



Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ (voorheen Dienst Getijdewateren)

Aan
belanghebbenden (zie lijst)

Contactpersoon	Doorkiesnummer
C. Storm	280
Datum	Bijlage(n)
8 juli 1994	1
Ons kenmerk	Uw kenmerk
RIKZ/OS-94.60079	
Project	
Oostwest	
Onderwerp	
Aanbieding Rapport Nauwkeurigheid Zandbalans Westerschelde (RIKZ-94.008)	

Bijgaand treft U aan het rapport "Nauwkeurigheid zandbalans Westerschelde en aanbevelingen ter optimalisatie" van C. Storm, P. Bollebakker, J. de Jong en G. Mol. Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van het project Oostwest.

Morfologische informatie is van groot belang voor de beheerder van de Westerschelde om te kunnen beslissen over het toekomstig beleid. Een zandbalans is één van de belangrijkste instrumenten om deze informatie te verkrijgen. Met een zandbalans kunnen grootschalige ontwikkelingen in de morfologie worden gereconstrueerd en gevolgd. Daarbij geeft een zandbalans inzicht in het feit of ontwikkelingen een natuurlijke oorzaak hebben dan wel het gevolg zijn van ingrepen zoals vaargeulverdieping, onderhoudsbaggerwerk en/of zandwinning. Om de morfologische informatie welke met de zandbalans wordt verkregen naar waarde te kunnen gebruiken, is inzicht in de nauwkeurigheid van de balans essentieel.

De nauwkeurigheid van de zandbalans wordt bepaald door stochastische en systematische fouten in de peiling, de interpolatie van de lodingdata, de inhoudsberekening en de bagger-, stort- en zandwinvolumina. Nagegaan is hoe deze fouten doorwerken in de nauwkeurigheid van de zandbalans. Uit de analyse blijkt dat met name menselijke fouten leiden tot grote afwijkingen in de verschilberekeningen en dus in de zandbalansen. Daarnaast is ook de inzinking van het schip verantwoordelijk voor grote onnauwkeurigheden. Verder is gebleken dat het tot op heden gehanteerde uitleveringspercentage voor bagger- en stortvolumina vermoedelijk te

Vestiging Middelburg
Postbus 8039, 4330 EA Middelburg
Bezoekadres Grenadierweg 31

Telefoon 01180-72200
Telefax 01180-16500



groot is en dat voor de inhoudsberekeningen de dichtheid van meetraaien in het oostelijk deel van de Westerschelde onnodig hoog is. De raai-dichtheid kan van 100m tot 200m worden vergroot, zonder verlies in nauwkeurigheid van de zandbalansen.

Op basis van de resultaten van de foutenanalyse wordt aanbevolen :

- nog nadrukkelijker te controleren op menselijke fouten door dwarsraaien te meten ("cross-check lines"); het resultaat van deze controle namelijk een standaarddeviatie van de verschillen op de snijpunten is een maat voor de nauwkeurigheid van de vaklo-ding;
- de opname-methodiek zodanig aan te passen dat gecorrigeerd kan worden voor de inzinking van het schip (squat);
- na te gaan of het gehanteerde uitleveringspercentage van 20% voor de bagger- en stortvolumina wel correct is. Een percentage van 10% lijkt realistischer, omdat dan ook rekening wordt gehouden met de relatief losse pakking van het sediment "in situ".
- fouten op te sporen aan de hand van trendafwijkingen in het verloop van de inhoud van een vak over lange periode. Om deze trends voldoende nauwkeurig te kunnen vaststellen dient per jaar een zandbalans te worden opgesteld.

Het RIKZ en de Directie Zeeland zijn binnen het project Oostwest reeds gestart met het frequenter berekenen van de zandbalansen. Gedigitali-seerde lodingskaarten worden met het DIGIBEELD systeem verwerkt tot bodemschematisaties in de vorm van rasterkaarten. Vervolgens worden in het GIS de inhoudsgegevens gecombineerd met de bagger- en stortgegevens. Inmiddels zijn balansen vanaf 1950 beschikbaar. Aan de hand hiervan zal in de komende maanden worden gewerkt aan vragen zoals "hoe heeft het systeem gereageerd op de inpolderingen en de vaargeulverdieping?" en "hoe is de functiewisseling verlopen tussen het Zuidergat en het nevengeulengebied van Valkenisse en tussen het Middelgat en de Overloop van Hansweert?".

Hoogachtend,
De Hoofdingenieur-directeur,
namens deze,
projectleider Oostwest

Ir. J. Vroon



Verzendlijst:

RWS DGW/ RIKZ:

Bibliotheek (3x)

Bijlsma

Heuvel, van der

Langerak

Maldegem, van

Male, van der

Mulder, H.

Mulder, J.

Pieters

Smit

Steyaart

RWS Directie Zeeland:

Bibliotheek

Dam, van

Dienstkring Westerschelde

Dijke, van (Meetdienst Zeeland)

Kleef, van

Meulblok

Turkstra

RUU (Vakgroep Fysische Geografie):

Berg, van de

Jeuken

Uit den Bogaard

Huijs

Antwerpse Zeehavendiensten:

Claessens



Nauwkeurigheid zandbalans
Westerschelde 1965-1990 en
aanbevelingen ter optimalisatie

Rapport RIKZ-94.008

Februari 1993

Project Oostwest

C. Storm
P. Bollebakker
J. de Jong
G. Mol

Inhoudsopgave

Lijst van Figuren	5
Lijst van Tabellen	5
Lijst van Bijlagen	5
Begrippenlijst	6
Samenvatting	7
0. Voorwoord	9
1. Inleiding	11
2. Berekening zandbalans	13
3. Nauwkeurigheden	15
3.1 Peiling	15
3.2 Interpolatie	16
3.3 Inhoudsberekening	21
3.4 Bagger-, stort- en zandwinvolumina	21
3.5 Zandbalans	22
4. Optimalisatie	25
4.1 Peiling	25
4.2 Interpolatie en inhoudsberekening	26
4.3 Bagger-, stort- en zandwinvolumina	26
4.4 Zandbalans	27
5. Conclusies	29
6. Referenties	31

Lijst van Figuren

- Figuur 1. De berekening van een Zandbalans.
 Figuur 2. De zandbalans Westerschelde onderverdeeld in 3 vakken; periode 1970-1990 [16].
 Figuur 3. Het principe van een peiling [naar 18].
 Figuur 4. De procentuele afwijking in de inhoud van de "nieuwe" bodem, met een stochastische fout van 0,23 m (2σ) ten opzichte van de referentie bodem ('92 nominaal) voor het proefgebied (Fig. 5) [3].
 Figuur 5. De ligging van het proefgebied (Vak IV volgens de Looft) in het oostelijk deel van de Westerschelde (schaal ca. 1:65.000).
 Figuur 6. De vervlakking van een geulprofiel door interpolatie; de inhoud wordt overschat op de convexe geulhellingen (+) en onderschat op de concave geulhellingen (-) [7].
 Figuur 7. De invloed van de pixelgrootte op de inhoudsberekening van het proefgebied (Fig. 5); 100*100 m en 200*200 m ten opzichte van 20*20 m; a) 1990 en b) 1992 [2].
 Figuur 8. Het inhoudsverschil voor het proefgebied (Fig 5.) tussen ZB en de methode DIGIBEELD bij pixels 20*20 m, 100*100 m en 200*200 m; situatie 1990 [2].
 Figuur 9. De relatieve (a t/m c) en absolute (d t/m f) inhoudsverschillen van het proefgebied (Fig. 5) bij pixels van 20*20 m (a en d), 100*100 m (b en e) en 200*200 m (c en f); situatie 1992 [2].

Lijst van Tabellen

- Tabel 1. Gemiddelde stochastische en systematische dieptefout voor verschillende morfologische eenheden (1σ) [21].
 Tabel 2. Stochastische en systematische fouten in de zandwinning en het baggeren ten behoeve van de vaargeul [5].
 Tabel 3. Foutentabel zandbalans.
 Tabel 4. Overzicht van stochastische en systematische fouten bij dieptelodingen (Nanninga [13]; Jonkers [9]).
 Tabel 5. De stochastische en systematische fouten in volumina voor de huidige situatie van de Westerschelde.

Lijst van Bijlagen

- Bijlage 1. Klassieke- versus morfologische zandbalans
 Bijlage 2. Nauwkeurigheden lodingen Westerschelde uitgesplitst per onderdeel

Begrippenlijst

bandbreedte	het interval tussen de minimale- en maximale waarde
betrouwbaarheidsinterval	het interval waarbinnen een bepaald percentage van de (meet)waarden voorkomt; deze is gerelateerd aan de standaarddeviatie (σ): 1σ 67%; 2σ 95% en 3σ 99%
beunvolumina	de volumina in het ruim (beun) van een baggerschip
bodemschematisatie	een geschematiseerde weergave van een bodem, meestal in de vorm van pixels (zie ook pixel)
DGPS	Differential Global Positioning System; plaatsbepaling mbv satellieten
DIGIBEELD	Digitale Beeldverwerking; een verwerkingssysteem voor dieptegegevens
DTM	Digitaal Terrein Model (<i>zie bodemschematisatie</i>)
dwarsraai	een transect over een geul of plaat die ongeveer loodrecht staat op de dieptelijnen
(meet)fout	de afwijking tussen het meetresultaat en de juiste waarde
GIS	Geografisch Informatie Systeem
inhoudsberekening	de berekening van de waterinhoud van een vak of gebied, beneden een bepaald niveau
kubering	<i>zie inhoudsberekening</i>
loding	een opname van de waterdiepte met behulp van een echolood
nauwkeurigheid	de mate waarin de (meet)waarden overeenstemmen met de juiste waarde; meestal gekwantificeerd door een standaarddeviatie of bandbreedte
peiling	<i>zie loding</i>
pixel	het kleinste element van een "beeld" dat afzonderlijk kan worden geadresseerd (hier een gemiddelde diepte tov NAP)
lodingsraai	een transect waarover een dieptemeting wordt uitgevoerd
squat	de inzinking van een schip welke afhankelijk is van de vaarsnelheid en de waterdiepte
stochastische fout	een volledig willekeurige of toevallige fout
systematische fout	een fout of afwijking consequent in één richting
uitlevering	het verschil tussen het gemeten volume in het beun van het baggerschip en het oorspronkelijke volume in de bodem ("in situ"); in de Westerschelde wordt al enkele decennia gerekend met een uitleveringspercentage van 20%
vakloding	een volledige loding van een kaartblad; de Westerschelde is onderverdeeld in 6 kaartbladen, 1 tot en met 6 van oost naar west
variabele systematische fout	(<i>hier gedefinieerd als</i>) een fout die optreedt in de dieptegegevens van een bepaalde dag of van een bepaald schip over meerdere dagen; de fout is variabel omdat zowel de grootte als de richting kan variëren en systematisch omdat deze vaak een groot gebied beslaat
zandbalans	"de zandboekhouding" van een estuarium of een deelgebied hiervan; de resultante van inhoudsverschillen, bagger-, stort- en zandwinvolumina binnen een estuarium of deelgebied
zandwinning	het onttrekken van zand aan het watersysteem
zuiger	een bagger- of zandwinschip

Samenvatting

Grootschalige ontwikkelingen in de morfologie kunnen aan de hand van opeenvolgende zandbalansen worden bepaald. Dit kunnen natuurlijke ontwikkelingen zijn, maar ook reacties van het systeem op ingrepen zoals bijvoorbeeld een vaargeulverdieping, het baggeren en storten en de zandwinning. Deze morfologische informatie is derhalve van groot belang voor het beheer van een estuarium. Daarom is het, zowel voor de onderzoeker als voor de beheerder, evident om a) te weten hoe nauwkeurig de zandbalansen zijn en b) te zoeken naar mogelijkheden om de berekeningsmethodiek nog verder te optimaliseren.

