijk deel van de huidige Westerschelde) door tot in Bath en tapt hier op haar beurt de Schelde af. Wel blijft er nog een noordwaarts stromende riviertak bestaan doorheen het Kreekrak (ingepolderd rond 1868). Een toename aan stormvloeden in de XV^{de} eeuw doet de Honte verbreden en verdiepen en ontstaat de huidige Westerschelde. De tijgolf dringt nu verder het land in (figuur 2) waarbij het tij-

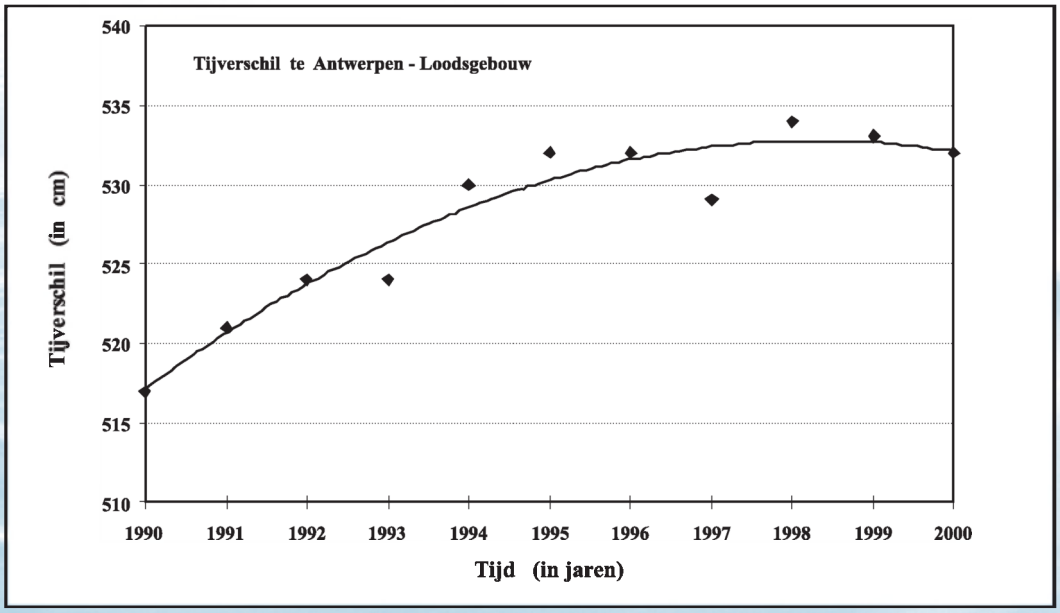
Figuur 2. Evolutie van het tijverschil van 1550 tot 1970. De pijlen geven aan hoe in de buurt van Antwerpen het tijverschil toeneemt en het maximum in tijverschil zich landwaarts verplaatst (bron: Coen, 1988).



verschil vrij snel daalt. De voortdurende zeespiegelstijging, de toenemende frequentie aan stormvloeden en de inpolderingen zorgen er voor dat de energieverstrooiing afneemt en dat de tijhoogte landwaarts toeneemt, waarbij aanvankelijk een maximum moet bereikt zijn in het gebied tussen Zandvliet en Antwerpen. Verder stroomopwaarts versmalt de Scheldegeul zodat de wrijving toeneemt en het tijverschil daalt (figuur 2).

Verdere inpolderingen en zowel verdieping als verbreding van vooral de Westerschelde doen het tijmaximum nog toenemen en landwaarts opschuiven. Dit proces is sindsdien niet afgenomen. Nabij Antwerpen nam het tijverschil toe van minder dan 3 m in de XIV^{de} eeuw tot bijna 5 m in de zeventiger jaren. Dit komt neer op een gemiddelde toename van 0.5 cm per jaar. In figuur 3 is het tijverschil nabij Antwerpen weergegeven voor

