

Studierapport no. 16

RUIMTELIJKE EN TEMPORELE
VARIABILITEIT VAN SLIBTRANSPORTEN
IN DE WESTERSCHELDE

I.C.M. Helsloot
C. Storm
o.l.v.
Drs. P. Hoekstra

met dank aan
Drs. F.H.I.M. Steyaert
Ing. D.C. van Maldegem

RIJKSUNIVERSITEIT UTRECHT
Geografisch Instituut

Utrecht, augustus 1988

Studierapport no. 16

UITGAVE IN DE REEKS WESTERSCHELDE STUDIES

Informatie:

Coördinatiecentrum Westerschelde Studies
* Geografisch Instituut - Rijksuniversiteit Utrecht *
Dr. W.J. Scheele, project-coördinator
Heidelberglaan 2, tel: 030-531399/531368
3508 TC UTRECHT NL

VOORWOORD

In het kader van het doctoraalprogramma Fysische Geografie aan de Rijks Universiteit te Utrecht, is in een gedeelte van de Westerschelde een veldwerk uitgevoerd waarvan hier de rapportage volgt. In dit verband is tevens een stage van drie maanden bij de Dienst Getijde Wateren te Middelburg toegevoegd.

De voorbereidingen, het lezen van literatuur, het opstellen van een meetprogramma binnen de gestelde doeleinden en de verwezenlijking hiervan op organisatorisch vlak zijn in april 1987 begonnen. In de periode vanaf half mei tot en met begin november 1987 zijn van tijd tot tijd metingen verricht. Het laboratoriumwerk, het opzetten van een databestand en het verwerken van de gegevens, heeft plaatsgevonden van juni 1987 tot en met april 1988. De afronding, in de vorm van een rapportage heeft de maanden mei en juni 1988 in beslag genomen.

Een aantal personen zijn wij zeer erkentelijk voor de door hen geleverde hulp en steun.

Jan Theune en Willem Verlinde, Dienst Getijde Wateren, voor het contact met Meetdienst Zeeland te Vlissingen (schepen, materiaal) en voor hun praktische hulp op respectievelijk de "Zeekat" en de "Delta".

Jan Provoost en Chris Scheers, Meetdienst Zeeland, voor hun medewerking met logistieke zaken.

De bemanning van de "Delta", voor de welwillendheid en efficiëntie bij de drie bodembemonsteringen in het Middelgat.

De bemanning van de "Zuiderdiep", voor de bodembemonstering in de geul van de Molenplaat en in het bijzonder voor de ervaring met een boot op de Brouwerplaat droog te vallen. De rijkspolitie is zo vriendelijk geweest ons naar de haven te brengen.

Peter Doorenweerd, voor de excursie op de Zeekat en het dragen van onze watermonsters.

Jan Lastdrager en Piet van Dijke, respectievelijk schipper van de "Agger" en schipper van de "Zeekat": met hen hebben we vele uren doorgebracht al pendelend tussen Hansweert en de Zeekat en op de Zeekat zelf. Piet heeft ons altijd weten te versterken met een kop tomatensoep. Met Jan hebben we graag gediscussieerd over de mooie dingen in het leven. Allebei zeer bedankt.

Onze begeleiders vanuit Middelburg, Frank Steyaert en Dirk van Maldegem, voor hun tips en discussies. Vooral Dirk voor de assistentie op onze eerste vaardagen en voor het verzenden van nota's cq gegevens.

Als laatste willen we Piet Hoekstra bedanken, onze begeleider in Utrecht. Niet alleen omdat dit gebruikelijk is maar vooral omdat hij ons op de juiste momenten op de goede weg wist te sturen.

Wij hebben dit onderzoek in de Westerschelde met veel enthousiame uitgevoerd, zeker niet in de laatste plaats door de plezierige samenwerking met hiervoor genoemde, maar ook ongenoemd gelaten personen.

Met vriendelijke groet, Irene Helsloot en Kees Storm.

Utrecht, augustus 1988.

INHOUDSOPGAVE

	blz
VOORWOORD	1
1. Inleiding	6
2. Werkwijze	11
2.1. Bodembemonstering	11
2.1.1. Inleiding	11
2.1.2. Van Veen grijper	11
2.1.3. Plaatsbepaling bodembemonsteringsgebied	12
2.1.4. Laboratorium analyse	13
2.1.5. Data opslag	14
2.2. Metingen in de waterkolom	14
2.2.1. Inleiding	14
2.2.2. Meetprogramma Zeekat	15
2.2.3. Laboratorium analyse	17
2.2.4. Data opslag	17
3. Slibgehalten in de bovenste bodemlaag	19
3.1. Inleiding	19
3.2. Ruimtelijke en temporele verdeling van bodemslib- gehalten in het bodembemonsteringsgebied	19
3.3. Statistische analyse	23
3.3.1. Inleiding	23
3.3.2. Regressieanalyse	23
3.3.3. Variantieanalyse	24
3.3.4. Semivariantie	25
3.3.5. Temporele variatie in slibgehalten per meet- punt	26
3.3.6. Samenvatting van op statistiek gebaseerde conclusies	28
3.4. Slibuitwisseling tussen bodem en waterkolom	28
3.4.1. Inleiding	28
3.4.2. Beschikbaarheid van slib in de waterkolom	29
3.4.3. Omstandigheden die erosie en resuspensie beïnvloeden	30
3.4.4. Omstandigheden die de weerstand aan de bodem bepalen	32
3.4.5. Ruimtelijke differentiatie in bodemslibge- halte	33
3.5. Koppeling van de onderzoeksresultaten met theorie	33
3.6. Wijze van bemonstering, vergelijking met bestaande kartering	35
4. Processen in de waterkolom	38
4.1. Inleiding	38
4.2. Hydrodynamica en sedimenttransport	39
4.3. Beschrijving stroomsnelheids-variaties	41
4.4. Beschrijving troebelheids-variaties	52
4.5. Beschrijving chloriniteits-variaties	52
4.6. Metingen positie Zeekat	53
4.7. Discussie	53
4.7.1. Stroomsnelheid	53
4.7.2. Troebelheden	54
4.7.3. Chloriniteiten	56
4.8. Literatuurdiscussie	58

5. Transporten	61
5.1. Bodemberging slib	61
5.2. Bespreking resultaten	63
5.2.1. Dynamiek bodemslibberging	63
5.2.2. Vergelijking met eerste slibbalans Westerschelde	65
5.3. Suspensietransporten van slib	67
5.3.1. Berekening suspensietransport per eenheid van breedte	67
5.3.2. Schatting slibtransporten op Zeekatlocatie	67
5.4. Interpretatie van het karakter van suspensie-transport op de Zeekatlocatie	74
6. Conclusies	76
LITERATUUROPGAVE	79
APPENDIX A Korrelgrootte analyse bodemonsters	i
APPENDIX B Slibconcentratie bepaling Watermonsters	ii
APPENDIX C De Partech 7000 3RP Troebelheidsmeter (type S 1000)	iii
APPENDIX D Golfcondities in het bemonsteringsgebied en de invloed hiervan op de bodem	viii

LIJST VAN FIGUREN

1. 1. Ligging van het onderzoeksgebied.
1. 2. Het bodembemonsteringsgebied.

2. 1. De Van Veen grijper.
2. 2. Het meetpontoon de Zeekat.

3. 1. Verdeling in bodemslibgehalte (%), gemeten in mei 1987.
3. 2. Verdeling in bodemslibgehalte (%), gemeten in september 1987.
3. 3. Verdeling in bodemslibgehalte (%), gemeten in november 1987.
3. 4. De karakteristieke vorm van een semivariogram, waarbij de experimenteel geschatte waarde van de semivariantie zijn gepast in een sferisch model (—) en een exponentieel model (---) (Burrough, 1986).
3. 5. a) Ruimtelijke verdeling van het gemiddelde slibgehalte over de drie bemonsteringsperioden.
b) Ruimtelijke verdeling van de variatiecoëfficiënt.
3. 6. Processen in de waterkolom en op het grensvlak met de bodem, die de mate van resuspensie en uitwisseling met de bodem bepalen (Nichols, 1985).
3. 7. Modellen van tijdschalen in resuspensie in de vorm van tijdsnelheidsoscillaties van de momentane, locale stroomsnelheid. Figuren A-D zijn overgenomen uit Allen (1974), (Nichols, 1984).
3. 8. Detail bodembemonstering van De Looff (1978).

4. 1. De verdeling van de schuifspanning binnen het logaritmische snelheidsprofiel (Richards, 1980).
4. 2. De menging van sediment ten gevolge van depositie en resuspensie (Nichols, 1984).
4. 3. Profielen van de verticaalverdelingen van snelheid en concentratieverdelingen voor twee verschillende korrelgroot-

- tefracties; meetstation in the Outer Thames estuarium (McCave, 1978 naar Thorn, 1975).
- 4.4. Stroomsnelheids- en troebelheidsverticalen (vloed positief, eb negatief), Zeekat,
 - a) 17 september 1987.
 - b) 24 september 1987.
 - c) 3 november 1987.
 - d) 9 november 1987.
 - 4.5. Iso-stroomsnelheidsdiagram (isotache), Zeekat,
 - a) 17 september 1987.
 - b) 24 september 1987.
 - c) 3 november 1987.
 - d) 9 november 1987.
 - 4.6. Iso-troebelheidsdiagram, Zeekat,
 - a) 17 september 1987.
 - b) 24 september 1987.
 - c) 3 november 1987.
 - d) 9 november 1987.
 - 4.7. Iso-chloriniteitsdiagram, Zeekat,
 - a) 17 september 1987.
 - b) 24 september 1987.
 - c) 9 november 1987.
 - 4.8. Temporele variatie van sedimentconcentratie op een aantal niveaus boven de bodem; Savannah River (naar Krone, 1972).
 - 4.9. Stroomsnelheden (op halve diepte) en gehalten aan gesuspendeerd materiaal op drie verschillende dieptes; twee stations in de Waddenzee nabij Ameland. De lijnen betreffen de volgende fracties: 1 totale fractie; 4 fractie $< 64\mu$; 5 $< 32\mu$; 6 $< 16\mu$ en 7 $< 8\mu$ (Postma, 1961).
 - 4.10. Stroomsnelheden- en troebelheden op 6 cm boven de bodem; Rappahanock estuarium, USA (Nichols, 1984/1985).
 - 4.11. Stroomsnelheids- en troebelheidsmetingen over twee getijd cycli; Chesapeake Bay, USA (Nichols, 1984).
 - 4.12. Variaties van waterniveau (m boven bodem), stroomsnelheid (cm/s), saliniteit (‰) en gesuspendeerd materiaal (mg/l) in the Boca Vagre van de Orinoco delta (Van Andel en Postma, 1954).
 - 4.13. Een longitudinale sectie van een asymmetrische getijdeweg, waarbij tijdens de kenteringen verticale stromingen optreden die invloed hebben op de mate van depositie; Gironde estuarium, Frankrijk (Salomon en Allen, 1983).
 - 4.14. Temporele variatie van gesuspendeerd materiaal gekoppeld aan doodtij- springtijcyclus; Rappahanock estuarium, USA (Nichols, 1981).
 - 5.1. Thiessenpolygonen van het bodembemonsteringsgebied voor de situatie in mei en september 1987.
 - 5.2. Dynamiek in slibberging voor het bodembemonsteringsgebied; voor de perioden: mei-september, september-november en mei-november 1987.
 - 5.3. Frequentiehistogram en de vorm voor de normale verdeling (doorgetrokken lijn) van slibgehalten, mei 1987.
 - 5.4. Verloop van de verticaalgeïntegreerde stroomsnelheid en slibconcentratie over een getijdencyclus op a) 17-09-87, b) 24-09-87, c) 03-11-87 en d) 09-11-87 op de Zeekatlocatie.
 - 5.5. Verloop van het suspensietransport per eenheid van breedte over een getijdencyclus op a) 17-09-87, b) 24-09-87, c) 03-11-87 en d) 09-11-87 op de Zeekatlocatie.

- C1 Transmissie meetprincipe bij optisch en acoustisch bemonsteren (Van Rijn, 1986).
- C2 Onderdelen van de sensor van de Partech troebelheidsmeter waarbij de reductie in intensiteit over twee lichtwegen van verschillende lengte wordt gemeten (Partech Electronics LTD)

LIJST VAN TABELLEN

- 3.1. Resultaten van lineaire regressieanalyse met de logaritme van het (plaatselijk) bodemslibgehalte als afhankelijke en de hoogteligging van de bodem t.o.v. NAP als onafhankelijke variabele.
- 3.2. Resultaten van de variantieanalyse van de logaritme van de slibgehalten per morfologische eenheid per periode.
- 3.3. Overzicht van de frequentie van daggemiddelde windsnelheden > 7,5 m/s zoals geregistreerd voorafgaande aan de bodembemonsteringen (naar gegevens KNMI, station Vlissingen).
- 3.4. Beschrijvende statistiek van slibpercentages in het bodembemonsteringsgebied, volgens gegevens van de Looff (1978) en uit eigen onderzoek.
- 4.1. Getij- en meteorologische omstandigheden voor de vier 13-uursmetingen.
- 5.1. Schatting van de relatieve fouten van variabelen in het model ter berekening van de momentane slibberging.
- 5.2. Vergelijking slibberging compartiment 3; berekening van Van Maldegem (1987) en berekening voor de drie bemonsterde perioden volgens methode Van Maldegem (1987). De dynamische diepte is gesteld op 1,0 m/j.
- 5.3. De dynamiek in slibberging voor het bodembemonsteringsgebied berekend volgens twee methoden (1000 tonnen).
- 5.4. Suspensietransport door een waterkolom op de Zeekatlocatie met externe omstandigheden.
- 5.5. Nauwkeurigheid van variabelen die bepalend zijn voor de grootte van het suspensietransport.
- 5.6. Schattingen van het suspensietransport op de Zeekatlocatie met 95%-betrouwbaarheidsinterval.
- C1 Gegevens lineaire regressieanalyse bij constructie van ijklijnen en ter omzetting van Partechwaarden (in %) naar slibconcentratie (in mg/l).
- C2 Betrouwbaarheden van de voor de Zeekatlocatie geconstrueerde ijklijnen voor de Partech troebelheidsmeter.
- D1 Schatting van golfparameters voor de zuidwestelijke punt van de Brouwerplaat bij bepaalde windcondities (nrs. 1 t/m 4) en de hiermee geassocieerde fetch.
- D2 Schatting van de horizontale orbitaalsnelheid aan de bodem bij de in tabel D1 genoemde meteorologische condities (nrs. 1 t/m 4) tijdens de hoogwaterkentering onder gemiddelde getijomstandigheden.
- D3 Relevante golfparameters ter schatting van breker- hoogte en diepte en de resultaten hiervan.

1. INLEIDING

Inzicht verkrijgen in de ruimtelijke en temporele variatie van processen die invloed hebben op de beweging van slib in een estuarien systeem is een vrij actueel streven. Een verbreding van kennis, zowel fundamenteel als regionaal gericht, is voor een aantal zaken van belang:

- ter onderbouwing van de morfologische dynamiek in relatie tot erosie- en sedimentatieprocessen.
- voor een zowel financieel als een voor het milieu verantwoord bagger- en stortingsbeleid waarbij tevens internationale aspecten (Nederland/ België) van belang zijn.
- voor de kennis over de ruimtelijke verspreiding van het fijne materiaal (slib); zware metalen en andere verontreinigingen zijn voornamelijk gebonden aan fijn materiaal zodat het een verspreidingspatroon vertoont gelijk aan dat van slib.
- ter extrapolatie van gedetailleerde kennis van dit estuarium naar andere gebieden met soortgelijke problematiek.

In het kader van dit onderzoek is getracht om een indruk te krijgen op welke schaal en in welke mate factoren hun invloed doen gelden op de slibhuishouding van de Westerschelde. Met name de ruimtelijke variatie over enkele morfologische eenheden, alswel een eventuele seizoensfluctuatie van processen als erosie, transport en sedimentatie van slib zijn onderzocht. Voor het onderzoek in de waterkolom is de nadruk gelegd op de variatie van slibgehalten tijdens de eb- vloedcyclus en op een meer kwalitatief niveau tijdens de doodtij- springtijcyclus. Tevens is bekeken welke invloed meteorologische omstandigheden hebben op het gedrag van slib binnen dit gedeelte van het estuarium.

Op een meer praktisch niveau is een schatting gemaakt van de absolute verplaatsing van slibmateriaal naar aanleiding van de mobilisatie van bodemslib en voor het transport van suspensiemateriaal in de waterkolom. Hierbij is gebruik gemaakt van eenvoudige modelleringen. Vervolgens is, wat betreft de bodemslibberging een vergelijking gemaakt met de eerste slibbalans voor de Westerschelde (Van Maldegem, 1987).

Om bovenstaande doelen te verwezenlijken zijn voor dit onderzoek een drietal probleemstellingen geformuleerd, en wel het onderzoeken van:

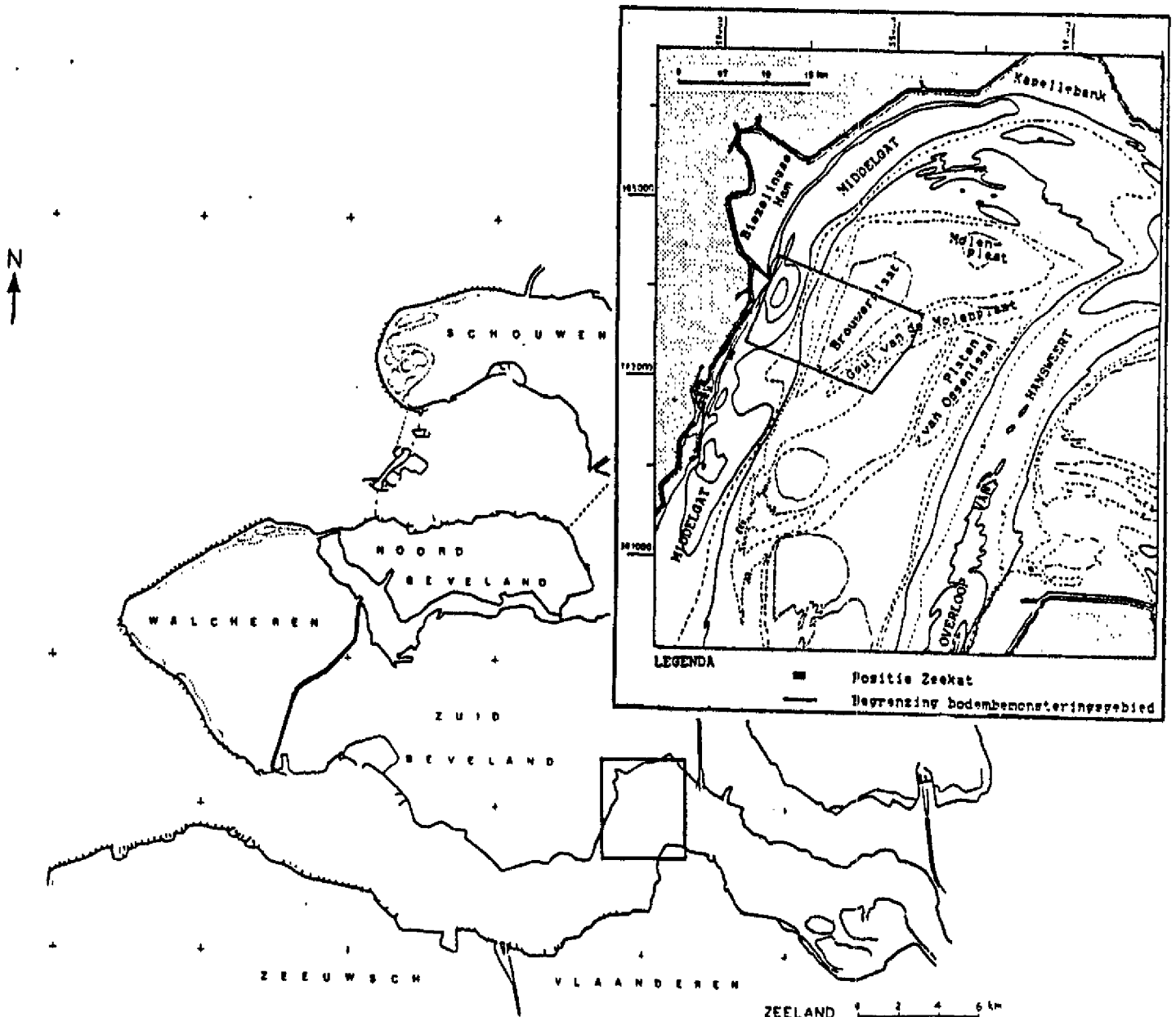
- a) de ruimtelijke en temporele variatie van slibgehalten in het bodemsediment.
- b) de temporele variatie van stroomsnelheden en slibconcentraties in een waterkolom (1 locatie).
- c) de ruimtelijke verschillen in slibtransport over een dwarsraai.

ad a) Voor een gebied van ongeveer 1,5 km² is een gedetailleerde bodembemonstering uitgevoerd. In totaal zijn 80 monsters genomen verdeeld over drie morfologische eenheden: een diepe geul, een plaat en een ondiepe geul (schaar) (figuren 1.1 en 1.2).

De bemonstering heeft over drie periodes in het jaar plaatsgevonden om een eventuele temporele (seizoens-) variatie te achterhalen; respectievelijk in mei, september en november 1987.

Met dit onderdeel zijn de volgende onderzoeksdoelstellingen nagestreefd:

1. wetenschappelijk: het achterhalen van de ruimtelijke en temporele variatie van bodemslibgehalten.
2. toegepast: - het doen van een aanbeveling voor een efficiënt bodembemonsteringsprogramma.
- het beoordelen van de bestaande kartering van de Looff (1978).
3. het kwantificeren van transporten door middel van een eenvoudige modellering.



Figuur 1.1 Ligging van het onderzoeksgebied.

ad b) Het meetpunt "de Zeekat" heeft als basis gediend voor het onderzoek naar processen in de waterkolom. Hierbij zijn voornamelijk de temporele variaties van stroomsnelheden en troebelheden onderzocht. Het meetschema is geheel onafhankelijk opgesteld ten opzichte van het automatisch inwinprogramma van de Zeekat, welke wordt uitgevoerd in het kader van de Systeem Analyse Westerschelde (SAWES project).

De volgende doeleinden zijn gesteld:

1. wetenschappelijk: het achterhalen van stroomsnelheids- en slibconcentratieverdelingen in de waterkolom in relatie tot getij- en meteorologische omstandigheden.
2. toegepast: het vergelijken met de door RWS uitgevoerde Zeekatmetingen.
3. het kwantificeren van het suspensietransport door middel van een eenvoudige modellering.

ad c) Om een indruk te krijgen van de variatie in slibtransporten binnen een dwarsraai in de Westerschelde, zijn metingen naar slibgehalten gedaan tijdens een debietmeting op 13 en 14 mei 1987. De dwarsraai is gelegen over het Gat van Ossensisse, de Rug van Baarland en het Middelgat. Naast de reguliere apparatuur zijn vier van de elf schepen, die tegelijkertijd metingen over de dwarsraai verrichten, met Partech troebelheidsmeters uitgerust. Helaas is tijdens de meting het een en ander misgegaan, zodanig dat het hele gedeelte binnen dit onderzoek is komen te vervallen.

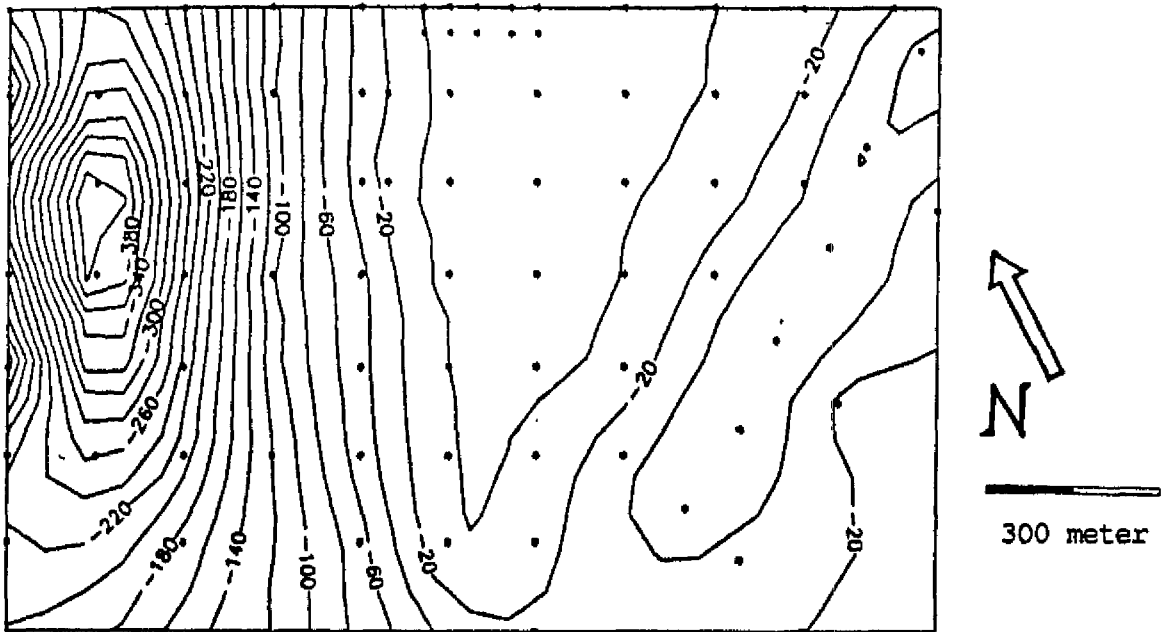
Voor een algemene beschrijving van het estuarium de Westerschelde wordt verwezen naar het rapport van Manni (1986). De breedte van het estuarium in de buurt van Hoedekenskerke bedraagt 3 tot 4 km. Figuur 1.1. toont een tweetal diepe geulen: het Middelgat en de Overloop van Hansweert. De overloop van Hansweert vormt de huidige hoofdvaargeul voor het scheepvaartverkeer van en naar Antwerpen. Deze functie heeft het in 1980 overgenomen van het Middelgat, welke nu als secundaire geul een sterke sedimentatie van relatief slibrijk materiaal ondervindt (Manni, 1986). Manni (1986) veronderstelt een maximale aanwas van 0.5 m/jaar. Het Middelgat is ongeveer 600 tot 800 meter breed; de grootste diepte bedraagt ±45 meter. Het estuarium wordt sterk door menselijk handelen als baggeren, storten en ten gevolge van oevervastlegging beïnvloed, met directe gevolgen voor de morfologie.

De beide geulen worden gescheiden door een uitgestrekt platencomplex. Van zuid naar noord zijn er successievelijk de Rug van Baarland, de Brouwerplaat en de Molenplaat gesitueerd. Volgens nog niet gepubliceerde gegevens van Directie Zeeland uit 1985 bedraagt het oppervlak van dit platencomplex, met toevoeging van de plaat van Ossensisse, 324 ha op NAP niveau en 48 ha op 1 meter +NAP. Op enkele plaatsen wordt dit complex doorsneden door ondiepe geulen, met maximale diepten van 5 tot 7 meter: de scharen.

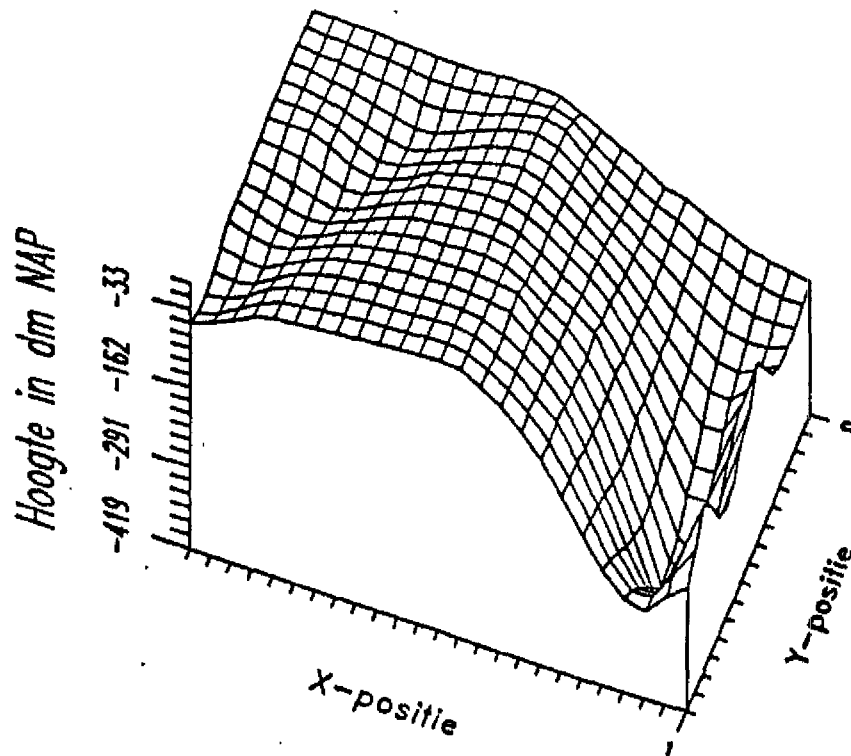
Het bodembemonsteringsgebied is in figuur 1.1 omkaderd door aangegeven. Het omvat een gedeelte van zowel het Middelgat, de Brouwerplaat als de geul van de Molenplaat. Figuur 1.2 geeft de posities van de monsterpunten en de hoogtelijnen van het bodembemonsteringsgebied weer.

Het meetpunt de Zeekat is ook in het Middelgat gesitueerd (figuur 1.1). De geulbodem ter plaatse is gelegen op een diepte van ca. 18 meter beneden NAP.

Hoogtelijnenkaart bodembemonsteringsgebied



Reliefkaart



Figuur 1.2. Het bodembemonsteringsgebied.

Om verwarring aangaande een aantal begrippen te voorkomen volgen hier de in dit rapport gehanteerde definities:

- een estuarium is een half-gesloten kustwater, in vrije verbinding met de zee, waarin het zeewater meetbaar verdund wordt met het water afkomstig van de in het estuarium uitstromende rivieren (Pritchard, 1967).
- de slibfractie wordt gevormd door de delen met een diameter kleiner dan 53 μm .
- de slibconcentratie in het water, de troebelheid en het suspensiegehalte (aan slib) zijn begrippen die in dit rapport naast elkaar zijn gebruikt. Ze worden uitgedrukt in mg/l.

2. WERKWIJZE

2.1 Bodembemonstering

2.1.1. Inleiding

Voor een gebied in de Westerschelde zijn slibgehalten bepaald van de bovenste 2 cm van de onderwaterbodem. De bodembemonstering is over een drietal perioden uitgevoerd: mei, september en november.

De bemonstering in het Middelgat (diepe geul) en de geul van de Molenplaat (schaar) (fig 1.1) heeft plaatsgevonden vanaf een schip tijdens hoogwaterkenteringen. Lage stroomsnelheden vergemakkelijken dan zowel de monsternamen als de plaatsbepaling, dit laatste in verband met afdrijven. Ook kan tijdens hoogwater een groot gebied vanaf het schip worden bemonsterd. Er is gebruik gemaakt van een Van Veen bodemhapper.

De plaat is tijdens droogvallen bezocht. De monsters zijn genomen met een troffel.

De Looft wijst op het belang van het nemen van bodemonsters onder vergelijkbare getijomstandigheden (De Looft, 1978). In dit onderzoek is wel rekening gehouden met het dubbeldaagse getij, niet met de fase in de spring-doodtijcyclus.

De bodembemonstering is uitgevoerd op een regelmatig vierkantsnet, waarbij met de oriëntatie rekening is gehouden met de morfologie. Dit heeft een aantal praktische voordelen:

- goed op kaart uit te zetten
- goed bevaarbaar
- betere plaatsbepaling mogelijk op plaat

De bemonsteringsdichtheid bedraagt ongeveer 40 meetpunten per vierkante kilometer.

2.1.2 Van Veen gripper

Met de Van Veen gripper is het mogelijk monsters te nemen van een onderwaterbodem. De gripper wordt geopend naar de bodem gevierd. Bij het op de bodem vallen, klapt een hendel weg zodat tijdens ophalen de beide helften zich sluiten. Er is gebruik gemaakt van een drietal Van Veen grippers: een kleine, een middelgrote en een grote gripper. Het voordeel van een grote gripper is dat deze, door zijn grotere gewicht, minder door stroming wordt beïnvloed. De middelgrote gripper is de meest praktische. Deze is uitgerust met een tweetal bovenkleppen zodat het nemen van een ongestoord monster wordt vergemakkelijkt (fig 2.1). De kleinste gripper is tevens de lichtste, deze kan met de hand worden bediend.

Van Maldegem (1987) heeft een viertal bodembemonsteringsmethoden vergeleken en heeft geconcludeerd dat niet zozeer het apparaat als wel de dichtheid van de monstering van belang is voor de nauwkeurigheid van het resultaat.

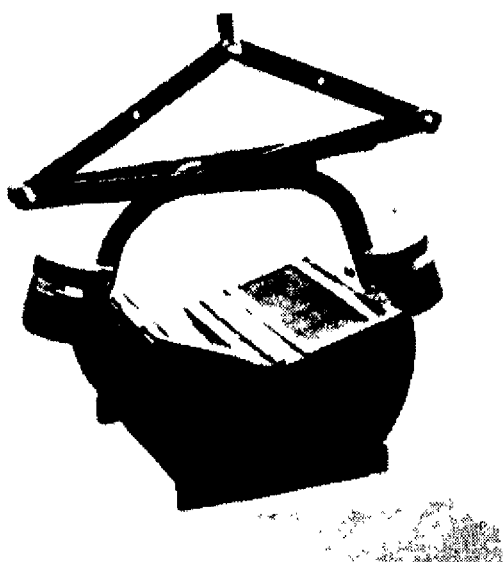
Fouten worden bij het gebruik van de Van Veen gripper geïntroduceerd ten gevolge van de volgende factoren:

- Indien de gripper niet goed sluit (obstakel tussen de kleppen, gebrek van de Van Veen gripper) zal sediment verloren gaan. De gripper is zo geconstrueerd dat overtollig water draineert. Met dit water (lekwater) gaat echter ook

materiaal verloren. Met behulp van een drietal monsters is onderzocht of het slibpercentage van het lekwater afwijkt van het slibgehalte van het bodemonster. Twee van de drie monsters vertonen sterk afwijkende waarden: de ene kent een lagere, de andere een hogere slibconcentratie in het lekwater. Een verband is waarschijnlijk niet aanwezig.

- Een grijper zonder bovenkleppen moet in een bak worden geleegd alvorens monsterring kan plaatsvinden. Hierdoor raakt het monster verstoord.

- In water dieper dan 20 meter wordt de monsternamen, al bij stroomsnelheden van 0.5 m/s, door scheefhangen van de grijper problematisch.



Figuur 2.1 De Van Veen Grijper met bovenkleppen.

2.1.3. Plaatsbepaling bemonsteringsgebied

In de geul is ter plaatsbepaling gebruik gemaakt van de op het schip aanwezige navigatieapparatuur: de DECCA TRISPONDER 202. Dit apparaat registreert de tijd tussen verzenden en ontvangen van een impuls, vanuit het schip naar maximaal vier landbakens. Hieruit kan de positie van het schip worden bepaald. De nauwkeurigheid van het apparaat bedraagt, onder normale meteorologische omstandigheden, ongeveer 3 meter (Hooper, 1979).

De schaar is bemonsterd met behulp van het THORAN navigatiesysteem. Dit systeem berust op hetzelfde principe als de DECCA. Het is voor een kleiner gebied opgezet (Oosterschelde, Westerschelde). De nauwkeurigheid van het systeem bedraagt, onder normale meteorologische omstandigheden, ongeveer 1 meter (Hooper, 1979). Deze tweedeling in gebruikte plaatsbepalingssystemen heeft om praktische redenen plaatsgevonden.

Door afdrijven van de boot ten gevolge van de stroming tijdens het vieren van de grijper, wordt een onnauwkeurigheid toegevoegd, in de orde van 20 meter. Bij grotere diepten (meer dan 15 meter), gaat ook het scheefhangen van de kabel en de grijper een rol spelen. Deze afwijking is gesteld op gemiddeld 5 meter. De maximale onnauwkeurigheid van de plaatsbepaling voor de geulmonsters wordt gegeven door berekening van de voortplanting van de

afzonderlijke foutenbronnen (apparaat, afdrijven, scheefhangen) en bedraagt ongeveer 21 meter.

Op de plaat zijn de posities bepaald door het schieten van richtingen met behulp van het kompas en het uitmeten van afstanden door middel van afpassing.