De nauwkeurigheid van een zandbalans wordt bepaald door fouten in de peiling, de interpolatie, de inhoudsberekening en de bagger-, stort en zandwinvolumina. Het rapport toont aan dat de *stochastische fout* niet relevant is voor de nauwkeurigheid van de inhoudsberekeningen, omdat deze geheel wordt uitgemiddeld. Ook sommige *systematische fouten* vallen bij de verschilberekening grotendeels weg. Echter een aantal systematische fouten, hier aangeduid als *variabele systematische fouten*, zijn geheel willekeurig, zowel in grootte als in richting. Deze, vaak menselijke fouten, kunnen leiden tot grote afwijkingen in de verschilberekeningen en dus ook de zandbalansen. Als de Westerschelde in zijn geheel wordt beschouwd dan moet rekening worden gehouden met een fout in de orde van enkele cm's. Naarmate de vakken waarover een zandbalans wordt berekend kleiner worden, neemt de onnauwkeurigheid toe. Uit onze analyse blijkt dat fouten in de orde van enkele dm's kunnen voorkomen!

Door een ver doorgevoerde systematiek in de lodingen zal de kans om "variabele systematische fouten" te maken worden verkleind. Een vast raaienstelsel en een frequente calibratie behoren reeds geruime tijd tot de meetpraktijk van de Meetdienst Zeeland. Voorts wordt aanbevolen om:

- a) de lodingsdata grondig te controle zowel tijdens als na de verwerking om zodoende systematische fouten in een vroeg stadium op te kunnen sporen,
- b) extra dwarsraaien op te meten ("cross-check lines") als extra controle en ook om een kwaliteitsmerk aan een kaart of vakloding te kunnen toekennen, en
- c) de opname-methodiek zodanig aan te passen dat gecorrigeerd kan worden voor de inzinking van het schip (squat).

Uit het onderzoek zijn verder nog de volgende punten naar voren gekomen:

- 1) De optimale pixelgrootte voor interpolaties van vaklodingen met behulp van DIGIBEELD ligt ergens tussen de 20x20 m en 100x100 m.
- 2) Bij het maken van verschilberekeringen dienen gebieden met dezelfde omvang te worden genomen, waarbij de dieptematrix voor 100% is gevuld. Elke afwijking in gebiedsgrootte introduceert direct een inhoudsfout. Dit aspect geldt in het bijzonder voor het intergetijdegebied boven NAP -1m, waarvan vaak hoogtegegevens ontbreken.
- 3) Bij het invoeren van een nieuwe methodiek voor de inhoudsberekeningen moeten de reeds eerder uitgevoerde berekeningen opnieuw worden uitgevoerd volgens de nieuwe methodiek.
- 4) Er wordt aanbevolen de hoge raaidichtheid in het oostelijk deel van de Westerschelde kritisch te evalueren. Er zijn goede aanwijzingen dat de raaiafstand kan worden teruggebracht tot 200 meter, zonder verlies van de nauwkeurigheid van de inhoudsberekeningen.
- 5) Tot nu toe is ten aanzien van bagger- en stortvolumina een uitlevering van 20% gehanteerd.

Een uitlevering van 10% lijkt echter realistischer, omdat dan ook rekening gehouden wordt met de relatief losse pakking van het sediment "in situ". Nader onderzoek is gewenst.

Geconcludeerd wordt dat een jaarlijkse tot twee-jaarlijkse berekening de nauwkeurigheid van een zandbalans kan vergroten. De berekening wordt dan minder afhankelijk van willekeurige fouten tussen twee jaren omdat gekeken wordt naar trends over meerdere jaren. Bij de invoering van deze methode dient rekening gehouden te worden met een aantal aspecten: a) de tijdsverschillen in opeenvolgende peilingen van hetzelfde gebied, b) de tijdsverschillen tussen gebieden onderling in hetzelfde jaar, c) de duur van de opname van een vaklodging en d) grote speciëstortingen uit havens.

0. Voorwoord

Dit rapport is een produkt van de Werkgroep ZAND, van het project Oostwest. Het project Oostwest is een samenwerkingsverband tussen het Rijksinstituut voor Kust en Zee /RIKZ (voorheen de Dienst Getijdewateren) en de Directie Zeeland (beide Rijkswaterstaat) en het Instituut voor Natuurbeheer te Hasselt (België). De doelstellingen van het project OOSTWEST zijn [17]:

- * het (doen) genereren en operationaliseren van de noodzakelijke kennis om de invloed van menselijke ingrepen op het basisfunctioneren van het fysische systeem van het Schelde- estuarium te kunnen bepalen;
- * het ontwikkelen en operationaliseren van een instrumentarium om effecten van beheersmaatregelen te kunnen voorspellen, te monitoren en te analyseren;
- * het adviseren inzake beheersmaatregelen en ingrepen;
- * en het ontwikkelen van alternatieven voor de ontwikkelingsmogelijkheden van het estuarium op lange termijn

Aan de Werkgroep ZAND is onder meer gevraagd om de nauwkeurigheid van de zandbalans onder de loep te nemen [17; 20]. In het project Oostwest zijn zandbalansen onder meer gebruikt om langs empirische weg de invloed van het baggeren en storten op het natuurlijk systeem in te schatten. Nu het project in een fase is beland, waarin nauwkeurige voorspellingen van groot belang zijn, diende zich de noodzaak aan de nauwkeurigheid van de zandbalansen te analyseren en mogelijkheden aan te geven voor een verdere optimalisatie.

Aan de basis van dit rapport liggen een aantal werkdocumenten, die kunnen worden opgevraagd bij het RIKZ te Middelburg.

Dick van Dam (Directie Zeeland) heeft met het werkdocument over de nauwkeurigheden van het baggeren, storten en de zandwinning, een belangrijke bijdrage aan dit rapport geleverd. Leden van de Werkgroep ZAND en van de projectgroep OOSTWEST worden bedankt voor hun kritische commentaren op de tekst. Ook worden Jan van Dijke en Chris Scheers van de Meetdienst Zeeland (Directie Zeeland) bedankt voor hun medewerking en opbouwende suggesties bij de start van het onderzoek.

1. Inleiding

algemeen

Grootschalige ontwikkelingen in de morfologie kunnen aan de hand van opeenvolgende zandbalansen worden bepaald. Dit kunnen natuurlijke ontwikkelingen zijn, maar ook reacties van het systeem op ingrepen zoals bijvoorbeeld een vaargeulverdieping, het baggeren en storten en de zandwinning (Pieters et.al., 1991 [15]; Pieters, 1993 [16]). Deze morfologische informatie is derhalve van groot belang voor het beheer van een estuarium. Daarom is het, zowel voor de onderzoeker als voor de beheerder, evident om a) te weten hoe nauwkeurig de zandbalansen zijn en b) te zoeken naar mogelijkheden om de berekeningsmethodiek nog verder te optimaliseren.

Lodingsgegevens staan aan de basis van de zandbalansen. Deze lodingen, ook wel aangeduid als peilingen, worden verwerkt tot vaklodingen. Op hun beurt vormen de vaklodingen weer de basis voor de inhoudsberekeningen, ofwel kuberingen. Samen met de bagger-, stort- en zandwinvolumina levert deze kubering uiteindelijk het gegeven van de zandbalans, "de sedimentboekhouding" van een estuarium of een deelgebied hiervan.

probleemstelling

Zowel voor de onderzoeker als de beheerder is het van belang te weten hoe nauwkeurig de zandbalansen zijn. De nauwkeurigheid van een zandbalans wordt bepaald door de nauwkeurigheden van alle stappen die nodig zijn om de zandbalans te berekenen. In elke stap worden namelijk fouten gegenereerd. Dit kunnen meetfouten zijn, bijvoorbeeld veroorzaakt door beperkingen van de apparatuur, moeilijke of variabele omstandigheden of fouten in de calibratie. Ook kunnen menselijke fouten bij de verwerking van de dieptegegevens een grote rol spelen.

doelstelling

Vanuit deze probleemstelling zijn de doelstellingen van het onderzoek als volgt geformuleerd:

- * een analyse van de nauwkeurigheid van de zandbalansen zoals deze over de periode 1965 tot en met 1990 zijn berekend
- * het doen van aanbevelingen om de berekeningsmethodiek van de zandbalans te optimaliseren, hetgeen in dit geval betekent dat op een pragmatische wijze gestreefd wordt naar maximaal haalbare nauwkeurigheid

