

notitie

aan : Sawes model

van : A. Langerak

datum : 21 mei 1990/Revisie eerdere notitie

onderwerp Slibuitwisseling tussen de bodemfase en de waterfase

1. Inleiding

De slibuitwisseling tussen de bodemfase en de waterfase en de toevoer van verontreinigd slib uit België bepalen de waterkwaliteit in de Westerschelde. Dat heeft twee oorzaken:

- Ten eerste is slib een effectief medium om verontreinigingen tussen bodem en water uit te wisselen. Het gehalte verontreinigingen, gebonden aan slib, kan bijv. 10^2 x groter zijn dan het gehalte aan verontreinigingen in het water.
- Ten tweede kan de bodem via het slib een grote hoeveelheid verontreinigingen opslaan. De hoeveelheid slib, geborgen in de actieve bodemlaag, kan bijv. 10^3 x groter zijn dan de hoeveelheid gesuspendeerd slib in de waterfase.

Het belang van de slibuitwisseling met de bodem en de opslag in de bodem kan met twee voorbeelden toegelicht worden:

De buffer in de bodem kan bij hoge uitwisselingssnelheden en grote capaciteit enerzijds alle pieken in de toevoer aan verontreinigende stoffen egaliseren, waardoor het gehalte in het water vrijwel constant zal blijven. Anderzijds kan bij langdurige belasting (oplading bodems) en relatief lage uitwisselingssnelheden de bodem nog jaren verontreinigende stoffen naleveren, waardoor na sanering het gehalte in water nog jaren te hoog blijft.

Het belang van de slibuitwisseling tussen de bodem- en de waterfase was reden om de aannamen in het beleidsplan nader door te lichten, waarbij er sterk

behoort bij: Notitie GWA0-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 2

afwijkende uitgangspunten gekozen zijn. De cijfers uit het beleidsplan en de nieuwe cijfers uit de notitie vormen daarmee de range waartussen de uitwisseling tussen bodem en water zich beweegt. Gevoeligheidsonderzoek moet aangeven welke parameters van belang zijn. Hierna moet via onderzoek een exactere waarde voor de belangrijke parameters vastgesteld worden.

2. Cijfers uit het beleidsplan

In het beleidsplan is een eerste poging gedaan de slibuitwisseling tussen de bodemfase en de waterfase te kwantificeren.

Het beleidsplan gaat bij het bepalen van de uitwisseling uit van een tweelagensysteem.

1. Een actieve bodemlaag van 1 m, die een hoge uitwisselingssnelheid heeft met de waterfase.
2. Een daaropvolgende diepe bodemlaag van 9 m, die een veel lagere uitwisselingssnelheid heeft, waarbij de uitwisseling met de waterfase via de actieve bodemlaag plaats heeft.

In de uitwisseling tussen de bodem en de waterfase onderscheidt het beleidsplan een natuurlijke en een onnatuurlijke oorzaak:

- De natuurlijke uitwisseling tussen de waterfase en de actieve bodemlaag bepaalt men door de kleine bodemveranderingen, die over twee jaar hebben plaatsgevonden, te kwantificeren. Dit uitgangspunt leidt tot een onderschatting van de uitwisseling, als de tijdschaal van de veranderingen veel kleiner is dan 2 jaar (en dat is ze vermoedelijk).
- De natuurlijke uitwisseling tussen de diepe bodemlaag en het water bepaalt men door de gemeten geulverplaatsingen te kwantificeren aan de hand van de veranderingen over 5 jaar. Ook hier middelt men over meerdere jaren, nl. 5 jaar. Dit heeft echter geen consequenties. De geulverplaatsingen hebben een langere tijdschaal dan 5 jaar, waardoor er geen onderschatting van de uitwisseling tussen de actieve bovenlaag en de diepe onderlaag plaatsvindt.

behoort bij: Notitie GWA0-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 3

De natuurlijke uitwisselingssnelheden tussen bodem en water, en daarmee de verversingstijd, zijn te bepalen uit de volgende twee tabellen uit het beleidsplan.