Aan het begin van elke monstercampagne is een zestal jalons uitgezet. Deze zes posities zijn bepaald met behulp van bekende kompasrichtingen naar markante punten en objecten op de dijk. De richtingen zijn vóór de meetcampagne, met behulp van de topografische kaart met dieptecijfers en lijnen schaal 1:10.000 bepaald. Door het controleren van de onderlinge afstanden, is het mogelijk de posities van de zes jalons op ongeveer 10 meter nauwkeurig te bepalen. De zes jalons vormen de basis voor de bepaling van de posities van de andere monsterpunten. Door de verschillende denkbeeldige lijnen door twee sjalons door te trekken én gebruikmakend van afpassing kunnen meetlocaties worden gevonden. Op deze manier is het mogelijk de plaat snel en relatief nauwkeurig te bemonsteren.

De geschatte fout bij het schieten van een hoek met het kompas (SILVA type 15T The Ranger) bedraagt 1,5 graad. Het is belangrijk dat de hoek tussen de twee schietlijnen ongeveer 90 graden bedraagt. Omdat de richtingen uit een kaart zijn verkregen moet rekening worden gehouden met de deviatie: de hoek tussen het kaart-noorden en het werkelijke (kompas)-noorden. Op het gebruikte kompas bestaat de mogelijkheid direct voor de deviatie te corrigeren.

Het gebruik van een kompas heeft een aantal voordelen ten opzichte van de veel nauwkeurigere theodoliet of het waterpasinstrument:

- licht/ handelbaar
- snel
- een plaatsbepaling kan door één persoon worden uitgevoerd

Het afpassen is geïllustreerd door het meerdere keren lopen van een bekende afstand (50 m). De geschatte onnauwkeurigheid bedraagt 1 meter per 50 meter.

De nauwkeurigheid van de plaatsbepaling op de plaat is afhankelijk van de positie van de monsterpunten ten opzichte van de zes centraal opgestelde sjalons. In de buurt hiervan wordt de nauwkeurigheid geschat op 10 meter. Verder weg, aan de noord en zuidkant van de bemonsterde plaat, lopen de onnauwkeurigheden op tot ongeveer 25 meter.

2.1.4. Laboratorium analyse

De bodemonsters zijn geanalyseerd op het laboratorium van de Vakgroep Fysische Geografie te Utrecht. Er is een korrelgrootteanalyse uitgevoerd, waarbij de totale slib- en zandfracties zijn bepaald; slibfractie tot 53 μm , zandfractie van 53 tot 2000 μm (delen groter dan 2000 μm zijn niet aangetroffen). Het slibpercentage wordt gevormd door het gewichtspercentage van de slibfractie ten opzichte van het gewicht van de som van slib- en zandfractie. Er is geen rekening gehouden met het gehalte aan organisch materiaal en kalkresten. Volgens de kartering van De Looff (1978) komen in dit gebied kalkpercentages van 0 tot 20 % voor. Vooral de slibrijke monsters bevatten hoge gewichtspercentages kalk (CaCO_3). Volgens dezelfde kartering bedraagt het

gehalte aan organische bestanddelen 0 tot 3 %, waarbij ook hier een positieve correlatie aanwezig is tussen het gehalte aan slib en dat aan organisch materiaal.

Voor een gedetailleerde beschrijving van de labanalyse wordt verwezen naar Appendix A.

Om een indruk te krijgen van de fout in de bepaling van de slibpercentages is deze voor 7 monsters in duplo uitgevoerd. De gemiddelde relatieve afwijking bedraagt 32%, met een standaardafwijking van 17%. De absolute fout in de slibpercentages voor alle bodemonsters bedraagt gemiddeld 3 tot 4%. De uiteindelijke afwijkingen zijn toe te schrijven aan:

- Een relatief kleine analysefout ten gevolge van weeg- en meetfouten en het verliezen van materiaal door knoeien, verbranden of overkoken. Deze fout wordt geschat op 5 a 10% (relatieve fout).
- Een fout door de variatie in slibgehalten binnen de monsterpotjes. Deze zijn vóór de uiteindelijke analysemonstering niet gemengd. De resterende relatieve fout, 22 tot 27% komt op conto van dit verschijnsel. Door goede menging van de monsterpotten kan deze fout worden opgeheven.

2.1.5. Data opslag

De slibgehalten van de bodem voor de drie perioden zijn opgeslagen in een databestand (DBASE III plus). Het bestand kent de volgende structuur:

- monsterpuntnummer
- X-coördinaat
- Y-coördinaat
- Z-coördinaat (ten opzichte van NAP)
- %-slib mei
- %-slib september
- %-slib november
- gemiddeld slibgehalte over 3 perioden per meetpunt
- standaarddeviatie over 3 periode per meetpunt
- variatie coëfficiënt over 3 perioden per meetpunt

2.2. Metingen in de waterkolom

2.2.1. Inleiding

Teneinde het inzicht te verbeteren in de variabiliteit in slibconcentraties in de Westerschelde is in september 1987 een pomp- en meetponton "Zeekat" op een vaste locatie in het Middellgat gestationeerd (X: 53.108; Y: 383.260), (figuur 2.2). Met een automatisch inwinprogramma kunnen lange meetreeksen worden opgesteld, waarmee seizoensfluctuaties, maar vooral ook variaties in de slibconcentraties onder invloed van meteorologische omstandigheden worden bepaald.

Het ponton is ingesteld om op drie diepten in de waterkolom te meten: aan het wateroppervlak, op de halve diepte en aan de bodem. Het meetschema is zodanig geprogrammeerd, dat van de drie diepten elke 12 minuten de volgende parameters worden geregistreerd:

- stroomsnelheid in m/s en stroomrichting in ' alleen nabij het wateroppervlak)

- troebelheid in ME (Monitek-Eenheden)
- fluorescentie in FE (Fluorescentie-Eenheden)

Naast bovenbeschreven automatisch inwinprogramma, waar voor een gedetailleerdere toelichting verwezen wordt naar Holland (1984), heeft in het kader van het onderzoek een uitgebreider meetprogramma plaatsgevonden. Hierbij zijn meer parameters gemeten op meer diepten in de waterkolom. Vergelijking en evaluatie zou mogelijk zijn geweest indien verwerking van de automatisch ingewonnen data naar behoren zou zijn verlopen. De eerste drie maanden van het meetprogramma (sept - nov 1987) zijn komen te vervallen als gevolg van de verwisseling van meetniveaus. Dit heeft tijdens de automatische registratie reeds plaatsgevonden.

2.2.2. Meetprogramma Zeekat

Gedurende vier gehele eb-vloed cycli en voor vijf zes-uurs-perioden, allen in verschillende fasen binnen een doottij-springtij cyclus, is op de Zeekatlocatie het verloop van verschillende variabelen in de tijd en de verdeling ervan over de verticaal doorgemeten. Hiertoe zijn voor zes diepten binnen de waterkolom elk half uur de waarden van de volgende variabelen geregistreerd:

- | | |
|--|---------------|
| a- tijdstip na hoogwaterkentering (uren minuten) | |
| b- waterdiepte (m) | |
| c- stroomsnelheid | (m/s) |
| d- stroomrichting | (°) |
| e- troebelheid | (mg/l) |
| f- conductiviteit | (millimho/cm) |
| f- temperatuur | (°C) |
| g- saliniteit | (ppm) |



Figuur 2.2. Meetpontoon 'Zeekat'.

De verdeling van de zes meetpunten over de verticaal is zodanig gekozen dat in de waterkolom nabij de bodem de hoogste concentratie punten is gesitueerd. Daar zijn volgens verwachting de gradiënten in de variabele(n) het grootst. De punten bevinden zich respectievelijk op een halve meter, één meter en twee meter boven de bodem, op twee derde en één derde van de waterdiepte en op twee meter beneden het wateroppervlak.

ad a) Het tijdstip van de meting is gerelateerd aan de getij-curve zoals geregistreerd in Hansweert. Het vergt een tijdsduur van 15 minuten om van zes diepten in een waterkolom alle variabelen te meten. Om praktische redenen is per meetverticaal één tijdstip van meten verondersteld, deze is naar een heel kwartier afgerond.

ad b) De waterdiepte is vastgesteld aan de hand van de dieptemeter op de hijsinstallatie van de Zeekat, deze is tot op 2 dm nauwkeurig. De onnauwkeurigheid in de waterdiepte wordt enerzijds veroorzaakt door een afleesfout, anderzijds is een hoge stroomsnelheid debet aan de fout in de lengte van de waterkolom. Een grote stroomsnelheid doet de takel scheefhangen, waardoor een grotere waterdiepte gesuggereerd wordt. Deze fout is zo goed mogelijk ondervangen door de hoek te meten die de takel met de verticaal maakt en vervolgens door middel van een sinusfunctie een correctie aan te brengen.

ad c) De stroomsnelheid is gemeten met behulp van een aan een verzwaarde vis bevestigde Ottmolen; per diepte wordt van het propellor van de molen door middel van een Elmar het aantal omwentelingen per minuut geregistreerd. Tijdens de metingen is gedurende twee maal 30 seconden het gemiddeld aantal omwentelingen bepaald. Deze waarden worden met behulp van een nomogram naar een snelheid geconverteerd.

ad d) Via een aan de meetvis bevestigd kompas wordt door de Elmar-installatie de stroomrichting in graden aangegeven. Indien het kompas elk uur wordt geijkt, kan, als de stroomsnelheid niet uitzonderlijk laag is, naar schatting op 15 graden nauwkeurig worden gemeten.

ad e) De concentratie aan slib op een punt in de waterkolom is gemeten met behulp van een Partech 7000 3RP (type S 1000) troebelheidsmeter. Het instrument meet de lichtverzwakking over twee lichtwegen van verschillende lengte en geeft een uitslag in procenten. Aan de hand van lokaal en momentaan genomen watermonsters (15% van het aantal metingen) is een ijklijn geconstrueerd teneinde de procentuele schaal naar een schaal in mg/l te converteren. De watermonsters zijn genomen met de Vlissingse fles.

De Partech troebelheidsmeter is een gevoelig instrument; tijdens de meting kunnen door een aantal factoren fouten geïntroduceerd worden. Voor een uitgebreide discussie wordt verwezen naar Appendix C. Binnen dit kader wordt volstaan met een schatting van de meetfout en een korte toelichting.

De algemene nauwkeurigheid van de gemeten slibconcentratie wordt bepaald door de mate van spreiding rond de ijklijn. Deze hangt af van:

- de fout geïntroduceerd bij het nemen van de watermonsters (o. a. als gevolg van de afstand tussen de Vlissingse fles en de partech-meter en afhankelijk van de tijd dat de fles na de monsternamen zich in het water bevindt).
- de onnauwkeurigheid van het signaal van de partech-troebelheidsmeter. Deze kan, vooral bij concentraties lager dan 100 mg/l, ontstaan door temperatuursvariaties en bijkomend

licht (Van Rijn, 1986).

- de mate van onevenredigheid tussen het detectorsignaal en de slibconcentratie in het water.
- de betrouwbaarheid van de laboratoriumanalyse, waarbij het slibgehalte van het watermonster wordt bepaald (§ 2.2.3).

De correlatiecoëfficiënt van zes ijklijnen, geconstrueerd aan de hand van data van 9 meetdagen, varieert van 0,75 tot 0,96. De 95%-betrouwbaarheidsintervallen van de verschillende ijklijnen geven een gemiddelde waarde van 8 mg voor de afwijking. Uitgedrukt in het percentage van de gemiddelde slibconcentratie van alle watermonsters die van de lijn deel uitmaken, komt dit gemiddeld neer op 11% (Appendix C, tabel C2).

ad f, g en h) Door middel van een geleidbaarheidsmeter type Beckman RS 5-3 zijn puntgeïntegreerde metingen van geleidbaarheid en temperatuur uitgevoerd. Deze waarden zijn door de meter automatisch naar saliniteit herleid.

Bij onderzoek naar mengmechanismen en concentratiegradiënten wordt in het algemeen echter gebruik gemaakt van chloriniteit in g/kg of p.p.m. In dit onderzoek zijn om deze reden de gemeten saliniteitswaarden naar chloriniteit geconverteerd. Swart (1982) heeft voor de Westerschelde deze relatie beschreven. De standaardfout bij deze omrekeningsformule heeft een aanvaardbare waarde van 0,250 g/kg.

2.2.3. Laboratorium analyse

De watermonsters ten behoeve van de ijking van de partechtroebelheidsmeter zijn in het laboratorium volgens de hier uiteengezette methode op slibgehalte geanalyseerd.

Organisch materiaal en alle (andere) bestanddelen > 53 µm zijn met een zeef uit het monster geëxtraheerd. Door het monster vervolgens twee maal door een filter (Schleicher & Schuell Filter Paper Circles, ø 150 mm) te zuigen worden alle minerale bestanddelen uit het monsters verwijderd. Het filterpapier wordt zowel vóór (zonder slib) als na de analyse (met slib) stoofdroog, in mg nauwkeurig, gewogen (Appendix B).

Fouten worden veroorzaakt door onnauwkeurigheden bij het wegen en bedragen enkele milligrammen. Van acht aselekt gekozen monsters heeft een nauwkeurige analyse van het filtraat plaatsgevonden. Het slibgehalte in het filtraat is gemeten door het door filterpapier te persen met een poriëndiameter van 2 µm (Schleiger & Schuell, Glasfaser rundfilter 200, ø 50 mm). Het filtraat bleek nog 4 tot 10 mg aan minerale bestanddelen te bevatten, hetgeen een gemiddelde fout impliceert van 6,3%.

2.2.4. Data opslag

Van in totaal 969 plaats- en tijdsbepaalde meetpunten in de waterkolom op de Zeekatlocatie zijn 14 variabelen ingevoerd in een bestand van het programmapakket dBase III+. Van elk meetpunt zijn de volgende gegevens beschikbaar:

- datum
- het geregistreerde getijverschil zoals gemeten bij Hansweert, in m

- de tijd verstreken na de hoogwaterkentering, in uren en minuten
- de totale diepte van de waterkolom op gemeten tijdstip
- de meetdiepte, in dm ten opzichte van het wateroppervlak
- de relatieve positie van het meetpunt in de verticaal (1 t/m 6)
- de stroomsnelheid in m/s
- de stroomrichting in °
- de saliniteit in ppm
- de chloriniteit in g/kg
- de conductiviteit in millimho/cm
- de watertemperatuur in °C
- de partech-registratie in %
- de variatie in het partech-signaal in %
- de troebelheid in mg/l

Dit bestand heeft als uitgangspunt gediend in de verdere gegevensverwerking.

3. SLIBGEHALTEN IN DE BOVENSTE BODEMLAAG

3.1. Inleiding

Het meetnet in het bemonsteringsgebied (figuur 1.2) is gedurende drie perioden in het jaar bemonsterd. Na laboratorium- en computerverwerking van de bodemonsters zijn drie kaarten geconstrueerd die voor elk van de meetperioden de ruimtelijke verdeling van de bodemslibgehalten weergeven.

Met statistiek als hulpmiddel zijn deze verdelingen op het voorkomen van wetmatigheden in zowel ruimtelijke als temporele variatie getoetst. Aan de hand van de hieruit resulterende conclusies is een koppeling met de theorie gemaakt.

In de figuren 3.1 tot en met 3.3 zijn de verdelingen in bodemslibgehalten voor de verschillende meetperioden in kaart gebracht. Alle figuren zijn geconstrueerd door toepassing van de interpolatietechniek kriging. Voor een uitgebreide toelichting op deze techniek wordt verwezen naar Davis (1986). De isolijnen in de a-onderdelen van bedoelde figuren verbinden punten met gelijke slibpercentages. De onderste gedeelten ervan geven een driedimensionaal beeld van de verdelingen van de bodemslibgehalten. De met 'X-positie' aangegeven lijn komt overeen met de zuidgrens van het bodembemonsteringsgebied.

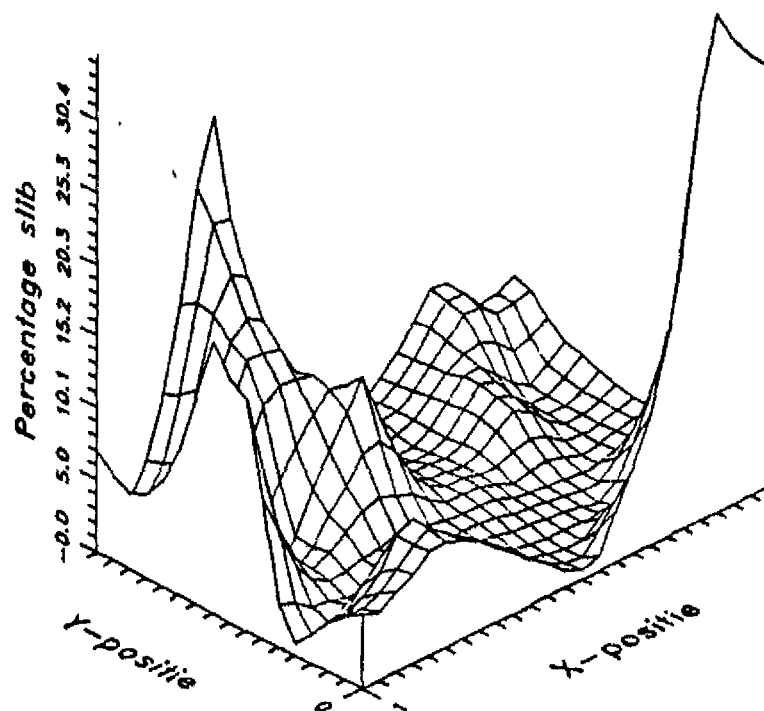
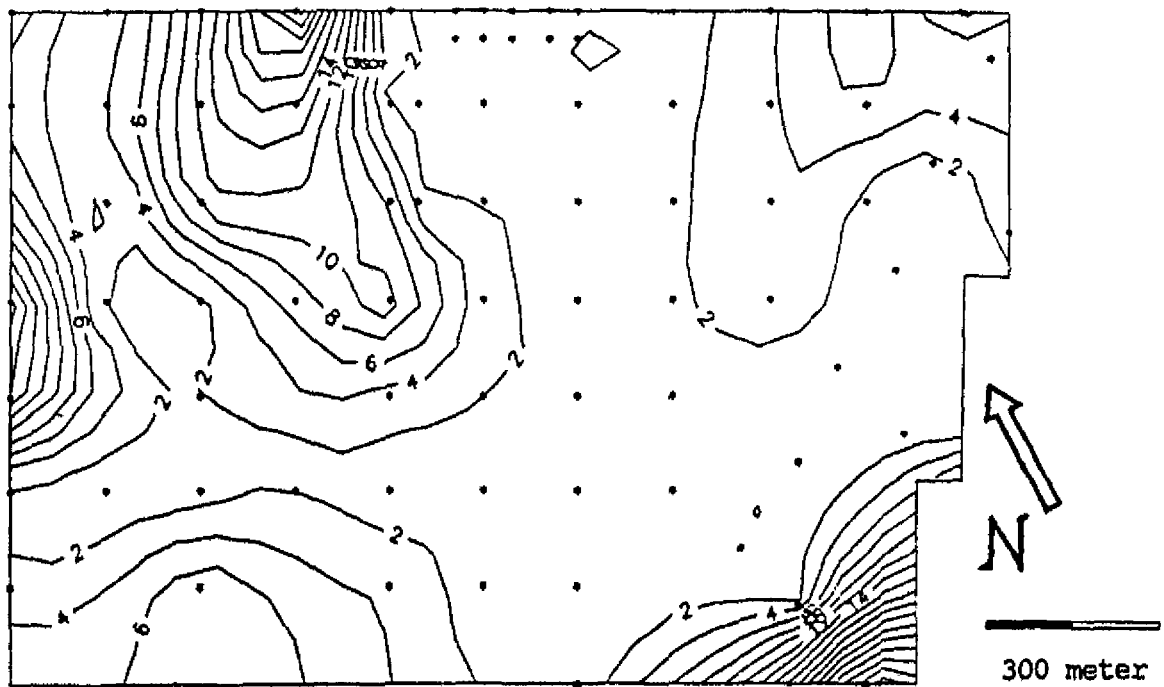
3.2. Ruimtelijke en temporele verdeling van bodemslibgehalten in het bemonsteringsgebied

In associatie met de onderscheiden morfologische eenheden (figuur 1.2) kunnen de verschillende verdelingen in slibgehalten in het gebied beschreven worden. Figuur 3.1 geeft het beeld van de ruimtelijke verspreiding hiervan zoals gemeten in mei 1987. De bodem van de diepe geul bevat de hoogste slibpercentages. Op de overgang naar de plaat komen percentages hoger dan 2 niet voor. Ook de plaat bevat weinig slib, er is een kleine stijgende gradiënt naar het noordoosten aanwezig. De schaar heeft lage slibgehalten; voor het meetpunt in het uiterste zuidoosten van het gebied echter, welke weer boven de gemiddeld laagwaterlijn ligt, is een zeer hoog slibpercentage gemeten.

De verdeling in bodemslibgehalten in de tweede meetperiode, begin september 1987, vertoont over de gehele bemonsterde oppervlakte een heel ander beeld in vergelijking tot de gemeten verdeling van de bodemslibgehalten in mei (figuur 3.2). Met uitzondering van de uiterste westkant zijn de slibpercentages in de diepe geul beduidend lager; op de overgang naar de plaat stijgen de slibgehalten enigszins, terwijl over de gehele plaat en met name in het noordoostelijk gedeelte, hoge tot zeer hoge slibgehalten voorkomen. De slibgehalten in de schaar vertonen een vergelijkbaar beeld met de meetperiode in mei: vrij lage tot gemiddelde waarden in de schaar zelf en een sterk stijgende gradiënt in zuidoostelijke richting, dwars op de oriëntatie van de schaar.

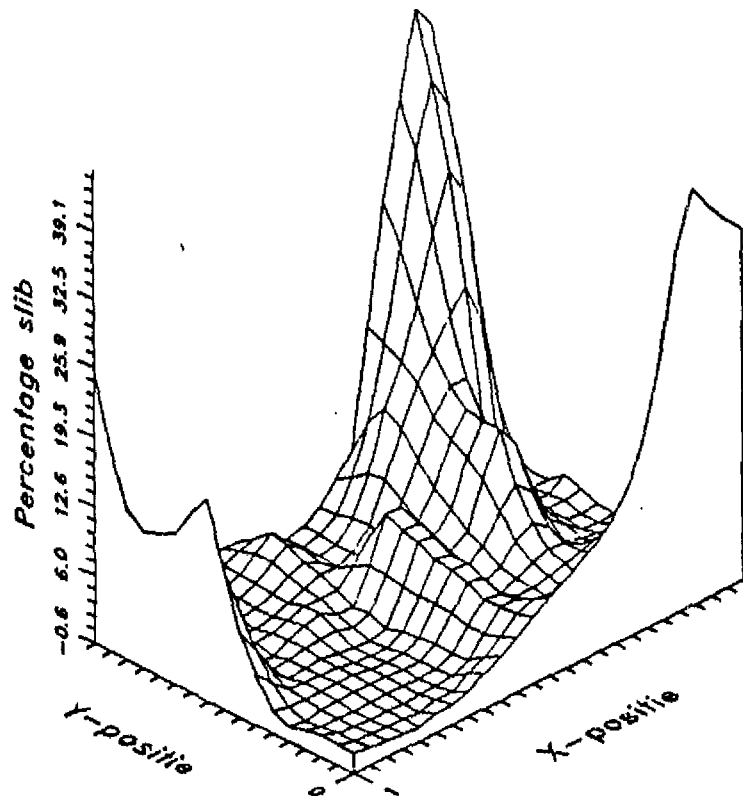
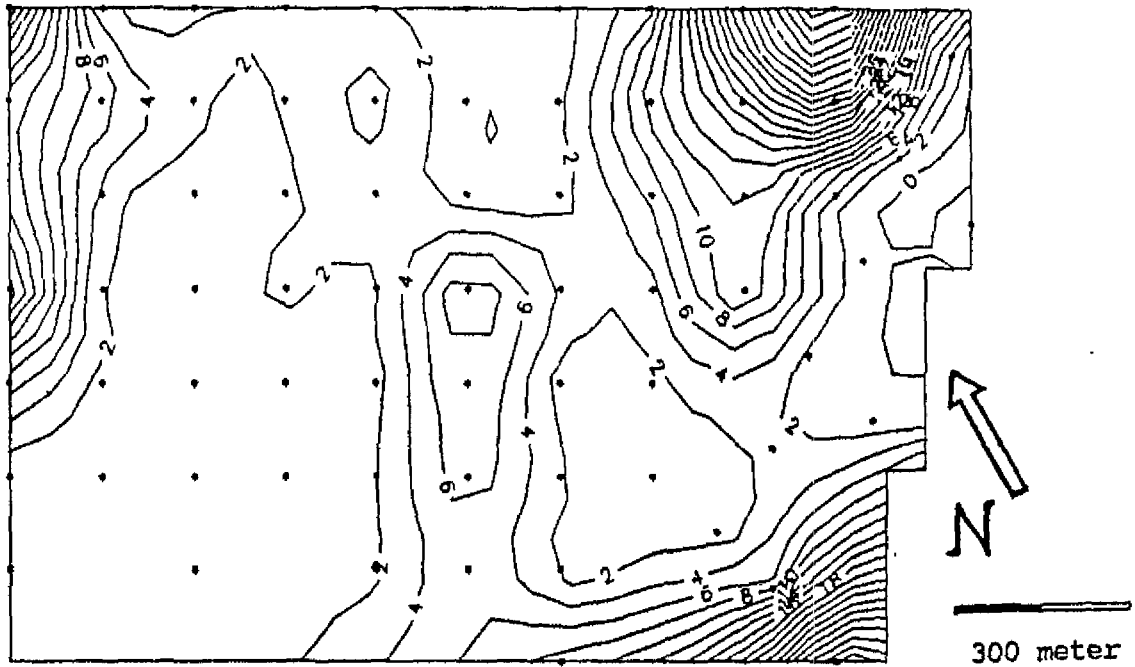
Figuur 3.3 geeft het kaartbeeld van de verdeling in bodemslibgehalten in de laatste meetperiode, begin november 1987. Twee opmerkingen zijn bij bestudering ervan op zijn plaats. Enerzijds is het om organisatorische redenen niet mogelijk gebleken de punten in de schaar te bemonsteren. Anderzijds moet bij het driedimensionale beeld gewezen worden op de ten opzichte van de voor-

Bodenslibgehalte deel Westerschelde mei 87



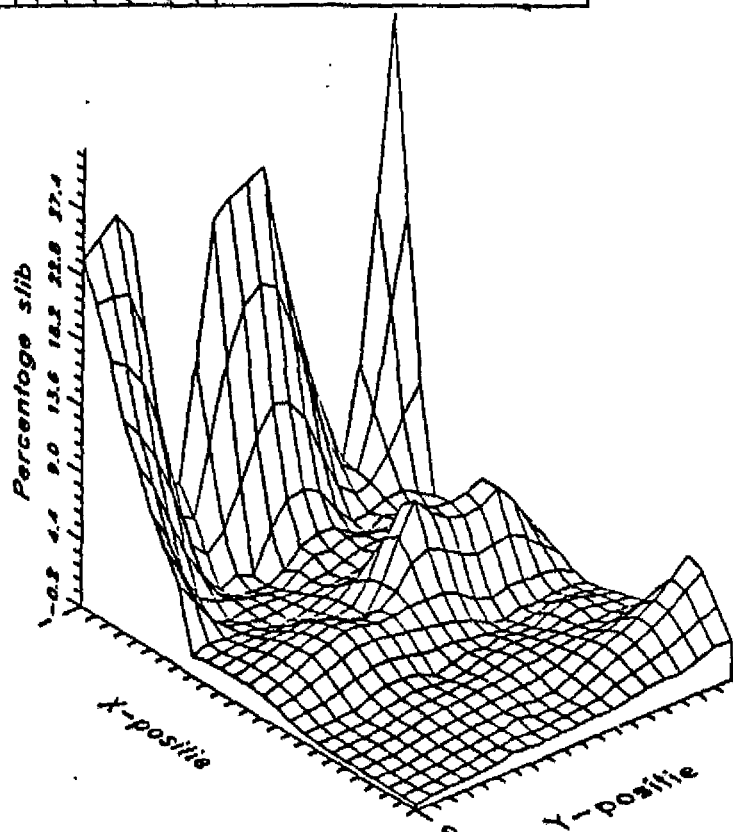
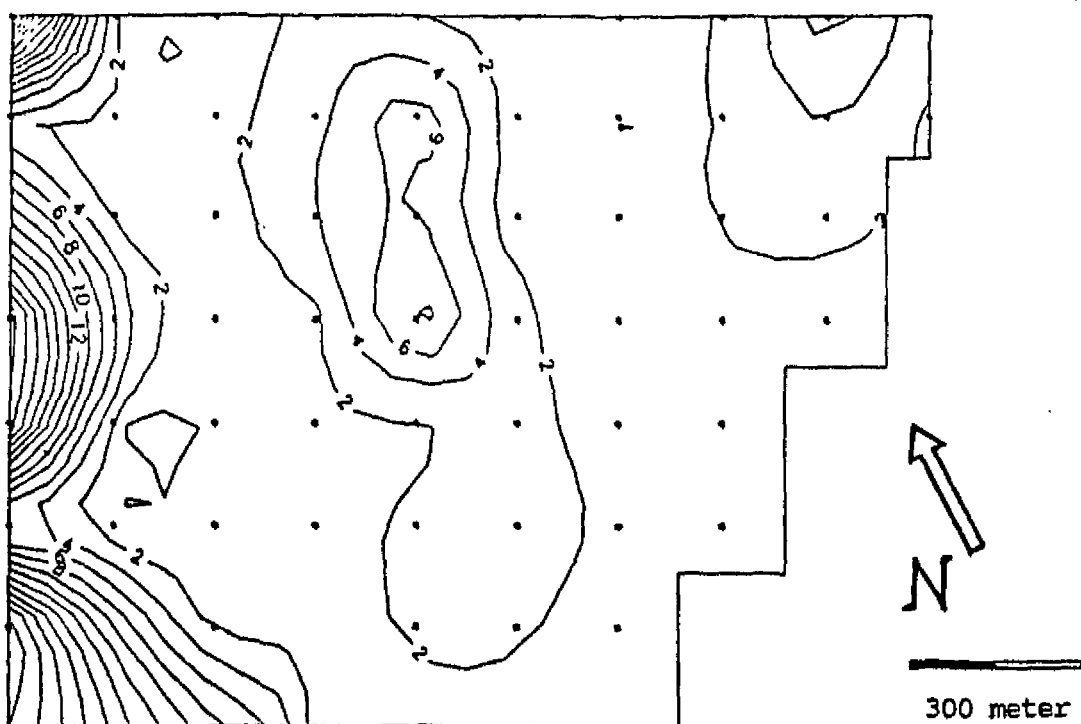
Figuur 3.1 Verdeling in bodenslibgehalte (%), gemeten in mei 1987.

Bodemslibgehalte deel Westerschelde sep 87



Figuur 3.2 Verdeling in bodemslibgehalte (%), gemeten in september 1987.

Bodemslibgehalte deel Westerschelde nov 87



Figuur 3.3 Verdeling in bodemslibgehalte (%), gemeten in november 1987.

gaande figuren afwijkende hoek waaronder het gebied belicht wordt; de met 'X-positie' aangegeven lijn valt samen met de zuidgrens van het bemonsteringsgebied.

De slibpercentages in de diepe geul en op de overgang naar de plaat liggen in november weliswaar gemiddeld iets hoger dan in september, toch is de algemene verdeling niet substantieel veranderd: hogere slibgehalten aan de westrand, in het diepste gedeelte van de geul, lage waarden en een lichte stijging in de richting van de plaat. Het grote verschil met voorgaande meetperiode schuilt in de slibgehalten op de plaat. Deze zijn over de gehele plaat gedaald tot een vergelijkbaar niveau en verdeling als die gemeten in mei.

3.3. Statistische analyse

3.3.1. Inleiding

Uit de verdeling van de bodemslibgehalten over het gebied voor de drie bemonsteringsperioden blijkt zowel de temporele als de ruimtelijke afhankelijkheid hiervan. Met statistiek als hulpmiddel kunnen de verzamelde gegevens op het al dan niet voorkomen van significante trends onderzocht worden. Daarbij kan worden getoetst of slibgehalten - zowel in de tijd als ruimtelijk bezien - zo enigerlei voorspeld kunnen worden en indien mogelijk, op grond van één of meer gemakkelijk te bepalen variabelen.

Er is gebruik gemaakt van een viertal analysetechnieken. Successievelijk worden regressie-, variantie- en semivariantie-analyse toegepast, waarna besloten wordt met de bestudering van de verdeling van de standaarddeviaties per meetpunt. Een uitgebreide behandeling van de verschillende methoden ligt buiten het bereik van dit rapport; hiervoor wordt verwezen naar (geo)statistische handboeken als van Davis (1980) en Blalock (1972).

Gemeenschappelijke voorwaarde bij regressie- en variantie-analyse is de normaliteit van de genomen monsters. Teneinde aan deze eis te voldoen zijn voor beide technieken de slibgehalten naar een logaritmische schaal geconverteerd.

3.3.2. Regressieanalyse

Regressieanalyse is toegepast met het doel inzicht te verkrijgen in hoeverre de variantie in hoogte van het slibpercentage valt te verklaren door één of meer gemakkelijk te bepalen variabelen.

Verschillende toetsingen zijn uitgevoerd met steeds de logaritme van het percentage bodemslib als afhankelijke, te voorspellen variabele en hoogteligging van de meetlocatie als onafhankelijke, verklarende variabele. Successievelijk is de voorspelbaarheid van de slibpercentages per meetperiode en het gemiddelde over de drie perioden onderzocht. Geen van de analyses resulteerde in een (absolute) correlatiecoëfficiënt hoger dan 0,2. Een overzicht van de resultaten van de uitgevoerde analyses wordt gegeven in tabel 3.1.

Aan de hand van in de in drie perioden uitgevoerde metingen valt op grond van hoogteligging (alleen) geen uitspraak te doen over de hoogte van het slibgehalte.

Tabel 3.1. Resultaten van lineaire regressieanalyse met de logaritme van het (plaatselijk) bodemslibgehalte als afhankelijke en de hoogteligging van de bodem t.o.v. NAP als onafhankelijke variabele.

Afhankelijke variabele (%)	Onafhankelijke var. (m NAP)	Intercept	Regressie coëff.	Corr. coëff	R' (%)
log. slib% mei	hoogteligging	0.3	$-1,9 \cdot 10^{-3}$	-0.2	2.6
log. slib% sept	hoogteligging	0.9	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0.1	1.0
log. slib% nov	hoogteligging	0.6	$7,8 \cdot 10^{-4}$	0.1	0.7
log. van gem. slib%	hoogteligging	0.9	$1,1 \cdot 10^{-5}$	0.0	0.0

3.3.3. Variantieanalyse

Variantieanalyse wordt toegepast om te toetsen of verschillende steekproeven uit een zelfde populatie afkomstig zijn. De methode vergelijkt de variantie in de waarden binnen een bepaalde groep met de variantie in de gemiddelden van de afzonderlijke groepen. Op grond van deze ratio wordt, met een bepaalde betrouwbaarheid, geconcludeerd of verschillen in het gemiddelde van de steekproeven al of niet op toeval berusten.

Voor de uitvoering van de methode zijn de data per meetperiode op grond van hoogteligging onderverdeeld in drie eenheden. Als indelingscriterium heeft morfologie gediend. Verder zijn de voorwaarden gesteld dat de meetpunten enigszins gelijkmatig over de eenheden verdeeld zouden zijn en dat een eenheid uit minstens 20 data zou bestaan.

Aldus zijn respectievelijk als eenheden onderscheiden:

- 'plaat': monsterpunten gesitueerd boven de gemiddeld laagwaterlijn ($> -2,2$ m NAP)

- 'ondiepe geul': monsterpunten gesitueerd tussen $-2,2$ m NAP en $-8,0$ m NAP. (Omvat de gehele schaar en de overgang van het Middeldgat naar de Brouwerplaat.)

- 'diepe geul': monsterpunten gesitueerd beneden $-8,0$ m NAP.

Aan de hand van het gemiddelde en de bijbehorende standaarddeviatie van de logaritme van de slibpercentages binnen een eenheid wordt getoetst of er, zowel ruimtelijk als temporeel bezien, een statistisch significant onderscheid is te maken. In tabel 3.2 staan de resultaten geresumeerd van deze analyse. De logaritme van zowel het gemiddelde slibgehalte als de beide grenswaarden van het 95%-betrouwbaarheidsinterval zijn per morfologische eenheid vermeld. Het significantieniveau geeft aan in welke mate er per periode of per eenheid een onderscheid in slibgehalte is te maken; een laag getal hierbij impliceert een hoge differentiatiegraad.

De toetsing per meetperiode resulteert slechts in een onderscheid voor de bemonstering in mei: met 99% betrouwbaarheid kan op grond van de gegevens geconcludeerd worden dat de slibpercentages in de diepe geul in mei 1987 gemiddeld hoger liggen dan die op grotere hoogten (op de plaat en in de ondiepe geul).