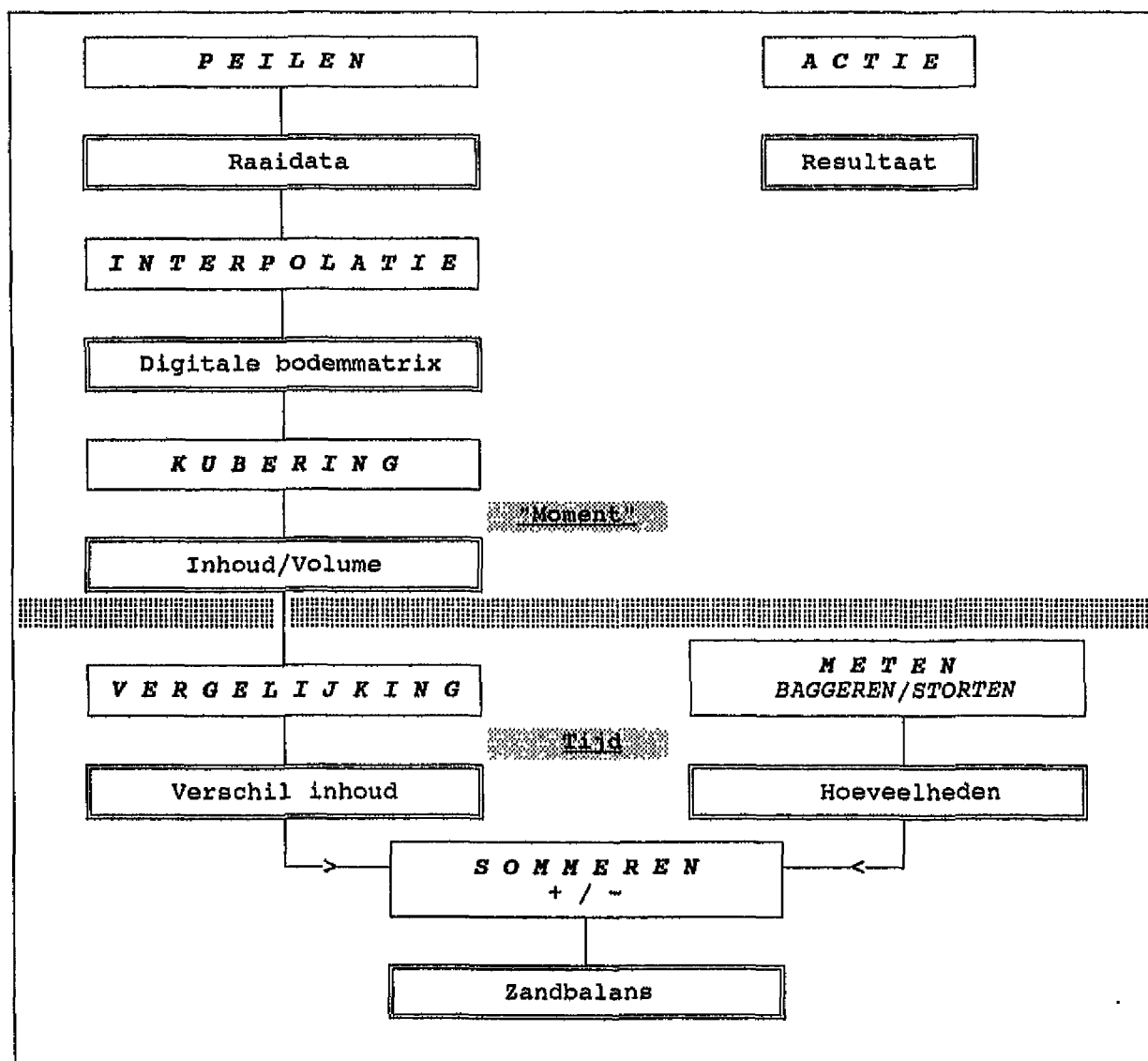
aanpak

De berekeningsmethodiek van de zandbalans Westerschelde wordt in hoofdstuk 2 besproken. Vervolgens wordt per fase beschreven hoe deze bijdraagt tot de totale onnauwkeurigheid van de zandbalans. Wat betreft de nauwkeurigheid van de lodingen is voornamelijk teruggevallen op bestaande literatuur. Het onderdeel van de interpolaties en de kuberingen is gebaseerd op eigen onderzoek, en voor het baggeren, storten en de zandwinning is uitgegaan van een "best professional judgement" (hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op mogelijkheden om de zandbalansen te optimaliseren. Een belangrijke aanbeveling, namelijk het opvoeren van de frequentie van de berekening, van vijf jaarlijks naar jaarlijks, wordt nader toegelicht in paragraaf 4.4. De conclusies en aanbevelingen worden verwoord in hoofdstuk 5.

2. Berekening zandbalans

De basisgegevens van een zandbalans zijn de peilingen, ook wel lodingen genoemd, welke in raaien worden opgenomen. Deze raai-informatie wordt geïnterpoleerd tot een bodemschematisatie, in de vorm van een raster bestaande uit gridcellen ofwel pixels. Het resultaat is een zogenaamde "Digitale matrix", die ook wel wordt aangeduid als een Digitaal Terrein Model (DTM). Vervolgens wordt aan de hand van zo'n DTM de inhoud berekend ten opzichte van een referentieniveau (meestal NAP). Het resultaat representeert de inhoud van een gebied op een bepaald "moment" (Fig. 1).

Tot het einde van de tachtiger jaren zijn de interpolaties voornamelijk handmatig uitgevoerd. Sinds de ingebruikname van het "geulwerkstation DIGIBEELD", in het begin van de negentiger jaren, worden



Figuur 1. De berekening van een Zandbalans.

de vaklodingen geheel automatisch geïnterpoleerd. Het grote voordeel van deze methodiek is dat nu relatief snel en geheel mensonafhankelijk een DTM kan worden aangemaakt.

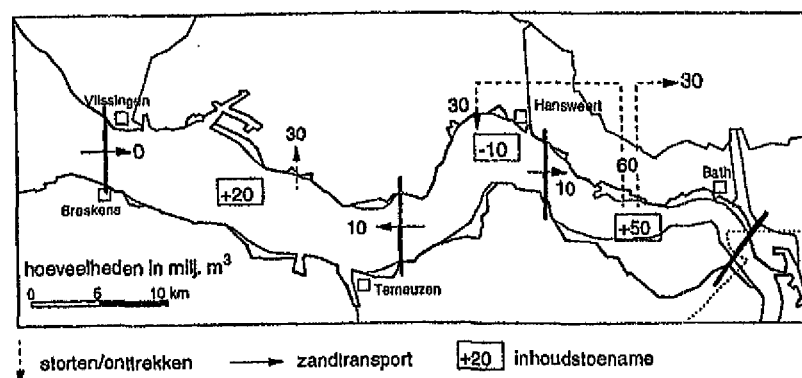
Men krijgt een indruk van de veranderingen in de tijd ("tijd"-aspect) door het verschil te nemen tussen twee "moment"-opnames. Hiermee wordt vastgesteld waar binnen een vak, over de betreffende periode, sprake is van erosie (verdieping) of van sedimentatie (verondieping). Het inhoudsverschil is in de Westerschelde zowel resultaat van natuurlijke- als kunstmatige (menselijke) factoren. Per vak en per periode wordt gekeken hoeveel sediment er netto is op kunstmatige wijze is onttrokken of gestort, ten gevolge van de zandwinning, het baggeren of het storten. Vervolgens wordt het "natuurlijk transport" van of naar een vak worden berekend door het verschil te nemen tussen de inhoudsverandering en het verschil tussen het storten en onttrekken.

Er dient aan minimaal één zijde van het gebied een randvoorwaarde te worden opgelegd ten aanzien van het netto zandtransport. Voor de zandbalans van de Westerschelde is tot nu toe aangenomen dat er geen netto zandtransport plaatsvond over de Belgisch-Nederlandse grens.

Elke actie zoals weergegeven in Fig. 1, beïnvloedt de nauwkeurigheid van het eindresultaat, de zandbalans van een vak. In het volgende hoofdstuk zal stap voor stap de nauwkeurigheid beschouwd worden van elke actie en zal, voor zover mogelijk, de invloed ervan voor het uiteindelijke resultaat worden aangegeven.

In principe zou hier gesproken moeten worden over "sedimentbalansen" in plaats van "zandbalansen", omdat geen onderscheid wordt gemaakt tussen zand of slib (fractie groter, respectievelijk kleiner dan 63 micron). Echter, omdat de volumeveranderingen in de Westerschelde voor meer dan 95% door zand worden veroorzaakt, lijkt het ons opportuun de term "zandbalans" te handhaven.

De hier beschreven methodiek is toegespitst op de zandbalansberekening zoals deze tot nu toe voor de Westerschelde is gehanteerd [1; 4; 15; 16]. Een voorbeeld van zo'n berekening, waarin de Westerschelde in 3 vakken is verdeeld wordt gepresenteerd in Fig 2. Een zandbalans waarbij eveneens rekening wordt gehouden met andere componenten, zoals relatieve zeespiegelstijging, de sedimentatie op schorren, een meer onderbouwde schatting van de uitwisseling met België, wordt hier een "morfologische zandbalans" genoemd (zie ook Bijlage 1). Deze extra componenten zullen uiteraard de nauwkeurigheid van de zandbalans beïnvloeden. De "morfologische zandbalans" wordt in de Westerschelde nog niet toegepast en zal derhalve in dit rapport niet worden behandeld.

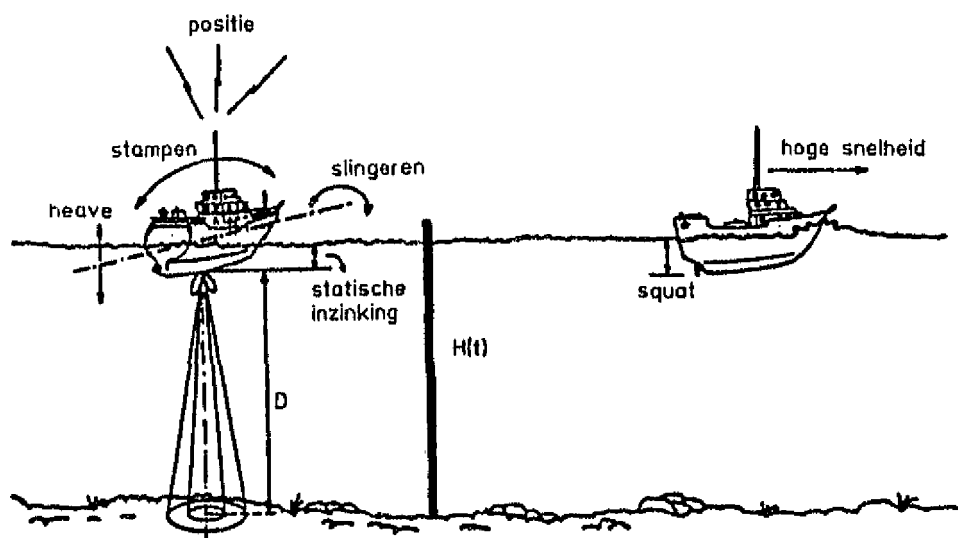


Figuur 2. De zandbalans Westerschelde onderverdeeld in 3 vakken; periode 1970-1990 [16].

3. Nauwkeurigheden

3.1 Peiling

Ondanks een correcte bediening van het peilsysteem, en met name het op een juiste en correcte wijze kalibreren van de sensoren, zullen de uiteindelijke X,Y,Z-waarden van de uitgevoerde peiling, nog een fout vertonen. Deze fout kan worden opgesplitst in een systematisch fout en een stochastisch fout [13]. Een stochastische fout is een fout die volkomen willekeurig ofwel "random" is. Deze fout kan zowel negatief als positief zijn. Wij veronderstellen dat de stochastische fout "normaal" is verdeeld (Gauss verdeling). Een systematische fout is een fout die altijd in dezelfde richting wijst; deze is of positief of negatief.