Tabel 1. Slibgehalte en slibberging in de drie modelvakken van het Westerschelde-estuarium.

Vak	Oppervlakte km ²	Slibgehalte %	Berging bodem ¹⁾ 10 ⁹ kg
Zee Schelde	23	40	42,5
Oost ²⁾	60	4,5	45,9
West	174	4,6	133

- 1) Bij het vaststellen van de slibberging in de bodem is uitgegaan van een laagdikte van 10 m.
- 2) Hierbij is het Land van Saeftinghe als permanente berging buiten beschouwing gelaten.

Tabel 2. Omvang van de slibuitwisseling via resuspensie en sedimentatie.

Vak	Actieve bovenlaag 10 ⁹ kg/jaar	Diepe laag 10 ⁹ kg/jaar
Zeeschelde	1,2	0,1
O-Westerschelde	1,4	0,1
W-Westerschelde	4,9	0,2

- De onnatuurlijke slibuitwisseling van de bodem- en de waterfase vindt plaats door onderhoudsbaggerwerk. Het sediment met ingesloten slib wordt van locaties met een onvoldoende vaargeuldiepte weggebaggerd, waarbij 50% of meer van het net opgebaggerde slib weer via overflow uit de beun van de sleephopperzuiger terugstroomt in het water. Het opgebaggerde sediment wordt elders teruggestort in het estuarium of wordt uit het estuarium onttrokken.

behoort bij: Notitie GWA0-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 4

De opgebaggerde, de onttrokken en de teruggestorte hoeveelheden sediment zijn in de volgende tabel uit het beleidsplan weergegeven:

Tabel 3. Gemiddelde jaarlijkse slibhoeveelheden betrokken in baggerwerkzaamheden en zandwinning, uitgevoerd sinds 1950, excl. de effecten van verondieping.

Vak	Baggerwerken 10 ⁹ kg/jaar	Zandwinning 10 ⁹ kg/jaar	Speciestortingen 10 ⁹ kg/jaar
Zeeschelde	1,0	0,1	0,4
O. Westerschelde	0,3	0,1	0,2
W. Westerschelde	0,1	0,1	0,1

Naast de natuurlijke en onnatuurlijke slibuitwisseling onderscheidt het beleidsplan drie permanente onttrekkingen van sediment.

1. De sedimentatie op de schorren (bijv. Saeftinghe) orde 400.000 ton/j
2. De sedimentatie in secundaire geulen, die verondiepen orde 400.000 ton/j
3. Insluiting door aanzanding van intergetijdegebieden.

Deze uitwisseling is verder niet relevant voor deze notitie, omdat er redelijke schattingen voor beschikbaar zijn.

3. Amendering cijfers uit beleidsplan

De cijfers voor het beleidsplan zijn deels gebaseerd op metingen, deels op schattingen aangevuld met gezond verstand. Exacte gegevens ontbreken. Andere uitgangspunten leiden, met gebruik van dezelfde metingen, tot een andere slibuitwisseling tussen de bodemfase en de waterfase en tussen de actieve bodemlaag en de diepe laag.

I.v.m. het belang van de uitwisseling van slib is voor het Sawes project de uitwisseling van slib nogmaals gekwantificeerd, maar nu met vier andere uitgangspunten dan in het beleidsplan.