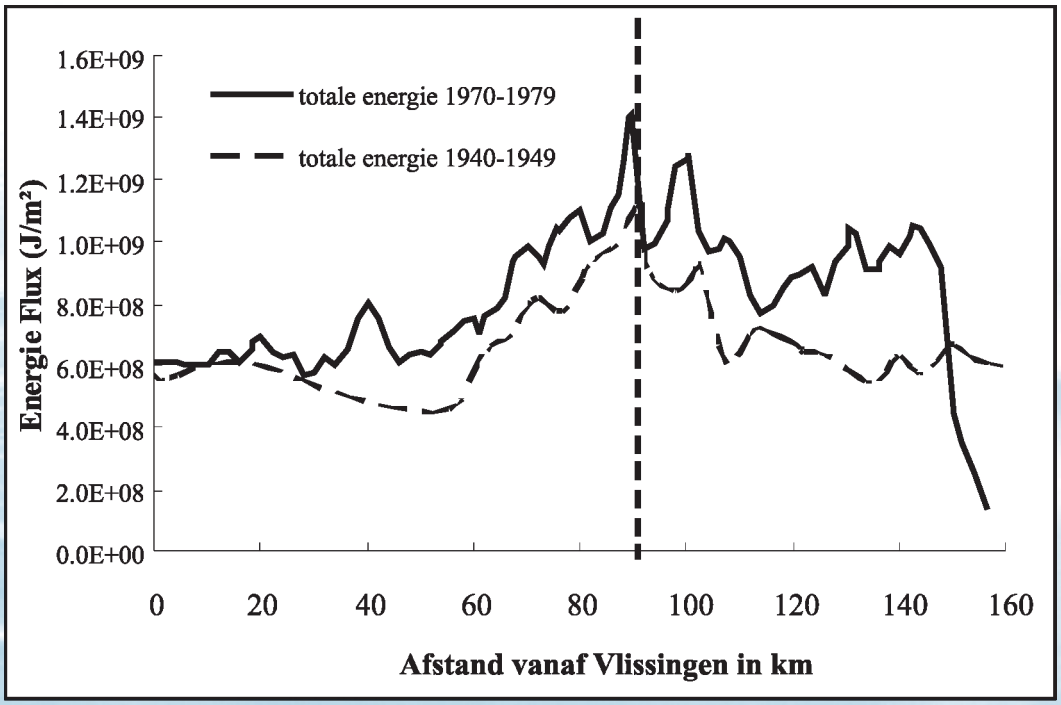
Figuur 3. Aanhoudende stijging van het tijverschil nabij Antwerpen (ongeveer 80 km van Vlissingen) van 1990 tot 1998 (bron: Taveniers, 1998).