Figuur 3. Het principe van een peiling [naar 18].

Nanninga [13] heeft een vrij volledig overzicht gegeven in welke mate verschillende factoren bijdragen aan de totale lodingsfout, de afwijking van de diepte op de kaart ten opzichte van de werkelijke diepte (Fig. 3). Een stochastische fout in een dieptebeoordeling (Z-fout) wordt veroorzaakt door een aantal componenten, zoals een fout in de plaatsbepaling (positie), het echolood (D), de omrekening van de waterstand naar NAP (via getijstations $H(t)$), de bewegingen van het schip (heave, stampen en slingeren) en afrondingsfouten. De systematische fout is een gevolg van 1) de inzinking van het schip (squat) en 2) het te "ondiep" peilen van geulhellingen als gevolg van de breedte van de echoloodbundel.

Deze stochastische en systematische fouten variëren al naar gelang de morfologische eenheid. In Tabel 1 zijn de gemiddelde fouten weergegeven voor intergetijdegebieden (boven GLW), geulbodems (vlakke gebieden) en geulhellingen (voor 1σ). Deze zijn door Storm [21] afgeleid uit Nanninga [13] en Jonkers [9] (zie ook Bijlage 2).

Tabel 1. *Gemiddelde stochastische en systematische dieptefout voor verschillende morfologische eenheden (1 σ) [21].*

	Stochastische fout (m)	Systematische fout (m)
intergetijdegebied	± 0.23	- 0.20
geulbodems/vlakke gebieden	± 0.19	- 0.10
geulhellingen	± 0.39	- 0.25

De grootste stochastische en systematische lodingsfouten treden op bij plaat-geulhellingen. Voor de geul- en intergetijdegebieden is de stochastische fout vrijwel gelijk. De intergetijdegebieden worden door de grotere squat systematisch 0,1 m dieper gepeild dan de resterende eenheden. Voor de Voordelta gelden ongeveer dezelfde stochastische fouten als in de Westerschelde.

Wanneer bij de bediening of de calibratie van de sensoren een menselijke fout wordt gemaakt, zal dit altijd een systematische fout zijn. Deze fout zal bijvoorbeeld optreden in de peiling van een bepaalde dag of van een bepaald schip over meerdere dagen. Hetzelfde geldt voor de verwerking van de ruwe meetgegevens tot de definitieve X,Y,Z-waarden. Een foutief ingevoerde waarde van een waterstand voor een bepaalde meetpaal zal een fout introduceren in de omrekening naar NAP. Dit zal een fout veroorzaken voor het gehele gepeilde gebied rondom die meetpaal.

In dit rapport worden dit soort fouten verder aangeduid als "variabele systematische fouten". Variabel omdat ze zowel in grootte als richting sterk variëren; systematisch omdat ze vaak een groot gebied beslaan. De grootte van deze, meestal menselijke, "variabele systematische fouten" kan achteraf niet meer worden achterhaald.

In sommige gevallen zijn die fouten zo groot dat deze van normale ontwikkelingen kunnen worden onderscheiden. Van den Berg et.al [1] concludeert op grond van de reeksen dat het vak bij Vlissingen in 1975 te ondiep is gepeild en dat enkele vakken in het oostelijk deel van de Westerschelde in 1980 te diep ("te nat") zijn gepeild. Uit de langjarige trend is af te leiden dat er een fout van ca. 15 miljoen m³ over 50 km² is gemaakt. Dit komt overeen met een gemiddeld systematisch te diepe peiling in de orde van 0,3 m! [21]. Jonkers [9] heeft de gehele loding van 1987 van de Oosterschelde ter discussie gesteld, op grond van tegenstrijdige waarnemingen ten opzichte van de lodingen van 1983 en 1989.

3.2 Interpolatie

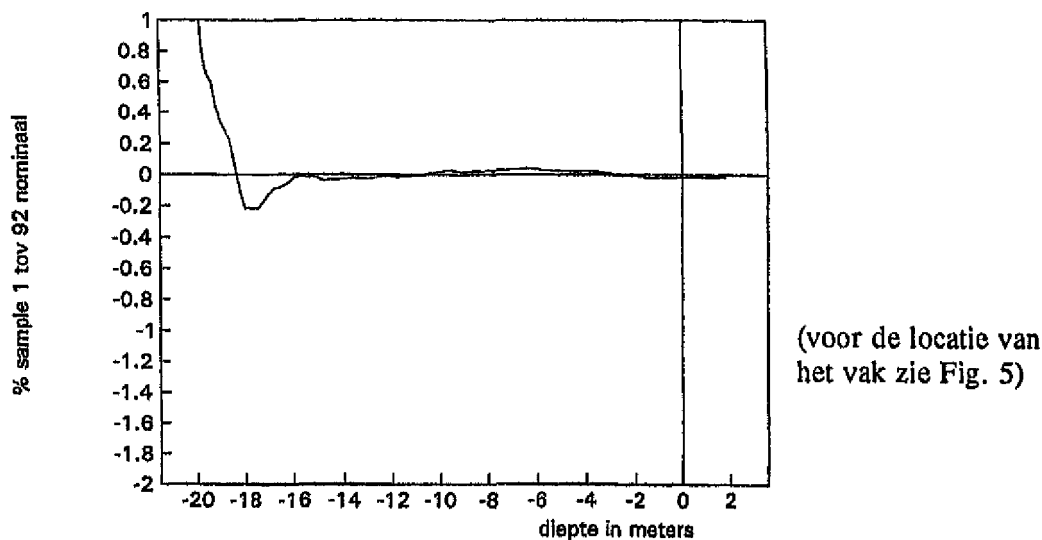
Uit de X,Y,Z-waarden van de peilingen wordt via een interpolatie een digitale matrix gemaakt welke is opgebouwd uit een verzameling pixels. Elk pixel wordt gerepresenteerd door een gemiddelde diepte.

Om na te gaan wat de invloed is van de stochastische lodingsfout op een inhoudsberekening, is gebruik gemaakt van de "eenvoudige Monte Carlo methodiek". Deze methode is gebaseerd op een (Fortran) subroutine die een random fout genereert uit een standaard normale verdeling ten opzichte van een referentie bestand. Van het "nieuwe" bestand wordt de inhoud berekend. Dit wordt een aantal keren

herhaald en vervolgens worden de inhouden van de "nieuwe" bestanden vergeleken met de inhoud van het referentie bestand.

Bollebakker en Van der Male [3] hebben op deze wijze berekend dat een stochastische fout van 0,23 m (2σ) een fout oplevert die kleiner is dan 0,01%, ten opzichte van de totale inhoud van het proefgebied (Fig. 5). Hieruit is geconcludeerd dat de stochastische fout als gevolg van de middelling kan worden verwaarloosd.

De systematische fouten blijven echter aanwezig en werken door als fout in de digitale matrix. Het proefgebied is zo gekozen dat het representatief is voor de situatie in de hele Westerschelde; het omvat een diepe hoofdgeul, een hoge plaat en een aantal kleinere (kortsluit)geulen met tussengelegene platen (Fig. 5).

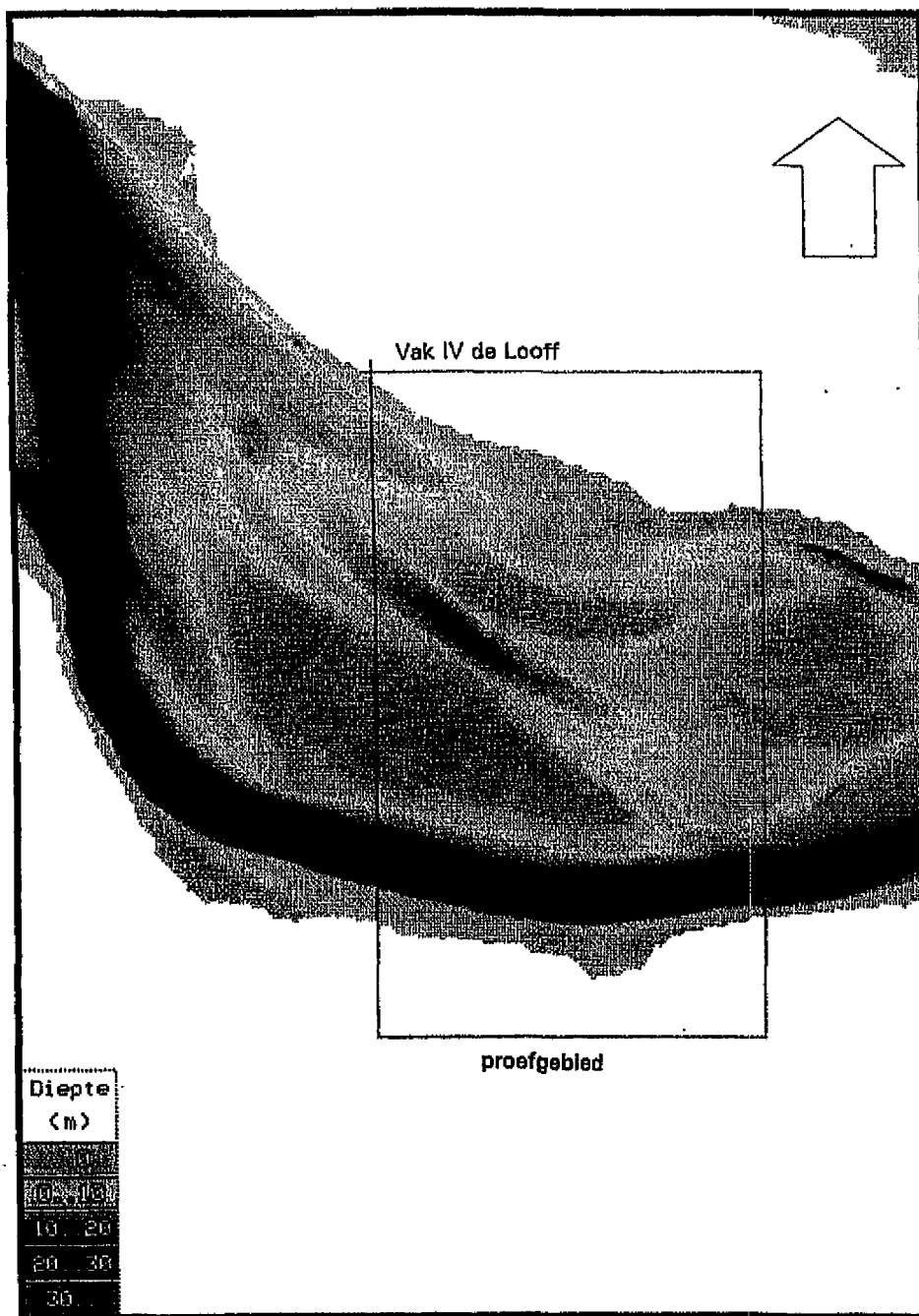


Figuur 4. De procentuele afwijking in de inhoud van de "nieuwe" bodem, met een stochastische fout van 0,23 m (2σ) ten opzichte van de referentie bodem ('92 nominaal) voor het proefgebied (Fig. 5) [3].

