

**DE ZANDBEWEGING
IN HET
GETUGEBIED**

door P. H. J. Morra

RUKSWATERSTAAT • STUDIEDIENST • DIRECTIE BENEDENRIVIEREN
RAPPORT N^o 11 1952

Rijkswaterstaat. Directie Benedenrivieren
afdeling Studiedienst.

's-Gravenhage 26 November 1952.

Nota R.H.J. Morra
betr. Zandbeweging in tijgebied.
(niet intern)

1. Bijgaande nota van de Technisch Opzichter A. R.H.J. Morra is te beschouwen als een poging om de theorie der zandbeweging geschikt te maken voorgetijgebieden met zandbodems. Tevens is zij een toetsing dezer theorie aan waarnemingen.

2. Voor de toetsing bestaat tweërlei gelegenheid:

a. de stroomsnelheidsmetingen met de zandtransportmetingen; hiervoor werden nieuwe metingen op de Oosterschelde verricht (homogeen water) en op het Volkerak (enigszins brak water).

b. de peilingen en daarvoor verrichte kuberingen; hiervoor werd het terrein van de Oosterschelde gekozen, nota D 484 (1947) van de Technisch Opzichter Jac. Jaring.

Onder a is nog te rekenen een toetsing aan de nota no D 279 van 1940, van de hand van Ir. van der Velde, handelend over de gemeten zandtransporten in de Oosterschelde beoosten Zierikzee op 10 cm boven de bodem.

3. Zoals uit de literatuurlijst blijkt is de methode van het berekenen van zandtransporthoeveelheden nog uiterst nieuw. In 1947 belastte ik de heer Morra met dit onderzoek, waaromtrent ik destijds grote verwachtingen koesterde, en thans kan worden gezegd dat deze verwachtingen inderdaad gewettigd waren. De nieuwe formules der Amerikanen Kalinske, Einstein Jr. e.a. blijken ook voor het tijgebied met zandbodems en homogeen water zeer bevredigende uitkomsten te kunnen geven. Zelfs voor het Volkerak, waar het water niet geheel homogeen is en dus de stroomverticaal enigszins afwijkt van het normale, blijkt de berekening nog goed toelaatbaar.

4. Voor een tijgebied bepalen de verschillen in zandtransport bij eb en vloed de richting waarin de z.g. reststroom van het zand zich beweegt. De grootte van deze reststroom werd vroeger bepaald met metingen, doch men voelde zich daarbij nooit geheel zeker, omdat dagelijkse ongelijkheden van het getij gemakkelijk zulke verschillen tussen eb- en vloedhoeveelheden konden beïnvloeden. Veelal werd dus 2 x of 3 x op elk meetpunt gemeten. Thans blijkt uit de berekeningen dat de hoofdzaken der zandbeweging in de Russenwateren (en elders vermoedelijk ook) toch met behulp dezer metingen vrij goed bekend werden.

AAN: de heer Hoofdingenieur-Directeur
in de Directie Benedenrivieren.

