

NOTA GWAO-91.081
SAWES-NOTA 91.08
DNS 92/37

studierapport

DE SLIBBALANS VAN HET
SCHELDE-ESTUARIUM

Kennis over de slibhuishouding is van
groot belang omdat een groot deel
van de verontreinigingen chemisch
gebonden is aan het slib

Fenomenologisch onderzoek heeft geleid
tot verwachtingswaarden voor de horizontale
en verticale uitwisselingen van het slib
binnen het Schelde-estuarium.

Naar verwachting zal de waterbodem
na sanering nog lange tijd
verontreinigd slib naleveren.

Ing.D.C. van Maldegem
Middelburg, 12 januari 1993

DE SLIBBALANS VAN HET SCHELDE-ESTUARIUM

<u>Beknopte inhoudsopgave</u>	Blz.
Samenvatting	4
Overzichten van figuren, tabellen, bijlagen en appendices	6
1. Inleiding	9
2. Gebiedsbeschrijving	13
3. Morfologische indeling van het Schelde-estuarium	17
4. Inventarisatie slibvoorkomens	21
5. <u>Horizontale</u> slibtransporten tussen de vakken	36
6. <u>Verticale</u> uitwisseling van slib tussen waterbodem en waterfase	60
7. Samenvatting <u>horizontale</u> en <u>verticale</u> uitwisseling van slib	66
8. Ervaringen met de 1D en 2DH slibtransportmodellen	69
9. Toekomstige veranderingen in de slibbalans	72
10. Konklusies	73
Geraadpleegde literatuur	74
Bijlagen	
Appendices	

Studierapport DE SLIBBALANS VAN HET SCHELDE-ESTUARIUM

Uitvoerige inhoudsopgave

Samenvatting

Overzichten van figuren tussen de tekst

Overzicht van tabellen tussen de tekst

Overzichten van de bijlagen en de appendices

1. Inleiding

2. Gebiedsbeschrijving

3. Morfologische indeling van het Schelde-estuarium

3.1 Algemene indeling

3.2 Indeling naar sedimentstromen

3.3 Vakindeling voor de slibbalans

4. Inventarisatie slibvoorkomens

4.1 Het voorkomen van het slib in de waterfase

- hoeveelheid slib in de waterfase
- variatie met de getijstroom
- variatie met de seizoenen
- variatie langs de getijweg

4.2 Het voorkomen van het slib in de bodem

- inleiding
- ruimtelijke verdeling van het slib in de bodem
 - * algemeen
 - * platen
 - * slikken
 - * schorren
 - * havens
- totaal overzicht

4.3 Resumé

5. Horizontale slibtransporten tussen de vakken

5.1 Berekeningsmethode netto slibtransporten

- balansmethode
- methode voor de verdeling van de transporten over het jaar

- 5.2 Gegevens voor de berekening van de netto slibtransporten
 - verhouding marien/fluviatiel slib
 - belastings- en onttrekkingsbronnen
 - invloed van morfologische verandering in waterbodem en waterfase
 - 5.3 Berekeningsresultaten netto slibtransporten
 - gemiddelde resultaten
 - gevoeligheidsanalyse
 - vergelijking met de resultaten van vroegere berekeningen
 - 5.4 Bruto slibtransporten
 - methode
 - gegevens
 - berekende bruto slibtransporten
 - 6. Verticale uitwisseling van slib tussen waterbodem en waterfase
 - 6.1 Inleiding
 - 6.2 Schematisatie van de uitwisseling tussen waterbodem en waterfase
 - Uitwisseling volgens 2 lagensysteem
 - Uitwisseling volgens 3 lagensysteem
 - 6.3 Gebruikte gegevens
 - Dikte en uitwisselingssnelheid van de actieve bodemlaag bij het drielagenmodel
 - Reinigingsduur actieve bodemlaag
 - Uitwisseling diepe bodemlaag
 - 6.4 Resultaten
 - 7. Samenvatting horizontale en verticale uitwisseling van slib
 - 8. Ervaringen met de 1D en 2DH slibtransportmodellen
 - 8.1 Modelbeschrijving
 - 8.2 Berekeningsresultaten
 - 9. Toekomstige veranderingen in de slibbalans
 - 9.1 Oorzaken van verandering
 - 9.2 Nalevering van de waterbodem bij sanering
 - 10. Konklusies
- Geraadpleegde literatuur
- Bijlagen
- Appendices

Samenvatting

Deze SAWES nota behandelt de slibbalans van het Schelde-estuarium voor het gebied tussen Rupelmonde en Vlissingen voor de situatie medio 1980.

Het Schelde-estuarium wordt gekenmerkt door een stelsel meanderende geulen met daartussen en daarlangs gelegen platen, slikken en schorren. Langs het estuarium bevinden zich getijdehavens en scheepvaartsluizen en havengebieden.

Onder invloed van de afvoer van de Schelde en de getijbeweging wordt fluviatiel slib vanuit België en marien slib vanuit het mondingsgebied van de Westerschelde aangevoerd en samen met zanddeeltjes afgezet op de waterbodem van het estuarium.

In de bovenste meter van de waterbodem is ruim $50 \cdot 10^6$ ton slib gebufferd. Hiervan is meer dan $10 \cdot 10^6$ ton slib definitief afgezet op de schorren. Ongeveer 1/3 deel van de totale hoeveelheid slib is van fluviatiele oorsprong. Het slib in de Beneden Zeeschelde is overwegend fluviatiel, het westelijk deel van de Westerschelde is overwegend marien en daartussen ligt als overgangsg gebied het oostelijk deel van de Westerschelde.

Om de ruimtelijke variatie en de morfologische veranderingen van het gebied in de slibbalans te kunnen meenemen is het estuarium geschematiseerd in 14 duidelijk herkenbare hoofdvakken.

Hydrodynamische processen en baggeren zorgen voor een uitwisseling van het slib in de bodem met de waterfase. In de waterfase wordt het slib horizontaal getransporteerd tussen de vakken.

De netto horizontale uitwisseling tussen de vakken is berekend met behulp van een slibbalans, wat een boekhoudstelsel van alle bron- en puttermen inhoudt. De bruto slibtransporten zijn berekend met behulp van de gemeten getijde-debietten en slibconcentraties. De belangrijkste en gevoeligste invoertermen van de balans zijn de slibaanvoer uit België, de accumulatie op Belgisch gebied en de afzetting in de schorren. De verdeling naar fluviatiel en marien slib is heel erg gevoelig voor de definitie van welk slib 100% fluviatiel en 100% marien slib is. Door al deze gevoeligheden ligt er een brede band van onzekerheid over de verwachtingswaarde van de netto transporten tussen de vakken. De verwachting voor het fluviatiele transport op de Belgisch Nederlandse grens bedraagt $300 \pm 120 \cdot 10^3$ t/jr. Vroegere berekeningen kwamen tot wat hogere schattingen. Controleberekeningen voor het transport op de grens geven echter vergelijkbare waarden (ook orde 300 t/jaar). De bruto transporten zijn enkele orden groter. Door de onnauwkeurigheden in de bruto transporten is het verschil tussen het vloed- en ebtransport geen goede schatter voor het netto transport.

De verticale uitwisseling van de waterbodem met de waterfase gebeurt volgens de gedane aannamen 2 keer per getij met een zeer actief laagje van ca. 1 mm. dikte en 2 keer per jaar voor een laag van 0.5m. dikte door de verplaatsing van de zandribbels. De hieronderliggende laag van 9.5 m. dikte wisselt met een veel lagere frekwentie slib uit door de meandering van de geulen.

Resumerend kan worden gesteld dat onder invloed van de uitwisselingen in de breedte-richting, verticale-richting en lengte-richting van het estuarium slib wordt verspreid waarbij er een nettotransport van fluviatiel slib is in de richting van de zee en van marien slib in de richting van de rivier is.

Om meer inzicht te krijgen in slibtransporten zijn er ook ervaringen opgedaan met fysische slibtransport modellen. Het resultaat hiervan is dat het ééndimensionaal model SLITRA niet geschikt blijkt te zijn voor een estuarien systeem als de Westerschelde en dat het tweedimensionaal model 2DH-DELWAQ nog onvoldoende is ontwikkeld.

Door ingrepen in het estuarium is het mogelijk dat wijzigingen in het estuarium gaan optreden, die gevolgen hebben voor de slibbalans. Hierbij moet steeds rekening worden gehouden met een lange nalevering van oud verontreinigd slib uit de waterbodem.

Overzicht van de figuren tussen de tekst

1. Satellietfoto van het Schelde-estuarium.
2. Stroomgebied van de rivier de Schelde.
3. Ondiepten en intergetijdegebieden in het Schelde-estuarium.
4. Gemiddelde getijkrommen van het Schelde-estuarium tussen Zeebrugge en Gent.
5. Geologische afzettingen rond het Schelde-estuarium.
6. Globale indeling van het estuarium.
7. Indeling naar morfologische eenheden.
8. Slibtransporten in het estuarium.
9. Uitwisseling tussen de morfologische eenheden.
10. Verloop inhoud Schelde-estuarium.
11. Slib in de waterfase in het Schelde-estuarium.
12. Verloop van de slibconcentratie en stroomsnelheid in het westelijk deel van de Westerschelde gedurende een doottij/springtijcyclus.
13. Verloop diepte- en tijgemiddelde slibconcentratie op de grenzen van de hoofdvakken in het Schelde-estuarium (fractie $\leq 63\mu$).
14. Gemiddeld seizoensverloop en spreiding van de slibconcentratie in het oppervlaktewater op 9 lokaties in het Schelde-estuarium (periode 1970 - 1990).
15. Verschuiving van de slibgradiënt in het Schelde-estuarium gedurende een jaar op basis van oppervlaktescanning gedurende 2 of 3 dagen.
16. Bulkhoeveelheden fluviatiel slib in de bovenste meter van de bodem van het Schelde-estuarium.
17. Bulkhoeveelheden marien slib in de bovenste meter van de bodem van het Schelde-estuarium.
18. Verdeling van het fluviatiele en mariene slib in de bovenste meter van de waterbodem van het Schelde-estuarium.
19. Schematisatische voorstelling van de uitwisseling in een dwarsdoorsnede van het Schelde-estuarium.
20. Schematische voorstelling van de slibbalans voor één vak in het Schelde-estuarium.
21. Verloop van de fractie fluviatiel slib in het Schelde-estuarium op basis van de isotopenverhouding $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ [-].
22. Morfologische veranderingen van de Westerschelde, de plaatgebieden en het Land van Saaftinge over de periode 1965 - 1985.
23. Netto erosie en sedimentatie van slib in de vakken van het Schelde-estuarium door natuurlijk- en kunstmatig slibtransport.
24. Netto aan- en ontslibbing van schorren, geulen en platen in de vakken van het Schelde-estuarium.
25. Verwachte nettotransporten van de natuurlijke mariene- en fluviatiele slibtransporten in het Schelde-estuarium (met onder- en bovengrenzen).
26. Resultaten van de variatie van enkele uitgangspunten voor de netto mariene- en fluviatiele slibtransporten in het Schelde-estuarium.
27. Empirische relatie tussen getijvolume en doorstroomprofiel in het Schelde-estuarium.
28. Verloop van de natte doorsnede op de vakgrenzen in het Schelde-estuarium.
29. Berekende bruto slibtransporten op de vakgrenzen van het Schelde-estuarium [10^3 t/getij].
30. Bulkhoeveelheden aan slib in waterbodem en waterfase en de bruto horizontale en verticale uitwisseling van slib in het estuarium.
31. Netto slibtransporten in het Schelde-estuarium [10^3 t/jr.].

Overzicht van de tabellen tussen de tekst

- Tabel 1. Dieptegemiddelde slibconcentratie in het Schelde-estuarium [mg/l].
- Tabel 2. Spreiding in de fractie fluviatiel slib op 3 relevante lokaties in het Schelde-estuarium.
- Tabel 3. Verdeling van de hoeveelheid gebufferd slib over de verschillende morfologische eenheden in het Schelde-estuarium [10^6 ton].
- Tabel 4. Indeling van het Land van Saaftinge naar laag, midden- en hoog schorgebied.
- Tabel 5. Aanslibbing van de getijdehavens in de Westerschelde.
- Tabel 6. Procentuele verdeling van de bulkhoeveelheid slib over de morfologische eenheden in het Schelde-estuarium, geklusterd voor 3 gebieden [%].
- Tabel 7. Overzicht van de belastings- en onttrekkingsbronnen op het Schelde-estuarium tussen Rupel en Vlissingen.
- Tabel 8. De slibaanvoer bovenstrooms van Rupel [10^3 t/getij].
- Tabel 9. De zijdelingse slibaanvoer tussen Rupel en de grens [10^3 t/jr].
- Tabel 10. Gemiddelde uitwisseling van slib in het Schelde-estuarium [10^3 t/jr.]
- Tabel 11. Gemiddelde netto slibtransporten op enkele relevante vakgrenzen in het Schelde-estuarium [10^3 t/jr].
- Tabel 12. Gevoeligheid van de berekende netto slibtransporten in het Schelde-estuarium voor de variatie van enkele aannamen [10^3 t/jr].
- Tabel 13. Diverse schattingen van het netto slibtransport in het Schelde-estuarium [10^3 t/jr.]
- Tabel 14. Vermenigvuldigingscoëfficiënt om de bruto slibtransporten voor de opeenvolgende kwartalen te berekenen.
- Tabel 15. Natuurlijke en onnatuurlijke uitwisseling van de actieve bodemlaag van het Schelde-estuarium volgens het Beleidsplan Westerschelde [100 g/m²/dag].
- Tabel 16. Ribbelsnelheden in de Westerschelde, genormeerd voor een ribbelhoogte van 1 m.
- Tabel 17. Responsietijden van een propstroming en een perfecte menger bij verschillende reinigingsgraden.
- Tabel 18. Uitwisseling van slib tussen de verschillende lagen voor de verschillende gebieden in het Schelde-estuarium.
- Tabel 19. Procentuele verdeling van de bulkhoeveelheid slib over de morfologische eenheden in het Schelde-estuarium, geklusterd voor de 3 hoofdgebieden [%].
- Tabel 20. Netto erosie en sedimentatie van slib in de morfologische eenheden incl. baggereffekten voor de hoofdgebieden van het Schelde-estuarium [10^3 t/jr.].
- Tabel 21. Vergelijking tussen de gemeten- en berekende slibconcentratie [kg/m³].

Overzicht van de bijlagen (deze zijn achter in de nota opgenomen)

- B1. Tabel met inhouden en oppervlakten van het Schelde-estuarium.
- B2. Situatie van het Schelde-estuarium.
- B3. Situatie van de schematisatie van het Schelde-estuarium in hoofd- en nevenvakken voor de slibbalans.
- B4. Tabel met de berekende dieptegemiddelde slibconcentratie in het Schelde-estuarium (voor bemonsteringslokaties Westerschelde zie bijlage B1).
- B5. Situatie van het slibpercentage in de waterbodem van het Schelde-estuarium.
- B6. Situatie van het verloop van de isotopenverhouding $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ in het Schelde-estuarium.
- B7. Tabellen met de berekende slibvoorkomens in het Schelde-estuarium (3 bladen).
- B8. Kontrôle van de slibbalans voor het Oostelijk deel van de Westerschelde.
- B9. Overzicht van het baggeren en storten in het Schelde-estuarium.
- B10. Tabellen met het berekeningsresultaat van de slibbalans van het Schelde-estuarium (3 bladen).
- B11. Tabel met het berekeningsresultaat van de bruto slibtransporten.

Overzicht van de appendices

- A1. Globale beschrijving van de fysische processen m.b.t. de slibtransporten.
- A2. Omrekening kubieke meters sediment naar tonnages droge stof.
- A3. Opmerkingen omtrent de sedimentbalans van het Schelde-estuarium.
- A4. Kunstmatige sedimenttransporten.
- A5. Berekening van het ontstaan van een slibrijke grenslaag tussen waterbodem en waterfase.

1. INLEIDING

Dit rapport beschrijft de slibhuishouding van het Schelde-estuarium met de kennis die tussen 1970 en 1990 is verzameld. Kennis over de slibhuishouding is noodzakelijk omdat veel (micro)verontreinigingen aan slib gebonden zijn en met het slib verspreid worden.

Kernvragen van het slib-onderzoek waren:

HOEVEEL SLIB KOMT HET ESTUARIUM BINNEN?

WAARHEEN WORDT HET SLIB GETRANSPORTEERD?

HOELANG BLIJFT HET SLIB IN HET ESTUARIUM?

HOE GROOT IS DE UITWISSELING VAN SLIB TUSSEN WATER EN BODEM?

Het rapport is de eind-rapportage van de werkgroep SAWES TRANSPORT van het SAWES project. Het SAWES project (SAWES = Systeem Analysen Westerschelde) werd in 1987 door de Dienst Getijde Wateren van Rijkswaterstaat opgestart om een set wiskundige modellen te maken, die de verspreiding van verontreinigingen en de gevolgen daarvan voor het ecosysteem simuleren [SAWES 1987].

Voor het deelproject SAWES TRANSPORT werden de volgende doelstellingen geformuleerd:

- Het formuleren van het verspreidingsmechanisme van ingebrachte verontreinigingen, vanuit de Schelde (primaïr) en overige bronnen (secundair), zowel in opgeloste als in gebonden toestand (slib).
- het verwerven en modelmatig formuleren van kennis over de aanwezigheid van slib en de verdeling daarvan over het bekken.

De slibproblematiek van het Schelde-estuarium is niet nieuw, maar wordt reeds lang onderkend. Bijna ½ eeuw geleden werd al gestart met slibonderzoek. Crommelin (1949) heeft onderzoek verricht naar de aard en herkomst van het slib in de Westerschelde; Terwindt (1967) heeft de slibstromen in het Deltabekken geïnventariseerd; Wollast (1968) heeft schattingen gemaakt voor de slibtransporten vanuit België; Wartel (1972) en Bastin (1974 en 1985) hebben de sedimentologie van het estuarium onderzocht; De Looft (1970/1980) heeft uitgebreide karteringen verricht in de geul- en plaatgebieden van het estuarium. Deze gegevens zijn onmisbaar gebleken; Bakker (1975) heeft slibtransportformuleringen opgesteld; Salomons (1981) heeft berekeningen m.b.t. de slibtransporten gemaakt; Swart (1983) heeft transport- en concentratiemetingen nader geanalyseerd; Daamen (1984) heeft als eerste de verschillende benaderingen van het slibtransport vergeleken.; Manni (1986) heeft uitgebreid literatuuronderzoek verricht; Steyaert (1987) heeft het verband met de morfologie geïntroduceerd; Bijlsma (1988) heeft de aanzet gegeven voor de koppeling tussen slibbalans en kwaliteitsbalans van de waterbodem.; H.Mulder (1989) heeft (in het kader van de 3^o nota waterhuishouding) een 2DH-slibtransportmodel ontwikkeld voor de Westerschelde.

De slibproblematiek voor dit estuarium vraagt de komende jaren overigens nog veel aandacht doordat de sanering in het stroomgebied van de Schelde pas op gang is gekomen.

In dit rapport is het slib gedefinieerd als de anorganische deeltjes (kleimineralen, ijzeroxiden) $\leq 63\mu$. Alle slibgegevens zijn herleid naar de fractie $\leq 63\mu$ [notitie Bams]. Voor het transportmechanisme van het zwevend transport (suspended load) is onderscheid gemaakt in "washload" en "bed material load".

De opbouw van het rapport is als volgt:

Hoofdstuk 2 geeft een globale gebiedsbeschrijving van het estuarium. Hoofdstuk 3 bespreekt enkele indelingen voor de morfologie. Hoofdstuk 4 behandelt het voorkomen van slib in het water en de bodem. De horizontale slibtransporten en de slibbalans komen ter sprake in hoofdstuk 5, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen enerzijds het marien en fluviatiel slib en anderzijds de natuurlijke en kunstmatige transporten. De balans geeft naast de netto slibtransporten, de sedimentatie en de erosie van slib. Vervolgens komen in hoofdstuk 6 de verticale transporten aan de orde. Hoofdstuk 7 geeft een samenvatting van de horizontale en verticale slibtransporten.

In de afgelopen jaren zijn zowel een 1D- als een 2DH-slibmodel ontwikkeld voor het estuarium. De ervaringen met deze modellen zijn beschreven in hoofdstuk 8. Het 2DH-slibmodel zal door Mulder nog meer in detail worden gerapporteerd.

De saneringen in het stroomgebied en voorgenomen maatregelen, waarbij slib aan het estuarium wordt onttrokken, zullen de slibbalans in toekomst veranderen. Deze veranderingen worden besproken in hoofdstuk 9.

Tenslotte staan in hoofdstuk 10 de conclusies vermeld, waaruit aanbevelingen voor verder onderzoek zijn af te leiden.

Het rapport bevat daarnaast een uitgebreide literatuurlijst over de slibhuishouding van het Schelde-estuarium. In een aantal appendices is verder gedetailleerdere informatieve m.b.t. het voorkomen van slib in het estuarium opgenomen.

Een belangrijk deel van de huidige kennis over de slibhuishouding heeft bijgedragen aan de totstandkoming van het **BELEIDS PLAN WESTERSCHELDE**.

Met de uitgave van deze nota wordt de kennis uit de nota GWAO-87.101 "1° benadering slibbalans westerschelde" geactualiseerd.

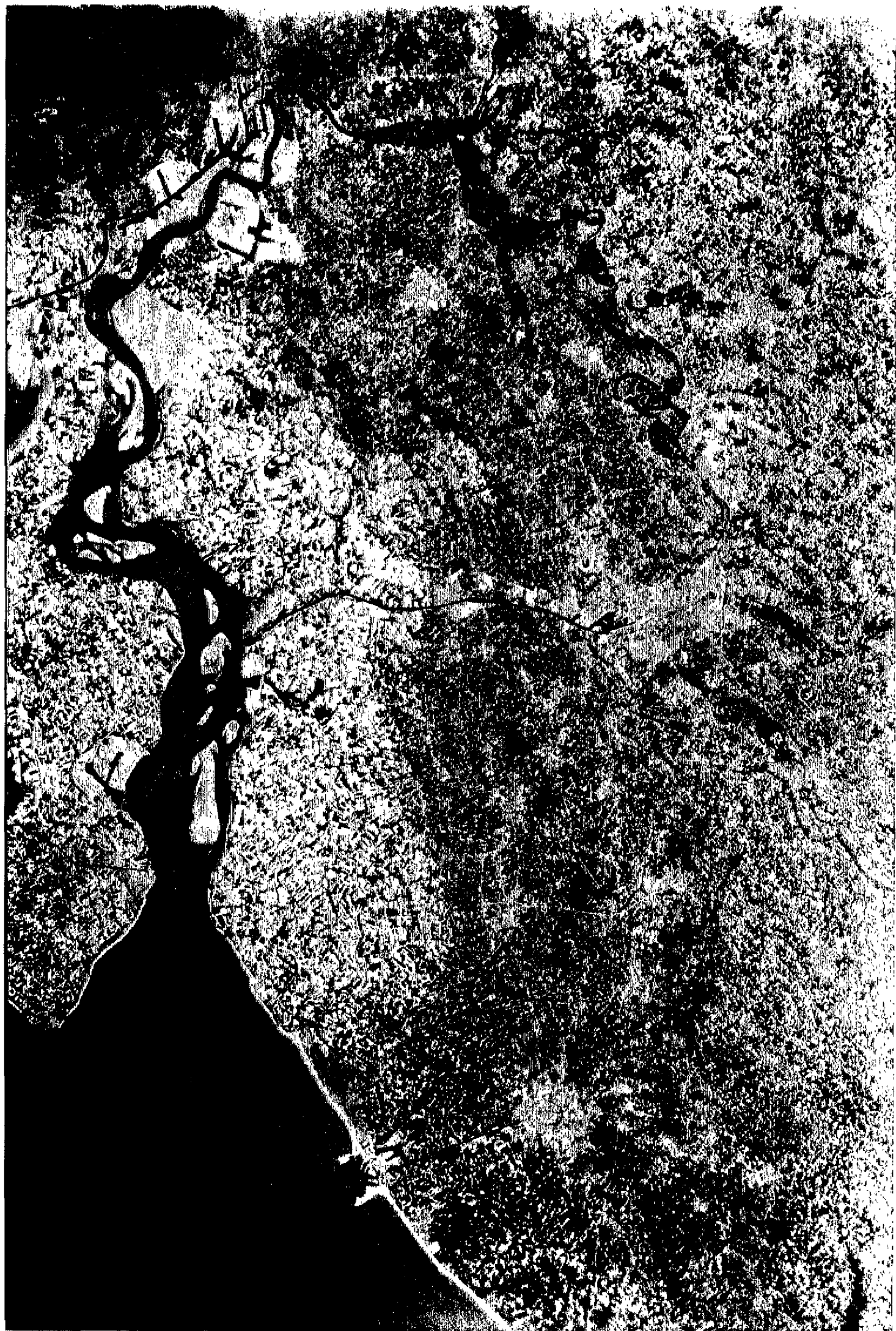
Aan de deelprojectgroep SAWES TRANSPORT is meegewerkt door drs F.Steyaert (voorzitter tot 1989), ir A.Langerak (voorzitter vanaf 1990), ir T.v.d.Wekken, H. de Jong, ing W.de Vos, ir T.Pieters en ing D.v.Maldegem (secretaris).

Mijn collega's wil ik hierbij dankzeggen voor hun specifieke bijdragen aan de betreffende deelaspecten.

Verder wil ik bedanken:

- De vele medewerkers van de Meetdienst Zeeland en vroegere Adviesdienst Vlissingen, die jarenlang met veel inzet fysische metingen en bemonsteringen hebben uitgevoerd in het Schelde-estuarium. Hun gegevens hebben gediend als basis voor dit rapport.
- De medewerkers van IOSM van DGW in Middelburg voor de begeleiding en uitvoering van het veldwerk.
- De medewerkers van IOL van DGW in Middelburg voor het analyseren van de vele monsters.
- Ineke Bams van WSL van DGW te Den Haag voor het samenvatten van de karteringen.
- Jo de Brabander van BXV van DGW te Middelburg voor het tekenwerk.
- Jan Mulder van AOEM te Den Haag voor zijn mening bij de opzet van de nota.
- Bert van Eck van AOCM te Middelburg, Herman Mulder van AOCT te Haren en Wilfried ten Brinke van de RU Utrecht voor hun inhoudelijk kritische opmerkingen.

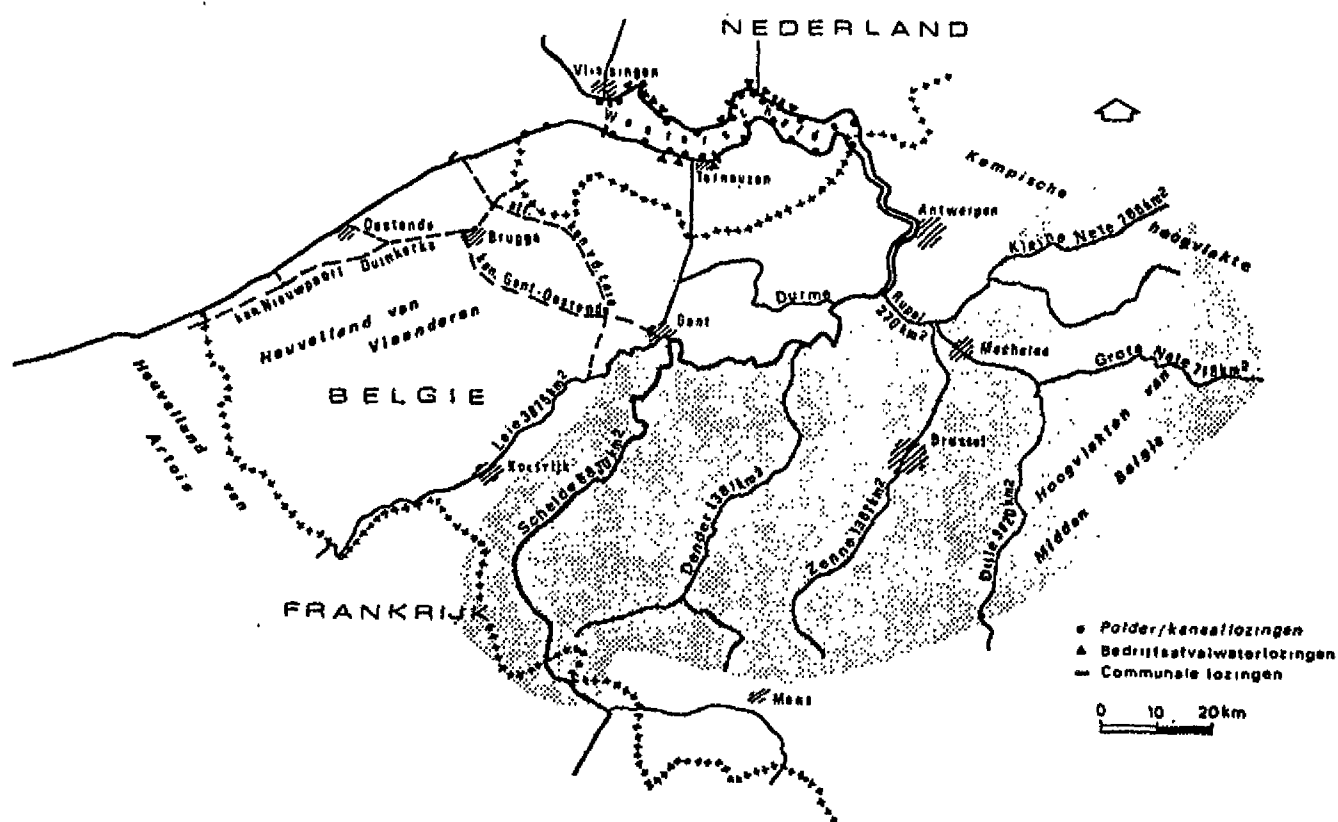
- Ten slotte en niet in het minst Ad Langerak voor het doorzwoegen van de tekst op samenhang en leesbaarheid en voor zijn bijdragen aan de tekst.



2. Gebiedsbeschrijving

Het Schelde-estuarium is de overgang tussen de rivier Schelde en haar zijrivieren, en de zuidelijke baai van de Noordzee (zie figuur 1: en de satelliet foto hiernaast). Het estuarium strekt zich uit vanaf de trechtervormige mond bij Vlissingen, tot de stuwen bij Gent in België [Allersma 1990] (figuur 2). Bovenstrooms van Gent reikt het stroomgebied van de Schelde tot in Frankrijk.

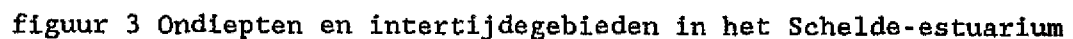
De druk van menselijke activiteiten hebben geresulteerd in grote veranderingen in de natuurlijke morfologische- en ecologische situatie [Bijlsma 1990].



figuur 2 Stroomgebied van de rivier de Schelde

De water- en slibverdeling in het stroomgebied worden beïnvloed door waterhuishoudkundige ingrepen en het waterbeheer in België. Waterwegen en kunstwerken, waardoor water en slib worden aangevoerd of verdeeld zijn de zijrivieren de Durme en de Rupel, de sluizencomplexen van het Antwerps havengebied, het Schelde-Rijnkanaal, het Spuikanaal Bath, het kanaal door Zuid Beveland, het kanaal van Gent naar Terneuzen en het kanaal door Walcheren. Niet alle afvoer van de Schelde belast het estuarium. Een deel van het Scheldewater voedt scheepvaartkanalen in West Vlaanderen, die afwateren op de kust via Franse- en Belgische zeehavens [Technische Schelde Commissie 1986]. De kwantitatieve hoeveelheden water en slib, die het estuarium belasten, worden in hoofdstuk 5 besproken.

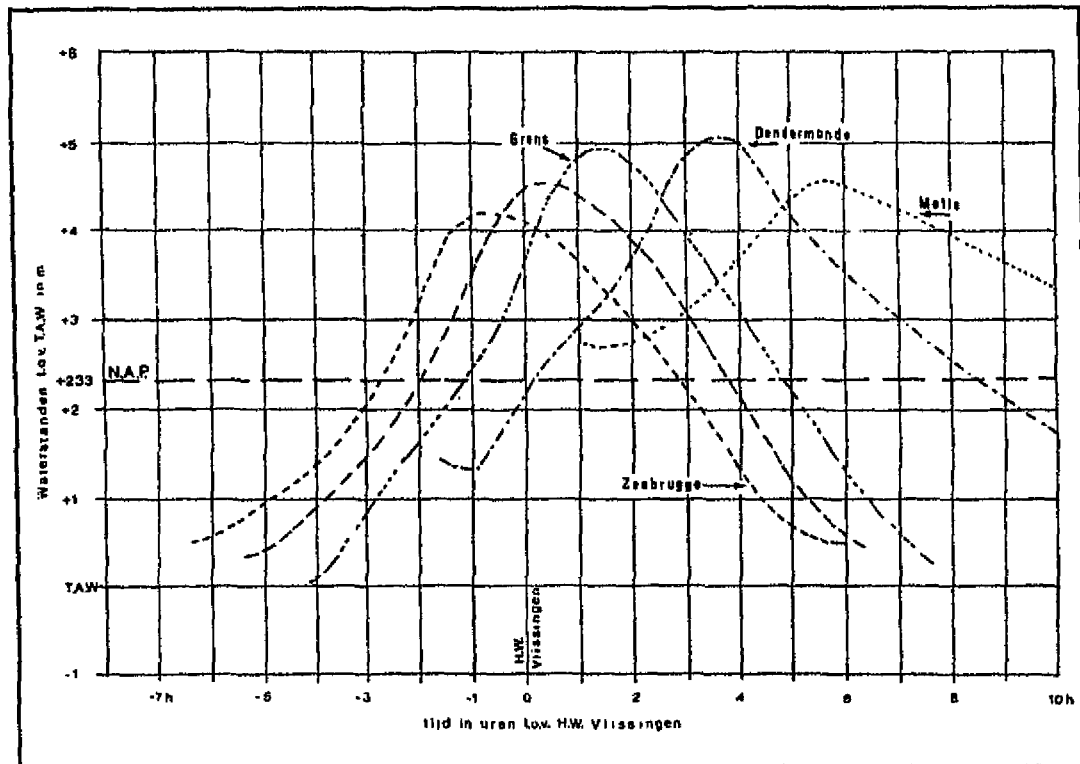
Tot enkele kilometers bovenstrooms van de Belgisch-Nederlandse grens bestaat het estuarium uit één stroomgeul. Benedenstrooms hiervan tot aan de monding van het estuarium zijn er twee of meer evenwijdige stelsels geulen met daartussen ondiepten en banken (figuur 3). De stelsels geulen worden onderscheiden in eb- en vloedgeulen.



Een aantal grotere platen ligt boven de gemiddelde waterstand; enkele reiken tot gemiddeld hoogwater of iets hoger. Langs de oevers en op de hoogste platen liggen slikken en schorren die alleen bij springtij met storm onderlopen (bijlage B2). In de brakwaterzone ligt het grote schorregebied van het Land van Saftinge.

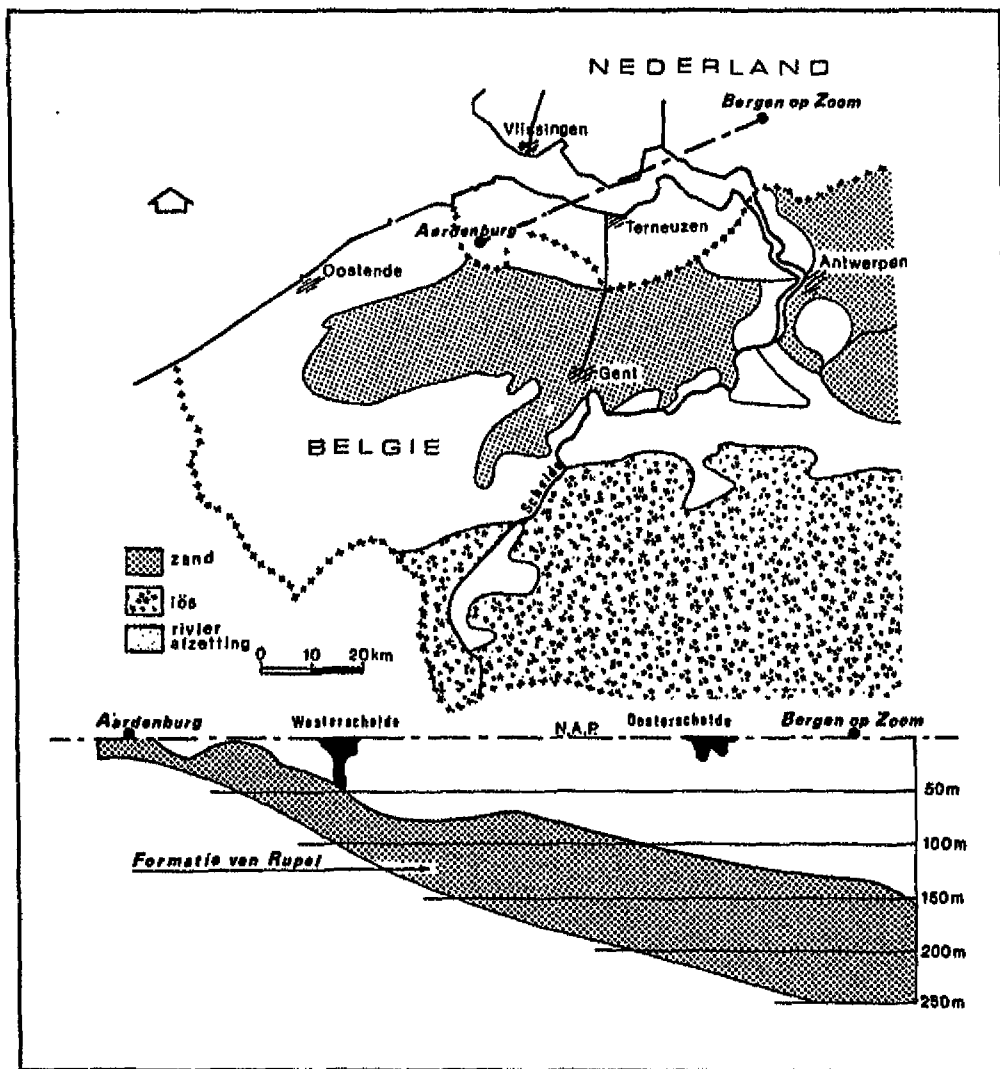
Door de getijbeweging vindt uitwisseling plaats tussen het estuarium en het mondingsgebied, dat in verbinding staat met de zuidelijke Noordzee. Een natuurlijke bron voor marien slib zijn de eroderende Vlaamse Banken gelegen voor de Belgische kust [Bastin 1974] (figuur 3).

Het estuarium benedenstrooms van Hansweert ondervindt hoofdzakelijk mariene invloeden, verder stroomopwaarts tot ongeveer benedenstrooms Antwerpen is een overgangsgebied en bovenstroom van Antwerpen zijn vooral de fluviatiele rivierinvloeden belangrijk. De getijbeweging is merkbaar tot aan Gent (figuur 4), terwijl de rivierafvoer merkbaar is tot Hansweert [Claessens 1988].



figuur 4 Gemiddelde getijkrommen van het Schelde-estuarium tussen Zeebrugge en Gent

Het aangevoerde fluviatiele slib uit natuurlijke bronnen, dat ca. 50% van de fluviatiele belasting vormt, is afkomstig uit de zand- en lösgebieden in het stroomgebied en uit rivierafzettingen in de vallei van de Schelde. In enkele diepe (gebaggerde) geulgedeelten komt de Formatie van Rupel aan de oppervlakte [Wartel 1972]. Deze harde afzetting wordt ook wel "Boomse klei" genoemd (figuur 5).



figuur 5 Geologische afzettingen rond het Scheldeestuarium

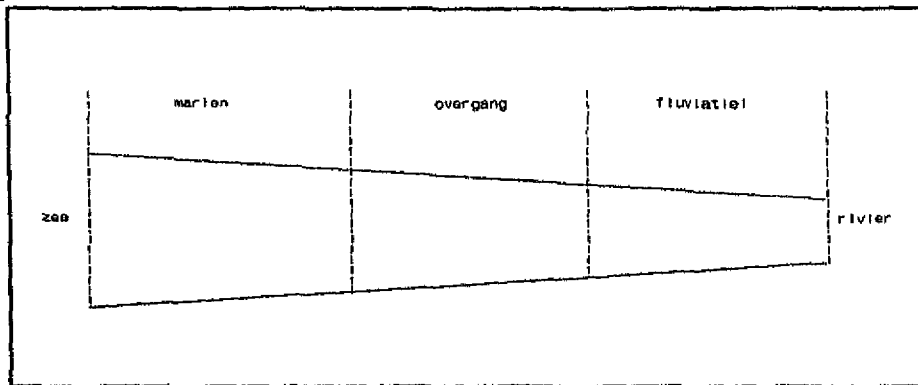
De Schelde, en haar zijriviertjes transporteren tevens het fluviatiele slib (ca. 50%) dat afkomstig is van huishoudelijk en industrieel afvalwater, waarvan een deel onderweg wordt afgezet [D'Hondt et al 1982]. Voor meer informatie hierover wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

3. Morfologische indeling van het Schelde-estuarium

3.1 Indeling naar gebieden

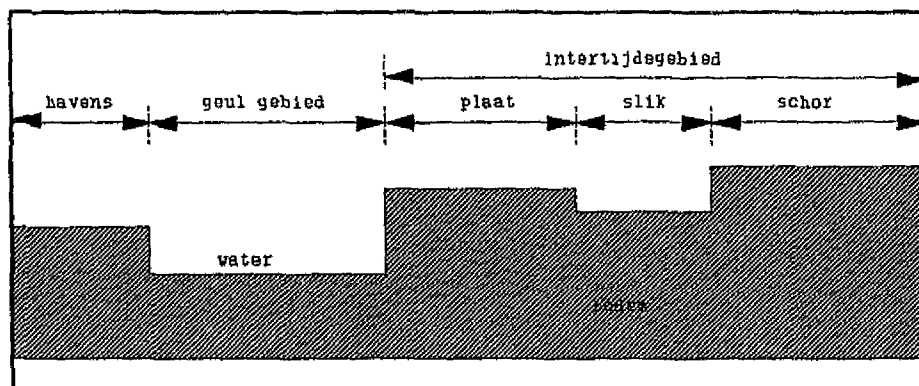
Het Schelde-estuarium is een sedimenterend bekken, dat netto slib en zand accumuleert, waardoor er op de lange termijn een zeewaartse verschuiving van het estuarium optreedt [Allersma 1990]. Dit proces betekent dat er in de huidige situatie meer (ook vervuild) slib sedimenteert dan erodeert. De aanvoer van slib heeft daarmee een gevolg voor de concentratie van vervuild slib in de waterbodem.

Het estuarium staat deels onder invloed van de Noordzee en deels van de rivier de Schelde. Het estuarium is daardoor te splitsen in een marien gebied (Westelijk deel Westerschelde), een overgangsgedebied (Oostelijk deel Westerschelde) en fluviatiele gebied (Belgische Zeeschelde) (figuur 6) [Nihoul et al 1976].



figuur 6 Globale indeling van het estuarium

Het totale watersysteem is voortdurend in beweging binnen de harde begrenzingen in de vorm van kunstwerken. De morfologie van dit estuarium heeft dan ook een enorme dynamiek die zich uit in een zeer gevarieerde dwarsdoorsnede bestaande uit schorren, slikken, platen en geulen (figuur 7) [van Schaik et al 1988].