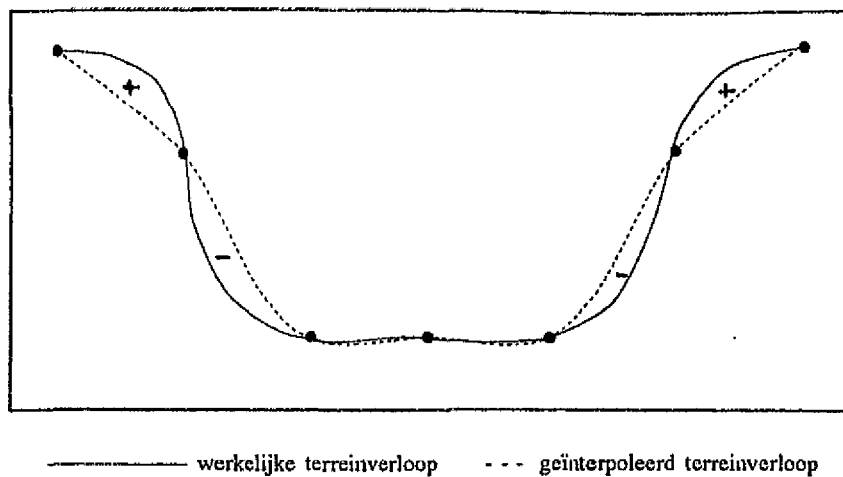
Een logisch gevolg van een interpolatie van lodingsraaien naar een DTM is de vervlakking van de morfologie; de ondiepe punten verdiepen, de diepste punten verondiepen. Uit Fig. 6 blijkt duidelijk dat de inhoud wordt overschat bij convexe geulhellingen en onderschat bij concave geulhellingen. Naarmate de grootte van de pixels toeneemt wordt de vervlakking sterker. Bollebakker [2] toont voor een gebied in het oostelijk deel van de Westerschelde (Fig. 5) aan dat inhouden berekend met pixels van 20*20 en 100*100 m elkaar weinig ontlopen (Fig. 7). Echter, de inhoud van het vak berekend met pixels van 200*200 m kan tot ca. 40% afwijken. De grote procentuele afwijkingen beneden NAP -18 m worden veroorzaakt doordat de absolute inhoud snel afneemt. Het diepere gedeelte wordt daarom ook niet in de beschouwing betrokken.

De wijze van interpoleren, en met name de grootte van de pixels, kan een belangrijke invloed hebben op het resultaat van de inhoudsberekening. Dit blijkt duidelijk uit Fig. 8. Hierin zijn, voor het proefgebied (Fig. 5) de inhoudsverschillen weergegeven tussen de inhoudsberekeningen met DIGIBEELD (pixels 20*20 m, 100*100 m en 200*200 m) en ZB, de zandbalansberekening volgens Van den Berg [1]. De inhouden berekend met DIGIBEELD voor pixels van 20*20 en 100*100 m liggen dichtbij

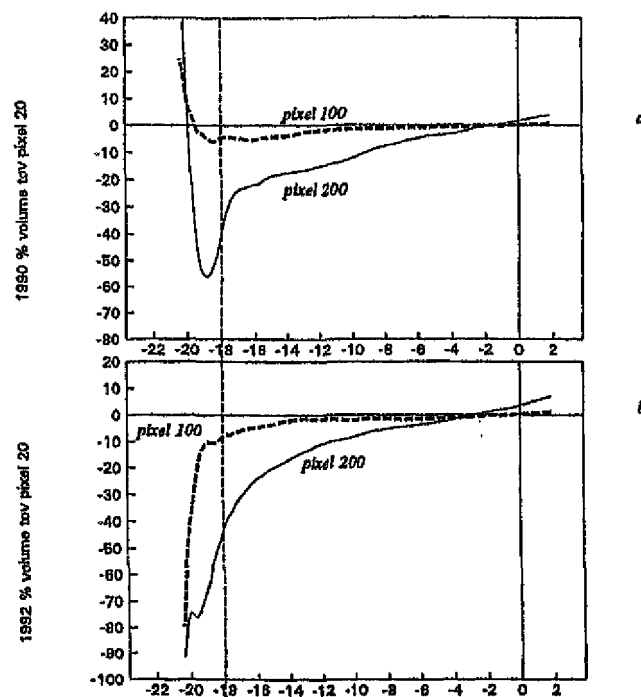
elkaar. Het inhoudsverschil met ZB beneden NAP bedraagt 1,6 miljoen m³, ofwel een gemiddelde diepteafwijking van 0,13 m over het proefgebied. DIGIBEELD met pixels van 200*200 m geeft een inhoudsverschil van 2,7 miljoen m³, ofwel 0,23 m. Dit voorbeeld geeft aan hoe riskant het is om inhoudsgegevens die op verschillende wijze zijn berekend met elkaar te vergelijken.



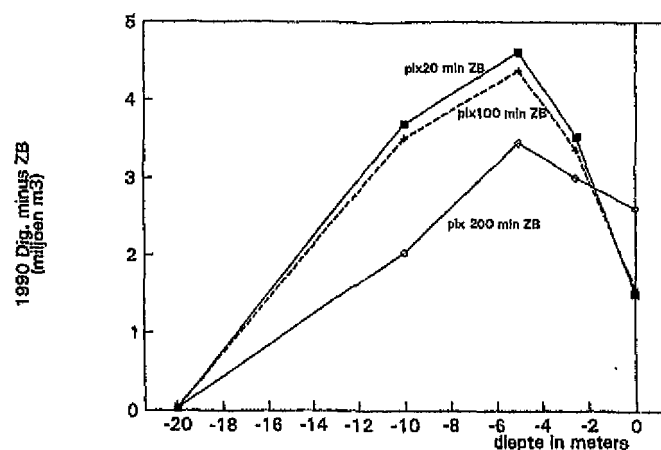
Figuur 5. De ligging van het proefgebied (Vak IV volgens de Looff) in het oostelijk deel van de Westerschelde (schaal ca. 1:65.000).



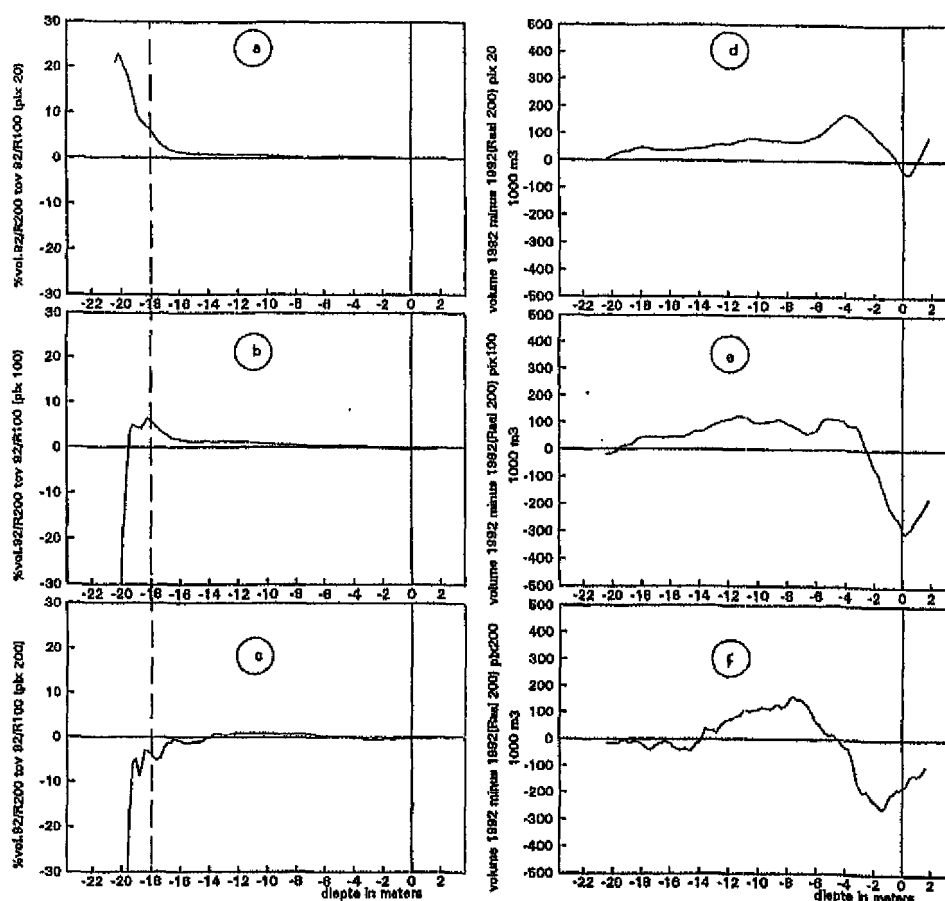
Figuur 6. De vervlakking van een geulprofiel door interpolatie; de inhoud wordt overschat op de convexe geulhellingen (+) en onderschat op de concave geulhellingen (-) [7].



Figuur 7. De invloed van de pixelgrootte op de inhoudsberekening van het proefgebied (Fig. 5); 100*100 m en 200*200 m ten opzichte van 20*20 m; a) 1990 en b) 1992 [2].



Figuur 8. Het inhoudsverschil voor het proefgebied (Fig 5.) tussen ZB en de methode DIGI-BEELD bij pixels 20*20 m, 100*100 m en 200*200 m; situatie 1990 [2].



Figuur 9. De relatieve (a t/m c) en absolute (d t/m f) inhoudsverschillen van het proefgebied (Fig. 5) bij pixels van 20*20 m (a en d), 100*100 m (b en e) en 200*200 m (c en f); situatie 1992 [2].