Voor de tweede en derde meetperiode in het gebied is op statistische gronden geen significant verschil in (gemiddeld) bodemslibgehalte tussen de eenheden aan te brengen.

De tijdsafhankelijkheid wordt getoetst door een nulhypothese op te stellen die ervan uitgaat dat de gemiddelde slibpercentages

van een morfologische eenheid over de drie meetperioden, statistisch gesproken, niet significant van elkaar verschillen.

Deze toetsingen resulteren slechts in een significante temporele afhankelijkheid op de plaat: op grond van de metingen kan met 92,5% betrouwbaarheid (hetgeen overeenkomt met een significantieniveau van $1 - 0,925 = 0,075$) op diepten boven de GLW-lijn (-2,15 m NAP) gesteld worden dat het gemiddeld slibpercentage in de bovenste bodemlaag in september significant hoger ligt dan in mei respectievelijk november 1987 (tabel 3.2).

Het gemiddeld bodemslibgehalte voor monsters in de beide overige eenheden vertoonde bij analyse wel variatie over de drie meetperioden, maar deze verschillen zijn niet statistisch significant bevonden.

Tabel 3.2. Resultaten variantieanalyse van de logaritme van de slibgehalten per morfologische eenheid per periode.

Meet-periode	95% betr. b interval	morfologische eenheid			Signific. niveau
		diepe geul	ond. geul	plaat	
MEI	ondergrens	0,74	-0,26	-0,21	0,005
	gemiddelde	1,19	0,22	0,15	
	bovengrens	1,64	0,69	0,51	
SEPT	ondergrens	0,14	0,15	0,40	0,793
	gemiddelde	0,63	0,70	0,89	
	bovengrens	1,12	1,25	1,38	
NOV	ondergrens	0,08	0,13	-0,05	0,651
	gemiddelde	0,51	0,81	0,39	
	bovengrens	0,94	1,49	0,82	
Significantieniveau		0,223	0,273	0,075	

3.3.4. Semivariantie

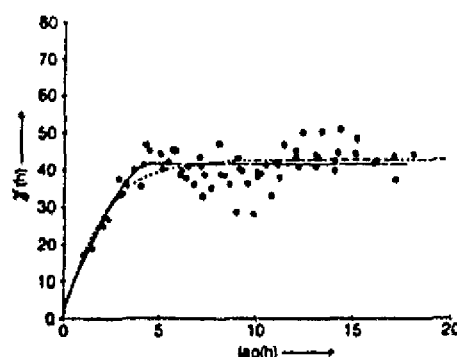
Semivariantie wordt toegepast bij een ruimtelijk afhankelijke variabele, die continu is van punt tot punt, maar waarvan de veranderingen zo complex zijn, dat ze door middel van een opspoorbare deterministische functie niet te beschrijven zijn (Davis, 1986). Semivariantie drukt, voor een bepaalde afstand, de mate van verandering in de beschouwde variabele uit.

Een semivariogram, waarvan in figuur 3.4 een voorbeeld gegeven is, geeft een schatting van het verloop van de semivariantie van de variabele bij toenemende afstand. In het algemeen geeft het, tot een bepaalde afstand h , een stijging in semivariantie weer. Tussen afstanden, groter dan deze bepaalde afstand, die als 'range' wordt gerefereerd, blijft de semivariantie rond een maximale 'sill'waarde fluctueren. Dit impliceert dat punten die verder dan de range van elkaar verwijderd zijn geen informatie over de waarde van de beschouwde variabele aan elkaar kunnen verschaffen: de punten zijn volledig onafhankelijk van elkaar. De waarde van de sill is gelijk aan de variantie van de variabele.

In het kader van het onderzoek zou het nuttig zijn een goed semivariogram te construeren; d.w.z. voor verschillende afstanden tussen monsterpunten de semivariantie in slibgehalte te bereke-

nen. Met een dergelijke grafiek kan een bemonsteringsafstand voor het gebied of per morfologische eenheid aanbevolen worden. Deze afstand bedraagt, afhankelijk van beoogde nauwkeurigheid, een bepaald percentage van de range.

Met een kleinste bemonsteringsafstand van 150 m is het niet mogelijk gebleken een volledig semivariogram samen te stellen. De korte afstandsvariantie is met deze afstand niet bepaald. Afhankelijk van de bemonsteringsperiode en de beschouwde morfologische eenheid is het semivariogram meer of minder goed te construeren. In alle gevallen geldt evenwel, dat berekeningen voor afstanden geringer dan 150 m noodzakelijk zijn om via beschreven methode tot een onderbouwde bepaling te komen van een aan te bevelen bemonsteringsafstand.



Figuur 3.4 De karakteristieke vorm van een semivariogram, waarbij de experimenteel geschatte waarden van de semivariantie zijn gepast in een sferisch model (—) en een exponentieel model (---) (Burrough, 1986).

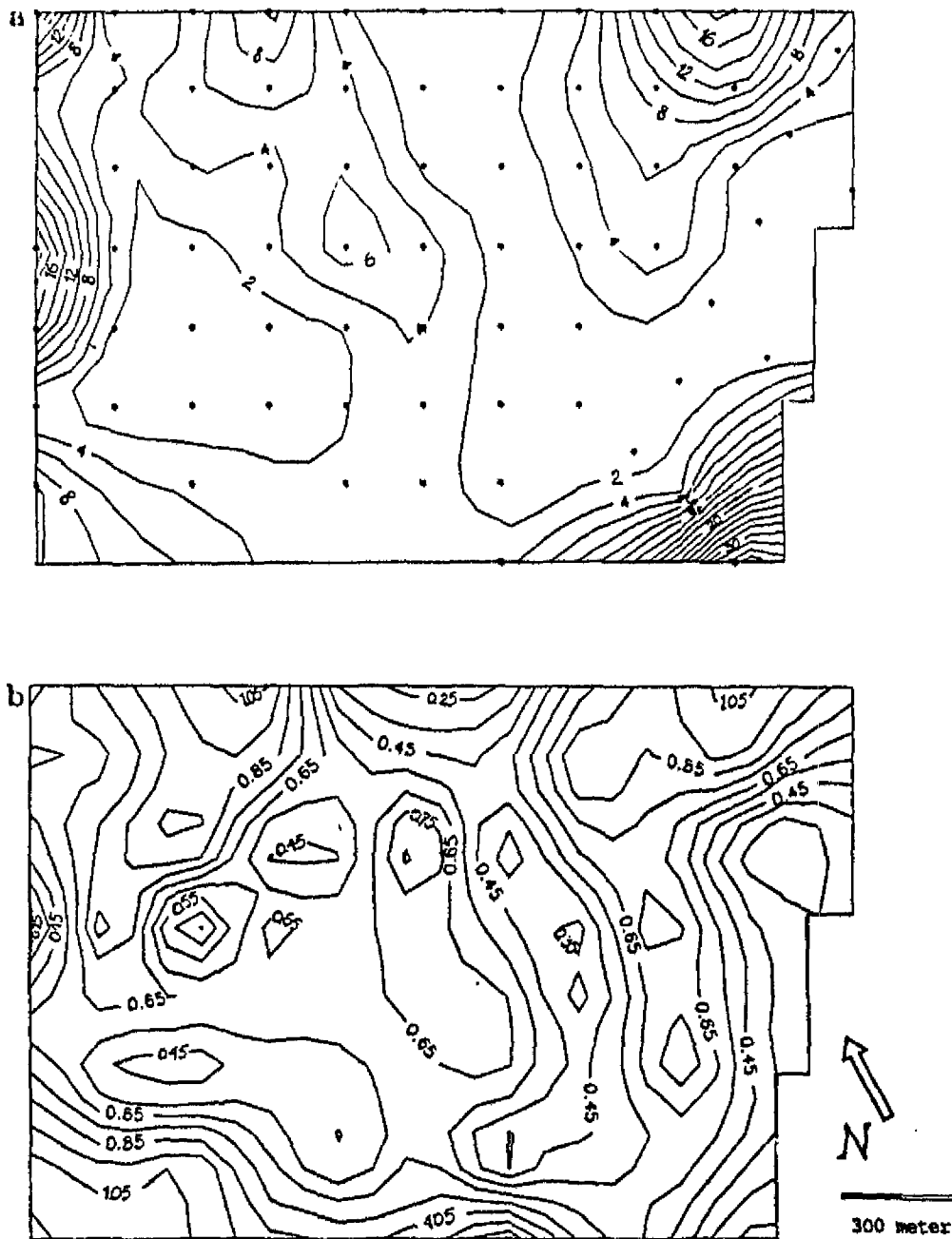
3.3.5. Temporele variatie in slibgehalte per meetpunt

In één van de probleemstellingen bij de bodembemonsteringscampagne is de vraag gesteld of er binnen het onderzoeksgebied oppervlakten zouden zijn te onderscheiden, eventueel gekoppeld aan een (morfologische) variabele, met een grotere dynamiek in slibgehalte. Anders gesteld, is er een differentiatie aan te brengen in gebieden waar de variatie in slibgehalte over de drie meetperioden hoger ligt ten opzichte van andere?

Teneinde via de statistiek een antwoord hierop te geven is in eerste instantie per meetpunt de standaarddeviatie berekend. Om deze waarden in het gebied onderling vergelijkbaar te maken is het noodzakelijk ze te standaardiseren. De dan verkregen relatieve variabiliteit wordt uitgedrukt in de variatiecoëfficiënt V , die gedefiniëerd wordt als het quotiënt van de standaarddeviatie en het gemiddelde van beschouwde variabele (Blalock, 1972).

Met gebruik making van de interpolatietechniek kriging is een isolijnenkaart geconstrueerd, die de verspreiding van het gemiddelde slibpercentage over de drie meetperioden weergeeft (figuur 3.5a). Figuur 3.5b geeft de verdeling van de variatiecoëfficiënt in slibgehalte over het bemonsteringsgebied. Door middel van kriging zijn tussen de meetpunten lijnen met gelijke coëfficiëntwaarden getrokken.

In de figuur zijn, op het oog, twee gebieden te onderscheiden waarbij de temporele variabiliteit hoger ligt dan het gemiddelde. De twee gebieden zijn gelocaliseerd in het noordelijk deel



Figuur 3.5 a) Ruimtelijke verdeling van het gemiddelde slibgehalte (%) over de drie bemonsteringsperioden
b) Ruimtelijke verdeling van de variatiecoëfficiënt (-)

van het centrale, diepe gedeelte van het Middeldgat en op het noordoostelijk deel van de bemonsterde Brouwerplaat.

Ondanks het voorkomen van deze clusters lijkt het niet zinvol wetmatigheden of relaties aan het resultaat van toegepaste methode te verbinden. De ruimtelijke verdeling van de coëfficiënten vertoont geen duidelijke gradiënt in een bepaalde richting. Ter illustratie hiervan kunnen de waarden van vier meetpunten worden genoemd, die in het Middeldgat langs één lijn en 150 m van elkaar verwijderd liggen. De variatiecoëfficiënten fluctueren binnen het bereik van voorkomen van het ene extreem naar het andere: ze bedragen respectievelijk 0,1, 1,0, 0,1 en 1,1.

Toepassing van variantieanalyse, waarbij getoetst wordt of er een onderscheid is te maken tussen de morfologische eenheden (§ 3.3.3.) wat betreft de daarin voorkomende variatiecoëfficiënten, resulteert dan ook niet in significante verschillen.

3.3.6. Samenvatting van op statistiek gebaseerde conclusies

Met behulp van statistische methoden en technieken zijn aan de meetresultaten enkele conclusies verbonden aangaande het onderzoeksgebied. Ter behoud van het overzicht volgt een recapitulatie hiervan:

- De ruimtelijke én temporele variatie in slibgehalten voor de verschillende monsterpunten is groot.
- De slibgehalten op de plaat zijn in september gemiddeld significant hoger dan die op de plaat in mei respectievelijk november.
- De slibgehalten in de diepe geul zijn in mei gemiddeld significant hoger dan op de hoger gelegen meetpunten in dezelfde periode.
- De korte afstandsvariatie is met een minimumbemonsteringsafstand van 150 m, voor de verschillende morfologische eenheden en meetperiodes, niet volledig te bepalen.
- Op grond van hoogteligging is het niet mogelijk een differentiatie aan te brengen in gebieden met verschillend slibgehalte.

Bij de toepassing van statistische technieken kunnen zich moeilijkheden voordoen, juist in een milieu waarbij interactie plaatsvindt tussen veel factoren, die zowel ruimtelijk als temporeel elkaar in dominantie aflossen. Het is ook hierom van belang de rol van de statistiek te relativiseren. Statistische analyses moeten niet als doel worden beschouwd, maar als middel dienen om een omvangrijke dataset overzichtelijk te maken en in deze set trends of juist het ontbreken daarvan op te sporen.

3.4. Slibuitwisseling tussen bodem en waterkolom

3.4.1. Inleiding

Met behulp van statistische methoden en technieken zijn aan de meetresultaten enkele conclusies verbonden. Een logische stap in het vervolg van het onderzoek is na te gaan in hoeverre de constatering binnen een procesmatige benadering zijn te plaatsen. Alvorens deze koppeling te maken volgt een theoretische

beschouwing van de hierbij relevante processen en factoren.

Hierbij moet gewezen worden op het feit dat binnen dit onderzoek slechts de slibhuishouding beschouwd wordt. Het is van belang dat gerealiseerd wordt dat de slibfractie slechts een gering percentage ten opzichte van het zand in de bodem van het Westerschelde estuarium vormt. Het gedrag van de zandfractie zal wel degelijk invloed hebben op de mate waarin slibuitwisseling plaatsvindt. Als gevolg van resuspensie en sedimentatie van zand kan ook het slibgehalte beïnvloed worden.

Op het grensvlak tussen bodem en waterkolom speelt een complex processen die invloed heeft op de mate van erosie en resuspensie van slib aan de ene kant en sedimentatie hiervan aan de andere.

Het feit dat de verzameling van invloed zijnde processen en de dominantie van bepaalde processen hierbinnen per locatie en in de tijd verschilt, veroorzaakt de geconstateerde grote ruimtelijke en temporele variatie in slibgehalte.

Bij de beschouwing van de meest relevante processen en factoren inzake de mate van uitwisseling van slib over het grensvlak is een tweedeling te maken in degenen die invloed hebben op de mate van erosiviteit op de bodem en die de mate van weerstand van de bovenste bodemlaag bepalen. Het complex fysische, chemische en biologische processen werkt onafhankelijk of in combinatie van elkaar. De sedimentreactie vindt hierbij niet altijd onmiddellijk plaats, maar loopt vaak enigszins achter op veranderingen in energie input (Nichols, 1984).

Oppervlakte erosie vindt plaats als de bodemschuifspanning een kritieke waarde overschrijdt, gelijk aan de weerstand van het sediment ter plaatse. Deze drempelwaarde hangt slechts indirect van de stroomsnelheid af: de belangrijkste factoren zijn onder andere de sleep- of trekkrachten die op de bodem werken, de bodemruwheid en turbulentie (Postma, 1967). De stroomsnelheid, waarbij een bepaalde korrelgrootte op transport gaat, wordt de competente stroomsnelheid van die korrelgrootte genoemd.

De weerstand van een cohesieve bodem wordt veroorzaakt door electro- en/of biochemische krachten tussen de deeltjes (Nichols, 1984). De sterkte hiervan is afhankelijk van factoren die in de tijd en per locatie verschillen.

3.4.2. Beschikbaarheid van slib in de waterkolom

Naast de omstandigheden aan het grensvlak spelen factoren een rol die de mate bepalen waarin slib wordt aangevoerd. Van belang hierbij zijn:

- de absolute hoeveelheid slib en de verdeling hiervan in de waterkolom. Deze bepalen de hoeveelheid slib die onder de heersende hydraulische condities kan bezinken of opgenomen kan worden.
- de lengte van de waterkolom. Dit speelt in samenhang met de tijd die beschikbaar is voor uitzakking en sedimentatie.

Bovenstaande factoren moeten in hun ruimtelijke afhankelijkheid beschouwd worden. De mate waarin bijvoorbeeld de verticaal-opbouw boven plaat en geul van elkaar verschillen zal van invloed zijn op het verschil in slibgehalte tussen de respectievelijke bodems. Verwacht zou kunnen worden dat het verschil in concentratieverdelingen fluctueert met een eb-vloedcyclus, een doottij-

springtijcyclus en met de seizoenen. Verder is het van belang zowel de initiële condities als het verloop te kennen van een concentratieverticaal bij een voortgaande stroming over een plaat.

Teneinde een beter inzicht te verkrijgen in het resulterend effect van genoemde factoren is nader onderzoek aanbevelenswaardig. Metingen in waterkolommen op verschillende locaties zullen in hun ruimtelijke context belicht moeten worden.

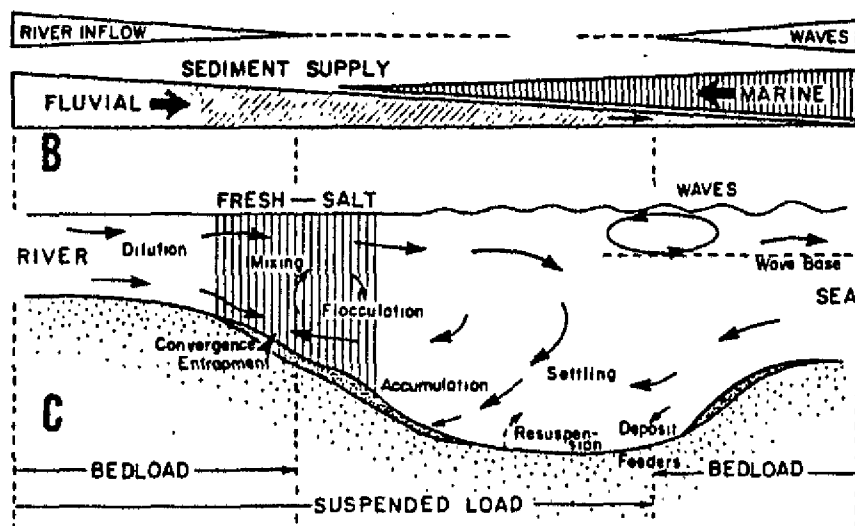
3.4.3. Omstandigheden die erosie en resuspensie beïnvloeden

Het voornaamste proces waarbij sediment (terug) in de waterkolom wordt gebracht is oppervlakte erosie door stroom- of golfbeweging (Nichols, 1984). Figuur 3.6 geeft een indruk van de factoren die in dit verband van belang zijn.

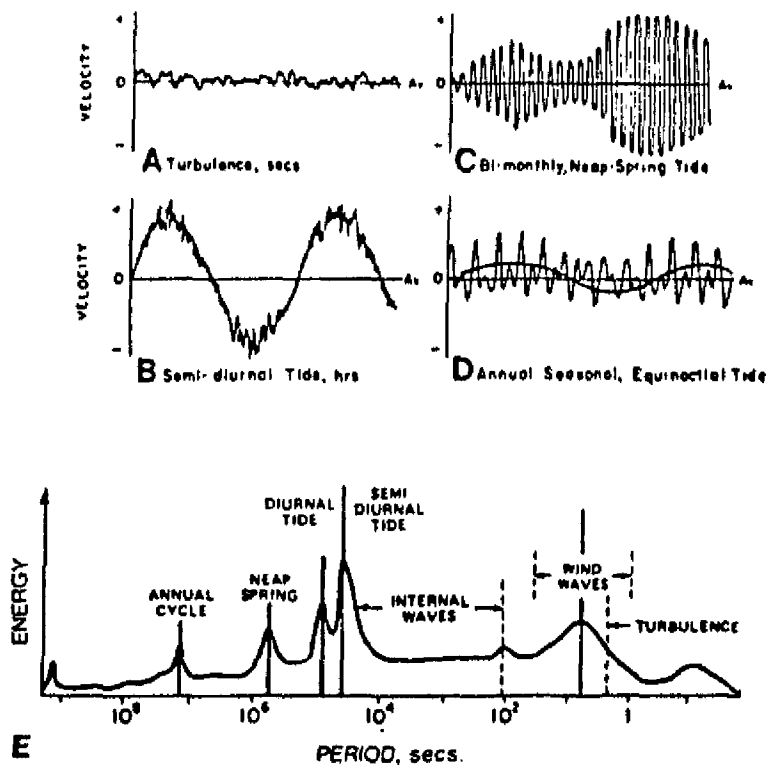
De hoeveelheid materiaal die door het grensvlak in de waterkolom wordt gebracht is afhankelijk van de mate waarin de competente snelheid overschreden wordt en het tijdsinterval waarover dit plaatsvindt. Zowel (getijde)stroming als golfwerking vertonen hierin een groot bereik aan periodiciteiten. Anderzijds bestaat ook in sedimenteigenschappen en biologische activiteit een grote (ruimtelijke én temporele) variatie. Deze fenomenen liggen ten grondslag aan het feit dat er, per locatie in de Westerschelde, in resuspensie- en erosieactiviteit een breed spectrum aan tijdschalen aanwezig is. Tijdschalen variëren als gevolg van periodiciteit in turbulentie, binnen een eb-vloedcyclus, een doottij-springtijcyclus en een jaarlijkse afwisseling (figuur 3.7).

Effect van golfwerking aan de bodem.

Golven met hoge orbitaalsnelheden aan de bodem kunnen sediment in suspensie brengen (Nichols, 1984). Suhayda et al. (1976) spreken van een bijkomend effect van golfbeweging: drukvariaties



Figuur 3.6 Processen in de waterkolom en op het grensvlak met de bodem, die de mate van suspensie en uitwisseling met de bodem bepalen (Nichols, 1985).



Figuur 3.7 Modellen van tijdschalen in resuspensie in de vorm van tijd-snelheidsoscillaties van de momentane, locale stroomsnelheid. Figuren A-D zijn overgenomen uit Allen (1974), (Nichols, 1984).

A. Willekeurige oscillaties in turbulentie met elementen die fluctueren binnen een bereik van een seconde tot tien-tallen seconden.

B. Periodische oscillaties van een dubbel-daagse getijcyclus met variaties in turbulentie erop gesuperponeerd.

C. Periodische oscillaties van de tweewekelijkse dootij-springtijcyclus.

D. Weergave van periodische oscillaties van de dootij-springtijcyclus gesuperponeerd op de seizoensmatige variaties voor een half jaar.

E. Schematisering van tijdschalen in resuspensie, weergegeven in verschillende vormen van energie input. De energieschaal is arbitrair.

als gevolg van fluctuaties in golfamplitude, kunnen van invloed zijn op de bodemweerstand, afhankelijk van de bodemsamenstelling ter plaatse.

De mate waarin golfwerking als agens kan optreden voor het in suspensie brengen van materiaal hangt af van:

- de hoeveelheid energie die door de wind kan worden overgedragen aan de waterkolom. Dit is evenredig met de derde macht van de windsnelheid (Gabrielson et al, 1984).
- de mate waarin golven tot ontwikkeling kunnen komen, afhankelijk van de strijklengte, geassocieerd met de windrichting, en van de duur waarin een bepaalde windkracht energie uitwisselt met het wateroppervlak (Groen & Dorrestein, 1976). Van belang hierbij is het soort golven die gegenereerd worden: de grootte van de golfperiode, -lengte en -hoogte.

- in hoeverre de door de golven opgewekte orbitaalbeweging kan bijdragen tot overschrijding van de kritieke bodemschuifspanning. Dit wordt in hoge mate beïnvloed door de waterdiepte, welke zowel in de tijd (binnen een eb-vloed en een doodtij-springtijcyclus) als in de ruimte (bepaald door de bodemdiepte ten opzichte van NAP) varieert.

Invloed van getijstroming.

Naast golfwerking is getijstroming de voornaamste energieleverancier om sediment (terug) in de waterkolom te brengen. De mate waarin dit plaatsvindt is afhankelijk van de vorm van de getijcurve (van Alphen, 1982), ook in associatie met de heersende omstandigheden binnen de doodtij-springtijcyclus. Dit beïnvloedt de maximale stroomsnelheid, de duur waarbij de competente stroomsnelheid wordt overschreden en het verband tussen de stroomsnelheid en waterdiepte en daarmee samenhangend de schuifspanning aan de bodem.

3. 4. 4. Omstandigheden die de weerstand van de bodem bepalen

De voornaamste factoren die naast de erosieve krachten invloed hebben op de mate van uitwisseling door de grenslaag zijn:

- de sedimentsamenstelling en textuur. Factoren als het gehalte aan organisch materiaal, kleimineralogie en het klei/zandpercentage bepalen, in associatie met de mate van cohesie, de hoogte van de kritieke schuifspanning. (Nichols, 1984 en Postma, 1967).
- de consolidatiegraad. De tijd verstreken na sedimentatie bepaalt, afhankelijk van sedimenteigenschappen en uitgeoefende spanningen op de bodem, de mate waarin consolidatie en daarmee verhoging van de drempelwaarde, plaats heeft kunnen vinden (Postma, 1967; Nichols, 1984).
- omstandigheden die flocculatie beïnvloeden. De vorm, dichtheid en afmeting van een vlok bepalen de grootte van de sedimentatiesnelheid enerzijds en de kritische schuifspanning anderzijds. Flocculatie hangt af van het aantal botsingen en van de cohesie tussen de deeltjes (Neville Burt, 1984).

Een samenvatting uit Mulder et al (1987), Nichols (1984), Krone (1978) en Neville Burt (1984) geeft de volgende opsomming van de factoren die hierop van invloed zijn:

- de concentratie van de deeltjes in suspensie.
- het verschil in valsnelheid, ofwel differential settling.
- turbulentie en in associatie hiermee de aan de grenslaag heersende schuifspanning. Als gevolg van turbulentie kunnen deeltjes met elkaar in botsing komen, maar kan ook afbraak van een vlok plaatsvinden.
- de Brownse beweging.
- de eigenschappen van de deeltjes, voor zoverre deze samenhangt met de cohesiegraad.
- organische processen en biologische activiteiten. Deze veroorzaken variaties in de cohesie van het sediment. De vorming van matten, door onder andere diatomeeën, en uitwerpselen van fauna verhogen de kritieke schuifspanning. Anderzijds kan door omwoeling en vergroting van de bodemruw-

heid als gevolg van gravende dieren juist méér sediment in suspensie worden gebracht (McCave, 1984 en Nichols, 1985).

3.4.5. Ruimtelijke differentiatie in bodemslibgehalte

Vanuit de bovenbeschreven combinatie van relevante processen en factoren kan doorberedeneerd worden naar een verwachting van de ruimtelijke uitwerking hiervan.

De intergetijdgebieden zullen in het zomerseizoen een relatief hoog slibgehalte vertonen. Dit in tegenstelling tot het voor- en najaar waarin de hydraulische condities als gevolg van bijvoorbeeld windgolven overwegend onrustiger zijn. Naar continuïteitseisen zal in het voor- en najaar in het gehele systeem meer slib mobiel zijn en eventueel beschikbaar om in de geulen te sedimenteren. Daarnaast zal in geulen ook zandtransport plaatsvinden.

Het feit dat een intergetijdgebied slechts met één kentering per eb-vloedcyclus te maken heeft zou eveneens tot een differentiatie in slibgehalte tussen geul en plaat kunnen leiden. Ook hier spelen elkaar tegenwerkende factoren en processen. In de geulen wordt in principe twee maal zo lang gelegenheid tot sedimentatie geboden. Er heersen echter ook langer condities die resuspensie zullen bevorderen. Daarnaast zullen op een plaat door ontwatering de omstandigheden gunstiger zijn voor consolidatie.

In hoeverre het resulterend effect zal doorslaan naar een verschil in slibgehalte zal mede afhangen van de expositie en de hoogte van de beschouwde locaties.

In 3.4.2 is summier de relatie met de verdeling(en) van de concentratieverticalen besproken. Daarnaast spelen horizontale transporten en circulatiepatronen binnen het estuarium een rol in het bepalen van de ruimtelijke verschillen in slibgehalte. In dit verband wordt genoeg genomen met slechts een vermelding.

3.5. Koppeling van de onderzoeksresultaten met theorie

Het bovenbeschreven complex factoren vormt de basis voor de statistisch aangetoonde grote ruimtelijke en temporele variaties in slibgehalten in het bemonsteringsgebied. Het feit dat de korte afstandsvariantie meestal niet beschreven kan worden met een minimale bemonsteringsafstand van 150 m (§ 3.3.4) impliceert dat de dominantie binnen dit complex vaak al verandert binnen deze afstand.

Regressieanalyse met hoogteligging als afhankelijke variabele om de variatie in bodemslibgehalte te verklaren heeft niet tot resultaat geleid (§ 3.3.2.). Hieruit blijkt dat verschil in bodemdiepte alléén geen maat is voor de overheersende combinatie van processen die de mate van slibuitwisseling bepaalt.

Niettegenstaande is het in het bemonsteringsgebied mogelijk gebleken om aan de hand van een bepaald bereik aan bodemdiepten een voorspelling te doen over de ruimtelijke en temporele variabiliteit in gemiddeld slibgehalte (§ 3.3.3.).

De op statistiek gebaseerde conclusie dat voor bodemdiepten boven de gemiddeld laagwaterlijn het gemiddeld slibgehalte in september significant hoger ligt dan in mei respectievelijk no-

Tabel 3.3. Overzicht van de frequentie van daggemiddelde windsnelheden > 7,5 m/s zoals geregistreerd voorafgaande aan de bodembemonsteringen (naar weergegevens KNMI, station Vlissingen).

PERIODE	FREQUENTIE (mnd ⁻¹)	MAX. DAGGEM. IN PERIODE (m/s)
vóór mei bemonstering	7,3	10,5
tussen bem. mei - sep	1,6	9,5
tussen bem. sep - nov	11,4	15,0

vember kan waarschijnlijk als volgt verklaard worden. Sediment-beweging vindt overwegend plaats gedurende korte episodes met hoog energetische omstandigheden. Indien een grote windsnelheid gepaard gaat met een voor de configuratie van het Middellandse Zee juiste windrichting, kan sedimentopname plaatsvinden. Dit kan slechts voorkomen op locaties waar de bodemdiepte zodanig ligt, dat orbitale snelheden als gevolg van golfwerking voldoende groot zijn om de kritische bodemschuifspanning te kunnen overschrijden. In de periode tussen de bemonstering in mei en die van september komen aanzienlijk minder hoge (zuidwestelijke) windsnelheden voor dan voor beide andere bemonsteringsperiodes (weergegevens KNMI, station Vlissingen). Een specificatie wordt gegeven in tabel 3.3. In appendix D zijn enkele voorbeeldsituaties van in de Westerschelde voorkomende meteorologische omstandigheden doorberekend naar golfcondities in het bemonsteringsgebied en de hieraan gerelateerde orbitale snelheden nabij de bodem.

De (extreme) windomstandigheden zijn dusdanig, dat golven ontwikkeld worden, die slechts de bodem van de Brouwerplaat merkbaar beïnvloeden; bij overige locaties in het onderzochte gebied ligt de bodem te diep. Om deze reden is het statistisch aangetoonde seizoensmatige verschil in slibgehalte slechts bij de plaatmonsters aanwezig.

Het statistisch aangetoonde verschil in gemiddeld bodemslibgehalte in mei tussen de gebieden begrensd door de -8 m NAP-lijn heeft mogelijk ook met bovenstaande te maken. Alvorens dit toe te lichten eerst de toevoeging dat, aan de hand van de figuren 1.2 en 3.1 tot en met 3.3, er geen lijn, maar een grensgebied is waar te nemen. Deze ligt ruwweg tussen de gemiddeld laagwaterlijn en de genoemde -8 m NAP-hoogtelijn. De slibpercentages van de oppervlakten gedeeltelijk in, maar voornamelijk boven deze zone kunnen lager zijn na perioden met grote windactiviteit omdat slechts hier golfwerking zijn invloed heeft laten gelden.

Hoewel het gemiddeld slibpercentage in de geul in mei iets hoger ligt dan in beide andere meetperiodes, is dit temporele verschil niet significant bevonden. Deze constatering zou in overeenstemming met de theorie zijn: als hier getijstrooming dominant zou zijn in energieinput, dan zou een variatie in slibgehalte op het schaalniveau van een doortij-springtijcyclus te verwachten zijn.

Opvallend is dan wel het feit dat tijdens de bemonstering begin november, weer na een periode met sterke windcondities, dit ruimtelijk verschil (hogere slibgehalten in de diepe geul) niet is aangetoond (tabel 3.2, figuren 3.1 & 3.3). Dit kan waarschijn-

lijk op conto geschreven worden van de seizoensvariabiliteit. Gedurende een lange periode met weinig wind en laag energetische golfomstandigheden in de zomer heeft er sedimentatie en nadien consolidatie van slib op de plaat plaats kunnen vinden. Er is dientengevolge veel energie vereist om het slibpercentage terug te brengen tot het in mei gemeten niveau. De antecedente condities van de novemberbemonstering zijn dan niet van dien aard geweest om het niveau van mei binnen de tot dan toe beschikbare tijd te bewerkstelligen.

Bij vergelijking van de cijfers van mei met november moet opgemerkt worden dat het gemiddelde in mei op de plaat dus net iets lager ligt, maar dat het in de diepe geul dan net iets hoger ligt: het ruimtelijk verschil dat in mei wel werd geconstateerd wordt aan twee kanten uitgedempt.

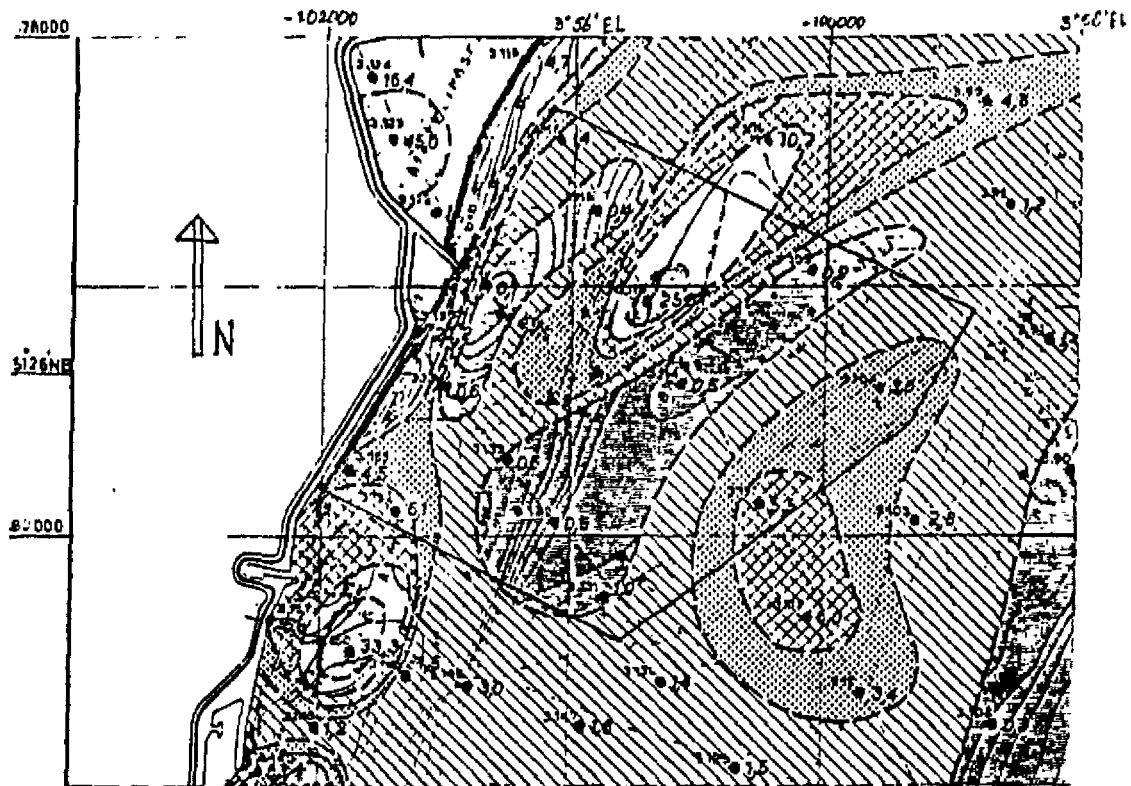
De getijomstandigheden zijn vergelijkbaar: beide metingen vonden plaats twee dagen voor springtij. De verklaring kan eventueel nog gezocht worden in veranderde omstandigheden in de geul (en mogelijk die op de plaat): een variatie in consolidatiegraad van de bodem of de biologische activiteit of een tijdelijke verandering in de hoeveelheid beschikbaar slib voorafgaande aan een bemonstering (erosie of lozing stroomopwaarts).