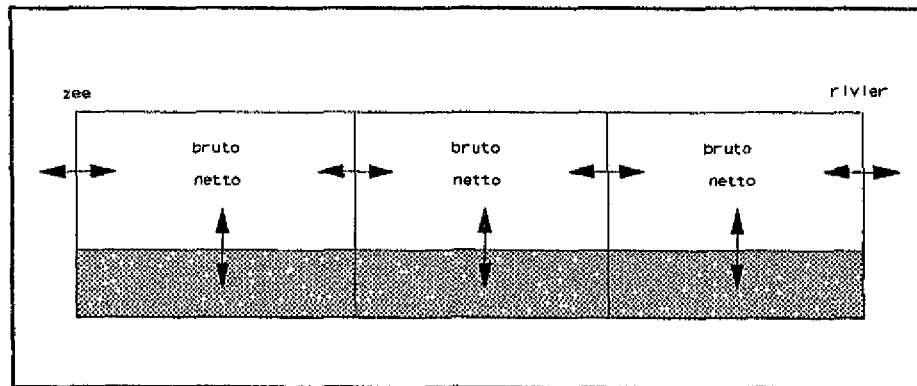


figuur 7 Indeling naar morfologische eenheden

3.2 Indeling naar sedimentstromen

In het Schelde-estuarium zorgen de natuurlijke hydrodynamische- en de kunstmatige processen voor sedimentatie, erosie en transport van sediment, die de accumulatie, verspreiding en nalevering van verontreinigde specie uit de bodem (figuur 8) [Mulder et al 1987] veroorzaken.

Voor extra informatie zie appendix A



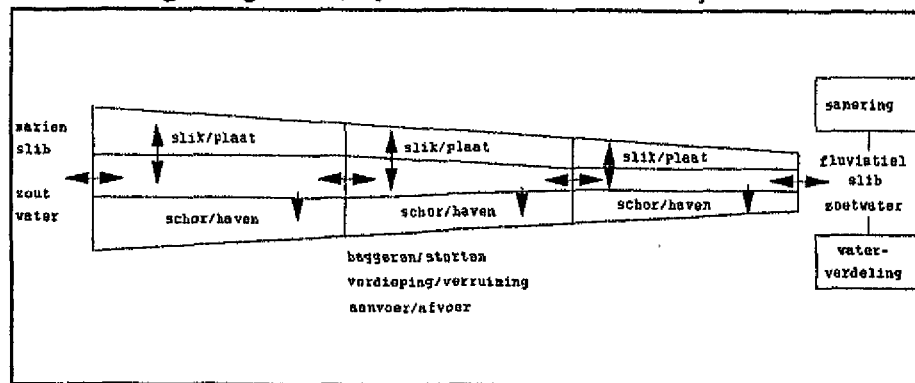
figuur 8 Slibtransporten in het estuarium

De natuurlijke processen, zoals de getijbeweging, de wind en de rivierafvoer, zorgen mede onder invloed van biochemische processen voor het brutto- en netto sedimenttransport tussen geulen, platen, slikken en schorren, en voor de uitwisseling tussen water en bodem. Hierdoor mengt schoon zeeslib met verontreinigd rivierslib, en accumuleert of levert de waterbodem verontreinigd slib na [Langerak 1989.1].

De kunstmatige processen, zoals baggeren van de drempels en havens, zandwinning, speciéstortingen en scheepsbewegingen zorgen voor een enorme verstoring van de natuurlijke processen en leveren daarmee een negatieve bijdrage aan het ecosysteem [Jonge de 1992].

Door bovengenoemde processen is het patroon van ebgeulen en vloedcharen, drempels en platen voortdurend in beweging [Looff de et al 1976].

Bij het sedimenttransport door natuurlijke- en kunstmatige processen kan onderscheid worden gemaakt in transporten in longitudinale richting en transversale richting (figuur 9) [Dronkers et al 1982].



figuur 9 Uitwisseling tussen de morfologische eenheden

De transporten in transversale richting tussen geul en plaat, schor en slik zijn belangrijk voor de ontwikkeling van de intergetijdegebieden en voor de slibconcentratie in de waterbodem.

3.3 Vakindeling voor de slibbalans

Voor het opstellen van de slibbalans is het Scheldeestuarium vanaf de Rupel tot aan de Noordzee verdeeld in 14 hoofdvakken en 66 nevenvakken. Het laatste om onderscheid te kunnen maken in morfologische eenheden als geul-, plaat-, slik- en schorgebieden (Bijlage B3) .

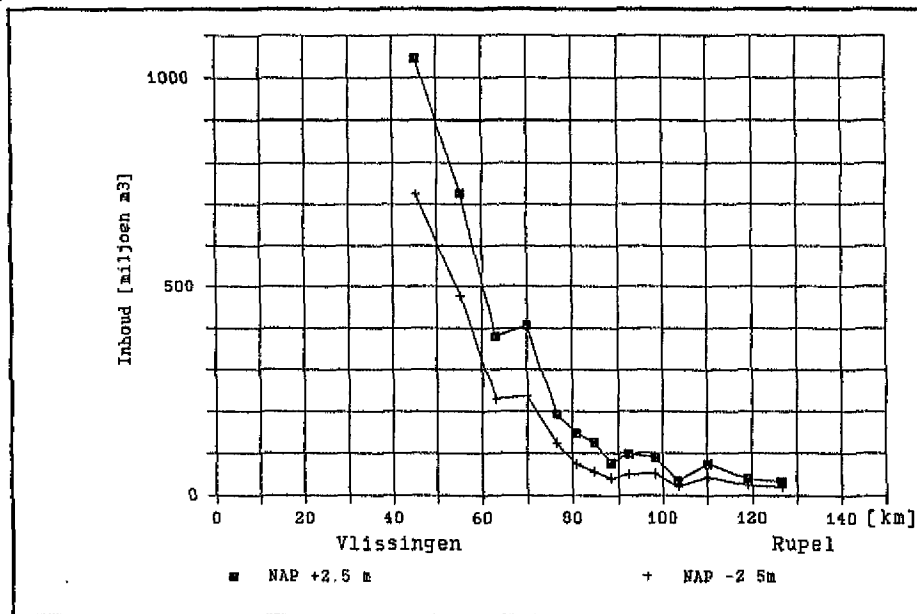
De grenzen van de hoofdvakken zijn zo veel mogelijk gekozen op de overgangen van het geulensysteem (Bijlage B2). Door deze keuze zijn met name de afzonderlijke plaat- en schorgebieden duidelijk herkenbaar als één geheel.

De schematisatie laat de microstructuur van het estuarium buiten beschouwing, maar geeft een goed beeld van de macrostructuur. Het estuarium is door de schematisatie vereenvoudigd tot een systeem, bestaande uit een keten van trechtervormige gootjes voor de geulen, waarvan de doorsnede landwaarts afneemt, met daaraan aangetakt berging voor de verschillende intergetijde gebieden. In deze zijdelingse berging vinden naast interne processen import en export van slib plaats.

De scheidingsvlakken van dit systeem zijn als volgt gedefinieerd:

- Zeerand : een denkbeeldige watervlak tussen Breskens en Vlissingen
- Rivierrand : een denkbeeldige watervlak ter hoogte van Schelle
- Zijranden : de Westerschelde- en Zeescheldedijken
- Onderrand : de onderrand is een grensvlak in de onderwaterbodem tot waar de erosieprocessen merkbaar zijn.
- Intern : de grenzen tussen de morfologische eenheden zijn zo gekozen dat de plaat-, geul-, slik- en schorgebieden herkenbaar zijn.

In bijlage B1 is een overzicht gegeven van de oppervlakte en inhoud van de morfologische eenheden in de hoofdvakken. In het verloop van de inhoud van de hoofdvakken langs de getijweg is de trechtervorm van het estuarium te zien (figuur 10).



figuur 10 Verloop inhoud Schelde-estuarium

De schijf tussen de lijnen voor de nivo's NAP-2.5m. en NAP+2.5m. in figuur 10 geeft het verloop van de inhoud van het intertijgetijd of de komberging weer. Dit verloop is eveneens trechtervormig met afname in stroomopwaartse richting.

In het vervolg van dit rapport wordt bij de beschrijving steeds uitgegaan van de indeling van het Schelde-estuarium in 14 hoofdvakken.

4. Inventarisatie slibvoorkomens (*)

4.1 Het voorkomen van het slib in de waterfase

Hoeveelheid slib in de waterfase

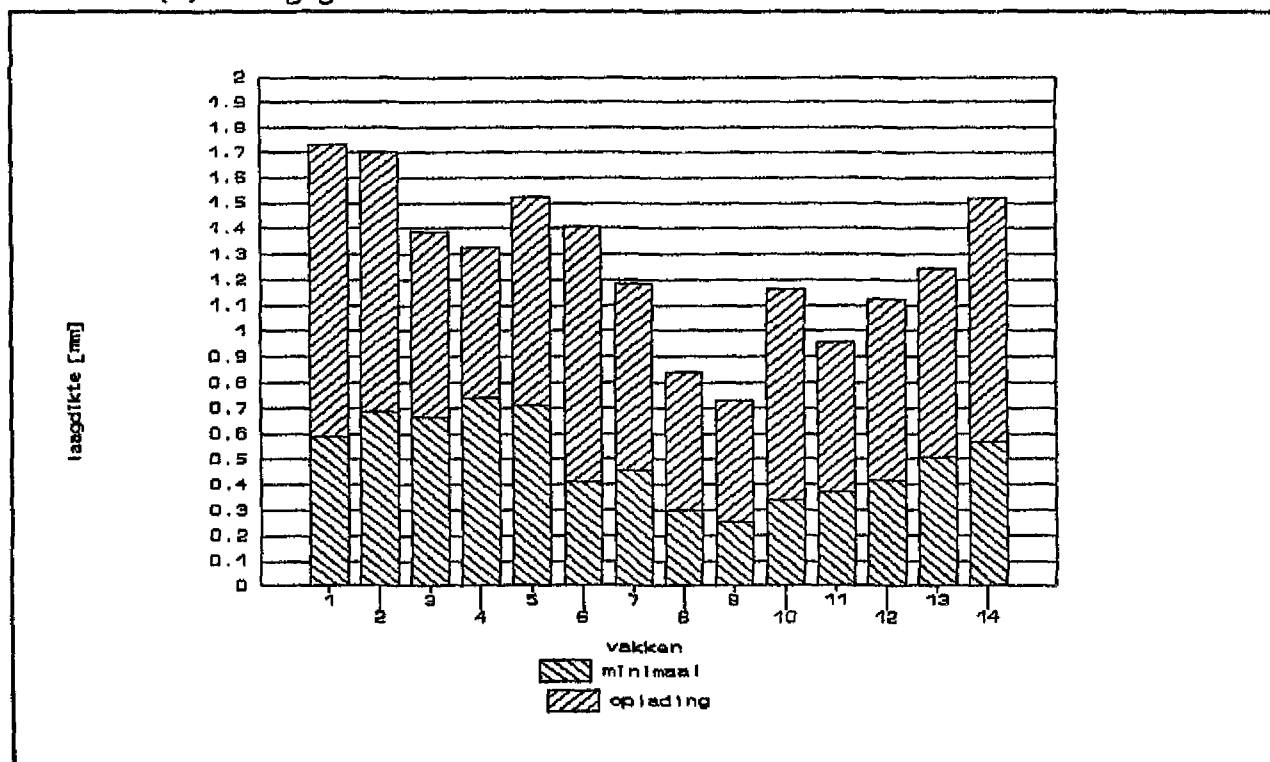
Het slibvoorkomen in de waterfase vertoont een enorme variabiliteit met de getijstroom, de seizoenen en de getijweg in het estuarium.

De maximale en minimale slibhoeveelheden in de waterfase zijn als volgt bepaald (bijlage B7):

- De grootste hoeveelheid is in suspensie bij springtij en maximale stroom snelheid. Omdat vrij willekeurig is bemonsterd wordt aangenomen dat de slibconcentratie tijdens deze omstandigheden overeenkomt met de bovengrens van de berekende jaargemiddelde spreiding. De hoeveelheid slib in suspensie bedraagt dan in totaal ca. $0.4 \cdot 10^6$ ton en komt overeen met een sliblaagje op de bodem van 1.2 mm.
- De minimale hoeveelheid is in suspensie bij doottij tijdens laagwater kentering. Het grootste deel van het slib is dan uitgezakt naar de waterbodem. Aangenomen is dat de slibconcentratie tijdens deze omstandigheden overeenkomt met de ondergrens van de berekende jaargemiddelde spreiding. De hoeveelheid slib in suspensie bedraagt dan in totaal ca. $0.1 \cdot 10^6$ ton en komt overeen met een sliblaagje van 0.4 mm.

Het verschil tussen a. en b. komt overeen met een laagje slib van een dikte van bijna 1 mm. Dit laagje is voldoende om de waterkolom maximaal op te laden.

In figuur 11 zijn de oplading (het verschil van a en b) en de minimale hoeveelheid (b) weergegeven voor de 14 hoofdvakken.



Figuur 11 Slib in de waterfase in het Schelde-estuarium [mm] (fractie <63 μ)

(*)

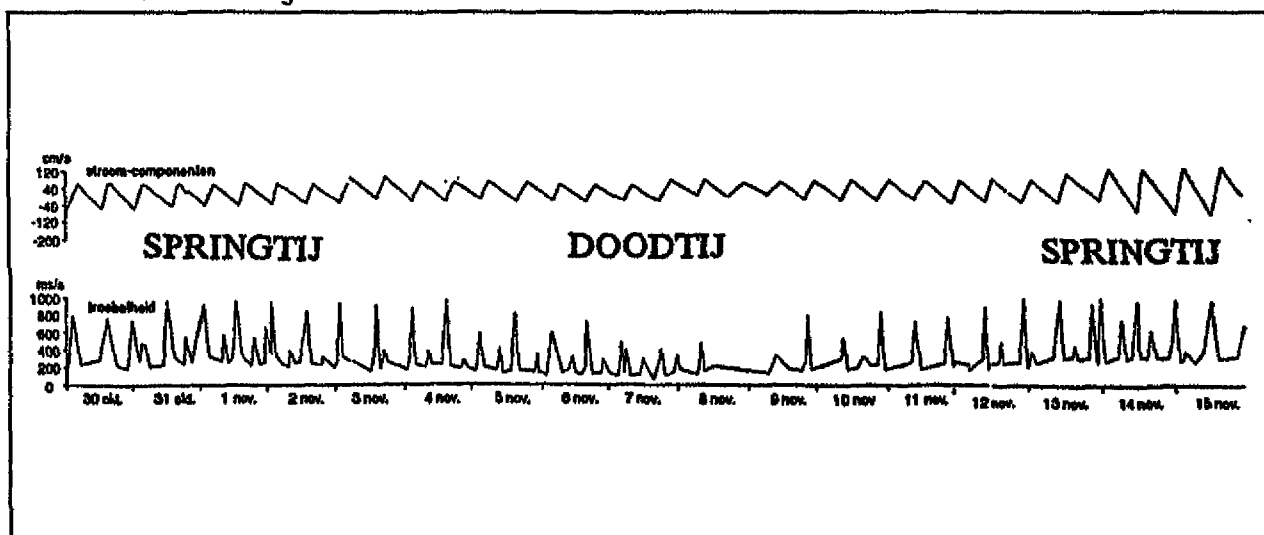
Voor nadere informatie over de bepaling van de slibgegevens in de waterfase en de bodem wordt verwezen naar [Maldegem 1992]

Uit bovenstaande analyse volgt dus dat éénderde tot ééntweede deel van de maximale hoeveelheid in suspensie sedimenteert dan wel erodeert onder invloed van het getij.

Variatie met de getijstroom

Uit de kontinuemetingen blijkt dat de slibconcentratie in suspensie tijdens de stroomkentering orde 50% afneemt t.o.v. de maximum concentratie die optreedt even na de maximum stroomsnelheid. Uit bepalingen van de korrelverdeling met de Malvern volgt dat de deeltjes in de waterkolom kort na kentering een media-ne korrelverdeling hebben van ca. $\leq 20 \mu$. Verondersteld kan worden dat de frac-tie $\leq 20 \mu$ min of meer mag worden gezien als het "spoeltransport" (washload). Het spoeltransport heeft dezelfde retentietijd als het Scheldewater, namelijk enkele maanden.

De grovere slibfractie (bedmaterial load) sedimenteert en erodeert afhankelijk van het getij, totdat afzetting heeft plaatsgevonden op een definitieve loka-tie buiten de getijinvloed. De grove slibfractie sedimenteert later bij val-lend getij en erodeert eerder bij rijzend getij dan zand. Gemeten slib- en zandvertikalen tonen dit aan. Door de vertraagde sedimentatie is er sprake van een natuurlijke selectie van bodemmateriaal, waardoor afwisselend slib- en zandlaagjes ontstaan. Het "vullen en uitzakken van de slibverticaal" gedurende een getij is een gevolg van de interactie tussen het water en de waterbodem onder invloed van het horizontaal getij. Het verloop van dit proces is sterk afhankelijk van het beschikbaar zijn van slib uit de directe omgeving (water en waterbodem). Het proces vertoont grote variaties afhankelijk van de loka-tie, waar is gemeten en van de getijcondities. In figuur 12 wordt ter illu-stratie de variatie van de slibconcentratie met de getijstroom op 1 waterdiepte gedurende een doodtij-springtij periode in 1989 gegeven voor een lokatie in het meest westelijke deel van de Westerschelde.

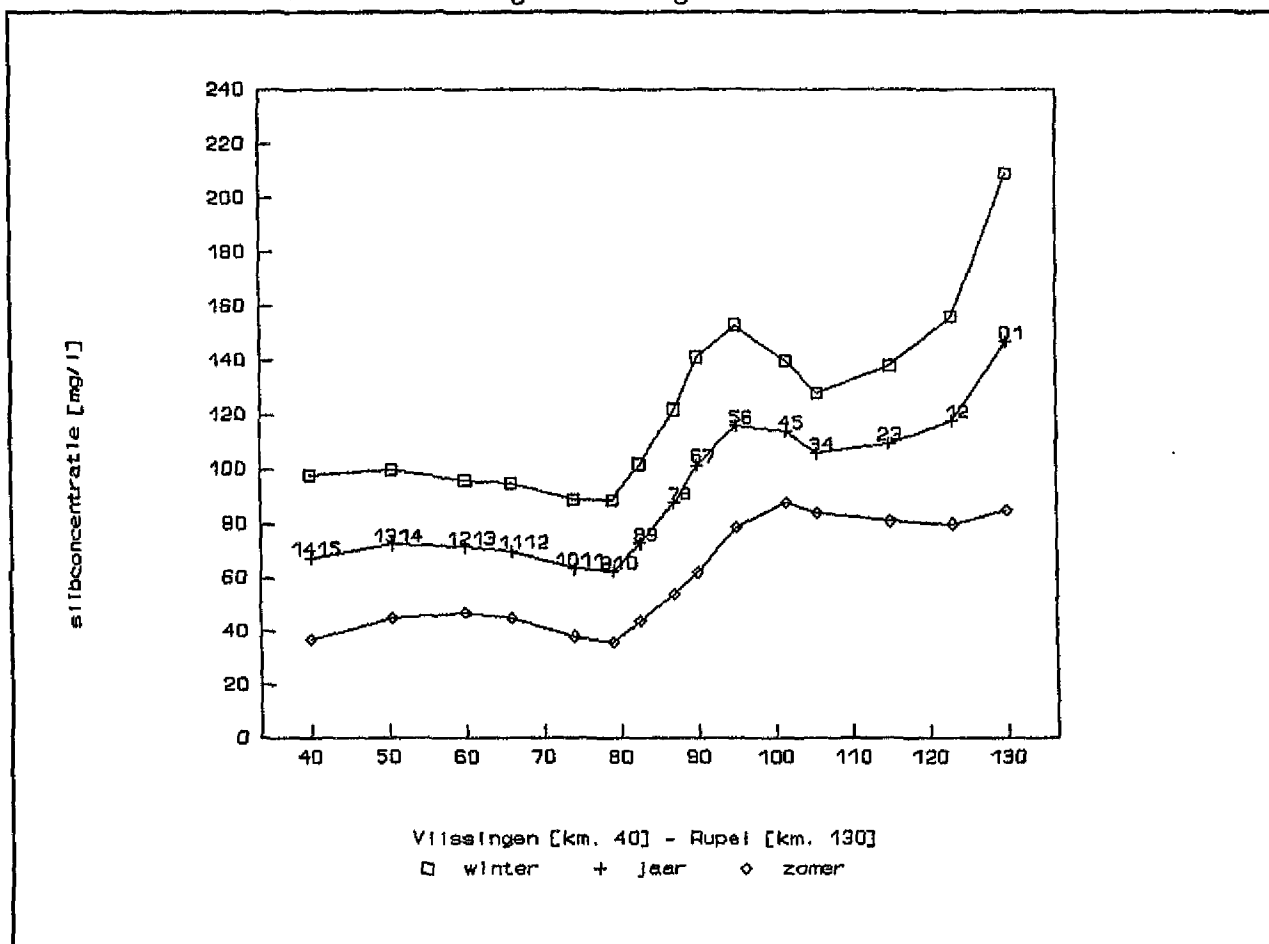


figuur 12 Verloop van de slibconcentratie en stroomsnelheid in het westelijk deel van de Westerschelde gedurende een doodtij/springtijcyclus

Variatie met de seizoenen

De dieptegemiddelde slibconcentratie varieert sterk met de seizoenen. Dit blijkt als de maand gemiddelde slibconcentraties voor de bemonsteringslokaties en vakken uit bijlage B4 verwerkt worden tot jaargemiddelde waarden op de

vakgrenzen (zie figuur 13). De bovengrens komt overeen met de gemiddelde slibconcentraties in de winter, terwijl de ondergrens overeenkomt met de gemiddelde slibconcentraties in de zomer. In de weergegeven concentraties op de vakgrenzen zijn de concentraties van de naastliggende vakgrenzen meegewogen om effecten van lokale omstandigheden enigszins uit te filteren.



figuur 13 Verloop diepte- en tijngemiddelde slibconcentratie op de vakgrenzen van de hoofdvakken in het Schelde-estuarium (fractie $<63 \mu$)

De gemiddelde slibconcentratie bedraagt te Rupel 150 mg/l, bij de grens 120 mg/l en te Vlissingen 70 mg/l. De seizoensvariatie bedraagt ongeveer 50%.

In tabel 1 is de dieptegemiddelde slibconcentratie voor de gebieden Belgische Schelde, oostelijk deel- en westelijk deel van de Westerschelde gegeven [mg/l].

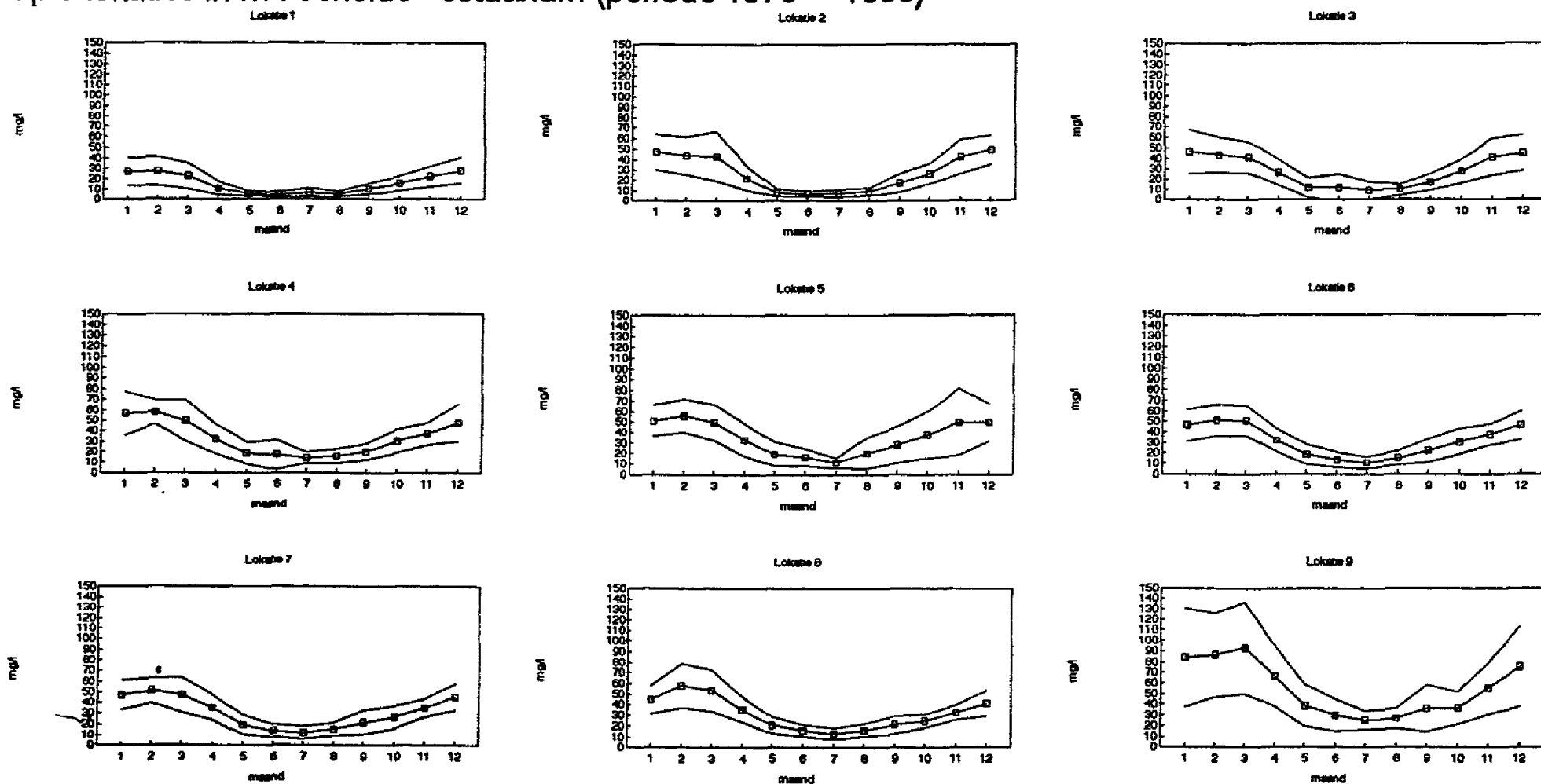
Tabel 1. Dieptegemiddelde slibconcentratie in het Schelde-estuarium [mg/l]

GEBIED	GEMIDDELD	SPREIDING
Belgische Schelde	115	30
Westerschelde oost	76	30
Westerschelde west	72	27

De slibconcentratie van het oppervlaktewater vertoont overigens voor de meeste lokaties geen eenduidige trendmatige verandering over de diverse jaren [Swart 1982, Maldegem et al 1990]. Waarschijnlijk is de hoeveelheid slib in de waterfase op jaarbasis vrij konstant.

Figuur 14

Gemiddeld seizoensverloop en spreiding van de slibconcentratie in het oppervlaktewater op 9 lokaties in het Schelde–estuarium (periode 1970 – 1990)



In figuur 14 is het seizoensverloop van de slibconcentratie van het oppervlaktewater weergegeven voor de 9 bemonsteringslokaties in de Westerschelde. De bemonsteringslokaties staan aangegeven op bijlage B2.

Tijdens de winterperiode wordt de slibconcentratie in de geulen ruim verdubbeld. Deze toename komt naar schatting overeen met de hoeveelheid materiaal, die gedurende de winterperiode door stormen wordt geërodeerd van de platen. De toename van de slibconcentratie wordt daarom toegeschreven aan het zgn. afspelen van plaatgebieden door de hydraulische omstandigheden [Geomor en RU studies].

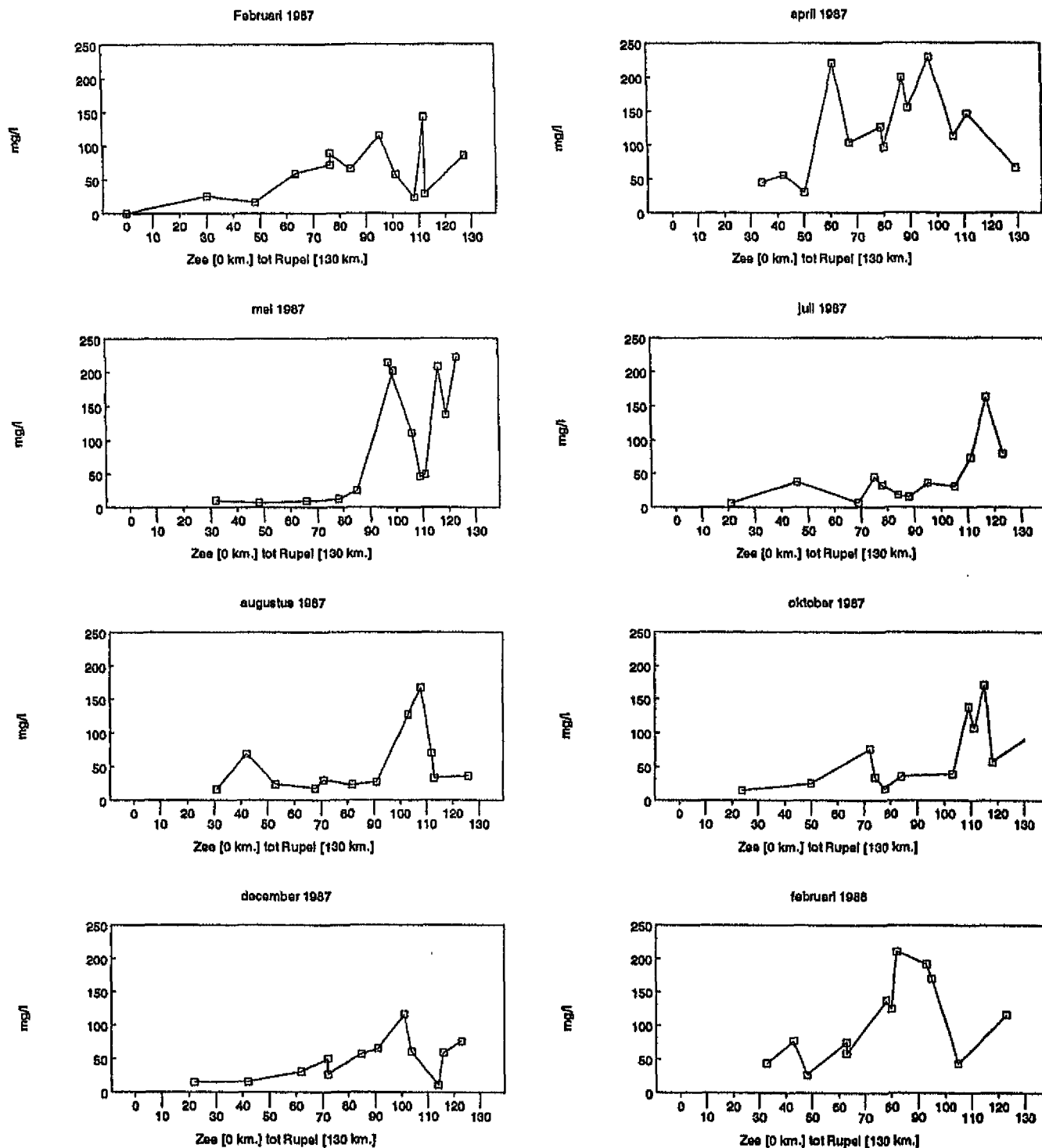
Variatie langs de getijweg

De momentane slibgradiënt in het estuarium varieert in samenhang met de zoutgradiënt. De zoutgradiënt verschuift met het getij over een afstand tot max 20 km. in de lengterichting van het estuarium heen en weer. Deze afstand is mede afhankelijk van de doottij/springtij cyclus. Verder zijn er verschuivingen in de orde van 30 tot 40 km over een langere periode door de varierende zoetwater afvoer van de Schelde (Claessens, 1988).

De slibgradient incl. het zgn. troebelheidsmaximum verschuift onder invloed van de zoutgradiënt mee (figuur 15). Uit figuur 15 blijkt overigens dat de positie van het troebelheidsmaximum niet altijd even duidelijk is aan te geven. Door de verschuiving van de zoutgradiënt is ruim $0.1 \cdot 10^6$ ton slib in beweging.

De langjarige en kortdurende variaties in de waterfase zijn nauwelijks van belang voor de bodem doordat relatief een geringe hoeveelheid slib in suspensie is t.o.v. het beschikbare slib in de waterbodem. Alle jaarlijkse en getij variaties worden daardoor gedempt meegenomen in de ontwikkeling van de waterbodem. Dit betekent dat de waterbodem min of meer een gewogen gemiddelde toestand van het systeem weergeeft m.b.t. de verhouding marien fluviatiel slib.

Figuur 15 Verschuiving van de slibgradient in het Schelde–estuarium gedurende een jaar op basis van oppervlaktescanning gedurende 2 of 3 dagen

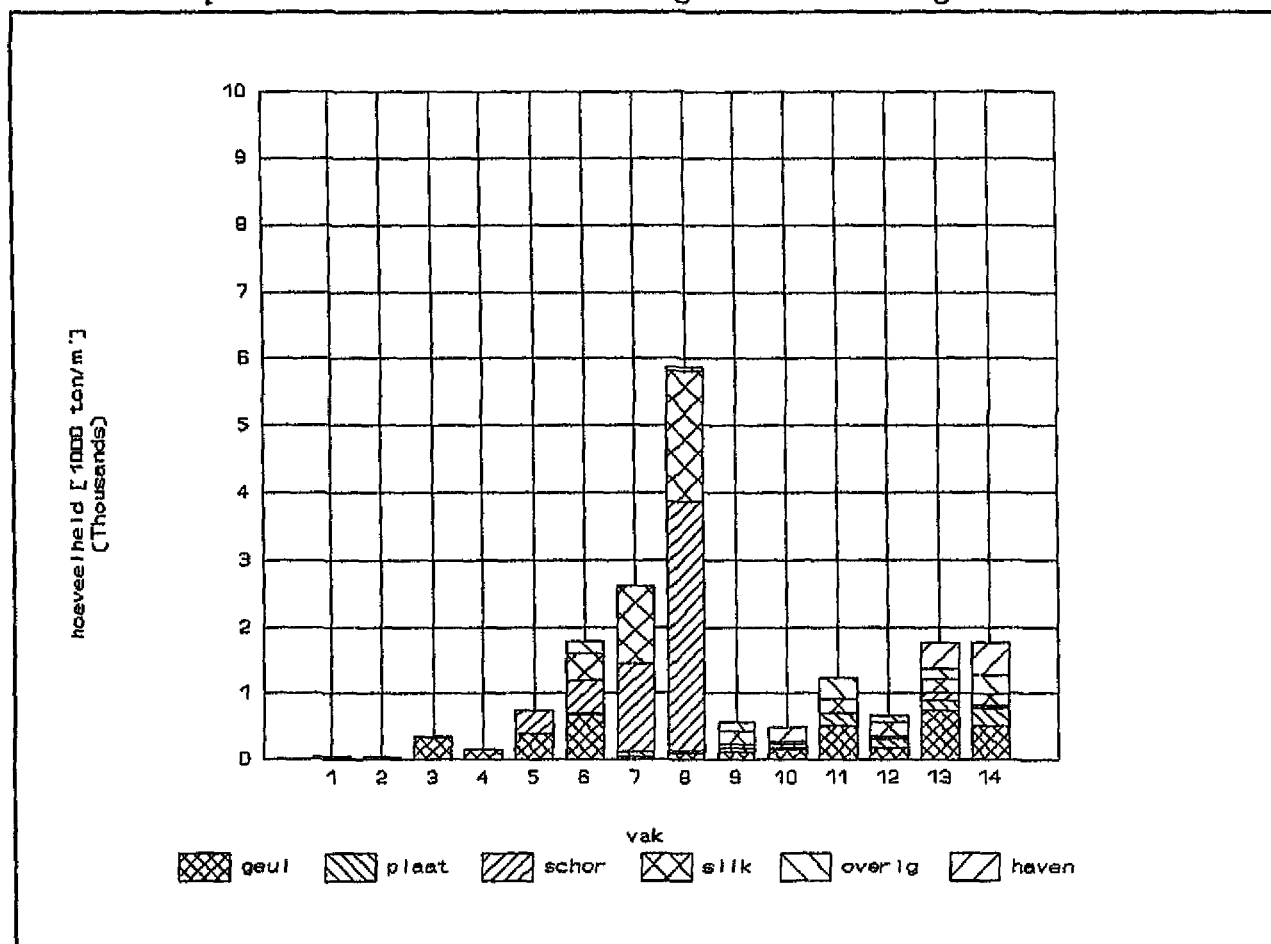


4.2 Het voorkomen van het slib in de bodem

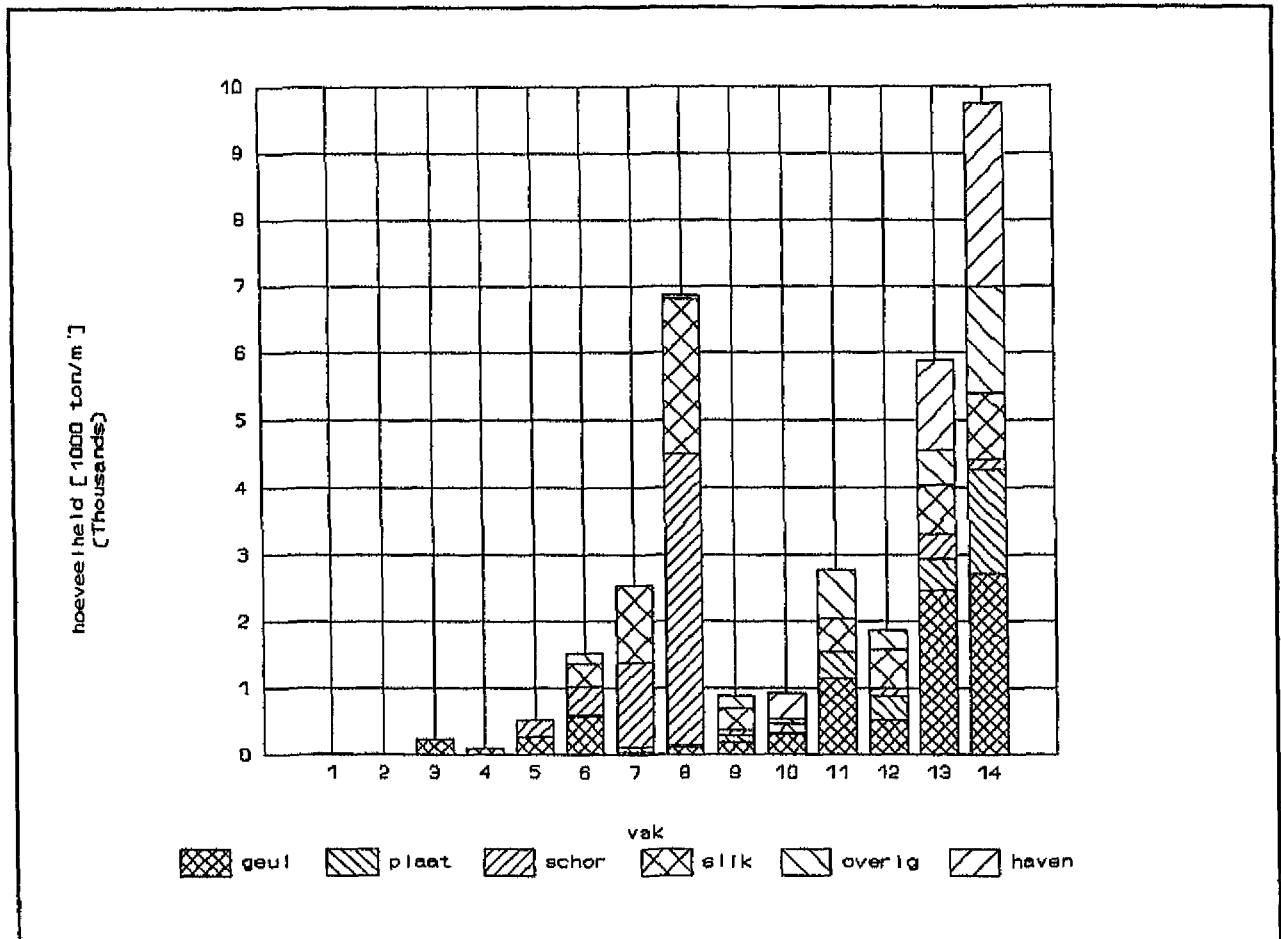
Inleiding

Het slibpercentage in de bodem varieert sterk over de morfologische eenheden (geul, schor, slik, plaat en haven) en daarmee over de lengte en breedte van het estuarium (bijlage B5).

De slibhoeveelheid in de bodem is groot. In de bovenste meter van de waterbodem in het actieve deel van het estuarium is ca. 40 miljoen ton slib gebufferd en ruim 10 miljoen ton slib is opgeslagen in het passieve schorrengebied. De hoeveelheid, die opgeslagen ligt in het schorrengebied is feitelijk aan het systeem onttrokken. De figuren 16 en 17 geven de hoeveelheden fluviatiel en marien slib per hoofdvak en in de eerder genoemde morfologische eenheden.



figuur 16 Bulkhoeveelheden fluviatiel slib in de bovenste meter van de bodem van het Schelde-estuarium



figuur 17 Bulkhoeveelheden marien slib in bovenste meter van de bodem van het Schelde-estuarium

De hoeveelheid slib in de bodem varieert zoals uit figuur 16 en 17 blijkt sterk met de fluviatiele- en mariene herkomst. De hoeveelheid fluviatiele- en marien slib is bepaald met de koolstofisotoop $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$. Het verloop van deze verhouding tussen de rivier de Schelde en de Noordzee is een maat voor het verloop van de verhouding marien en fluviatiele slib in het estuarium. Om de verhouding tussen fluviatiele en marien slib te bepalen zijn alle gemeten $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ waarden in het Schelde-estuarium op één kaart gezet (zie bijlage B6). Hieruit is zo goed mogelijk de $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ waarden per hoofdvak is bepaald.

De verhouding marien fluviatiele per hoofdvak is vervolgens berekend met de omrekeningsformule:

$$f_m = (-\delta + \delta_m) / (\delta_m - \delta_f)$$

waarin:

f_m = fractie fluviatiele slib

δ = $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ waarde van het hoofdvak

δ_m = $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ waarde voor 100% marien slib

δ_f = $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ waarde voor 100% fluviatiele slib

Aangezien de literatuur een ruime marge aangeeft voor 100% marien- en 100% fluviatiele slib, namelijk -21/-24 voor marien en -27/-31 voor fluviatiele slib [Laane et al 1990], is de spreiding van de berekende verhouding marien fluviatiele groot. Ter illustratie van deze spreiding zijn in tabel 2 de berekende waarden met spreiding voor de fractie fluviatiele [-] gegeven voor 3 relevante

lokaties.