De relatieve nauwkeurigheid van verschillende interpolatiemethoden (DIGIBEELD, CONLOD, Kriging, Inverse Distance) is onderzocht door de Meetkundige Dienst [6] en de TPD-TNO [12]. Uit deze rapporten blijkt dat met de interpolatie binnen DIGIBEELD een objectieve (persoonsonafhankelijke) en betrouwbare interpolatie kan worden verkregen. Over de grootte van de absolute fout ten gevolge van het interpolatieproces wordt geen uitspraak gedaan. Wij nemen aan dat de grotendeels stochastische fout niet groter zal zijn dan gemiddeld ca. 0,1 m. Ook verwachten wij dat de interpolatiefout bij vershilkuberingen deels zal wegvallen, doordat steeds sprake is van hetzelfde gebied, zelfde raaien en min of meer dezelfde geometrie.

Uit de analyse van Bollebakker [2] blijkt dat in het proefgebied een raaiafstand van 100 meter geen aantoonbaar betere kuberingen heeft opgeleverd dan een raaiafstand van 200 m. Dit is onafhankelijk van de grootte van de pixels (Fig. 9). De ligging van de lodingsraaien ten opzichte van de gradiënten in diepten is wel van groot belang. Dit betekent dat de afstand tussen de lodingsraaien in het oostelijk deel van de Westerschelde (Vakken 1, 2 en 3), met oog op de zandbalansen, zonder verlies van de nauwkeurigheid teruggebracht zou kunnen worden van 100 naar 200 m.

3.3 Inhoudsberekening

De nauwkeurigheid van een inhoudsberekening van een vak of een gebied wordt niet beïnvloed door het rekenproces. De in de eerdere procesgang ontstane fouten bepalen de nauwkeurigheid van de berekening. Bij vershilkuberingen moet goed worden gerealiseerd dat elke afwijking in gebiedsgrootte direct een fout introduceert in de inhoudsberekening. Dit komt met name voor aan de randen van de vakken en voor plaatgebieden die niet zijn gepeild. De verschillen in nauwkeurigheid voor de platen, geulen en de hellingen, werken naar rato van oppervlakte door in het resultaat.

3.4 Bagger-, stort- en zandwinvolumina

Er wordt onderscheid gemaakt tussen het baggeren voor de zandwinning of het baggeren ten behoeve van het vaargeulonderhoud. In het eerste geval wordt al het materiaal uit het watersysteem onttrokken. In het laatste geval wordt het sediment op een ander locatie teruggestort. Van Dam [5] heeft aan de hand van "best professional judgement" voor de verschillende aspecten procentuele stochastische en systematische fouten aangegeven (Tabel 2).

Bij het meten van de baggervolumina, kunnen per zuiger stochastische en systematische fouten worden onderscheiden [5]. De stochastische fouten bij de zandwinning en het baggeren en storten zijn het gevolg van fouten in de bepaling van de beunvolumina. Deze worden voor de zandwinning minder nauwkeurig bepaald dan die voor het baggeren en storten (Tabel 2). De stochastische fout wordt uitgemiddeld doordat de inhoud over een groot aantal schepen wordt gesommeerd. De invloed van deze fout op de totale zandbalans is derhalve gering.

Het sediment heeft in het beun van een zuiger een lossere pakking dan in de oorspronkelijke toestand op de bodem "in situ". Dit volume en dus ook dichtheidsverschil wordt in de uitlevering genoemd. In de Westerschelde wordt al enkele decennia gerekend met een uitleveringspercentage van 20%. Van

Dam [5] geeft aan dat dit percentage zeer waarschijnlijk te hoog is, doordat de dichtheid van het sediment "in situ" wordt overschat. Een uitleveringspercentage van 10% lijkt vooralsnog reëel, zodat zowel bij de zandwinning als bij het baggeren en storten een systematische fout gemaakt van +10%. Nader onderzoek hiernaar is gewenst.

Doordat het meeste sediment binnen het estuarium wordt verplaatst, namelijk van bagger- naar stortlocatie, heeft deze systematische fout vooral invloed op de interne verdeling van de zandbalans.

Tabel 2. Stochastische en systematische fouten in de zandwinning en het baggeren ten behoeve van de vaargeul [5].

	<i>Stochastische fout</i>	<i>Systematische fout</i>
zandwinning	$\pm 1 \text{ tot } 5 \%$	+ 10 %
baggeren t.b.v. vaargeul	$\pm 1.5 \%$	+ 10 %

Als een bagger-, stort- of zandwingebied door een vakgrens in een zandbalans doorsneden wordt, dan moet voor de berekening een verdeling worden gemaakt in de onttrokken of gestorte volumina per vak. Tot nu toe is deze verdeling meestal gemaakt naar rato van oppervlak [1]. Hiermee wordt echter een onbekende fout geïntroduceerd. Daarom wordt aanbevolen om de vakindeling zodanig op te zetten dat de bagger-, stort- of zandwingebied geheel aan één vak kunnen worden toegekend.

3.5 Zandbalans

De nauwkeurigheid van een zandbalans wordt bepaald door alle fouten die voortkomen uit het peilen, de interpolatie, de inhoudsberekening en het onttrekken of storten van sediment.

Stochastische fouten die ontstaan bij het peilen en bij de bagger-, stort en zandwinvolumina, worden door de grote omvang van de dataset vrijwel uitgemiddeld. We veronderstellen dat de systematische fouten grotendeels tegen elkaar zullen wegvallen, bij het bepalen van inhoudsverschillen tussen twee "momenten" tijdstip T en T+t' (Tabel 3). Dit geldt alleen als er geen grote verschillen in de geometrie van het beschouwde gebied zijn opgetreden, omdat de systematische fouten afhankelijk zijn van de morfologische eenheden (plaat, geul, helling) en naar rato doorwerken in de berekening (Tabel 1). De onbekende "variabele systematische fouten", die in elke peiling kunnen verschillen, kunnen elkaar opheffen, maar kunnen elkaar ook versterken.

Samengevat kan worden gesteld dat stochastische fouten kunnen worden verwaarloosd. Als het verschil wordt bepaald dan vallen ook grotendeels de systematische fouten weg. De voor de zandbalans belangrijke fouten zijn: 1) de systematische fouten in de bagger-, stort- en zandwinvolumina en 2) "variabele systematische" fouten. Als de Westerschelde in zijn geheel wordt beschouwd dan moet rekening wor-

den gehouden met een fout in de orde van enkele cm's. Echter, naarmate de vakken waarover een zandbalans wordt berekend kleiner worden, neemt de onnauwkeurigheid toe. Uit onze analyse blijkt dat fouten in de orde van 0,3 m kunnen voorkomen!

De fouten in de bagger-, stort- en zandwinvolumina kunnen per vak redelijk worden gecorrigeerd volgens de percentages in Tabel 3. De "variabele systematische fouten" kunnen niet worden gecorrigeerd omdat de grootte en richting van deze fouten onbekend zijn.

Oost en de Haas [14] hebben op basis van dat onderzoek een standaarddeviatie "aangenomen" van 0,05 m ten aanzien van opeenvolgende lodingen in het Waddengebied [8]. Zij veronderstellen dat deze fout met name het gevolg is van kleine variaties in systematische fouten, zoals bijvoorbeeld verschillen in squat of door kalibratiefouten. Er is voor het Waddengebied geen melding gemaakt van jaren waarin opmerkelijk grote systematische fouten zijn waargenomen.

Tabel 3. Foutentabel zandbalans.

A C T I E S	Inhoudsberekening Tijdstip T		Inhoudsberekening Tijdstip T + t'		Verschil-inhoud over t'	
	FOUTEN		FOUTEN		FOUTEN	
	Syst.	"Var.Syst"	Syst.	"Var.Syst"	Syst.	"Var.Syst"
<u>Peilen:</u>						
-interget. geb.	-0.20	onbek. 1	-0.20	onbek. 2	± 0	onbek.1+2
-vlakke gebieden	-0.10	onbek. 1	-0.10	onbek. 2	± 0	onbek.1+2
-geulhellingen	-0.25	onbek. 1	-0.25	onbek. 2	± 0	onbek.1+2
Interpolatie	ca. 1%		ca. 1%		± 0	
Kubering	0		0		0	
<u>Baggeren:</u>						
-zandwinning	nvt	nvt	nvt	nvt	10 %	nvt
-t.b.v. vaargeul	nvt	nvt	nvt	nvt	10 %	nvt
<u>Storten</u>	nvt	nvt	nvt	nvt	10 %	nvt

4. Optimalisatie

4.1 Peiling

In [3] is aangetoond dat een verkleining van *stochastische fouten* de nauwkeurigheid van een zandbalans niet sterk zal verbeteren. In principe geldt dit ook voor *systematische fouten* die van jaar tot jaar ongeveer gelijk blijven, zoals het te ondiep opnemen van de plaat-geul overgangen. Deze fouten vallen bij de verschilberekening grotendeels weg. Voor andere doeleinden kunnen deze fouten wel van belang zijn, zoals bijvoorbeeld bij het vergelijken van geul- en plaatprofielen.

De "*variabele systematische fouten*" bepalen in grote mate de onnauwkeurigheid van een zandbalans. Om de nauwkeurigheid van de zandbalansen te verhogen zal men moeten proberen de kans op juist dit soort fouten te minimaliseren. Een oplossing is het doorvoeren van een strikte systematiek in de uitvoer en de verwerking van de lodingen. Dit maakt de kans om "*variabele systematische fouten*" te maken kleiner. Een vast raaienstelsel en een frequente calibratie zijn reeds geruime tijd onderdeel van de meetpraktijk van de Meetdienst Zeeland. Verder wordt voorgesteld om de opnames van vaklodingen binnen één maand uit te voeren. Hierdoor wordt zo goed mogelijk één "moment" vastgelegd.

De verwerking kan verder worden geoptimaliseerd door zowel tijdens als na de verwerking de resultaten te controleren. Op deze wijze kunnen systematische fouten in een vroeg stadium worden opgespoord. Hiervoor worden de volgende stappen voorgesteld:

- de dieptegegevens worden geïnterpoleerd in DIGIBEELD en verwerkt tot DTM's (is reeds standaard geworden in de loop van 1993)
- de nieuwe opname wordt vergeleken met de meest recente opname van dat gebied door middel van verschilkaarten en verschilkuberingen; hiervoor zijn speciale applicaties ontwikkeld binnen ARCINFO-GIS
- bij grote afwijkingen moet worden gekeken in hoeverre die afwijkingen corresponderen met het vaarschema (meetschip, meetdag, omstandigheden); indien dit aanleiding geeft om aan de opname van een aantal dagen te twijfelen, dan dient zo snel mogelijk een nieuwe opname van het gehele vak te worden gemaakt

Een extra controle-mogelijkheid kan worden gecreëerd door het opnemen van dwarsraaien ("cross-check lines"). Hierbij worden per lodingsvak een aantal raaien min of meer loodrecht ten opzichte van het bestaande raaienstelsel gepeild. Met behulp van de diepteverschillen op de snijpunten kan een indruk worden verkregen van de fout van de loding, ten gevolge van zowel verticale- als horizontale discrepanties. Eventuele uitschieters op een meetdag kunnen dan worden opgemerkt. Deze verificatie mag alleen worden uitgevoerd in relatief vlakke gebieden.