1. Het twee lagenmodel van het beleidsplan is omgezet naar een drie lagenmodel door het twee lagenmodel uit het beleidsplan (een actieve bovenlaag van 1 m en diepe laag van 9 m) aan te vullen met een derde laag. Deze zgn. grenslaag markeert de overgang van de waterfase naar de bodem. Deze laag van ± 1 mm dik, die vrijwel geheel uit slib bestaat, wordt tweemaal per getij tijdens de kentering opgebouwd en daarna weer volledig geërodeerd.

behoort bij: Notitie GWAO-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 5

2. De uitwisselingssnelheid tussen de actieve bovenlaag en de waterfase is verviervoudigd en de laagdikte is verkleind tot 0,5 m.
3. De uitwisseling met de diepe onderlaag (die vergroot is van 9 naar 9,5 m) vindt plaats op basis van first in en last out i.p.v. op basis van toevoeging of onttrekking aan een algemene voorraad met een gemiddeld gehalte. Op basis van een tijdschaal van 10 à 20 jaar vooruit betekent het eerste voor de Westerschelde dat de diepe laag alleen vervuild slib ontvangt en schoon slib afgeeft.

De gedane aannamen zijn speculatief maar niet zonder grond:

- Ad 1. Om de discrepantie tussen het slibgehalte in de bodemfase (massa slib/zand 1 op 20) en in de waterfase (massa slib/zand 1 op 1) te verklaren, moeten we aannemen dat bij kentering het meeste slib tijdelijk op de zandbodem afgezet wordt en geen onderdeel vormt van de bodem, maar blijft behoren tot de waterfase (zie verder appendix A).
- Ad 2. De Westerschelde bevat naar verwachting zandgolven met een golfhoogte van orde 1 m, die vermoedelijk een looptijd hebben van een half jaar. Binnen een jaar zou daardoor een bodemlaag van orde 0,5 m tweemaal volledig uitwisselen met de waterfase. Dit is echter niet meer dan een globaal cijfer Tabel 4 en 5 laten een grote variatie in omwoel-diepte (ribbelhoogte) en omwoelsnelheid ribbelsnelheid zien).
- Ad 3. In het beleidsplan wordt er van uitgegaan, dat de diepe bodemlaag zal uitwisselen met de actieve bodemlaag door uitbochting van geulen. De uitbochting ontstaat doordat de geul aan de buitenbocht erodeert en aan de binnenbocht sedimenteert. Aan de binnenbocht wordt dus telkens vervuild slib opgeslagen en aan de buitenbocht erodeert vers (niet-verontreinigd?) bodemmateriaal. Het proces van uitbochten eindigt op een bepaald moment als er een nieuwe geul ontstaat die de oude opruimt. Het vervuilde slib zou pas bij hernieuwde aansnijding van de oude bocht weer vrij kunnen komen.

behoort bij: Notitie GWA0-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 6

4. Nadere motivatie en gevolgen amendering cijfers beleidsplan

4.1. Toevoeging grenslaag tussen de waterfase en de bodemfase

Om de discrepantie tussen de slibrandverhouding in de waterfase en de bodemfase te verklaren, hebben we moeten aannemen dat, ongeacht het getij, steeds eenzelfde hoeveelheid slib tot de waterfase hoort en dat bij kentering tijdelijk een dun laagje puur slib op de bodem afgezet wordt.

De consequentie hiervan is dat de slibhoeveelheid waarmee we voor de waterfase moeten rekenen een factor twee of drie toeneemt, omdat we het slib in de waterfase moeten bepalen uit de gemeten maximum concentraties, en niet uit het gemiddeld gehalte. Het bestaan en het gedrag van het aangenomen dunne laagje slib is overigen heel aannemelijk, zoals blijkt uit appendix A.

4.2. Verhoging omzetsnelheid actieve bodemlaag

De geulen en platen van het Westerschelde-estuarium zijn voor een belangrijk deel bedekt met ribbels of onderwaterduinen. De beweging van de ribbels en duinen vindt plaats doordat zand van de stroomwaartse zijde opgenomen wordt en aan de stroomafwaartse zijde afgezet wordt. Het bodemmateriaal komt daarmee intensief in aanraking met de waterfase.

Over de zandgolven in de (Ooster- en) Westerschelde is weinig bekend. Totaal zijn er 3 bruikbare metingen beschikbaar, waarvan de resultaten in tabel 4 zijn weergegeven.

behoort bij: Notitie GWA0-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 7

Tabel 4. Gegevens over ribbel- en duinvorming in de Ooster- en Westerschelde.