Een feit dat bij bestudering van de drie verdelingen van slibgehalten opvalt is de relatieve uniformiteit per periode van de percentages op de overgang van de diepe geul naar de plaat. Dit zou veroorzaakt kunnen zijn doordat het de grens vormt tussen twee gebieden die van elkaar verschillen in dominantie van processen. Indien hier in vergelijking tot de omgeving hogere slibpercentages worden aangetroffen (zoals in november, figuur 3.3), kan dat resulteren uit het feit dat de bodem van de geulrand te diep is om beïnvloed te worden door golven en tegelijkertijd te ver van de as van de geul verwijderd ligt om bloot te staan aan sterke stromingen. Bij een dergelijke uitspraak moet (zoals zovele malen) niet voorbij worden gegaan aan andere van invloed zijnde condities; de expositie ten opzichte van de richting en de plaats waaruit energie wordt aangevoerd en de steilheid van de rand zullen hierbij van belang zijn.

3.6 Wijze van bodembemonstering, vergelijking bestaande kartering

Door een meetgrid met een dichtheid van 40 punten per km² gedurende een half jaar 3 maal te bemonsteren is een indruk verkregen van de grote ruimtelijke en temporele variatie in slibgehalten van de bovenste bodemlaag in het gebied en de trends die hierin zijn te onderscheiden. Het aangehouden bemonsteringsprogramma is veel intensiever dan die is uitgevoerd voor de bestaande kartering 1 : 25.000 van de Westerschelde (De Looft, 1978 en 1980), die door RWS als basis wordt gebruikt bij een aantal onderzoeken. Voor het in dit rapport besproken gebied is een vergelijking mogelijk tussen de patronen in bovengenoemde kaart en de resultaten van dit onderzoek.

De kartering 1 : 25.000 laat een geheel ander patroon zien dan de in dit onderzoek verkregen resultaten (figuur 3.8). Om tot een kwantitatieve vergelijking te komen moeten de door de Looft gebruikte percentages, die slaan op het gehalte aan de fractie $\leq 16 \mu\text{m}$, vermenigvuldigd worden met de ratio tussen het gewichtspercentage van materiaal $\leq 50 \mu\text{m}$ en dat van materiaal $\leq 16 \mu\text{m}$.

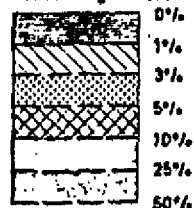


TOELICHTING

RECHTHOEKIGE COÖRDINATEN IN m.T.O.V. AMERSFOORT
 EUROPESE COÖRDINATEN IN GRADEN T.O.V. GREENWICH
 SITUATIE NAAR LUCHTKAARTERING
 DIEPTELIJNEN IN dm T.O.V. N.A.P.
 ECHOLODINGEN VERRICHT VAN 1 MEI t/m 12 DEC. 1975

—— KABEL OF ZINKER (IN GEBRUIK)
 - - - KABEL OF ZINKER (BUITEN GEBRUIK)

Percentages slib



1.87 ● Monsterpunt met nr
 ● 0,6 Percentage slib

Figuur 3.8 Gedeelte van de kartering van bodemslibpercentages (fractie $\leq 16 \mu\text{m}$) in de Westerschelde, naar de bodemonstering in 1975. Verkleind van schaal 1 : 25.000 (De Looff, 1978).

Deze verhouding bedraagt voor beschouwd gebied gemiddeld 1,75 (Van Maldegem, 1987).

Tabel 3.4 toont het verschil in gemiddeld slibgehalte en de variatie hierin, berekend volgens de kartering 1 : 25.000 en aan de hand van de resultaten van de drie meetperioden in dit onderzoek. Het gemiddelde volgens eerstgenoemde ligt beduidend hoger.

Omdat externe omstandigheden tijdens en vóór de in 1975 uitgevoerde campagne onbekend zijn, evenals bijvoorbeeld de aangehouden laboratoriumanalyse, wordt verklaring van deze verschillen bemoeilijkt. Daarnaast wordt een fout geïntroduceerd bij de omre-

Tabel 3.4 Beschrijvende statistiek van slibpercentages in het bodembemonsteringsgebied, volgens gegevens van De Looff (1978) en uit eigen onderzoek.

	De Looff	Eigen onderzoek		
		mei	sept	nov
Gemiddeld over het gebied (%)	12,5	3,9	5,9	3,8
Standaarddeviatie (%)	17,2	6,3	9,7	1,7

kening naar het percentage van de fractie $\leq 50 \mu\text{m}$. Niettegenstaande kunnen in dit verband enkele uitspraken gedaan worden.

In eerste instantie speelt het verschil in bemonsteringsdichtheid een rol. Een afstand van 150 m is vaak onvoldoende gebleken om de korte afstandsvariantie te schatten; de Looff (1978) baseert zijn kartering op een meetprogramma dat wel degelijk een goede spreiding in monsterpunten vertoont, maar dat 6,5 maal minder intensief is.

Niet in de laatste plaats echter is het tijdsinterval waarin monsternamen heeft plaatsgevonden als oorzaak voor de verschillen aan te wijzen. Hoewel bij de in 1975 uitgevoerde meetcampagne rekening is gehouden met doodtij-springtijomstandigheden, is de bemonstering in beschouwd gebied geschied tussen 20-02 en 06-06 1975 (Van Maldegem, 1987).

De verdelingen van slibgehalten per periode en de conclusies hierover (§ 3.3) maken duidelijk dat bij het opzetten van een bemonsteringsprogramma wel degelijk rekening moet worden gehouden met het tijdstip binnen het jaar.

Aanbevelingen voor een bodembemonsteringsprogramma zijn, vanwege de grote temporele en ruimtelijke variaties in slibpercentages, moeilijk te maken. Er zou rekening gehouden moeten worden met de dynamiek, en wel in eerste instantie met de jaarlijkse periodiciteit in slibgehalte. Daarnaast speelt ook de ruimtelijke variatie een niet te onderschatten rol. De korte afstandsvariantie is variabel over afstand en in de tijd en is met een minimale bemonsteringsafstand van 150 m niet altijd te bepalen. Om hier vat op te krijgen zou een 'nested sampling' uitgevoerd moeten worden. Deze bemonsteringsmethode houdt in dat punten volgens een bepaald patroon worden gekozen op een aantal verschillende afstanden, bv. op 2, 20, 100 en 1000 m. Dit heeft het voordeel dat naast de grotere trend ook de korte afstandsvariantie, de zogenaamde ruis, kan worden bepaald (Burrough, 1986).

Met deze wetenschap blijft de keuze over om hetzij binnen de door tijd en financiën gestelde randvoorwaarden over te gaan tot een intensieve bemonstering in een representatief geacht gebied en resultaten hiervan in meer of mindere mate te extrapoleren naar andere oppervlakten, ofwel de middelen te spreiden over het gehele te onderzoeken gebied.

4. PROCESSEN IN DE WATERKOLOM

4.1. Inleiding

Ter bestudering van de processen die van belang zijn bij stromingen en troebelheden in de waterkolom, zijn twee soorten figuren geconstrueerd:

1. stroomsnelheids- en troebelheidsverticalen
2. isostroomsnelheids- isotroebelheids- en isochloriniteits-diagrammen

De verticalen geven inzicht in variaties binnen de waterkolom. Tevens is het mogelijk om voor zowel de stroomsnelheid als de troebelheid de verticaalgemiddelden te bepalen.

Een iso-diagram is een weergave van een aaneenschakeling van verticalen over een gehele getijperiode. De variaties in de beschouwde variabele (stroomsnelheid, troebelheid, chloriniteit) worden door middel van iso-lijnen weergegeven. Hiervoor is gebruik gemaakt van een Kriging interpolatieprogramma (Davis, 1986).

Dit soort diagrammen geeft een goed overzicht van de veranderingen van de verschillende variabelen in de tijd. Ook onderlinge vergelijking van variabelen maakt het leggen van eventuele verbanden mogelijk.

De verticalen en iso-diagrammen zijn opgesteld voor vier 13-uurs metingen, elk onder andere getijomstandigheden (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Getij- en Meteorologische omstandigheden voor de vier 13- uurs metingen.

DATUM	GETIJ				WIND*	
	VERSCHIL (m)	EB DUUR (uren. minuten)	VLOED DUUR (uren. minuten)		SNELH (m/s)	RICHTING (graden)
17-9	2,72	6,23	6,37	doodtij	7,0	ZW
24-9	4,77	6,17	6,13	springtij	7,0	ZW
3-11	4,73	6,32	6,18	van dood- naar springtij	4,1	NO
9-11	4,63	6,12	5,58	van spring- naar doodtij	3,3	ZO

* De windgegevens zijn afkomstig van het meteostation te Vlissingen.

De conclusies blijven op een kwalitatief niveau, gezien het statistisch gering aantal meetdagen (vier) waarop deze zijn gebaseerd.

Naast de hierboven genoemde meetdagen, zijn ook andere metingen bekeken:

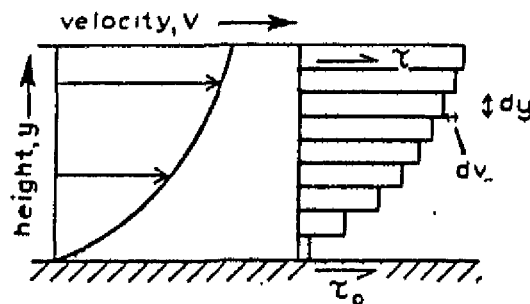
- 6- uurs (half getij) metingen, uitgevoerd in het kader van dit onderzoek
- controle metingen voor het meetponton Zeekat, uitgevoerd door DGW (meetschip Delta).

De laatste toetssteen wordt gevormd door theorieën en gegevens uit de internationale literatuur. Hierbij komt aan de orde of de algemene trends zoals waargenomen in de Westerschelde extrapol eerbaar zijn naar andere estuariene gebieden.

4.2. Hydrodynamica en sedimenttransport

Voor een goede interpretatie van de figuren, is een kort theoretische overzicht aangaande hydrodynamica en sedimenttransport op zijn plaats.

Een waterlaag die over een vaste bodem stroomt ondervindt een weerstandskracht op dit grensvlak. Deze is afhankelijk van hydrodynamische omstandigheden en bodemruwheidsfactoren. Omdat waterlagen ten opzichte van elkaar een geringe wrijving ondervinden, wordt de schuifspanning over de gehele waterlaag verdeeld (Statham, 1977). Onder stationaire omstandigheden ontstaat in een 2-dimensionale stroming een logaritmisch snelheidsprofiel in de verticaal (figuur 4.1).



Figuur 4.1 De verdeling van de schuifspanning binnen het logaritmische snelheidsprofiel (Richards, 1980).

Turbulenties binnen de waterkolom worden behalve ten gevolge van getijstromingen ook op andere manieren gegenereerd:

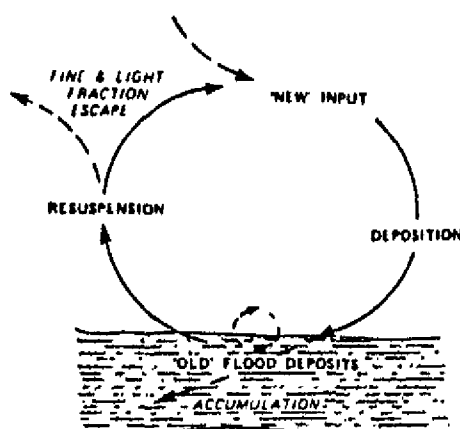
- ten gevolge van versnellingen en vertragingen in de stroomsnelheid.
- ten gevolge van golfwerking.
- ten gevolge van scheepvaart.
- ten gevolge van windgedreven stromingen.
- ten gevolge van dichtheidsverschillen.

Turbulenties in een waterkolom en vermenging binnen de waterkolom zijn aan elkaar gekoppeld. Uitwisseling van impuls vindt plaats ten gevolge van aanwezige gradiënten van bijvoorbeeld snelheid, troebelheid of zoutgehalte. Dit mengproces wordt aangeduid als diffusie (Dyer, 1973).

De beweging van estuarien sediment wordt bepaald door een cyclus van een viertal processen (Nichols & Biggs, 1985) (zie ook figuur 3.6):

- erosie van de onderwaterbodem
- transport
- depositie
- consolidatie van het sediment

Erosie (entrainment) van deeltjes is mogelijk indien de door de stroming uitgeoefende schuifkracht op de bodem een drempelwaarde overschrijdt. Omdat deeltjes vaak een cycliciteit onder



Figuur 4.2 De menging van sediment ten gevolge van de cyclus van depositie en resuspensie (Nichols, 1984).

gaan (erosie/ sedimentatie/ erosie), wordt ook wel van resuspensie gesproken (figuur 4.2).

Voor het transport van deeltjes ten gevolge van de stroming (advectie) zijn twee tegengestelde krachten van belang :

- het uitzakken van deeltjes in de waterkolom ten gevolge van de zwaartekracht onder een bepaalde snelheid, de val-snelheid. Deze wordt bepaald door de grootte, vorm en soortelijk gewicht van de deeltjes en van de viscositeit van het water (McCave, 1984). De eerst drie factoren zijn afhankelijk van mineralogische samenstelling en de graad van flocculatie van het materiaal. De viscositeit van het water is sterk temperatuursafhankelijk. In het temperatuursbereik van 0 tot 20 °C wijzigt de kinematische viscositeit van 1,79 tot $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, hetgeen betekent dat de valsnelheid bij 0 °C 75% lager is dan bij 20 °C (Swart, 1982a).
- de opwaartse kracht van deeltjes in suspensie. Deze wordt veroorzaakt door turbulenties, ten gevolge van stromingen en golfwerking.

Depositie vindt plaats indien de neerwaartse beweging van sediment de opwaartse overschrijdt. De hoeveelheid slib die uit de waterkolom sedimenteert of uit de bodem erin wordt opgenomen wordt bepaald door de balans tussen de op de bodem uitgeoefende schuifkrachten enerzijds en aan de andere kant de weerstand die de bodem biedt. De omstandigheden en factoren die hierop van invloed zijn, zijn in paragraaf 3.4 gesommeerd.

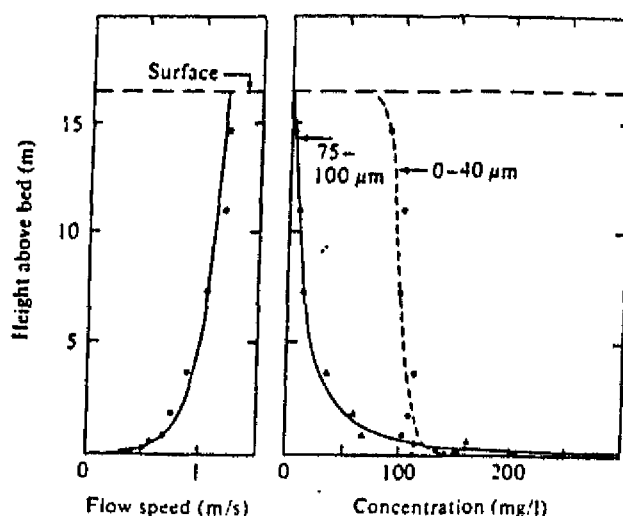
Tezamen bepalen bovengenoemde processen en factoren de vorm van de troebelheidsverticalen. Het ideale profiel vertoont hoge troebelheden bij de bodem, exponentieel afnemend naar het wateroppervlak toe. In dit onderzoek is geen onderscheid gemaakt binnen de slibfractie. In het algemeen geldt dat de fijnere delen, ten gevolge van kleinere valsnelheden, homogener over de verticaal zijn verdeeld dan de grovere delen (fig. 4.3).

Tussen de waterkolom en de bodem bevindt zich meestal een laag met relatief hoge slibconcentraties (Mulder et al, 1987). Omdat metingen dicht bij de bodem in de praktijk moeilijk uitvoerbaar zijn zonder daarbij direct de heersende condities te beïnvloeden, is zeer weinig bekend over de dikte en het gedrag van deze laag. In dit rapport wordt hier verder niet op ingegaan.

Bij het plaatsen van de waargenomen verschijnselen in een

theoretisch kader volgen ter relativering een aantal opmerkingen:

- Een estuarium is een dynamisch systeem; een stationaire situatie wordt nooit bereikt.
- In een estuarium beweegt een hoeveelheid water onder invloed van het getij heen en weer. In dit onderzoek zijn echter metingen uitgevoerd op een vaste plaats in het estuarium zodat ook variaties worden gemeten die elders hun oorsprong hebben.
- De invloed van de afvoer van de Schelde is niet in aanmerking genomen bij de bespreking van de verschijnselen.



Figuur 4.3 Verticaalprofielen voor snelheid en concentratieverdelingen voor twee korrelgroottefracties; meetstation in het Outer Thames estuarium (McCave, 1978 naar Thorn, 1975)

4.3. Beschrijving stroomsnelheids-variaties

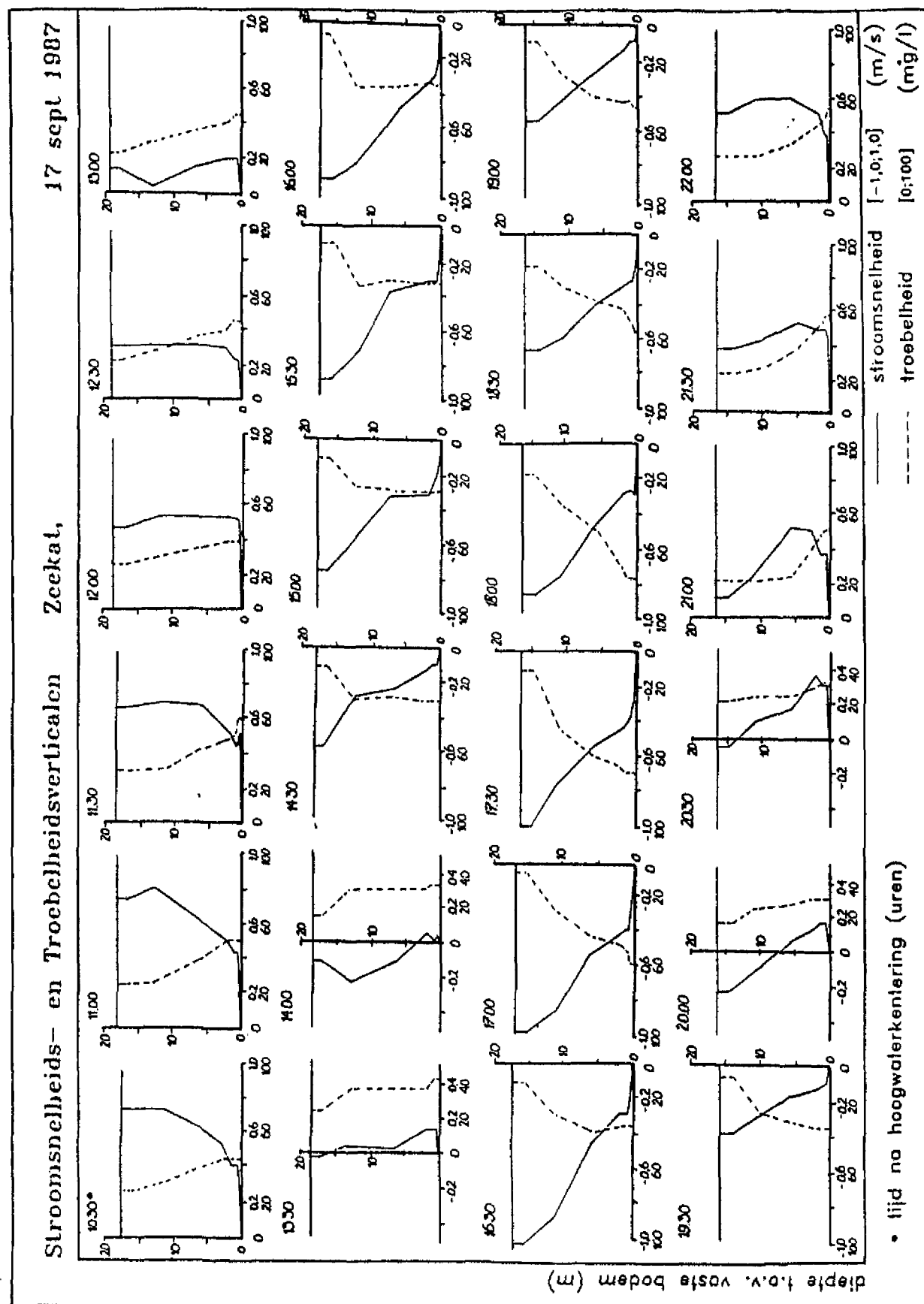
Voor de constructie van de verticalen en isodiagrammen zijn voor de stroomsnelheid de volgende aannamen gedaan:

- de snelheid op het grensvlak water/bodem is 0.
- de snelheid gemeten op 2 m onder het wateroppervlak is gelijk gesteld aan de snelheid aan het oppervlak

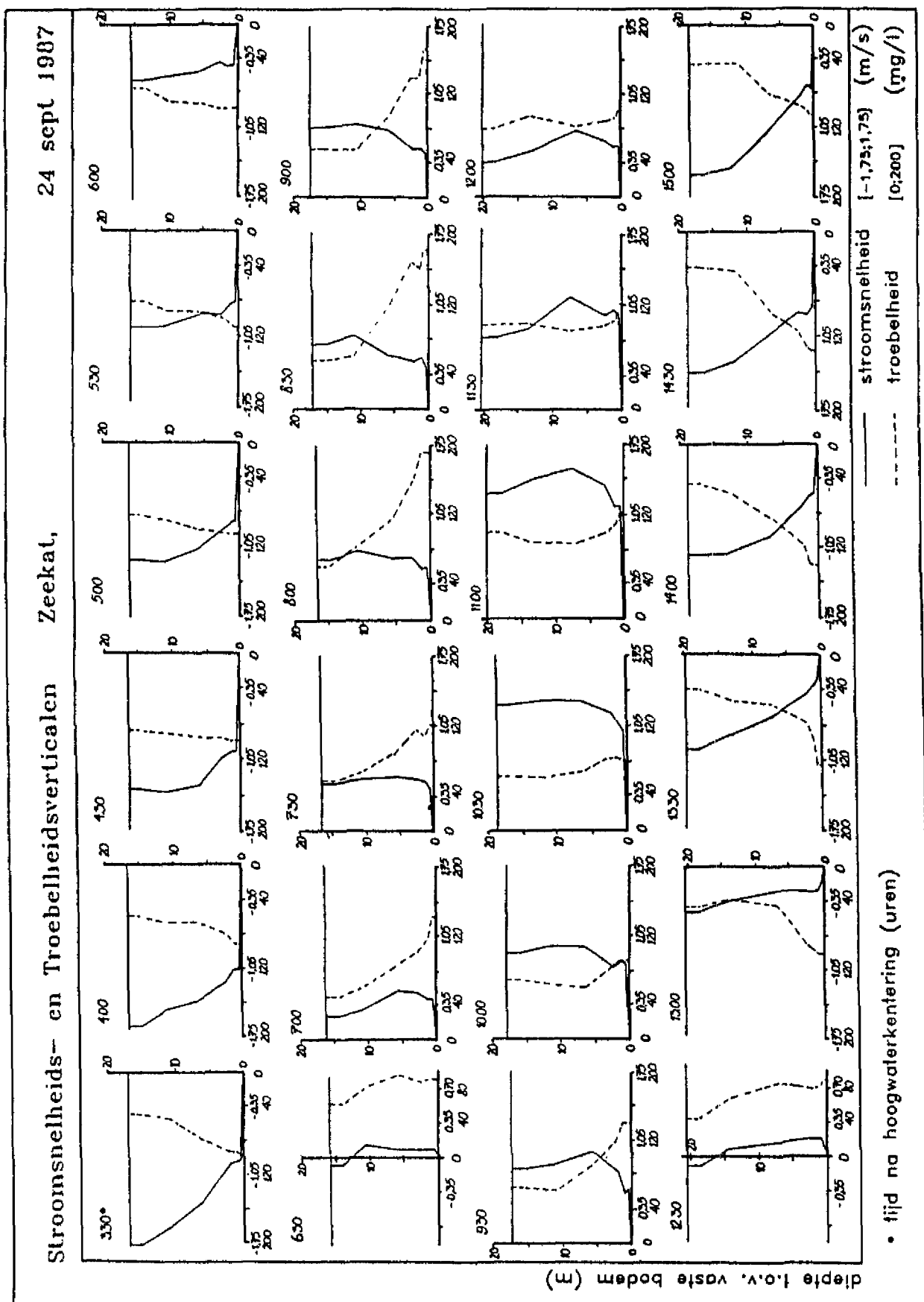
In de verticaal is de diepte van de waterkolom uitgezet. Deze varieert onder invloed van het getij. De tijd na hoogwaterkentering is uitgezet op de horizontale as. De snelheid in de ebrichting is bij de constructie van de verticalen negatief gesteld; bij de isodiagrammen is de snelheid altijd positief gesteld.

Tijdens de kentering van de stroom komen binnen de verticaal twee stromingsrichtingen voor. Bij laagwaterkentering is de vloedstroom het eerst onderin de waterkolom merkbaar. Bij hoogwaterkentering begint de ebstroom het eerst bovenin de waterkolom (Fig 4.4).

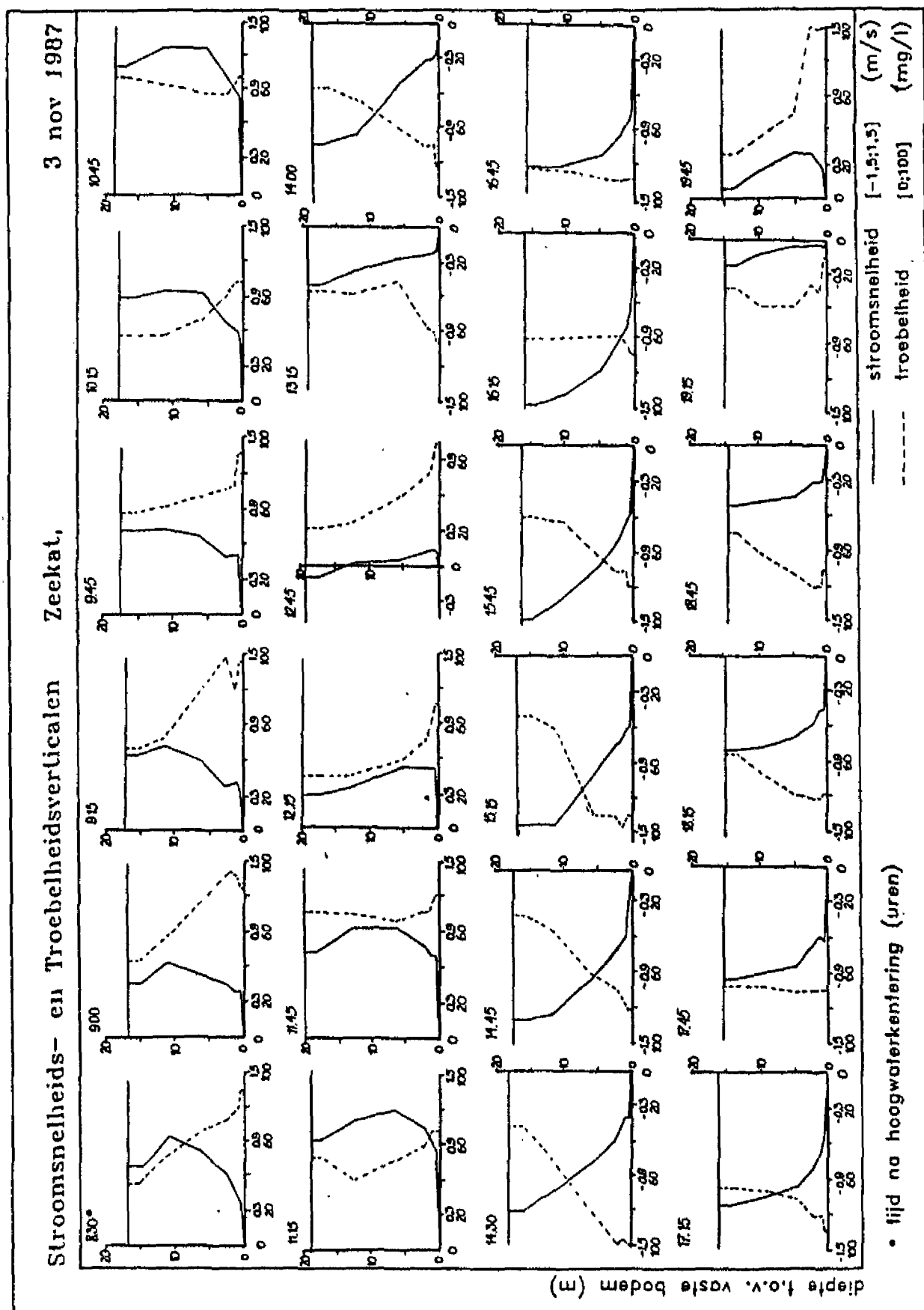
De maximaal ontwikkelde snelheden vinden ongeveer 3 tot 4 uur na kentering plaats. De ebstroom heeft de grootste maximale



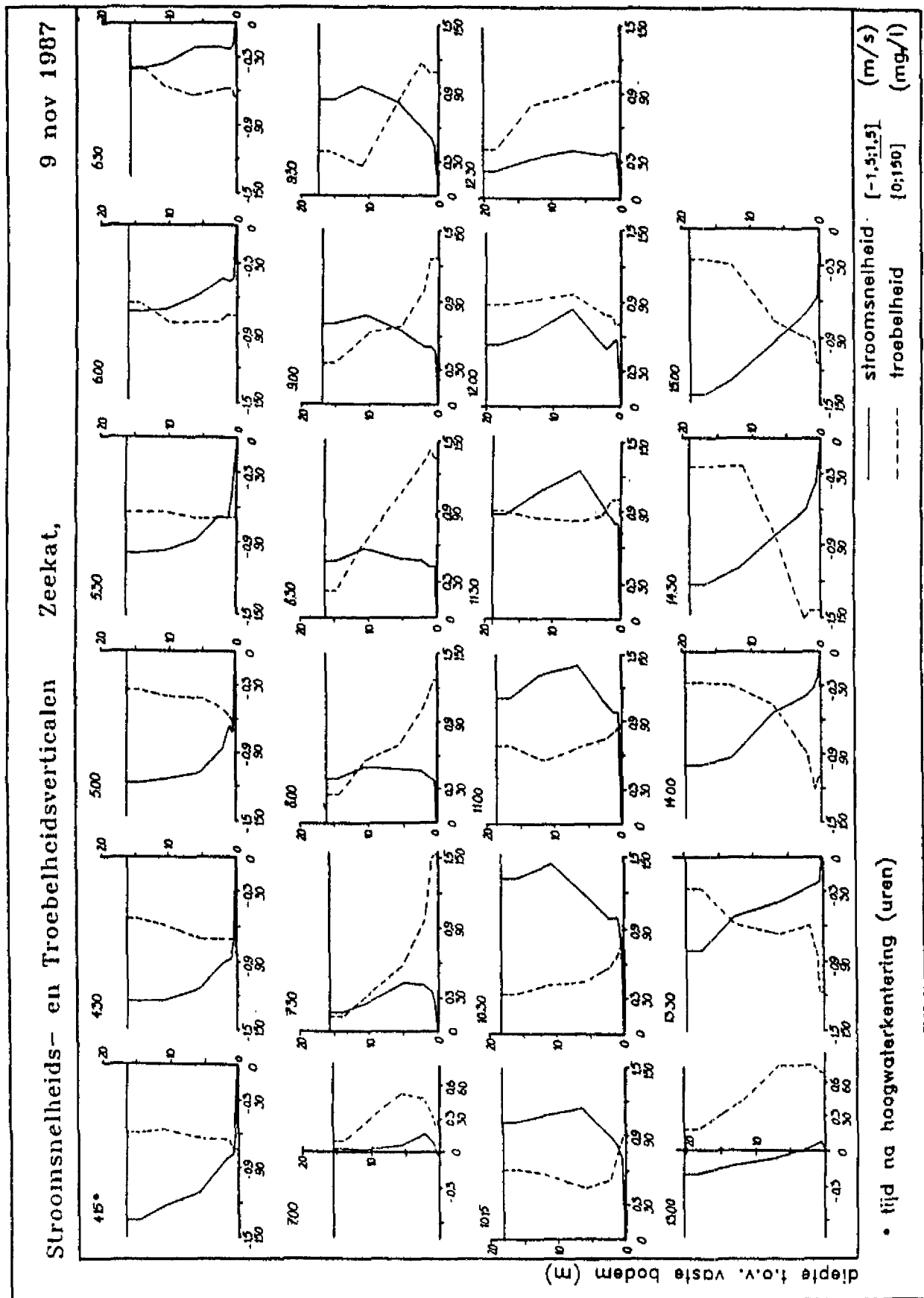
Figuur 4.4.a. Stroomsnelheids- en troebelheidsverticalen (vloed positief, eb negatief), Zeekat, 17 september 1987.



Figuur 4.4.b. Stroomsnelheids- en troebelheidsverticalen (vloed positief, eb negatief), Zeekat, 24 september 1987.



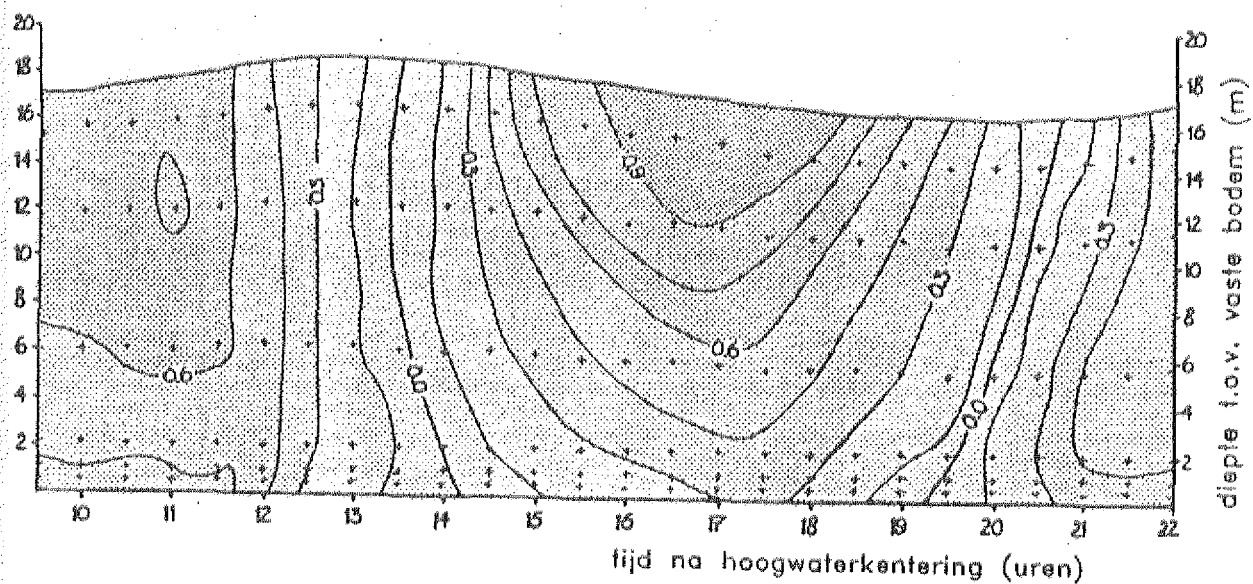
Figuur 4.4.c. Stroomsnelheids- en troebelheidsverticalen (vloed positief, eb negatief), Zeekat, 3 november 1987.



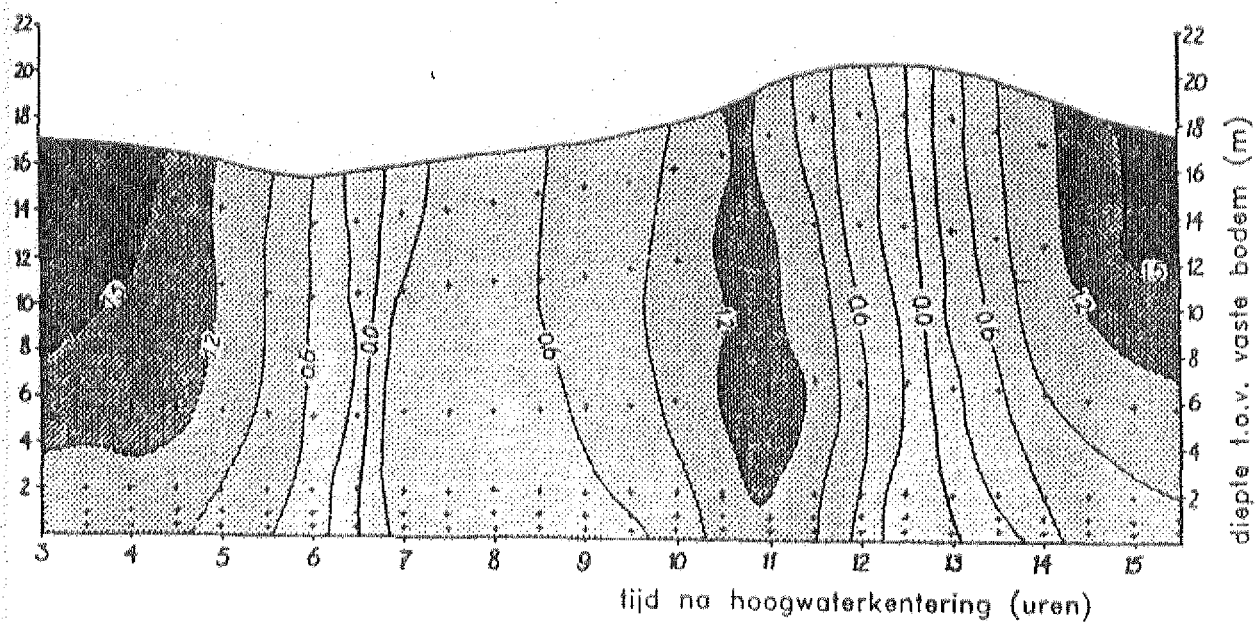
Figuur 4.4.d Stroomsnelheids- en troebelheidsverticalen, (vloed positief, eb negatief), Zeekat, 9 november 1987.