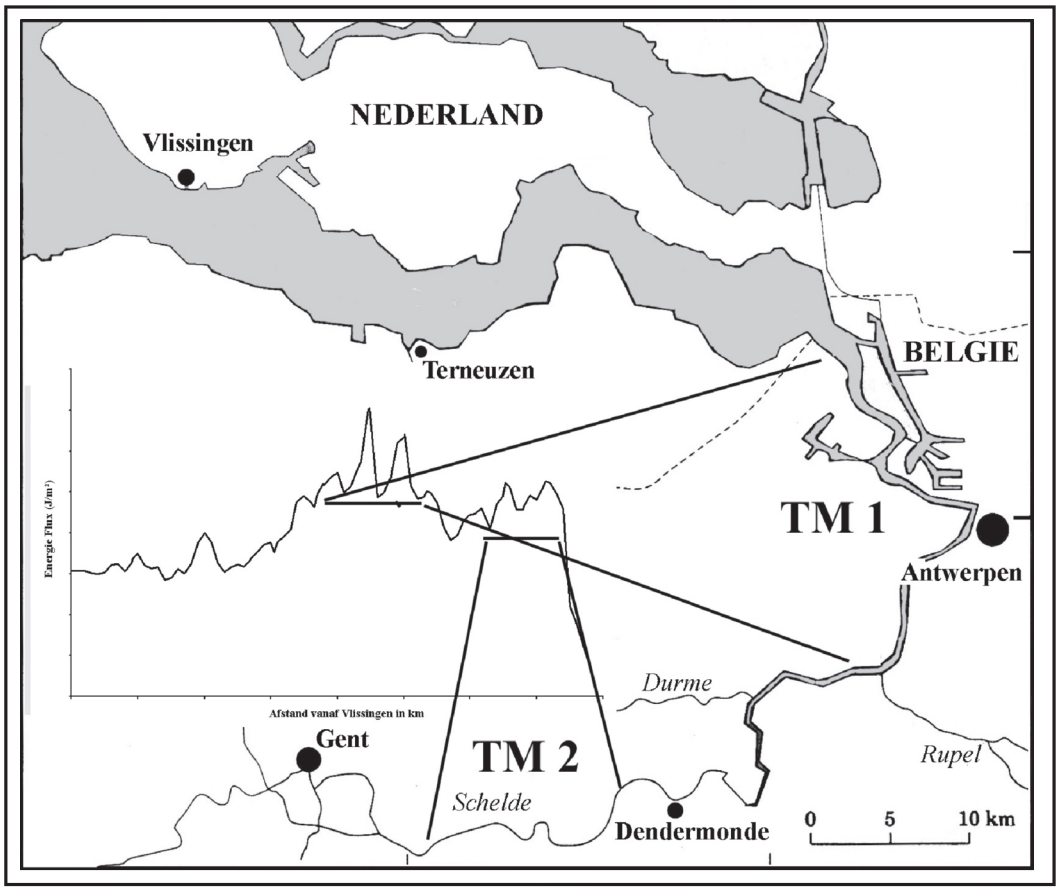
de periode 1990-1998 en is een gestage toename merkbaar van 2 cm per jaar (Taverniers, 1998). Dit is tienmaal groter dan de verondersteld zeespiegelstijging in dezelfde periode en illustreert het effect van het verdiepen van de Westerschelde op het tij in het landwaarts deel van het estuarium. Deze verdieping vermindert de weerstand die de instromende vloed ondervindt zodat een grotere hoeveelheid zeewater het estuarium kan binnendringen met enerzijds een stijging van het tijverschil als gevolg en anderzijds een landwaartse verplaatsing van het tijmaximum. Vandaag worden de grootste tijverschillen waargenomen ter hoogte van de Durmemonding.
Een watermassa die in beweging is bezit een zekere energie die een uitdruking is van de arbeid die deze watermassa kan leveren. Ze bestaat uit een kinetische energie die voortspruit uit de horizontale beweging van de watermassa en een potentiële energie die het gevolg is van het hoogteverschil tussen de watermassa en het zeeniveau. In een estuarium zoals de Schelde zijn er voornamelijk twee componenten (1) de binnendringende getijgolf die een vloedstroom en een ebstroom veroorzaakt en (2) het water van de rivier dat naar zee stroomt. Beide componenten bezitten zowel een kinetische als een potentiële energie. De totale energie van het Schelde-estuarium is de algebraïsche som van de tijenergie (of mariene energie) en van de rivierenergie. In het mondingsgebied van de Schelde speelt ook de door de wind veroorzaakte golfwerking een rol, maar deze is in het Belgische gedeelte van het Scheldeestuarium verwaarloosbaar.

Het effect van het toenemende tijverschil op de totale energie in het Schelde-estuarium wordt geïllustreerd in figuur 4. Voor de Schelde bestaat een typisch energiepatroon dat gedomineerd wordt door de tijenergie en met een duidelijk maximum tussen 58 en 100 km opwaarts van Vlissingen (Chen *et al.*, 2005). Voor de periodes 1940-1949 en 1970-1979 respectievelijk werd de totale estuariene energie geschat op basis van het tijverschil enerzijds en het debiet van de rivier anderzijds. Hieruit blijkt dat er tussen beide periodes een gestage energietoename heeft plaatsgevonden van 20 tot 40%. Deze toename is onder andere toe te schrijven aan een toename van het tijvolume en aan morfologische veranderingen. De grootste energietoename wordt waargenomen in het bovenestuarium. Dit wijst er op dat morfologische veranderingen in de Westerschelde ook ver stroomopwaarts een belangrijke invloed hebben.
Een groter tijverschil veroorzaakt grotere stroomsnelheden en dus logischerwijze een hogere kinetische energie. Dit vindt zijn weerslag in een toenemende opwoeling van de bodem zodat de concentratie aan zwevend materiaal zal toenemen. Er zal dus een verband bestaan tussen de toename in tijverschil, de toenemende kinetische energie en hogere sedimentconcentraties.
De zwevende stof is niet homogeen verdeeld over het estuarium maar er komen gebieden voor met sterk verhoogde concentratie aan zwevende stof: de zogenaamde "troebelheidsmaxima". Deze gebieden ontstaan door een versnelde sedimentatie als gevolg van vlokvorming van het fijnste sediment (kleipartikels en organische bestanddelen) en van herhaalde opwoeling van het recent afgezette sediment als gevolg van de hoge energie. Versnelde sedimentatie en opwoeling veroorzaken niet alleen een lokale verrijking aan zwevende stof in het water maar tevens een verrijking aan schadelijke stoffen die zich op de fijnste partikels hebben vastgezet. In die zin speelt dus de

Figuur 4. Kwantificeren van de estuariene energie voor de periodes 1940-1949 en 1970-1979.