Deze methode maakt deel uit van "The Standards" zoals opgesteld door de American Nations, 7th Cartographic Consultation of the Pan American Institute of Geography and History in 1955 [uit 19]. Deze methodiek wordt tevens gebruikt om de nauwkeurigheid van hydrografische kaarten te bepalen [22].

Een verdere verbetering van de peiling is mogelijk indien voor de squat wordt gecorrigeerd. De opname methodiek wordt dan zodanig aangepast dat alle meetvaartuigen voorzien zijn van een registratie van de toerenteller in het RWSLOD systeem en dat bekend is hoe het toerental en de waterdiepte

gerelateerd zijn aan de squat (ijking per meetschip). Thans wordt bij de Meetdienst Zeeland bekeken hoe de verrekening van de squat in de nabije toekomst kan worden ingevoerd (mondelinge mededeling van de Meetdienst Zeeland). Bij de invoering van de squat-correctie dienen de verschillen tussen gecorrigeerde en ongecorrigeerde dieptemetingen te worden bepaald. Dit om de trendbreuk in de verschilluberingen, die dan zal optreden, te kunnen verrekenen.

4.2 Interpolatie en inhoudsberekening

Vrijwel alle interpolaties voor de Westerschelde worden tegenwoordig met DIGIBEELD uitgevoerd met een pixels van 20*20 m. In [2] wordt ten aanzien van de nauwkeurigheid van de inhoudsberekeningen aangegeven dat interpolaties en kuberingen voor een zandbalans bij een pixels variërend van 20*20 tot 100*100 meter optimaal lijkt.

De wijze van interpoleren, en met name de grootte van de pixels, kan een belangrijke invloed hebben op het resultaat van de inhoudsberekening. Bij het invoeren van een nieuwe berekeningsmethodiek voor de zandbalansen is het daarom evident om de voor alle jaren opnieuw een inhoudsberekening uit te voeren volgens de nieuwe methodiek.

Kuberingen voor de zandbalans dienen voortaan uit te worden gevoerd met hoogte- en dieptegegevens tot een niveau van NAP +2.5 meter. Naast vaklodingen moet dan voor de basisgegevens gebruik gemaakt worden van waterpassingen, detaillodingen, plaatlodingen en eventueel luchtfoto-opnamen.

De mogelijkheden van hoogtemetingen met behulp van een dynamisch DGPS (Differential Global Positioning System) lijken interessant voor de opname van slikken en platen (zie ook [11]).

Voor de gegevensinwinning van deze gebieden wordt een frequentie van eenmaal per twee tot drie jaar aanbevolen. Indien de opname geschiedt volgens raaien, dan dient deze aan te sluiten bij de lodingsraaien in de geulen.

4.3 Bagger-, stort- en zandwinvolumina

Voor de zandbalans zijn alle systematische fouten in de bagger-, stort- en zandwinvolumina van belang. Deze fouten kunnen per vak redelijk worden gecorrigeerd volgens de percentages in Tabel 3.

Over de grootte van de systematische fout in de uitlevering, de omrekening van "in situ" naar het "beun" (baggerruim) (Tabel 2), bestaat nog onzekerheid [5]. Nader onderzoek is gewenst, maar vooruitlopend hierop lijkt een bijstelling van de uitlevering tot 10 % realistisch.

Maandelijkse gegevens van zandwinning, baggeren en storten dienen digitaal aan te worden geleverd en ingevoerd in kaartbladen van ARCINFO. Dit is van belang voor de geautomatiseerde verwerking van de toekomstige zandbalansen voor de Westerschelde.

4.4 Zandbalans

Een vergroting van de nauwkeurigheid van een zandbalans kan verder worden bereikt door het opvoeren van de frequentie van de berekeningen. Voor de Westerschelde wordt aanbevolen wordt om de huidige vijf jaarlijkse frequentie op te voeren naar een jaarlijkse. Het grote voordeel is dat naar een "trend" kan worden gekeken bepaald over meerdere "momenten" in plaats van verschillen tussen twee "momenten". De extra rekeninspanning wordt mogelijk gemaakt omdat momenteel deze berekeningen met behulp van Digibeeld en ARCINFO (GIS) relatief snel kunnen worden gemaakt.

Een jaarlijkse berekening van de zandbalans minder maakt deze minder afhankelijk van jaren waarin grote "variabele menselijke fouten" zijn gemaakt. Een ander voordeel is dat de onderzoeker en de beheerder "up to date" inzicht hebben in de actuele zandbalansen zodat veranderingen in de morfologie eerder kunnen worden gesignaleerd.

Bij de jaarlijkse berekening van een zandbalans voor de Westerschelde zal rekening gehouden moeten worden met een aantal aspecten:

- *peiling en hoogtemeting:*
De Westerschelde dient elk jaar in zijn geheel te worden gepeild. De opnamefrequentie van de vakken in het westelijk deel van de Westerschelde (vakken 4, 5 en 6) zal dan moeten verdubbelen ten opzichte van het huidige programma. De relatief hoge gebieden, die niet in de vaklodingen kunnen worden meegenomen, dienen één keer per 2 tot 3 jaar te worden opgenomen.
- *tijdsverschillen tussen opeenvolgende peilingen (zelfde gebied):*
Om een goede vergelijking tussen verschillende opnames mogelijk te maken is het noodzakelijk dat de metingen per vakblad en per opname in eenzelfde periode vallen. Wanneer voor bijvoorbeeld vakloding 5 in 1990 een peiling is uitgevoerd in januari dan zal de eerstvolgende opname van dit vakblad ook in januari moeten worden uitgevoerd. Voor de verschillende vaklodingen in de Westerschelde zal een optimaal tijdschema moeten worden opgesteld.
- *tijdsverschillen tussen gebieden onderling (zelfde jaar):*
Voor een jaarlijkse zandbalans moeten de "moment" opnames worden omgerekend naar één datum voor de hele Westerschelde. Alleen dan kunnen de maandelijkse hoeveelheden van het baggeren, storten en de zandwinning goed worden verrekend met de inhouden voor de vakken. Er zal dus een "synchronisatie" moeten worden uitgevoerd van de vaklodingen tot bijvoorbeeld een "opname 1 januari". Er zal nog onderzocht moeten worden hoe, en in welke fase binnen de zandbalansberekening dit het best kan worden uitgevoerd.
- *te lange duur van de opname van een vakloding:*
Als de loding van een vak te lang duurt, dan kan niet meer worden gesproken van een "moment"-opname. Er wordt aanbevolen per vakloding niet meer dan één maand uit te trekken.
- *speciestortingen uit havens:*
In het verleden is altijd aangenomen dat het effect van speciestortingen uit havens op de resultaten van een vijf jaarlijkse zandbalans kon worden verwaarloosd [1; 4]. Belangrijke argumenten hiervoor waren 1) het uitgangspunt van een gesloten balans tussen de haven en het voorliggende vak en 2) het feit dat het merendeel van het sediment uit slib bestaat. Wij veronderstellen dat grote havenstortingen, in de orde van een half tot enkele miljoenen m³'s, voor de jaarlijkse balansen wel van significant belang kunnen zijn.

5. Conclusies

nauwkeurigheden:

- * De grootste stochastische en systematische lodingsfouten treden op bij plaat-geulhellingsen en bedragen $\pm 0,39$ m (1σ). Voor de relatief vlakke geulbodems en intergetijdegebieden is de stochastische fout vrijwel gelijk, namelijk $\pm 0,19$ m respectievelijk $\pm 0,23$ m (1σ). De intergetijdegebieden worden door de grotere squat systematisch 0,1 m dieper gepeild dan de resterende eenheden.
- * Er is aangetoond dat de *stochastische fout* niet relevant is voor de nauwkeurigheid van de inhoudsberekeningen, omdat deze geheel wordt uitgemiddeld. Ook de *systematische fouten* vallen bij de verschilberekening grotendeels weg. Menselijke fouten tijdens de lading of de verwerking, de zogenaamde *variabele systematische fouten*, kunnen echter leiden tot grote fouten in de verschilberekeningen. Na enkele jaren is het niet meer mogelijk de grootte van deze fouten te achterhalen.
- * Als de Westerschelde in zijn geheel wordt beschouwd dan moet rekening worden gehouden met een onder- of overschatting van de gemiddelde diepte in de orde van enkele cm's. De onnauwkeurigheid neemt toe naarmate het vak waarover de zandbalans wordt berekend kleiner wordt. Uit vroegere zandbalansen is afgeleid dat gemiddelde dieptefouten in de orde van 0,3 m over een heel vak kunnen voorkomen.
- * De inhouden berekend met pixels van 20x20 m en 100x100 m zijn ongeveer even groot. Berekeningen met pixels van 200x200 m kunnen hiervan echter aanzienlijk afwijken. Het is verder van groot belang dat bij het maken van verschilkuberingen gebieden met dezelfde omvang worden genomen, waarbij de dieptematrix voor 100% is gevuld. Elke afwijking in gebiedsgrootte introduceert een fout in de inhoudsberekening.
- * De onnauwkeurigheid bij de bepaling van de uitlevering van de bagger- en stortvolumina heeft een belangrijke invloed op het resultaat van de zandbalans. Deze onnauwkeurigheid heeft met name invloed op de zandbalansen voor bagger- en stortvakken afzonderlijk.
- * De wijze van interpoleren, en met name de grootte van de pixels, kan een belangrijke invloed hebben op het resultaat van de inhoudsberekening. Bij het invoeren van een nieuwe berekeningsmethodiek voor de zandbalansen is het daarom evident om de voor alle jaren opnieuw een inhoudsberekening uit te voeren volgens de nieuwe methodiek.

optimalisatie:

- * Uit voorgaande conclusies blijkt dat ten aanzien van zandbalansen de "variabele systematische fouten" de nauwkeurigheid van de peilingen sterk beïnvloeden. Een grotere nauwkeurigheid kan derhalve worden bereikt door die fouten te minimaliseren.
Door een ver doorgevoerde systematiek in de lodingen zal de kans om "variabele systematische

fouten" te maken worden verkleind. Een vast raaienstelsel en een frequente calibratie zijn reeds geruime tijd onderdeel van de meetpraktijk van de Meetdienst Zeeland.