Stroomsnelheid (m/s) Zeekat,

17 sept 1987



24 sept 1987

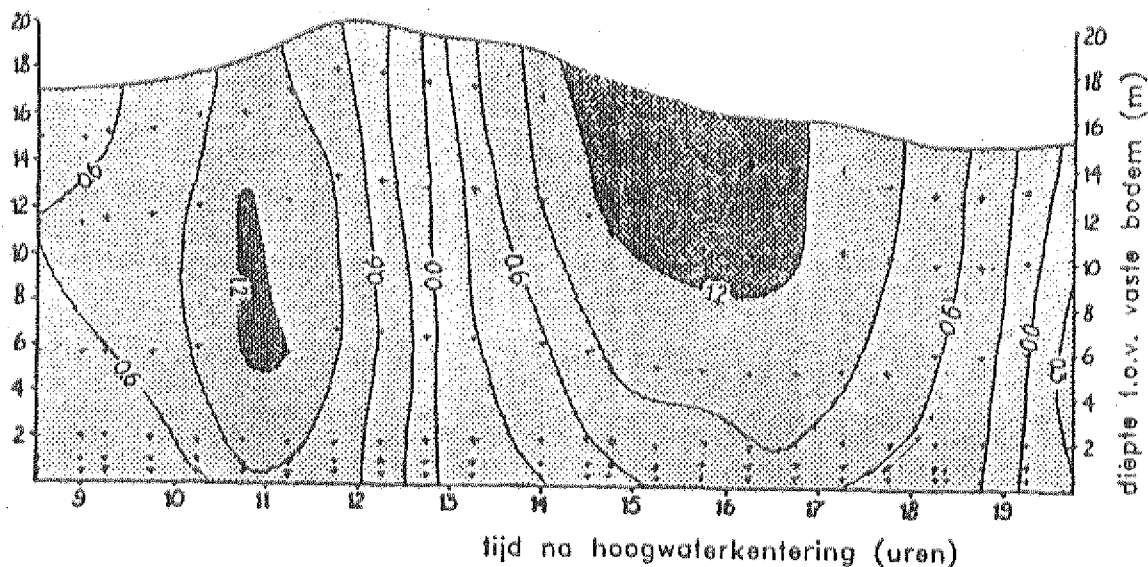


Voor legenda zie volgende pagina.

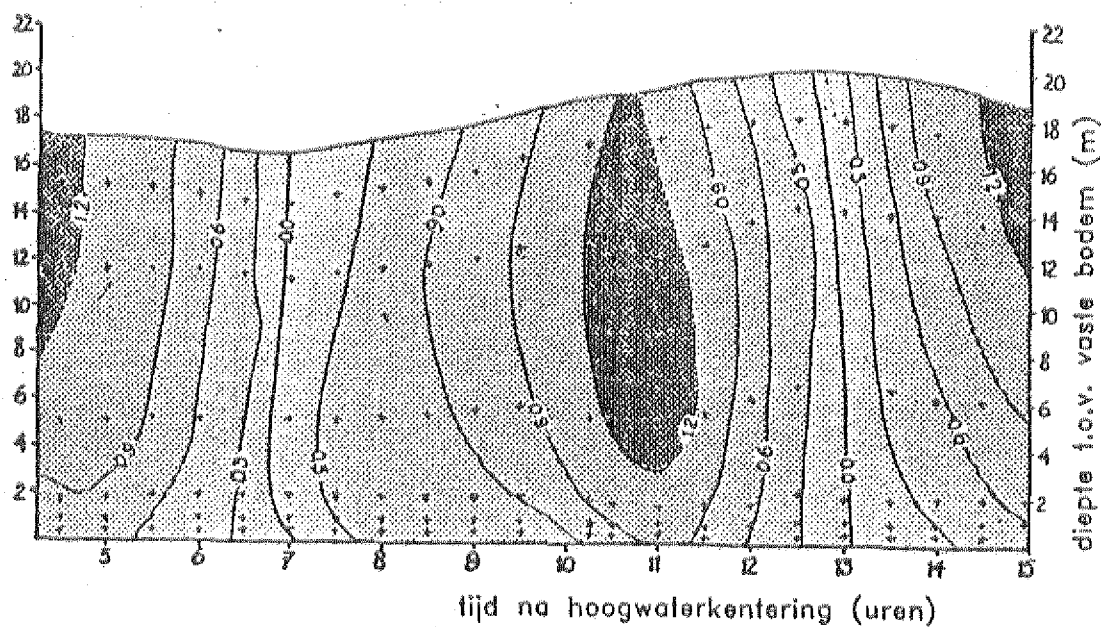
Figuur 4.5.a. en Figuur 4.5.b. Iso-stroomsnelheidsdiagrammen (isotachen), Zeekat, 17 en 24 september 1987.

Stroomsnelheid (m/s) Zeekat,

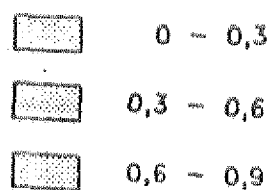
3 nov 1987



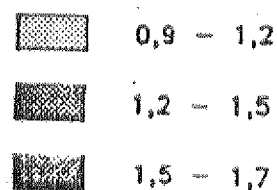
9 nov 1987



Legenda



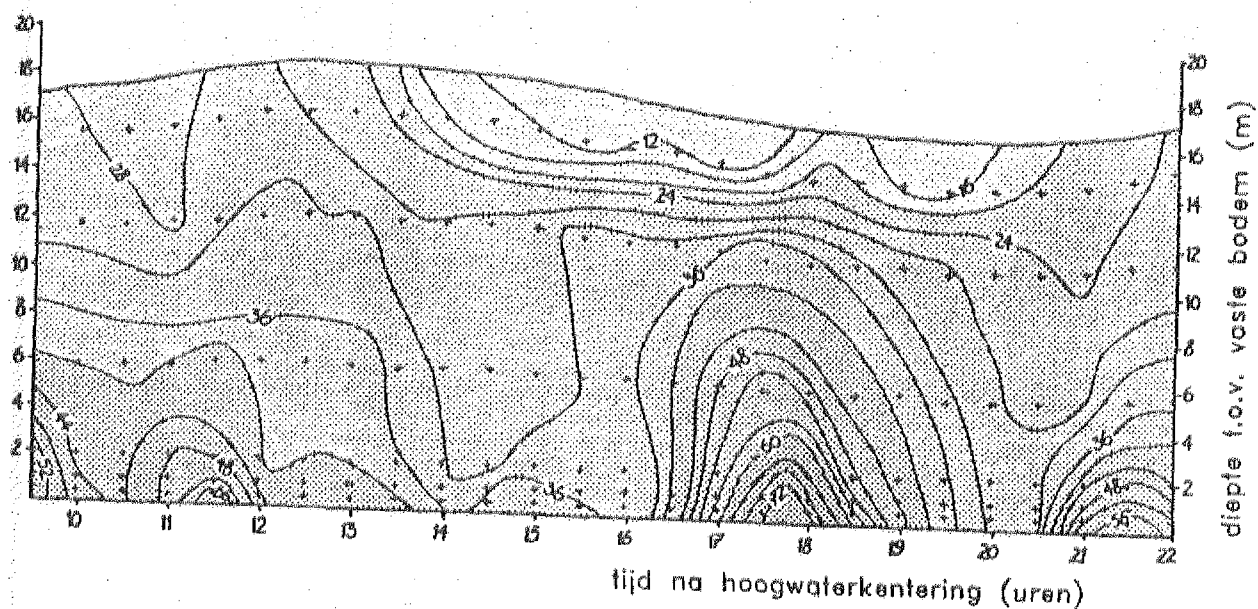
Stroomsnelheid in m/s



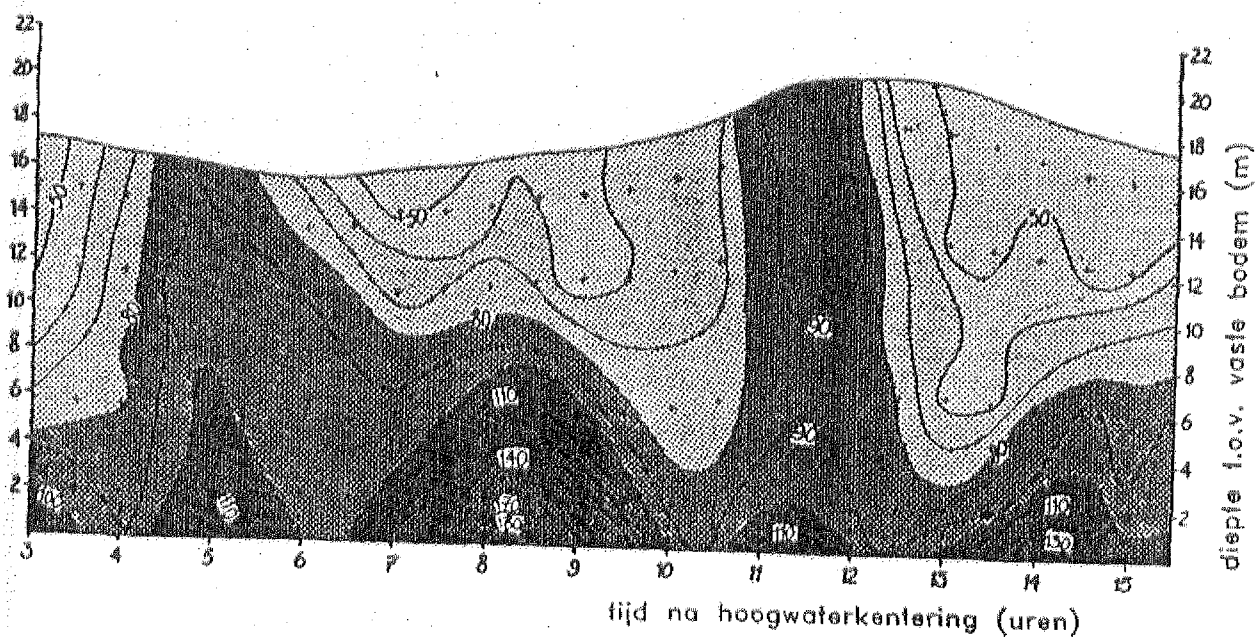
Figuur 4.5.c. en Figuur 4.5.d. Iso-stroomsnelheidsdiagrammen (isotachen), Zeekat, 3 en 9 november 1987.

Troebelheid (mg/l) Zeekat,

17 sept 1987



24 sept 1987

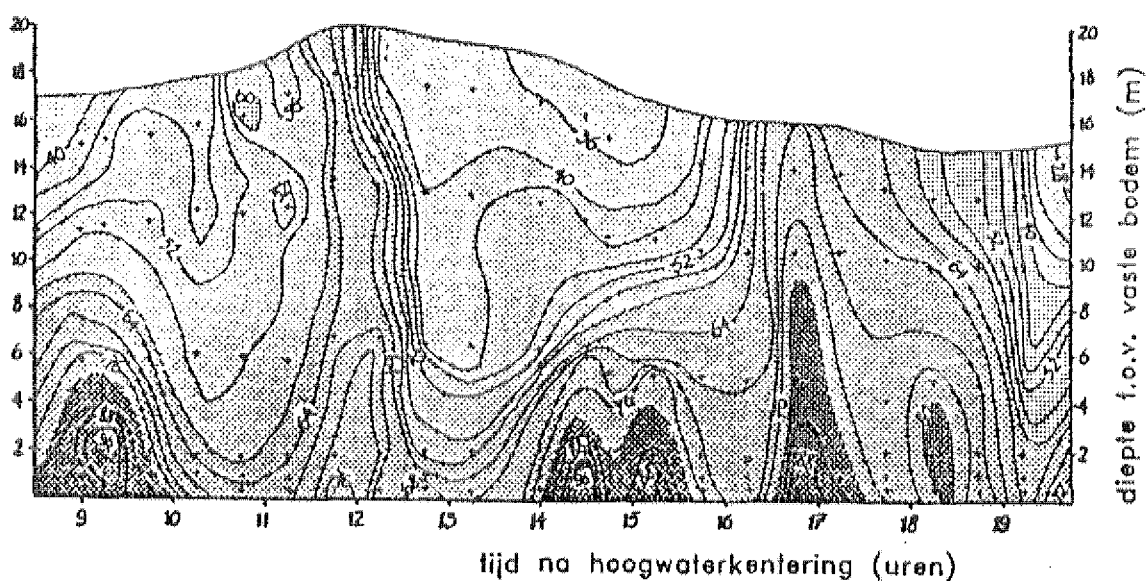


Voor legenda zie volgende pagina.

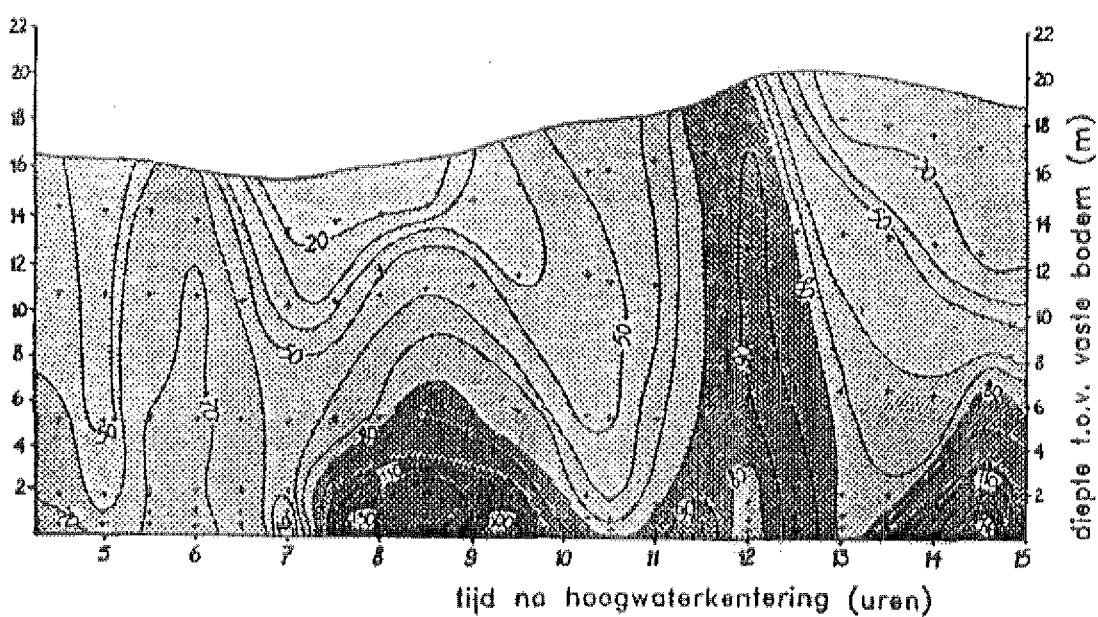
Figuur 4.6. a. en Figuur 4.6. b. Iso-troebelheidsdiagrammen, Zeekat, 17 en 24 september 1987.

Troebelheid (mg/l) Zeekat,

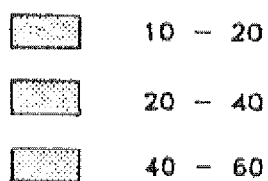
3 nov 1987



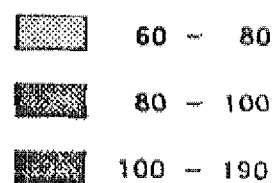
9 nov 1987



Legenda



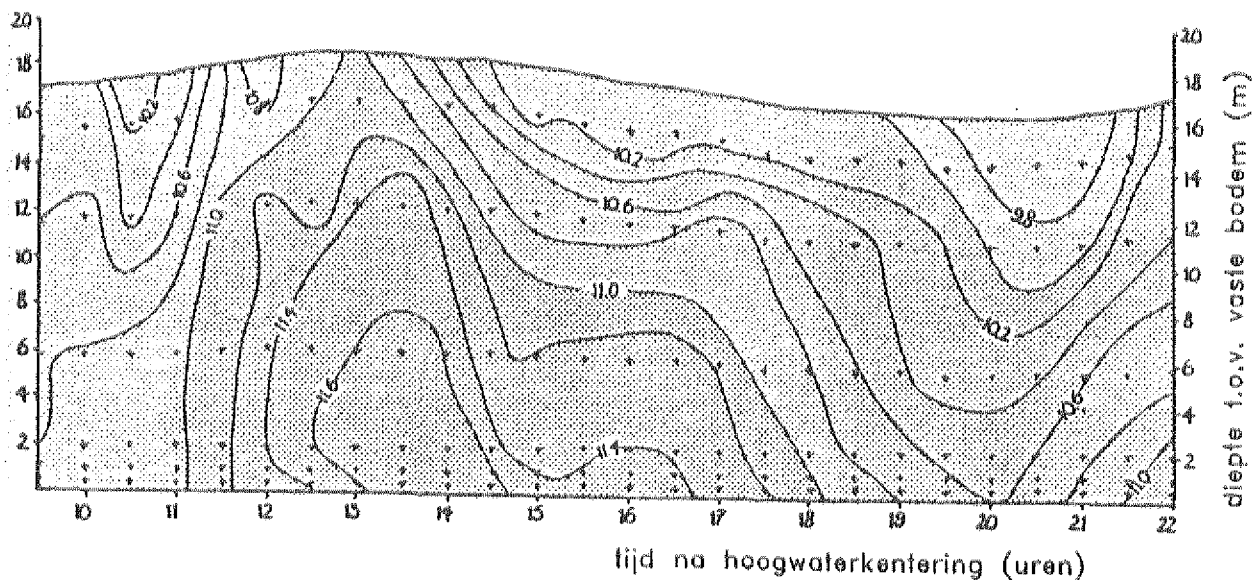
Troebelheid in mg/l



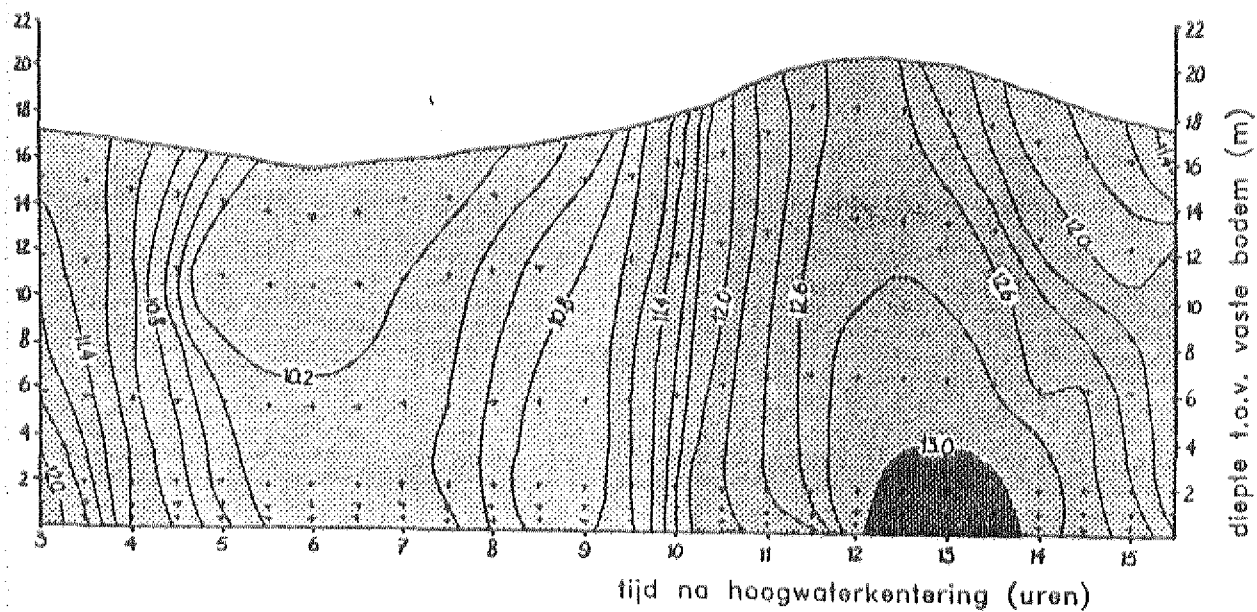
Figuur 4.6.c. en Figuur 4.6.d. Iso-troebelheidsdiagrammen, Zeekat, 3 en 9 november 1987.

Chloriniteit (g/kg) Zeekat,

17 sept 1987



24 sept 1987

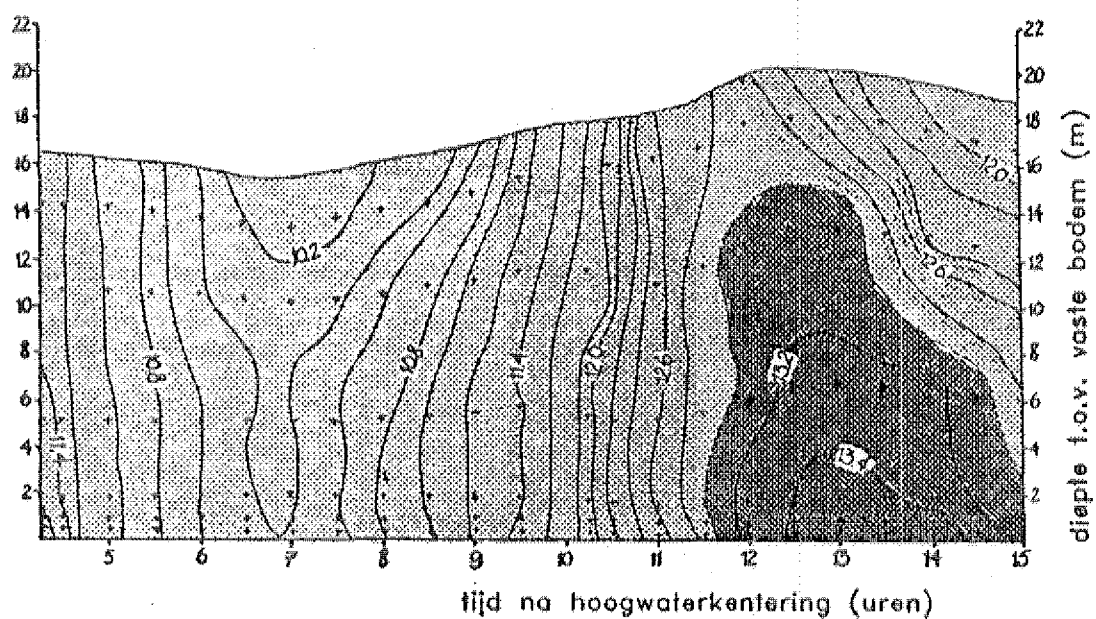


Voor legenda zie volgende pagina.

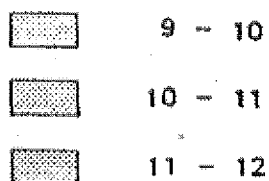
Figuur 4.7. a. en Figuur 4.7. b. Iso-chloriniteitsdiagrammen, Zeekat, 17 en 24 september 1987.

Chloriniteit (g/kg) Zeekat,

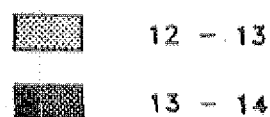
9 nov 1987



Legenda



Chloriniteit in g/kg



Figuur 4.7.c. Iso-chloriniteitsdiagram, Zeekat, 9 november 1987.

snelheden binnen het getij.

De snelheden zijn tijdens eb groter in vooral het bovenste gedeelte van de waterkolom. Tijdens de vloedstroming vindt een soort middeling in snelheid plaats, zodat de gradiënt in snelheden over de verticaal kleiner is. Stroomsnelheden op 2 m onder het wateroppervlak zijn vaak kleiner dan op ongeveer 5 m onder het oppervlak (fig 4.4).

De stroomkentering ijlt na op de kentering van het water-niveau; ongeveer 1/4 tot 3/4 uur.

De sterkste gradiënt van de stroomsnelheden in de tijd vindt plaats rond de hoogwaterkentering, over de gehele waterkolom (fig 4.5).

Het diagram van meetdag 17 sept. (fig 4.5.a) vertoont lagere snelheden en kleinere snelheidsgradiënten dan de andere meetdagen.

4.4. Beschrijving troebelheids-variaties

Bij de constructie van de verticalen en isodiagrammen voor de troebelheid gelden de volgende aannamen cq randvoorwaarden:

- troebelheden op 0,5 m boven bodem zijn gelijk gesteld aan troebelheden op het grensvlak bodem / waterkolom.
- troebelheden op 2 m onder het wateroppervlak zijn gelijk gesteld aan troebelheden aan het wateroppervlak.

Er wordt geen rekening gehouden met de richting van het transport; troebelheden zijn altijd positief.

De hoogste slibgehalten worden, overeenkomstig met het ideale profiel, meestal bij de bodem aangetroffen (fig. 4.4).

Bij de bodem zijn een viertal maxima in troebelheden, per getijperiode waarneembaar. Twee hiervan strekken zich uit tot het wateroppervlak en treden ongeveer een uur voor de kenteringen op. Er zijn troebelheden van 70 tot 110 mg/l waargenomen, met uitzondering van meetdag 17 september. De andere maxima in troebelheden beperken zich tot de onderste helft van de waterkolom. De troebelheden bij de bodem liggen dan in de orde van 80 tot 100 mg/l; aan het oppervlak is deze meestal kleiner dan 40 mg/l (fig 4.6). Deze verticalen, met sterke verschillen in troebelheden nabij de bodem en bij het oppervlak, treden 2 tot 3 uur na de kenteringen op (tussen 7.30- 9.30 en 13.30- 15.30 na hoogwaterkentering) (fig 4.6).

Meetdag 17 sept vertoont over het gehele getij zeer geringe variaties; vergeleken met de andere dagen zijn de troebelheden laag (fig 4.6.a).

4.5. Beschrijving chloriniteits-variaties

De Westerschelde is een goed gemengd estuarium. De menging is tijdens springtij optimaal (meetdag 24 september). Met doottij is op meetdag 17 september een, zij het zwakke, stratificatie aangetroffen (fig 4.7).

Rond de laagwaterkenteringen komen de laagste chloriniteitswaarden voor, rond de hoogwaterkenteringen de hoogste. Het verschil in minimum- en maximumchloriniteit is tijdens meetdag 17 sept kleiner dan gedurende de andere dagen (fig 4.7).

Rond de kenteringen zijn verticale gradiënten in chlorini-

teit aanwezig, met de hoogste waarden aan de bodem. Tussen de kenteringen zijn deze verticale gradiënten niet aanwezig, met uitzondering van meetdag 17 sept.

4.6. Metingen positie Zeekat

Uitgaande van de door middel van vier 13-uurs meetdagen verkregen informatie, is onderzocht of trends aangaande stroomsnelheid en troebelheden ook in de andere metingen die op de Zeekatlocatie zijn verricht, naar voren komen. De beschikbare data bestaat uit een tweetal meetsets:

- vier 6-uursmetingen uitgevoerd als voorbereiding op de 13-uurs meetdagen (in het kader van dit onderzoek), data: 8, 9, 14 en 15 september 1987.
- een viertal controlemetingen op de Zeekatlocatie (uitgevoerd door DGW), data: 18 augustus, 3, 11 en 24 november 1987.

Bij de controlemetingen van de Zeekat is gebruik gemaakt van een Monitek troebelheidsmeter, in tegenstelling tot de in dit onderzoek gebruikte Partechmeter. De troebelheidsdata zijn tevens in onverwerkte staat geïnterpreteerd, zodat alleen kwalitatieve conclusies met betrekking tot de variaties in monitek eenheden kunnen worden gedaan.

De volgende verschijnselen zijn in de twee meetsets naar voren gekomen:

- het verschil in de opbouw van de stroomsnelheden in de verticaal; maximale snelheden aan het oppervlak voor de ebstroom in tegenstelling tot de vloedstroom waarbij de maximale snelheden meestal op 5 meter onder het wateroppervlak optreden.
- de maxima in troebelheden na de maximale snelheden worden zowel voor de eb- als de vloedstroom waargenomen.
- de andere maxima waarbij de troebelheden beperkt blijven tot de onderste helft van de waterkolom en 2 à 3 uur na de stroomkenteringen optreden, zijn altijd waargenomen.

Uit voorgaande kan geconcludeerd worden dat de markante verschijnselen, de zogenaamde wetmatigheden, geïnterpreteerd naar aanleiding van de vier verwerkte 13-uursmetingen, representatief zijn voor deze locatie.

4.7. Discussie

4.7.1. Stroomsnelheid

Binnen een dwarsraai in een estuarium komen eb- en vloedgedomineerde geulen voor, met respectievelijk een sterkere eb- en vloedstroom. Het Middeldgat is een ebgedomineerde geul, met de grootste debieten tijdens eb (Manni, 1986).

De hydraulische omstandigheden in de waterkolom reageren met een zekere traagheid (inertie) op de veranderingen in de gradiënt van het wateroppervlak (Nichols, 1984). De maximale stroomsnelheid loopt hierdoor achter op het tijdstip van de maximale gradiënt van het waterniveau. Deze inertie verklaart tevens waarom de stroomkenteringen meestal 1/4 tot 3/4 uur na de waterniveaукente-

niveaукenteringen optreden. Deze faseverschillen in kenteringen kunnen zowel in lengte- als dwarsrichting van het estuarium optreden.

Het waargenomen verschil in het verticale snelheidsprofiel tussen eb- en vloedcondities (fig 4.4) kan verklaard worden door middel van de estuariene circulatie (Postma, 1967 en Nichols & Biggs, 1985). Het zoutere vloedtransport is ten gevolge van zijn grotere gewicht in het onderste gedeelte van de waterkolom sterker merkbaar. Het lichtere, zoetere water dat een zeewaartsgericht transport kent, manifesteert zich sterker in het bovenste gedeelte van de waterkolom. Voorgaande lijkt in tegenspraak met de veronderstelde goede menging van het estuarium. Blijkbaar zijn chloriniteitsverschillen in de orde van 0,5 tot 1 ‰ voldoende om het stromingspatroon te beïnvloeden.

Behalve de dubbel-daagse getijperiode, is nog een ander periodisch verschijnsel werkzaam, de doodtij-springtijcyclus: de variatie in getijverschillen. Deze heeft een periode van ongeveer 14 dagen. Voor de positie van de Zeekat bedraagt het gemiddeld getijverschil tijdens doodtij 3,5 m en tijdens springtij 5 m (Studierapport STSC 6/84).

Stroomsnelheden zijn tijdens springtij hoger dan tijdens doodtij, omdat een groter volume water (getijvolume) een dwarsdoorsnede in eenzelfde tijd moet passeren. Dit is overeenkomstig de waargenomen snelheidsverschillen tussen meetdag 17 september (doodtijomstandigheden, getijverschil 2,72 m) en meetdag 24 september (fig 4.4. a/b en 4.5 a/b) (springtij, getijverschil 4,77 m, opgetreden getij Hansweert). Door de grotere snelheidsverschillen, zowel binnen de verticaal als in de tijd, vertoont de waterlaag tijdens springtij een grotere turbulentie. Dit is niet gemeten maar kan wel indirect worden afgeleid uit de sterkere homogenisatie in de profielen van zowel stroomsnelheid, troebelheid en chloriniteit.

4.7.2. Troebelheden

Na het optreden van maximale stroomsnelheden treden in de waterkolom maxima in troebelheden op, zij het met een zekere vertraging. Deze vertragingen kunnen worden toegeschreven aan een aantal factoren (Nichols, 1984):

- de versnellende stroming én toenemende turbulentie hebben tijd nodig om materiaal vanuit de bodem in suspensie te brengen (resuspensie) en vervolgens hoger in de waterkolom te transporteren; analoog aan het temporele aspect van het begrip "scour lag" van Postma (1967).
- er is een zekere tijd nodig om suspensiemateriaal uit te laten zakken nadat de stroming is vertraagd; de "settling lag" (Postma, 1967).
- de turbulente schuifspanning varieert in tijd en diepte; bij versnelling ligt het zwaartepunt van de schuifspanning in het onderste gedeelte van de waterkolom, bij vertraging verschuift dit naar boven zodat materiaal langer in suspensie blijft na vertraging van de stroomsnelheid (Nichols, 1984).

Bovengenoemd principe verklaart twee van de vier waargenomen maxima in troebelheden die in een getijperiode optreden.

De maxima waarbij de toename in suspensielaast beperkt blijft

tot de onderste helft van de waterkolom, en optreden tussen de 2 à 3 uur na de kenteringen moeten vanuit een andere optiek worden verklaard. De stroomsnelheden zijn nog in ontwikkeling, ze bedragen de helft van hun maximaal te bereiken snelheid (ongeveer 0,6 m/s, figuur 4.5). Het materiaal dat na maximale stroming in de waterkolom is gebracht, zakt tijdens de kenteringen snel uit (weinig turbulenties). Het materiaal vormt een visceuze modderlaag op de bodem, waarna consolidatie begint. In deze situatie ontbreekt voldoende tijd voor consolidatie om de weerstandskracht van deze laag te vergroten zodat bij een relatief lage stroomsnelheid, de nog steeds visceuze laag makkelijk erodeerbaar is. De hoge troebelheden blijven beperkt tot de onderste laag van de waterkolom. Ten gevolge van geringe snelheidsgradiënten in de verticaal ontbreekt voldoende turbulentie om materiaal over de gehele waterkolom te verdelen.

De stroomsnelheden blijven toenemen terwijl de troebelheden, bij de bodem en gemiddeld over de gehele verticaal, afnemen. Gedeeltelijk wordt het suspensiemateriaal verdeeld over de verticaal. Gezien de hoeveelheid materiaal in het maximum aan de bodem moet ofwel de aanvoer van materiaal verminderen of materiaal op de bodem worden afgezet. Deze stap is aan de hand van deze metingen, die immers slechts op één punt binnen de geul zijn gebaseerd, moeilijk verklaarbaar. Enkele hypothesen:

- naarmate de tijd verstrijkt is in de bodem steeds minder slib beschikbaar voor snelle resuspensie zodat watermassa's die de "Zeekat" later passeren minder materiaal kunnen opnemen.
- de ruimtelijke verspreiding van het bodemslib is van belang voor de opname van slib in de waterkolom. Ondanks overeenkomstige stromingscondities, kan dit zowel een ruimtelijke als temporele variatie in slibconcentraties veroorzaken.
- ten gevolge van specifieke (locale) omstandigheden worden plaatselijk, onderin de waterkolom hoge troebelheden gevormd, welke als een lopende golf, ten gevolge van advectie, binnen de geul wordt verplaatst.

Meetdag 17 sept (doodtij) vertoont lagere troebelheden over het gehele getij dan op dag 24 sept (springtij) (fig 4.6. a/b). Dit is gedeeltelijk toe te schrijven aan de grotere turbulenties tijdens springtij. Ook meteorologische omstandigheden hebben waarschijnlijk een rol gespeeld. Aan meetdag 24 sept is een periode van hogere windsnelheden voorafgegaan in vergelijking tot meetdag 17 sept (waarnemingen weerstation Vlissingen). Dit heeft geresulteerd in een grotere golfactiviteit hetgeen een verhoging van suspensiemateriaal in het gehele estuarium veroorzaakt (Gabrielson et al, 1985).

Ten gevolge van het geringe aantal meetdagen is het onmogelijk de invloed van getij- en meteorologische omstandigheden op troebelheden te onderscheiden.

Mondeling is van Van Maldegem vernomen dat in de Zeekat-meetserie van november 1987 tot en met februari 1988 geen correlatie is aangetroffen tussen dagen met hoge windsnelheden en troebelheden in de waterkolom. Dit zou impliceren dat de getijomstandigheden de belangrijkste oorzaak zijn voor de temporele variatie in troebelheden op de Zeekat-locatie.