Figuur 5. Estuariene energie en troebelheidsmaxima (TM) in het estuarium van de Schelde. De legende van de energiegrafiek is terug te vinden in figuur 4.



energieverdeling een zeer belangrijke rol bij het beheer van het milieu omdat het sedimenttransport, de verdeling aan zwevende stof en alle sedimentaire processen aangedreven worden door en bepaald worden door het heersende energiepatroon. Waarnemingen van zwevende stof concentraties tonen aan dat er in de Schelde drie troebelheidsmaxima bestaan (Chen 2003; Chen *et al.* 2005). Het voornaamste komt voor in het midden-estuarium waar ook de hoogste energieën gevonden worden. Het strekt zich uit van Zandvliet tot aan de monding van de Rupel (figuur 5). Daarnaast is er een tweede troebelheidsmaximum in het boven-estuarium dat voornamelijk gedomineerd wordt door de rivierenergie, en is er een derde troebelheidsmaximum in het mondingsgebied van de Schelde, namelijk voor de kust, nabij Zeebrugge (Fettweis & Van den Eynde, 2003)

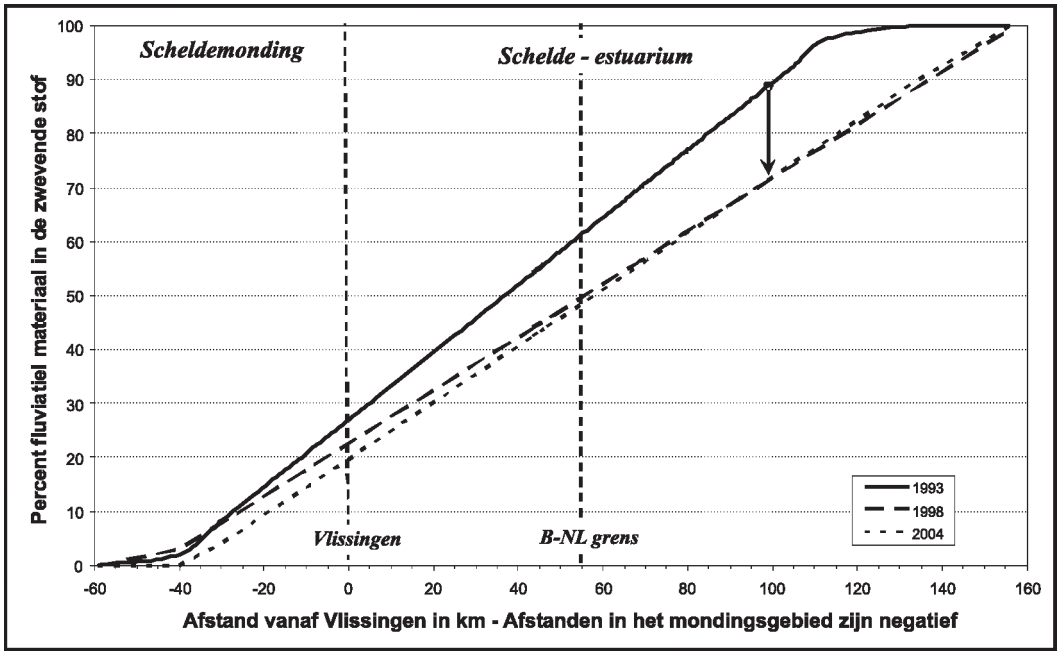
3. Het evenwicht tussen de rivier en de zee

Een belangrijk aspect van de sedimentdynamiek in een estuarium bestaat in het evenwicht tussen de fluviatiele en de mariene energie. Het is een sleutelbegrip voor de vraag of het effect van morfologische veranderingen op het transport van sedimenten en het sedimentaire evenwicht kan worden geëvalueerd. In figuur 6 wordt het aandeel aan fluviatiel sediment getoond in functie van de afstand tot monding. Metingen in 1993 tonen een te verwachten zeewaartse afname aan fluviatiel sediment (Wartel *et al.* 2004). Vijf jaar later, in 1998, is de situatie veranderd: in het boven-estuarium, nabij Gent, is de fluviatiele component sterk gedaald en ook nabij de Belgisch-Nederlandse grens is er een, weliswaar kleinere, daling merkbaar. De metingen van 2004 tonen weinig verandering ten opzicht van de situatie in 1998. Alles wijst er dus op dat na 1993 de mariene component in het estuarium is toegenomen. Dit houdt allicht verband met de verruimingsfase van de Westerschelde in de periode 1993-1998.