Tabel 2. Spreiding in de fractie fluviatiel slib op 3 relevante lokaties in het Schelde-estuarium slib [-]

	Fractie fluviatiel slib [-]		
	Rupel	grens	Vlissingen
bovengrens	1.0	0.9	0.4
gemiddeld	0.7	0.6	0.2
ondergrens	0.4	0.3	0.0

Ruimtelijke verdeling van het slib

* Algemeen

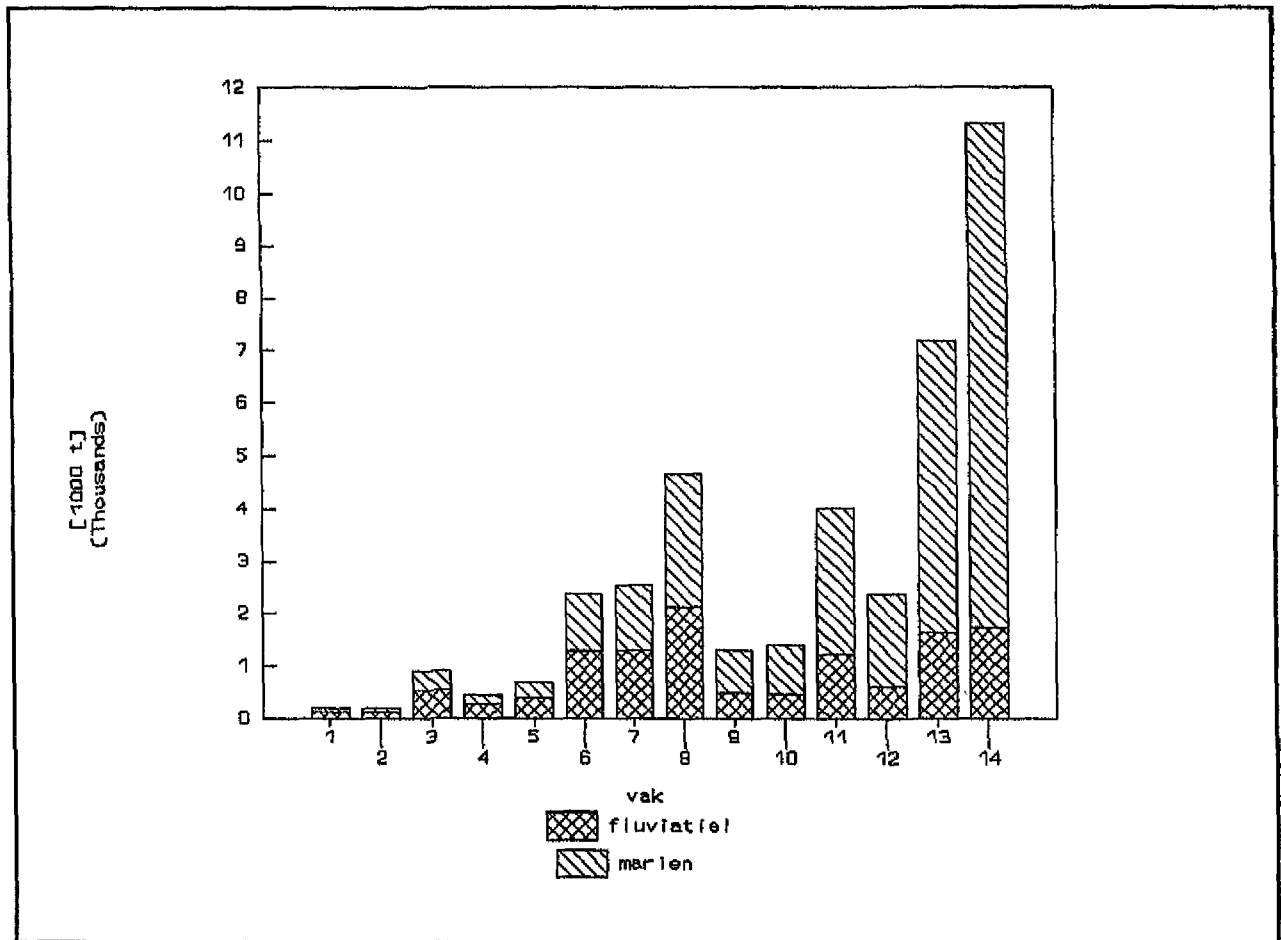
De verhouding $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ in de waterbodem van het gehele estuarium [Swart 1987, Maldegem 1989] toont aan dat de verdeling van marien en fluviatiel slib is gespreid volgens verklaarbare patronen (Bijlage B6).

1. De vloedgeulen bevatten meer marien slib dan de ebgeulen. Dit patroon kon worden gekonstateerd in de gebieden waar sprake is van een sterke gradiënt in deze verhouding. De invloed van marien slib is daarmee sterker in vloedgeulen en van fluviatiel slib sterker in ebgeulen.
2. Het slib hogerop de platen is onder invloed van het overstromen met de vloed meer van mariene oorsprong dan het slib in de nabijgelegen geulen.
3. Het slib dat in het Land van Saaftinge wordt afgezet (30 tot 60% marien) is onder invloed van de afgelegde weg van het (vloed)water meer marien dan het slib dat zich gelijktijdig in de geul bevindt.
4. Het slib in de Westerschelde havens heeft over het algemeen dezelfde verhouding marien fluviatiel als in de voorgelegen geul.
5. Het slib aan de binnenzijde van het Kanaal Gent Terneuzen is grotendeels van fluviatiele oorsprongen; en het slib in de voorhaven van het sluizencomplex is meer fluviatiel dan in de nabijgelegen Westerschelde.
6. Het slib in de zeehavens Duinkerken en Zeebrugge wordt beïnvloed door fluviatiele slibaanvoer vanuit het achterland. De verhouding marien fluviatiel is vergelijkbaar met de rede Vlissingen.

Het slib ligt voor het grootste tijdelijk en definitief opgeslagen in het oostelijk deel en westelijk deel van de Westerschelde. Van het slib in het oostelijk deel ligt ca. 25% definitief opgeslagen in de schorren buiten het watersysteem, terwijl in het westelijk bijna alles tijdelijk opgeslagen of gebufferd zit in het watersysteem. Het slib in het oostelijk deel bestaat voor de ene helft uit fluviatiel en voor de andere helft uit marien materiaal. Het slib in het westelijk deel bestaat slechts voor het grootste deel uit marien materiaal.

Het slibpercentage in de geulbodem is orde 2 - 10%, uitgezonderd vak 6 (18%). Het slibpercentage in het intergetijdegebied bedraagt orde 10 tot 30%, behalve de vakken met veel schor waar het percentage 40 tot 50% bedraagt. Opvallend is de grote spreiding per morfologische eenheid (Bijlage B5).

De hoeveelheid actief fluviatiel en marien slib in de waterbodem over de lengterichting van het estuarium is weergegeven in de figuur 18. De actieve laag is daarbij normatief gesteld is op 1 m.



Figuur 18 Verdeling van het fluviatiele en mariene slib in de bovenste meter van de waterbodem over het Schelde-estuarium

De totale hoeveelheid slib in het estuarium is ook te verdelen naar geulgebieden, intergetijdegebieden en havens (zie bijlage B7). De hoeveelheid in de havens hoort hier eigenlijk niet bij. De haven vormt één geheel met de ervoor liggende geul. Ze fungeert als tijdelijke opslag met een opslagtijd van een jaar waarna het materiaal door baggeren teruggestort wordt in de geul. Voor een bijv. 10 jaarlijkse balans is deze post dan ook niet interessant! Het resultaat van de verdeling is weergegeven in de tabel 3.

Tabel 3. Verdeling van de hoeveelheid gebufferd slib over de verschillende morfologische eenheden in het Schelde-estuarium [10^6 ton] (laagdikte 1m.).

Morfologische eenheid	fluviatiel	marien	totaal
Geulen	4	9	13
Intergetijgebied - schor	7	14	21
deel slikken	5	7	12
deel platen	1	3	4
deel overig	1	4	5
Getijdehavens	1	4	6
Totaal van de eenheden	12	27	40

Ongeveer de helft van het slib blijkt geborgen te zijn in de intergetijde gebieden (platen en slikken).

De hoeveelheid slib in de bovenste meter van de waterbodem komt gemiddeld overeen met een 15 cm dikke sliblaag met een dichtheid van 1 t/m^3 (geul 7 cm; intergetijdegebied 25 cm). Dit slib bevindt zich in de morfologische zeer actieve invloedssfeer. Door het meanderen van de geulen worden ook lagen tot een dikte van 10 m. aangesneden. Doordat het tempo van het aansnijden van deze lagen laag is, zijn deze lagen slechts accumulatoren op een tijdschaal in de orde van decennia tot eeuwen. De verblijftijd van de $\frac{1}{2}$ tot 1 m. dikke actieve bodemlaag bedraagt echter orde één jaar. De dikte van deze laag is afgeleid uit de hoogte van de zandribbels in het actieve deel van de waterbodem [Wege et al 1991].

* Platen

De plaatgebieden zijn kwantitatief niet belangrijk voor de accumulatie van slib. Minder dan 10% van de bulkhoeveelheid is in deze gebieden geaccumuleerd, waarvan bijna de helft nog voor rekening komt van de meest westelijk gelegen Hooie Platen in vak 14 (bijlage B7).

De $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ verhouding van het slib op de platen geeft aan dat het materiaal op de plaat van meer mariene oorsprong is dan van de nabijgelegen geul. De platen worden voornamelijk overspoeld met vloedwater van het stroomafwaarts gelegen gebied. Dit impliceert, doordat het mariene slib minder verontreinigd is dan het fluviatiele slib, ook dat een plaat minder verontreinigd is dan de geul in zijn directe omgeving. Omdat de platen weinig (<10%) bijdragen aan de bulkhoeveelheid slib wordt voor de $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ verhouding eenvoudigheidshalve uitgegaan van de gemiddelde waarde in de geul.

De plaatgebieden nemen nog in omvang toe. In de periode 1955 - 1984 nam de totale inhoud van de plaatgebieden in de Westerschelde boven GLW toe met $31 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De inhoudstoename over een oppervlakte van $6 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ betekent een gemiddelde ophoging van 0.52 m. in de beschouwde periode. Dit komt overeen met 1 tot 2 cm. verhoging per jaar [zie Beleidsplan Westerschelde 1989, deelrapport 4 voor de ontwikkelingen van de afzonderlijke platen].

Het slibpercentage van de plaatgebieden varieert met de seizoenen van "slib-arm" tot "slibrijk". De platen bevatten 's zomers relatief veel en 's winters relatief weinig slib. Deze seizoensafhankelijkheid is aangetoond door veldon-

derzoek voor het gebied rond het Middelgat [Helsloot et al 1988]. Door de beschutte ligging van de platen in het Middelgat voor westenwind zouden de resultaten van dit onderzoek niet rechtstreeks vertaald mogen worden naar andere gebieden zoals de Middelpaas. Uit bodemonderzoek van Siereveld in 1988 [Siereveld 1990] is echter vastgesteld dat deze conclusie ook voor andere plaatgebieden geldt. In een aantal plaatgebieden zijn dunne sliblaagjes in het bodemprofiel aangetoond, die een gevolg zijn van seizoensinvloeden.

Uit een ruwe schatting blijkt dat op de platen het suspensieve materiaal dat 's zomers schijnbaar uit het water verdwijnt, kan worden gebufferd in een laagje zand van ca 1 tot 2 cm. als het slibpercentage in deze verhoging orde 10% bedraagt.

* Slikken

De slikken zijn, zoals de naam al zegt, zeer slibrijk. Het slibpercentage varieert van 20 tot 50%, waarbij slikken met zeer hoge slibpercentages zich ten oosten van Hansweert bevinden.

De slikken bevatten ook kwantitatief gezien veel slib. Meer dan 20% van de bulkhoeveelheid is gebufferd in de slikgebieden. Deze hoeveelheid bestaat voor bijna 40% uit fluviatiel materiaal, indien aangenomen wordt dat de verhouding marien/fluviatiel slib op de slikken overeenkomt met de verhouding voor de geulbodem in de omgeving. In werkelijkheid zal het percentage fluviatiel slib iets lager zijn.

* Schorren

Het estuarium bestaat voor bijna 10% uit schorgebieden. De oppervlakte van de schorgebieden bedraagt ca. 3000 ha. Het grootste gedeelte hiervan (2730 ha.) bevindt zich in het Land van Saaftinge. Op basis van een kaartering in 1979 [Daamen et al 1983] is een indeling van dit gebied naar laag, midden en hoog te maken (tabel 4).

Tabel 4. Indeling van het Land van Saaftinge naar laag, midden en hoog schorgebied

	kwalificatie	Hoogteligging	Oppervlakte	Verdeling
		[m.NAP]	[ha]	[%]
Laag		<+2.5	1200	44
Midden		>+2.5 en <+3.0	650	24
Hoog		>+3.00	850	32

Het slibpercentage in het Land van Saaftinge varieert van orde 20 tot 50%. De variatie van het slibpercentage is o.a. een gevolg van het voorkomen van zowel schorren, slikken als geulen binnen dit gebied. Uit de bemonsteringen in het Land van Saaftinge blijkt echter dat hoge slibpercentages het meest voorkomen. Het gemiddelde slibpercentage is daarom geschat op bijna 50%.

Bij een laagdikte van 1 m. voor het hele estuarium ligt in alle schorren ca. 25% van al het slib uit de estuarium bodem definitief opgeslagen. Dit betekent een hoeveelheid van meer dan 13 miljoen ton slib, die naar schatting voor 50% van fluviatiele oorsprong is. Het aandeel van het Land van Saaftinge hierin bedraagt 90%.

De verhouding marien-fluviatiel van het slib in de schorren is overigens moeilijk aan te geven doordat de gebruikelijke $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ analyse niet representatief is

door plantenresten, die de verhouding $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ in het koolstof sterk beïnvloeden. Voor de schorren is daarom bij gebrek aan betere informatie de verhouding marien/fluviatueel slib in de waterbodem van de voorliggende geul aangehouden. Het feit dat de schorren bij springvloed onderstromen en zoals eerder vermeld dat het mariene en fluviatiele slib in de geulen gespreid is volgens het patroon van vloed- en ebgeulen ondersteunt echter de veronderstelling van een relatief groter marien slibconcentratie op de schorren.

Uit het voorgaande blijkt dat op de schorren grote hoeveelheden slib zijn afgezet. Toch komt niet alle slib in de schorgebieden tot bezinking. Indien al het slib zou sedimenteren uit het water dat de schorren overspoeld, zou dit een laag geven van bijna 3 cm. puur slib per jaar. Uit metingen van het sedimenttransport in een schorgeul in de Oosterschelde blijkt echter dat orde de helft van het aangevoerde sediment achterblijft [Kooistra 1973]. Uit deze benadering volgt een aanslibbing van ca. 1.5 cm. per jaar voor het Schelde-estuarium af te leiden. Dit wordt ondersteund door ander onderzoek:

Uit de analyseresultaten van ^{137}Cs en Pb^{210} zijn door Berger de volgende sedimentatie snelheden voor puur slib afgeleid voor het Land van Saaftinge [Berger et al 1988] (cm/jaar):

Lokatie	Cs 137	^{210}Pb
Konijnenschor	1.7	1.32
Saaftinge oost	1.0	0.75

De beleidsnota Westerschelde vermeldt n.a.v. de resultaten van Berger een opslibbingssnelheid van 1 tot 2 cm./jr.

Uit waterpassingen en luchtkarteringen zijn voor het Land van Saaftinge de volgende sedimentatiesnelheden bepaald:

Periode	sedimentatie slib (50-50 basis)	
1931 - 1980	2.6 cm/jr.	1.3 cm/jr.
1970 - 1980	3.0 cm/jr.	1.5 cm/jr.

De sedimentatie snelheid van de schorren in de Westerschelde bedraagt volgens deze cijfers maximaal 3 cm/jaar, terwijl de aanslibbing ongeveer 1.5 cm/jaar bedraagt.

De sedimentatiesnelheid van de schorren in de Oosterschelde zijn overigens lager. Door [Goedheer 1985] zijn de volgende sedimentatie snelheden bepaald voor een laag, midden en hoog schor in de Oosterschelde in de periode van voor de aanleg van de stormvloedkering:

laag en hoog schor	1 tot 2 cm/jr. (zand en slib)
midden schor	1 tot 5 cm/jr. (zand en slib)

Gekonkludeerd wordt dat de gemiddelde sedimentatiesnelheid van de schorren in de Oosterschelde (1.9 cm/jr.) duidelijk lager is dan in de Westerschelde (ca. 3 cm/jr.).

* Havens

Langs het Schelde-estuarium bevinden zich bijna 700 ha getijgebonden havens en scheepswerven, (bijlage 5). Deze havengebieden bevinden zich in het gebied tussen Vlissingen en de Nederlandse Belgische grens. De getijgebonden toegangseu-len voor de sluizen in de Beneden Zeeschelde worden in deze beschou-

wing van de havens dus niet meegenomen.

De slibpercentages in deze havens zijn hoog 70 - 90% [De Looff 1985]. De bijdrage van de havens aan de hoeveelheid slib in het estuarium bedraagt ruim 5 miljoen ton slib, die voor 90% van mariene oorsprong is.

De afzetting in de havens wordt geschat op 50 tot 100% van het aangevoerde sediment. Deze afzetting is een tijdelijk en tegelijk een continue proces doordat jaarlijkse baggerwerken de havens op diepte houden. De gebaggerde specie wordt door stortingen in de voorliggende geul weer toegevoegd aan het sediment in het water. De gemiddelde hoeveelheden baggerspecie (in het beun gemeten) voor de periode 1965 t/m 1987 zijn gegeven in tabel 5.

Tabel 5. Aanslibbing van de getijdehavens in de Westerschelde.

Vak	haven oppervlak [10 ³ m ²]	bagger hoeveelheid [10 ⁶ m ³ /jr]	sedimentatie snelheid [m/jr]	slib vracht [10 ³ t/jr]
10	739	0.2	0.23	125
13	2294	0.9	0.38	652
14	3664	1.5	0.42	1155
	-----	-----	-----	-----
Totaal	6697	2.6	0.38	1932

Op deze jaarcijfers geldt een standaardafwijking van ca. 50%. Uit ¹²C¹³C analyses van bemonsteringen in de havens is vastgesteld dat de verhouding marien/fluviatiel slib in de havens overeenkomt met de verhouding in het voorgelegen geulgebied.

Totaal overzicht slib in de waterbodem

De bulkhoeveelheden marien en fluviaal slib in de waterbodem, verdeeld over morfologische eenheden in de Belgische Schelde, oostelijk deel- en westelijk deel van de Westerschelde, zijn gegeven in tabel 6.

Tabel 6. Procentuele verdeling van de bulkhoeveelheid slib in de morfologische eenheden geklusterd voor 3 gebieden in het Schelde-estuarium [%]

Gebied	Ben Zeesch.		Wsch. oost		Wsch. west		Estuarium	
	fluv	mar	fluv	mar	fluv	mar	flu	mar
1. Geulen	<u>31</u>	21	5	5	7	<u>27</u>	8	<u>17</u>
2. Slikken	-	-	16	18	3	11	9	13
3. Platen	-	-	1	1	3	11	2	6
4. Havens	0	0	1	2	3	16	2	8
5. (*)	-	-	2	2	3	12	2	7
Buffer (1-5)	49	31	24	27	20	76	24	51
Schorren	12	8	<u>23</u>	<u>26</u>	1	3	12	13
Buffer+schor	60	40	47	53	21	79	35	65
Legenda: * Overig intergetijdegebied <u>18</u> Maatgevende morfologische eenheid								

De Beneden Zeeschelde blijkt het meeste slib van fluviaale oorsprong te bevatten. Dit slib is gebufferd in de geul. In het oostelijk deel van de Westerschelde is het meeste slib opgeslagen in de schorren. Dit slib is zowel van mariene als van fluviaale herkomst. Dit gebied vormt daarmee de overgang naar meer mariene omstandigheden. In het westelijk deel van de Westerschelde is hoofdzakelijk marien slib opgeslagen. Dit slib is in de geulen gebufferd.

5. Horizontale slibtransporten tussen de vakken

Hoofdstuk 5 behandelt drie onderwerpen:

- De netto transporten van marien- en fluviatiel slib
- De bruto transporten van marien- en fluviatiel slib
- De verdeling van de netto- en bruto transporten over de seizoenen

De bruto slibtransporten zijn rechtstreeks af te leiden uit stroom- en sedimentmetingen. De netto slibtransporten kunnen in tegenstelling tot de bruto slibtransporten niet rechtstreeks uit deze metingen worden afgeleid. Dit komt doordat de gemeten bruto eb- en vloedtransporten orde 10^2 groter zijn dan het netto transport, dat het kleine verschil is tussen het grote eb- en vloedtransport. De grootte van het netto transport is daarmee veel kleiner dan de meetfout in de brutotransporten. De netto slibtransporten zijn daarom bepaald met de balansmethode.

Bepalend in de balans is de slibtoevoer uit België. Op de uitkomsten van de balans voor het slibtransport over de Belgisch Nederlandse grens zijn dan ook enkele controleberekeningen uitgevoerd. De balans is een gemiddelde over een groot aantal jaren.

De verdeling van zowel de bruto als netto transporten over de seizoenen is geschat t.b.v. het SAWES model door gebruikmaking van de seizoensverdeling van de slibconcentraties in het estuarium. Aangezien het slibtransport fysisch anders verloopt dan het transport van opgeloste stof is deze aanpak discutabel.

5.1 Berekeningsmethode netto slibtransporten

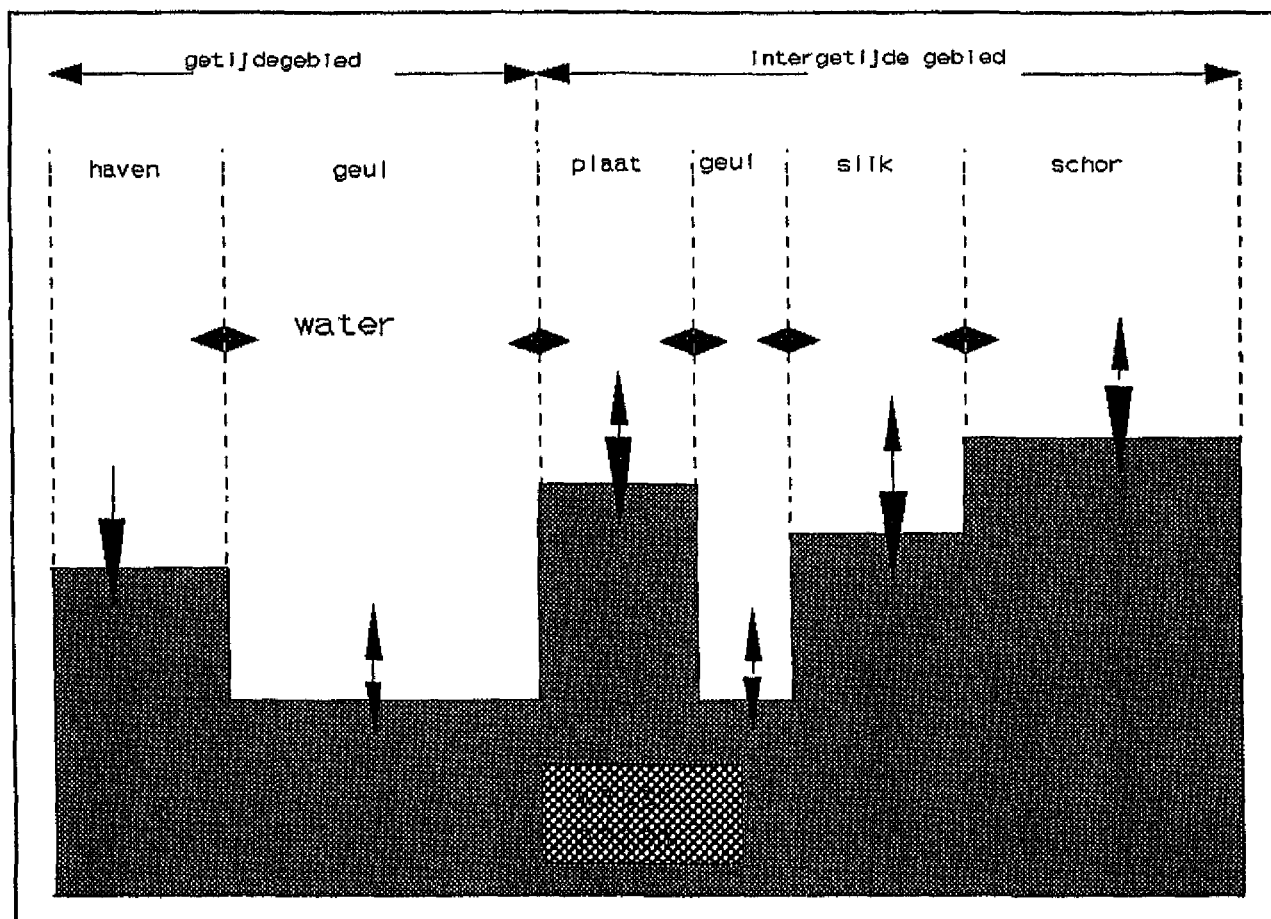
Balansmethode

De balansmethode weegt de belangrijkste (gemeten) factoren in het slibtransport. De belangrijkste factoren in de slibbalans zijn de fluviatiele slibaanvoer van de rivier de Schelde, de sedimentatie en erosie in de morfologische eenheden, de verhouding marien-fluviatiel slib in de waterbodem en de effecten van baggeren en storten. De afzetting op de schorren is beschouwd als een definitieve onttrekking van slib aan het systeem. De verhouding marien-fluviatiel slib is bepaald op basis van het verloop van de koolstofisotoop $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ langs het estuarium. Uit deze balans zijn de natuurlijke netto slibtransporten te bepalen.

Het nadeel van de balansmethode is dat geen rekening wordt gehouden met o.a. de fysische, chemische en biologische processen die de slibtransporten veroorzaken. Veranderen de fysische processen dan verliest de balans zijn waarde. Verder is aangenomen dat de morfologische veranderingen van het estuarium op lange termijn (>20 jaar) van ondergeschikt belang zijn voor de slibbalans.

De balansmethode gaat er voor de sedimentatie en erosie in de morfologische eenheden (geulen en intergetijdegebieden) van uit dat slib deel uitmaakt van het sediment zand. De "SLIB-BALANS" is dus eigenlijk een onderdeel van de "ZAND-BALANS"; dit mag omdat in het zandige Schelde-estuarium over het algemeen relatief weinig slib zit.

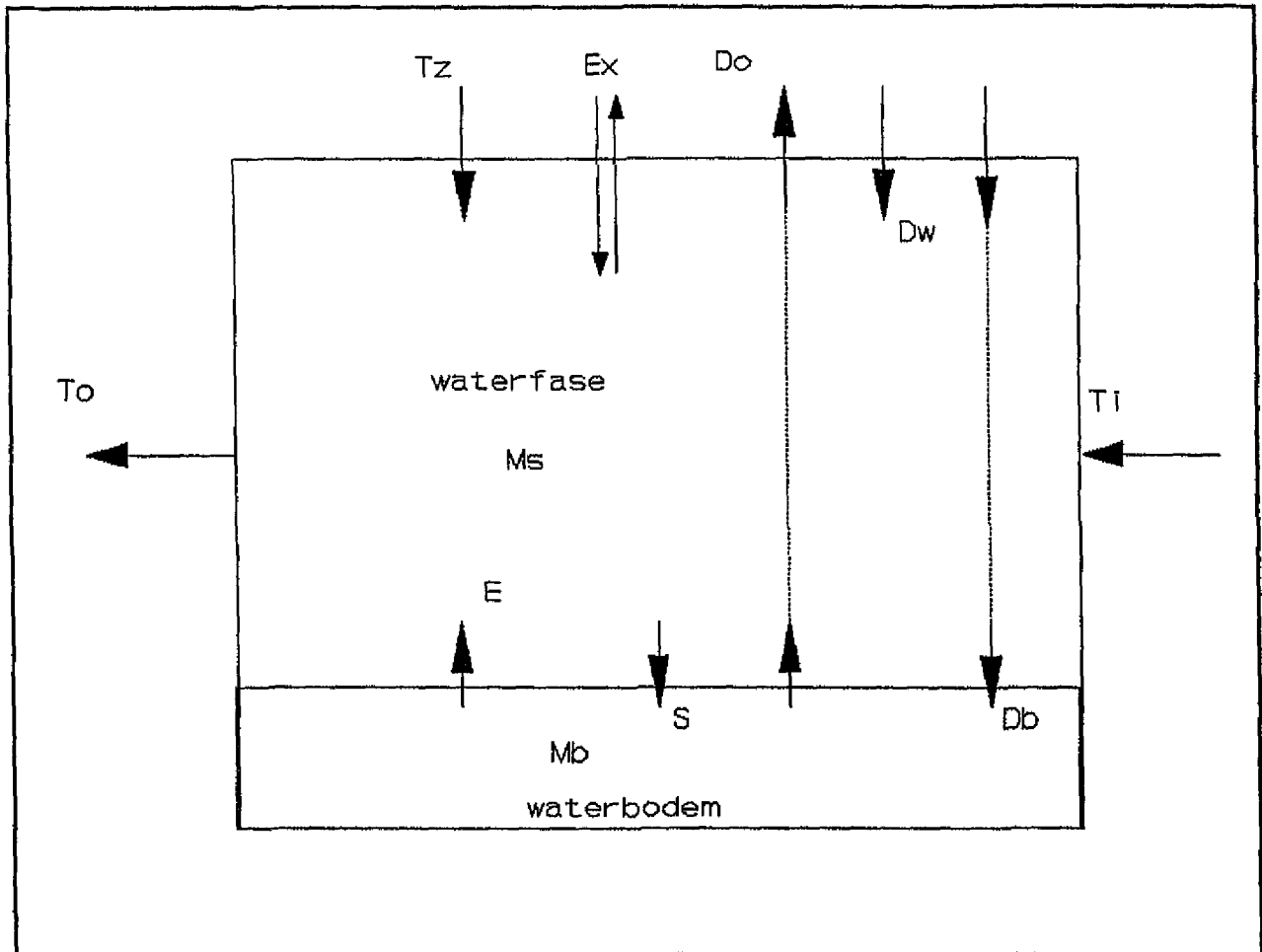
In paragraaf 3.3 is de vakindeling van het estuarium t.b.v. de slibbalans weergegeven. Zoals vermeld is het estuarium ingedeeld in 14 hoofdvakken, die door de geuleenheden aan elkaar zijn verbonden. Elk vak op zich is weer onderverdeeld in nevenvakken, met onderscheid naar de verschillende morfologische eenheden, zoals geulen, platen, slikken en schorren (figuur 19).



Figuur 19. Schematische voorstelling van de uitwisselingen in een dwarsdoorsnede van het Schelde-estuarium.

Als geulgebied is gedefinieerd het gebied beneden een niveau van N.A.P.-2.50 m. Het gebied boven het niveau N.A.P.-2.50 m. is door zijn kwalitatieve verschillen ingedeeld naar platen, slikken en de begroeide schorren [Technische Scheldecommissie 1984].

In figuur 20 zijn de put- en bronfactoren voor de massa slib in het water en de waterbodem voor één hoofdvak schematisch voorgesteld.



Figuur 20. Schematische voorstelling van de slibbalans voor één vak in het Schelde-estuarium

In de slibbalans voor één vak is de massa slib in suspensie voorgesteld met (M_s) en de massa in de waterbodem met (M_b) en de natuurlijke uitwisseling hier-tussen door de erosie (E) en de sedimentatie met (S). De kunstmatige uitwisseling met de waterbodem door baggeren en terugstorten wordt voorgesteld met (D_o) en (D_b). Het gemorste baggermateriaal wordt voorgesteld met (D_w). Er is via de geul import (T_i) en export (T_o) en er is een zijdelingse aanvoer (T_z). De overblijvende bron en puttermen zijn verzameld in de term E_x .

De massa balansvergelijkingen voor het water en de waterbodem luiden dan voor het vak:

$$dM_s/dt = T_i + T_z - T_o + E - S + D_w - E_x \quad (1)$$

$$dM_b/dt = -E + S - D_o + D_b \quad (2)$$

hierin is t de tijd

Met de veronderstellingen dat $dM_s/dt \approx 0$ en dat $D_w \ll D_b \approx 0$ volgt uit (1) en (2):

$$T_o = T_i + T_z - dM_b/dt - D_o + D_b - E_x \quad (3)$$

Omdat voor vak n en vak $n-1$ geldt dat $T_{i(n)} = T_{o(n-1)}$, volgt hieruit als algemene vergelijking voor het n de vak:

$$T_{o(n)} = T_{i(1)} + \sum_{1-n} \{ T_{z(n)} - (dM_b/dt)_{(n)} - D_{o(n)} + D_{b(n)} - E_{x(n)} \} \quad (4)$$

Door alle termen aan de rechterkant van de vergelijking te bepalen uit veld- en baggergegevens kan de uitvoer $T_o(n)$ voor het n de vak worden berekend. In vergelijking (4) is slechts aan één zijde van het estuarium een randvoorwaarde nodig, namelijk voor $T_{i(1)}$. Deze randvoorwaarde wordt ontleend aan de geschatte import van slib te Rupelmonde. De reken richting in de slibbalans (4) is daarmee stroomafwaarts.

De verandering van de massa in de waterbodem in vergelijking (4) is te berekenen uit:

$$dM_b/dt = dz_b/dt * (1 - p) * p_s * f_m \quad (5)$$

waarin z_b het niveau van de waterbodem, p de porositeit, p_s de dichtheid van het sediment en f_m de fractie marien of fluviatiel slib in de waterbodem is. Voor p en p_s zijn gemiddelde waarden van 0.64 en 2.65 t/m³ gebruikt.

Door voor f_m de fractie fluviatiel slib in te vullen worden de netto fluviatiele transporten berekend.

Door voor f_m de fractie marien slib in de waterbodem in te vullen worden de netto mariene slibtransporten berekend.

Doordat er geen waarde bekend is voor de import van marien slib aan de zeezijde, wordt dit feitelijk bepaald door de verhouding marien/fluviatiel slib in de waterbodem en de fluviatiele import te Rupelmonde.

In de slibbalans zijn de netto verplaatsingen door het onderhoudsbaggerwerken van de vaargeul opgevat als kunstmatige slibtransporten. De balansberekening is erop gericht om de natuurlijke slibtransporten te bepalen en corrigeert in vergelijking (2) feitelijk voor de kunstmatige verplaatsingen door baggerwerken.

Methode voor de verdeling van de netto transporten over het jaar

Uit de berekende jaargemiddelde netto slibtransporten zijn t.b.v. het SAWES model kwartaalgemiddelde slibtransporten geschat. Dit is gedaan door de variatie van de slibtransporten binnen een jaar evenredig te stellen aan de variatie van de Scheldeafvoer (deze variatie is bij benadering een cosinus functie).

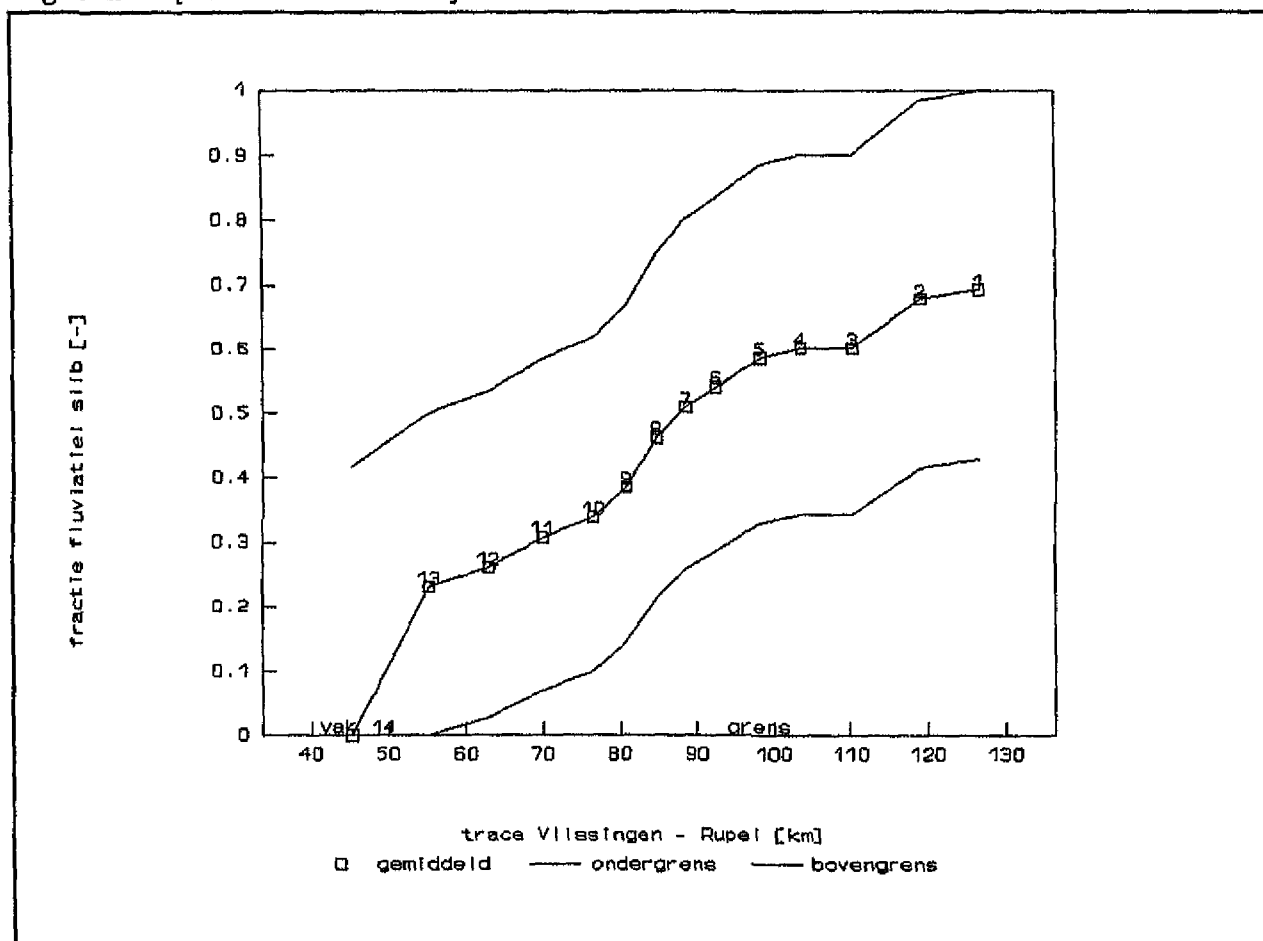
Voor de verdeling fluviatiel/marien slib over het jaar is aangenomen dat de verhouding marien/fluviatiel gedurende een jaar constant blijft.

5.2 Gegevens voor de berekening van de netto slibtransporten

De balansberekeningen voor de horizontale uitwisseling zijn uitgevoerd met behulp van een groot aantal gegevens, met als belangrijkste de verhouding marien fluviatiel slib, de belastings- en onttrekkingsbronnen, de verandering van de slibberging in de bodem en het slibtransport in het water. Deze gegevens worden in het vervolg van deze paragraaf achtereenvolgens besproken.

Verhouding marien fluviatiel slib

Om het deel fluviatiel slib te bepalen uit het totale slibtransport is de verhouding fluviatiel/marien slib nodig. De verhouding tussen marien en fluviatiel slib is bepaald uit de eerdergenoemde verhouding tussen de koolstofisotoop $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ van het organische bodemmateriaal. Verondersteld is dat de gemiddelde $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ waarden voor 100% marien en 100% fluviatiel slib, respectievelijk -22.5 en -29 zijn. Deze waarden zijn zo goed als kon uit de literatuur afgeschat [Laane et al 1990].



figuur 21. Verloop van fractie marien en fluviatiel slib met onder- en bovengrenzen in het Schelde-estuarium

Hieruit volgt het gemiddelde verloop van de fractie fluviatiel slib in het estuarium (figuur 21). De spreiding in dit verloop door de marges in de aannamen voor 100% marien en 100% fluviatiel slib zijn eveneens in deze figuur weergegeven (zie ook paragraaf 4.2). Bij de berekening van de netto slibtransporten zijn deze marges steeds als onder- en bovengrenzen meegenomen.

De $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ verhouding is overigens niet de enige mogelijke methode voor de bepaling van de verhouding marien/fluviatiel slib. De keus is op de $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ methode gevallen vanwege de bestaande ervaring ermee. Andere tracers zoals Cesium137, Arseen, Barium, Strontium en Zink zijn een mogelijk "kontrolemiddel" of alternatief voor de $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ benadering. Methoden gebaseerd op zware metalen of "fingerprinting" [Bernard 1989] zijn waarschijnlijk minder goed toepasbaar in de Westerschelde vanwege de vervuiling. Toepassing van de methode, waarbij de korrelverdeling als tracer wordt gebruikt is eventueel ook toepasbaar [Mc.Laren 1985]. Bij deze kostbare methode is echter onduidelijk wat de effecten zijn van een sterke verstoring van de korrelverdeling door baggeractiviteiten.

Belastings- en onttrekkingsbronnen

Het Schelde-estuarium kent een groot aantal belastingen en onttrekkingen die met enige willekeur te verdelen zijn in externe en interne bronnen (tabel 7).

Tabel 7. Overzicht van de belastings- en onttrekkingsbronnen op het Schelde-estuarium tussen Rupel en Vlissingen.

bron	logistieke indeling	bron	netto belasting(+) en onttrekking(-) van slib [1000 ton/jr.]
extern	rivier	Bovenschede Rupel	+263 FA
		Zijdelings Rupel-grens	+111 FA en + 44 FO
	havens	Antwerps havengebied	-120 FM grove schatting
		Zoommeer	+16 FOA
		Zout-zoet effect	-15 FM
	kanalen	Gent-Terneuzen	+58 FA
		Afwateringsgebied	+22 FOA
	polders	lozingspunten in Nederland	-
	smeerpipen	direkte neerslag	+8 FOA
	atmosfeer	Scheldemonding	restpost balans M(S)
	zee		
intern	baggeren bergings-verandering	bagger- en stortplaatsen	+117 en -187
		geulen, platen, schorren slikken en getijhavens	varieert per vak

Verklaring voor de gebruikte symbolen:

F en M staan voor Fluviatiel en Marien slib

A en O staan voor Anorganisch en Organisch slib

De slibbalans gaat alleen uit van de belastingen en onttrekkingen aangegeven in de vorige tabel. Andere niet aangegeven belastingen en uittrekkingen zijn verwaarloosd omdat ze geen bijdrage aan de balans geven of omdat ze tegen elkaar wegvallen.

De gekozen waarden voor de belastingen en onttrekkingen zijn als volgt te verantwoorden:

a. Slibaanvoer op de Bovenzeeschelde te Rupel

De natuurlijke slibaanvoer op de Bovenschede te Rupel is afkomstig van de "natuurlijke" erosie van landbouwgronden en "kunstmatige" lozingen van industrie en bevolking. De gegevens over de slibaanvoer vanuit België zijn ontleend aan een samenvattende studie van het Belgische Ministerie van Volksgezondheid

naar gesuspendeerde materie in de Schelde [D'Hondt et al 1982]. In deze studie zijn de huishoudelijke-, industriële en natuurlijke bijdragen vanuit België en Frankrijk in beeld gebracht voor elk van de takken van het Scheldebekken. Een deel van de aanvoer bovenstrooms van Rupel wordt door de waterverdeling met de stuwen in België via andere waterwegen afgevoerd. De belangrijkste waterweg hiervan is het kanaal van Gent naar Terneuzen. In de eerdergenoemde studie is voor de huishoudelijke- en industriële bijdrage aan de slibaanvoer uitgegaan van een belasting van 90 g/dag per I.E. De natuurlijke bijdrage door erosie van de landbouwgronden is afgeleid uit troebelheidsmetingen in de riviertjes.

Voor de verdere uitwerking t.b.v. de slibbalans is aangenomen is dat het huishoudelijk - en industrieel slib grofweg de volgende kenmerken heeft (mondelinge informatie van Veldkamp TUD):

	organisch	anorganisch	zuiverbaar
bezinkbaar	40%	20%	80%
zwevend	20%	10%	80 - 100%

De specifieke definities voor "bezinkbaar" en "zwevend" van deze indeling zijn niet bekend.

Het huishoudelijke en industrieële afvalwater bestaat volgens de tabel voor 1/3 deel uit anorganisch materiaal, waarvan 1/3 deel zwevend en 2/3 deel bezinkbaar. Aangenomen is dat de natuurlijke bijdrage van de erosie van de landbouwgronden alleen uit anorganisch materiaal bestaat. In tabel 8 is de hieruit volgende bruto aanvoer van slib bovenstrooms van Rupel gegeven.

Tabel 8. De bruto slibaanvoer bovenstrooms van Rupel [10^3 t/jr].