4.7.3. Chloriniteiten

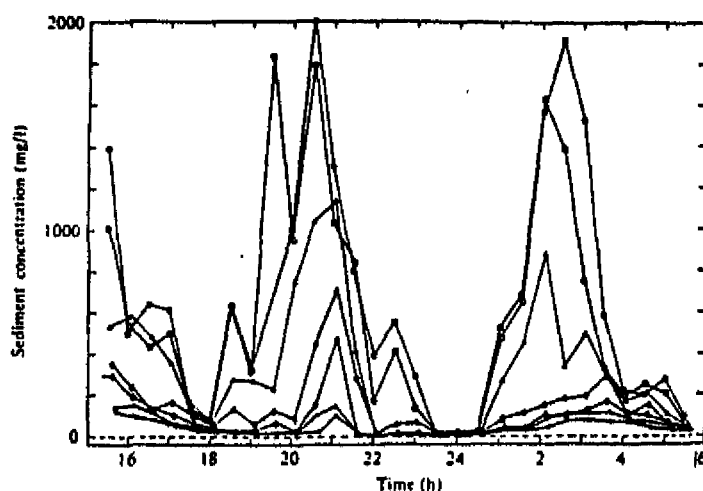
De Westerschelde is een goed gemengd estuarium. De debieten ten gevolge van de getijdebewegingen zijn groter dan het debiet van de Schelde. Dit resulteert in een goede menging tussen het zoute en het zoete water (geen verticale stratificatie) (Dyer, 1973).

De meetdagen 24 sept en 9 nov voldoen inderdaad aan dit beeld (figuur 4.7). Alleen tijdens de kenteringen is, ten gevolge van de aanwezigheid van twee stromingen binnen de verticaal, een kleine verticale gradiënt in chloriniteit aanwezig. Meetdag 17 september vormt hierop een uitzondering en vertoont wel een zekere, relatief kleine verticale gradiënt over de gehele getijperiode. Het ontbreken van een mengmechanisme wijst op een vrij lage turbulentiegraad ten gevolge van de lage stroomsnelheden.

De verschillen tussen minimum- en maximumchloriniteiten zijn voor meetdag 17 sept. kleiner dan voor de andere twee meetdagen; respectievelijk 2 en 3 promille. De absolute verschillen in chloriniteiten binnen een getij, staan in relatie tot het getijverschil. Tijdens springtij legt een waterdeeltje een grotere afstand af dan in doodtijsituaties, zodat op één positie zowel zoeter als zouter water wordt aangetroffen. Dit verschijnsel is ook in het estuarium van de Nieuwe Waterweg aangetroffen. De zoutintrusie, welke tijdens hoogwater maximaal is, reikt verder landinwaarts naarmate het getijvolume groter is (Abraham et al, 1986).

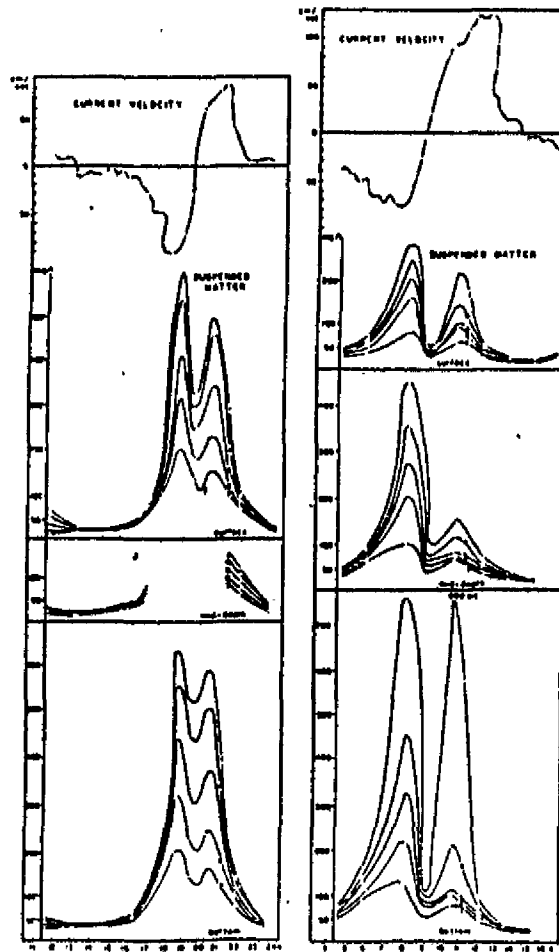
4.8. Literatuurdiscussie

Over de reactie van suspensiemateriaal in een estuarium ten gevolge van getij- en golfwerking, is een grote collectie literatuur voorradig. In het onderstaande worden enkele verschijnselen aangehaald. Het is van belang dat een koppeling met de in het Middellgat waargenomen verschijnselen met enige voorzichtigheid geschiedt. De vorm van de getijcurve, het soort estuarium (stratificatie/ mengvorm), de aanwezigheid van fijn materiaal, het soort sediment en andere factoren variëren per estuarium.



■, 1 ft above bottom; □, 2 ft; ▲, 4 ft; ◇, 8 ft; ◆, 16 ft; ●, 25 ft; ○, surface.

Figuur 4.8 Temporele variatie van sedimentconcentratie op een aantal niveaus boven de bodem; Savannah River (naar Krone, 1972).

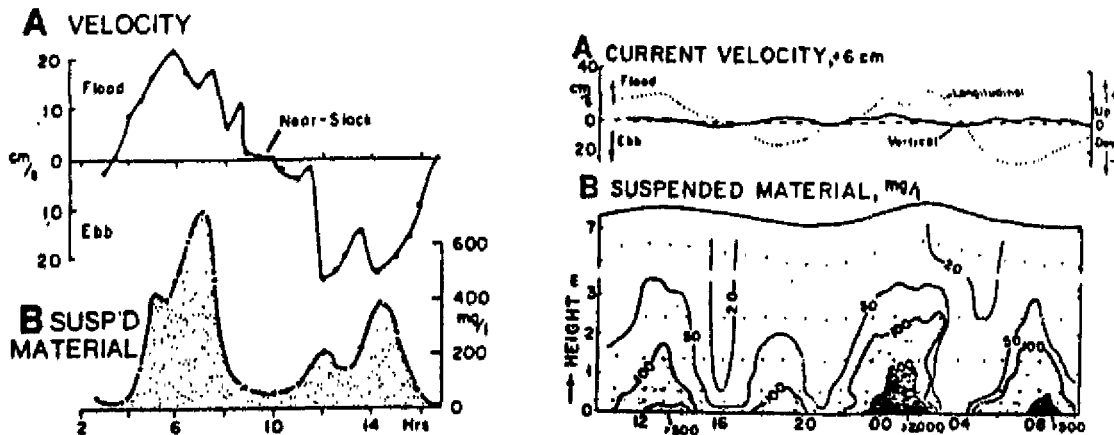


Figuur 4.9 Stroomsnelheden (op halve diepte) en gehalten aan gesuspendeerd materiaal op drie verschillende dieptes; twee stations in de Waddenzee nabij Ameland. De lijnen betreffen de volgende fracties: 1 totale fractie; 4 fractie $< 64\mu$; 5 $< 32\mu$; 6 $< 16\mu$ en 7 $< 8\mu$ (Postma, 1961).

In de figuren 4.8 en 4.9 wordt reactie van het suspensie materiaal in de tijd uitgezet. De afstand tot de bodem is zeer bepalend voor het troebelheidsgehalte (mg/l). De troebelheden variëren op 30 cm boven de bodem tussen 50 en 2000 mg/l. Aan het oppervlak liggen de waarden tussen de 50 en 150 mg/l (figuur 4.8). Postma (1961) heeft voor metingen in de Waddenzee de totale slibfractie uitgesplitst in kleinere fracties. Tijdens perioden van lage stroomsnelheden bestaat het suspensiemateriaal voornamelijk uit delen kleiner dan 8μ . Tijdens maximale stroomsnelheden kunnen ook de andere fracties in suspensie worden gebracht (figuur 4.9).

Nichols (1984/ 1985) heeft over één getijperiode op 6 cm boven de bodem stroomsnelheid en troebelheid bepaald (figuur 4.10). Bij een versnellende stroming van 10 cm/s komt materiaal in suspensie. Opvallend is de snelle reactie van de troebelheden op de veranderingen van de stroming. Normaliter reageert het suspensiemateriaal met een zekere traagheid op veranderingen in het stromingspatroon (time-lag), welke ook is waargenomen bij de metingen op de Zeekat-locatie.

In figuur 4.11 zijn de troebelheden over de hele verticaal weergegeven, analoog aan de iso-diagrammen (figuur 4.6). De maxima in troebelheden treden op na stroomsnelheidsmaxima. Er bestaat een duidelijk verschil in grootte van deze maxima; tijdens vloed komen de hoogste troebelheden voor. Dit verschijnsel is in het Middelgat niet aangetroffen.



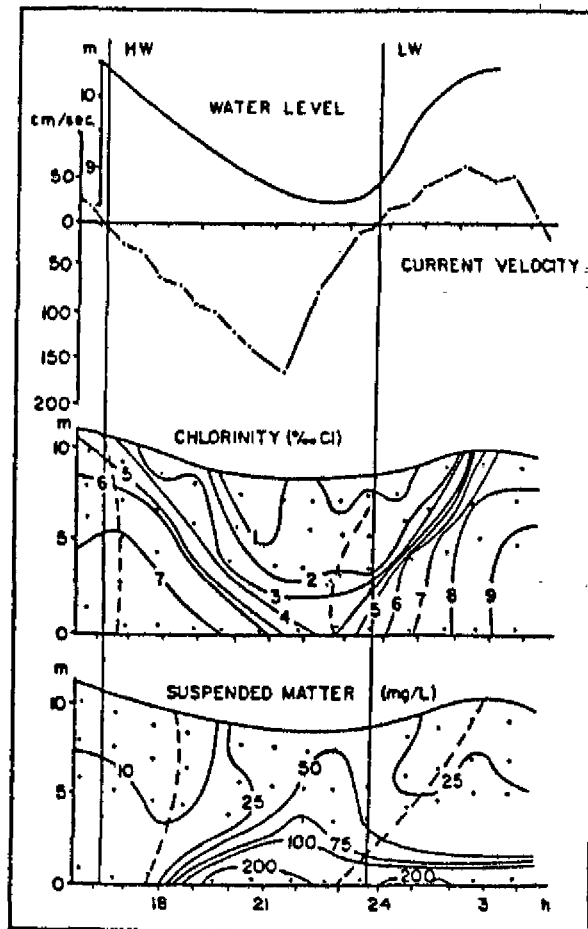
Figuur 4.10 (links) Stroomsnelheids- en troebelheidsmetingen op 6 cm boven de bodem; Rappahanock estuarium, USA (Nichols, 1984/ 1985).

Figuur 4.11 (rechts) Stroomsnelheids- en troebelheidsmetingen over twee getijdencycli; Cheseapeake bay, USA (Nichols, 1984).

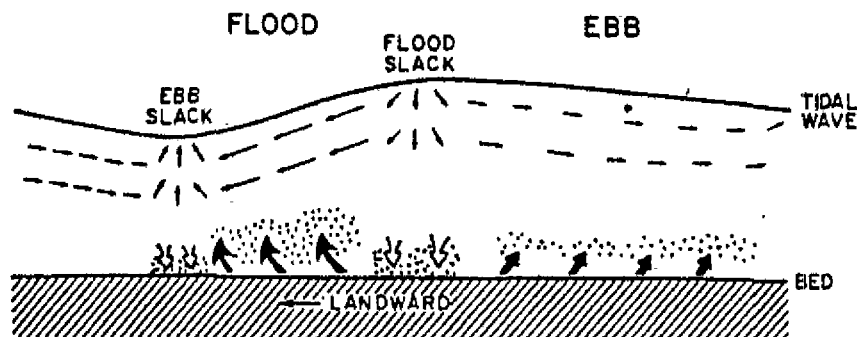
In de literatuur is met weinig succes gezocht naar beschrijvingen aangaande het in het Middelgat consequent aangetroffen maximum in troebelheden na de kenteringen. Van Andel en Postma (1954) hebben dit verschijnsel in de Orinoco delta wellicht aangetroffen. In figuur 4.12 treden van 1 tot 2,5 uur na de laagwaterkentering hogere troebelheden op (200 mg/l) om vervolgens af te nemen, bij een nog steeds versnellende stroming.

Salomon en Allen (1983) hebben in de Gironde een verschil in depositie aangetroffen tijdens de laagwater- en hoogwaterkentering. Verticale stroomsnelheden, tijdens laagwaterkentering naar het oppervlak gericht en naar de bodem tijdens de hoogwaterkentering verminderen respectievelijk vergroten de depositie (figuur 4.13). De verticale snelheden liggen in de orde van cm/s per seconde. Kwantitatieve metingen aangaande depositie zijn in dit onderzoek nabij de Zeekaat niet uitgevoerd. Wel is gekeken naar de mate van uitzakking en het verschil hiervan tussen de hoogwater- en laagwaterkentering. Alleen op 24 september (figuur 4.6.b) heeft tijdens de hoogwaterstroomkentering een grotere uitzakking van suspensiemateriaal plaatsgevonden.

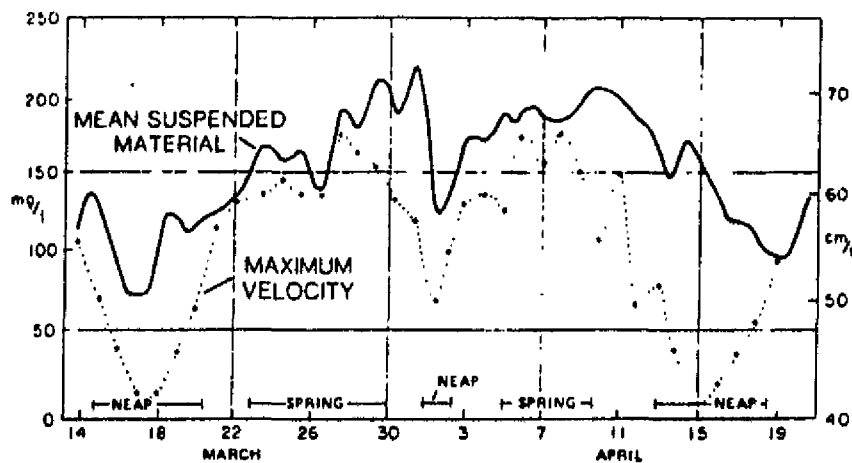
Temporele variaties in gemiddelde concentraties suspensiemateriaal en gemiddelde maximale stroomsnelheden voor twee dubbel-daagse getijdencycli vertonen een trend geassocieerd met spring- en doortijdscyclus (Nichols, 1984)(figuur 4.14). Dit komt overeen met de conclusie dat tijdens springtij, ten gevolge van extreme stromingscondities, hogere troebelheden voorkomen dan tijdens doortij.



Figuur 4.12 Variaties van waterniveau (m boven bodem), stroomsnelheid (cm/s), saliniteit (‰ Cl) en gesuspendeerd materiaal (mg/l) in de Boca Vagre van de Orinoco delta (Van Andel en Postma, 1954).



Figuur 4.13 Een longitudinale sectie van een asymmetrische getijdeweg, waarbij tijdens de kenteringen verticale stromingen optreden die invloed hebben op de mate van depositie; Gironde estuarium, Frankrijk (Salomon en Allen, 1983).



Figuur 4.14 Temporele variatie van gesuspendeerd materiaal gekoppeld aan doottij-springtijcyclus; Rappahanock estuarium, USA (Nichols, 1981).

Swart (1982a) heeft geconcludeerd dat maandgemiddelde slibgehalten aan het wateroppervlak in de Westerschelde een duidelijke seizoensafhankelijkheid vertonen, met hogere gehalten in de winter en lagere in de zomer. Een correlatie tussen slibgehalten aan het oppervlak en maandgemiddelde geschatte golfhoogten is alleen aangetroffen nabij de monding van het estuarium. Swart veronderstelt dat indien gebruik gemaakt zou worden van dagelijkse waarnemingen in tegenstelling tot maandelijks gemiddelden van geschatte golfhoogten, een hogere correlatie zou worden aangetroffen. Eerder in dit hoofdstuk is de invloed van golven op de suspensiegehalten binnen een estuarium aan de orde geweest.

Na uitbreiding van de meetset met de metingen van de Zeekat, zou het interessant zijn om bepaalde, in dit onderzoek genoemde kwalitatieve relaties, te kwantificeren. Meer specifiek: wat is de relatie tussen de maxima in troebelheden, zowel in grootte als in tijdstip, ten opzichte van de fase in het getij en ten opzichte van meteorologische omstandigheden. De in hoofdstuk 4.4 beschreven verschijnselen, gecombineerd met gegevens van de Westerschelde en kennis uit de literatuur betreffende andere estuariene milieus kunnen dienen als een basis voor de vorming van enkele empirische relaties die specifiek gelden voor de Westerschelde.

5. TRANSPORTEN

5.1. Bodemberging slib

De slibberging in de bodem in tonnen is bepaald aan de hand van een model. Met behulp van de ruimtelijke verspreiding van slibgehalten aan het oppervlak, is het mogelijk de momentane slibberging voor een bepaald gebied te berekenen. Indien dit voor meerdere perioden wordt gedaan kan ook de verandering van slibberging in de tijd worden bepaald (in tonnen per oppervlak per tijdseenheid). Deze eenheid geeft het transport weer door het grensvlak tussen bodem en waterkolom; gesproken wordt van een netto sedimentatie bij positieve, en een netto erosie bij negatieve waarden. Het ligt voor de hand de resultaten te vergelijken met de gegevens van de eerste slibbalans voor de Westerschelde (Van Maldegem, 1987).

Het model is deterministisch; de uitgangspunten die gehanteerd worden voor het model zijn theoretisch. Er wordt gebruik gemaakt van het model dat wordt toegepast voor de berekening van de slibbalans voor de Westerschelde (van Maldegem, 1987). Deze is op enige punten aangepast.

De momentane slibberging voor een bepaald oppervlak wordt berekend door:

$$Bsb = Ps * Ob * Db * (1 - n) * SMS \quad (\text{ton})$$

$$Bsb = \text{slibberging bodem} \quad (\text{ton})$$

$$Ps = \% \text{ droog slib} \quad (-)$$

$$Ob = \text{oppervlakte} \quad (\text{m}^2)$$

$$Db = \text{dynamische diepte} \quad (\text{m})$$

$$n = \text{poriëngehalte} \quad (-)$$

$$SMS = \text{soortelijke massa slib} \quad (\text{ton/m}^3)$$

Hierbij zijn de volgende aannamen gedaan:

- het slibpercentage aan het oppervlak wordt constant verondersteld in de diepte (tenminste 1 meter).
- zowel het soortelijk gewicht van het materiaal als het poriënvolume vertonen geen ruimtelijke en temporele variatie (en geen veranderingen in de diepte).
- de dynamische diepte is vergelijkbaar voor het hele gebied.
- de dynamische diepte is constant in de tijd.

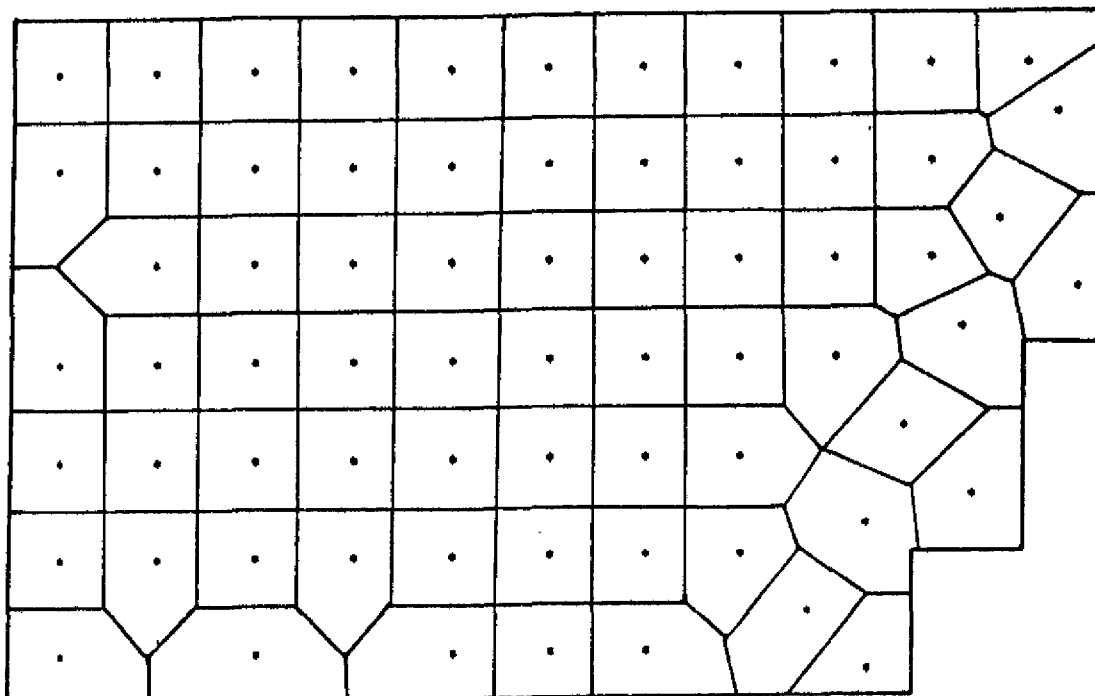
Een belangrijke parameter bij deze berekeningen is de dynamische diepte (Db). Dit is een gemiddelde waarde voor de cumulatieve verticale erosie en/of sedimentatie over een bepaald tijdsinterval en over een bepaald gebied; de morfologische invloedsfeer. Met andere woorden: dat gedeelte van de bodem welke geacht wordt mobiel te zijn. Voor de Westerschelde is door De Looff (1983) een soort gemiddelde waarde van de dynamische diepte bepaald; deze bedraagt 0,5 a 1,0 meter per jaar. Deze waarde vormt zowel een temporeel als ruimtelijk gemiddelde.

Voor de berekening van dynamiek in slibberging van de bodem is de dynamische diepte aangepast aan de tijdsspan. De periode tussen de meting in mei en september bedraagt 3,5 maand. De in berekening gebruikte dynamische diepte bedraagt dan $(3,5/12) * 1,0$ is 0,3 meter.

Het poriëngehalte en de soortelijke massa van het slib zijn

overgenomen uit van Maldegem (1987); deze bedragen respectievelijk 0,4 (-) en 2,65 ton/m³.

De verdeling van slibgehalten aan het oppervlak is aan de hand van Thiessen polygoons uitgevoerd (fig 5.1). Deze eenvoudige interpolatietechniek heeft als uitgangspunt dat de meetwaarde van het centrale punt tevens geldt als meetwaarde voor het onderscheiden oppervlak (Davis, 1986).



Figuur 5.1 Thiessenpolygoonen van het bodembemonsteringsgebied voor de situatie in mei en september.

Fouten in de berekening van het model zijn bepaald aan de hand van de onnauwkeurigheden in de afzonderlijke variabelen. Deze zijn helaas moeilijk te kwantificeren zodat volstaan moet worden met schattingen hiervan (Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Schatting van de relatieve fouten van variabelen in het model ter berekening van de momentane slibberging.

variabelen	relatieve fout (%)	
	minimaal	maximaal
fout dynamische diepte (Db)	25	50
fout interpolatietechniek	5	10
variaties poriëngehalte (n)	15	30
(diepte, tijd en ruimtelijk)		
fout labanalyse slibperc. (%)	10	30
fout soortelijke massa (SMs)	0	5

Zowel de variatie van slibgehalten in de tijd, in de ruimte als in de diepte spelen een rol. Ook is belangrijk in hoeverre, en met welke betrouwbaarheid, gesteld kan worden dat de aanname klopt dat de dynamische diepte voor dit gebied ligt tussen 0,5 en 1,0 meter per jaar. Ten gevolge van verschillen in consolidatie zijn tevens verschillen in poriëngehalte te verwachten. Indien men een betere indruk wil krijgen van de totale fout bij deze berekeningsmethode, is het noodzakelijk om naast een gedetailleerde bodembemonstering, onderzoek te verrichten naar de variatie in poriëngehalte en de dynamische diepte (morfologische invloedssfeer).

De minimale relatieve fout van dit model bedraagt 30 %, de maximale relatieve fout 65 %. Het is zaak de waarde van deze modelberekening niet te overschatten in aanmerking nemende de grote fout die gemaakt wordt in de berekening.

5.2. Bespreking resultaten

5.2.1. Dynamiek bodemslibberging

De verandering in slibberging is een directe afgeleide van de verandering in ruimtelijke verspreiding van de slibgehalten aan het oppervlak. Hierbij zijn de in hoofdstuk 3 besproken processen van belang.

In figuur 5.2 is de dynamiek in slibberging aangegeven voor de tijdsspannen van mei naar september, van september naar november en van mei naar november. Hierbij is uitgegaan van een dynamische diepte van 1,0 meter per jaar. Indien men een dynamische diepte van 0,5 meter per jaar veronderstelt, dienen de waarden in figuur 5.2 te worden gehalveerd.

Voor de periode van mei naar september (3,5 maand) vindt, cumulatief over het hele gebied een netto sedimentatie plaats. Deze toename wordt veroorzaakt door een sterke sedimentatie van slib op het noordelijk gedeelte van de plaat: 15.080 ton met een verandering in slibberging van 120 ton per maand per hectare. De geul kent een netto erosie van slib terwijl de schaar vrijwel neutraal is.

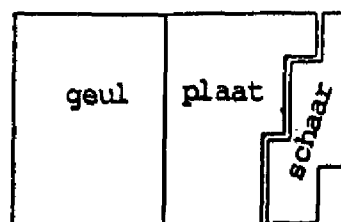
In de periode van september naar november (2,0 maand) verdwijnt een groot gedeelte van het in september aanwezige slib op de plaat: erosie van 10.760 ton. De geul kent een netto sedimentatie. Depositie vindt slechts plaats in het zuidwestelijk gedeelte van het gebied (3.820 ton).

Over de totale tijdsspan bezien, van mei naar november (5,5 maand) vertoont de plaat een netto depositie van 7.040 ton. Deze is groter dan de erosie in de geul welke 3.170 ton bedraagt.

Naar aanleiding van deze gegevens kunnen een aantal conclusies worden gedaan aangaande de slibberging in de bodem en de temporele variatie hiervan die in hoofdstuk 3 reeds naar voren zijn gekomen:

- De morfologische eenheden vertonen een seizoensbepaalde variatie in slibberging. Dit geldt met name voor de plaat.
- De sedimentatie of erosie van slib vertoont per periode een sterke variatie binnen de verschillende morfologische eenheden.

DYNAMIEK SLIBBERGING BODEM



mei - sept

1102	15
<u>2.3</u>	<u>0.2</u>

sept - nov

-715
<u>-2.6</u>

mei - nov

387
<u>0.5</u>

mei - sept

-678	1780	15
<u>-2.5</u>	<u>8.7</u>	<u>0.2</u>

sept - nov

361	-1076
<u>1.3</u>	<u>-0.2</u>

mei - nov

-317	704
<u>-0.1</u>	<u>2.2</u>

mei - sept

-508	1508	15
<u>-3.7</u>	<u>12.0</u>	<u>0.2</u>
-107	272	
<u>-1.2</u>	<u>3.5</u>	

sept - nov

-21	-928
<u>-0.3</u>	<u>-12.9</u>
382	-148
<u>4.9</u>	<u>-3.3</u>

mei - nov

-529	580
<u>-2.4</u>	<u>3.9</u>
275	124
<u>1.3</u>	<u>1.0</u>

tijd: 3,5 mnd

tijd: 2,0 mnd

tijd: 5,5 mnd

(1102): netto slibverplaatsing (+ = sedimentatie)
 (- = erosie) [10 ton]
 (2.3): netto slibverplaatsing per tijds- en oppervlakte-eenheid (rate) [10 ton/ (mnd. ha)

Figuur 5.2 Dynamiek in slibberging voor het bodembemonsteringsgebied; voor de perioden: mei - september, september-november en mei - november.

5.2.2. Vergelijking met eerste slibbalans Westerschelde

Van Maldegem (1987) heeft een eerste slibbalans opgesteld voor het gehele estuarium van de Westerschelde. In dit systeem vormt de onderwaterbodem de voornaamste bron voor het slib. Met behulp van het hierboven beschreven model en met de bodemkartering van De Looff (1978, 1980) is een schatting gemaakt van de totale slibberging in tonnen, berekend over de periode van een jaar. Dit is uitgevoerd voor de vijf compartimenten waarin de Westerschelde is opgedeeld.

Voor de drie perioden is, analoog aan de methode zoals gehanteerd in Van Maldegem (1987), de momentane slibberging voor het bodembemonsteringsgebied berekend. In tegenstelling tot de berekeningswijze die beschreven is in hoofdstuk 5.1, is nu gebruik gemaakt van de gemiddelde waarde voor slibgehalten van het hele gebied. Ervan uitgaande dat slibgehalten die zijn aangetroffen in het bodembemonsteringsgebied representatief zijn voor compartiment 3, kan de totale slibberging voor het compartiment worden berekend voor de drie onderzochte perioden. Deze waarden worden in Tabel 5.2 vergeleken met de bodemslibberging zoals berekend door Van Maldegem (1987).

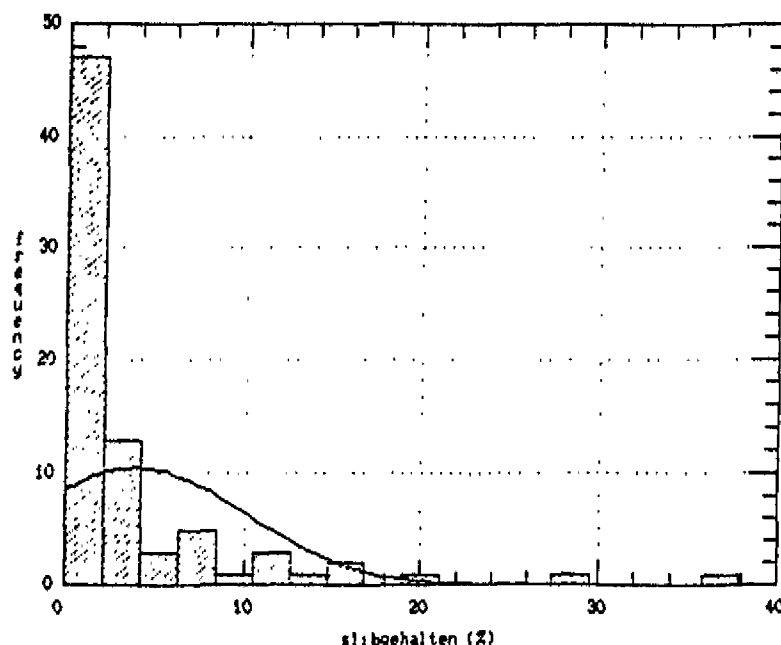
De gemiddelde slibgehalten per periode van het bodembemonsteringsgebied worden vermenigvuldigd met het oppervlak van compartiment 3, de reciproke van het poriëngehalte, de soortelijke massa en de dynamische diepte die gesteld is op 1 m/jaar (Tabel 5.2). Het oppervlak van compartiment 3, ter hoogte van NAP, bedraagt 42,4 km² (Bollebakker, 1985).

De slibberging van compartiment 3 over de periode van 1 jaar is volgens de berekening van Van Maldegem bijna twee keer zo groot als bij de berekening volgens gegevens van het Middelgat. Dit verschil wordt veroorzaakt door het verschil in gemiddeld slibgehalte. De slibgehalten in het bodembemonsteringsgebied zijn voor de drie perioden beduidend lager dan het gemiddelde van het hele compartiment, berekend met behulp van de gegevens van De Looff (1978). Een oorzaak hiervoor is wellicht de Biezelingse Ham en de Kapellebank (figuur 1.1), relatief grote gebieden met hoge slibgehalten, waardoor het gemiddelde van compartiment 3 wordt beïnvloed.

Tabel 5.2 Vergelijking slibberging compartiment 3; berekening Van Maldegem (1987) en berekening voor de drie bemonsterde perioden volgens methode Van Maldegem (1987). De dynamische diepte is gesteld op 1,0 m/j.

berekening	slibberging (1.000 ton)	standaarddeviatie (1.000 ton)
Van Maldegem	5.544	6.932
mei	2.637	4.194
september	3.972	6.488
november	2.481	4.433

Door de berekeningsmethode te gebruiken met behulp van de gemiddelden wordt tijd uitgespaard maar tevens informatie ongebruikt gelaten. Indien men gemiddelden berekent wordt aan elk



Figuur 5.3 Frequentie histogram, en de vorm voor de normale verdeling (doorgetrokken lijn) van slibgehalten, mei 1987.

monsterpunt een evengrote waarde toegekend. In praktijk zal het meetnet echter nooit evenredig over het bemonsterde gebied zijn verdeeld. Ook wordt uitgegaan van een normale verdeling van de slibgehalten, welke voor geen van de drie perioden is aangetroffen. De oorzaak van de scheve verdeling in slibgehalten ligt in het feit dat grote delen van het gebied relatief lage slibgehalten vertonen (0 tot 5%). Indien hogere slibgehalten voorkomen zijn deze direct beduidend hoger (20 tot 40%) (figuur 5.3).

In tabel 5.3 staan de schattingen aangegeven voor de dynamiek in slibberging en de fouten hierbij, berekend volgens de twee methoden: de interpolatiemethode de 'methoden gemiddelden'.

Tabel 5.3 De dynamiek in slibberging voor het bodembemonsteringsgebied berekend volgens twee methoden (1000 tonnen).

perioden	methode interpolatie		methode gemiddelden	
	schatting	fout	schatting	fout
mei- sept	11,2	5,6	15,5	89,9
sept- nov#	- 7,2	3,6	- 8,1	43,7
mei- nov#	3,9	1,9	1,8	92,2

Deze berekening is uitgevoerd zonder het schaaroppervlak

De resultaten van beide methoden vertonen dezelfde trends aangaande de dynamiek. Er is een groot verschil in de veronderstelde fout van de beide berekeningen. In hoofdstuk 5.1 wordt gesteld dat het moeilijk is een fout voor de interpolatiemethode aan te geven. Voor de berekening van tabel 5.3 is een soort gemiddelde relatieve fout van 50% verondersteld. Anderzijds is

voor de 'methode gemiddelden', gebruik gemaakt van de standaarddeviatie, zoals ook Van Maldegem (1986) dat heeft gedaan. De vraag is of dit een goede maat vormt voor de werkelijke fout in de berekening. De totale slibberging van een gebied is het resultaat van delen van het oppervlak met hoge en delen met lage slibgehalten zodat de variatie in dit signaal, aangegeven door de standaarddeviatie, geen goede maat is voor de fout. De relatieve fout bij de methode gemiddelden die nu in de orde ligt van de 500 tot 5000% zal in werkelijkheid beduidend lager liggen.

5.3. Suspensietransporten van slib

5.3.1. Berekening suspensietransport per eenheid van breedte

Aan de hand van de metingen over de waterkolom op de Zeekatlocatie is het mogelijk de omvang van het suspensietransport van de slibfractie te schatten.

De metingen hebben betrekking op twee dimensies: de variabelen zijn geregistreerd op zes punten in de verticaal en de richting van de waterstroming is bekend (§ 2.2.2). Op grond hiervan kan (slechts) het suspensietransport per eenheid van breedte worden berekend. Immers, transporten in massa per tijdseenheid door een dwarsdoorsnede van een geul hebben betrekking op drie dimensies.

De grootte van het suspensietransport T op een bepaald tijdstip door een kolom is berekend door het product van de verticaal gemiddelde snelheid ($\bar{v}$) en verticaalgemiddelde slibconcentratie ($\bar{c}$) te vermenigvuldigen met de op dat moment heersende waterdiepte (d):

$$T = \bar{v} \bar{c} d \quad (\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}))$$

Hierbij is het niet mogelijk geweest rekening te houden met de oriëntatie van het verticale vlak. Vanwege het feit dat de stroomrichting varieert in de tijd zou bij constant houden van de oriëntatie ontbinding in vectoren noodzakelijk zijn. De nauwkeurigheid van de stroomrichtingsmetingen is echter van dien aard, dat verdiscontering ervan niet verantwoord zou zijn.