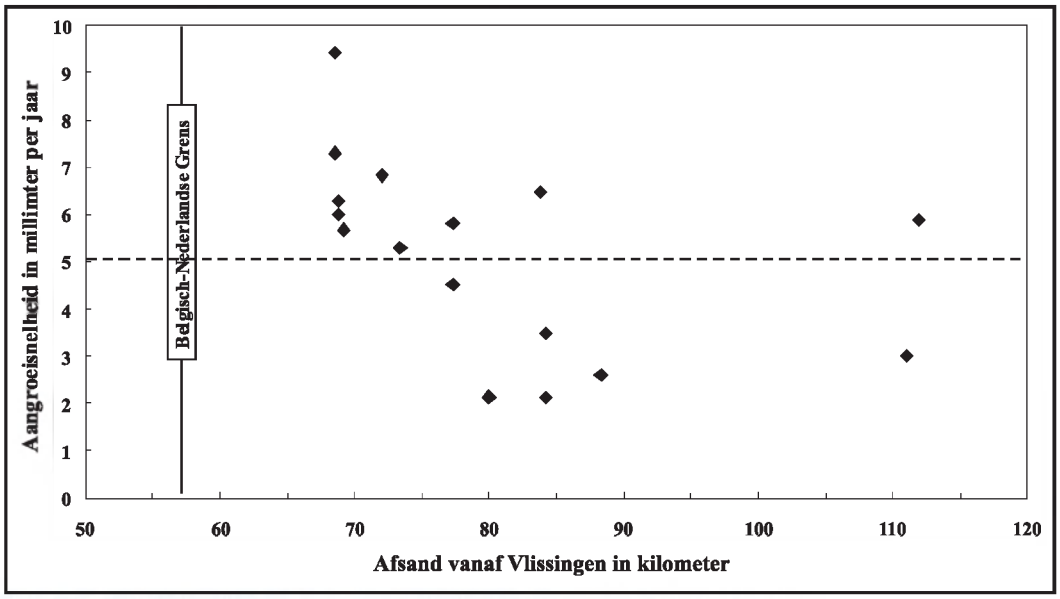
4. Sedimentaangroei

Een belangrijke vraag die zich bij dit alles stelt is of, en eventueel hoe snel, het sediment op de intertidale gebieden, de slikken, aangroeit? Daarom werd op basis van radioisotopen de sedimentaangroei op de slikken gemeten. Hieruit blijkt dat gemiddeld over een periode van meerdere tientallen jaren er een aangroei is van 0.2 tot 0.7 cm per jaar (figuur 7). Dit is behoorlijk meer dan de gemiddelde zeespiegelstijging die slechts 0.1 à 0.2 cm per jaar bedraagt, maar komt wel goed overeen met de eerder waargenomen stijging van het tijverschil met 0.5 cm per jaar. De hoogteligging van het intertidale gebied volgt dus het tijverschil. Een gelijkaardig verband werd eveneens vastgesteld voor de schorregebieden (Temmerman *et al.*, 2003).

Figuur 6. Het fluvio-mariene evenwicht van de zwevende stof in 1993, 1998 en 2004.



Figuur 7. Sedimentaangroei in het intertidale gebied (slikken).