Locatie	water- diepte m	water- snelheid m/s	ribbel- hoogte m	ribbel- lengte m	ribbel- snelheid m/dag
O'schelde Stavenisse	6,7-9,8	0-1,15	0,9	22	0,15
Pl.v.Ossenisse					
landstelling	0 -3,1	0-1,0	0,27	5,5	2,3
zeestelling	0 -2,1	0-0,8	0,16	6,0	0,8

Als we aannemen dat bij de verplaatsing van een ribbel over zijn lengte een bodemlaag van de halve ribbelhoogte omgewoeld is, dan hebben we voor uitwisselingssnelheid van de bodem en de waterfase de volgende gegevens nodig:

1. maatgevende ribbelhoogte
2. maatgevende ribbellengte
3. verplaatsingssnelheid van de ribbels.

Gebaseerd op de summieri gegevens van tabel 4 zijn de volgende waarden schat:

Ad 1. De maatgevende ribbelhoogte kan bepaald worden uit de verhouding waterdiepte ribbelhoogte. Een grove schatting op basis van de tabel is ribbelhoogte/waterdiepte 1:10. Dit leidt bij een gemiddelde diepte van de Westerschelde van 10 m tot een maatgevende ribbelhoogte van 1 m.

Ad 2. De maatgevende lengte kan bepaald worden uit de verhouding lengte/hoogte. Een grove schatting op basis van de tabel is 1:25. Dit leidt bij een gekozen hoogte van 1 m tot een lengte van 25 m.

Ad 3. De maatgevende snelheid is bepaald door te veronderstellen dat de bodemtransporten onafhankelijk zijn van de ribbelhoogte. De ribbels verplaatsen zich dan qua snelheid omgekeerd evenredig met de hoogte.

Als we uitgaan van een ribbelhoogte van 1 m dan is uit tabel 5 de volgende schatting te halen voor de ribbelsnelheid.

behoort bij: Notitie GWAO-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 8

Tabel 5. Bepalen ribbelsnelheid genormeerd naar 1 m.

Locatie	ribbelhoogte	correctie naar hoogte/van 1 m	gemeten ribbelsnelheid	ribbelsnelheid gecorr. naar 1 m
Oosterschelde	0,9	0,9/1	0,15 m/d	0,145 m/d
Ossenisse LS	0,27	0,27/1	2,30 m/d	0,62 m/d
Ossenisse ZS	0,16	0,16/1	0,80 m/d	0,13 m/d

Aangehouden is een snelheid van 0,13 m/d. Hieruit volgt een verplaatsingsduur van $25/0,13 = 192$ dagen. Resumerend schatten we dat de actieve bodemlaag van 0,5 m (halve ribbelhoogte) eens per half jaar uitwisselt met de waterfase. We kunnen dit afzetten tegen het beleidsplan.

Uit tabel 1 en 2 is af te leiden dat volgens het beleidsplan een laag met een 1 m dikte 1x per 3,2 jaar omgezet wordt. De huidige schatting is dat een laag van 0,5 m 4x per jaar omgezet wordt.

De consequentie hiervan is:

1. dat de buffer in de actieve bovenlaag de helft kleiner is en dat
2. de uitwisseling sterk versneld wordt, waardoor de verontreinigingen in de actieve bodemlaag van 0,5 m de concentratie aan verontreinigingen in de waterfase met een kleine tijdsverschuiving zullen volgen.