Voorts wordt aanbevolen om:

- a) de lodingsdata grondig te controle zowel tijdens als na de verwerking om zodoende systematische fouten in een vroeg stadium op te kunnen sporen
- b) extra dwarsraaien op te meten ("cross-check lines") als extra controle en ook om een kwaliteitsmerk aan een kaart of vakloding te kunnen toekennen
- c) de opname-methodiek zodanig aan te passen dat gecorrigeerd kan worden voor de inzinking van het schip (squat)

- * Geconcludeerd wordt dat door het jaarlijks opstellen van de zandbalans de foutenmarge verkleint, doordat dan gekeken kan worden naar trends. Er dient wel rekening gehouden te worden met een aantal aspecten: a) tijdsverschillen in opeenvolgende peilingen (in hetzelfde gebied), b) tijdsverschillen tussen gebieden onderling (hetzelfde jaar), c) te lange duur van de opname van een vakloding en d) speciéstoringen uit havens.
- * Kuberingen voor de zandbalans dienen voortaan te worden uitgevoerd met hoogte- en dieptegegevens tot een niveau van N.A.P. + 2.5 meter. De mogelijkheden van hoogtemetingen met behulp van een kynematic (dynamisch) DGPS (Differential Global Positioning System) zijn interessant voor de opname van de slikken en platen.
- * Bij de invoering van de squat-correctie dienen de verschillen tussen gecorrigeerde en ongecorrigeerde dieptemetingen te worden bepaald. Dit om de trendbreuk in de verschil kuberingen, die dan zal optreden, te kunnen verrekenen.
- * Er wordt aanbevolen te onderzoeken of de raai afstand van 100 meter voor de vakken in het oostelijk deel van de Westerschelde (Vakken 1, 2 en 3) terug te brengen is naar 200 meter. Uit dit onderzoek blijkt dat dit geen invloed zal hebben op de nauwkeurigheid van de zandbalans Westerschelde.

6. Referenties

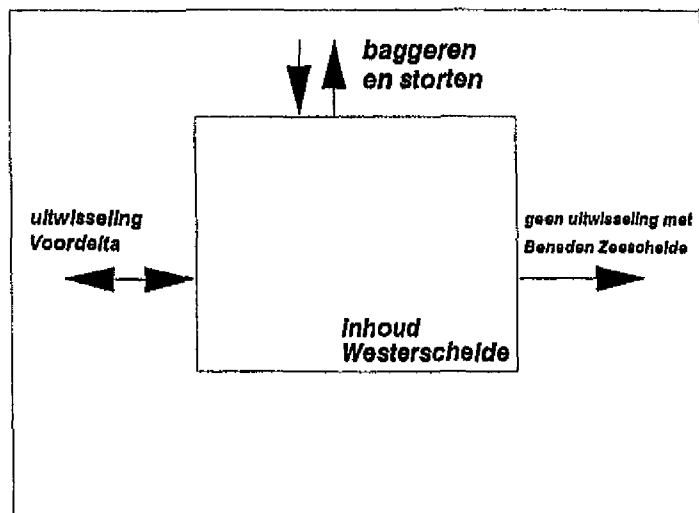
- [1] Berg, van den J.H., Schouten, D., en Van Westenbrugge, C.J., 1993. Zandbalans Westerschelde 1965, 1970, 1975, 1980 en 1985. RWS Dir. Zeeland Nota NWL-91.36.
- [2] Bollebakker, P., 1993. Analyse van de berekeningsmethodiek van inhoudsberekeningen. RWS DGW GWWS-93.829X.
- [3] Bollebakker, P. en Van der Male, C., 1993. Invloed stochastische fout op inhoudsberekeningen. RWS DGW GWWS-93.831X.
- [4] Dam, van D., 1991. Inhoudsberekening en zandbalans Westerschelde voor de periode 1984/ 1-1985 - 1990. RWS Dir. Zeeland Notitie NWL-91.55.
- [5] Dam, van D., 1993. Onnauwkeurigheden bij het bepalen van de gebaggerde en gestorte hoeveelheden. RWS Dir. Zeeland Memo NWL-93.06
- [6] Dijk, van H.H.J., en Kamminga, L., 1993. Rapportage LODGIS. RWS Meetkundige Dienst-MTO-R9313.
- [7] Eijnsbergen, van C., 1993. Nauwkeurighedsanalyse van dieptegegevens in de Westerschelde. Afstudeerscriptie, TU Delft en TNO/TPD.
- [8] Hartman, J., en Pastoor, K., 1985. Onderzoek naar de verandering van de bodemligging voor de Oostelijke Waddenzee en buitendelta's voor de perioden 1975 - 1979 en 1970 - 1979. RWS, Directie Groningen, Nota 85.24.
- [9] Jonkers, W., 1991. De problematiek omtrent de basisgegevens voor morfologisch onderzoek naar geulveranderingen in het Oosterscheldebekken na 1987. RWS Notitie GWAO-91.13039.
- [10] Mol, G., 1993. Analyse van de 5-jaarlijkse zandbalans in de Westerschelde over de jaren 1965-1985. RWS DGW GWWS-93.875X.
- [11] Morton, R.A., Leach, M.P., Pine, J.G., and Cardoza, M.A., 1993. Monitoring beach changes using GPS Surveying techniques. Journal of Coastal Research, Vol. 9, No. 3, p 702-720.
- [12] Munster, van R.J., en Van Antwerpen, G., 1993. Verificatie interpolatie DIGIBEELD. Reactie op rapportage LODGIS door RWS MD. TPD-FSP-RPT-93-074.
- [13] Nanninga, M., 1985. The accuracy of echo sounding. Description in a mathematical model. RWS Nota WWKZ 85.H016.
- [14] Oost, A.P., en De Haas, H., ca. 1992. Het Friesche Zeegat. Morfologisch-sedimentologische veranderingen in de periode 1970-1987 (2 delen). Kustgenese rapport, Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht.
- [15] Pieters, T., Storm, C., Walhout, T., en Ysebaert, T., 1991. Het Schelde-estuarium méér dan een vaarweg. RWS DGW Nota GWWS-91.081.
- [16] Pieters, T., 1993. Het Schelde-estuarium, beheren of beheersen? RWS Rapport DGW-93.032.
- [17] Projectgroep Oostwest, 1993. Projectplan OOSTWEST fase 1993-1994. Werkdocument GWWS-93.813X.
- [18] Rijkswaterstaat, ca. 1992. De kwaliteit van lodingen; meetnauwkeurigheid. Cursus meetleiders en waarnemers. Vak 51.33 Les 03.0. Koninklijke PBNA.
- [19] Sallenger, A.H., Goldsmith, V., and Sutton, C.H., 1975. Bathymetric chart comparisons: a manual of methodology, error criteria and applications. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering, No. 66.
- [20] Storm, C., 1993. Plan van aanpak Werkgroep Zand. RWS DGW Werkdocument GWAO 93.-803X.
- [21] Storm, C., 1993. Van peiling tot vakloding. Een beschouwing van de nauwkeurigheid van de

lodingsmethodiek voor de Westerschelde en Voordelta (1965-1990). RWS DGW GWA0-93.8-41X.

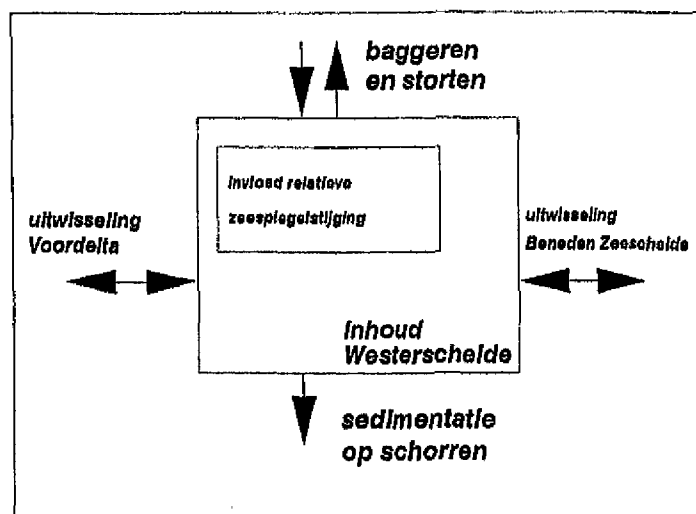
- [22] Velberg, P.J., 1993. The accuracy of the depth information of the Nautical Chart. The Hydrographic Journal, 68, April, 29-35.

Bijlage 1. Klassieke- versus morfologische zandbalans

De zandbalansen voor de Westerschelde zijn tot op heden berekend zoals in figuur A is weergegeven. In dit rapport hebben we dat de "klassieke zandbalans" genoemd. Een zandbalans waarbij eveneens rekening wordt gehouden met andere componenten, zoals relatieve zeespiegelstijging, de sedimentatie op schorren, een meer onderbouwde schatting van de uitwisseling met België, wordt een "morfologische zandbalans" genoemd (zie figuur B).



figuur A. De klassieke zandbalans Westerschelde.



figuur B. De morfologische zandbalans Westerschelde.

Bijlage 2. Nauwkeurigheden lodingen Westerschelde uitgesplitst per onderdeel

In paragraaf 3.1 wordt de nauwkeurigheid van de lodingen in de Westerschelde besproken. In onderstaande Tabel 4 wordt de bijdrage per afzonderlijke stochastische en systematische fout weergegeven.

Tabel 4. *Overzicht van stochastische en systematische fouten bij dieptelodungen (Nanninga [13]; Jonkers [9]).*

stochastische fouten (1 sigma)	inter. helling			geul
	echolood	$\pm 0,05$	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$ m
	plaatsbepaling	$\pm 0,2$	$\pm 0,35$	$\pm 0,1$ m (a)
	waterstand	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$ m
	afrondding	$\pm 0,03$	$\pm 0,03$	$\pm 0,03$ m
	totaal:	$\pm 0,23$	$\pm 0,39$	$\pm 0,19$ m
systematische fouten	squat intergetijdegeb.	- 0,2 m		
	squat geulen/hellingen	- 0,1 m		
	bodemhelling	- 0,15 m		

(a) indien geen rekening wordt gehouden met bodemribbels

In Tabel 5 worden stochastische en systematische fouten gepresenteerd in volumina, rekening houdend met de huidige inhoud van de Westerschelde.

Tabel 5. *De stochastische en systematische fouten in volumina voor de huidige situatie van de Westerschelde.*

gebied	fouten m	totaal opp 10^4 m ²	totale fout 10^6 m ³
intergetijden	$-0,20 \pm 0,23$	10.000	-20 ± 23
p/g hellingen	$-0,25 \pm 0,39$	ca. 10.000 *	-25 ± 39
geulen	$-0,10 \pm 0,19$	ca. 10.000 *	-10 ± 19
TOTAAL		ca. 30.000	-55 ± 49

* geschatte oppervlakten