Bijdrage:	Anorganisch	Organisch	Totaal
Natuurlijk	227	0	227
Huishoudelijk	46	91	137
Industrieel	48	96	144
Zwevend	107	62	169
Bezinkbaar	214	125	339
Totaal	321	187	508

We nemen nu voor de netto toevoer aan dat het organisch bezinkbare en zwevende deel van de slibaanvoer bovenstrooms van Rupel ($125 \cdot 10^3$ t/jr.) grotendeels wordt omgezet in water en CO_2 . Het resterende kleine deel van het organisch effluent blijft achter en wordt naar verwachting afgezet in de bovenstroomse takken als de Zenne en de Durme. We maken verder een aanname voor de zijdelingse afvoer. Uit [eindrapport werkgroep TGWH] is bekend dat gemiddeld ca. $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx 18\%$) van de bovenstroomse wateraanvoer van het Scheldebekken wordt afgevoerd via het kanaal van Gent naar Terneuzen. Aangenomen wordt dat de slibaanvoer op evenredige wijze wordt verdeeld. Een en ander betekent dat bij Rupel netto $263 \cdot 10^3$ ton slib per jaar wordt aangevoerd op de Beneden Zeeschelde en dat via het kanaal van Gent naar Terneuzen $58 \cdot 10^3$ t/jr. wordt aangevoerd naar de Westerschelde.

Uit twee simpele controleberekeningen voor de slibaanvoer te Rupel volgt een zelfde orde van grootte slibvracht:

- Controle 1: Stel dat de slibimport te Rupel deel uitmaakt van de sediment

import die op grond van baggerwerken geschat wordt ca. 0.5 miljoen m³/jaar [Appendix A3]. De waterbodem bevat in dit gedeelte ca. 45% slib. Hieruit volgt een slibaanvoer van $225 \cdot 10^3$ t/jr.

- Controle 2: Stel dat de rivieraafvoer en de slibconcentratie de slibimport te Rupel bepalen. Als verondersteld wordt dat de advectie van slib jaargemiddeld overheerst over de diffusie t.g.v. het getij dan geldt

$Q_s \cdot c_s$ (c_s = gemiddelde slibconcentratie; Q_s = Scheldeafvoer).

Uitgaande van een debiet van 100 m³/s en een slibconcentratie van 100 kg/m³ volgt hieruit een slibaanvoer van $315 \cdot 10^3$ t/jr.

Voor een meer uitgebreide controle wordt verwezen naar bijlage B8.

- b. Rivier - zijdelingse slibaanvoer in de Beneden Zeeschelde tussen Rupel en de grens

De zijdelingse aanvoer langs het riviergedeelte tussen Rupel en de grens is op analoge wijze bepaald als de bovenaanvoer te Rupel. In tabel 9 is een overzicht gegeven van de zijdelingse aanvoer tussen Rupel en de grens.

Tabel 9. De zijdelingse slibaanvoer tussen Rupel en de grens [10^3 t/jr.]:

Bijdrage	Anorganisch	Organisch	Totaal
Natuurlijk	44	0	44
Huishoudelijk	51	103	154
Industrieel	16	31	47
Zwevend	37	44	81
Bezinkbaar	74	90	164
Totaal	111	134	245

De totale zijdelingse aanvoer bestaat uit anorganisch materiaal ($111 \cdot 10^3$ t/jr.) en uit het effluent van het organisch zwevende materiaal ($44 \cdot 10^3$ ton/jr.), dat overigens voor een onbekend deel gezuiverd kan zijn door zelfreinigende werking van de Zeeschelde. De totale zijdelings bijdrage wordt geschat op dus $155 \cdot 10^3$ t/jr. Aangenomen is dat de belasting gelijkmatig verdeeld is over de Zeeschelde tussen Rupel en de grens.

- c. Zoommeer en polders - zijdelingse toevoer op het estuarium stroomafwaarts van Rupel

Het Zoommeer loost vanaf 1987 via het spuikanaal Bath overtollig water op de Westerschelde. Volgens mondelinge informatie van DBW Dordrecht bedraagt het jaargemiddeld spuidebiet ca. 0.5 m³/s. Voor de peil- en chloridebeheersing van het Zoommeer wordt via het Schelde Rijn Kanaal en Zandvliet Sluizen gemiddeld 15 à 20 m³/s geloosd. In totaal wordt ca. 15 à 20 m³/s. geloosd. De slibconcentratie daarvan bedraagt naar schatting 0.03 kg/m³. Hieruit volgt een slibbelasting van $16 \cdot 10^3$ t/jr.

Verder loost 141000 ha poldergebied direct via polderlozingen, en indirect via de kanalen Gent - Terneuzen, Zuid Beveland en Walcheren op het estuarium [Ebbens et al 1980] (zie hoofdstuk 2, figuur 2). Naar schatting wordt ca. 23 m³/s geloosd. Met een zwevende stof gehalte in polderwater van ca. 0.03 Kg/m³ [Del-tadienst 1978] volgt hieruit een slibbelasting van $22 \cdot 10^3$ t/jr. Deze relatief geringe belasting is in het tamelijk centraal gelegen vak 13 van de Westerschelde op de slibbalans gezet. Dit is aanvaardbaar omdat de belasting klein

is en omdat ongeveer de helft van deze polderlozingen via het kanaal Gent - Terneuzen de Westerschelde bereiken. De slibbelastingen van de polders bestaat voor ca. de helft uit biologisch afbreekbaar materiaal. Dit deel van het slib wordt op korte termijn afgebroken in de Westerschelde.

d. Verdere lozingspunten in Nederland

De industrieële en afvalwaterlozingen zijn buiten beschouwing gelaten, omdat deze kleine lozingen veelal gezuiverd zijn.

e. Directe neerslag

De directe neerslag in Zuidwest Nederland bedraagt 600-1000 mm/jr. Het zwevende stof gehalte in neerslag bedraagt 0,02 tot 0,04 Kg/m³ [Pieters 1981]. De belasting door neerslag is berekend op ca. $8 \cdot 10^3$ t/jr. en meegenomen op het centraal gelegen vak 13.

f. Natuurlijke slibaanvoer via de Westerscheldemonding

De mariene slibaanvoer is wegens gebrek aan gegevens niet te schatten. De mariene slibaanvoer is gekozen als de sluitpost in de balans. Deze aanname impliceert ook dat de nauwkeurigheid van de berekende slibtransporten van oost naar west afneemt.

g. Interne onderlinge uitwisselingen door baggereffecten

Bijlage B9 geeft een globaal overzicht van het baggeren, het storten en de zandwinning in het Schelde-estuarium. Veelal levert het baggeren en storten geen bijdrage aan de slibbalans, doordat in vak x wordt gebaggerd en in vak x wordt gestort. Alleen de onderhoudsbaggerwerken waarbij in vak x gebaggerd en in vak y gestort wordt leveren een bijdrage aan de slibbalans (zie Appendix A4). In totaal worden de vakken met netto $117 \cdot 10^3$ t/jr. belast afkomstig uit andere vakken. In totaal is uit de vakken $187 \cdot 10^3$ t/jr. onttrokken.

Voor de slibbalans zijn de resuspensie van slib door baggerwerken in de scheepvaartgeul, zandwinning, specielozingen en onderhoud van de havens niet van belang. Het gaat in deze gevallen om lokale uitwisselingen in één vak. De gebaggerde specie in de havens wordt bijvoorbeeld getransporteerd van de waterbodem in de haven naar de geul direkt buiten de haven en blijft daarmee in hetzelfde vak. De lokale resuspensie in het estuarium bedraagt naar schatting ca. $200 \cdot 10^3$ t/jr.

Ook de effecten van tijdelijke werken zoals de verbreding van het kanaal door Zuid Beveland, waarbij de specie werd geloosd in het Schaar van Valkenisse, zijn niet meegenomen in de slibbalans. Door kanaal en havenwerken (incl. onderhoud) wordt per jaar 4 tot $6 \cdot 10^3$ m³ specie in de Westerschelde gebracht. Deze specie bevat veel slecht erodeerbare klei en veen en kan zodoende niet als sliblast worden aangemerkt.

Aan de Westerschelde wordt ca. $4 \cdot 10^6$ m³/jr. zand onttrokken. Uitgaande van 5% slib in het sediment bedraagt de onttrokken hoeveelheid slib $0,3 \cdot 10^3$ t/jr.

Ook deze hoeveelheid is verwaarloosd.

h. Onttrekking door Antwerps havengebied

Het Antwerps havengebied onttrekt slib aan het systeem door afzetting van slib in de kolken van de zeesluizen gedurende de schutcyclus. Het grootste aandeel hierin hebben de Zandvliet- en Berendrechtsluis. De gegevens over de slibonttrekking door het schutten berusten op globale mondelinge en schriftelijke informatie van Belgische zijde [Gemeenschaps ministerie van het Vlaamse Gewest 1990]. De genoemde getallen varieëren tussen de 40 en $230 \cdot 10^3$ t/jr. Gezien deze ruime spreiding wordt uitgegaan van een gemiddelde waarde van ca. $120 \cdot 10^3$ t/jr.

i. Onttrekking van slib via kanalen stroomafwaarts van de grens

De kanalen onttrekken slib aan de Westerschelde via de dichtheidstromen in de sluiscomplexen, die een scheiding vormen tussen een met zoet water gevuld kanaal en de zoute Westerschelde. Voor de kanalen is aangenomen dat gemiddeld per dag 10 schutkolken volledig uitwisselen met concentratieverschil van 0,03 kg/m³. De onttrekking door totale zoutlast van de scheepvaartsluizen is daarmee geschat op $15 \cdot 10^3$ t/jr.

Invloed van morfologische veranderingen in waterbodem en waterfase
(op het beschikbaar zijn van slib) [zie ook appendix A3]

- Waterbodem Westerschelde

De verandering van de slibberging in de waterbodem van de geulen, platen en slikken is bepaald uit de jaargemiddelde morfologische verandering in de Westerschelde over de periode 1975 - 1985 [Berg et al 1991]. De in figuur 22 weergegeven veranderingen over de periode 1965 - 1985 zijn vooral bedoeld om een beeld te geven van de grootte van de morfologische ontwikkelingen (figuur 22).

De hoeveelheid slib, die sedimenteert of erodeert is daarbij berekend door de optredende morfologische veranderingen te vermenigvuldigen met het slibpercentage van het bodemmateriaal. Verder is verondersteld dat het slibconcentratie constant is gebleven over de beschouwde periode.

Voor de schorren is uitgegaan van een aanslibbing van 1.3 cm/jr. Het Land van Saaftinge is daarbij door haar grootte een extra belangrijke post voor de slibbalans.

Uit de morfologische ontwikkelingen volgt dat de verandering van de water bodem in de Westerschelde een belangrijke post is bij het opstellen van de slibbalans.

- Waterbodem Beneden-Zeeschelde

Van het Belgische gebied de Beneden Zeeschelde is bekend dat enkele decennia geleden baggerwerken de waterbodem stroomafwaarts van Antwerpen aanzienlijk hebben verdiept [Klerk de 1989]. De hoogteligging van de waterbodem bovenstrooms van Antwerpen is daarentegen vrij constant gebleven.

Bij gebrek aan nauwkeurige gegevens is voor dit gebied in de slibbalans aangenomen dat de waterbodem een konstante hoogte heeft gehad. De toevoer van sediment is daarmee gelijk aan de baggeronttrekking. De slibconcentratie van het onttrokken sediment is gelijk aan de slibconcentratie van het gebaggerde sediment [Belmans 1988].

Voor de schorren is uitgegaan van een gemiddelde aanslibbing van 1.3 cm/jr (zie paragraaf 4.2).

- Waterfase

De verandering van de hoeveelheid slib in het water is zo klein dat ze alleen van belang zijn voor de slibtransporten binnen een jaar. Ze blijft daarom buiten beschouwing.

Morfologische veranderingen van de Westerschelde, de plaatgebieden en het Land van Saeftinge over de periode 1965-1985.

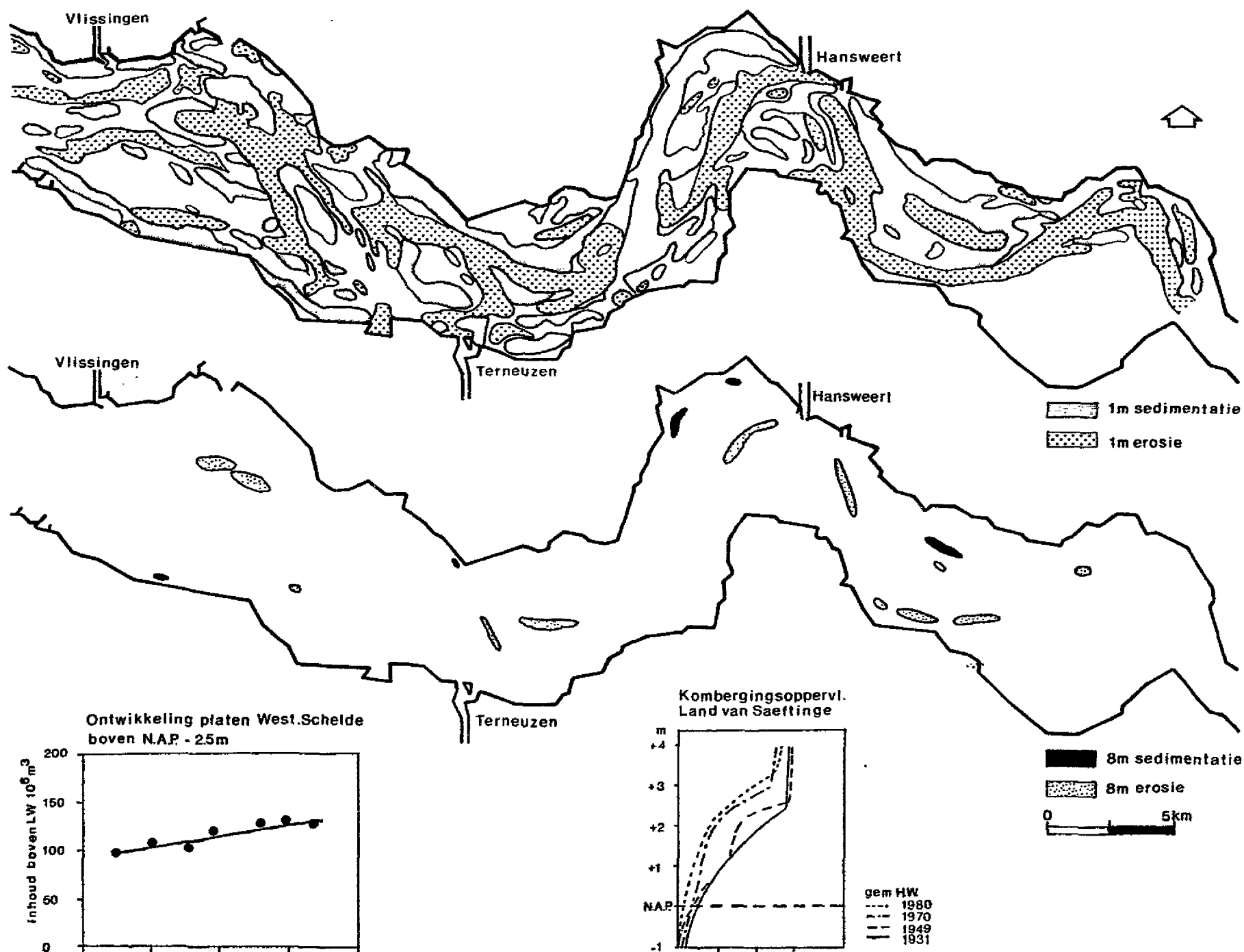


Fig.22

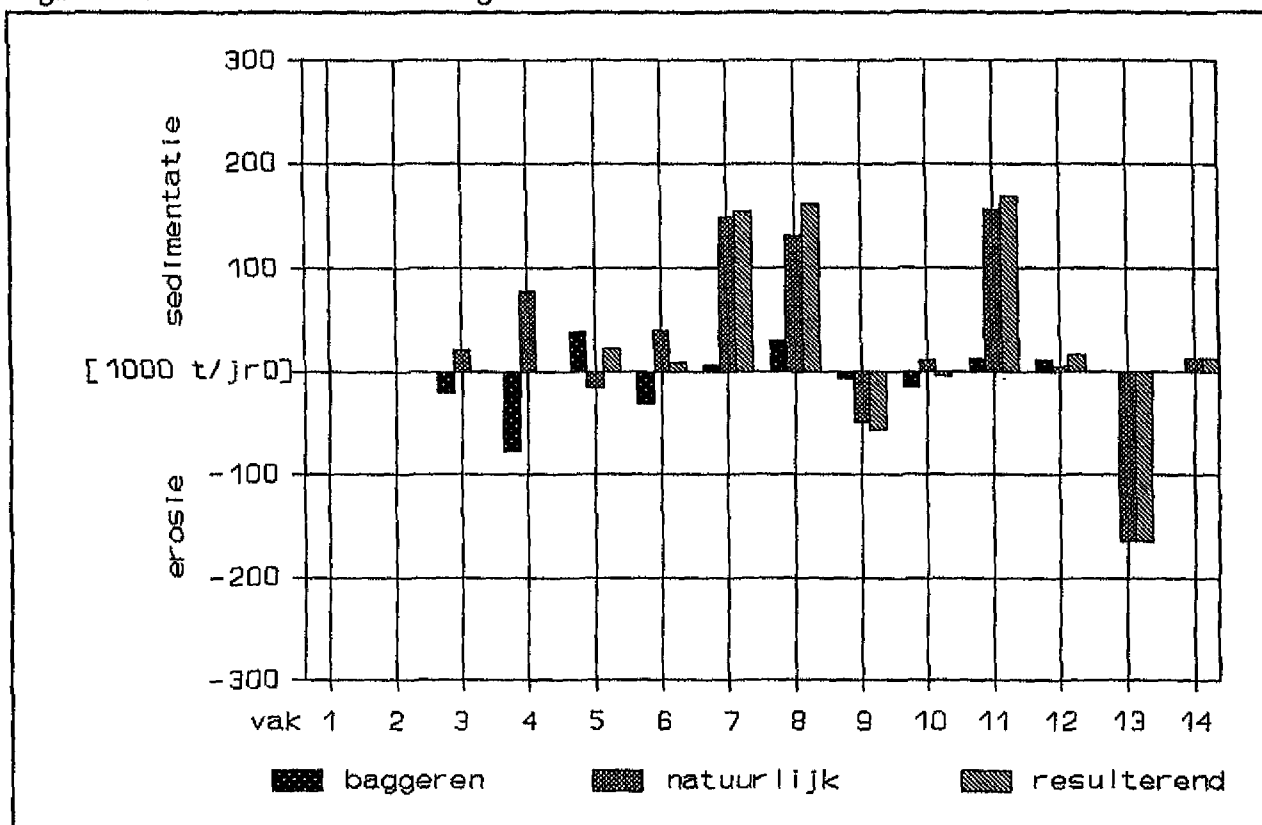
5.3 Berekeningsresultaten netto slibtransporten

Gemiddelde resultaten

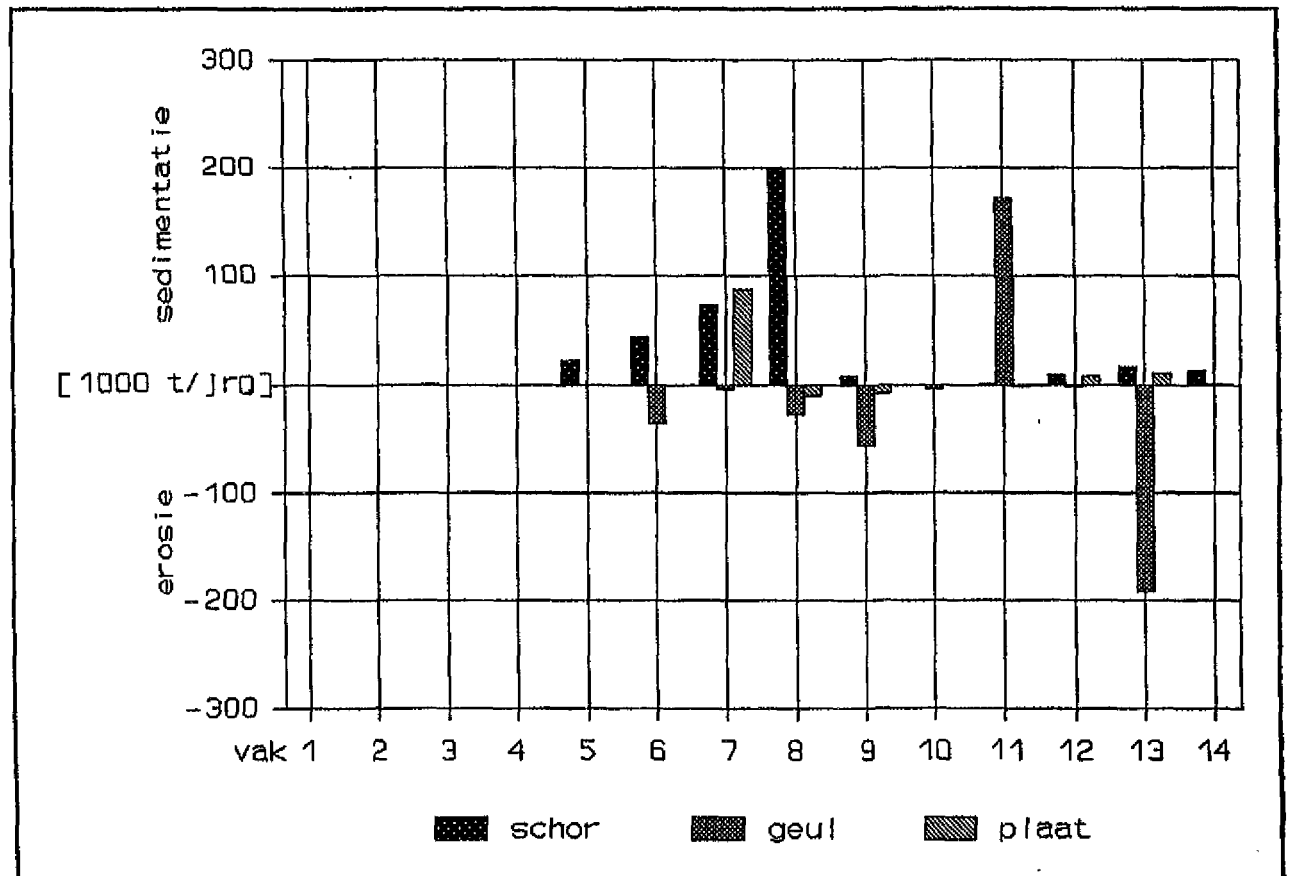
De berekende slibbalans is gegeven in bijlage B10. Deze bijlage bevat de berekende belastingen- en onttrekkingen per vak alsmede de jaargemiddelde netto mariene en fluviatiele slibtransporten voor de vakgrenzen.

De berekeningsresultaten zijn in diverse figuren grafisch weergegeven:

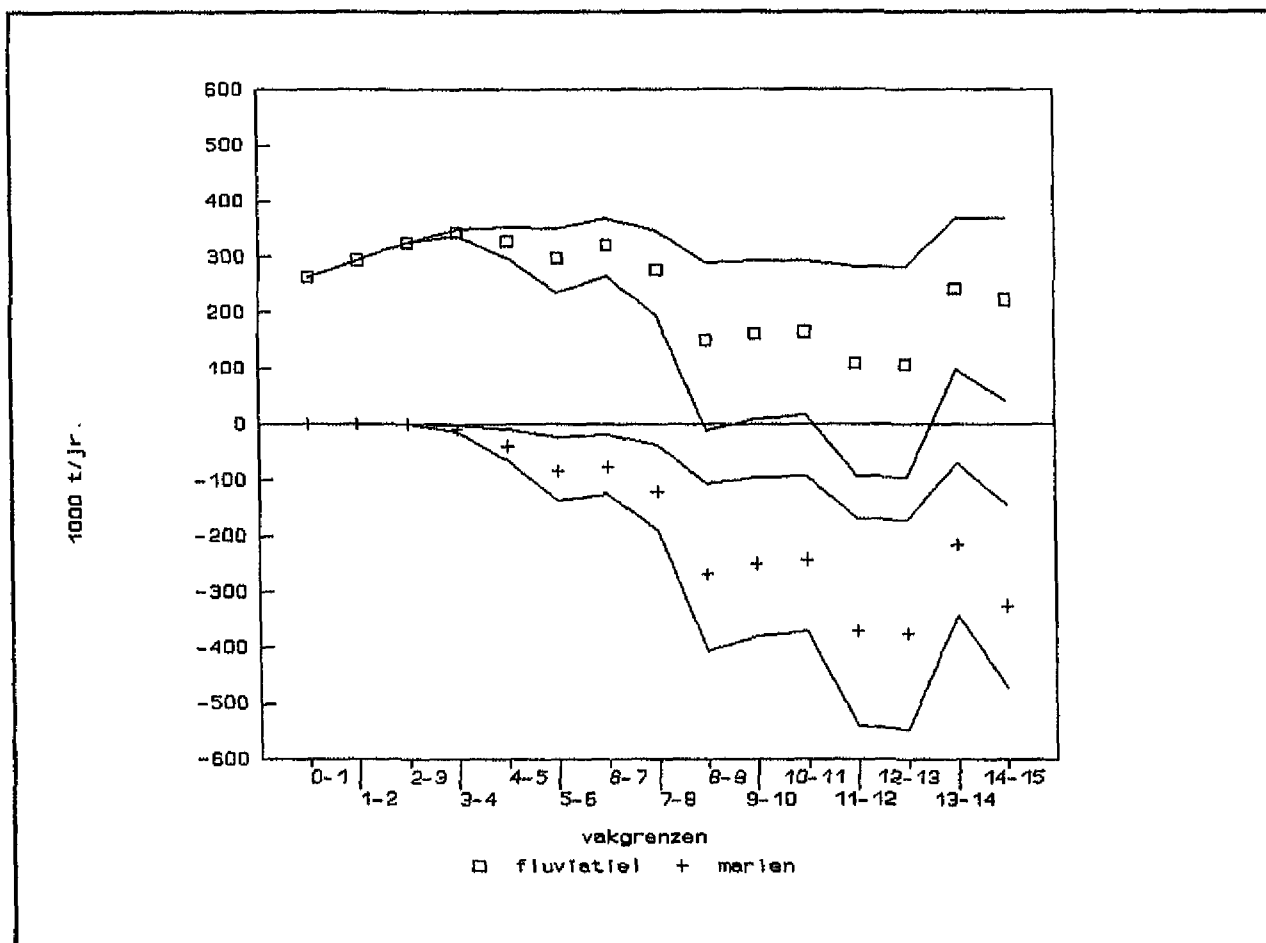
- Figuur 23 bevat de netto erosie en sedimentatie van slib over de vakken.
- Figuur 24 bevat de verdeling van de netto aan- en ontslibbing over schor, en plaat.
- Figuur 25 bevat de netto mariene en fluviatiele slibtransporten op de vakgrenzen met onder- en bovengrenzen.



figuur 23. Netto erosie en sedimentatie van slib door natuurlijk- en kunstmatig slibtransport in het Schelde-estuarium.



figuur 24. Netto aan- en ontslibbing van schorren, geulen en platen in het Schelde-estuarium.



figuur 25. Verwachte netto transporten van de mariene- en fluvia-
 tiële slibtransporten in het Schelde-estuarium
 (met onder- en bovengrenzen).

De band rond de berekende netto slibtransporten in figuur 25 is vooral een gevolg van de spreiding in de tracerwaarden voor 100% marien en 100% fluvia-
 tiel slib (zie paragraaf 4.2). Hieruit volgt dat de resultaten van de slibba-
 lans erg gevoelig zijn voor keuzes omtrent de tracer. Figuur 25. vertoont ten
 westen van de grens een onlogisch beeld, namelijk een toename van de mariene
 transporten. De sterk fluctuerende netto mariene- en fluvia-
 tiel transporten ten westen van de grens zijn vermoedelijk een gevolg van fouten in de gebruik-
 te gegevens.

De belangrijkste resultaten van de slibbalans zijn nog eens samengevat in de
 tabellen 10 en 11:

- Tabel 10 geeft geklusterd voor alle termen in de balans een overzicht
 van de gemiddelde uitwisseling van slib in het hele estuarium. Het subtotaal
 voor totaal slib is nul om de balans sluitend is te maken.
- Tabel 11. geeft een overzicht van de berekende netto slibtransporten op de
 belangrijkste vakgrenzen van het estuarium.

Tabel 10. Gemiddelde uitwisseling van slib in het Schelde-estuarium [10³ ton/jaar].

Bron- en puttermen +=belast./erosie --onttr./sedim.	Netto uitwisseling van slib 10 ³ t/jr.		
	Marien slib	Fluviatiel slib	Totaal slib
(B)elastingen	+237	+522(+476)	+759
(O)nttrekkingen	-61	-209	-270
Totaal1: B+O	+176	+313	+483
Sedimentatie geul	+99	+48	+147
Sedimentatie plaat	+13	+13	+27
Sedimentatie slik	-137	-74	-211
Sedimentatie schor	-208	-177	-385
Totaal2: sediment.	-233	-190	-423
Netto (ba)ggeren	-36	0	-36
Netto (s)torten	-30	+1	-29
Totaal3: ba+s	-66	+1	-65
Subtotaal 1+2+3	-123	+123	0

(+476) aanvoer vanuit België

Tabel 11. Gemiddelde netto slibtransporten op enkele relevante vakgrenzen in het Schelde-estuarium [10³ t/jr.]

	Rupel	grens	zee
netto marien	0	83	324
netto fluv.	263	298	223

Uit "contrôleberekeningen" voor de grens (zie bijlage B8) zijn netto slibtransporten van een zelfde orde van grootte afgeleid.

Een gedeelte van het aangevoerde fluviatiele slib vanuit België (ca. 23%) blijft volgens de balans achter op de Belgische Beneden Zeeschelde. Het grootste gedeelte van het fluviatiele slib wordt door natuurlijke processen getransporteerd over de grens, waarna een aanzienlijk deel in de schorgebieden sedimenteert.

De aangevoerde netto hoeveelheid marien slib komt overeen met ca. 5 promilles van het bruto transport. Het mariene slibtransport over de grens is bij de gedane aannamen vrijwel verwaarloosbaar. Ruim één derde deel van de totale fluviatiele aanvoer wordt via het estuarium richting zee getransporteerd. Deze totale verhouding komt globaal overeen met de geschatte verhouding tussen het door de Bovenschelde aangevoerde zwevende "suspended material load" en de totale slibaanvoer. Dit zou kunnen betekenen dat hoofdzakelijk het zwevende fluviatiele materiaal richting zee wordt getransporteerd.

Gevoeligheidsanalyse

De slibbalans is getest op de invloed van een aantal onzekerheden door een aantal basisgegevens te laten variëren t.o.v. de aangenomen gemiddelde situatie. De erosie en sedimentatie van slib in de morfologische eenheden (exclusief schorren) van de Westerschelde is daarbij niet gevarieerd. Deze gegevens zijn doordat deze gebaseerd zijn op zeer veel meetgegevens gemiddeld veel betrouwbaarder dan de andere basisgegevens.

Voor de basisgegevens zijn de volgende variaties doorerekend:

- A. 50% meer fluviatiele aanvoer uit België
- B. 20% meer baggeren
- C. 50% meer aanslibbing van de schorren
- D. De hoeveelheid sediment, die netto door baggeren aan de Beneden Zeeschelde wordt onttrokken, wordt opgevuld met 100% slib

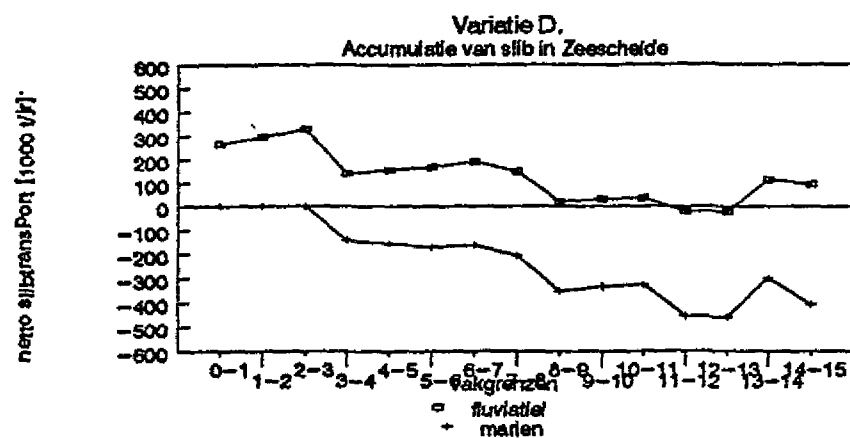
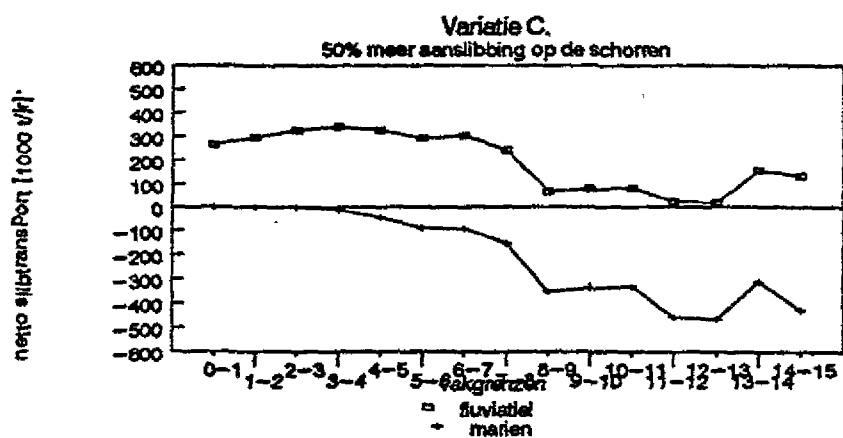
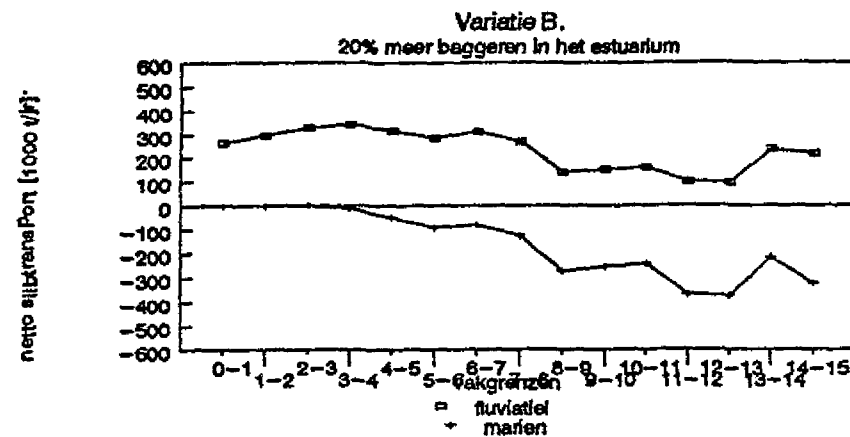
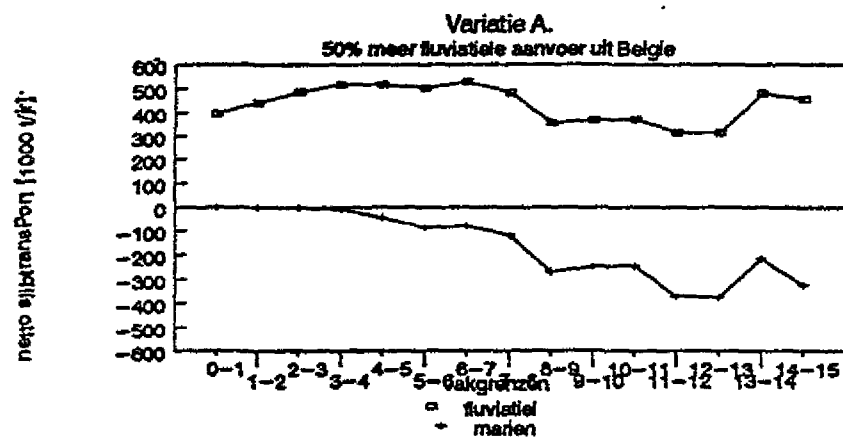
De berekeningsresultaten van deze variaties zijn grafisch weergegeven in figuur 26. Tabel 12 geeft een overzicht van de aldus berekende slibtransporten op enkele markante lokaties.

Tabel 12. Gevoeligheid van de berekende netto slibtransporten in het Schelde estuarium voor variatie van enkele aannamen [10^3 t/jr.]

Berekening	Fluviatiel transport				Marien transport		
	Rupel grens	Hansw.	Zee		Zee	Hansw.	grens
VERWACHTE SITUATIE							
Ondergrens tracer (i)		237	294	369	470	370	135
Gemiddelde	263	298	166	223	324	241	83
Bovengrens tracer (ii)		350	16	42	144	91	22
Spreiding (σ) in i en ii		80	197	231	231	197	80
VARIATIE							
50% meer aanvoer (A)	395	505	373	459	324	241	83
20% meer baggeren (B)	263	284	158	216	324	243	92
50% meer op schor (C)	263	291	81	134	428	330	88
100% opvulling België (D)	263	168	36	93	409	326	168
Spreiding (σ) in A t/m D	66	140	149	164	55	50	40
Totale spreiding (σ) in i, ii en A t/m D	66	115	145	164	116	100	50

De spreiding geïntroduceerd door de tracer $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ is over het algemeen groter dan de spreiding door de onzekerheid in de andere uitgangspunten. Hieruit volgt dat de tracer belangrijk is voor de nauwkeurigheid van de berekende netto slibtransporten. Nader onderzoek hiernaar is nodig. De combinatie van de gemiddelde spreiding door de tracer en de variaties is een maat voor de te verwachten spreiding op de berekende netto slibtransporten.

Figuur 26. Resultaten van de variatie van enkele uitgangspunten voor de netto mariene en fluviatiele slibtransporten in het Schelde–estuarium.



Vergelijking met de resultaten van vroegere berekeningen

De slibhuishouding van de Westerschelde wordt gedomineerd door de toevoer uit België en de toevoer uit zee. Deze toevoeren zijn slecht bekend. Het is daarom interessant om te zien tot welke cijfers andere auteurs komen.

Door diverse onderzoekers zijn in het verleden schattingen verricht voor het slibtransport vanuit België en vanuit zee. Hierbij werd uitgegaan van het totale aangevoerde organische en anorganische materiaal. Om deze transporten te kunnen vergelijken met de berekeningen in het onderliggende rapport is met de aangenomen verhoudingen tussen organisch en anorganisch slib in paragraaf 5.2 het anorganisch deel hiervan geschat. Voor het onderliggende rapport is bij deze vergelijking uitgegaan van de gemiddelde fluviatiele en mariene slibtransporten op enkele markante lokaties. In tabel 13 is een chronologisch overzicht gemaakt van de diverse schattingen.

TABEL 13. Diverse schattingen van het natuurlijke slibtransport in het Schelde-estuarium [10^3 t/jr.]

Legenda: 0 = organisch materiaal
 A = anorganisch materiaal
550 = anorganische deel, is geschat als 0+A zijn gegeven in de literatuur.

Onderzoeker(s)	Methode	Fluviatiel slib			Marien slib	
		Rupel	grens	zee	zee	grens
Wollast et al (O+A) 1980	Transport	970 <u>550</u>	320 <u>180</u>	120 <u>70</u>		
Salomons et al (O+A) 1981	Transport	800 <u>460</u>	340 <u>190</u>	100 <u>60</u>	930	200
Manni (O+A) 1986	Lit. ond.	700 <u>400</u>	560 <u>320</u>	490 <u>280</u>	<500	
Steyaert et al (O+A) 1987	Balans	800 <u>460</u>	350 <u>200</u>	10 <u>10</u>	570	220
Bijlsma et al (O+A) 1988	Balans	800 <u>460</u>	350 <u>200</u>	220 <u>130</u>	380	80
Mulder (A) 1990	Balans	540 <u>540</u>	550 <u>550</u>	-60 <u>-60</u>	+1600	110
gemiddelde waarde (A)		<u>480</u>	<u>270</u>	<u>90</u>	<u>800</u>	<u>150</u>
(spreiding σ)		(60)	(150)	(100)	(490)	(70)
Onderliggend rapport 1991 (A) Balans		<u>260</u>	<u>300</u>	<u>220</u>	<u>320</u>	<u>80</u>
(spreiding σ)		(120)	(160)	(120)	(50)	

Verder zijn door Bakker (1975) en Swart (1983) op grond van metingen van de stroomsnelheid en de slibconcentratie in een raai bij de grens berekeningen gemaakt voor het resttransport door advectie en diffusie op deze lokatie. Deze transporten bedragen orde 600 tot $800 \cdot 10^3$ t/jr. en komen qua orde overeen met de hiervoor vermelde onderzoeksresultaten.

De ranges van de berekende fluviatiele en mariene slibtransporten zijn in het onderliggende rapport over het algemeen kleiner dan de ranges, die de eerdere berekeningen aangeven (tabel 13).

LOKATIE	Range Fluviatiel slib		Range Marien slib	
	BALANS	LITERATUUR	BALANS	LITERATUUR
grens	180 - 420	120 - 420	30 - 130	80 - 220
zee	60 - 380	0 - 200	200 - 440	310 - 1290

De in dit rapport geschatte fluviatiele import te Rupel is lager dan bij de andere onderzoekers uit de tabel doordat aangenomen is dat het organisch deel van het slib bovenstrooms Rupel al is afgebroken en afgezet.

De schattingen voor het fluviatueel slibtransport op de grens vertonen in de tabel de geringste spreiding doordat de onderzoekers veelal uitgaan van de zelfde aanvoer op Belgisch gebied. De schattingen voor het fluviatiele slib naar zee varieëren sterk.

De aanvoer van het marien materiaal varieert meer dan van het fluviatiele materiaal doordat deze schatting in de meeste gevallen een sluitpost is bij de balans-berekeningen. Vrijwel zeker is dat een gedeelte van het mariene slib de grens zal overschrijden, hoewel de spreiding in de gemaakte hoeveelheid ruim is.

De onderhavige schattingen zijn mogelijk van meer betekenis dan de schattingen uit het verleden doordat de berekeningen gebaseerd zijn op veel meer informatie over het estuarium. O.a. zijn naast de externe bron- en puttermen ook de interne bron- en puttermen van het watersysteem duidelijk meegenomen. De uitkomsten blijven echter sterk afhankelijk van de betrouwbaarheid van met name de slibaanvoer vanuit België.

Uit dit rapport volgt dat de betrouwbaarheid van de gekozen tracer $^{12}\text{C}^{13}\text{C}$ en de aannamen over de morfologische veranderingen van de waterbodem van de Beneden Zeeschelde erg belangrijk zijn. Onbevredigend blijft dat er eigenlijk geen goede methode voorhanden is om het netto slibtransport op de overgang naar de zee direkt te schatten. De berekende transporten op de zeerland blijven daarom weinig betrouwbaar.

5.4 Bruto slibtransporten

Methode

De bruto slibtransporten voor de vakgrenzen zijn berekend op basis van het gemiddelde getij-debiet. De slibtransporten door het door de getij-geïnduceerde diffusie van slib en de advectie door de afvoer zijn verwaarloosd.

Het gebruikte getijdebiet is bepaald door het getijvolume te delen door de getijperiode.