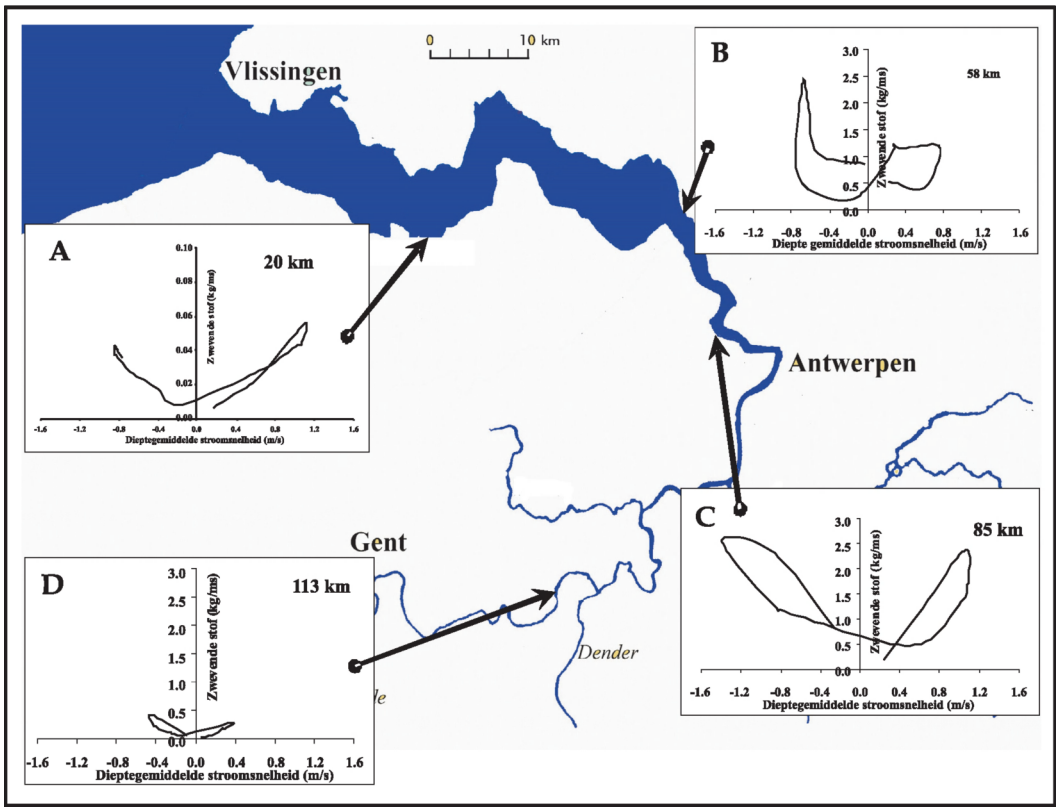


5. De sedimentlading

Een samenvatting van de verdeling van de sedimentlading over het estuarium in functie van het getij is weergegeven in figuur 8. De dieptegemiddelde concentratie aan zwevende stof wordt getoond tegenover de dieptegemiddelde stroomsnelheid van het water. De meetpunten nabij repectievelijk de Belgisch-Nederlandse grens (58 km opwaarts van Vlissingen) en Kruibeke (85 km opwaarts van Vlissingen) zijn gelegen in het tijgedomineerd troebelheidsmaximum. De sedimentlading in het beneden-estuarium is laag en redelijk homogeen verdeeld over de waterkolom. Veranderingen gedurende de tijcyclus zijn relatief gering. Dit is eveneens het geval voor het boven-estuarium alhoewel de lading hier iets hoger is. In het opwaartse deel van het troebelheidsmaximum (nabij 85 km) komen sterke stromingen voor zowel bij eb als bij vloed en is er een snelle sedimentatie gedurende de ebfase en een duidelijke hysteresis en vertraging van de sedimentatie tijdens de vloedfase. Dit laatste is een gevolg van de hoge estuariene energie en de ermee gepaard gaande opwoeling van het bodemsediment. Er werd reeds eerder gewezen op de toename aan kinetische energie als gevolg van een toename in het tijverschil. In figuur 8 nu is te zien hoe de zone met hoge energie (figuur 5) tevens een zone is met de hoogste dieptegemiddelde sedimentconcentraties (troebelheidsmaximum). Er is dus wel degelijk een verband tussen de energietoename en het voorkomen van een troebelheidsmaximum.

De verschillen tussen de hier voorgestelde sedimentdynamische scenario's worden geken-

Figuur 8. Evolutie van de sedimentlading tijdens een volledige tijcyclus. Voorbeelden van meetstations in het beneden- (A), het midden- (B en C), en het bovenestuarium (D) van de Schelde. Op de horizontale x-as is de dieptegemiddelde stroomsnelheid weergegeven van -1.6 tot +1.6 $m.s^{-1}$. Op de verticale y-as is de dieptegemiddelde concentratie aan zwevende stof weergegeven van 0 tot 30 $kg.m^{-1}.s^{-1}$, uitgezonderd voor figuur A waar de concentratie aan zwevende stof is weergegeven van 0 tot 0.1 $kg.m^{-1}.s^{-1}$. De vloedstroom is op arbitraire wijze met een negatief teken weergegeven.



merkt door een aantal factoren: de aard van het bodemsediment, de aard en samenstelling van de zwevende stof, en vooral de graad van vlokvorming en de valsnelheid van de vlokken.