De hoge omzetsnelheid van de actieve bodemlaag (4 x jaar) houdt overigens niet in, dat de bodem na sanering van de Belgische lozingen ook binnen een kwartaal schoon is. De onttrekking van slib uit het estuarium is hiervoor te klein. De slibmassa die gemoeid is met resuspensie en sedimentatie is 5 x zo groot als de natuurlijke en kunstmatige onttrekking waardoor deze dominant is. Om de verblijftijd (reinigingsduur) van de Westerschelde te bepalen schematiseren we de Westerschelde tot een reservoir volledig gevuld met slib, waarin de toevoer uit zee en uit de rivier in evenwicht is met afvoer naar 1) de zee, 2) de schorren en slikken, 3) de diepe bodemlaag en 4) naar land door baggeren van slib.

behoort bij: Notitie GWA0-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 9

Er zijn nu 2 mogelijkheden:

1. Schoon en vuil slib mengen niet en er wordt alleen schoon slib toegevoerd en vuil slib afgevoerd. In de reactor chemie wordt dit aangeduid als propstrooming. In formule vorm is propstrooming te beschrijven met:

$$t = \frac{M}{T} \quad (1)$$

t: verblijftijd c.q. tijd voor volledige reiniging

M: de slibmassa in het reservoir

T: de slibonttrekking

2. Schoon en vuil slib mengen perfect er wordt een mengsel van vuil en schoon slib afgevoerd. In de reactor chemie wordt dit aangeduid als perfecte menger. In formule vorm is de perfecte menger te beschrijven met:

$$M \frac{dM_p}{dt} = T M_p \quad (2)$$

M_p: percentage vuil slib

Deze vergelijking heeft als oplossing:

$$M_p = e^{-\frac{(T/M)t}{1}} \quad (3)$$

Met de vergelijkingen (1) en (3) is een eerste schatting te maken van de responsie tijd van de actieve bovenlaag.

Uit tabel 1 volgt dat de 0,5 m dikke actieve bodemlaag een slibmassa van 11 10⁹ kg slib bevat. De onttrekkingen zijn volgens het beleidsplan en de slibbalans.

- afvoer naar zee	0,2 10 ⁹ kg/jaar
- afvoer naar Saeftinge	0,4 10 ⁹ kg/jaar
- netto onttrekking baggerwerk	1,0 10 ⁹ kg/jaar
- berging in diepe bodemlaag	0,4 10 ⁹ kg/jaar
totaal	2,0 10 ⁹ kg/jaar

behoort bij: Notitie GWAO-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 10

In de onderstaande tabel is op basis van (1) en (3) een verblijftijd berekend

Tabel 6. Responsietijd actieve bodemlaag.

Reinigingsgraad	Propstroming	perfecte menger
63%	-	6 jaar
87%	-	11,0 jaar
ca. 100%	6 jaar	25 jaar

De werkelijkheid zal meer op een perfecte menger lijken dan op een propstroming. We kunnen voor de actieve bodemlaag op grond van deze cijfers dan ook een reinigingsduur van 10 tot 20 jaar verwachten. Van cardinaal belang in deze berekening is de onttrekking door baggerwerken. Valt deze geheel weg dan nemen de responsietijden toe tot 20 à 30 jaar.

4.3. First in - last out principe diepe bodemlaag

De responsietijd van de diepe laag is veel groter. Hier kunnen we uitgaande van formule (1) en tabel 2 en 7 (let op de afwijkende dimensies van tabel 7) een responsietijd van zeg 500 jaar verwachten.

De consequentie van het first in - last out principe voor de Westerschelde is dat door de lange responsieduur van het systeem (nog geen volledige vervuiling) nog jaren vervuild slib ingenomen wordt en schoon slib door de diepe bodemlaag afgegeven wordt. Pas op termijn van orde 500 jaar (zie tabel 1 en 2) is de hele bodem omgezet, dus vervuild. Stellen we het begin van de vervuiling op 1950, dan zal in de jaren 2400 tot 2500 de bodem, die in 1950 vervuild was, geëxposeerd worden aan de waterfase. Per jaar zal dan bij gelijkblijvend gedrag $0,4 \cdot 10^9$ kg vervuild slib afgegeven worden en $0,1 \cdot 10^9$ schoner slib opgenomen worden.