In formule vorm:

$$T_b = Q_g \cdot c_g \quad ,$$

waarin:

T = getijgemiddeld brutoslibtransport [t/getij]

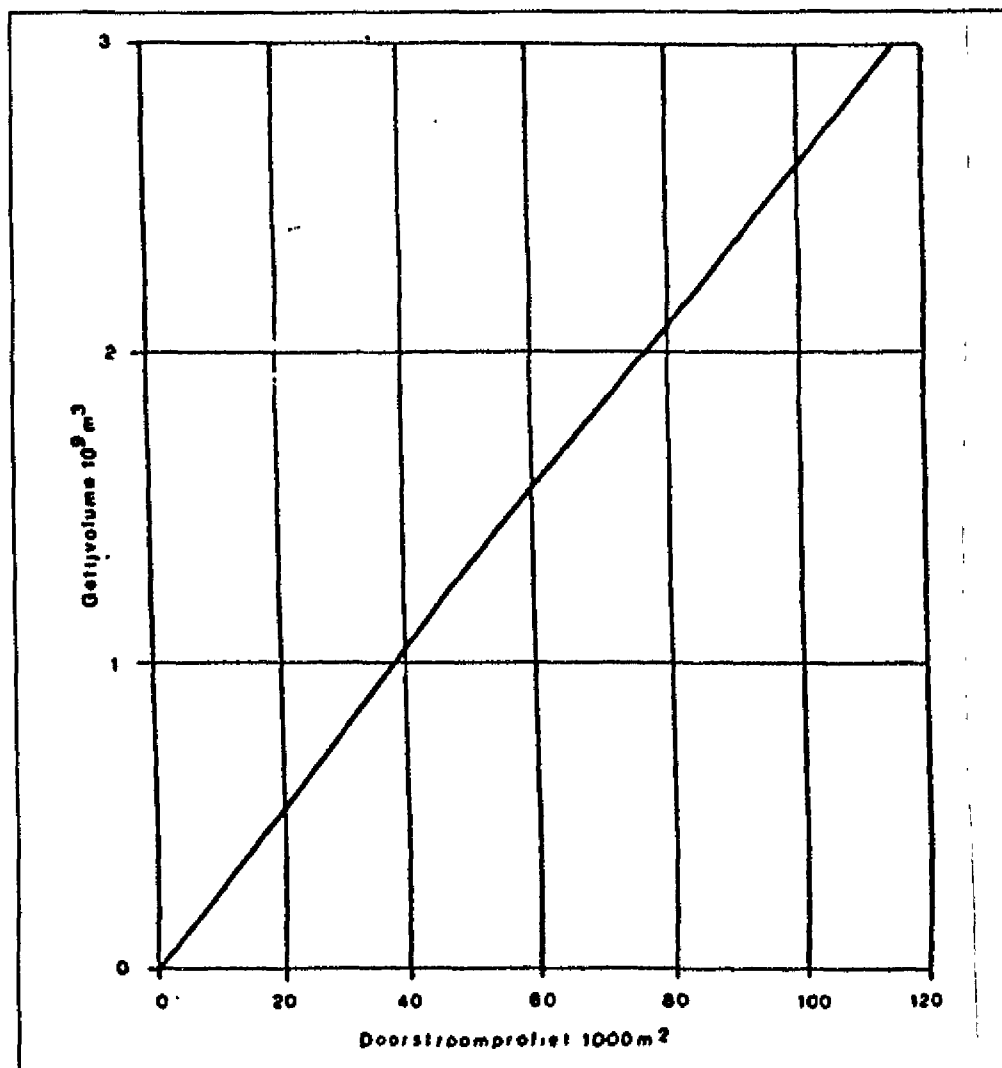
Q_g = gemiddelde getijdebiet [m^3 /getij]

c_g = gemiddelde slibconcentratie [t/ m^3]

Gegevens

De berekeningen van de bruto slibtransporten zijn uitgevoerd met behulp van een aantal gegevens, waarvan de essentie hier wordt behandeld. De numerieke waarden van deze gegevens zijn vermeld in bijlage 11. Verder zijn een aantal gegevens uit de in de vorige paragraaf genoemde bijlagen gebruikt.

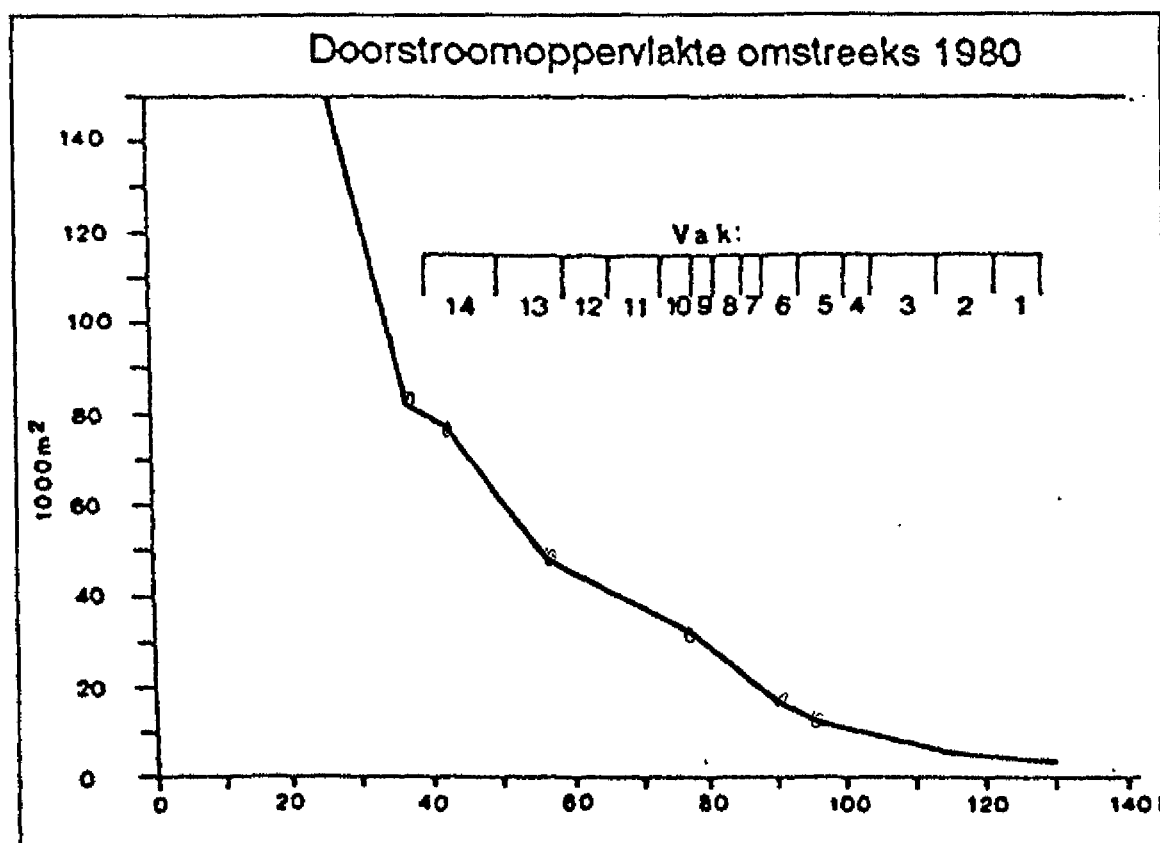
De getijvolumes zijn primair gebaseerd op de debietmetingen in de periode 1981 t/m 1985. De resultaten van deze metingen zijn met de getijfactor ($\approx$ getijamplitude) herleid naar getijgemiddelde omstandigheden. Voor de lokale vakgrenzen, waar geen debietberekeningen beschikbaar zijn, zijn de getijvolumes bepaald uit de empirische relaties tussen tijvolume en doorstroomoppervlakte (figuur 27).



figuur 27. Empirische relatie tussen getijvolume en doorstroomprofiel in het Schelde-estuarium.

Verder is aangenomen dat de Schelde-afvoer verwaarloosd mag worden waardoor het gemiddeld ebdebiet overeenkomt met het gemiddelde vloeddebiet. De fout die hiermee wordt gemaakt is stroomafwaarts van de grens klein en ze wordt verder stroomafwaarts steeds kleiner, doordat de invloed van de Schelde-afvoer op het getij steeds kleiner wordt.

Het natte doorstroomoppervlak op de vakgrenzen is afgeleid uit het verloop van het natte doorstroomoppervlak volgens de raaien waar de debietraaien uitgevoerd (figuur 28).



figuur 28. Verloop van de natte doorsnede op de vakgrenzen in het Schelde-estuarium.

Berekende bruto slibtransporten

De numerieke waarden van de berekende bruto slibtransporten zijn weergegeven in bijlage 11. Deze bijlage bevat de jaargemiddelde, bruto mariene en fluvi-atiele slibtransporten door de vakgrenzen.

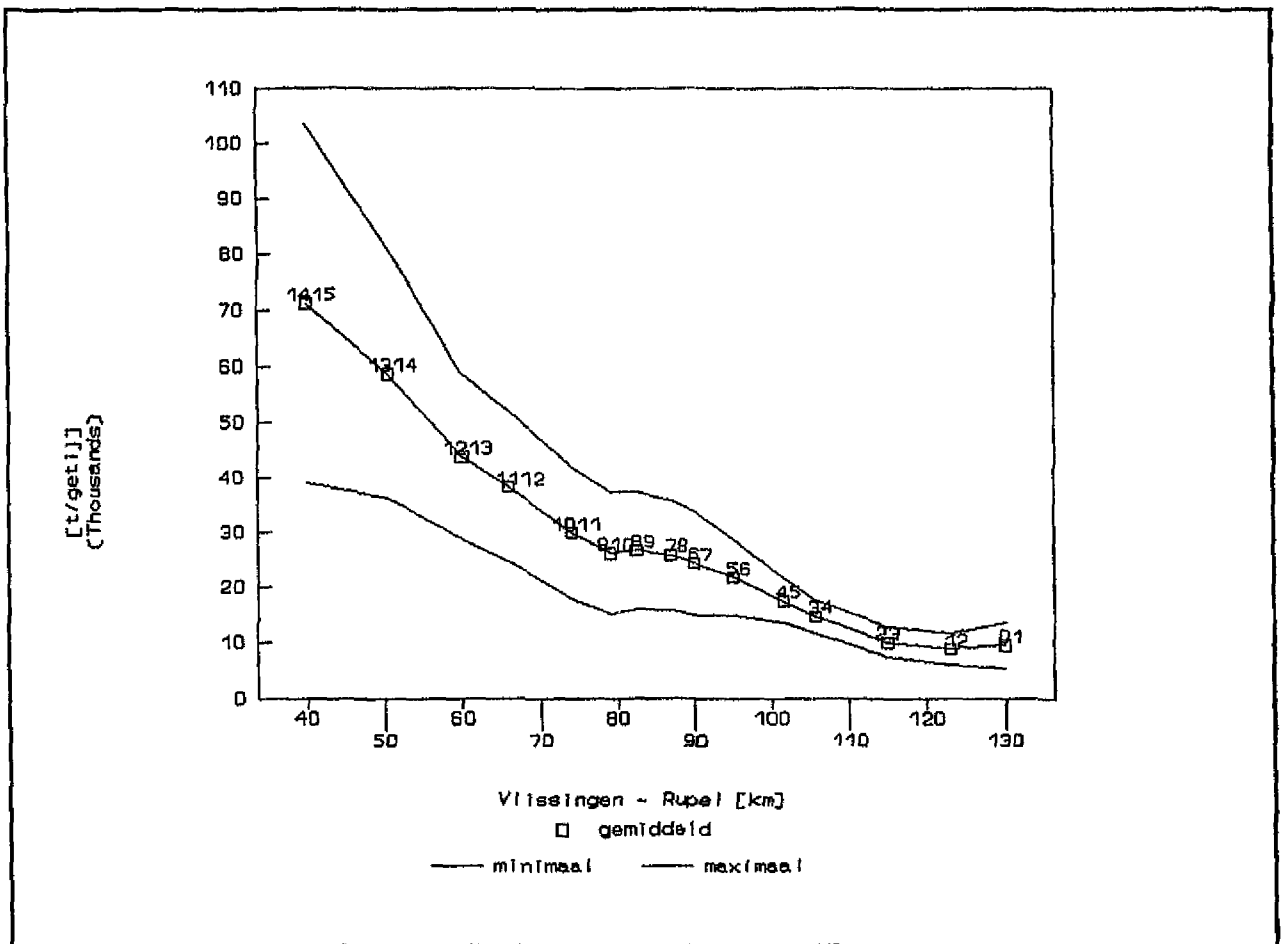
In figuur 29 zijn de berekende bruto transporten grafisch weergegeven.

De bruto slibtransporten door de vakgrenzen bij Rupel, de grens en Vlissingen zijn in bijlage 11 berekend op 10 , 22 en $71 \cdot 10^3$ t/getij. Ook de seizoens variaties zijn aangegeven. De seizoensspreiding van de bruto transporten is bepaald aan de hand van de gemeten seizoensspreiding van de slibconcentraties in de vakken. De vermenigvuldigingscoëfficiënt om uit de jaarcijfers de kwartaalcijfers te bepalen zijn weergegeven in TABEL 14.

TABEL 14

Vermenigvuldigingscoëfficiënt om de bruto slibtransporten voor de opeenvolgende kwartalen te berekenen.

kwartaal	Rupel	Grens	Vlissingen
1	0,6	1,5	1,7
2	1,1	0,9	0,9
3	1,0	0,6	0,5
4	1,3	1,0	1,2



figuur 29 Bruto slibtransporten op de vakgrenzen van het Schelde-estuarium [10^3 t/getij].

Uit de direct gemeten brutotransporten zijn zoals al eerder aangegeven is, geen netto-transporten te berekenen, aangezien de bruto slibtransporten een orde 10^2 à 10^3 groter zijn dan de netto slibtransporten.

Door het bruto transport pendelt ieder getij een grote hoeveelheid slib langs potentiële aanslibbingsgebieden. Aan de randvoorwaarde dat voor aanslibbing slib beschikbaarheid moet zijn wordt in ieder geval dus voldaan.

6. Verticale uitwisseling van slib tussen waterbodem en waterfase [Uit: Langerak 1989.1]

6.1 Inleiding

De slibuitwisseling tussen waterbodem en waterfase is lokaal gezien dominerend voor zowel de biologisch beschikbare fractie aan verontreinigingen als de veranderingen van deze fractie in de tijd.

De gebufferde hoeveelheid slib in de bodem kan nl. bij een hoge uitwisselings-snelheid en een grote buffercapaciteit de pieken in de aangevoerde verontreinigingen volledig egaliseren, waardoor het gehalte in het water vrijwel constant blijft. En bij een langdurige belasting (oplading bodem) en relatief lage uitwisselingssnelheden kan de bodem nog jaren naleveren, waardoor na sanering het gehalte in water nog jaren te hoog blijft. Om deze reden wordt apart aandacht besteed aan de uitwisseling tussen waterbodem en waterfase.

6.2 Schematisatie van de uitwisseling tussen de waterbodem en de waterfase volgens het beleidsplan en volgens het SAWES-model.

De uitwisseling tussen waterbodem en waterfase is zeer complex, waardoor drastische schematisaties nodig zijn om de materie toegankelijk te maken. De uitwisseling is daartoe benaderd met behulp van een zogenaamd 2 en een 3 lagen model. Het eerste model is gebruikt in het beleidsplan en het tweede in de SAWES-studie.

Uitwisseling volgens het 2 lagen model (Beleidsplan)

Voor het Beleidsplan Westerschelde is de slibuitwisseling tussen waterbodem en water benaderd met behulp van een zgn. tweelagenmodel, waarbij onderscheid gemaakt is in natuurlijke en onnatuurlijke oorzaken van uitwisseling.

Met het tweelagenmodel is getracht om de processen in de geulen in te kapselen met verschillende tijdschalen nl. de processen, die diepteveranderingen in termijnen in orde van jaren en in orde van decennia teweegbrengen. Uit het vergelijken van lodingskaarten kon worden opgemaakt dat bij deze termijnen diepteveranderingen behoren van respectievelijk 1 m. en 10 m.

De natuurlijke uitwisseling van de actieve bovenste bodemlaag (de 1 m. dikke laag) met de waterfase is gekwantificeerd door de kleine veranderingen in de bodemhoogte die optreden tussen de twee jaarlijkse lodingen te kwantificeren. Dit uitgangspunt leidt tot een onderschatting van de uitwisseling, wanneer de tijdschaal van de veranderingen veel kleiner is dan 2 jaar. Dit bleek bij een latere analyse inderdaad het geval te zijn (zie drielagenmodel).

De natuurlijke uitwisseling van een daaronder liggende diepe bodemlaag van 9 m. met de waterfase is bepaald door de gemeten geulverplaatsingen te kwantificeren aan de hand van de veranderingen over 5 jaar. Dit uitgangspunt leidt in tegenstelling tot het vorige niet tot een onderschatting doordat de geulverplaatsingen een veel langere tijdschaal hebben dan 5 jaar.

Aangenomen is dat al het slib in de bodem van 1 of 10 m tijdens de omzetting uitwisseld met de waterfase.

De onnatuurlijke slibuitwisseling tussen waterbodem en water is gekwantificeerd aan de hand van het onderhoudsbaggerwerk. Het sediment met ingesloten slib wordt van locaties met onvoldoende vaargeuldiepte weggebaggerd, waarbij 50% of meer van het net opgebaggerde slib weer via overflow uit de beun van de sleepopperzuiger terugstroomt in het water. Het opgebaggerde sediment wordt

elders teruggestort in het estuarium of wordt uit het estuarium onttrokken.

Naast de geulen zijn er andere gebieden die een rol spelen bij de uitwisseling tussen de waterfase en waterbodem. Hiervoor zijn grove aannamen gedaan. De schorren zijn als permanente afzettingsgebied van slib buiten beschouwing gelaten en voor het intergetijdegebied is in het Beleidsplan aangenomen dat per jaar 1 dm netto uitwisselt.

De berekende uitwisselingssnelheden tussen waterbodem en waterfase, de zgn. "VERVERSING", volgens het Beleidsplan Westerschelde, zijn gegeven in tabel 15.

Tabel 15. Natuurlijke en onnatuurlijke uitwisseling van de 1 m. dikke actieve bodemlaag van het Schelde-estuarium volgens het Beleidsplan Westerschelde [100 g/m²/dag]

Gebied	natuurlijk	onnatuurlijk
Beneden Zeeschelde	1.9	2.0
Westerschelde oost	1.2	0.4
Westerschelde west	1.3	<0.1
Totale estuarium	1.3	0.3

De natuurlijke uitwisselingssnelheid van de dieper gelegen 9 m dikke laag blijkt minstens één orde kleiner te zijn en is daarmee niet van belang.

Uitwisseling volgens het 3-lagenmodel (SAWES-model)

Voor het SAWES model is de slibuitwisseling tussen de waterbodem en de waterfase benaderd met een drielagen model. Het tweelagenmodel is daarbij omgezet naar een drielagenmodel door het toevoegen van een grenslaag op de overgang tussen waterbodem en waterfase. Het model bestaat daarmee uit een dynamische toplaag van 1 mm., een actieve laag en een diepe laag. De actieve laag is een 0.5 m. dik, waardoor de diepere bodemlaag 9.5 m. dik geworden is.

De dynamische toplaag van ± 1 mm dik, die vrijwel geheel uit slib bestaat, is normaliter in suspensie. Zo wordt in dit denkmodel alleen tijdens de kentering afgezet wordt ze bij toenemende snelheid weer volledig geërodeerd [appendix A5]. De toplaag van zuiver slib ontstaat doordat bij kentering door het verschil in valsnelheid eerst na het zand op de waterbodem wordt afgezet en daarna het slib. Na de kentering wordt de sliblaag het eerst weer geresuspendeerd, zodat dit materiaal feitelijk blijft behoren bij de waterfase. Hierdoor hoort "ongeacht" de getijfase, steeds eenzelfde hoeveelheid slib tot de waterfase. Alleen bij kentering wordt ze tijdelijk als een dun laagje puur slib op de bodem afgezet.

Dit materiaal is overigens ook betrokken bij de uitwisseling van de actieve bodemlaag via de doodtij-springtij cyclus. Als de schuifspanningssnelheid langs de geulbodem namelijk groter wordt, zoals tijdens een springtij, is meer materiaal uit de actieve laag toegevoegd aan dit dunne laagje slib.

6.3 Gebruikte gegevens

Dikte en uitwisselingssnelheid van de actieve bodemlaag bij het drie lagen model

De geulen en platen van het Westerschelde-estuarium zijn voor een belangrijk deel bedekt met bewegende ribbels en onderwaterduinen. Aangenomen is dat deze ribbels en duinen de dikte en uitwisselingssnelheid van de actieve bodemlaag bepalen.

De beweging van de ribbels en duinen vindt plaats doordat netto over het getij aan de ene zijde van de ribbel zand wordt opgenomen en aan de andere zijde van de ribbel zand wordt afgezet. Het bodemmateriaal komt tijdens dit proces intensief in aanraking met de waterfase.

Voor de laagdikte en uitwisselingssnelheid van de actieve laag wordt verondersteld dat bij de verplaatsing van een ribbel over zijn lengte een bodemlaag van de halve ribbelhoogte wordt omgewoeld. De uitwisseling tussen waterbodem en water volgt dan direkt uit de verplaatsingsnelheid van de maatgevende ribbel.

Uit metingen is weinig bekend over de ribbelhoogten, -lengten en -snelheden in de Westerschelde. Uit het weinige onderzoek blijkt dat:

- De ribbelhoogte te bepalen min of meer evenredig is met de waterdiepte te ribbelhoogte. Uit het sonaronderzoek in de geulen volgt dat bij een gemiddeld estuarium van 10 m de ribbels een hoogte heeft in de orde van 1 m. wordt de maatgevende ribbelhoogte geschat op ca. 1 m.
- De maatgevende ribbellengte te bepalen is uit de verhouding lengte/hoogte. Uit de resultaten van sonaropnamen volgt dat een verhouding van 1:25. Op basis van deze gegevens wordt voor een maatgevende hoogte van 1 m een bijbehorende lengte van 25 m. aangenomen.
- De maatgevende snelheid is bepaald door te veronderstellen dat de ribbelhoogte onafhankelijk is van het bodemtransport. De ribbels verplaatsen zich dan qua snelheid omgekeerd evenredig met de ribbelhoogte.

Met deze aanname zijn enkele uit onderzoek vd. Berg gemeten ribbelsnelheden omgerekend naar geschatte waarden voor de aangenomen maatgevende ribbelhoogte in de Westerschelde

Tabel 16. Ribbelsnelheden in de Westerschelde, genormeerd voor een ribbelhoogte van 1 m.

Onderzoeks- gebied	gemeten ribbelhoogte	omrekenings factor	gemeten ribbelsnelheid	omgerekende ribbelsnelheid
Oosterschelde	0,90 m	0,90/1,0	0,15 m/d	0,135 m/d
Ossenisse ZS	0,16 m	0,16/1,0	0,80 m/d	0,13 m/d
Ossenisse LS	0,27 m	0,27/1,0	2,30 m/d	0,62 m/d

ZS betekent zeestelling; LS betekent landstelling

Bij van een aangenomen ribbelsnelheid van 0,13 m/d. bedraagt de verplaatsingsduur 192 dagen. Hieruit is afgeleid dat de actieve bodemlaag van 0,5 m. één keer per half jaar uitwisselt met het water.

De aangenomen dikte en uitwisselingssnelheid veroorzaakt wezenlijke veranderingen tot het Beleidsplan. Doordat de uitwisselingssnelheid 4 keer zo groot en de buffer 2 keer zo klein is als bij het 2 lagensysteem volgen de veront-

reinigingen in de actieve bodemlaag de lokale concentratie in het water met een kleine tijdsverschuiving.

Deze hogere omzetsnelheid betekent niet, dat de waterbodem van het hele estuarium na sanering van de Belgische lozingen veel sneller schoon is. De toevoer van schoon slib naar het estuarium, die voor de feitelijke verbetering van de waterkwaliteit moet zorgen is namelijk maar erg klein t.o.v. de gebufferde hoeveelheid in de waterbodem. Doordat de slibmassa die betrokken is bij resuspensie en sedimentatie 5 x zo groot is als de natuurlijke en kunstmatige toevoer blijft de toevoer/buffer grootte verhouding maatgevend. Deze stelling wordt toegelicht aan de hand van enkele eenvoudige sommen voor de reinigingsduur van de actieve bodemlaag en de uitwisseling van de diepe bodemlaag:

Reinigingsduur actieve bodemlaag

Om de verblijftijd (reinigingsduur) van het verontreinigde slib te bepalen is het Schelde-estuarium of de Schelde-rivier geschematiseerd tot een reservoir, dat volledig gevuld is met slib, waarin de netto afvoer naar zee en de zijdelingse onttrekking in evenwicht is met de netto toevoer uit de rivier.

Er zijn nu 2 mogelijkheden:

1. Schoon en vuil slib mengen niet en er wordt alleen schoon slib toegevoerd en vuil slib afgevoerd. In de reactor chemie wordt dit aangeduid als propstrooming. In formule vorm : $t = M/T$ (1), waarin
 t = tijd voor volledige reiniging
 M = de slibmassa in het reservoir
 T = de netto toevoer door de rivier

2. Schoon en vuil slib mengen perfect en er wordt een mengsel van vuil en schoon slib afgevoerd. In de reactor chemie wordt dit aangeduid als perfecte menger. In formule vorm: $M \cdot dM_p/dt = T \cdot M_p$ (2), waarin
 M_p = percentage vuil slib

Deze vergelijking heeft als oplossing: $M_p = e^{(-T/M)t}$ (3)

Met de vergelijkingen (1) en (3) is een eerste schatting gemaakt van de responsie tijd van de actieve bovenlaag in het estuarium. Hierbij zijn met de volgende uitgangspunten gehanteerd.

- De 0,5 m. dikke actieve bodemlaag bevat een slibmassa van orde 10^{10} kg.
- De natuurlijke en kunstmatige onttrekkingen bedragen orde 10^9 kg/j.

De berekende responsietijden van de actieve bodemlaag voor verschillende reinigingsgraden zijn vermeld in tabel 17.

Tabel 17. Responsietijden van een propstrooming en een perfecte menger bij verschillende reinigingsgraden.

Reinigingsgraad	Propstrooming	perfecte menger
63%	-	20 jaar
87%	-	25 jaar
ca. 100%	20 jaar	40 jaar

Een estuarien systeem lijkt meer op een perfecte menger dan op een propstrooming, zodat de reinigingsduur van de actieve bodemlaag geschat kan worden op 20 tot 40 jaar. Voor de afzonderlijke gebieden Beneden Zeeschelde, Oostelijk deel Westerschelde en Westelijk deel Westerschelde gelden wat afwijkende waarden.

Uitwisseling diepe bodemlaag

De natuurlijke uitwisseling van de diepe bodemlaag met de waterfase is alleen van belang in gebieden van de Westerschelde waar sprake is van "meandering". De diepe bodemlaag wisselt dan uit met de actieve bodemlaag door uitbochting van geulen [Beleidsplan Westerschelde, 1989]. De uitbochting ontstaat doordat de geul aan de buitenbocht erodeert en aan de binnenbocht sedimenteert. Aan de binnenbocht wordt dus telkens vervuild slib opgeslagen en aan de buitenbocht erodeert vers minder verontreinigd bodemmateriaal. Het proces van uitbochten eindigt op een bepaald moment als er een nieuwe geul ontstaat die de oude opruimt. Het vervuilde slib kan pas bij hernieuwde aansnijding van de oude bocht weer vrij komen.

De uitwisseling met de 9.5 m. dikke diepe onderlaag vindt in dit denkmodel plaats op basis van first in en last out. Op basis van een tijdschaal van 10 à 20 jaar vooruit betekent dit primair voor de Westerschelde dat de diepe laag vervuild slib ontvangt en schoon slib afgeeft.

De responsietijd van de diepe laag is veel groter dan van de actieve laag. Er worden responsietijden van orde 500 jaar verwacht.

Door de lange responsieduur van het systeem (nu nog geen volledige vervuiling!) zal er nog jaren vervuild slib ingenomen kunnen worden en schoon slib door de diepe bodemlaag afgegeven kunnen worden.

Bij gelijkblijvend gedrag zal per jaar max. $0,3 \cdot 10^9$ kg vervuild slib afgegeven worden aan de diepe laag en $0,1 \cdot 10^9$ kg. schoner slib opgenomen worden.

6.4 Resultaten

In het 2-lagenmodel wordt de verticale uitwisseling gedurende ieder getij en de seizoenale invloeden op de uitwisseling duidelijk onderschat. Verder zijn de omwoeleffecten van het baggeren verwaarloosd.

Het 2 lagenmodel gaat uit van de gemeten diepteveranderingen, waarbij korte termijn veranderingen worden gekonstateerd over grote oppervlakten (dit is de actieve laag genoemd) en lange termijn veranderingen door het meanderen van de geulen (dit is de diepe bodemlaag genoemd).

Met dit model wordt een omzetting van de hoeveelheid slib in de waterbodem, berekend die gedefinieerd is als het verschil tussen 2 vrij willekeurige opnamen. De periode tussen deze opnamen bedraagt orde enkele jaren. De berekeningsresultaten geven een ondergrens voor de verticale uitwisseling, doordat de bed vormende processen sneller verlopen.

In het drielagen model zijn de snellere processen wel opgenomen.

De uitwisselingssnelheid tussen de actieve bovenlaag en het water is hierdoor in het 3-lagenmodel verviervoudigd t.o.v. het 2 lagen model. En de laagdikte is op basis van metingen verkleind is tot 0,5 m.

In tabel 18 worden cijfers gegeven voor de uitwisseling van slib volgens beide modellen. Het eerste cijfer is volgens het concept van het 2 lagen systeem en het tweede (de onderstreepte) volgens het concept van het voor het 3 lagen systeem. In het drielagen model is ook het omwoelen door baggeren betrokken.

Tabel 18. Uitwisseling van slib tussen de diverse lagen voor de verschillende gebieden in het Schelde-estuarium

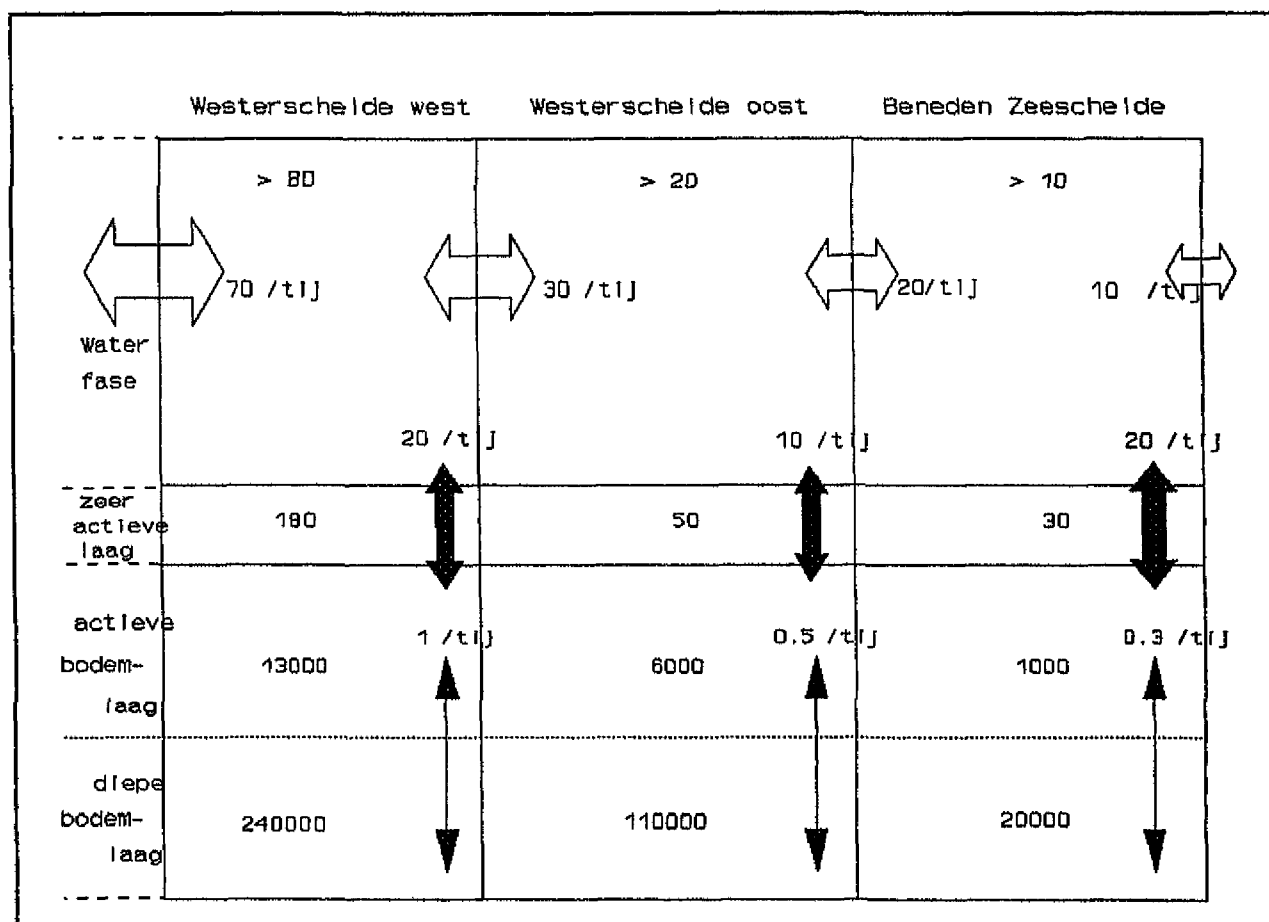
Gebied	Uitwisseling tussen waterfase en actieve laag [100 g/m ² /dag]	Uitwisseling tussen actieve laag en diepe laag [100 g/m ² /dag]
Beneden Zeeschelde	1.9 tot <u>24.8</u>	<0.2 tot <u>0.6</u>
Westerschelde Oost	1.2 tot <u>8.0</u>	<u>≤0.1</u>
Westerschelde West	1.3 tot <u>3.5</u>	<u>≤0.1</u>

De onderstreepte waarden worden het meest waarschijnlijk geacht. In deze waarden is voor de actieve laag een resuspentie factor i.v.m. omwoelen door baggeren verwerkte van achtereenvolgens 5.8, 2.6 en 1.0.

De berekende uitwisselingssnelheid geldt voor marien en fluviatiel slib samen. De afzonderlijke uitwisseling van marien en fluviatiel slib met de waterbodem is te bepalen a.d.h.v. de lokale verhouding marien/fluviatiel slib.

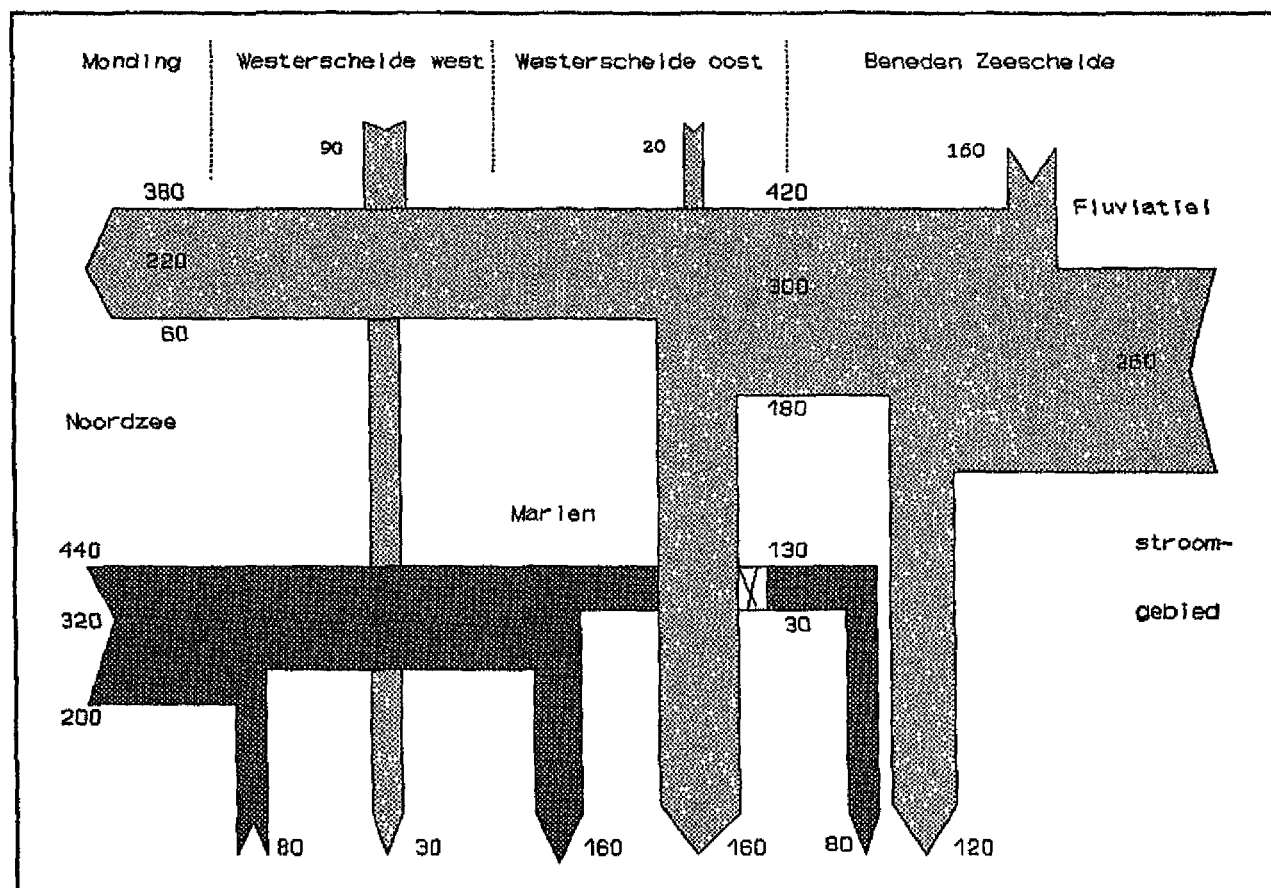
7. Samenvatting horizontale en verticale uitwisseling van slib

Samenvatting van de studieresultaten uit hoofdstuk 4, 5 en 6



Figuur 30. Bulkhoeveelheden aan slib in waterbodem en waterfase en de bruto horizontale- en verticale uitwisseling van slib in het Schelde-estuarium [10^3 ton].

De hoeveelheden slib in het water zijn zeer gering vergeleken met de hoeveelheden in de waterbodem. Toch vindt er een relatief grote uitwisseling plaats tussen de bodemlagen en het water. De "zeer actieve" mm's dunne top van de bodemlaag wisselt 2* per getij uit, de iets dieper gelegen "actieve" bodemlaag naar schatting 2* per jaar en de deca m's dikke diepe bodemlaag wisselt naar schatting orde van 1* per eeuw of meer uit (zie hoofdstuk 5). De uitwisseling van de "actieve" bodemlaag is het grootst en wordt bovendien beïnvloed door baggerwerken. Naast de uitwisseling met de bodem is er een horizontale uitwisseling door het getij. Door het getij pendelt er slib in suspensie continue heen en weer langs de getijweg. Deze slibvracht is het grootst in het westelijk deel van het estuarium. Dit in tegenstelling tot de verticale uitwisseling die het sterkst is in het oosten. Relatief gezien wordt de horizontale uitwisseling naar het westen toe groter, terwijl de verticale uitwisseling naar het oosten toe groter wordt. Naast de horizontale uitwisseling in de lengterichting van het estuarium vindt er ook een sterke horizontale uitwisseling in de breedte richting van het estuarium plaats. Het saldo van alle horizontale en verticale uitwisselingsprocessen is het zogenaamde netto transport. Het netto transport van het aangevoerde mariene en fluviatiele slib is weergegeven in figuur 31.



Figuur 31. Netto slibtransporten in het Schelde-estuarium [10^3 t/jr.]

Uit figuur 31 blijkt dat het fluviatiele slib, aangevoerd vanuit België, naar schatting voor één derde deel sedimenteert in de Beneden Zeeschelde, voor één derde deel sedimenteert in het oostelijk deel van de Westerschelde. Ruim éénderde deel van dit slib wordt naar zee getransporteerd. Vanuit zee wordt marien slib aangevoerd dat naar schatting voor de helft in het oostelijk deel van de Westerschelde sedimenteert.

Het aandeel dat de morfologische eenheden door natuurlijke sedimentatie en erosie onder invloed van baggeren hebben op deze netto slibtransporten is berekend in bijlage 10 en samengevat weergegeven in tabel 20.

Tabel 20. Netto sedimentatie en erosie van slib in de morfologische eenheden incl. baggereffekten voor de hoofdgebieden van het Schelde-estuarium [10^3 t/jr.]

Morfologische eenheid	Beneden Zeeschelde	Westerschelde oost	Westerschelde west
geul	-	+126	+22
plaat	-	+ 15	+11
slik	-	-142	-69
schor	-23	-323	-38
baggeren	-60	+18	-24
--=sedimentatie; +=erosie			

Het meeste slib dat aangevoerd wordt, wordt zoals al eerder aangegeven onttrokken aan het actieve deel van het estuarium door sedimentatie op de slik en schorren-gebieden in het oostelijk deel van de Westerschelde. Opvallend is ook het aandeel door erosie van de geulen in ditzelfde gebied. Het baggeren heeft vooral invloed in de Belgische Beneden Zeeschelde.

De actieve waterbodem van het estuarium bevat een zeer grote hoeveelheid morfologisch beschikbaar slib. De uitwisseling van slib in het estuarium vindt dan ook veelal plaats met het slib dat aanwezig is in de waterbodem.

De hoeveelheid marien en fluviatiel slib in de waterbodem is ongelijkmatig verdeeld over de onderscheiden morfologische eenheden van het watersysteem. De procentuele verdeling hiervan die ontleend is aan hoofdstuk 4 wordt weergegeven in tabel 19 voor de gebieden Beneden Zeeschelde, oostelijke deel- en westelijk deel van de Westerschelde.

Tabel 19. Procentuele verdeling van de bulkhoeveelheid slib over de morfologische eenheden in het Schelde-estuarium, geklusterd voor de 3 hoofdgebieden [%].

Gebied	Beneden Zeeschelde		Westerschelde oost		Westerschelde west	
	fluv	mar	fluv	mar	fluv	mar
1. Geulen	<u>31</u>	21	5	5	7	<u>27</u>
2. Slikken	-	-	16	18	3	11
3. Platen	-	-	1	1	3	11
24. Havens	0	0	1	2	3	16
5. (*)	-	-	2	2	3	12
Schorren	12	8	<u>23</u>	<u>26</u>	1	3
* Overig intergetijdegebied <u>18</u> Maatgevende morfologische eenheid						

De Beneden Zeeschelde bevat veelal slib van fluviatiële oorsprong. Dit slib is veelal gebufferd in de geul. In het oostelijk deel van de Westerschelde bevatten de schorren veelal slib dat zowel fluviatiële als mariene herkomst is. Dit gebied is een overgangsgebied naar meer mariene omstandigheden. Het westelijk deel van de Westerschelde is hoofdzakelijk marien en heeft het meeste slib is in de geulen gebufferd.

Naast een verdeling van het slib over het estuarium oppervlak is er ook een verdeling naar diepte te maken, waarbij achtereenvolgens een "zeer actieve" laag (dikte ca. 1 mm), een "actieve" laag (dikte 0.5 m.) en een "diepe" laag (dikte 9.5 m.) onderscheiden worden. De verdeling van de totale hoeveelheid gebufferd slib over de "diepe" bodemlaag, "actieve" bodemlaag, "zeer actieve" bodemlaag en de waterfase is weergegeven in figuur 30 in 10^3 ton. In deze figuur zijn tevens de bruto horizontale- en verticale uitwisselingen aangegeven, zoals berekend in hoofdstuk 5 en 6. Deze uitwisselingen zijn aangegeven in 10^3 ton/tij.