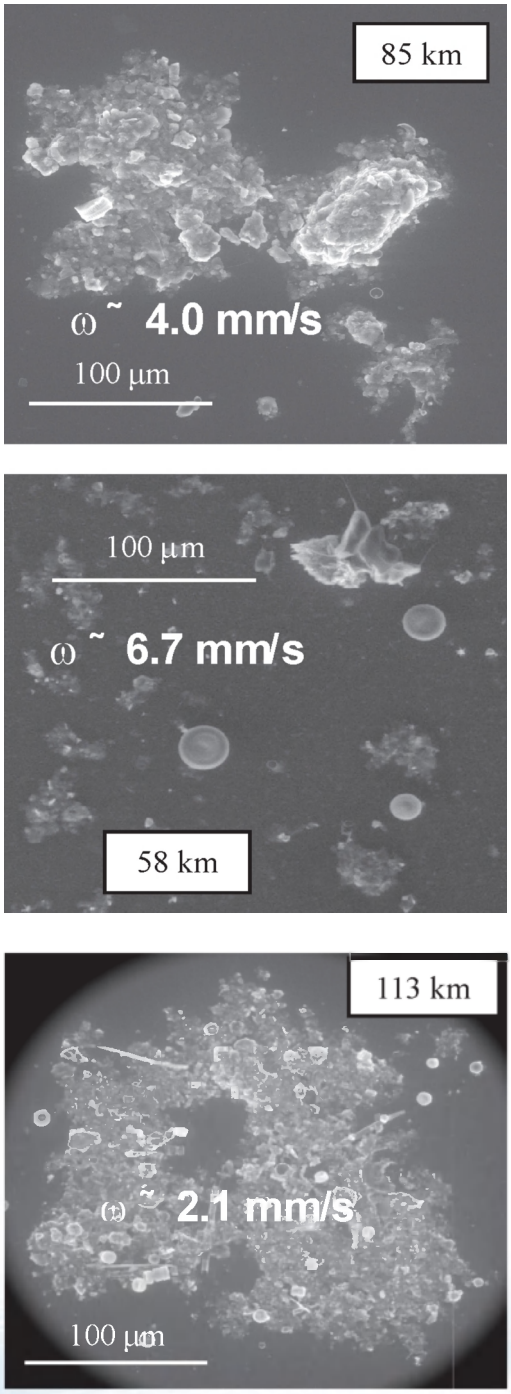
6. Vlokvorming en vlok-valsnelheid

Het is een algemeen gekend verschijnsel dat in het estuariene milieu de meerderheid van de zwevende partikels niet geïsoleerd voorkomen maar kleine of grotere aggregaten vormen, vlokken genoemd. De neiging van partikels om vlokken te vormen bemoeilijkt in hoge mate de ontwikkeling van modellen die de sedimentdynamiek moeten in kaart brengen. Vlokken werden bestudeerd op verschillende plaatsen in het Schelde estuarium (figuur 8) en in-situ beelden worden getoond in figuur 9. De kleinste vlokken komen voor in het zeewaarts deel van het troebelheidsmaximum. Verder zeewaarts, in het beneden estuarium, komen grotere vlokken voor en ook in het boven estuarium worden herhaaldelijk grote tot zeer grote vlokken waargenomen. In tegenstelling tot wat veelal vooropgesteld wordt (o.m. Wollast, 1988), zijn er geen aanwijzingen gevonden voor een toename van de vlokvorming en de vlokgrootte op de grens waar het brakke water overgaat in zoetwater. Door toepassing van hydrologische modellen op metingen over een volledige tijcyclus van concentratie aan zwevende stof, stroomsnelheid en vlokgrootte kon de valsnelheid van de vlokken bepaald worden. Hieruit blijkt dat in het troebelheidsmaximum de valsnelheid van de vlokken het grootst is ook al zijn de vlokken er kleiner. Grote vlokken zowel in het beneden estuarium als in het boven-estuarium sedimenteren duidelijk langzamer.