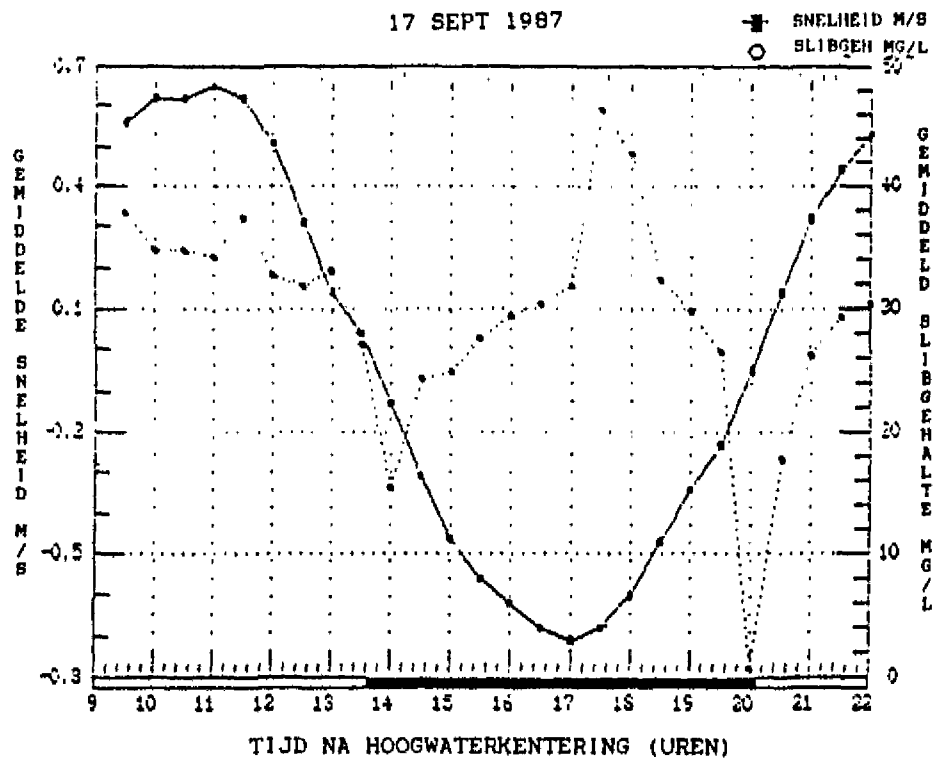
Indien bovenstaande expressie op de successievelijke verticaalmetingen wordt toegepast, wordt een beeld verkregen van de ontwikkeling van het suspensietransport in de tijd.

5.3.2. Schatting slibtransporten op Zeekatlocatie

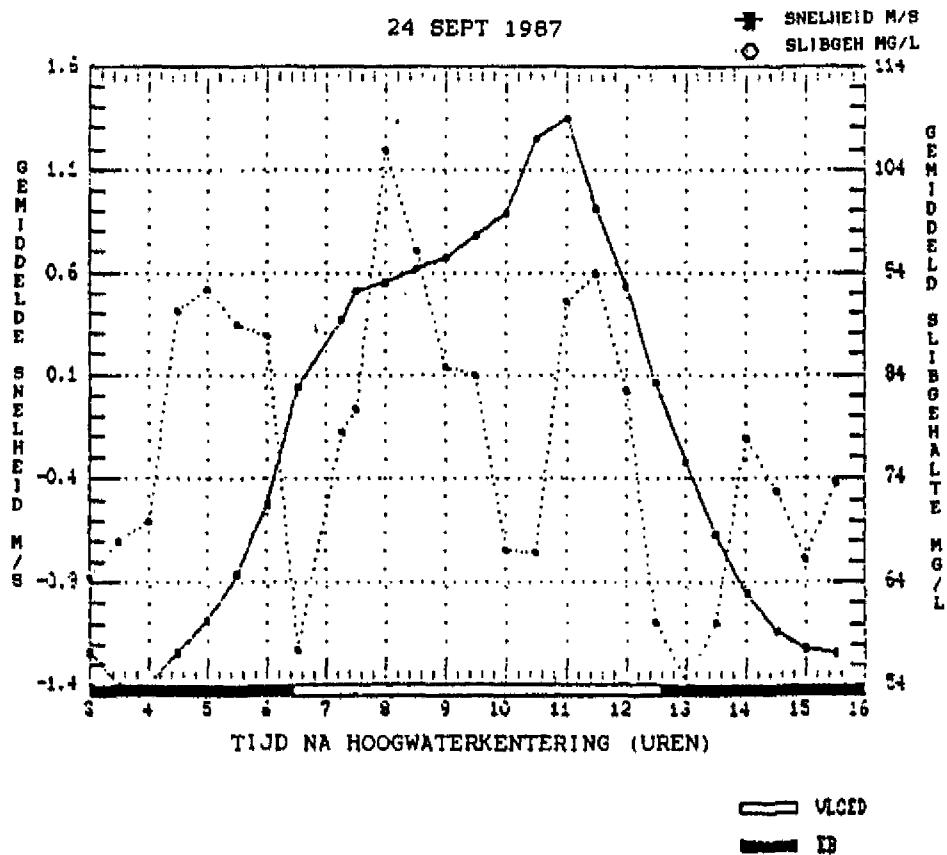
Het verloop van de verticaalgeïntegreerde snelheid en -concentratie over een eb-vloedcyclus is voor vier meetdagen weergegeven in figuur 5.4. Bij de interpretatie van het figuur moet men attent zijn op de verschillende schaalverdelingen. De sinusvorm in het verloop van de gemiddelde snelheid is gedurende alle 13-uursmetingen waargenomen. De maximale waarde hiervan wordt steeds tijdens eb geregistreerd.

Het verloop in gemiddelde slibconcentratie laat een meer afwisselend beeld zien, analoog aan het reeds beschreven verloop van de concentratieverticalen. Opvallend is het (in hoofdstuk 4 reeds vermelde) verschil in absolute cijfers tussen de achter-

a)

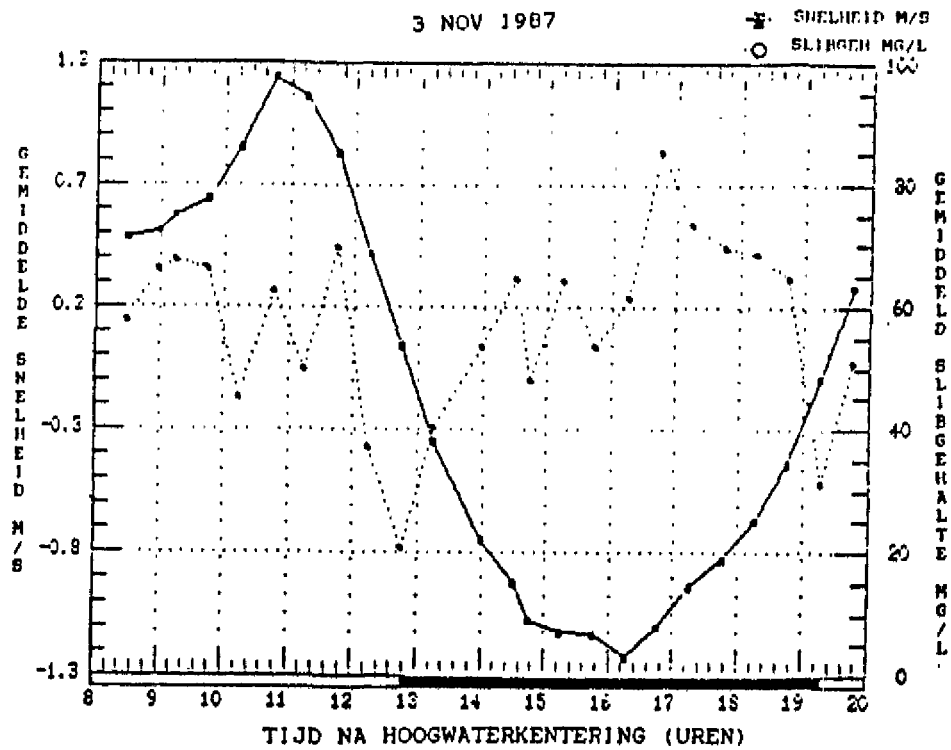


b)

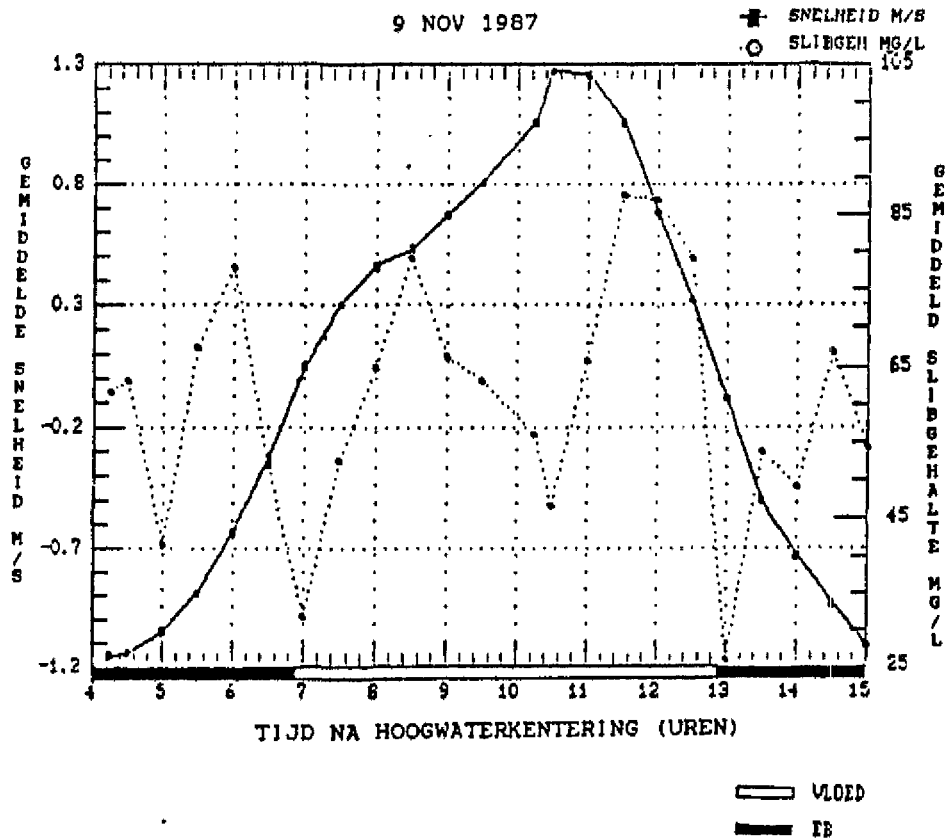


Figuur 5.4 Verloop van de verticaalgeïntegreerde stroomsnelheid en slibconcentratie over een getijcyclus op a) 17-09 1987 en b) 24-09 1987 op de Zeekatlocatie.

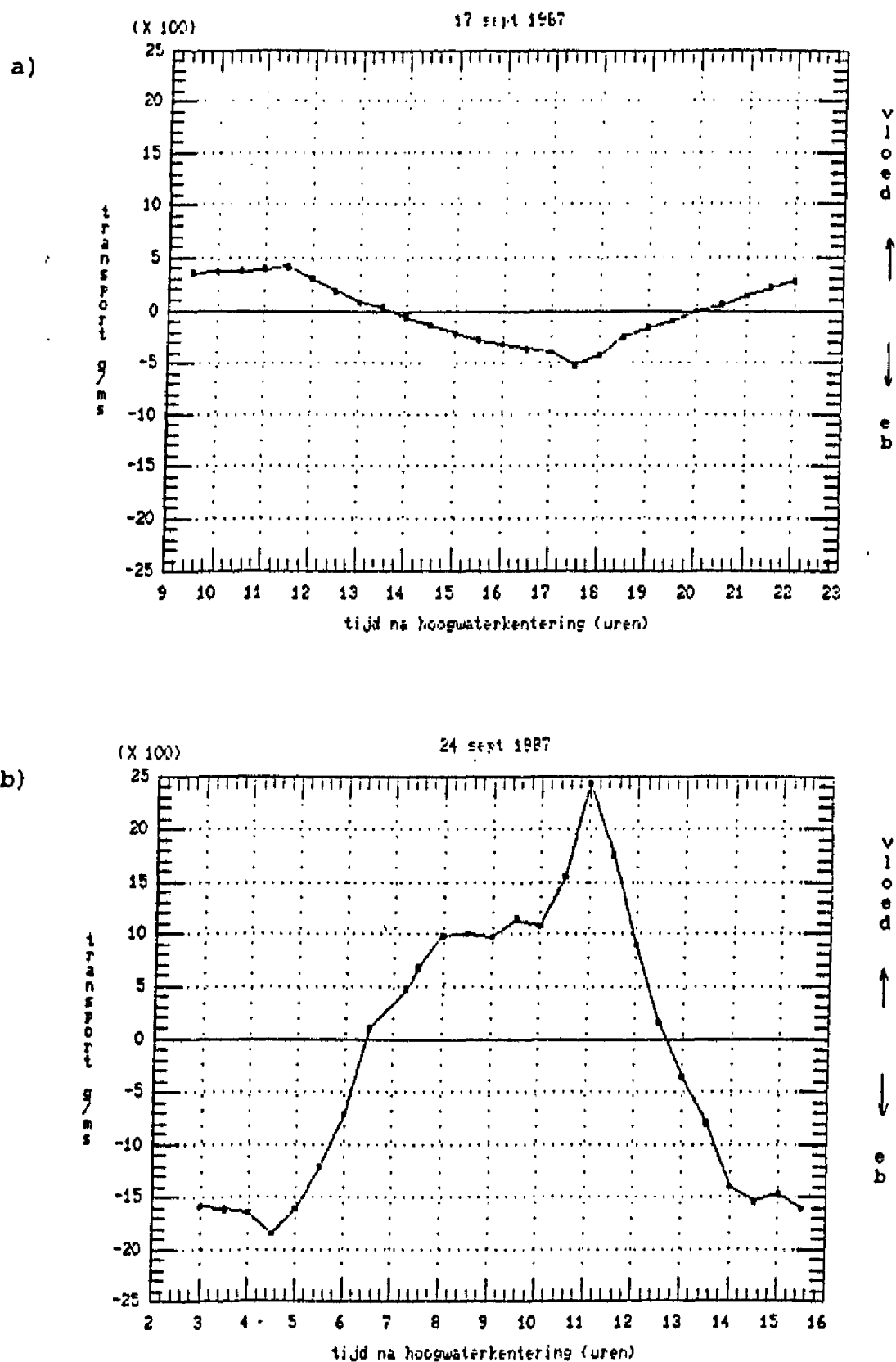
c)



d)

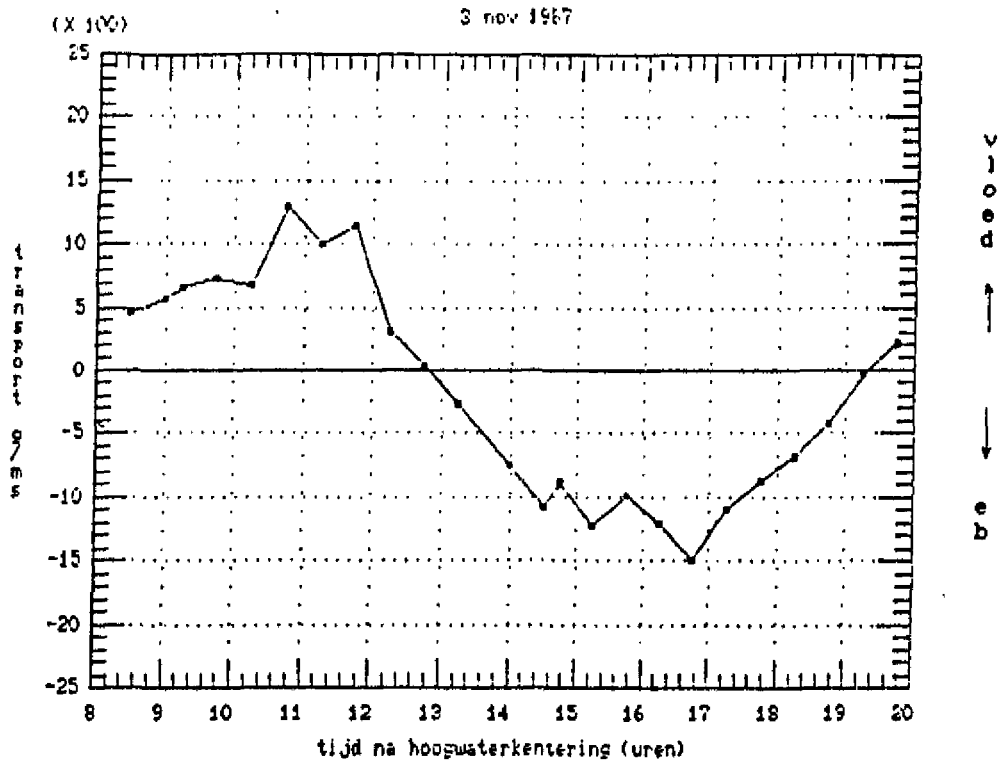


Figuur 5.4 Verloop van de verticaalgeïntegreerde stroomsnelheid en slibconcentratie over een getijcyclus op c) 03-11 1987 en d) 09-11 1987 op de Zeekaatlocatie.

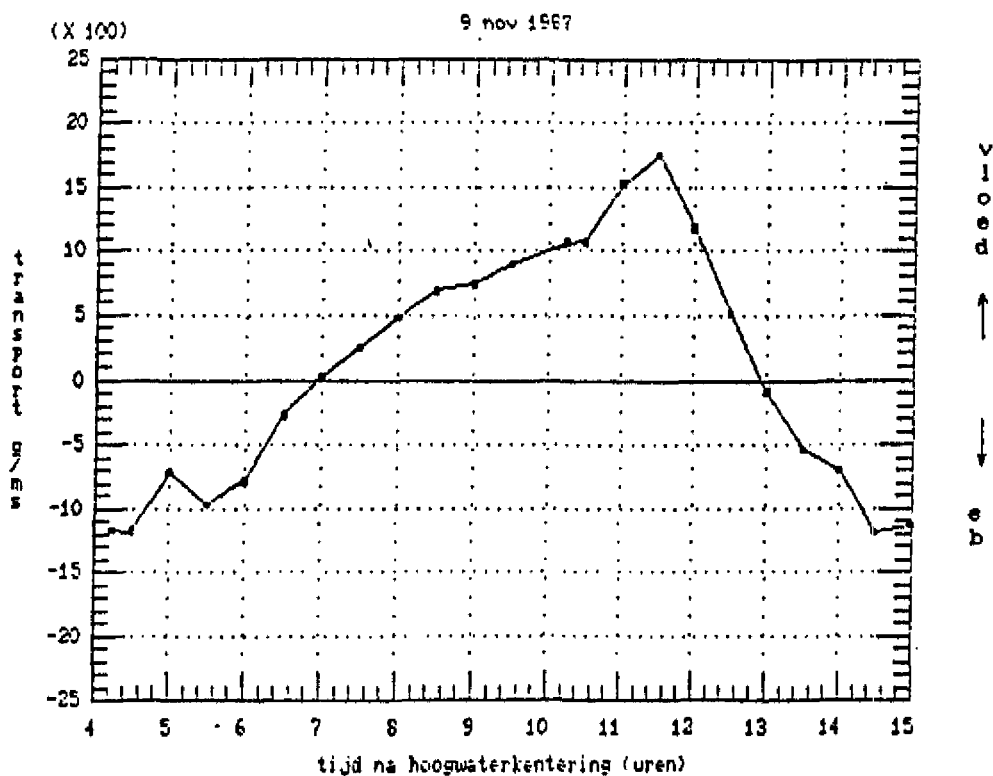


Figuur 5.5 Verloop van het suspensietransport per eenheid van breedte over een getijcyclus (vloed positief, eb negatief) op a) 17-09 1987 en b) 24-09 1987 op de Zeekatlocatie.

c)



d)



Figuur 5.5 Verloop van het suspensietransport per eenheid van breedte over een getijcyclus (vloed positief, eb negatief) op c) 03-11 1987 en d) 09-11 1987 op de Zeekatlocatie.

eenvolgende meetdagen. De maximaal voorkomende gemiddelde slibconcentratie op 17 september is lager dan de minimale waarde een week later op 24 september.

Bij toepassing van bovenvermelde expressie voor successievelijke tijdstippen wordt het verloop verkregen van het suspensietransport aan slib per eenheid van breedte, hetgeen in figuur 5.5 is weergegeven voor de vier meetdagen. De schaalverdeling is met opzet niet per meetdag gemodificeerd, teneinde onderlinge verschillen, die aanzienlijk zijn, te visualiseren. Het verloop vertoont een golfbeweging die in vorm en tijdstip vrijwel overeenkomt met die in de gemiddelde snelheid. Alleen een piek van het maximale transport ijlt in de orde van grootte van een half uur na op die in stroomsnelheid.

Vanuit de figuur kan via tijdsintegratie het totale suspensietransport aan slib over een bepaald tijdsinterval berekend worden. Voor zowel de eb- als de vloedperiode van de vier 13-uursmetingen is dit uitgevoerd. De resultaten staan geresumeerd in tabel 5.4. Elke rij heeft betrekking op een bepaalde meetdag. De linkerkolommen in de tabel geven een samenvatting van enkele relevante externe omstandigheden, rechts staat tenslotte een schatting van de transporten vermeld, respectievelijk in de eb-richting en in de vloedrichting en de nettowaarde, waarbij een positief getal een netto transport in de vloedrichting impliceert.

Tabel 5.4 Suspensietransport door een waterkolom op de Zee-katlocatie met externe omstandigheden.

DATUM	GETIJ			WIND		TRANSPORT		
	verschil (m)	eb-duur (uren)	vloed-duur (minuten)	snelh (m/s)	richt	eb (ton/m)	vloed (ton/m)	netto (ton/m)
17-9	2,72	6.23	6.37	7,0	ZW	5,8	5,8	0,0
24-9	4,77	6.17	6.13	7,0	ZW	28,3	23,4	-4,9
3-11	4,73	6.32	6.18	4,1	NO	19,4	13,6	-5,8
9-11	4,63	6.12	5.58	3,3	ZO	18,4	17,4	-1,0

netto transport = vloedtransport - ebtransport

Bij toepassing van het transportmodel worden berekeningen uitgevoerd met waarden van verscheidene variabelen, die elk een bepaalde nauwkeurigheid bezitten. De fouten in de gemiddelde snelheid en slibconcentratie op een bepaald tijdstip, in de dan gemeten waterdiepte en in de duur van een eb- of vloedperiode bepalen de uiteindelijke betrouwbaarheid van het transportcijfer. De manier waarop foutenvoortplanting zich bij deze bewerkingen manifesteert verschilt per dag, per eb- en vloedperiode. De volgende factoren liggen hieraan ten grondslag:

- Indien de meetnauwkeurigheid constant is, maar de grootte van de meetwaarden per periode varieert, verschilt de relatieve fout per periode.

- De nauwkeurigheid in slibconcentratie verschilt per meetdag, als gevolg van een meer of minder groot betrouwbaarheidsinterval per ijklijn (2.2.2).

- Het feit dan de metingen niet exact op een kentering zijn aangevangen introduceert een fout in de duur van een eb- of vloedperiode. In dergelijke gevallen is de tijdsduur aangehouden van dat gedeelte van de getijcyclus zoals die is gemeten in Hansweert en is hierbij een nauwkeurigheid van 5 minuten in acht genomen.

Tabel 5.5 geeft een opgave van de grootte van de fouten als gevolg van bovenbeschreven bronnen. Van de variabelen staat na het gemiddelde achtereenvolgens de absolute fout en de relatieve fout (in %) vermeld. De laatste kolom geeft de totale relatieve fout voor het gedeelte van de getijcyclus. Tabel 5.6 tenslotte vermeldt het resultaat van de verkregen betrouwbaarheid van de transportcijfers na doorberekening van de verschillende fouten.

Tabel 5.5 Nauwkeurigheid van variabelen die bepalend zijn voor de grootte van het suspensietransport.

GETIJ	GEM. SNELHEID (m/s)		GEM. SLIBCONC. (mg/l)		GEM. WATERDIEPTE (m)		TIJD	TOT.
FOUTEN:	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	rel.	rel.
17 september:								
eb	0,45 ± 0,08	17,8	28 ± 6	21,5	17,4 ± 0,2	1,1	-	27,9
vloed	0,42 ± 0,08	19,0	31 ± 6	19,2	17,4 ± 0,2	1,1	1,7	27,1
24 september:								
eb	1,02 ± 0,08	7,8	74 ± 9	12,1	18,1 ± 0,2	1,1	1,7	14,5
vloed	0,63 ± 0,08	12,7	81 ± 9	11,2	18,1 ± 0,2	1,1	-	17,0
3 november:								
eb	0,82 ± 0,08	9,8	60 ± 8	13,3	17,5 ± 0,2	1,1	-	16,6
vloed	0,62 ± 0,08	12,9	54 ± 8	14,8	17,5 ± 0,2	1,1	0,8	19,7
9 november:								
eb	0,78 ± 0,08	10,3	56 ± 12	21,5	17,9 ± 0,2	1,1	1,9	23,9
vloed	0,71 ± 0,08	11,3	65 ± 12	18,5	17,9 ± 0,2	1,1	-	21,7

Tabel 5.6 Schattingen van het suspensietransport per eenheid van breedte op de Zeekatlocatie met 95%-betrouwbaarheidsinterval.

DATUM	TRANSPORT [ton/m]		
	EB	VLOED	NETTO
17 september	-5,8 ± 1,6	5,8 ± 1,6	0,0 ± 2,2
24 september	-28,3 ± 4,1	23,4 ± 4,0	-4,9 ± 5,7
3 november	-19,4 ± 3,2	13,6 ± 2,7	-5,8 ± 4,2
9 november	-18,4 ± 4,4	17,4 ± 3,8	-1,0 ± 5,8

5.4. Interpretatie van het karakter van het suspensietransport op de Zeekatlocatie

Bij vergelijking van de geschatte transporten over de vier meetperioden vallen twee fenomenen op. In eerste instantie ligt voor alle dagen het 95%-betrouwbaarheidsinterval rond het netto transport voor tenminste de helft in de ebrichting. Op 3 nov vindt het netto transport zelfs zeker in de ebrichting plaats, op 24 sept slechts in het extreme geval niet. Ten tweede springen de grote verschillen tussen de dagen in het oog: het totale transport tijdens de eb- of vloedperiode op 17 september ligt in de orde van grootte van de nettowaarde op 3 november.

Een theoretische beschouwing resulteert in een opsomming van relevante variabelen.

De grootte van het suspensietransport wordt bepaald door het produkt van de slibconcentratie en de stroomsnelheid. Van invloed hierop zijn:

- de vorm van de getijcurve. Dit bepaalt de ebduur ten opzichte van de vloedduur (de asymmetrie van de getijcurve), de maximale stroomsnelheden en de duur waarbij de competente snelheid wordt overschreden.
- de verticale verdeling van het suspensiemateriaal. Van belang hierbij is de samenhang met de opbouw van de stroomsnelheidsverticaal en met name in het gedeelte nabij de bodem, waar (relatief) hoge troebelheden kunnen voorkomen.
- naijleffecten, ofwel het faseverschil tussen stroomsnelheid en slibconcentratie (§ 4.4.2.). Transporten zullen maximaal zijn wanneer de pieken in beide variabelen in de tijd samenvallen.
- de mate waarin uitwisseling over het grensvlak tussen bodem en waterkolom plaatsvindt. Dit is uitgebreid besproken in § 3.4.

Er zijn verschillende oorzaken aan te wijzen, die geregistreerd zijn, die kunnen bijdragen tot het geconstateerde verschil in absolute waarde van het slibtransport door de waterkolom en in de richting van het netto transport hiervan.

Ten eerste duurt, volgens de metingen op de Zeekatlocatie, met uitzondering van 17 september, de eb langer dan de vloed. Er wordt dan dus gedurende een groter tijdsinterval slib in de ebrichting getransporteerd.

In tweede instantie zijn de maximale (verticaalgemiddelde) snelheden in de ebrichting steeds groter dan die tijdens de vloedperiode. Tevens bestaan er aanzienlijke verschillen in gemiddelde snelheden tussen de meetdagen onderling.

Gedeeltelijk in samenhang met het laatstgenoemd geregistreerde feit is er een significant verschil in slibconcentratie aanwezig tussen de vier 13-uursmetingen.

Het faseverschil tussen stroomsnelheid en slibconcentratie kan, naast beïnvloeding van de grootte van het suspensietransport, ook effect hebben op de richting (en omvang) van het netto transport. Voor de meetdag 3 nov is het grootste netto transport in ebrichting berekend. Bij vergelijking van de iso-diagrammen van die dag (figuren 4.4 en 4.5) is waar te nemen dat de twee zich over de gehele verticaal manifesterende maxima (4.3) zich van elkaar onderscheiden in relatie tot de dan heersende stromingscondities. Nauwkeurige bestudering wijst uit dat het op de

maximale vloodsnelheden nadjlënd maximum in troebelheid zich rond de hoogwaterkentering bevindt. Op dat moment zijn de vloodsnelheden al aanzienlijk afgenomen en heersen, voor een gedeelte, zelfs ebcondities. Dit alles staat in contrast met de stromingsomstandigheden tijdens het maximum in troebelheid, dat, later op de dag najlt op de grote ebsnelheden.

Als gevolg van de verschillende aannamen, die gesteld zijn bij het construeren van de stroomsnelheids- en troebelheidsverticalen, wordt een onnauwkeurigheid in de transportwaarde geïntroduceerd. De extrapolatie in de verticaal van de onderste meetwaarden naar de bodem en van de bovenste naar het wateroppervlak strookt niet in alle gevallen met de realiteit. In welke mate deze fouten elkaar versterken of uitdempen of, anders gesteld, hoe de uiteindelijk hierdoor veroorzaakte fout in de verschillende transportcijfers doorwerkt is niet bekend.

Naast deze concrete aanwijzingen die aanleiding geven tot verschillen in transporten kan slechts gegist worden naar de invloed van de factoren die volgens theoretische overwegingen een rol kunnen spelen. Bovendien moet men er zich van bewust zijn dat metingen slechts op één vaste locatie zijn uitgevoerd. De hoeveelheid en de richting waarin bepaalde kwantiteiten slib langs een bepaalde waterkolom worden gevoerd hangt mede af van de locatie van de kolom binnen het systeem van circulatiestromingen in het brede Westerscheldebekken met variërende waterdiepten in de dwarsdoorsnede (Manni, 1986) en van de antecedente condities op op dat moment stroomopwaarts gelegen locaties.

De conclusie die Manni (1986) stelt, is eveneens op de resultaten van dit onderzoek toepasbaar: het blijkt in de praktijk bijzonder moeilijk te zijn om aangaande slibtransport een nauwkeurige analyse uit te voeren. De omstandigheden zijn sterk veranderlijk. Daarnaast is het resulterend slibtransport een relatief klein verschil van de getransporteerde slibmassa's tijdens eb en vlood, terwijl de fout bij deze netto waarde in dezelfde orde van grootte ligt als die van het eb- en vloodtransport.

6. CONCLUSIES

Zowel uit de resultaten van bodembemonstering als die van metingen in een waterkolom volgt dat de bodem een sleutelrol vervult in de slibhuishouding. Hier vindt de grootste opslag van slib plaats. Het is dus van belang een goed inzicht te krijgen in de processen die zich afspelen op het grensvlak tussen bodem en waterkolom teneinde een beeld te vormen van de ruimtelijke en temporele variatie in slibtransport.

Slibgehalten in de bovenste bodemlaag.

Zowel de ruimtelijke als temporele variatie in slibpercentage van de bovenste 2 cm van de bodem is groot. Het is niet mogelijk gebleken om trends aan te wijzen voor de ruimtelijke variatie, welke te koppelen zouden zijn aan belangrijk veronderstelde, grootschalige, processen.

De temporele variatie is op verschillende schaalniveaus aanwezig als gevolg van een periodiciteit in getijomstandigheden en over een jaar. Hoewel het effect van de doortij-springtijcyclus niet is verdisconteerd, is, voornamelijk in het intergetijdegebied, een seizoensvariatie aangetoond. Deze variatie, een gemiddeld significant hoger slibpercentage op de plaat in september, kan grotendeels verklaard worden door de seizoensmatige cycliciteit in golfactiviteit.

Bij vergelijking van het gemiddelde slibgehalte volgens de bestaande bodemkartering van de Westerschelde, 1 : 25.000 (De Looff, 1978) met de resultaten van dit onderzoek worden aanzienlijke verschillen aangetroffen. De bemonsteringscampagne voor de kartering van De Looff is over een aantal maanden verdeeld. Gezien de seizoensmatige variabiliteit in slibgehalte, is dit niet aanbevelingswaardig.

Het is van belang een bodembemonsteringsprogramma af te stemmen op het beoogde doel, afhankelijk van de door financiën en tijd gestelde randvoorwaarden.

Indien men is geïnteresseerd in het effect van het complex aan processen op het bodemslibgehalte, lijkt het zinvol de middelen te concentreren, zowel ruimtelijk als temporeel.

Voor het berekenen van een slibbalans, ligt het voor de hand te streven naar bemonstering van gemiddelde slibgehalten. Vanwege de grote dynamiek in de slibhuishouding zal het niet of nauwelijks mogelijk zijn een zowel ruimtelijk als temporeel representatief programma op te stellen.

De berekening van de momentane slibberging volgens een eenvoudige modellering en de dynamiek hierin toont een grote variatie, analoog aan bovenbeschreven conclusie.

De bepaling is geschied volgens enerzijds een methode waarbij gebruik is gemaakt van het gemiddelde slibgehalte per periode en anderzijds een methode met behulp van een interpolatietechniek. Hoewel een nauwkeurighedsanalyse bij beide modelleringen op moeilijkheden stuit, is bij laatstgenoemde methode een betere schatting te maken.

Stroomsnelheids- en troebelheidsvariaties in de waterkolom

Het stromingspatroon op de Zeekatlocatie kent een aantal karakteristieken die onder verschillende getij- en meteorologische omstandigheden zijn waargenomen:

1. de maximale stroomsnelheden en de maximale verticaal-gemiddelde stroomsnelheden vinden plaats tijdens eb.
2. de stroomkenteringen vinden tijdens de hoogwaterkentering eerst bovenin en tijdens de laagwaterkentering eerst onderin de waterkolom plaats.
3. tijdens springtij zijn de stroomsnelheden groter dan tijdens doodtij.
4. een invloed van weersomstandigheden op het stromingspatroon is niet waargenomen.

Er is een verschil waargenomen in profielopbouw tussen de eb- en vloedperiode. Dit verschijnsel kan verklaard worden aan de hand van de estuariene circulatie. Het zoutere vloedtransport manifesteert zich sterker in het onderste gedeelte van de waterkolom. Het zoetere, lichtere water, dat een zeewaartsgericht transport kent, is sterker merkbaar in het bovenste gedeelte van de waterkolom.

Het patroon van de troebelheden is gerelateerd aan de stromingscondities, zij het met een zekere vertraging. Dit geldt zowel voor de eb-vloed- als de springtij-doodtijcyclus.

- eb/vloed. Hoge troebelheden, die zich uitstrekken in de gehele verticaal, treden op na maximale stroomsnelheden ten gevolge van hoog energetische en turbulente omstandigheden. Dit verschijnsel is, door verschillende onderzoekers, beschreven voor andere estuaria. Een ander maximum in troebelheden, welke zich beperkt tot de onderste helft van de waterkolom, treedt op bij het aantrekken van de stroming tussen 2 à 3 uur na de stroomkenteringen. In de internationale literatuur is echter niets over dit specifieke verschijnsel aangetroffen.

- springtij/doodtij. Troebelheden vertonen een positieve relatie met de grootte van de stroomsnelheden. Tijdens springtij, waarbij de stromingen zowel in eb- als vloedrichting relatief sterk zijn ontwikkeld, worden hogere troebelheden aangetroffen dan gedurende doodtijomstandigheden.

Een relatie tussen troebelheden en meteorologische omstandigheden is te verwachten, ten gevolge van het resuspenderende effect van door wind gegenereerde golven in het estuarium. De trend voor dit fenomeen is waargenomen, maar het aantal meetdagen is te beperkt om hier een harde conclusie aan te verbinden.

Bij het verklaren van de verschillende verschijnselen moeten men er zich van bewust zijn dat metingen slechts op één vaste locatie zijn verricht. De hoeveelheid en de richting waarin bepaalde kwantiteiten slib langs een waterkolom worden gevoerd hangt mede af van de situering van de kolom binnen het systeem van circulatiestromingen in het brede Westerscheldebekken en van antecedente condities op op dat moment stroomopwaarts gelegen locaties.

Berekening van het suspensietransport per eenheid van breedte over vier getijcycli resulteert in de constatering van een verschil in absolute waarde tussen de meetdagen van zowel het eb-

en vloedtransport als van het nettocijfer. Overwegend vindt op de Zeekatllocatie een nettotransport in de ebrichting plaats. Bepalend voor de grootte en de richting van het suspensietransport is het cumulatieve effect van de (verdeling van) slibconcentratie en stroomsnelheid in de waterkolom.

De nauwkeurigheid van de modellering ter berekening van het suspensietransport wordt bepaald door de wijze waarop de verschillende fouten zich voortplanten. Dit varieert per dag, afhankelijk van de getijomstandigheden en de hierdoor geïnduceerde troebelheden, het gebruikte instrumentarium en het tijdstip van meten. Een schatting hiervan voor beschouwde meetdagen fluctueert tussen de 15 en 30%.