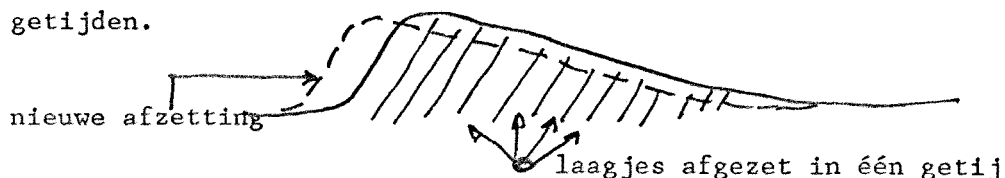
Dit gedrag is niet relevant voor het model gegenereerd in Sawes kader omdat hier de voorspelduur kleiner dan zeg 1 eeuw is. Relevant is dat de bodemlaag vervuild slib inneemt en schoon slib afgeeft door het first in last out principe.

behoort bij: Notitie GWA0-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 11

De uitwisseling van actieve bovenlaag werkt overigens niet volgens het first in last out principe, maar meer volgens het principe van een perfecte menger (zie onderstaande figuur). De afzetting van vervuild slib vindt plaats van het front van de randribbel en door erosie wordt er telkens een laagje slib afgeschaafd, dat slib bevat dat afgezet is gedurende een groot aantal vorige getijden.



———— oorspronkelijke zandribbel

- - - - zandribbel na de verplaatsing gedurende één getij

5. Cijfers t.b.v. het model

In de volgende tabellen (7 en 8) worden cijfers gegeven voor de uitwisseling van slib tussen de verschillende lagen. T.b.v. het model zijn alle gegevens teruggerekend naar grammen/m² of grammen m² per dag. Als er twee cijfers aangegeven zijn, geldt het eerste cijfer voor het beleidsplan en het tweede (de onderstreepte) voor waarden, bepaald in deze notitie.

Tabel 7. Slibberging in de waterfase (incl. eventuele grenslaag), de actieve bodemlaag en de diepe laag.

Vak	berging waterfase in 10 ³ gr./m ²	berging in actieve laag in 10 ³ gr.m ²	berging in diepe laag in 10 ³ gr./m ²	oppervlak in 10 ⁶ m ²
Zeeschelde	1,3 — <u>3,3</u>	187 — <u>91</u>	1665 — <u>1757</u>	23
Oost	0,72 — <u>1,8</u>	77 — <u>38</u>	688 — <u>727</u>	60
West	0,71 — <u>1,8</u>	75 — <u>37</u>	675 — <u>714</u>	174

behoort bij: Notitie GWAO-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 12

Tabel 8. Uitwisseling van slib tussen de diverse lagen t.g.v. resuspensie en sedimentatie

Vak	uitwisseling tussen de waterfase en de actieve laag in grammen per m ² per dag	uitwisseling tussen actieve laag en diepe laag in grammen per dag per m ²
Zeeschelde	658 — <u>2333</u>	<u>55</u>
Oost	64 — <u>213</u>	<u>4,5</u>
West	77 — <u>233</u>	<u>3,2</u>

N.B.:

1. Van de getallen gegeven in tabel 6 en 7 worden de onderstreepte waarschijnlijk geacht dan de in het Beleidsplan gepresenteerde cijfers (de niet onderstreepte waarden). Het verdient aanbeveling bij deze cijfers een marge van tenminste 50% aan te houden.
2. Voor de actieve bovenlaag geldt dat de omzetsnelheid van tabel 7 nog verhoogd moet worden met de baggerwerken van tabel 3.
3. Het gedeeltelijk subjectieve karakter van alle genoemde cijfers maakt een gevoeligheidsonderzoek met het waterkwaliteitsmodel nodig. Via het gevoeligheidsonderzoek kan enerzijds vastgesteld worden in hoeverre de slibbeweging bepalend is voor de waterkwaliteit en daarmee in hoeverre de ruime marges in de genoemde cijfers van belang zijn. Via het gevoeligheidsonderzoek kan anderzijds vastgesteld worden welk aanvullend onderzoek naar de slibbeweging nodig kan zijn om tot betere resultaten te komen.