8. Ervaringen met de 1D en 2DH slibtransportmodellen

8.1 modelbeschrijving

Er is behoefte aan slibtransportmodellen die in staat zijn om de processen te simuleren en zo voorspellingen te doen voor een veranderde situatie. Het slibtransportmodel dat aan de primaire fysische en morfologische eisen voldoet bestaat echter nog niet!

2

Voor estuariene systemen zijn er twee Nederlandse slibtransportmodellen ontwikkeld, die zijn toegepast voor het Scheldeestuarium:

1D SLITRA

SLITRA is een bestaand wiskundig fysisch één-dimensionaal (onvertakt) slibtransport model, waarbij de concentraties van fijn sediment worden berekend volgens een een advectie-diffusie vergelijking waarin erosie en sedimentatie-termen zijn opgenomen. Een voordeel is dat uitgegaan is van de bodemschuifspanning door getijstroom en golven. Een nadeel van dit model is dat wordt uitgegaan van onbeperkte beschikbaarheid van slib.

Het model heeft een zgn. open achterrand, waardoor de invloed van een rivier kan worden meegenomen. Het Scheldeestuarium is geschematiseerd in 20 vakken van 5 km. lengte van Rupel tot Vlissingen.

Het Nederlandse deel is gebaseerd op een geometrie uit 1981 en het Belgische deel is gebaseerd op de bodemligging uit 1969. De laatste situatie is sterk verouderd omdat na 1970 door baggerwerken het volume met ca. 20% is toegenomen. De komberging in het model is geschat uit de oppervakte-diepte relaties [Bollebakker], met als bergend gebied het gebied boven $\geq$ NAP -3 m. De gebruikte weergave van het gebied maakt van het estuarium een breed recht kanaal met afnemend profieloppervakte van west naar oost en zijdelingse berging. Hierdoor wordt het estuarium sterk vertakend.

Als randvoorwaarde en coëfficiënten zijn gegeven een gemiddeld getij te Vlissingen, de dispersiecoëfficiënten volgens VEDWAM, Chezy-waarden volgens ervaringen met het IMPLIC model en als golf- en windklimaat de jaargemiddelde golfhoogte en wind te Vlissingen. De afvoer van de Schelde is in eerste instantie verwaarloosd.

Met het model zijn 4 getij-perioden doorgerekend met tijdstappen van 5 minuten, waarbij de berekening van de concentraties na 2 getijperioden is gestart.

Als beginvoorwaarde voor de simulatie is uitgegaan van de sedimentatiegegevens voor slib op grond van ervaringen in Westerschelde en Oosterschelde en de jaargemiddelde slibconcentraties.

2DH DELWAO

2DH DELWAO is een model in ontwikkeling. Het is een dieptegemiddeld twee dimensionaal slibtransportmodel wat de slibconcentraties simuleert voor het gebied tussen de westerscheldemonding en de grens. Het model bestaat uit drie onderdelen, een golfmodel, een waterbewegingsmodel en een transportmodel. In het model is een sedimenttransportmodule gekoppeld aan een hydrodynamisch model (WAQUA) en een golfmodel (HISWA). Het model beschrijft de advectie, diffusie en erosie/sedimentatie van slib uitgaande van de erosie sedimentatie formulering van Krone en Partheniades. Bij de berekeningen wordt verondersteld dat de morfologisch veranderingen in eerste instatie verwaarloosbaar zijn. Met dit model zijn simulaties uitgevoerd voor het verloop van de slibconcentratie, de invloed van golven en de sedimentatie van fluviatiel slib in de Westerschelde.

De hydrodynamica is gebaseerd op een simulatie van 2 getijperioden voor een 5%

hogere getij-amplitude dan de gemiddelde waarde (maatgevend morfologisch getij. De golfinvloed is gebaseerd op 4 dominantie windrichtingen met de bijbehorende gemiddelde windsnelheid.

De basisgegevens voor het sediment transport gedeelte zijn gebaseerd op de informatie over de morfologische eenheden, zoals beschreven in hoofdstuk 4.

8.2 Berekeningsresultaten

1D SLITRA

De berekende getijamplitude, stroomsnelheden, waterstanden en debieten zijn vergeleken met metingen. Hieruit zijn de volgende konklusies getrokken:

- De gemiddelde getijden worden redelijk gesimuleerd.
- De gemiddelde golfhoogte neemt stroomopwaarts toe. De golfberekeningen zijn daardoor niet representatief voor de werkelijkheid. Dit leidt tot verkeerde konklusies bij de berekening van het sedimenttransport.
- De top van de vloedstroom wordt onvoldoende gesimuleerd, ondanks vergeefse pogingen door het aanbrengen van veranderingen in de geometrie. Alleen door de Chezy coëfficiënt tussen de vakken onderling te laten variëren is het mogelijk de stroomsnelheidskromme enigszins te manipuleren. Uit andere ééndimensionale modellen blijkt dat de grofheid van de geometrie niet de oorzaak is van het onvoldoende simuleren van de stroomsnelheid.
- Het verloop van de slibconcentratie wordt onvoldoende gesimuleerd, waarbij de berekende maximum concentraties op een later tijdstip vallen dan bij de metingen. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk de onjuiste simulatie van de stroomsnelheden. De orde van grootte van de berekende gemiddelde slibconcentraties zijn echter vergelijkbaar met de metingen (zie tabel 21).
- Hoewel de berekende sedimentatie, erosie en transport van slib nog niet vergeleken zijn met natuurmetingen bestaat de indruk dat de berekende import van zeeslib een reële orde van grootte heeft.

Tabel 21. Vergelijking tussen gemeten en berekende slibconcentraties [kg/m³]

Tijdstip [u.]	Metingen	SLITRA
LW +1	0.02	
LW +2/+4	max 0.09	
LW +5		max 0.09/0.12
HW	0.03/0.05	0.05
HW +1/+5	0.02/0.07	0.05/0.10

In verband met het onvoldoende simuleren van de kritische, maximale vloedstroomsnelheden kan het verloop van de slibconcentratie niet verbeterd worden, zolang het waterbewegingsdeel van het model niet in staat is om de stroomsnelheden beter te simuleren. De toepassingsmogelijkheden moeten wellicht meer worden gezocht in de richting van kleinschalig onderzoek m.b.t. de fysische processen.

2DH DELWAQ

De berekende getijamplitude, stroomsnelheden, waterstanden en debieten zijn vergeleken met metingen.

De tijdstippen van de maximum concentraties blijken redelijk gesimuleerd te worden, hoewel de absolute waarden van het verloop nog onvoldoende wordt berekend.

Een oorzaak hiervan is wellicht het niet goed beschikbaar komen van slib uit de

waterbodem.

Uit de modelproeven blijkt dat de korte golven van grote invloed kunnen zijn op de sedimentatie en erosie van geulen en ondiepten.

Het model is nog niet voldoende ontwikkeld om werkelijk te kunnen gebruiken voor het simuleren van de transporten en de erosie en sedimentatie van slib in het estuarium.

Resumé

* SLITRA is door zijn opbouw niet geschikt voor een estuarien systeem.

* 2DH-DELWAQ sluit beter aan bij de realiteit, maar is feitelijk nog in een ontwikkelingsstadium. 2DH-DELWAQ moet in principe ook de verdeling van de slibtransporten door de diverse geulen kunnen simuleren.

- Tabel 11. geeft een overzicht van de berekende netto slibtransporten op de belangrijkste vakgrenzen van het estuarium.

9. Toekomstige veranderingen in de slibbalans

9.1 Oorzaken van verandering

De slibbalans kan mogelijk veranderingen ondergaan door saneringen, hydrologische aanpassingen, het beheer, het baggerbeleid en waterbouwkundige ingrepen in het estuarium. Deze veranderingen hebben alleen op lange termijn effect, doordat de waterbodem als een enorme buffer de erfenis van het verleden nalevert.

Sanering

Door sanering van de slibaanvoer uit België kan op termijn een aanzienlijke reductie worden verwacht in het fluviatiele slibtransport op de grens. Indien deze sanering zoals verwacht leidt tot een vermindering van de slibconcentratie zal mogelijk een nieuw evenwicht ontstaan met het aangevoerde mariene slib vanuit zee. Het aandeel gesedimenteerd marien slib zal hierdoor mogelijk toenemen. Dit slib kan echter ook verontreinigingen bevatten door de speciëstoringen uit de Belgische Noordzeehavens op lokaties voor de kust.

Hydrologische aanpassingen

In het waterbeheer in België en Frankrijk zijn in het verleden en recent aanpassingen gedaan die gevolgen hebben voor de waterverdeling en daardoor de slibaanvoer. Voorbeelden hiervan zijn de aanleg van de Noordzeehavens met verbinding naar het achterland door middel van kanalen, de waterverdeling te Gent, een andere bestemming voor de Leye enz.

Dergelijke aanpassingen kunnen enerzijds een "schijn" sanering veroorzaken, maar kunnen anderzijds een meer directe zeewaartse verschuiving van de slibaanvoer uit België veroorzaken door verplaatsing van het troebelheidsmaximum of een verandering van de slibaanvoer.

Baggerbeleid

Het baggerbeleid is recent veranderd. De sterk verontreinigde specie uit de Zeeschelde wordt op het land gebracht. Verder beoogt het project OOSTWEST o.a. een ander baggerbeleid en/of een verminderde baggerinspanning. Door minder te baggeren wordt ook minder verontreinigd slib geresuspendeerd.

9.2 Nalevering van de waterbodem bij sanering

Het effect van sanering van de Schelde op het slibtransport en slibgehalte is verkennend onderzocht door Langerak [Langerak 1989,2]. Aangenomen is dat de slibblozing op de Schelderivier zeker kan halveren, doordat de huidige slibblozingen voor $\frac{2}{3}$ deel van huishoudelijke en industriële oorsprong zijn. (Bij een "volledige" sanering van de huishoudelijke en industriële lozingen daalt de totale fluviatiele slibbelasting tot 40% van de oorspronkelijke waarde.)

De eerste en voorlopige conclusies van deze eerste verkenning:

- De rivierbodem kan bij constante nalevering het slibgehalte en de transporten in de waterfase voor 20 jaar op het huidige peil houden.
- Bij een nalevering die evenredig daalt met het nog aanwezige gehalte in de bodem wordt deze in 30 jaar afgebouwd.

10. Konklusies

Er zijn al veel pogingen ondernomen om meer greep te krijgen op de slibtransporten in van het Schelde-estuarium. Deze pogingen zijn niet zonder probleem. Het estuarium omvat een gebied met een zeer grote ruimtelijke variatie en veel menselijke invloeden hierop.

Uit het onderzoek blijkt het volgende:

1. De waterfase is belangrijk als de transporteur van het slib door het estuarium.
2. Het slib ligt verspreid gebufferd en opgeslagen in de geulen, platen, slikken, schorren en havens.
De platen en de havens zijn kwantitatief gezien het minst belangrijk; deze gebieden spelen vooral een rol als tijdelijke buffer.
De plaatgebieden wisselen onder invloed van de klimatologische veranderingen over het jaar slib uit met de waterfase. De havens fungeren als tijdelijke slibvang voor het materiaal uit de directe omgeving.
In de schorren ligt het slib definitief opgeslagen.
Het onderscheiden slib van fluviatiele en mariene oorsprong ligt verspreid over de waterbodem volgens het patroon van de waterbeweging, de zgn. eb- en vloedgeulen. De hoge delen van de intergetijdegebieden en de vloedgeulen bevatten relatief meer marien materiaal.
3. In vergelijking met vroegere berekeningen zijn nu beter de grootste manko's van de slibbalans aan te geven. Bij de bepaling van de slibtransporten tussen de vakken van de balans zijn nu alle belangrijke bron- en puttermen meegenomen. Door de onnauwkeurigheid van veel termen ligt er echter een brede band van onzekerheid over de berekende netto transporten tussen de vakken. De grootste invloed op deze band komt door de onduidelijke definitie van 100% marien en 100% fluviatiel slib bij de tracermetingen. Andere belangrijke oorzaken zijn de onduidelijkheden omtrent de accumulatie van slib in de waterbodem van de Zeeschelde, de afzetting op de schorren en de aanvoer van slib uit België.
4. Uitwisseling van de waterbodem met de waterfase gebeurt naar schatting 2 maal per getij met een zeer actieve oppervlakte laag met een dikte van 1 mm. en orde 2 maal per jaar met een actieve bodemlaag van 0.5 m. dikte. De uitwisseling met de diepe bodemlaag van orde 10 m. dik verloopt zeer langzaam daar deze wordt bepaald door veranderingen van de geulligging.
5. De uitwisselingen van de zeer actieve en actieve bodemlagen stemmen overeen met de bruto uitwisselingen tussen de vakken. Bij de horizontale uitwisselingen zijn de in het midden gelegen schorren het grootste afzetgebied.
6. Het 1D-slibtransportmodel SLITRA is niet geschikt voor een estuarien systeem. Het 2DH-slibtransportmodel DELWAQ is nog onvoldoende ontwikkeld om de uitwisselingen goed te kunnen simuleren.
7. Bij belangrijke veranderingen in het estuarium moet rekening worden gehouden met wijzigingen van de slibhuishouding en langjarige nalevering van slib uit de waterbodem.

Geraadpleegde literatuur

Allersma E.

Systeemanalyse Westerschelde t.b.v. pilotstudie OOSTWEST
WL 1990

Alphen J.S.L.J.van

A mud balance for Belgian-Dutch coastal waters between 1969 and 1986
Netherlands Journal of Sea Research 1990

Bakker W.T.

Het huidige slibgehalte en slibtransport in het oostelijk deel van de
Westerschelde (tweede bericht).

Rijkswaterstaat, Studiedienst Vlissingen, Memo 75.10, augustus 1975.

Bakker W.T. en Roelse P.

Statistisch onderzoek naar de relatie tussen veekmerkhoogten en
het bezwijken van dijken.

Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-81.V007.

Bams C.J.

Inventarisatie gegevens van microverontreinigingen in oppervlakte
sedimenten van Nederlandse zoute wateren 1974-1985.

Deltadienst notitie DDMI-85.425 + DGW notitie 1974-1985.

Bams C.J.

De verhouding marien/fluviatiel slib in de bodem van de Westerschelde:
een nadere beschouwing van nota NXL-87.015 en van de toepassing in de
slibbalans van de Westerschelde

Dienst Getijde Wateren notitie GWAO-89.302

Bams C.J.

Slibkaarten van Westerschelde, Oosterschelde, Waddenzee en Eems-Dollard
Dienst Getijde Wateren, notitie GWAO-89.362.

Bastin A.

Regionale sedimentologie en morfologie van de zuidelijke Noordzee en
van het Scheldeestuarium.

Katholieke universiteit Leuven proefschrift 1974.

Bastin A.

Schelde, lithologische kaart 1986 - 1987

Ministerie van Openbare werken, Anwerpse Zeediensten 25-11-85.

Belmans H.

Verdieping- en onderhoudsbaggerwerken in Wester- en Zeeschelde.
Water, nr. 43/1, november/december 1988.

Beleidsplan Westerschelde

Deelrapport 3: Slibhuishouding en bodemkwaliteit.

Deelrapport 4: Morfologische structuur en dynamiek.

Werkgroep Waterbeheer Westerschelde april 1989.

Berg van den J.H., Schouten D., Westenbrugge C.J.,

Zandbalans Westerschelde 1965-1970-1975-1980-1985

Directie Zeeland nota NWL 91.36

Berger G.W., Eisma D.
 Datering van sedimenten in de Westerschelde met behulp van de isotopen.
 Cs134, Cs137 en Pb210
 NIOZ rapport 1988-2

Berger G., Zwolsman G.J., Zoest R.v., Eck B.v., Maldegem D.v.
 Datering schorren Westerschelde
 DGW notitie GWA0-90.13032

Bernard P.
 Automated electron probe X-ray microanalysis combined with multivariate analysis for application in marine research
 Universiteit Antwerpen 1989

Bitter G.
 Trendanalyse waterkwaliteit Westerschelde over de periode 1975 t/m 1985
 Dienst Getijde Wateren, nota GWWS-88.405

Boere P.
 Valsnelheids- en verticaal slibtransportmetingen in de Westerscheldemond en berekening van de horizontale slibtransporten in de Oosterschelde
 DGW-DIHO Balansnota 1987-30 GWA0.87.113

Bollebakker G.P.
 Inhoudsveranderingen Westerschelde 1952-1981.
 Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-85V027.

Boorarchief Westerschelde
 Overzichtstekeningen B5-75.927 en B5-76.474.
 RWS Directie Zeeland Meetdienst

Bijlsma L., Steyaert F.
 Bed Quality development in the Western Scheldt Estuary
 Proceedings of BHRA Water Modelling and Measurement 2, Morrogate, UK,
 Rijkswaterstaat, Dir. Zeeland en Dienst Getijdewateren, november 1988.

Bijlsma L.
 Schelde, wereldrivier, wereldvoorbeeld
 een voordracht van symposium "een Schelde zonder grenzen
 Dir.Zeeland 26 april 1990

Claessens J.,
 Het hydraulisch regime van de Schelde
 Water, tweemaandelijks referatenboek over de Schelde Waterproblematiek
 Deel 1, nr. 43, november-december 1988.

Crommelin R.D.
 Een onderzoek naar de aard en herkomst van het slib in de Westerschelde en enige aanverwante gebieden.
 Directie Benedenrivieren, 1949.

Daamen J.W., Lefèvre F.
 Berekeningen naar het effect van verdiepingswerken en lozingen van het Zoommeer op de chloridegehalten op de Westerschelde.
 Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-82.V009.

Daamen J.W., Maldegem D.C., Jong H.de
 Beschrijving getij- en zoutregime Westerschelde omgeving Land van
 Saeftinghe.
 Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-83.V002.

Daamen J.W.
 Algemeen slobonderzoek ten behoeve van beheersvragen Westerschelde.
 Adviesdienst Vlissingen, notitie WWKZ-84.401.

Deltadienst
 Gegevens polderwater Zuidelijk Deltagebied.
 Afdeling MIW, interne nota, november 1978.

D'Hondt P., Jacques T.G.
 Gesuspenderde materie in de Schelde. Evaluatie van een onderzoek van de
 ULB voor het Ministerie van Volksgezondheid.
 Water, 1^e uitgave, nr. 4 mei/juni 1982.

Dienst der Hydrografie
 Stroomatlas Westerschelde

Directie Zeeland
 Overzicht saneringen Nederlands gedeelte van de Westerschelde en het
 kanaal van Gent naar Terneuzen.
 Directie Zeeland, 1986.

Directie Zeeland
 Overzicht gebaggerde, gestorte en aan de Westerschelde onttrokken
 hoeveelheden specie periode 1951 - 1986
 Directie Zeeland, notitie NXL-88.04

Dronkers J. en Zimmerman J.T.F.
 Principles of mixing in TIDAL BASINS in the Netherlands.
 Deltadienst nota DDWT-82015.

Ebbens E., Hengst P. en Lefèvre F.
 De ijking van het eendimensionaal waterkwaliteitsmodel Dfenst 20
 van de Westerschelde en de Schelde.
 Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-80V023.

Eisma D. e.a.
 Loss of particular organic matter in estuaries as exemplified by the Ems
 and Gironde estuaries
 Mitt. Geol.-Palaont.Inst. UNiv.hAMBURG s397-412 APRIL 1985

Fischer H. e.a.
 Mixing in inland and coastal waters
 Academic Press 1979

Gemeenschapsministerie van het Vlaamse Gewest.
 De baggerwerken in de Schelde en de kwaliteit van water en bodem.
 Stand van zaken (voorlopig rapport).
 Departement Leefmilieu en infrastructuur 1990.

Gerritsen F. en Jong H.de
 Stabiliteit van doorstroomprofielen in de Westerschelde.
 Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-83V008.

Geurtz M.

Wiskundig onderzoeksmodel voor grootschalig slibgedrag in estuaria
DGW nota GWAO-88.022 in 3 delen

Goedheer G.J.

Schorontwikkeling.

Dienst Getijdewateren Middelburg, nota DDMI-85.22.

Helsloot I.C.M. en Storm C.

Ruimtelijke en temporele variabiliteit van slibtransporten in de Westerschelde

RU Utrecht doctoraalstudie 1988

Hengst P. en Bollebakker G.P.

Inhoudsberekeningen Scheldebekken traject Vlissingen - Antwerpen,
Opneming 1968 - 1969.

Rijkswaterstaat, nota WWKZ 79V018.

Herman P., Hummel H., Bokhorst M., Merks A. (DIHO)

The Westerschelde: Interaction between eutrophication and chemical
pollution

Eutrophication and pollution 1987?

Hydrografie Meetdienst Zeeland

Meetresultaten van stroom- en sedimentmetingen t.b.v. SAWES:

- Middelgat 17 maart 1988
 - Middelgat 3 maart 1988
 - Middelgat 19 mei 1988
 - Middelgat 26 mei 1988
 - Middelgat 10 juni 1988
 - Middelgat 21 juni 1988
 - Nauw v.Bath/S.v.d.Noord 25 oktober 1988
 - Nauw v.Bath/S.v.d.Noord 12 april 1989 notitie ZLMD-89.N.122
 - Honte/Schaar van Spijkerplaat 2 november 1989 notitie ZLMD-89.N.121
 - Honte/Schaar van Spijkerplaat 8 mei 1990 notitie ZLMD-90.N.097
- Rijkswaterstaat Directie Zeeland

Inventarisatie en geochemisch gedrag van zware metalen in de
Schelde en Westerschelde.

Waterloopkundig Laboratorium M1640/M1736.

Jong H. de

Berekeningswijze sedimenttransport uit zand- en slibtransporten.
Adviesdienst Vlissingen, notitie WWKZ-82V259.

Jong H. de

Berekening van inhouden en oppervlaktes van de Schelde en Westerschelde
t.b.v. SAWES.

Dienst Getijde Wateren, notitie GWAO-88.1314

Jong H. de

Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932.

Dienst Getijde Wateren, nota GWAO-89.1004.

Jong H. de

- Keuze van een bruto-reeks uit de beschikbare Zeekatresultaten t.b.v. een nadere interpretatie (lokatie Middelgat), notitie GWAO-89.1305
- Zeekat-registraties in het Nauw van Bath, notitie GWAO-89.1357
- Zeekat-registraties Schaar v.d.Noord, notitie

Jonge V. de

Physical processes and dynamics of microphytobenthos in the Ems estuary (The Netherlands), proefschrift.
Rijks Universiteit Groningen, 1992.

Kamer J.P.G. van de e.a.

Project verontreinigingen Westerschelde.
Dienst Getijdewateren notitie GWWS-86.530.

Klerk J. de

Inhoudsberekeningen Belgische Schelde, opneming 1968 - 1969 en opneming 1981 - 1982.
Rijkswaterstaat Dir. Zeeland (niet gepubliceerd) 1989.

Kohsiek L.H.M., Mulder J.P.M.

Een verkenning van een veranderend watersysteem: De Voordelta
DGW Nota GWAO-88.002

Kooij L.A. van de

Dwarsraai onderzoek Westerschelde 1982.
RIZA nota nr. 85.06.

Laane R., Turkstra E. en Mook W.

Stable carbon isotope composition of pelagic and benthic organic matter in the North sea and adjacent estuaries.
Ministry of transport and public works, 1990.

Langerak A.

Slibuitwisseling tussen de bodemfase en de waterfase
Dienst Getijde Wateren notitie GWAO-89.1260

Langerak A.

Slibtransport en slibgehalte landengrens bij sanering Belgische sliblozingen
DGW notitie GWAO-89.1306

Looff D. de, Malde van J.

Over de cyclus der zogenaamde drempelgeulen in de Oostelijk uitloop van de Zimmermangeul.
Rijkswaterstaat, publicatie nr. 22, 1976.

Looff D. de

Kartering van de bodemsamenstelling van de oostelijk gedeelte van de Westerschelde. Methode en resultaten.
Adviesdienst Vlissingen nota WWKZ-78V013.

Looff D. de

Kartering van de bodemsamenstelling van het oostelijk gedeelte van de Westerschelde. Methode en resultaten.
Adviesdienst vlissingen nota WWKZ-80V009.

Looff D. de
Inhoudsveranderingen en zandbalans Westerschelde, op basis van de resultaten van vroeger over de periode 1878-1971/72 en recent over de periode 1971/1972-1980 uitgevoerde berekeningen.
Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-83V003.

Looff D. de
De uitvoering van onderhoudsbaggerwerken met een waterinjectie-werktuig in enkele Zeeuwse Rijkshavens (augustus-oktober 1985).
Beschouwing resultaten verricht onderzoek.
Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-85.V031.

Looff D. de
Inhoudsberekeningen en zandbalans Westerschelde, periode 1980-1984/1985
RWS Directie Zeeland, Nota NXL-86.020

Maldegem D.C.v.
Aanslibbing bouwdok Westerschelde Oever Verbinding
Adviesdienst Vlissingen nota WWKZ-82.V004

Maldegem D.C. van
De bevaarbaarheid van de Westerschelde
Rijkswaterstaat, nota's t/m WWKZ85V001

Maldegem D.C.van
Vergelijkend onderzoek slibbemonsteringsapparatuur.
Dienst Getijdewateren, nota GWA0-86.113.

Maldegem D.C.van
1e Benadering slibbalans Westerschelde
Dienst Getijdewateren, nota GWA0-87.101

Maldegem D.C.van
Schatting natuurlijke slibtransporten op de Belgisch-Nederlandse grens van het Scheldeestuarium
Dienst Getijdewateren, notitie GWA0-89.1255

Maldegem D.C.van
Verhouding marien/fluviatiel slib Scheldeestuarium medio 1987 - 1988
Dienst Getijde Wateren, notitie GWA0-89.1287

Maldegem D.C.van
Resultaten 1D slibtransport Model Scheldeestuarium ("SLITRA")
Dienst Getijdewateren, notitie GWA0-89.1319

Maldegem D.C.van
Bevloeding slibhuishouding Westerschelde bij een ingreep in het oostelijk deel t.b.v. pilotstudie OOSTWEST
DGW notitie GWA0 89.1338

Maldegem D.C.van, Storm G.
Verloop slibconcentratie in relatie tot de baggerwerken
DGW/Dir.Zeeland notitie OW-90.064/NWL-90.53

Maldegem D.C. van
Methoden en kennisgegevens m.b.t. het voorkomen van slib in de morfologische eenheden van het Schelde-estuarium
DGW Werkdocument GWA0-92.852X

Manni R.J.
Slibtransport en slibbalans in de Westerschelde. Juli 1986.

Mc Laren P.
The effects of sedimenttransport on grain size distributions.
Journal of sedimentary Petrology,
Volume 55, no. 4, July 1985 p.0457-470.

Meulen A.v.d., Schoor M.M.
Erosie en sedimentatie aan de schor- en slikovergangen in de Westerschelde
RU Utrecht, Geografisch Instituut juni 1988; studierapport nr. 15

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Waterbodems - water voor nu en later -
Basis rapport derde Nota waterhuishouding GWWS-90.006

Ministerie van Volksgezondheid en leefmilieu e.a.
Ecologische impact van baggerspecielossingen voor de Belgische kust
april 1990 (conceptrapport)

Mook W.G. en Tan F.C.
Stable carbon isotopes in rivers and estuaries

Mulder H., Heuvel Tj.v., Reus J. de
Processen bij slibbeweging
DGW notitie GWA0-87.292

Mulder H., Maldegem D.C.v.
Verspreiding van verontreinigd slib in de Westerschelde
Dienst Getijdewateren, ZOUTKRANT 16/1/89

Mulder H., Udink C.
A cohesive sediment transport model for the Western Scheldt Estuary
Bijdrage aan International Symposium on Sediment Transport Modeling
van 14 tot 17 augustus 1989.
Dienst Getijdewateren, 1989

Mulder H.P.J.
Slibtransportmodellering voor de Westerschelde
DGW concept notitie AONW3-64 van 15-6-1989

Mulder H.
Slibbalans Westerschelde op basis van 400*400 m. net
DGW notitie AOMNW3-75 (concept) 7-2-1990

Nihoul J.C.J., Wollast R.
L'Estuaire de L'Escaut
Rapport Mer, Rapport Final, 1976.

Pieters J.
Kwaliteit van het regenwater in het Deltagebied
Deltadienst, hoofdafdeling Milieu en Inrichting, nota DDMI-81.05.

Project NAUWESB.
Slib- en zandconcentratiemetingen in de Westerschelde
Waterloopkundig laboratorium S 582, december 1983.

Projectgroep Oostwest.
Het Schelde-estuarium meer dan een vaarweg.
Ministerie van V. en W., DGW nota GWWS 91.081.

Reynders J.J. e.a.
Het bodemkundig milieu van het intergetijdegebied van de Westerschelde.
Instituut van Aardwetenschappen, Rijksuniversiteit Utrecht,
februari 1985.

Rietman F.
Identificatie puntbronnen tussen Gent en de Belgisch-Nederlandse grens
Project 'Monitoring Schelde' Meetcampagne 1989
ICWS januari 1990

Salomons W. and Mook W.G.
Field observations of the isotopic composition of particular organic
carbon in the Southern North Sea and adjacent estuaries.
Delft Hydraulics Laboratory, Haren Branch, c/o Institute for Soil
Fertility. Elsevier Scientific publishing Company Amsterdam (1981)

Salomons W., Eysink W.D., Kerdijk H.N.,
Inventarisatie en geochemisch gedrag van zware metalen in de Schelde en de
Westerschelde.
Waterloopkundig laboratorium, Rapport M1640/M1736, 1981

SAWES projectgroep
Projectplan SAWES
Dienst Getijde Wateren, nota GWAO-87.103

Schaik A.W.J.v., Jong D.J. de, Pluijm A.M.v.d.
Vegetatie buitendijkse gebieden Westerschelde
Dienst Getijde Wateren, nota GWAO-88.1003

Schelde de, toegang tot Antwerpen
referatenboek colloquium van VZW WEL en VZW AGHA 1-2 december 1988.
Water 7e jrg., nr. 43/1 - nov./dec/ 1988

Sibbles P.L. en Verduin J.A.
De vervuiling van de Schelde in sociaal-geografische context
Verslag van de eerste onderzoeksresultaten
IHE april 1987

Siereveld J.J.
Slibinventarisatie op de platen in de Westerschelde (1988)
Dienst Getijde Wateren, notitie GWIO-90.13042

Slibonderzoek
brochure van Min.v.V.en W.
RWS, DBW, DGW, BER en waterloopkundig Laboratorium 1989

Stormvloedkering Oosterschelde.
Berekening aanzanding cuvetten.
Waterloopkundig laboratorium. R1267-1.

Steyaert F., Maldegem D.van
Research of mud transport Westerschelde
DGW poster t.b.v. Schelde symposium van DIHO te Terneuzen mei 1987.

Swart J.P.
Onderzoek oppervlaktebemonsteringen slib in de Westerschelde
periode '69 - '80.
Adviesdienst Vlissingen, nota WWKZ-82.V003.

Swart J.P.
Slibtransportberekening in een dwarsraai in de Westerschelde.
Adviesdienst Vlissingen nota WWKZ-83V007.

Swart J.P.
Vooronderzoek aanslibbing Braakmanhaven
Adviesdienst Vlissingen nota WWKZ-84.V003

Swart J.P.
Onderzoek verhouding mariene-fluviatiele slib in de Westerschelde.
Directie Zeeland nota NXL-87.015

Technische Scheldecommissie
Studierapport Verdieping Westerschelde
juni 1984

Technische Scheldecommissie
Eindrapport werkgroep TGWH waterhuishouding.
1986.

Terwindt J.H.J.
Mud transport in the Dutch Delta area and along the adjacent coastline.
Rijkswaterstaat, Deltadienst, 1967.

Theune J.
Onderzoek naar de uitwisselingsstroming in de mond van de haven
Vlissingen -Oost (Sloehaven)
Adviesdienst Vlissingen notitie WWKZ-82.V002

Vos W.de
- Zeekatresultaten 871029-880201
Verloop regressiecoëfficiënten t.b.v. omrekening sestongeehalte
DGW notitie GWWS-88.547
- Zeekatresultaten
Vergelijking tussen bodemsestongehalten berekend op verschillende
wijzen
DGW notitie GWWS-88.548
- Ijklijnen en verwerking inwinning Zeekat voor de lokaties Middelgat
Schaar van de Noord en Schaar van Spijkerplaat (voorzover gereed)
DGW werkgroep SAWES transport

Wartel S.
Sedimentologisch onderzoek van de opbouw van het Scheldeestuarium.
Katholieke universiteit te Leuven Proefschrift 1972.

Wartel S.
Variations in concentration of suspended matter in the Scheldt estuary
Bulletin K.Belg.Inst.Nat.Wet. Brussel 31-12-1973

Wartel S.

Composition, Transport and origin of sediments in the Schelde estuary
Geologie en mijnbouw, volume 56, 1977

Wege R.v.d., Potappel P.

Zandribbelatlas Westerschelde

Dienst Getijde Wateren, 1991 intern rapport.

Winterterp J.

Cohesive sediments: 25. Flow induced erosion of cohesive beds

A literature survey

RWS/WL februari 1989

Wollast R.

Contribution à l'étude de l'envasement de l'Escaut.

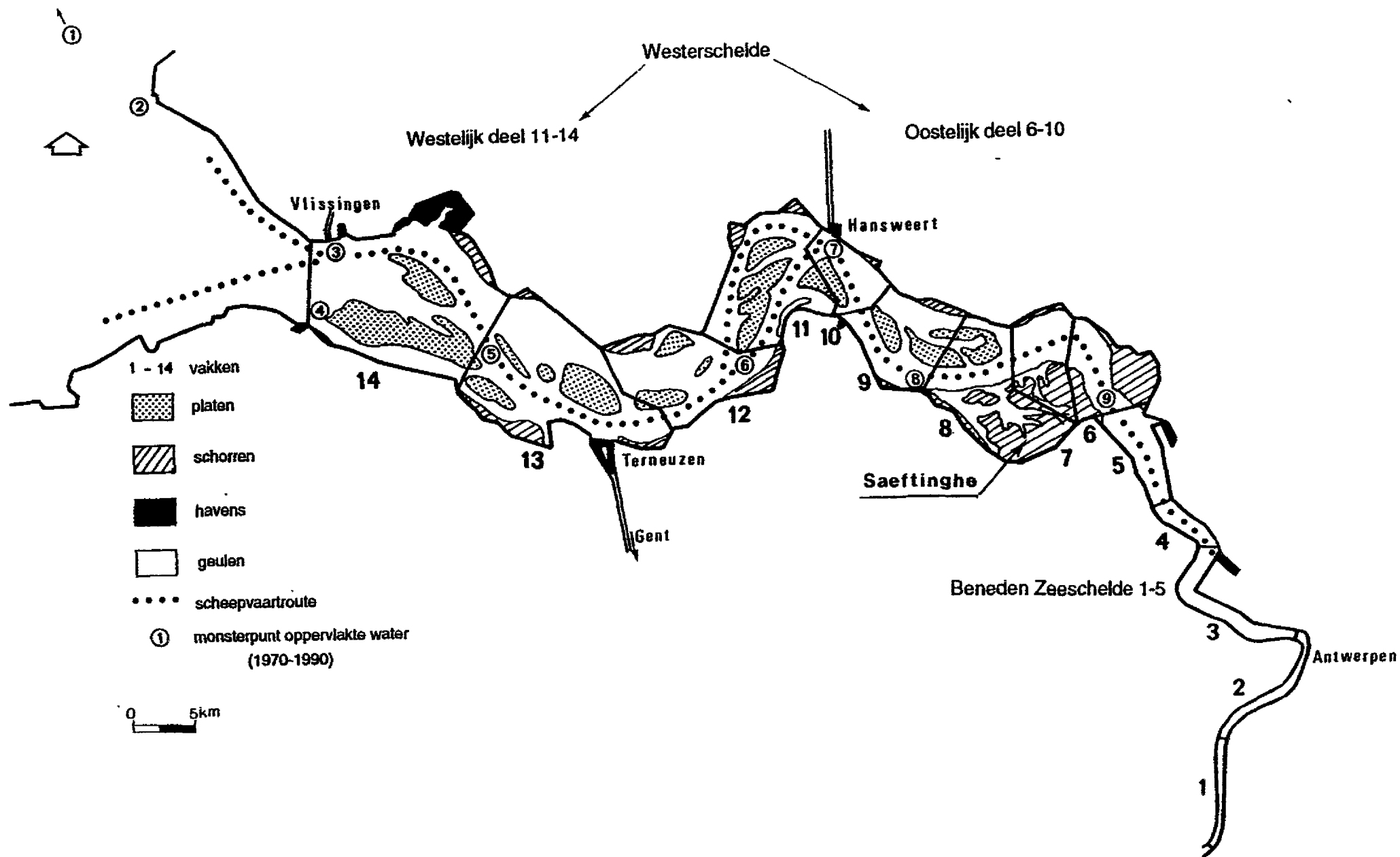
Rapport interne, Laboratoire de Chimie des Solides U.L.B. 1967-1968

Wollast R., Peters J.

Transfer of materials in estuarine zones

Université Libre de Bruxelles, oktober 1980

[illegible]

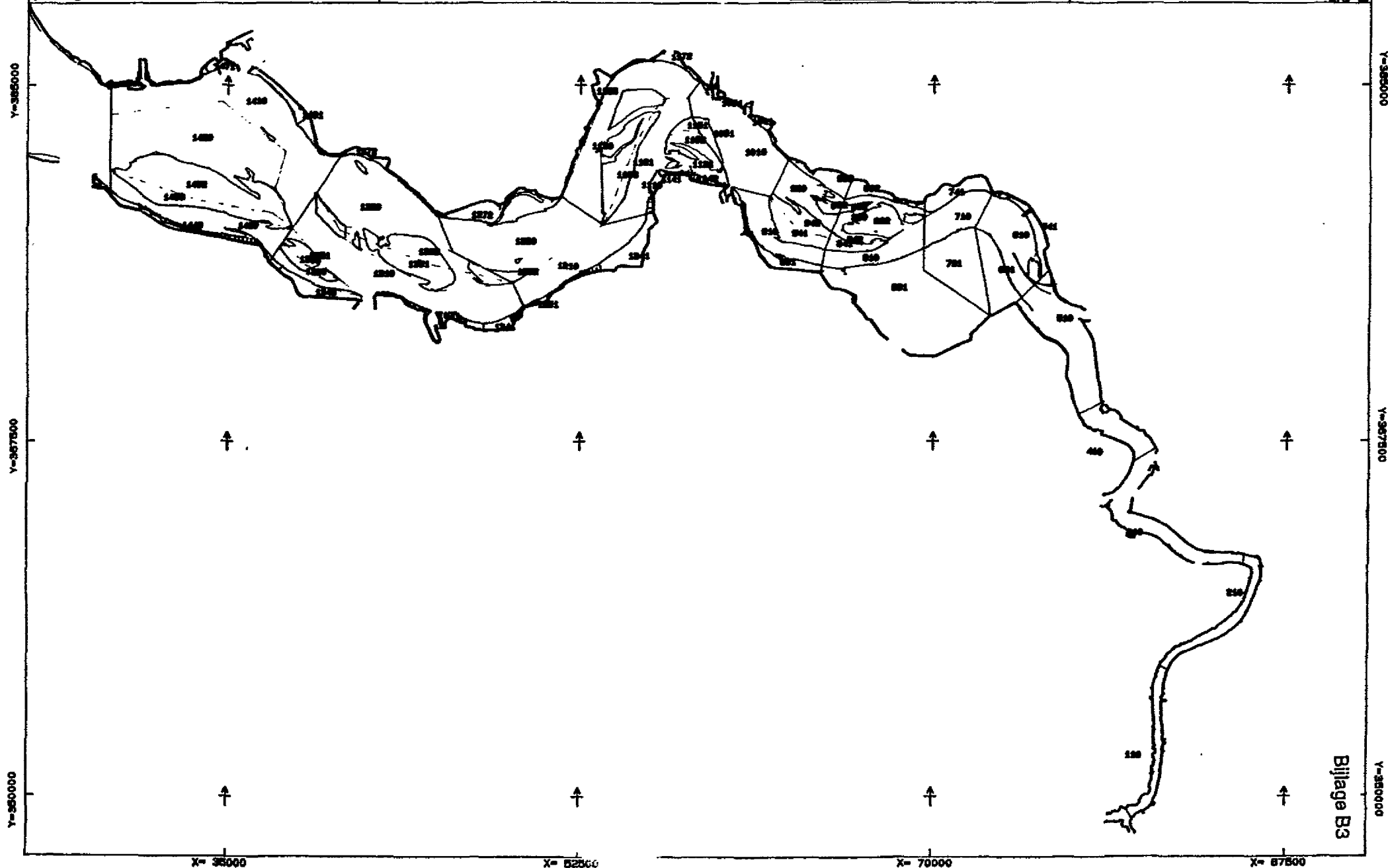


Situatie van het Schelde-estuarium.

**SLIBONDERZOEK
SCHELDEESTUARIUM
project SAWES TRANSPORT**

Situatie van de schematisatie van het Schelde-estuarium in hoofd-en nevenvakken
voor de slibbalans.