7. Vooruitzichten voor verder onderzoek

Uit et hier besproken onderzoek komt een duidelijk patroon in het sedimentgedrag naar voren dat verbonden is met grootschalige veranderingen in de estuariene processen die zelf bepaald worden door een combinatie van externe krachten zoals morfologische veranderingen, veranderingen in het tijregime en menselijke ingrepen.
Verdere studies, die in feite zeer essentieel zijn voor het beheer van het estuariene milieu, kunnen als volgt omschreven worden: (1) een kwantificering van de evolutie van de totale estuariene energie in de tijd zodat trends uit het verleden kunnen achterhaald worden en vooruitzichten naar de toekomst toe kunnen geformuleerd worden om scenario's op te stellen voor de evolutie van troebelheidsmaxima; (2) de eigenschappen van de zwevende stof worden mee bepaald door de aard van het bodemsediment. Echter de bodemsedimenten van het gebied tussen Antwerpen en Gent zijn niet gekend. Kaartering hiervan is dan ook dringend nodig; (3) de relatie tussen de vlokvormingsprocessen, zowel vorming als ontbinding van vlokken, en de variaties in de ruimte en tijd van biogeochemische processen is slechts

Figuur 9. In-situ vlokvorming. Op iedere foto is een schaal getekend. De vlokgrootte is kenmerkend voor het 70ste percentiel. w is de berekende gemiddelde valsneldheid.



gedeeltelijk gekend en dient meer aandacht te krijgen wil men dit zeer belangrijk aspect van de sedimentdynamiek volledig begrijpen.

Bedankingen

Dit onderzoek werd grotendeels uitgevoerd met middelen ter beschikking gesteld door onderzoeksprojecten van de Administratie Waterwegen en Zeewezen (Ministerie van het Vlaams Gewest) ondermeer in 1998 en in 2004 voor de bepaling van de verhouding tussen marien en fluviatiel slib en van 2002 tot 2004 als perceel 3 van het onderzoek naar de gevolgen van het Sigmaplan, baggeractiviteiten en havenuitbreiding in de Zeeschelde op het milieu. Het radioisotopenonderzoek was mogelijk dankzij de gewaardeerde medewerking van Dr. Pierre Van Den Winkel (Vrije Universiteit Brussel, Cyclotron). Het onderzoek van de stabiele isotopen werd uitgevoerd in samenwerking met Dr. Willy Baeyens, Dr. Frank Dehairs en Dr. Steven Bouillon (Vrije Universiteit Brussel, Analytische Scheikunde).

Referenties

Chen, M. S. 2003. Suspended matter and flocculation in the estuarine environment. Department of Analytical and Environmental Chemistry, Faculty of Sciences. Brussels, Free University of Brussels (VUB). pp.185.

Chen, M. S., Wartel, S., Van Eck, G. T. M. and Van Maldegem, D. C. 2005. Suspended matter in the Scheldt estuary. Hydrobiologia. 540, 79–104.

Coen, I. 1988. Ontstaan en ontwikkeling van de Westerschelde. Water. 43: 156-162.

Fettweis, M. and Van den Eynde, D. 2003. The mud deposits and the high turbidity in the Belgian-Dutch coastal zone, southern bight of the North Sea. Continental Shelf Research. 23: 669-691.

Taverniers, E. 1998. Evolutie van het getij in het Zeescheldebekken. Water. 102: 304-308.

Temmerman, S., Govers, G., Wartel, S. and Meire, P. 2003. Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and fresh tidal marsh, Scheldt estuary, Belgium - SW Netherlands. Earth Surface Processes and Landforms. 28: 739-755.

Wartel, S., Chen M. S., Baeyens, W. en Dehairs, F. 2004. Bepaling van de verhouding marien-fluviatiel slib in de beneden Zeeschelde in het voorjaar van 2004. Brussel, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, betsuur Waterwegen en Zeewezen, Afdeling Maritieme Toegang. pp. 66.

Wollast, R. 1988. The Scheldt estuary. Pollution of the North Sea. In: W. Salomons, B. L. Bayne, E. K. Duursma and U. Förstner. Berlin, heidelberg, New York, Springer Verlag. 183-193.

M. Chen,
S. Wartel en
F. De Smedt

Vrije Universiteit Brussel
Faculteit Ingenieurswetenschappen
Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde
Pleinlaan 2
1050 Brussel.

Contact: Margaret.Chen@vub.ac.be