behoort bij: Notitie GWA0-90.1260

datum: 21 mei 1990

bladnr: 13

6. De situatie voor de slikken en schorren (ondiepe delen)

In dit hoofdstuk behandelen we het morfologisch gedrag van ondiepe delen als slikken en schorren. Bij de behandeling van de ondiepe delen zijn de platen uitgesloten. Samen met de geulen vormen de platen het sterk dynamische deel van het estuarium dat al eerder behandeld is in hoofdstuk 1 t/m 5

Het morfologisch gedrag over de seizoenen van de slikken is zeer slecht bekend. Momenteel wordt hiernaar uitgevoerd onderzoek uitgewerkt.

We vermoeden uit anekdotische mondelinge verslagen dat het gedrag seizoens afhankelijk is en we kennen verder een orde van grootte van de sedimentatie en erosie

Uit het weinig materiaal dat we hebben is het volgende beeld samen te stellen:

- Begin april tot eind september sedimentatie orde 1 à 2 cm
- Begin oktober tot eind maart erosie door golven orde 1 à 2 cm

Dit leidt met een slibpercentage van 10 tot 50% reg. gemiddeld 30% tot de volgende sedimentatie en resuspensiecijfers:

april → sept sedimentatie 24 gr/dag/m² slib

okt → mrt resuspensie 24 gr/dag/m² slib

Het morfologisch gedrag over de seizoenen van de schorren is eveneens slecht bekend. De beste gegevens over schorgedrag zijn afkomstig uit Saeftinge dat al jaren orde 2 cm per jaar omhoog komt. De rijzing van het schor komt voornamelijk in de winter tot stand; omdat het schor dan overspoeld wordt bij storm.

Transformeren we de gegevens van Saeftinge (1 à 2 cm rijzing) naar de overige schorren die eveneens orde 50% slib bevatten dan maakt dit de volgende cijfers aannemelijk. okt - mrt sedimentatie orde 50 gr/m²/schor/dag

Met de hieronder weergegeven oppervlakte van schorren en slikken zijn de sedimentstromen van een naar slikken en schorren te berekenen.

Schoroppervlakte	Nederland 2700 ha	België 960 ha
Slikoppervlakte	Nederland 3000 ha	
(plaatareaal	Nederland 5300 ha)	

Appendix A. Ontstaan slibrijke grenslaag tussen zandbodem en waterfase

Om de discrepantie tussen de slib/zandverhouding (1 op 1) in de waterfase en de slib/zandverhouding (1 op 20; zie tabel 1) in de bodemfase te verklaren, hebben we aangenomen dat, ongeacht het getij, telkens een vrijwel dezelfde hoeveelheid slib tot de waterfase blijft behoren.

Dit is in schijnbare tegenspraak met de feiten, doordat de slibconcentratie wisselt met het getij. Op maximum eb- en vloedstroom zijn de slib- (en zand) concentraties het hoogst, om sterk te dalen gedurende de kentering.

Deze schijnbare tegenspraak verdwijnt als we twee schematisaties maken.

1. Rond de kentering zet zich eerst al het zand af en wel als laag boven op de bestaande zandlaag, pas daarna zet ook het slib zich af en wel als een aparte grenslaag.
2. Als de snelheden na kentering toenemen, wordt (buiten de slikken en schorren) de bovenliggende grenslaag eerst weer volledig opgenomen, ook in de gebieden waar sedimentatie plaatsvindt.