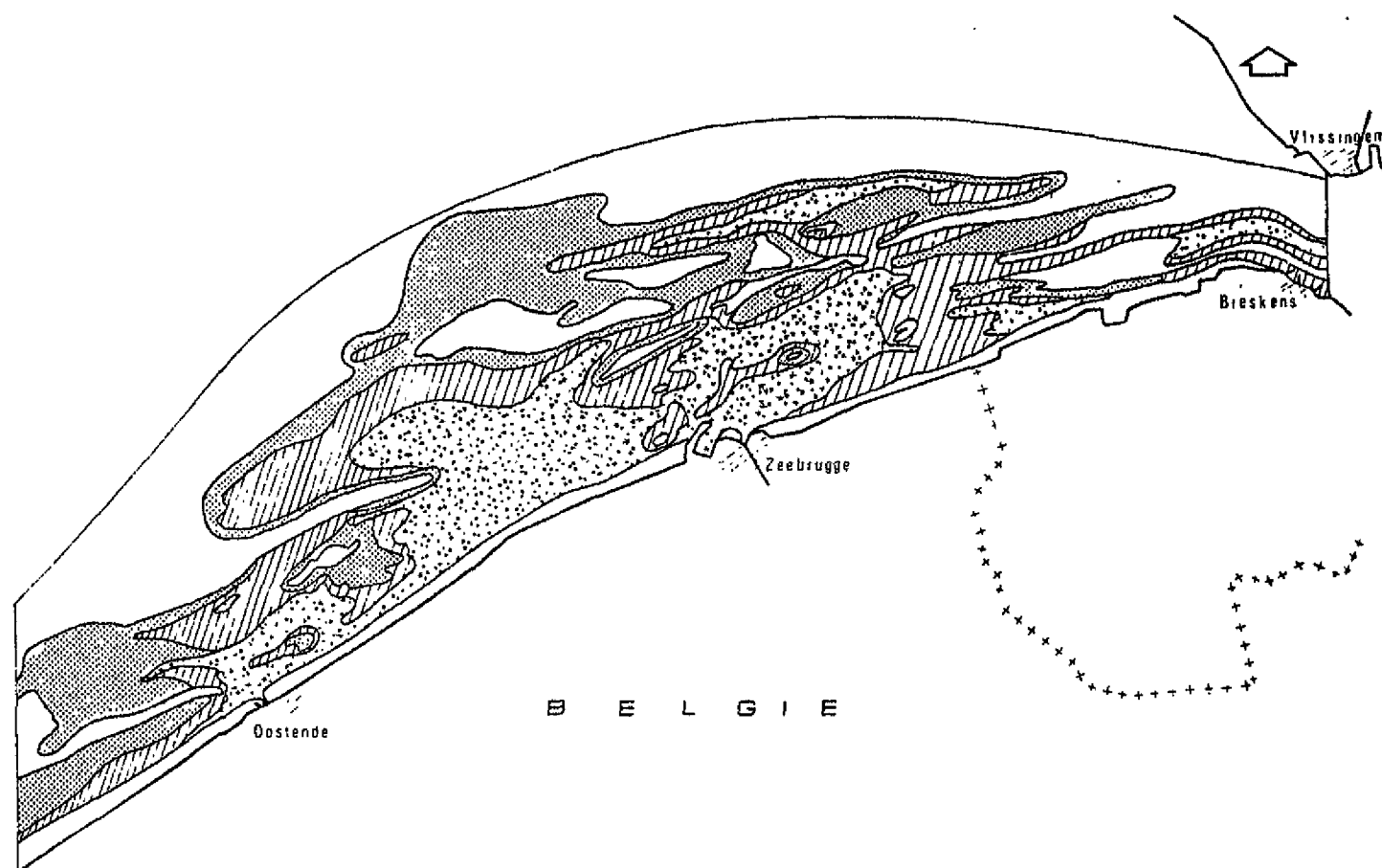
Plot: 29 maart 1989 9:09 uur
X10= 25000.00 Y10= 347000.00
Rotatie y-as = 0 grad
Schaal 1: 175000



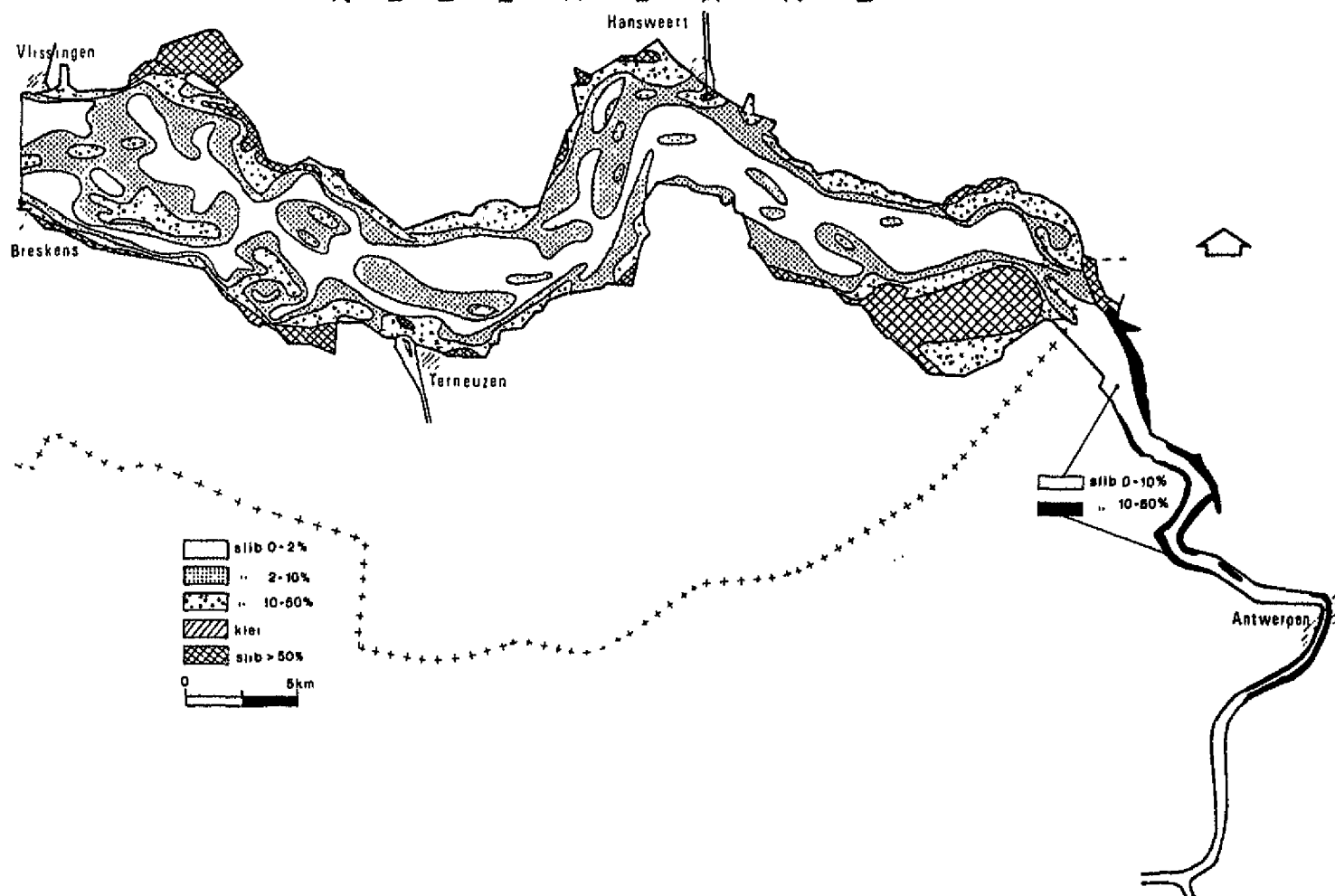
Bijlage B4

Laatste mutatedatum: 09/11/92 File: c:\alg\maldegem\slibconc\momentaalgempres.wk1
 Berekende dieptegemiddelde slibconcentratie voor het Scheldeestuarium [mg/l]
 gemiddelde voor de periode 1970 - 1990 turb naar slib formule $y = 0.71x + 23$, opp-vert f=1.6, <63mu f= 1.4
 gegevens van dgw, VU Brussel en Antwerpse Zeediensten

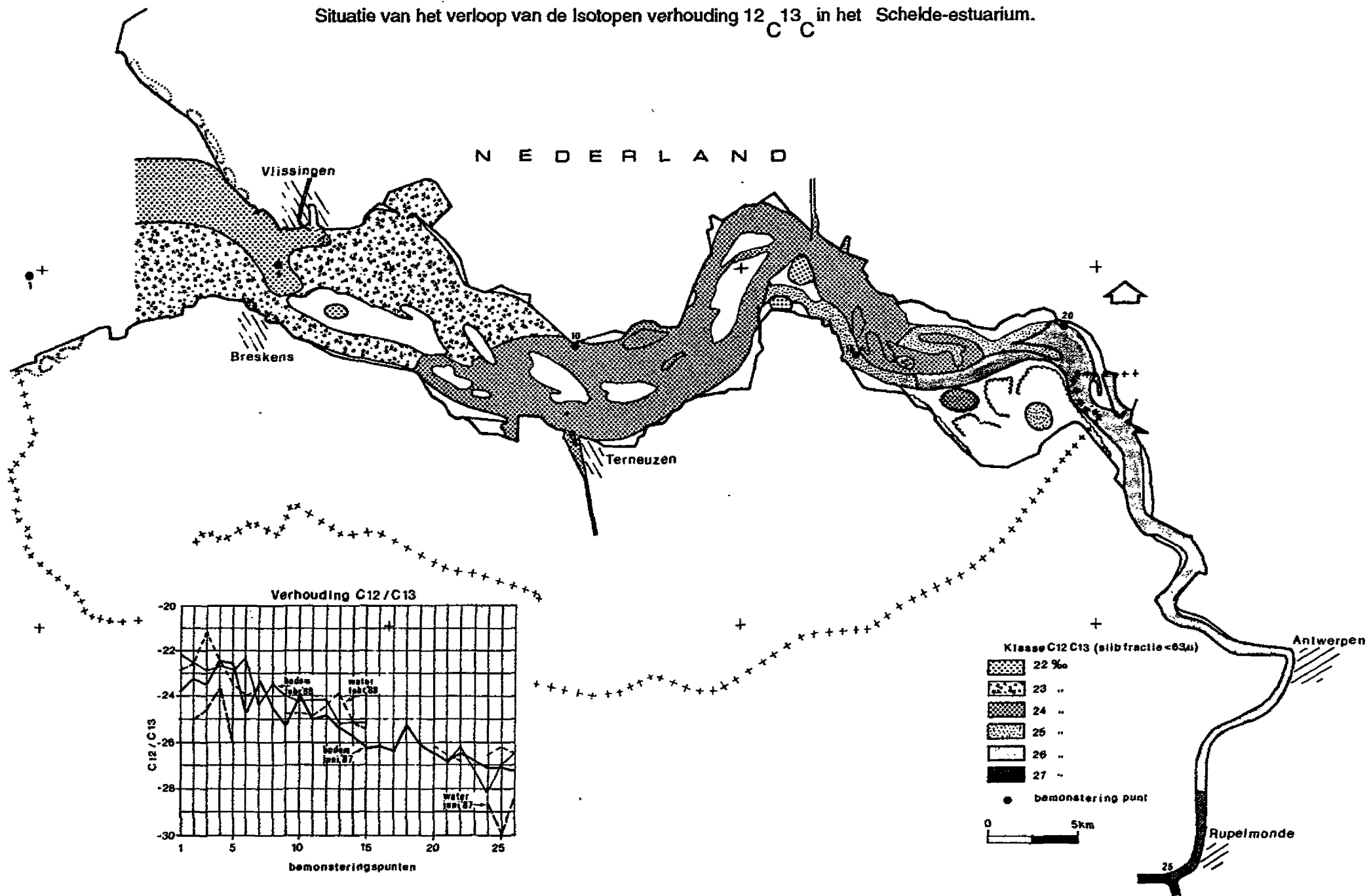
orientatie kilometer	18.0	26.0	26.0	39.0	Vilvoorden 40.0	52.0	65.6	74.5	81.5	grens 93.5	93.5	96.5	98.5	100.5
maand	mpt1	mpt2	mpt10	mpt3	mpt4	mpt5	mpt6	mpt7	mpt8	mpt9	mpt12	mpt13	mpt14	mpt15
1.0	57.5	111.8	89.8	91.7	138.9	89.1	95.7	87.3	89.6	168.2	82.9	69.3	83.6	65.8
2.0	57.9	103.2	104.5	85.2	139.5	97.5	105.4	94.7	115.6	172.6	164.4	179.5	110.4	89.2
3.0	48.4	101.6	118.5	81.2	120.2	86.5	105.2	87.1	106.8	185.8	110.6	131.0	123.4	94.2
4.0	23.9	73.3	70.0	82.1	78.0	77.0	96.5	65.9	92.0	155.2	111.0	130.1	132.9	117.8
5.0	12.1	27.3	29.4	26.8	44.9	45.7	56.9	35.0	54.7	90.5	155.8	169.6	175.7	127.0
6.0	10.8	22.7	29.7	26.6	41.8	38.5	40.8	25.8	41.2	69.8	121.1	119.5	113.8	107.1
7.0	14.9	24.7	24.1	21.0	34.0	28.4	32.5	22.2	34.0	58.8	108.0	149.4	104.8	85.3
8.0	11.8	29.7	36.2	22.6	36.1	47.4	46.2	28.6	42.0	63.0	75.2	76.0	73.9	76.6
9.0	22.2	56.7	43.9	39.4	48.3	65.8	66.7	39.9	55.5	84.7	131.9	173.1	141.4	132.9
10.0	32.9	61.9	48.7	54.2	72.9	65.8	63.6	49.0	49.4	73.4	117.6	120.3	121.2	102.7
11.0	47.1	100.6	79.8	81.8	89.6	85.8	78.0	64.7	65.2	110.6	143.6	199.7	131.8	111.8
12.0	59.0	116.3	85.3	88.7	114.7	86.5	95.9	83.4	82.4	151.0	142.6	196.6	141.3	113.3
kwartaal1	54.6	105.5	104.3	86.0	132.2	91.0	102.1	89.7	104.0	175.5	112.7	128.6	99.1	86.4
kwartaal2	15.6	41.1	43.0	38.5	54.9	53.7	64.7	42.6	62.7	105.2	129.3	139.7	140.8	117.3
kwartaal3	16.2	37.0	34.8	27.7	40.1	46.4	48.5	30.2	43.8	68.8	105.0	132.8	106.7	101.8
kwartaal4	46.3	92.9	71.6	74.9	92.4	79.7	79.2	65.7	65.7	111.7	134.6	172.2	131.4	109.3
zomer	15.9	39.1	38.9	33.1	47.5	50.1	56.8	36.4	53.2	87.0	117.2	136.3	123.7	109.5
winter	50.4	99.2	87.9	80.5	112.3	85.3	90.7	77.7	84.8	143.6	123.6	149.4	115.3	87.8
jaar	33.2	69.1	63.4	56.8	79.9	67.7	73.6	57.1	69.0	115.3	120.4	142.8	119.5	103.6
vermenigvuldigingsfactor t.o.v. jaargemiddelde slibconcentratie														
kwartaal1	1.6	1.5	1.6	1.5	1.7	1.3	1.4	1.6	1.5	1.5	0.9	0.9	0.8	0.8
kwartaal2	0.5	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.7	0.9	0.9	1.1	1.0	1.2	1.1
kwartaal3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.5	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	1.0
kwartaal4	1.4	1.3	1.1	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2	1.0	1.0	1.1	1.2	1.1	1.1
zomer	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.6	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.1
winter	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.2	1.4	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	0.9
jaar	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
st.afw	18.8	35.2	30.9	27.2	38.0	22.8	25.0	25.6	26.2	45.9	26.9	41.2	28.9	18.5
gem+std	52.0	104.4	94.3	83.9	117.9	90.0	98.6	82.7	95.3	161.2	149.3	184.0	148.4	122.2
gem-std	14.4	33.9	32.6	29.6	41.9	45.4	48.6	31.4	42.8	69.4	91.5	101.6	90.6	65.1
3puntsg.BG		83.6	94.2	98.7	97.3	102.2	90.4	92.2	113.0	135.3	164.8	160.6	151.5	102.9
3puntsg.OC		26.9	32.0	34.7	39.0	45.3	41.8	41.0	47.9	87.9	87.3	94.6	92.5	101.8
orientatie kilometer	103.5	105.5	107.5	110.5	112.5	114.0	115.5	118.0	120.0	122.0	124.0	126.5	128.5	Rupeel 131.0
maand	mpt16	mpt17	mpt18	mpt19	mpt20 AZ oosterw	mpt21	mpt22	mpt23	mpt24	mpt25	mpt26	mpt27	mpt28	
1.0	81.1	70.2	77.4	69.0	67.4	75.3	69.0	71.7	98.3	84.7	92.1	90.0	84.1	83.1
2.0	94.5	96.3	82.5	90.2	86.0	121.8	97.9	93.4	108.7	112.6	135.3	119.4	112.2	122.8
3.0	89.7	85.2	74.1	70.3	64.7	129.8	69.6	71.7	94.3	90.7	92.3	63.7	107.2	95.0
4.0	112.0	105.8	124.0	115.7	160.0	99.1	87.5	100.8	132.4	121.9	160.6	160.0	124.0	214.1
5.0	144.1	118.1	118.0	111.0	114.0	128.6	94.3	95.6	131.5	119.4	113.5	108.9	103.1	129.7
6.0	107.9	123.4	115.9	112.6	141.1	107.1	167.7	167.9	188.4	182.2	149.7	198.4	276.6	266.2
7.0	96.7	109.1	112.4	121.0	131.8	121.8	103.0	95.3	78.1	78.3	83.3	74.6	70.1	120.2
8.0	74.6	84.1	84.7	79.9	83.1	132.1	81.2	77.8	86.8	81.2	77.9	78.3	83.3	142.4
9.0	131.7	110.7	135.9	136.5	133.2	198.1	132.8	113.3	124.2	133.3	141.3	156.0	201.3	271.9
10.0	120.9	117.5	93.2	115.0	106.7	199.1	125.6	107.8	136.0	201.7	170.1	136.7	203.4	240.6
11.0	114.7	113.6	132.3	110.2	103.4	155.9	139.6	115.9	178.8	158.6	174.3	134.8	133.1	364.9
12.0	111.8	93.8	107.2	130.0	72.4	135.5	67.1	75.5	73.8	71.0	143.2	74.0	85.3	93.0
kwartaal1	81.7	83.9	78.0	77.5	72.7	109.0	78.8	78.9	99.1	96.0	106.6	91.0	101.2	100.3
kwartaal2	121.3	115.7	119.3	113.1	138.4	111.6	113.1	121.4	150.1	141.2	141.3	152.4	167.9	203.3
kwartaal3	101.0	101.3	111.0	112.5	116.0	150.7	105.7	95.4	96.4	97.6	100.8	103.0	118.2	178.2
kwartaal4	115.7	108.3	110.9	118.4	94.2	163.5	110.8	99.7	130.2	143.8	162.5	115.8	140.6	232.6
zomer	111.2	108.5	115.2	112.8	127.2	131.1	109.4	108.4	123.2	119.4	121.0	127.7	143.1	190.6
winter	98.7	96.1	94.5	98.0	83.4	136.2	94.8	89.3	114.6	119.9	134.5	103.4	120.9	165.5
jaar	104.9	102.3	104.8	105.4	105.3	133.7	102.1	98.9	116.9	119.6	127.8	115.6	132.0	176.7
st.afw	22.3	15.7	20.8	21.1	30.1	34.8	29.0	25.6	35.2	40.8	33.2	39.6	60.1	66.5
gem+std	127.2	118.0	125.6	126.5	135.4	168.5	131.1	124.5	154.1	160.5	181.0	155.1	192.1	265.2
gem-std	82.7	66.7	84.0	84.2	75.2	88.8	73.1	73.3	83.7	78.8	84.6	76.0	71.9	82.1
vermenigvuldigingsfactor t.o.v. jaargemiddelde slibconcentratie														
kwartaal1	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
kwartaal2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.3	0.8	1.1	1.2	1.3	1.2	1.1	1.3	1.3	1.1
kwartaal3	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0
kwartaal4	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	1.2	1.1	1.0	1.1	1.2	1.3	1.0	1.1	1.3
zomer	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	1.1	1.1	1.1
winter	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	0.9	0.9	0.9
jaar	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3puntsg.BG	107.7	123.6	123.4	129.2	143.5	145.0	141.4	136.6	146.4	158.5	158.9	169.4	204.1	
3puntsg.OC	106.4	84.4	85.0	81.2	86.1	82.4	81.7	76.7	78.6	85.7	83.1	80.8	80.0	



N E D E R L A N D



Situatie van het verloop van de Isotopen verhouding $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ in het Schelde-estuarium.



Bijlage B7 (3 bladen) blad 1 Berekeningen van de slibvoorkomens

Diepte- en tijgemiddelde slibconcentratie [mg/l] per vak, fractie <63 µ

	bovenstr.	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	Zee
gem+std	250	168	144	132	124	156	150	132	112	92	86	92	98	94	106	90
gem	169	125	111	108	104	124	108	95	81	65	60	67	73	70	75	60
gem-std	88	82	78	84	84	92	66	58	50	38	34	42	48	46	44	30

Berekening van bewegelijke sliblaag op waterbodem in een vak [mm]

(concentratie*inhoud vak/oppervlak vak)

(voor max. hw nivo; voor min lw nivo en uitgaande 1m³=1ton slib)

	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	totaal
max susp [t]	5768	5752	10057	4509	14115	14912	10174	14175	13619	16586	37494	37273	68305	110832	363571
min susp [t]	1599	1918	3731	1856	4753	3372	2472	2874	2826	4290	9949	11035	21998	31897	104571
max conc gem+std	1.73	1.70	1.39	1.32	1.52	1.41	1.18	0.84	0.73	1.16	0.95	1.12	1.25	1.52	1.23
min conc gem-std	0.59	0.68	0.67	0.74	0.71	0.41	0.46	0.30	0.25	0.34	0.37	0.42	0.51	0.57	0.36
bew. laagdikte	1.14	1.01	0.72	0.58	0.82	1.00	0.73	0.54	0.48	0.83	0.58	0.71	0.74	0.95	0.87

Gemiddeld slibpercentage[%] in de waterbodem voor de fractie <63µ

	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14
a. geul	2	2	10	10	10	18	2	3	3	4	7	3	10	6
b. plaat						32	53	2	3	1	4	20	4	14
c. schor	33	33	33	33	33	28	47	53	25			23	38	20
d. slik						29	48	51	18	18	38	19	41	41
e. overig	28	28	28	28	28	32		12	23	14	35	26	48	31
f. havens										82			75	89
b t/m e	23	23	23	23	23	29	48	41	11	11	13	21	12	22
a t/m f	16	16	16	16	16	23	33	34	7	5	10	7	10	10

Hoeveelheid slib per m² waterbodemplaat in [1000m³] of [1000t] voor fractie <63 µ.

	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	Totaal
a. geul	54	56	561	251	672	1250	97	198	315	471	1653	705	3206	3209	12697
b. plaat	0	0	0	0	0	26	117	96	144	14	575	493	623	1839	3926
c. schor	0	3	22	0	573	929	2625	8092	146	0	0	160	484	199	13233
d. slik	0	0	0	0	0	761	2330	4237	508	211	721	775	955	1142	11641
e. overig						348	0	116	328	111	1068	402	665	1877	4916
f. havens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	603	0	0	1727	3254	5584
b t/m e	141	136	377	207	588	2065	5072	12541	1126	336	2364	1830	2728	5056	34566
a t/m f	195	192	938	458	1260	3315	5169	12739	1441	1410	4017	2535	7661	11518	52847

Bijlage B7 (3 bladen) blad 2 Berekeningen van de slibvoorkomens

Gemeten koolstofisotoop-verhouding C12/C13 van het organische materiaal per vak, fractie <53 of <63 mu

	bovenstr.	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	Zee
gem.	27.4	27.0	26.9	26.4	26.4	26.3	26.0	25.8	25.5	25.0	24.7	24.5	24.2	24.0	23.5	22.3

Waarden voor :

	rekenw	gemiddeld	ondergr	bovengr
Delta marien [Lit]	-22.5	-22.50	-21	-24.0
Delta fluviatiel [Lit]	-29.0	-29.00	-27	-31.0

Berekende verhouding marien fluviatiel [fractie]

	bovenstr.	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	Zee
gem.fluv.	0.75	0.69	0.68	0.60	0.60	0.58	0.54	0.51	0.46	0.38	0.34	0.31	0.26	0.23	0.15	0.00
gem.mar.	0.25	0.31	0.32	0.40	0.40	0.42	0.46	0.49	0.54	0.62	0.66	0.69	0.74	0.77	0.85	1.00

Onder en bovengrens voor fractie marien fluviatiel slib

	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	Zee
max.fluv	1.00	0.98	0.90	0.90	0.88	0.83	0.80	0.75	0.67	0.62	0.58	0.53	0.50	0.42	0.22
marien	0.00	0.02	0.10	0.10	0.12	0.17	0.20	0.25	0.33	0.38	0.42	0.47	0.50	0.58	0.78
min.fluv	0.43	0.41	0.34	0.34	0.33	0.29	0.26	0.21	0.14	0.10	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00
marien	0.57	0.59	0.66	0.66	0.67	0.71	0.74	0.79	0.86	0.90	0.93	0.97	1.00	1.00	1.00

Berekende hoeveelheid fluviatiel slib per m³ waterbodemiaag in [1000m³] of [1000t] voor fractie <63 mu.

	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	Totaal
a. geul	38	38	337	151	393	673	49	91	121	159	508	184	740	494	3976
b. plaat	0	0	0	0	0	14	59	44	56	5	177	129	144	283	910
c. schor	0	2	13	0	335	500	1333	3735	56	0	42	112	31	6158	
d. slik	0	0	0	0	0	410	1183	1956	195	71	222	203	220	176	4636
e. itij						188	0	53	126	38	329	105	154	289	1281
f. havens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	204	0	0	399	501	1103
b t/m e	97	92	226	124	344	1112	2575	5788	433	114	727	479	630	778	13519
a t/m f	135	130	563	275	737	1785	2624	5879	554	477	1236	663	1768	1772	18598

Berekende hoeveelheid marien slib per m³ waterbodemiaag in [1000m³] of [1000t] voor fractie <63 mu.

	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	Totaal
a. geul	17	18	224	100	279	577	48	107	194	312	1144	520	2466	2715	8721
b. plaat	0	0	0	0	0	12	58	52	89	9	398	364	479	1556	3016
c. schor	0	1	9	0	238	429	1292	4357	90	0	118	372	168	7075	
d. slik	0	0	0	0	0	351	1147	2282	313	139	499	572	735	966	7005
e. itij						161	0	62	202	74	739	297	512	1588	3635
f. havens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	399	0	0	1329	2753	4481
b t/m e	43	44	151	83	244	953	2497	6753	693	222	1637	1351	2098	4278	21048
a t/m f	60	62	375	183	523	1530	2545	6859	887	933	2781	1872	5893	9746	34249

Bijlage B7 (3 bladen) blad 3 Berekeningen van de slibvoorkomens

Totaal fluviatiel slib in waterbodem, opslag in schorren en gebufferd per vak in [1000m3] of [1000t] voor fractie <63 mu.

	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	Totaal
Totaal	135	130	563	275	737	1785	2624	5879	554	477	1236	663	1768	1772	18598
opslag	0	2	13	0	335	500	1333	3735	56	0	0	42	112	31	6158
buffer gem.	135	128	550	275	402	1285	1291	2145	498	477	1236	621	1656	1741	12439
ondergr vast	195	185	825	412	607	1988	2035	3485	863	869	2343	1267	3588	4716	23380
bovengr vast	84	78	314	157	226	682	654	996	185	141	287	68	0	0	3871

Totaal marien slib in waterbodem, opslag in schorren en gebufferd per vak in [1000m3] of [1000t] voor fractie <63 mu.

	vak1	vak2	vak3	vak4	vak5	vak6	vak7	vak8	vak9	vak10	vak11	vak12	vak13	vak14	Totaal
Totaal	60	62	375	183	523	1530	2545	6859	887	933	2781	1872	5893	9746	34249
opslag	0	1	9	0	238	429	1292	4357	90	0	0	118	372	168	7075
buffer gem.	60	61	366	183	285	1101	1252	2502	797	933	2781	1754	5521	9578	27174
ondergr vast	0	3	92	46	80	398	509	1162	432	540	1674	1108	3588	6603	16234
bovengr vast	112	110	602	301	461	1704	1890	3651	1110	1269	3730	2307	7177	11319	35743

klustering van de gemiddelde hoeveelheden voor Beneden Zeeschelde, Oostelijk en Westelijk deel Westerschelde in [1000m3] of [1000t] voor fractie <63 mu.

	Beneden Zeeschelde vak 1 t/m 5			Oost.Westerschelde vak 6t/m10			West Westerschelde vak 11t/m14			Totaal estuarium vak 1t/m14		
	fluviatiel	marien	fluv+mar	fluviatiel	marien	fluv+mar	fluviatiel	marien	fluv+mar	fluviatiel	marien	fluv+mar
a. geul	956	639	1594	1094	1236	2330	1926	6845	8772	3976	8721	12697
b. plaat	0	0	0	178	219	397	732	2797	3530	910	3016	3926
c. schor	350	248	598	5624	6168	11792	184	659	843	6158	7075	13233
d. slik	0	0	0	3815	4232	8047	821	2773	3593	4636	7005	11641
e. overig	0	0	0	405	498	903	876	3136	4013	1281	3635	4916
f. havens	0	0	0	204	399	603	899	4082	4981	1103	4481	5584
b t/m e	883	565	1448	10022	11118	21140	2613	9365	11978	13519	21048	34566
a t/m f	1839	1204	3043	11320	12753	24073	5439	20292	25731	18598	34249	52847
gebufferd	1489	956	2445	5696	6585	12281	5255	19633	24888	12439	27174	39614

Gemiddeld percentageverdeling voor Beneden Zeeschelde, Oostelijk en Westelijk deel Westerschelde [%]

	Beneden Zeeschelde vak 1 t/m 5			Oost.Westerschelde vak 6t/m10			West Westerschelde vak 11t/m14			Totaal estuarium vak 1t/m14		
	fluviatiel	marien	fluv+mar	fluviatiel	marien	fluv+mar	fluviatiel	marien	fluv+mar	fluviatiel	marien	fluv+mar
a. geul	31	21	52	5	5	10	7	27	34	8	17	24
b. plaat	0	0	0	1	1	2	3	11	14	2	6	7
c. schor	12	8	20	23	26	49	1	3	3	12	13	25
d. slik	0	0	0	16	18	33	3	11	14	9	13	22
e. itij	0	0	0	2	2	4	3	12	16	2	7	9
f. havens	0	0	0	1	2	3	3	16	19	2	8	11
b t/m e	29	19	48	42	46	88	10	36	47	26	40	65
a t/m f	60	40	100	47	53	100	21	79	100	35	65	100
gebufferd	49	31	80	24	27	51	20	76	97	24	51	75

Bijlage B8: Controle van de slibbalans in het oostelijk deel van de Westerschelde

De slibsedimentatie levert voor Nederland de grootste ecologische problemen op in het oostelijk deel van de Westerschelde. Voor de Westerschelde vindt in dit gebied de grootste sedimentatie van vervuild fluviatiel slib plaats.

De controle van de berekende lokale slibbalans en met name van de berekende sedimentaanvoer over de Belgisch Nederlandse grens is dan ook van wezenlijk belang.

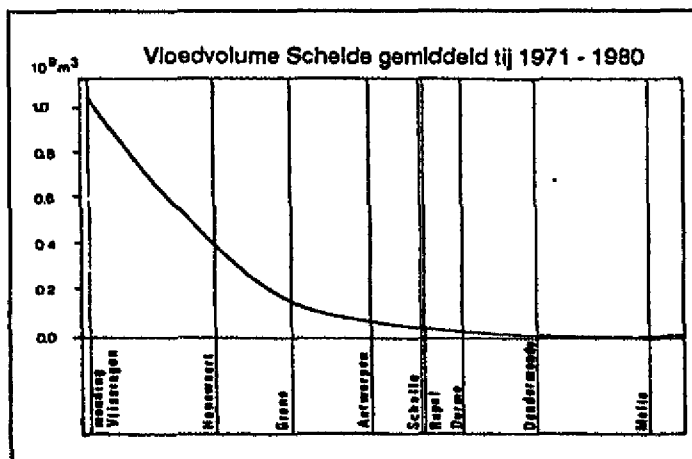
Controle via de Transportmethode

Algemene principe :

De transportmethode gaat uit van de principes van de advectie-diffusievergelijking, die feitelijk alleen mag worden toegepast voor de moleculaire diffusie van opgeloste conservatieve stoffen. De toepassing voor slib is een grove simplificatie.

De benadering luidt in formulevorm: $T = Q.c - D.A.\delta c/\delta x$ Deze geldt voor zowel marien als fluviatiel slib.

De benadering van het transport met de één dimensionale advectie-diffusievergelijking bevat het getijgemiddeld advectief slibtransport in de vorm van de getijgemiddelde vloeistofbeweging maal de sedimentconcentratie ($Q.c$) en het dispersiefttransport $D.A.\delta c/\delta x$. Het getijgemiddelde dispersieve transport is een gevolg van ongelijkmatige stroomverdeling en concentratie verdeling in de dwarsdoorsneden.



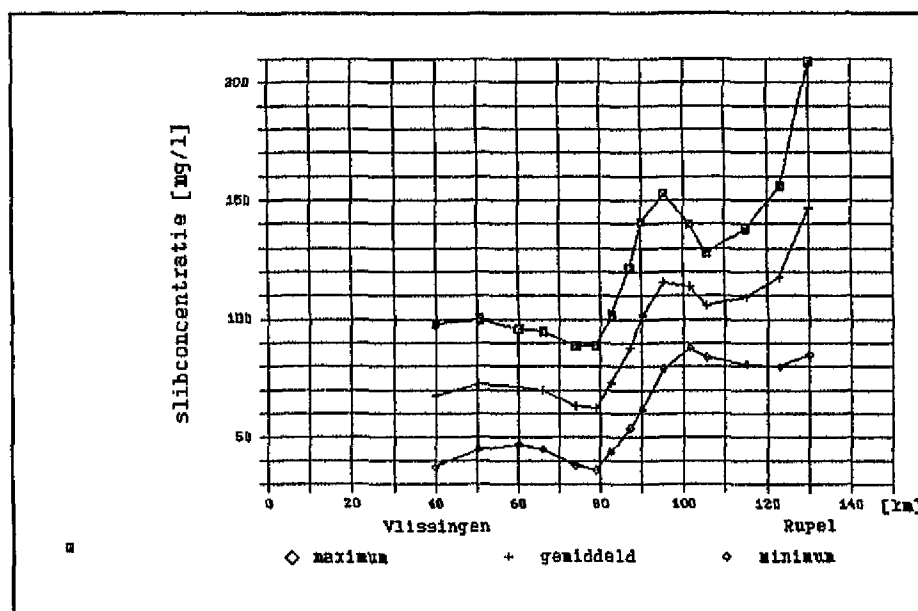
Vloedvolume Schelde-estuarium
bij gemiddeld getij (1971-1980)

De begrippen eb-, -vloed en
tijvolume zijn verduidelijkt
in het onderstaande figuurtje



Door interactie van het getij en de geometrie ontstaat op diverse lengteschalen een diffusieachtige menging. De verhouding 50 tot 100% fluviatiel tegen 0 tot 50% marien materiaal in het water en de waterbodem nabij de grens geeft aan dat menging van marien en fluviatiel slib plaats vindt. Deze menging wijst op dispersieve import van marien slib naar België tegen de richting van de afvoer in. Met de advectie-diffusie vergelijking zou dan ook in het restransport over de landengrens te bepalen zijn voor marien en fluviatiel slib, indien de diffusiecoëfficiënt (D) bekend zou zijn. (De overige grootheden: debiet (Q), slibconcentratie (c), slibgradiënt ($\delta c/\delta x$), dwarsdoorsnede (A) zijn bekend. D is echter niet bekend.

Dit probleem wordt omzeild door een slibbalans voor het gebied tussen de Hansweert en de landengrens op te zetten. De rand wordt bij Hansweert gelegd omdat er ter hoogte van Hansweert sprake is van een minimum in het verloop van de slibconcentratie (zie figuur).



Verloop dieptegemiddelde slibconcentratie op de grenzen van de hoofdvakken langs het Schelde-estuarium (fractie $< 63\mu$)

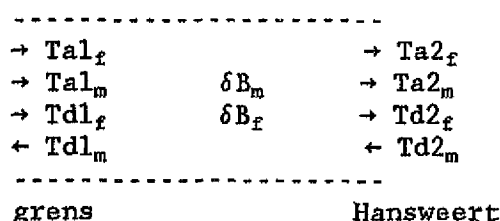
Verondersteld wordt dat t.p.v. van dit minimum het totale getijgemiddelde dispersieve transport verwaarloosbaar is.

Op basis van deze veronderstelling zijn balansen voor het fluviatiel- en marien slib voor het gebied tussen de grens en Hansweert opgesteld:

$$Ta1_f + Td1_f - Ta2_f - Td2_f = \delta B_f \quad (1)$$

$$Ta1_m - Td1_m - Ta2_m + Td2_m = \delta B_m \quad (2)$$

De veronderstelde transportrichting van het slib bij het opstellen van deze vergelijkingen is met pijlen aangegeven in de volgende figuur.



verklaring: T = transport

a = advectief

d = dispersief

f = fluviatiel

m = marien

B = berging

1 = Belg./Ned. grens

2 = omgeving Hansweert

δ = verandering per tijdseenheid

De vergelijkingen (1) en (2) met 8 onbekenden zijn oplosbaar met behulp van de volgende aannamen en relaties, als δB_m en δB_f bekend zijn:

* Het totaal dispersief transport te Hansweert is nul of $Td2_f + Td2_m = 0$

* $Ta1_f = Q \cdot cl_f$; $Ta1_m = Q \cdot cl_m$; $Ta2_f = Q \cdot c2_f$; $Ta2_m = Q \cdot c2_m$

Het stelsel vergelijking is gesloten als er een relatie tussen $Td1_f$ en $Td1_m$ op de landengrens bestaat. Hiervoor wordt aangenomen dat de dispersiecoëfficiënten voor fluviatiel en marien slib op de grens gelijk zijn of $D1 = D1_m = D1_f$.

Uit $Tdl_f = Dl.A.\delta cl_f/\delta x$ en $Tdl_m = Dl.A.\delta cl_m/\delta x$ volgt dan:

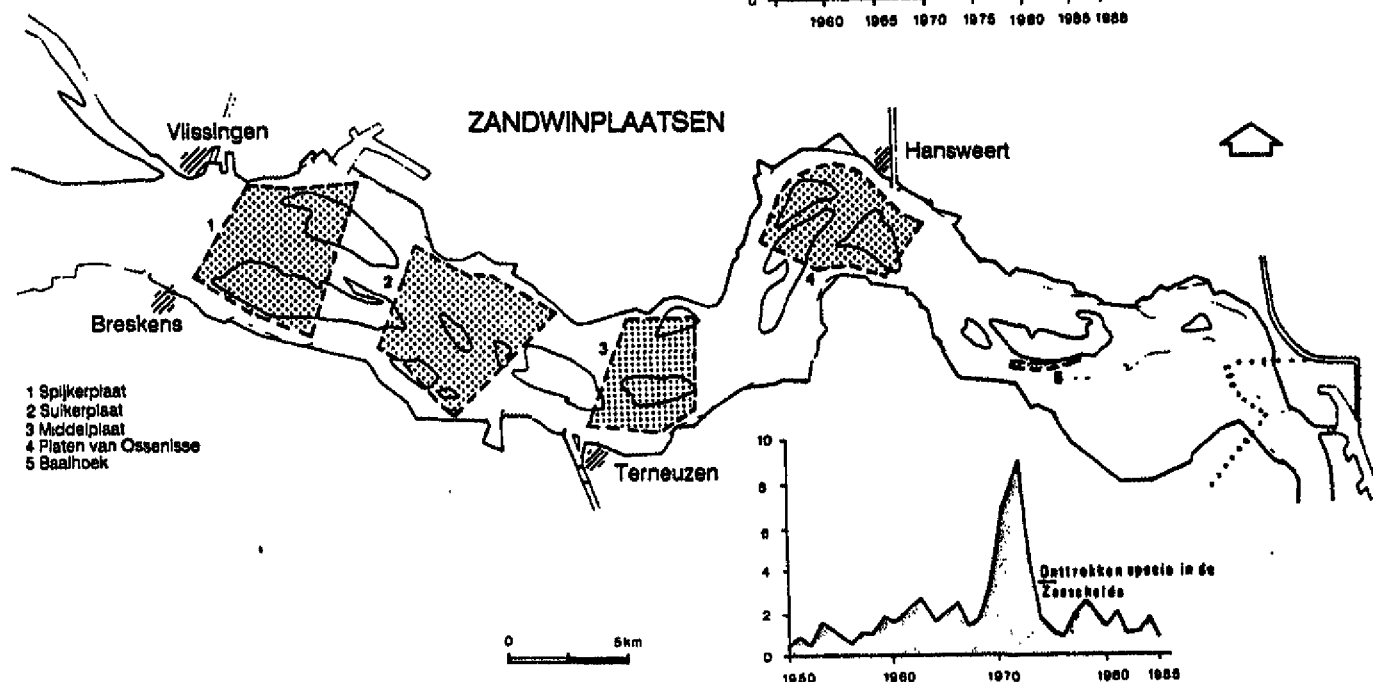
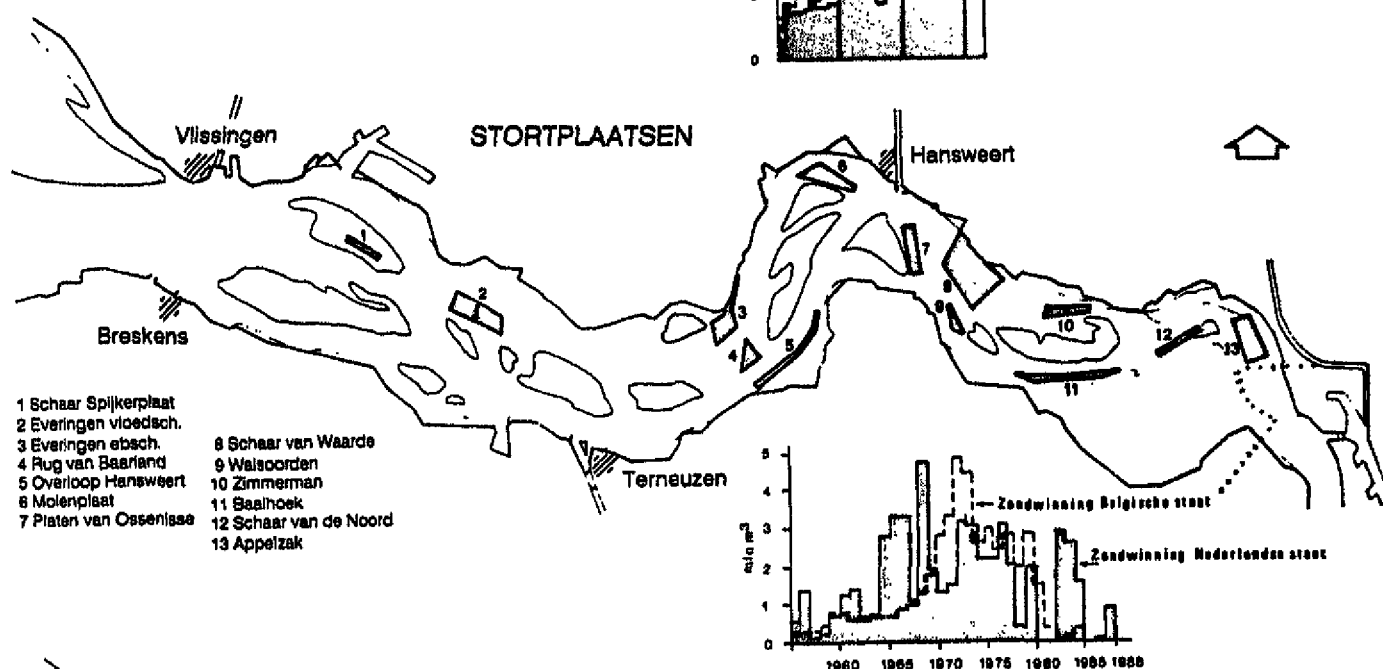
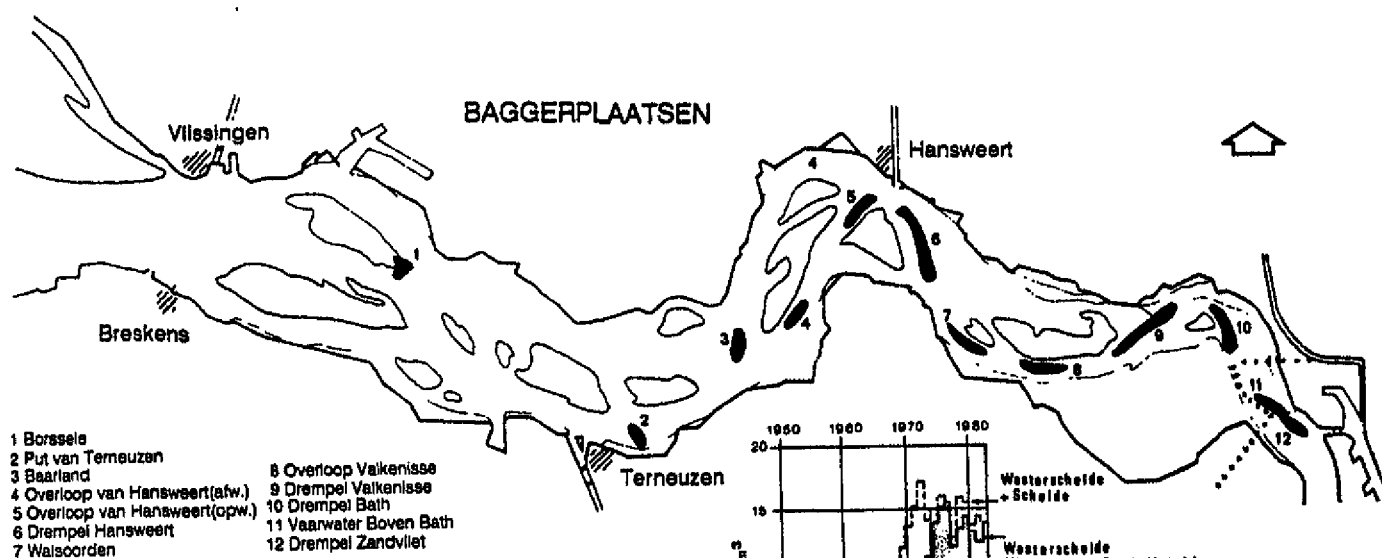
$$Tdl_f/Tdl_m = \delta cl_f/\delta cl_m ,$$

waarin δcl_f en δcl_m de concentratieveranderingen van het fluviatiele- en mariene slib tussen de grens en Hansweert zijn.