Van gebruikt instrumentarium is de nauwkeurigheid van de Partech 700 3RP troebelheidsmeter, (type S 1000) nader geanalyseerd. Op grond van de in dit onderzoek gevolgde meet- en verwerkingsprocedure kan gesteld worden dat, onder normale condities in de Westerschelde, ijklijnen voor dit apparaat geconstrueerd worden met een correlatiecoëfficiënt die hoger is dan 0,8, mits watermonsters worden genomen met slibconcentraties over een zo groot mogelijk bereik en een bemonsteringsfrequentie van minimaal 15% wordt aangehouden.

LITERATUURLIJST

- Abraham, G., de Jong, P., en van Kruiningen, F.E., 1986. Large scale mixing processes in a partly mixed estuary. In: van de Kreeke, J., (ed). Physics of shallow estuaries and bays, Springer Verlag, pp. 6- 21.
- Allen, J.R.L., 1974. Reaction, relaxation and lag in natural sedimentary systems; general principles, examples and lessons, Earth Science Reviews, 10, pp. 263- 342.
- Alphen van, J., 1982. Een literatuurstudie naar het morfodynamische gedrag van estuaria, Geomor, Nota 83.01.
- Andel van, T.H., en Postma, H., 1954. Recent sediments of the gulf of Paria, Verh. Kon. Ned. Akad. Wetensch., eerste Reeks, 20, pp. 192- 198.
- Blalock, H.M., 1972 (sec. ed.). Social statistics, McGraw- Hill Inc., Tokyo.
- Bollebakker, G.P., 1985. Inhoudsveranderingen Westerschelde 1952- 1981, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ-85.V027.
- Burrough, P.A., 1986. Principles of geographical information systems for land resources analysis, Oxford Univ. Press, pp. 193.
- Burt, T.N., 1984. Field settling velocities of estuary muds. In: Mehta, A.J., (ed). Estuarine cohesive sediment dynamics, Springer Verlag, pp. 126- 150.
- Davis, J.C., 1986 (sec. ed.). Statistics and data analysis in geology, John Wiley & Sons, pp. 646.
- Dyer, K.R., 1973. Estuaries: a physical introduction, John Wiley & Sons, pp. 140.
- Gabrielson, J.O., en Lukatelich, R.J., 1985. Wind related resuspension of sediments in the Peel-Harvey estuarine system, Estuarine Coastal and Shelf Science, 20, Academic Press Inc., pp. 135- 145.
- Groen, P., en Dorrestein, R., 1976 (derde druk). Zeegolven, Opstellen op oceanografisch- en maritiemmeteorol. geb. no 11, Staatsdrukkerij en Uitgeverijbedrijf, 's Gravenhage, pp. 124.
- Holland, A., 1984. Operationaliseringsplan voor het BALANS- ponton: "Zeekat", Delta Dienst Middelburg, Nota DDMI- 84.427.
- Hooper, D.J., 1979. Hydrographic surveying. In: Dyer, K.R., (ed). Estuarine hydrography and sedimentation, Cambridge Univ. Press, pp. 41- 56.
- Komar, P.D., 1976. Beach processes and sedimentation, Prentice-Hall Inc., New Jersey, pp. 429.
- Krone, K.B., 1972. A field study of flocculation as a factor in estuarial shoaling processes, U.S. Army Corps of Engineers, Committee on Tidal Hydraulics Technical Bullitin, 19, pp. 62.
- Krone R.B., 1978. Aggragation of suspended particles in estuaries. In: Kjerfve, B., (ed). Estuarine transportation processes. Univ. of South Car. Press, pp. 177- 190.
- Looff de, D., 1978. Kaartering van de bodemsamenstelling van het oostelijk gedeelte van de Westerschelde, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ- 78.V013.
- Looff de, D., 1980. Kaartering van de bodemsamenstelling van het westelijk gedeelte van de Westerschelde, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ- 80.V009.
- Looff de, D., 1983. Inhoudsveranderingen en zandbalans Westerschelde, op basis van de resultaten van vroeger over de periode 1878- 1971/ 1972 en recent over de periode 1971/

- 1972- 1980 uitgevoerde berekeningen, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ- 83.V003.
- Maldegem van, D.C., 1983. Vergelijkend onderzoek slibbemonsteringsapparatuur, Dienst Getijde Wateren, Nota GWA0- 86.113.
- Maldegem van, D.C., 1987. Eerste benadering slibbalans Westerschelde, Dienst Getijde Wateren, Nota GWA0- 87.101.
- McCave, I.N., 1978. Suspended sediment. In: Dyer, K. R., (ed). Estuarine hydrography and sedimentation, Cambridge Univ. Press, pp. 131- 185.
- McCave, I.N., 1984. Erosion transport and deposition of fine grained marine sediments. In: Stow, D.A.V. en Piper, D.J.W., (ed). Fine grained sediments: deep-water processes and facies, Blackwell Scientific Publications, pp. 35- 69.
- Manni, R.J., 1986. Slibtransport en slibbalans in de Westerschelde, Studierapport nr. 4, Reeks Westerschelde Studies.
- Mulder, H., van Heuvel, Tj., en de Reus, J., 1987. Processen bij slibbeweging, Dienst Getijde Wateren, Notitie GWA0- 87.292.
- Nichols, M., Cronin, L., Cronin, W., Gross, M.G., Nelson, B., Pierce, J., and Ulanowicz, R., 1981. Respons of the Rappahannock estuary to high river inflow, Chesapk. Res. Consort. Techn. Rept., 95, pp. 46.
- Nichols, M., 1984. Effects of fine sediment resuspension in estuaries. In: Mehta, A.J., (ed). Estuarine cohesive sediment dynamics, Springer Verlag, pp. 5- 42.
- Nichols, M., 1984/ 1985. Fluid mud accumulation processes in an estuary, Geo Marine Letters, 4, pp. 192- 198.
- Nichols, M. en Biggs, R.B., 1985. In: Davis, R.A. jr, (ed). Coastal sedimentary environments (sec. ed), Springer Verlag, pp. 77- 186.
- Partech Electronics LTD, - . Portable suspended solids monitor, Type 7000 3RP MK II, Eleven Doors, U.K.
- Postma, H., 1954. Size frequency of sands in the Dutch Wadden Sea, Arch. Neerl. Zoo., 13, pp. 319- 349.
- Postma, H., 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea, Neth. J. Sea Res., 1, pp. 148- 190.
- Postma, H., 1967. Sediment transport and sedimentation in the marine environment. In: Lauff, G.H., (ed). Estaries, Amre. Assoc. Adv. Sci., Publ. 83, Washington DC, pp. 158- 179.
- Pritchard, D.W., 1967. Observations in coastal plain estuaries. In: Lauff, G.H., (ed). Estuaries, Amer. Assoc. Adv. Sci., Publ. 83, Washington DC, pp. 3- 5.
- Richards, K., 1982. Rivers, form and processes in alluvial channels, Cambridge Univ. Press, pp. 358.
- Rijn van, L.C., 1986. Manual sediment transport measurements, Delft Hydraulic Laboratory, Delft.
- Salomon, J.C., en Allen, G.P., 1983. Role sedimentologique de la maree dans les estuaires a fort marnage, Compagnie Francais des Petroles, Notes and Memoires, 18, pp. 35- 44.
- Spronk, G., Steendijk, M., en van 't Westeinde, J., 1987. Periodieke controle en ijking van de Monitek/ Partech, Dienst Getijde Wateren, Notitie GWIO- 87.503.
- Statham, I., 1977. Earth surface sediment transport, Clarendon Press, Oxford, pp. 184.
- Suhayda, J.N., Whelan, T., Coleman, J.M., Booth, J.S., en Garrison, L.E., 1976. Marine sediment instability interaction of hydrodynamic forces and bottom sediments, Eight Offshore Tech. Conf., Paper OTC 2426, Houston, Texas, pp. 3.

- Swart, J. P., 1982(a). Onderzoek oppervlakte bemonstering slib in de Westerschelde periode '69- '80, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ- 82.V003.
- Swart, J. P., 1982(b). Relatie geleidendheid chloriniteit Westerschelde, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ- 82.V280.
- Swart, J. P., 1983. Slibtransportberekeningen in een dwarsraai in de Westerschelde, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ- 83.V0-07.
- Technische Scheldecommissie, 1984. Verdieping Westerschelde Programma, 48' /43', Studierapport STSC 6/84.
- Thorn, M. F. C., 1975. Deep tidal flow over a fine sand bed. Int. Assoc. for Hydraulic Research, 16th Congress, Sao Paulo, Paper A27, pp. 217- 233.
- Waterloopkundig Laboratorium, 1980. Onderzoek Vlissingse Fles, Nota M 1710, Delft.

APPENDIX A

Korrelgrootte analyse Bodemonsters

HANDELINGEN

- ongeveer 20 gr monster in bekerglas (500 ml)
- vul aan met: 10 ml leidingwater
10 ml waterstofperoxide (30%)
- een nacht (ongeveer 12 uur) laten staan
het peroxide reageert met de organische bestanddelen
- uitkoken waterstofperoxide
pas als het peroxide is uitgekookt (verdampt) kan het water gaan koken (kookpunt H₂O > kookpunt H₂O₂)
- zoutzuur (36%) toevoegen
ter verwijdering van carbonaten (schelpresten e.d.) meestal is 10 ml HCl voldoende (controleren pH < 4 m. b. v. lakmoespapier)
- ongeveer 10 min koken en vervolgens laten afkoelen
- filtreren en 3x uitspoelen met gedemineraliseerd water (demi-water); gebruikt filtreerpapier Schleicher & Schuell filter paper ø 150 mm Ref Nr 311.612
de effectiviteit van het filter kan positief worden beïnvloed door de vorming van een sliblaagje op het filter
deze handeling wordt verricht om het zoutzuur uit te spoelen (verhogen pH); bij een lage pH vlokken slibdeeltjes samen (flocculatie); door de pH te verhogen vallen deze vlokken uiteen hetgeen van belang is voor de zeping (scheiding zand/slib)
- filtreerpapier met zand/slib schoonspoelen in bekerglas
eventueel zacht kwastje gebruiken om de sliblaag te verwijderen waarbij het papier niet moet worden aangetast
- water en slib door zeef van 53 µm spoelen; slib uitwassen (demi-water) en opvangen in bekerglas(*)
- zand (restant in zeef) overhevelen in voorgewogen bakje en in stoof zetten
- zand droog zeven in zeef van 53 µm
- afwegen zandfractie (g)
- afwegen slibfractie (g)
- toevoegen van 5 ml zoutzuur (36%) aan bekerglas(*) met sliboplossing
samenvlokken slibdeeltjes tot grotere eenheden; kans op invang in filter groter
- filtreerpapier 2 uur drogen in stoof (105 °C), afkoelen (15-30 min) in exicator en afwegen blanco (g)
- 2x filtreren oplossing; filtreerpapier Schleicher & Schuell filter paper circles ø 150 mm Ref Nr 311.612
- drogen papier+slib in stoof (105 °C)
- afkoelen in exicator, wegen en berekenen gewicht slibfractie
- toevoegen van het gewicht aan slib verkregen na de droge zeping van de zandfractie door de 53 µm zeef om het totaal gewicht van de slibfractie te verkrijgen (g)

Het is belangrijk de monsterpot goed te mengen alvorens men tot de analyse overgaat.

APPENDIX B

Concentratiebepaling Watermonsters

HANDELINGEN

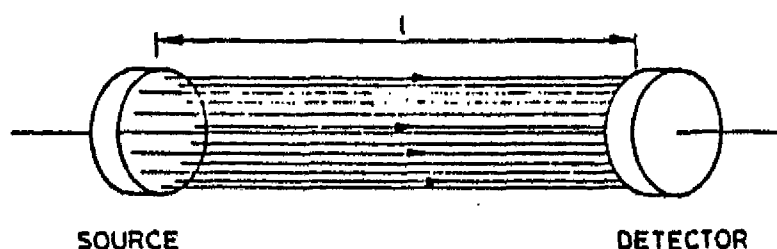
- watermonsters na monsternamen gekoeld opslaan (4 °C)
 - # geef het sediment ongeveer een week de tijd om te bezinken
- controleer het volume (water en sediment samen)
- voorzichtig de bovenste 3/4 overhevelen (indien helder) met behulp van slang
 - # verminderen hoeveelheid water dat het filter moet passeren; versnelling van de procedure
 - # op het filter zal door de hogere concentratie van de oplossing sneller een sliblaag worden gevormd zodat minder slib door het filter zal spoelen
- slib/zand-oplossing door zeef 53 µm; goed spoelen met demi-water
- residu (zandfractie) in voorgewogen alu-bakje overhevelen en drogen in stoof (105 °C)
- filtraat (slib/zoutoplossing) opvangen in bekerglas
- toevoegen van 5 ml zoutzuur (36%) en goed mengen
 - # samenvlokken slibdeeltjes (flocculatie); ter verbetering van de invang van het filter
- filtreerpapier (S&S paper circles ø 150 mm) 30 min drogen in stoof (105 °C), afkoelen in exicator (15-30 min) en afwegen (g)
- 2x filtreren met behulp van vacuümopstelling; goed spoelen met demi-water
 - # ter controle zijn een aantal filtraten nogmaals gefiltreerd maar dan met een ander filtreerpapier (S&S rundfilter ø 70 mm); hierbij is dezelfde procedure ten opzichte van het filtreerpapier in acht genomen (drogen, wegen enz.)
- drogen papier+slib in stoof (105 °C)
 - #duur ongeveer 2 uur, afkoelen in exicator (15-30 min), wegen en berekenen gewicht slibfractie (g)
- wegen zand+alu-bakje en berekenen gewicht zandfractie (g)
- bepalen slibconcentratie / zandconcentratie

APPENDIX C

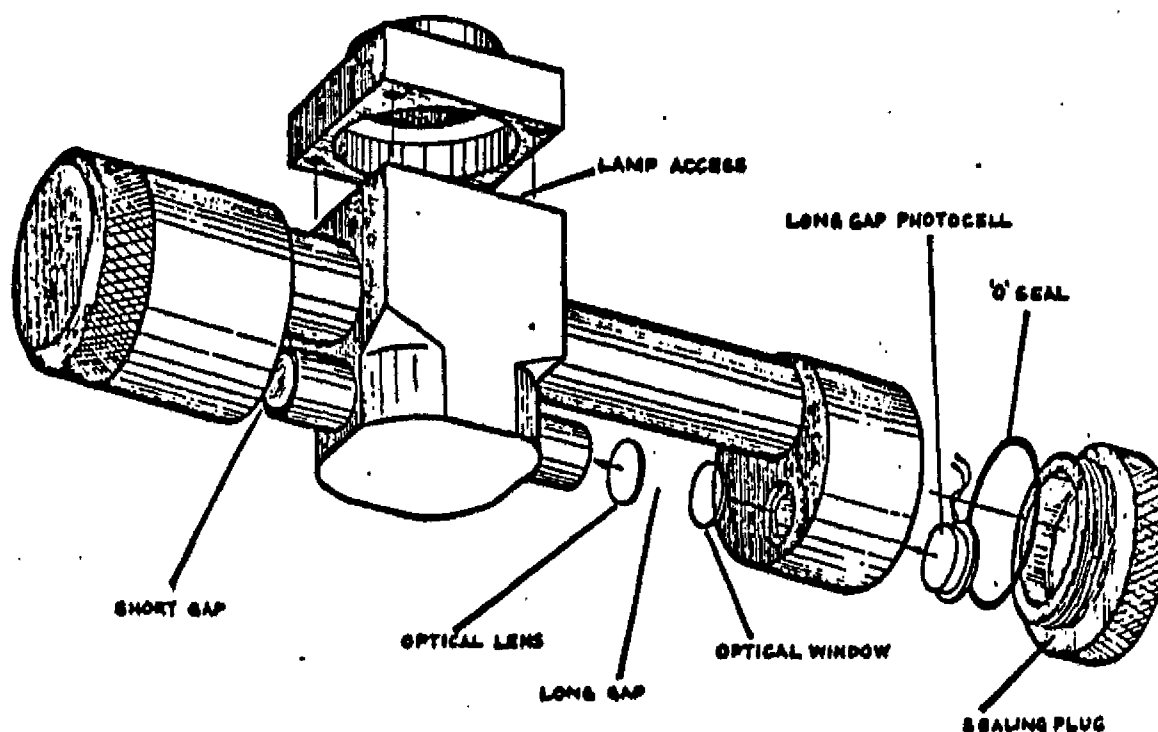
De Partech 7000 3RP Troebelheidsmeter (type S 1000)

1. Principe

De Partech troebelheidsmeter registreert volgens een optische meetmethode. De sedimentconcentratie wordt continu en contactloos gemeten volgens het transmissie meetprincipe (figuur C1). Dit impliceert dat de lichtbron en de detector in tegengestelde positie van elkaar, over een afstand l , staan opgesteld. De sedimentdeeltjes in de waterkolom reduceren de lichtintensiteit. De grootte van het detectorsignaal is een maat voor de slibconcentratie (Van Rijn, 1986).



Figuur C1. Transmissie meetprincipe bij optisch en acoustisch bemonsteren (Van Rijn, 1986).



Figuur C2. Onderdelen van de sensor van de Partech troebelheidsmeter waarbij de reductie in intensiteit over twee lichtwegen van verschillende lengte wordt gemeten (Partech electronics LTD).

De Partech 7000 3RP registreert de lichtverzwakking over twee lichtwegen van verschillende lengte (figuur C2). De wijzeruitslag is in benadering een lineaire functie van de sedimentconcentratie (Spronk et al., 1987). Spronk et al. (1987) spreken over een responstijd die minder dan één seconde bedraagt.

Het instrument kan over drie bereiken meten, hetgeen bij gebruikt type is ingesteld op respectievelijk 0 - 300 mg/l, 0 - 600 mg/l en 0 - 1200 mg/l.

De Partech troebelheidsmeter geeft een uitslag in procenten. Om deze schaal te converteren naar slibconcentraties in massa per volume eenheid zijn voor 15% van het aantal metingen met behulp van de Vlissingse fles momentaan en (zoveel mogelijk) lokaal watermonsters van één liter genomen. In het laboratorium zijn deze monsters op slibgehalte geanalyseerd.

Het is noodzakelijk dat het nemen van watermonsters lokaal geschiedt vanwege de karakteristieken en daarmee specifieke reductie van de lichtintensiteit door het sediment ter plaatse. Daarnaast is het van belang de Vlissingse fles zo dicht mogelijk bij de Partechsensor te plaatsen, zodat, op het moment dat registratie plaatsvindt, een watermonster wordt genomen met een voor dat tijdstip en die locatie representatieve slibconcentratie.

Tenslotte moet de monstername per meetperiode herhaald worden. Enerzijds vanwege het feit dat de mogelijkheid bestaat dat deeltjeseigenschappen in het water en temperatuur van het water varieert; anderzijds als gevolg van veranderingen in de electronica en/of aard van de voeding cq. batterijspanning in het instrument. Dergelijke factoren kunnen een verloop veroorzaken van de evenredigheidsfactor tussen concentratie en wijzeruitslag.

2. Gebruik van de Partech troebelheidsmeter op de Zeekat

In het kader van dit onderzoek is op de Zeekatlocatie van de Partech troebelheidsmeter gebruik gemaakt. Na een korte testperiode is de Partechdetectie uiteindelijk verwerkt voor negen meetdagen, waarvan vier een volledige eb-vloedcyclus beslaan. Vóór het begin van de meting is het noodzakelijk dat alle apparatuur tenminste drie uur (Spronk et al., 1987) op de voeding is aangesloten. Vervolgens kan de nulpuntsinstelling plaatsvinden, zowel wat betreft de wijzeruitslag als de aan het signaal aangesloten plotter. Dit geschiedt door de sensor in een sedimentloze, lichtvrije (leiding)waterbak te laten detecteren.

De Partech registreert volgens een optisch meetprincipe. Dit impliceert dat geen andere lichtstralen als die afkomstig van de bron op het instrument zelf de detector mogen bereiken. Op de Zeekatlocatie zijn hiertoe op twee manieren voorzieningen getroffen. Gedurende enkele meetdagen is op de meetvis boven het instrument een zwarte, halve cilindervormige boog bevestigd; gedurende de overige meettijd is direct rond de sensor een omhulsel aangebracht. Hierbij zijn de uiteinden vrijgelaten teneinde een goede doorstroming langs lichtbron en detector mogelijk te houden.

Bij gebruikmaking van de kap kan, onder heldere weersomstandigheden, tot enkele meters beneden het wateroppervlak lichtvervuiling en daarmee verstoring van het signaal optreden. Bij het omhulsel lijkt dit niet of nauwelijks het geval te zijn.

3. Omzetting procentuele schaal Partech naar slibconcentratie

Per meetperiode is door middel van regressieanalyse een ijklijn geconstrueerd. Aangezien elk geregistreerd partechsignaal met een dergelijke lijn naar een concentratie wordt omgezet is de mate van spreiding rond zo'n ijklijn bepalend voor de algemene nauwkeurigheid van de verkregen slibconcentratie (Van Rijn, 1986). Hierbij spelen de volgende factoren een rol:

- de mate van onevenredigheid tussen het detectorsignaal en de slibconcentratie in het water. De detectie heeft betrekking op het totaal aantal aanwezige deeltjes. Met de ijklijn vindt omzetting plaats naar de concentratie aan slibdeeltjes alleen. Lichtverzwakking door zandkorrels en organisch materiaal wordt niet verdisconteerd.
- de fout geïntroduceerd bij het nemen van de watermonsters; onder meer als gevolg van de afstand tussen de partechsensor en de Vlissingse fles en de verstreken tijd ná het vollopen en vóór het uit het water nemen van de fles. Onderzoek van het Waterloopkundig Laboratorium (1980) wijst uit dat een fles die ná vullen zich nog 15 minuten in een stroming bevindt met een concentratie van 725 ppm aan deeltjes met een mediaan van 200 μm , een concentratie heeft die 1.22 maal zo hoog ligt als die van de stroming.
- de onnauwkeurigheid van het detectorsignaal. Deze kan, vooral bij concentraties lager dan 100 mg/l, ontstaan door temperatuursvariaties en bijkomend licht (Van Rijn, 1986).
- de betrouwbaarheid van de laboratoriumanalyse, waarbij het slibgehalte van het watermonster wordt bepaald (§ 2.2.3).

4. Ijklijnen van de meetdagen op de Zeekatlocatie

Gedurende 9 meetdagen zijn voor 15% van het aantal metingen watermonsters genomen. Bij het binnen dit onderzoek aangehouden bemonsteringsprogramma komt dit neer op één monster per half uur. Deze (richt)frequentie wordt eveneens bij metingen van RWS aangehouden.

De watermonsters zijn afwisselend op de verschillende diepten genomen. De waarden van de slibconcentraties per dag vormen in alle gevallen een normale verdeling, hetgeen toepassing van regressieanalyse rechtvaardigt.

Aan de hand van deze waarden is vervolgens voor alle combinaties van successievelijke meetdagen een regressielijn geconstrueerd. Overeenkomstig de handelwijze van RWS zijn hierbij eventuele extreme waarden geëlimineerd. Concreet is dit het geval geweest met één coördinaat van de ijklijn geldig voor 9 nov en voor twee punterparen op de lijn van 17 sept en die van 3 nov.

Op grond van de correlatiecoëfficiënt en het aantal coördinaten waarop de regressielijn is gebaseerd is besloten uit hoeveel meetdagen een ijklijn op te bouwen. Deze formule heeft in zes ijklijnen geresulteerd (tabel C1). Het verschil in regressiecoëfficiënten heeft zijn oorzaak in het gebruik van meerdere sensoren, het instellen van het registratie instrument op verschillende gevoeligheden en een variatie in externe omstandigheden tussen de verschillende meetdagen.

Mede door de variabiliteit van bovengenoemde factoren is het moeilijk een indicatie te geven van het tijdsinterval waarin een ijklijn toepasbaar is. Hoewel een schatting van een week hiervoor

Tabel C1. Gegevens lineaire regressieanalyse bij constructie van ijklijnen ter omzetting van Partechwaarden (in %) naar slibconcentratie (in mg/l).

DATA WAARVOOR GELDIG	AANTAL WATERMONSTERS	REGRESSIE- COEFF. $\cdot 10^{-2}$	INTERCEPT $\cdot 10^{-2}$	CORRELATIE COEFFICIENT
2, 8 & 9 sept	30	1,75	-3,80	0,96
14 & 15 sept	24	1,48	-0,57	0,84
17 sept	22	0,58	-0,07	0,75
24 sept	24	0,64	-0,68	0,87
3 nov	21	0,43	-15,32	0,83
9 nov	21	0,38	1,69	0,83

in de orde van grootte zal liggen, blijft het aanbevelingswaardig per meetperiode frequent watermonsters te nemen.

Bij de analyse van de watermonsters is eveneens het gewicht van de fractie $> 53 \mu\text{m}$ bepaald. Met behulp van deze cijfers is een lineaire regressieanalyse uitgevoerd waarbij getoetst is in hoeverre het partechsignaal het totale gewicht aan slib en zand per volume eenheid water verklaart. Met één uitzondering blijkt dat, in vergelijking met de regressie van het partechsignaal op de slibconcentratie, er in alle gevallen een daling van de correlatie coëfficiënt optreedt.

5. Betrouwbaarheid van de geconstrueerde ijklijnen

De nauwkeurigheid van de zes ijklijnen wordt bepaald door de mate van spreiding van de coördinaten rond de lijn. Deze wordt gegeven door de (gemiddelde) afstand van de regressielijn naar de lijn die de grens van het 95%-betrouwbaarheidsinterval markeert. Tabel C2 geeft een opsomming van de deviatie van de regressielijn, zowel in absolute getallen (mg/l) als relatief in percentage van de gemiddelde slibconcentratie van de watermonsters. Wellicht ten overvloede kan hierbij gewezen worden op de samenhang tussen de relatieve nauwkeurigheid en de correlatie coëfficiënt van de ijklijn.

Tabel C2. Betrouwbaarheden van de voor de Zeekatlocatie geconstrueerde ijklijnen voor de Partech troebelheidsmeter.

DATA IJKLIJN	GEM. SLIBCONC. WATERMONSTERS (mg/l)	95%-BETROUWBAARHEIDS- INTERVAL		CORRELATIE- COEFFICIENT
		abs. (mg/l)	rel. (%)	
2, 8 & 9 sept	83	5	6	0,96
14 & 12 sept	93	10	11	0,84
17 sept	39	6	15	0,75
24 sept	90	9	10	0,87
3 nov	67	8	12	0,83
9 nov	109	12	11	0,83
gemiddeld:	80	8	11	0,85

De relatief lage betrouwbaarheid van de lijn toepasbaar op 17 sept is waarschijnlijk toe te schrijven aan de gevolgen van de extreem rustige (doodtij)stromingscondities gedurende die meetdag. Hoewel de absolute meetfout de geringste van allen is, resulteert dit in een lage relatieve nauwkeurigheid vanwege de absoluut lage concentraties van de watermonsters en het kleine meetbereik waarover de coördinaten zijn verdeeld.

Een recapitulatie kan plaatsvinden op grond van de in dit onderzoek gevolgde meet- en verwerkingsprocedure: onder normale condities in de Westerschelde kunnen ijklijnen voor de partech troebelheidsmeter geconstrueerd worden met een correlatie coëfficiënt die hoger is dan 0,8. Dit geldt onder de voorwaarde dat watermonsters worden genomen met slibconcentraties over een zo groot mogelijk bereik en dat een minimale bemonsteringsfrequentie van 15% wordt aangehouden.

APPENDIX D

Golfcondities in het bemonsteringsgebied en de invloed hiervan op de bodem

Door toepassing van golfmodellen en schatting van ter zake doende parameters kan er een indruk verkregen worden van de golfcondities die in het bemonsterde gebied voorkomen en het effect hiervan op de bodem. De strijklengten (fetches) tot aan de zuidwestelijke punt van de Brouwerplaat bij bepaalde windrichtingen staan geresumeerd in tabel D1. Bij de berekeningen zijn gebieden met bodemdiepten boven de G. L. L. W. S. (= - 2,7 m NAP (Swart, 1983)) geëlimineerd.

Groen & Dorrestein (1976) geven een diagram waarbij, gegeven de weersomstandigheden en strijklengte, de golfhoogte en -periode geschat kunnen worden. Gebruik hiervan impliceert de aanname dat de bodemdiepte nergens beperkend is voor golfontwikkeling, d.w.z. dat de bodem altijd dieper ligt dan de halve golflengte. Omdat het effect van bijvoorbeeld bodemwrijving, re- en diffractie niet wordt verdisconteerd zal het model een overschatting van de golfhoogte geven. De met het diagram verkregen resultaten staan vermeld in tabel D1.

Uit (nog) niet gepubliceerde gegevens van RWS kan ter vergelijking de hoogst geregistreeerde golfhoogte op de Zeekat locatie in nov 1987 vermeld worden. Deze is bij springtij gemeten door een waverider, die in nov 1987 is geplaatst en bedraagt 0,74 m.

Als ondergrens voor de windsnelheid die gedacht wordt golven te ontwikkelen die (een gedeelte van) de bodem nog merkbaar beïnvloeden is, enigszins arbitrair, voor 7,5 m/s (4 Beaufort) gekozen. Of bij deze condities inderdaad sprake zal zijn van (re)suspensie hangt, naast de op dat moment heersende grootte van de kritieke schuifspanning, af van de momentane en lokale waterdiepte en (getij)stromingscondities. De omstandigheden bij een windsnelheid van 15 m/s (7 Beaufort) en windrichting 200 - 220 graden (ZZW - ZW) zijn toegevoegd omdat dit de meest extreme condities waren gedurende het verloop van het onderzoek; deze daggemiddelde snelheid is gemeten op 16-10 1987 (KNMI, station Vlissingen).

Tabel D1 is bedoeld om een indruk te krijgen van de meest extreem voorkomende golfcondities en vanaf welke meteorologische omstandigheden de bodem beïnvloed kan worden. Ergo, tussen deze waarden kan uitwisseling van slib over het grensvlak plaatsvinden, waarbij condities vergelijkbaar met de benedengrens, afhankelijk van het seizoen, een hogere frequentie van voorkomen hebben.

Tabel D1. Schatting van golfparameters voor de zuidwestelijke punt van de Brouwerplaat bij bepaalde windcondities (nrs. 1 t/m 4) en de hiermee geassocieerde fetch.

	WIND			fetch (km)	hoogte (m)	GOLVEN	
	snelheid (m/s)	richting (10°)	min. duur (uur)			periode (s)	lengte (m)
1	7,5	21-22	1,75	8,7	0,55	2,4	9,0
2	15,0	21-22	1,25	8,7	1,20	3,0	14,0
3	7,5	20-21	2	11,2	0,58	2,5	9,8
4	15,0	20-21	1,5	11,2	1,30	3,2	16,0

Aan de hand van de door Airy ontwikkelde lineaire golftheorie (Komar, 1976; Groen & Dorrestein, 1976) is vervolgens een schatting gemaakt van de golfparameters die bij beschouwde omstandigheden voorkomen. Hierbij is de waterdiepte van essentieel belang. Bij gemiddelde getijomstandigheden beweegt de waterspiegel bij Hansweert tussen -2,15 m en +2,33 m NAP (Technische Scheldecommissie, 1984). Het bemonsterde gedeelte van de Brouwerplaat varieert in hoogte van -2,15 m tot 0,90 m NAP. Wordt ook hier met de gemiddelde waarde gerekend (-1,50 m NAP), dan resulteert dat in een fluctuatie in gemiddelde waterdiepte op de plaat over een normale getijcyclus van 0 tot 3,85 m.

De grootste waterdiepte, dus die bij hoogwaterkentering, is aangehouden bij de doorberekening naar de horizontale orbitale snelheid aan de bodem (tabel D2). De expressie voor berekening hiervan wordt meer of minder eenvoudig afhankelijk van de ratio tussen de waterdiepte en golflengte. Airy heeft voor de grootte van de horizontale orbitale snelheid de volgende vergelijkingen opgesteld (Komar, 1976):

$$\text{algemene expressie: } u = \frac{\pi H \cos[k(z + h)]}{T \sinh(kh)} * \cos(kx - \sigma t)$$

$$\text{diep water}(h/L > 0,25): u = \frac{\pi H}{T} * \exp(kz) * \cos(kx - \sigma t)$$

$$\text{ondiep w. } (h/L < 0,05): u = \frac{H}{2} * \sqrt{g/h} * \cos(kx - \sigma t)$$

waarbij:

u = horizontale orbitale snelheid
 H = golfhoogte
 T = golfperiode
 L = golflengte
 h = waterdiepte
 $k = 2\pi/L$
 $\sigma = 2\pi/T$
 z = diepte in de waterkolom
 x = afstand in de horizontale richting
 t = tijd
 g = gravitatieversnelling

De waarde van de horizontale orbitale snelheid moet geïnterpreteerd worden als de minimale schatting van deze snelheid en daarmee van de schuifspanning aan de bodem voor een eb-vloedcyclus tijdens de periode dat de plaat onder water staat. Dit geldt voor gemiddelde getijomstandigheden. Het is de waarde bij hoogwaterkentering en er geldt: hoe dieper onder het wateroppervlak, hoe groter de uitdamping van de orbitaal.

In tabel D2 is tevens voor zowel het hoogste als het laagste punt op de plaat een analoog aan bovenbeschreven berekening uitgevoerd.

Tabel D2. Schatting van de horizontale orbitaalsnelheid aan de bodem bij de in tabel D1 genoemde meteorologische condities (nrs. 1 t/m 4) tijdens de hoogwaterkentering onder normale getijomstandigheden op

- A. gemiddelde hoogte op de plaat (waterdiepte D = 3,85 m)
 B. hoogste punt op de plaat (waterdiepte D = 1,43 m)
 C. laagste punt op de plaat (waterdiepte D = 4,48 m)

METEOROLOGISCHE CONDITIE (tab. D1)	HORIZONTALE ORBITALE SNELHEID (m/s)		
	D = 3,85 m	D = 1,43 m	D = 4,48 m
1	0,05	0,60	0,03
2	0,22	1,79	0,17
3	0,06	0,71	0,04
4	0,28	2,10	0,22

Bovenstaande is geldig wanneer bij de gegenereerde golven niet vóór het bereiken van de plaat reeds breking heeft plaatsgevonden. De diepte D_b waarbij beschouwde golven breken kan in orde van grootte worden berekend met behulp van semi-empirische formules. Groen & Dorrestein (1976) geven een voor praktisch gebruik ontworpen diagram waarmee bij een gegeven waarde van golfhoogte en -periode de brekerhoogte H_b wordt geleverd. De diepte waarbij de golven breken staat in vaste verhouding tot de brekerhoogte. Deze verhouding kan theoretisch bepaald worden, maar is daarnaast aan de hand van veel waarnemingen in de natuur en proeven in laboratoria getoetst. Op grond hiervan kan met een afwijking van 0,2 gesteld worden dat:

$$D_b = 1,2 * H_b$$

Aldus zijn voor de voorbeeldsituaties de brekerdiepten benaderd (tabel D3).

Tabel D3. Relevante golfparameters ter schatting van brekerhoogte en -diepte en de resultaten hiervan.

INITIELE GOLFCONDITIONS				CONDITIE BIJ GOLFBREKING	
hoogte H (m)	periode T (s)	lengte L (m)	steilheid s (-)	brekerhoogte H_b (m)	brekerdiepte D_b
0,55	2,4	9,0	0,06	0,5	0,6
1,20	3,0	14,0	0,09	1,1	1,3
0,58	2,5	9,8	0,06	0,5	0,6
1,30	3,2	16,0	0,08	1,2	1,4

Uit de resultaten blijkt dat niet in alle gevallen de berekende orbitale snelheden zoals gegeven in tabel D2 zullen optreden vanwege het feit dat de golf reeds gebroken zal zijn. Het is van belang dat deze mogelijkheid terdege in ogenschouw wordt genomen.

De resulterende cijfers geven niet meer dan een indicatie, omdat voorkomende brekerhoogten en -diepten kunnen afwijken van de berekende waarden als gevolg van verschillende verstoringen

invloeden. Als zodanig kunnen werkzaam zijn (Groen & Dorrestein, 1976):

- stromingen
- wind
- plotselinge veranderingen (in de helling) van de onderwaterbodem

Het feit dat toegepaste golfmodellen een overschatting van de golfhoogte geven is reeds vermeld. Daarnaast is het ter relativering noodzakelijk dat gewezen wordt op het feit dat variabelen buiten beschouwing zijn gelaten (zoals de invloed van getijstrooming), dat voor elke locatie een specifieke waterdiepte en kritieke schuifspanning geldt, die temporeel variabel is, dat niet aan alle voorwaarden van de lineaire golftheorie is voldaan en dat de (dynamiek in de) weerstandskrachten niet in het verhaal naar voren zijn gekomen.