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

Tabel 9. Slibpercentage < 50 μ en bodemoppervlak (exclusief Land van Saef-tinghe).

ha	percentage	% x ha	% x ha cummulatief	ha cummu- latief	% cummu- latief
12800	1	12800	12800	12800	1
8500	3	25500	38300	21300	1,8
2500	8	20000	58200	23800	2,4
2050	14	28700	87000	25850	3,4
1400	35	49000	136000	27250	5
360	66	23760	159760	27610	5,8
10	75	750	160500	27620	5,8

De tijdens kentering afgezette laag slib is maar dun. Om de gedachte te bepalen veronderstellen we dat de waterfase tijdens maximum stroom 100 mg/l zand

behoort bij: 11 april 1989

datum:

bladnr:

15

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

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

Uit de laagdikte van het per kentering afgezette zand is overigens ook een schatting te maken van de maximum sedimentatie en erosie. Per jaar komen 1410 kenteringen voor. Als er een laag afgezet kan worden van 0,9 mm zand, kan eenzelfde laag opgenomen worden. De laagdikte van 0,9 mm en het aantal kenteringen (1410) leveren een maximum erosie en sedimentatie van $\pm 1,25$ m. Dergelijke waarden worden in de natuur ook gevonden.

De aanname van de afzetting van een grenslaag, d.w.z. de uitschifting van zand en slib en de aanname dat de grenslaag na de kentering erodeert, zijn te onderbouwen.

- Aanname 1: uitschifting zand en slib aan de bodem

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

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

behoort bij:

11 april 1989

datum:

16

bladnr:

- De concentratieverdeling tijdens maximum stroom

De vorm van de concentratievertikaal is volgens de literatuur te beschrijven met:

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

Hierin is:

C_h de concentratie op hoogte h

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

h de waterdiepte boven het referentievlak

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

w de valsnelheid, waar voor zand $w_z = 0,02$ m/s een reële waarde is en voor slib $w_s = 0,002$ m/s reëel is.

Verder geldt:

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

Hierin is

C : de referentieconcentratie

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

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

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

behoort bij: 11 april 1989

datum:

bladnr:

17

Uitgaande van eenzelfde referentieconcentratie is met (3) en (1) en met (4) en (1) de volgende verdeling te berekenen:

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

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

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

We kunnen e.e.a. kwantificeren met de volgende berekening:

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

$$M = \int_{hb}^h Ch \, d(h) \quad (5)$$

Als we op tijdstip t na het moment van kentering kijken is een onderste laag zand of slib neergeslagen met een dikte $h=w.t.$ Voeren we nu in (5) de varia-

behoort bij: 11 april 1989

datum:

bladnr:

18

bele t in i.p.v. h dan geldt met de introductie van (1) in (5):

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

Hiermee is de neergeslagen hoeveelheid als functie van de tijd te bepalen als we $\bar{C}$ zand 100 mg/l en $\bar{C}$ slib op 100 mg/l stellen volgt (met tussen haakjes de cumulatieve hoeveelheden):

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

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

- Aanname 2: Snelle erosie van slib na kentering

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

Voor de erosie van zand moet de bodemschuifspanning een zekere drempelwaarde overschrijden τ_{crit} . In de literatuur vinden we voor zand met een medi-

behoort bij: 11 april 1989

datum:

bladnr: 18

ane korreldiameter van 200 μ een $\tau_{crit.}$ van 0,2 N/m².

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

$$\frac{\tau_M}{\tau_t} = M_s (\tau - \tau_{crit.})$$

Hierin is:

M_s een coëfficiënt met als waarde voor vers slib 10⁻² s/m

τ de schuifspanning

$\tau_{crit.}$ drempelschuifspanning voor erosie met voor vers slib als waarde 10⁻⁴ N/m²

Uit de formule is te berekenen dat bij 0,2 N/m² de erosie van slib 210⁻³ kg/s bedraagt. De bodemschuifspanning van 0,2 N/m² wordt over het algemeen 20 minuten na kentering overschreden. Nemen we aan dat de sliberosie over deze periode gemiddeld $\frac{1}{2} \times 2 \cdot 10^{-3}$ kg bedraagt, dan kan er 1,2 kg slib geërodeerd zijn. Dit is meer dan de 3/4 kg waarvan we aannamen dat ze per getij afgezet wordt.