Berekeningsresultaten

Invulling van de bekende gegevens uit de bijlagen B7 en B10 in de vergelijkingen geeft het volgende resultaat:

Lokatie	Netto transport [10^3 t/jr.]	
	fluviatiel	marien
Grens	356	166
Hansweert	224	312



Bijlage B10. Tabellen met het berekeningsresultaat van de slibbalans van het Schelde—estuarium voor de aangenomen verwachte situatie (3 bladen)

SLIBBALANS 1975-1985 (NATUURLIJKE TRANSPORTEN)

aangepast: 09/11/92 Variant : Belgische bodem op zelfde niveau!!

algemene factoren: aanslibbing schor [m/jr.] 0.013 (fractie fluviale volgens bijlage B7)
omrekening m3>ton [-] 1

tekenafspraken: belasting, doorvoer zeewaarts, erosie +
onttrekking, doorvoer landwaarts, sedimentatie -

verklaring: K=kanaal; P=polders; N=neerslag; M=(Zoom)meer

Aanpak Belg. gebied: Aanname bodem op zelfde niveau wil zeggen geen slibaccumulatie, dus baggeren ontr. aan nat. transp. -
(deze aanname is terug te vinden in de posten 7. en 8.)

	nummer deelvak	oppervl. [1000m2]	totale sed./er. [1000m3/j]	slibperc. [%<63m]	slibtransporten in het vak totaal [1000V]	fluvial. [1000V]	marin [1000V]
Aanvoer vanuit Boven Zeeschelde					263.00	263.00	0.00
VAKnummer 1							
fr fluv 0.692307							
fr mar 0.307692							
1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	31.00	31.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---			
3. geulen <-2.50m	110		0	2			
4. platen >-2.50m			0				
5. slikken >-2.50m			0				
6. schorren vegetatie		0	---				
7. baggercorrectie	---	---	0				
8. stortcorrectie	---	---	0				
Totaal vak i is doorvoer vak i+1					294.00	294.00	0.00
VAKnummer 2							
fr fluv 0.676923							
fr mar 0.323076							
1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	31.00	31.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---			
3. geulen <-2.50m	210		0	2			
4. platen >-2.50m			0				
5. slikken >-2.50m			0				
6. schorren vegetatie		10	---		-0.13	-0.09	-0.04
7. baggercorrectie	---	---	0				
8. stortcorrectie	---	---	0				
Totaal vak i is doorvoer vak i+1					324.87	324.91	-0.04
VAKnummer 3							
fr fluv 0.6							
fr mar 0.4							
1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	31.00	31.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---			
3. geulen <-2.50m	310		0	10			
4. platen >-2.50m			0				
5. slikken >-2.50m			0				
6. schorren vegetatie		70	---		-0.91	-0.55	-0.36
7. baggercorrectie	---	---	-500	4	-20.00	-12.00	-8.00
8. stortcorrectie	---	---	0				
Totaal vak i is doorvoer vak i+1					334.96	343.37	-8.41
VAKnummer 4							
fr fluv 0.6							
fr mar 0.4							
1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	31.00	31.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---			
3. geulen <-2.50m	410		0	10			
4. platen >-2.50m			0				
5. slikken >-2.50m			0				
6. schorren vegetatie		0	---		0.00	0.00	0.00
7. baggercorrectie	---	---	-600	13	-78.00	-48.80	-31.20
8. stortcorrectie	---	---	0				
Totaal vak i is doorvoer vak i+1					287.96	327.57	-39.61
VAKnummer 5							
fr fluv 0.584615							
fr mar 0.415384							
1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	31.00	31.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---	-120.00	-70.15	-49.85
3. geulen <-2.50m	510		0	10			
4. platen >-2.50m			0				
5. slikken >-2.50m			0				
6. schorren vegetatie		1720	---		-22.36	-13.07	-9.29
7. baggercorrectie	---	---	-700	2	-14.00	-8.18	-5.82
8. stortcorrectie	---	---	400	13	52.00	30.40	21.60
Totaal vak i is doorvoer vak i+1					214.60	297.56	-82.96

VAKnummer 6
fr fluv 0.538461
fr mar 0.461538

1. Zijdelingse belasting	(M)	---	---	---	16.00	16.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
3. geulen <-2.50m	610	---	200	17.5	35.00	18.85	16.15
4. platen >-2.50m	---	---	9	32	2.88	1.55	1.33
5. slikken >-2.50m	---	---	-40	29	-11.60	-6.25	-5.35
6. schorren vegetatie	---	3320	---	---	-43.16	-23.24	-19.92
7. baggercorrectie	---	---	1600	2	32.00	17.23	14.77
8. stortcorrectie	---	---	0	0	0.00	0.00	0.00

Totaal vak i is doorvoer vak i+1 245.72 321.70 -75.98

VAKnummer 7
fr fluv 0.507692
fr mar 0.492307

1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
3. geulen <-2.50m	710	---	200	2	4.00	2.03	1.97
4. platen >-2.50m	---	---	46	53	24.38	12.38	12.00
5. slikken >-2.50m	---	---	-80	48	-38.40	-19.50	-18.90
6. schorren vegetatie	---	5550	---	---	-72.15	-36.63	-35.52
7. baggercorrectie	---	---	0	0	0.00	0.00	0.00
8. stortcorrectie	---	---	-300	2	-6.00	-3.05	-2.95

Totaal vak i is doorvoer vak i+1 157.55 276.93 -119.38

VAKnummer 8
fr fluv 0.461538
fr mar 0.538461

1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
3a. geulen <-2.50m	810	---	690	3.7	25.53	11.78	13.75
3b. geulen <-2.50m	820	---	110	1.3	1.43	0.66	0.77
4. platen >-2.50m	---	---	-230	2	-4.60	-2.12	-2.48
5. slikken >-2.50m	---	---	-130	51	-66.30	-30.80	-35.70
6. schorren vegetatie	---	15420	---	---	-200.46	-92.52	-107.94
7. baggercorrectie	---	---	300	1	3.00	1.38	1.62
8. stortcorrectie	---	---	-1700	2	-34.00	-15.69	-18.31

Totaal vak i is doorvoer vak i+1 -117.85 149.83 -267.68

VAKnummer 9
fr fluv 0.384615
fr mar 0.615384

1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
3a. geulen <-2.50m	910	---	1150	4.7	54.05	20.79	33.26
3b. geulen <-2.50m	920	---	110	1.6	1.76	0.68	1.08
4. platen >-2.50m	---	---	-230	3	-6.90	-2.65	-4.25
5. slikken >-2.50m	---	---	-90	18	-16.20	-6.23	-9.97
6. schorren vegetatie	---	590	---	---	-7.67	-2.95	-4.72
7. baggercorrectie	---	---	700	1	7.00	2.69	4.31
8. stortcorrectie	---	---	0	0	0.00	0.00	0.00

Totaal vak i is doorvoer vak i+1 -85.81 162.15 -247.96

VAKnummer 10
fr fluv 0.338461
fr mar 0.661538

1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
3. geulen <-2.50m	1010	---	110	3.9	4.29	1.46	2.84
4. platen >-2.50m	---	---	-110	1	-1.10	-0.37	-0.73
5. slikken >-2.50m	---	---	-50	18	-9.00	-3.05	-5.95
6. schorren vegetatie	---	0	---	---	0.00	0.00	0.00
7. baggercorrectie	---	---	2100	1	21.00	7.11	13.89
8. stortcorrectie	---	---	-500	1	-5.00	-1.69	-3.31

Totaal vak i is doorvoer vak i+1 -75.62 165.60 -241.22

VAKnummer 11
fr fluv 0.307692
fr mar 0.692307

1. Zijdelingse belasting	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	---	---	---	---	0.00	0.00	0.00
3a. geulen <-2.50m	1110	---	20	1.7	0.34	0.10	0.24
3b. geulen <-2.50m	1121	---	140	1.6	2.24	0.69	1.55
3c. geulen <-2.50m	1130	---	-1520	11.4	-173.28	-53.32	-119.96
4. platen >-2.50m	---	---	-110	4	-4.40	-1.35	-3.05
5. slikken >-2.50m	---	---	10	38	3.80	1.17	2.63
6. schorren vegetatie	---	20	---	---	-0.26	-0.08	-0.18
7. baggercorrectie	---	---	100	1	1.00	0.31	0.69
8. stortcorrectie	---	---	-1400	1	-14.00	-4.31	-9.69

Totaal vak i is doorvoer vak i+1 -280.18 108.81 -388.99

VAKnummer	12						
fr fluv	0.261538						
fr mar	0.738461						
1. Zijdelingse belasting	----	----	----	----	0.00	0.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	----	----	----	----	0.00	0.00	0.00
3a. geulen < -2.50m	1210		-100	4.1	-4.10	-1.07	-3.03
3b. geulen < -2.50m	1220		250	2.1	5.25	1.37	3.88
4. platen > -2.50m			120	20	24.00	6.28	17.72
5. slikken > -2.50m			-60	19	-11.40	-2.98	-8.42
6. schorren vegetatie		700	----		-9.10	-2.38	-6.72
7. baggercorrectie	----	----	0	0	0.00	0.00	0.00
8. stortcorrectie	----	----	-1100	1	-11.00	-2.88	-8.12

Totaal vak i is doorvoer vak i+1 -266.53 107.15 -373.68

VAKnummer	13						
fr fluv	0.230769						
fr mar	0.769230						
1. Zijdelingse belasting	(K+P+N)	----	----	----	88.00	88.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	(K)	----	----	----	-15.00	-3.46	-11.54
3a. geulen < -2.50m	1310		1630	12.2	198.86	45.89	152.97
3b. geulen < -2.50m	1320		250	6.4	16.00	3.69	12.31
3c. geulen < -2.50m	1330		-250	9.3	-23.25	-5.37	-17.88
4. platen > -2.50m			140	4	5.60	1.29	4.31
5. slikken > -2.50m			100	41	41.00	9.46	31.54
6. schorren vegetatie		1270	----		-16.81	-3.81	-12.70
7. baggercorrectie	----	----	0	0	0.00	0.00	0.00
8. stortcorrectie	----	----	0	0	0.00	0.00	0.00

Totaal vak i is doorvoer vak i+1 28.17 242.85 -214.68

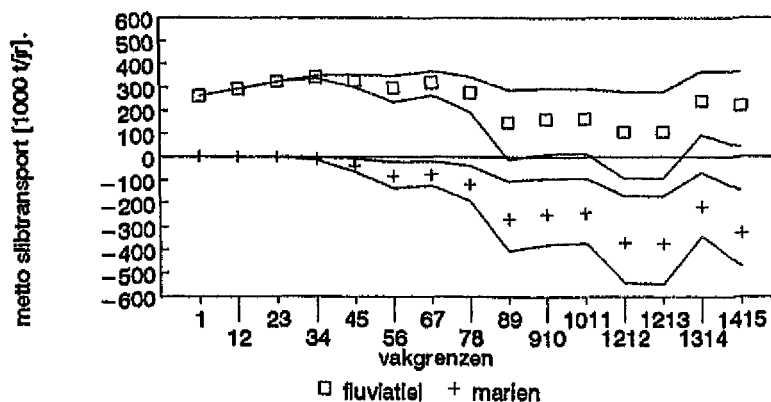
VAKnummer	14						
fr fluv	0.153846						
fr mar	0.846153						
1. Zijdelingse belasting	----	----	----	----	0.00	0.00	0.00
2. Zijdelingse onttrekking	----	----	----	----	0.00	0.00	0.00
3a. geulen < -2.50m	1410		-290	9	-26.10	-4.02	-22.08
3b. geulen < -2.50m	1420		1460	3.6	52.56	8.09	44.47
3c. geulen < -2.50m	1430		-500	5.4	-27.00	-4.15	-22.85
4. platen > -2.50m			-100	14	-14.00	-2.15	-11.85
5. slikken > -2.50m			-250	41	-102.50	-15.77	-86.73
6. schorren vegetatie		970	----		-12.61	-1.94	-10.67
7. baggercorrectie	----	----	1100	1	11.00	1.69	9.31
8. stortcorrectie	----	----	-1100	1	-11.00	-1.69	-9.31

Totaal vak i is doorvoer zee -101.48 222.90 -324.38

Verkorte rekenresultaten

	Cmarien	-21	-24	-22.5				resultaten silttransporten				
	Cfluv.	-27	-31	-29				gemiddeld	bovengrens.	ondergrens.		
	verschil	6	7	6.5								
vak	12C13C	fr.fluvo	fr.fluvb	fr.fluvg	rekenw.	grens	Tfluv	Tmar	Tfluv	Tmar	Tfluv	Tmar
1	-27	1.00	0.43	0.69	0.69	1	263	0	263	0	263	0
2	-26.9	0.98	0.41	0.68	0.68	12	294	0	294	0	294	0
3	-26.4	0.90	0.34	0.60	0.60	23	325	0	325	0	325	0
4	-26.4	0.90	0.34	0.60	0.60	34	343	-8	337	-2	349	-14
5	-26.3	0.88	0.33	0.58	0.58	45	328	-40	288	-10	353	-65
6	-26	0.83	0.29	0.54	0.54	56	298	-83	237	-22	350	-135
7	-25.8	0.80	0.26	0.51	0.51	67	322	-76	246	-20	370	-124
8	-25.5	0.75	0.21	0.46	0.46	78	277	-119	158	-37	347	-190
9	-25	0.67	0.14	0.38	0.38	89	150	-268	-12	-106	288	-406
10	-24.7	0.62	0.10	0.34	0.34	910	162	-248	10	-95	293	-379
11	-24.5	0.58	0.07	0.31	0.31	1011	166	-241	18	-91	294	-370
12	-24.2	0.53	0.03	0.26	0.26	1212	109	-369	-92	-168	281	-541
13	-24	0.50	0.00	0.23	0.23	1213	107	-374	-95	-171	281	-547
14	-23.5	0.42	0.00	0.15	0.15	1314	243	-215	96	-68	369	-340
						1415	223	-324	42	-144	369	-470

Verwachte situatie
spreiding van fractie marien-fluviatiel



Bijlage B11. Tabel met berekeningsresultaten van de bruto slibtransporten

Doorstroomoppervlakte beneden NAP [1000m ²]			op vakgrenzen												
	01	12	23	34	45	56	67	78	89	910	1011	1112	1213	1314	1415
	3	4	5	9	10	13	17	21	27	31	35	40	46	61	80
Berekening eb en vloed volume uit Q-Ac RELATIE [1000000m ³] voor gem. jaargetij volgens nota WWKZ-83.V008															
	01	12	23	34	45	56	67	78	89	910	1011	1112	1213	1314	1415
Eb	64	74	91	138	153	187	241	294	366	419	473	547	613	809	1054
Vloed	66	77	94	140	155	189	243	296	368	422	475	550	616	812	1057
Gem.Eb/Vl	65	75	92	139	154	188	242	295	367	421	474	548	614	811	1056
Dieptetijgemiddelde slibconcentratie op vakgrenzen [mg/l], fractie <63 µ															
	01	12	23	34	45	56	67	78	89	910	1011	1112	1213	1314	1415
gem+std	209	156	138	128	140	153	141	122	102	89	89	95	96	100	98
gem	147	118	110	106	114	116	102	88	73	63	64	70	72	73	68
gem-std	85	80	81	84	88	79	62	54	44	36	38	45	47	45	37
Vermenigvuldigingscoëfficiënten, afgeleid uit slibconcentraties te Rupel, grens en Vlissingen voor het berekenen van de bruto slibtransporten door de vakgrenzen per kwartaal.															
kwartaal	01	12	23	34	45	56	67	78	89	910	1011	1112	1213	1314	1415
1	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.4	1.4	1.3	1.7
2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.9	0.9	0.8	0.7
3	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.7	0.7	0.7	0.5
4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.1	1.1	1.2	1.2
Bruto slibtransport door de vakgrenzen volgens de debieten [ton/getij] voor gem. jaargetij															
	01	12	23	34	45	56	67	78	89	910	1011	1112	1213	1314	1415
gem+std	13539	11768	12760	17841	21588	28822	34075	35969	37470	37437	42168	52098	58985	81055	103443
gem	9523	8902	10125	14775	17579	21852	24529	25945	26817	26290	30086	38388	43931	58765	71249
gem-std	5506	6035	7490	11708	13570	14882	14983	15921	16163	15143	18004	24678	28878	36475	39055
Seizoensspreiding van de bruto slibtransporten [ton/getij] a.d.h.v. verdeling slibconcentraties over de kwartalen															
	01	12	23	34	45	56	67	78	89	910	1011	1112	1213	1314	1415
kwartaal1	5714	7121	8100	11820	14063	19667	36794	38917	40225	39435	48138	53743	61504	76394	121123
kwartaal2	10475	10682	11137	16252	21094	21852	22076	23350	24135	23661	21060	34549	39538	47012	49874
kwartaal3	9523	7121	10125	14775	17579	19667	14718	15567	16090	15774	15043	26872	30752	41135	35625
kwartaal4	12379	10682	11137	16252	19337	26223	24529	25945	26817	26290	36103	42227	48324	70518	85499
zomer	9999	8902	10631	15513	19337	20760	18397	19459	20112	19717	18052	30710	35145	44074	42749
winter	9047	8902	9619	14036	16700	22945	30662	32431	33521	32862	42120	47985	54914	73456	103311

Appendix A1

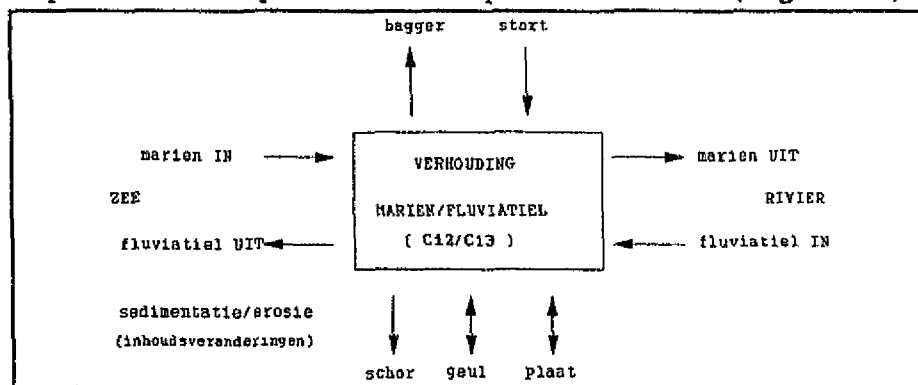
Globale beschrijving van de fysische processen m.b.t. de slibtransporten

A1.1. Inleiding

De slibtransporten staan onder voortdurende invloed van de volgende parameters:

- Getijbeweging, wind en neerslag
- Biologische en chemische processen
- Kunstmatige ingrepen in het regime

De complexiteit maakt een direkte bepaling van de slibtransporten vanuit de verschillende processen onmogelijk. Op grond hiervan is in dit rapport gekozen voor een balansmatige aanpak, waarbij wordt uitgegaan van de gevolgen van de slibtransportprocessen in plaats van de processen zelf (figuur A1).



figuur A1 Aanpak slibbalans Scheldeestuarium

De weggelaten processen worden in deze appendix behandeld. Bij deze beschrijving zijn de biologische processen buiten beschouwing gelaten.

A1.2 Processen in de waterfase

De morfologische dynamiek in de waterfase ontstaat door de grote variatie van stroomsnelheden en sedimentconcentraties gedurende een getij in het gebied. Deze dynamiek wordt mede beïnvloed door menselijke ingrepen in het estuarium. Door de voortdurende turbulentie in het water bevinden zich continue fijne slibdeeltjes bovenin in de waterkolom ("washload"), waardoor die snel door het estuarium worden verspreid. Bij het toenemen van de stroomsnelheid, waardoor de kritische schuifspanningsnelheid wordt overschreden gaat de waterkolom zich meer vullen met grovere zwevende deeltjes uit de scheidingslaag met de waterbodem en de geërodeerbare deeltjes van de waterbodem. De beschikbaarheid van erodeerbare deeltjes in de voornamelijk zandige waterbodem is daarbij een limiterende faktor, die afhankelijk is van vele factoren.

De opgewervelde slibdeeltjes vormen vlokken waarvan grootte bepaald wordt door fysisch-chemische processen, ("suspended load"). Door het getij pendelen deze slibdeeltjes heen en weer langs de getijweg. Bij de afname van de stroomsnelheid zakken de zwaardere deeltjes het eerste uit in de waterkolom, waarbij de slibvlokken uit elkaar kunnen vallen.

Al.3 Processen in de geulbodem

De dynamiek van het slib in een overwegend zandig estuarium is zichtbaar in de morfologische ontwikkelingen van de zandige waterbodem. In de zandige waterbodem kan door sedimentatie slib worden geaccumuleerd, terwijl door erosie slib in suspensie kan worden gebracht. Het sliblaagje bovenop de zandige waterbodem van de geulen is gevoeliger dan zand voor horizontale schuifspanningen en gaat daarmee eerder in suspensie. Door het sedimentatieproces is de slibconcentratie op de waterbodem relatief hoog en in de waterbodem relatief laag. Het slib in de bodem heeft nl. een lagere valsnelheid en is veel homogener verdeeld in de waterkolom dan zand, waardoor bij afnemende stroomsnelheden het zand eerder sedimenteert dan slib. Rond de kentering treft men dan ook een dunne sliblaag op de waterbodem met daaronder een slibarme waterbodem.

De dunne sliblaag op de waterbodem is direkt beschikbaar om te resuspenderen zodra de kritische erosiesnelheid van slib wordt overschreden. De waterkolom kan door deze sliblaag steeds snel worden gevuld met slibdeeltjes, waardoor in de waterfase gedurende een getij een terugkomend patroon van de slibconcentratie te zien valt. Naar gelang de sterkte van de stroomsnelheid wordt de waterkolom extra gevuld door slib vrijkomend door erosie van zand uit de slibarme waterbodem. Hierdoor is gedurende een doottij-springtijcyclus een duidelijke variatie van de gemiddelde slibconcentratie te zien.

Hoewel slib zich schijnbaar autonoom gedraagt t.o.v. zand wordt de uitwisseling met de actieve toplaag bepaald door het erosie sedimentaire proces van het zand in de waterbodem.

Al.4 Processen m.b.t. de intergetijdegebieden (platen, slikken en schorren)

Platen

De platen vormen de overgangen tussen eb- en vloedgeulen. Tussen de geulen en de plaat vindt door getij en golven transport van sediment plaats. Door het baggeren en storten van sediment wordt dit transport in sommige gebieden in sterke mate op kunstmatige wijze beïnvloedt.

De volgende fasen zijn onderscheiden in het "geul-plaattransport":

- a. Drooggevallede plaat: erosie plaatrand door stroom en golven
- b. Onderlopende plaat : geul-plaattransport naar de plaat toe door komberging. Flinke zeegang veroorzaakt erosie door brekende golven.
- c. Ondergelopen plaat : geul/plaattransport over de plaat heen. Tijdens max. stroomsnelheid vindt erosie, tijdens kentering vindt sedimentatie plaats.
- d. Droogvallende plaat: Relatief hoge snelheden bij het afstromen zorgen ervoor veel fijn sediment wordt meegevoerd. Flinke zeegang kan hierbij voor een extra effect zorgen.
- e. Drooggevallede plaat; Na de afstroming van de plaat vindt nog zijdelingse uitvloeijing van water plaats.

Er zijn verschillen tussen zomer en winter als gevolg van interne processen (o.a. zeegang). Hierdoor kan 's zomers fijn materiaal sedimenteren, dat in de winter erodeert.

Appendix blz. 3

SITUATIE/SEIZOEN	GETIJSTROMING (dubbeldaags getij)	ORBITAALSTROMING (wind-/hekgolven)
zomer	aanvoer materiaal	weinig erosie
winter	aanvoer materiaal	veel erosie

Slikken

Slikken zijn ondiep gelegen slibrijke gebieden, waar door de situering (gunstige hydraulische omstandigheden) afzetting van slibrijk materiaal kan plaatsvinden. Deze gebieden zijn vaak gelegen langs de oevers van het estuarium. Ze zijn ook vaak gelegen voor schorgebieden. ze kunnen ook op plaatgebieden voorkomen.

Door de ontoegankelijkheid van deze gebieden is aan de aanslibbings en erosiesprocessen tot nu toe weinig aandacht geschonken.

Schorren

Een schorrengedied is over het algemeen een sterk begroeid areaal waar afzetting van materiaal plaatsvindt. De schorren in het Schelde-estuarium zijn kwantitatief erg belangrijk voor de slibaccumulatie door hun grote oppervlakte. Voor wat betreft de invloed van de hydraulische factoren op de slibtransporten zijn de volgende processen te onderscheiden:

SITUATIE/SEIZOEN	GETIJSTROMING (dubbeldaags getij)	ORBITAALSTROMING (wind-/hekgolven)
zomer	aan- en afvoer van materiaal	weinig aanvoer van materiaal
winter	aan- en afvoer en uitschuring randen	aanvoer van veel materiaal

Het sediment wordt in de schorgebieden getransporteerd via een stelsel van geulen. Achterin deze geultjes beweegt het getij sterk vertraagd t.o.v. het estuarium. Er vindt enige opstuwing plaats, waardoor soms hoge stroomsnelheden ontstaan. Hierdoor is materiaaltransport tot ver achterin de geulen mogelijk. De overspoelingsfrequentie van de schorren en daarmee de mate van afzetting is sterk afhankelijk van de hoogteligging.

De schorren zijn vrijwel altijd definitieve sedimentatiegebieden.

Appendix blz. 4

Appendix A2

Omrekening kubieke meters sediment naar tonnages droge stof

Algemene formule : $SG = G / V$

SG ²²⁸ soortelijk gewicht

G = Gewicht [ton]

V = Volume [kubieke meters]

Voor een bodemonmonster, bestaande uit sediment en water geldt:

$$G_t = G_s + G_w \quad \text{Steel } G_t \approx 1.60 \text{ ton} / \text{lm}^3$$

anders geschreven :

$$V_s * SG_s + V_w * SG_w = 1.6 \quad \rightarrow \quad V_s * 2.65 + V_w * 1 = 1.6 \quad \dots\dots\dots[1]$$

ook geldt : $V_s + V_w = 1$ [2]

kombinatie van [1] en [2] geeft : $V_s \approx 0.36$ en $V_w \approx 0.64$

Hoeveel volume neemt met deze getallen 1 ton droog sediment in ?

Stel dit volume bedraagt $N \text{ m}^3$.

Voorgaande berekening liet zien dat de term van de droge stof is :

$$V_S * SG_S = G_S \rightarrow 0.36 * N * 2.65 \approx 1 \rightarrow N \approx 1.05 \text{ m}^3$$

Konklusie : VOOR GOED GEPAKT SEDIMENT GELDT: 1 M³ BEVAT 1 TON DROGE STOF

$$\text{STEL } Gt \approx 1.1 \text{ t/lm}^3$$

toepassen van formule [1] en [2] geeft: $V_s \approx 0.06$ en $V_w \approx 0.94$

dus voor de droge stof geldt : $0,06 * N * 2,65 \approx 1 \rightarrow N \approx 6,29 \text{ m}^3$.

Konklusie : VOOR ZEER SLAPPE SEDIMENT GELDT: 6 M³ BEVAT 1 TON DROGE STOF

Opmerkingen:

Het holtepercentage van het sediment in de waterbodem bedraagt ca. 40%

Het holtepercentage van de specie, die in de rivier wordt gestort $\approx 80\%$.

Appendix A3

Opmerkingen omtrent de sedimentbalans van het Schelde-estuarium

A3.1. Westerscheldegebied

Recent zijn op systematische wijze de inhoudsveranderingen van de Westerschelde en Westerscheldemond voor de periode 1960 tot 1985 in stappen van 5 jaar berekend [Berg et al 1991]. Daarbij is zoveel mogelijk ook het intertijdsgebied betrokken. De inhoudsveranderingen zijn gebruikt voor de slibbalans. Bij de interpretatie van de inhoudsveranderingen moet rekening worden gehouden met het feit dat de grootschalige natuurlijke morfologische veranderingen op lange termijn plaatsvinden. Dit betekent dat er in het systeem gebieden zijn die tientallen jaren alleen sedimenteren en daarnaast gebieden, die jarenlang eroderen.

De inhoudsberekeningen over de periode 1969 tot 1985 laten enerzijds een grote verdieping als gevolg van het baggeren zien en anderzijds laten ze een (geringe) toename van de oppervlakte aan plaatgebieden zien.

Kenmerkend voor de inhoudsveranderingen in deze periode zijn:

- Oostelijk gedeelte Westerschelde sterke verdieping na 1969 en geringe vergroting van het intergetijdsgebied.
- Westelijk gedeelte Westerschelde verdieping in de periode tot 1969 en zeer geringe vergroting van het intergetijdsgebied.

A3.2. Belgische Schelde gebied

De inhoudsveranderingen tussen Rupel en de grens zijn bepaald over de periode 1968 - 1981. De inhoudsveranderingen bovenstrooms Antwerpen blijken daarbij verwaarloosbaar te zijn. Dit volgt ook uit de stabiele ligging van de drempel van Burcht. Het meest westelijke deel van de grens tot aan de Zandvlietsluis is door baggerwerken op met name de drempels beneden N.A.P. verruimd met ca. 40.5 miljoen m³. Door de verdieping bevindt de geulbodem van de Belgische Schelde zich tot op het nivo van de zgn. Boomse klei.

De drempels zijn niet gelijkmatig verdiept. De drempels vertonen tot 1950 een zeer stabiele ligging. In de periode 1950 - 1970 vindt zeer regelmatig een geringe verdieping plaats en van 1970 tot 1980 een sterke verdieping. De periode na 1980 vertoont weer een stabilisering in de drempelligging.

Door België werd in de periode tot 1950 jaarlijks tussen 0.5 en 1.0 miljoen m³ specie netto aan de Beneden Zeeschelde onttrokken t.b.v. het onderhoud van de rivier. Dit materiaal bestaat voor 95% uit zand. Verondersteld wordt dat de sedimentonttrekking tot 1950 overeenkomt met de natuurlijke zandimport uit de Westerschelde. De verdiepingen en aanleg van de leidammen bij de grens hebben het netto zandtransport mogelijk beïnvloed. Verondersteld dat de netto-onttrekking na 1980 van ca 1.0 miljoen m³/jaar. overeenkomt met de netto zandimport uit de Westerschelde.

Op de Bovenzeeschelde wordt de vaarweg ten behoeve van de scheepvaart op diepte gehouden door zandwinning op de Rupelmondeplaat in de orde 0 tot 0.5 10.⁶ m³/jr. Verondersteld wordt dat het evenwichtsverhang van de rivierbedding zich heeft ingesteld op de grote ingrepen van de zeventiger jaren en dat de zandwinning overeenkomt met de natuurlijke zandtoevoer uit het riviergedeelte bovenstrooms van Rupelmonde.

Uit de vergelijking van de onderzoeken door Wartel en Bastin in 1970 en 1987 en RWS directie Zeeland rond 1980 volgt dat max. 5.10.⁶ m³ slib kan zijn

Appendix blz. 6

gebufferd in de waterbodem van de Beneden Zeeschelde over een periode van ongeveer 10 jaar. De gegevens van RWS Dir Zeeland zijn daarbij waarschijnlijk een overschatting doordat veel slibrijke gebieden zijn bemonsterd. Over de veranderingen van de schorren en slikken in België is weinig bekend. Wel is bekend dat de Durme (stroomopwaarts van Schelle) sterk is dichtgeslibd na de afdamming bij Lokeren (mondelinge informatie drs.P.Meire).

Appendix A4Kunstmatige sedimenttransporten

De kunstmatige transporten zijn een gevolg van het baggeren en storten. Kwantitatieve informatie over de baggerwerken is vanaf 1940 bekend over het gehele Scheldeestuarium [Maldegem 1985]. In de kunstmatige transporten zijn de effecten van zandwinningen, specielozingen, onderhoud van havens en de vaarweg, en zand onttrekkingen t.b.v. de aanleg van grote waterbouwkundig werken als havens, wegen, dijken en opspuitingen verdisconteerd (bijlage 16).

De transporten door baggeren zijn als volgt in te delen:

- a. Baggerwerken t.b.v. onderhoud en verdiepen vaarweg $\approx 13 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jr.}$
- b. Zandwinning voor derden en werken $\approx 4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jr.}$
- c. Storten van specie uit haven- en kanaalwerken ≈ 2 tot $3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jr.}$
- d. Baggerwerken voor de onderhoud van de havens ≈ 2 tot $3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jr.}$

Baggerwerken t.b.v. onderhoud en verdiepen zorgen voor belangrijkste kunstmatige transporten. Baggerwerken worden sinds 1940 door België verricht op de Westerschelde en de Belgische Beneden Zeeschelde. Een gedeelte van de op Belgisch gebied gebaggerde specie wordt gestort in het oostelijk deel van de Westerschelde. In de volgende tabel is hiervan een overzicht gegeven. Het betreft gemiddelden voor de periode voor de periode 1981 t/m 1985.

Gebakkerd vak	Gestort [$10^6 \text{ m}^3/\text{jr.}$]									
	3:	5:	6:	7:	8:	10:	11:	12:	13:	14:
3: 0.7	0.2	0.2								
4: 0.6		0.2								
5: 1.6		0.9			0.4					
6: 1.8		0.1	0.1	0.3	1.3					
8: 2.7		0.1			2.3	0.1		0.1		
9: 0.7						0.4	0.1	0.1		
10: 3.4						1.3	1.3	0.8		
11: 0.3							0.2	0.1		
14: 1.1									0.6	0.5

(de baggerspecie bestaat hoofdzakelijk uit weinig slibhoudend zand)

Appendix A5Berekening m.b.t. het ontstaan van een slibrijke grenslaag tussen water bodem en waterfase [Langerak 1989.1]

Om de discrepantie tussen de slib/zandverhouding (1 op 1) in de waterfase en de slib/zandverhouding (1 op 20) in de bodemfase te verklaren, hebben we een schematisatie gemaakt die gebaseerd is op twee veronderstellingen.

1. Rond de kentering zet zich bij afnemende snelheid in de geul, eerst al het zand af en wel als laag boven op de bestaande zandlaag, pas daarna zet ook het slib zich af en wel als een aparte grenslaag. Deze laatste laag blijft in het SAWES-model tot de waterfase behoren.
2. Als de snelheden na kentering toenemen in de geul, wordt de bovenliggende grenslaag eerst weer volledig opgenomen, ook in de gebieden waar sedimentatie plaatsvindt.

Het slib uit de "waterfase" wordt dus tijdens de kentering tijdelijk geparkeerd op de bodem.

De tijdens kentering afgezette laag slib is maar dun. Om de gedachte te bepalen veronderstellen we dat de waterfase tijdens maximum stroom 100 mg/l zand en 100 mg/l slib bevat. Van het slib wordt 5 mg/l in de zandbodem opgeslagen. Van de resterende 95 mg/l slib, die niet in het zand opgeslagen is, blijft 25 mg/l in de waterfase achter. Voor de resterende (95-25) mg/l nemen we aan dat ze neerslaat als één dunne laag. Bij een aangenomen waterdiepte van 10 m slaat zo $(95 - 25) 10^3 \cdot 10 = 0,7$ kg materiaal per m^2 neer. Bij een holtepercentage van 80% en soortelijke massa van de mineralen van $2,6 \text{ ton}/m^3$ vertegenwoordigt dit een laagdikte van 1,3 mm.

De tijdens kentering afgezette laag zand is nog dunner. Om de gedachte te bepalen veronderstellen we dat de volledige zandmassa van 100 mg/l neerslaat. Met een holtepercentage van 60% en een soortelijke massa van $2,6 \text{ ton}/m^3$ vertegenwoordigt dit een laagdikte van 0,9 mm per kentering.

Uit de laagdikte van het per kentering afgezette zand is overigens ook een schatting te maken van de maximum sedimentatie en erosie. Per jaar komen 1410 kenteringen voor. Met een laagdikte van 0,9 mm en dan levert dit een maximum erosie of sedimentatie van $\pm 1,25$ m. Dergelijke waarden worden in de natuur ook gevonden.

De twee eerder gedane veronderstellingen schematisaties zijn wel te onderbouwen:

Veronderstelling 1: uitschifting zand en slib aan de bodem.

Dat de uitschifting van zand en slib plaatsvindt is te onderbouwen met een gedachte-experiment. Hiervoor gaan we uit van de concentratieverdeling van het slib en het zand over de waterdiepte tijdens een maatgevende maximum stroomsnelheid.

Vervolgens nemen we aan dat de stroomsnelheid na het bereiken van de maatgevende waarde onmiddellijk overgaat in de kentering. Verder nemen we aan dat de kentering lang genoeg duurt om alle materiaal uit de waterkolom neer te laten slaan.

De concentratieverdeling tijdens maximum stroom is volgens de literatuur te beschrijven met:

$$\frac{C_h}{C_{bod}} = e^{-w \cdot (h-h_b)/E} \quad (1)$$

Hierin is:

C_h : de concentratie op hoogte h

C_{bod} : de concentratie vlak boven de bodem (op hoogte h_{bod} boven het referentievlak)

h : de waterhoogte boven het referentievlak

h_b : de bodemligging boven het referentie vlak

E : de verticale diffusiecoëfficiënt, waarvoor een reële waarde bij een waterdiepte 10 m en een snelheid van 1 m/s 0,03 m²/s is

w : de valsnelheid, waarvoor voorzand $w_z = 0,02$ m/s een reële waarde is en voor slib $w_s = 0,002$ m/s reël is.

Verder geldt:

$$\frac{C}{C_{bod}} = \frac{u^*}{15w} \cdot (1 - e^{-15 w/u^*}) \quad (2)$$

Hierin is

C : een te kiezen referentieconcentratie

u^* : de schuifspanningssnelheid met als een reële waarde 0,5 m/s

$$\text{Uit (2) volgt voor zand } \frac{C}{C_{bod}} = 0,75 \quad (w = 0,02 \text{ m/s}) \quad (3)$$

$$\text{en voor slib volgt } \frac{C}{C_{bod}} = 0,97 \quad (w = 0,002 \text{ m/s}) \quad (4)$$

Uitgaande van eenzelfde referentieconcentratie voor zand en slib is met (3) en (1) en met (4) en (1) een volgende genormeerde verdeling te berekenen:

hoogte t.o.v. bodem	C_h/C zand	C_h/C slib
10 m	0,2%	68%
5 m	5%	74%
3 m	18%	84%
1 m	68%	96%
$\frac{1}{2}$ m	95%	100%
0 m	133%	103%

We zien uit de tabellen dat de genormeerde concentratieverdeling van het slib over de diepte relatief gelijkmatig is en dat de genormeerde verdeling van het zand zeer hoge concentraties geeft aan de bodem en zeer lage aan het oppervlak.

Nemen we nu aan dat na de maatgevende snelheid onmiddellijk een voldoende lange kentering optreedt, dan kunnen we uit de zand/slibverdeling over de diepte kwalitatief de vorming van een grenslaag van puur slib verklaren. Het zand in de waterfase bevindt zich nl. voor een groot percentage in de onderste meter(s). Het zand in de onderste meter(s) heeft een hoge valsnelheid en een korte af te leggen weg. Het zal daardoor direct na de kentering in een veel grotere massa sedimenteren dan het slib waarvoor het "tegendeel" geldt. De af te leggen weg is voor het slib relatief gezien langer en de valsnelheid is kleiner. De slibsedimentatie zal daardoor een lager niveau hebben en langer doorgaan dan de zandsedimentatie.

Appendix blz. 10

We kunnen e.e.a. kwantificeren met een berekening. Als we namelijk op tijdstip t na het moment van kentering kijken is een onderste laag zand of slib neergeslagen met een dikte $h=w.t.$

De slib/zandmassa M onder het niveau h is daarbij te beschrijven met

$$M = \int_0^h \rho \, d(h) \quad (5)$$

Voeren we nu in (5) de variabele t in i.p.v. h dan geldt met de introductie van (1) in (5):

$$M = \int_0^T \rho \, C_{\text{bod},w} e^{-w^2 t/E} dt, \text{ ofwel } M = -C_{\text{bod}} \frac{E}{w} (e^{-w^2 t/E} - 1) \quad (6)$$

Hiermee is de neergeslagen hoeveelheid als functie van de tijd te bepalen. Als we de zand- en slib concentraten op 100 mg/l stellen volgen hieruit de neergeslagen hoeveelheden van de onderstaande tabel (met tussen haakjes de cumulatieve hoeveelheden):

Tijd seconden	neergeslagen slib gr/m ²		neergeslagen zand gr/m ²		slibpercentage in mengsel
0-30	0,006	(0,006)	0,076	(0,066)	7%
30-60	0,006	(0,012)	0,04	(0,16)	13%
60-120	0,013	(0,025)	0,05	(0,19)	20%
120-240	0,023	(0,048)	0,03	(0,20)	43%
240-480	0,048	(0,096)	0,01	(0,10)	83%
480-960	0,090	(0,186)	0,00	(0,20)	100%
960-1920	0,162	(0,348)	0,00	(0,20)	100%
1920-3840	0,271	(0,600)	0,00	(0,20)	100%
3840-5000	0,151	(0,751)	0,00	(0,20)	100%

Eerst vormt zich volgens de tabel een laag met een hoog zandgehalte (80%) en daarna een laag met een hoog slibgehalte (100%).

Veronderstelling 2: Snelle erosie van slib na kentering

Ook de aanname van de snelle en eerdere erosie van slib na de kentering is aannemelijk te maken. Uit literatuurgegevens blijkt dat het grootste deel van het sliblaagje (grenslaag) geërodeerd is voor er sprake is van enige erosie van zand.

Voor de erosie van zand en slib moet de bodemschuifspanning een drempelwaarde τ crit. overschrijden. In de literatuur vinden we voor zand met een mediane korreldiameter van 200 μ een τ crit. van 0,2 N/m². Voor vers slib geldt een veel lagere drempelwaarde, nl. τ crit. is 10 μ N/m².

In de periode tussen het overschrijden van τ crit. slib en τ crit. zand kan het sliblaagje volledig geërodeerd zijn zoals uit de volgende berekening blijkt.

Appendix blz. 11

Voor de erosie van slib wordt overwegend de volgende formule gebruikt:

$$\frac{\delta M}{\delta t} = M_s (\tau - \tau_{\text{crit.}})$$

Hierin is:

M_s : een coëfficiënt met als waarde voor vers slib 10^{-2} s/m

τ :

$\tau_{\text{crit.}}$: drempelschuifspanning voor de erosie van slib met voor vers slib als waarde 10^{-4} N/m² (vrijwel nul)

Uit de formule is te berekenen dat bij 0,2 N/m² ($\tau_{\text{crit.}}$) de erosie van slib $2 \cdot 10^{-3}$ kg/s bedraagt. De bodemschuifspanning van 0,2 N/m² wordt over het algemeen 20 minuten na kentering overschreden. Nemen we aan dat de sliberosie over deze periode gemiddeld $\frac{1}{2} \times 2 \cdot 10^{-3}$ kg bedraagt, dan kan er 1,2 kg slib geërodeerd zijn. Dit is meer dan de 3/4 kg waarvan we aannamen dat ze per getij tijdens de kentering afgezet werd.