5. Uitschuring en aanzanding werd vroeger (en ook nog thans) door vergelijking van peilcijfers bepaald. De berekening kan dit bepalen door het transportvermogen in de doorsneden boven en beneden een riviervak te bepalen. Neemt dit vermogen toe van boven naar beneden dan zal zand van de bodem worden opgenomen (uitschuring), neemt het af dan zal zand aan de bodem worden toegevoegd (aanzanding). Hieruit volgt ook dat aanzandingen kunnen voorkomen bij grote watersnelheden en uitschuringen bij tamelijk zwakke.
6. Een groot voordeel van het gebruik der zandformules is dat men de factoren die de zandverplaatsingen beïnvloeden, als daar zijn: diepte, korrelgrootte, turbulentie, ruwheid bodem, temperatuur, enz. goed leert onderscheiden.
7. Opzichter Haring kwam tot een zandverlies van de Oosterschelde becosten Zierikzee van 4 à 5 miljoen m³/jaar. De heer Morra komt tot hetzelfde mits een ruwheid van de bodem, uitgedrukt in de n van Manning van 0,020 wordt aangehouden. Dit is een logisch getal, doch het is duidelijk dat wij thans meer moeten zien te weten te komen omtrent de ruwheids coëfficiënten.
8. Bijlage T 4 (Oosterschelde) geeft een goede indruk omtrent de overeenstemming der zandmetingen en berekeningen. In het hart van getij is die overeenstemming goed, doch nabij de kenteringen iets minder goed. Een groot bezwaar is dit niet, daar zandtransport hoofdzakelijk plaats heeft in het hart van het getij. Voor het Volkerak (U 3-5-b) is de overeenstemming eveneens goed. Dit kan op eenvoudige wijze worden bereikt door de stroomparabool de graad te geven welke gemeten werd. Voor het Oosterscheldewater was deze graad ongeveer 8, voor het Volkerak 5½ à 7.
9. Bijlage T 11 geeft ten slotte de vergelijking van de gemeten en berekende zandverticalen voor een bepaald punt (Schaar van Colijnsplaat). Omt men uit van een gemeten zandtransportcijfer op 0,10 m boven de bodem, dan is de overeenstemming goed over de volle hoogte (gemerkt e). Kan men niet uitgaan van zo'n gemeten punt der zandverticaal doch moet men geheel afgaan op de theorie dan wijkt de vorm van de berekende krommen nog vrij veel af van de werkelijke, hoewel de totale zandverplaatsing wel goed is (inhoud tussen de kromme en de coördinaten).
10. Hoewel dus de theorie zowel als de meettechniek nog verbeterd kunnen worden - zij beïnvloeden elkaar bij het voortgaand onderzoek - is de mogelijkheid thans aanwezig de interessante uitschuringen en aanzandingskwesities van de getijgebieden grondig te leren kennen, i.c. bij de voorgenoemde werken te voorspellen. Binnenkort hoop ik U b.v. een nota betr. de te verwachten uitschuring van de Noord te doen toekomen, zomede van de te verwachten zandafzettingen op de Nieuwe Merwede, de Oude Maas, enz.
11. Een exemplaar der nota zond ik aan het hoofd van de Centrale Studiedienst.
12. Ik geef U in overweging de hierbijgaande nota na inzage in de Centrale Bibliotheek te doen opnemen.

De Hoofdingenieur A.

belest met de Studiedienst.

J. van den

DE ZANDBEWEGING IN HET GETIJGEBIED

door

R.H.J. Morra.

-.-.-

Inhoud.

1. Inleiding
2. Beknopt overzicht van de theorie van de zandbeweging in stationaire stromen onder evenwichtsvoorwaarden.
 - A. Zwevend transport.
 - B. Het rollend transport.
3. Toepasbaarheid in het getijgebied.
4. De gebruikte formules en wijze van berekening.
5. De zandtransportberekeningen van de Oosterschelde
6. Toetsing der berekeningen.
7. Nader onderzoek naar de toepasbaarheid van de zandformules voor stationaire stromen in het getijgebied.
8. Onderzoek naar de toepasbaarheid in het getijgebied wanneer er dichtheidsverschillen zijn.
9. Samenvatting.

par. 1. Inleiding.

Het doel van deze nota is om na te gaan of het mogelijk is om aan de hand van op theoretische gronden steunende formules voor stationnaire stromen berekeningen te maken van de zandverplaatsingen in het getijgebied met een voor praktische doeleinden voldoende mate van nauwkeurigheid, dus waarvan de uitkomsten in ieder geval de tendens en zo mogelijk de juiste hoeveelheden weergeven.

Als uitgangspunt dienen de onder Ht.(1) en (2) genoemde nota's. Hierin werden aan de hand van de turbulentietheorie formules voor de zandgehalteverticaal en het hieruit volgende zwevende transport, alsmede voor het rollende transport afgeleid. Beide nota's steunen op in hoofdzaak Amerikaanse publicaties van de laatste tijd en gelden alleen voor stationnaire stromen onder evenwichtsvoorwaarden. De eerste voorwaarde is in het tijgebied niet en de laatste in het algemeen niet aanwezig omdat er vrijwel altijd sprake is van aanzanding of uitschuring. Toch zal blijken, dat het desondanks mogelijk is de zandformules voor ^{niet}stationnaire stromen toe te passen. Bij de afleiding van bovenbedoelde formules voor stationnaire stromen speelt de snelheidsverticaal een zeer belangrijke rol. Vertoont de gemeten snelheidsverticaal grote afwijkingen t.o.v. de logaritmische of parabolische snelheidsverticaal, dan kan men ook grote afwijkingen in de zandgehalteverticaal verwachten. Dit is voornamelijk het geval wanneer er grote verschillen in dichtheid van het water optreden (brakwatergebied).

Wil men de formules ook toepassen voor het tijgebied, dan is het noodzakelijk om de volgende concessies te doen:

1. De stromen in tijgebied worden van uur tot uur als stationnair beschouwd.
2. Aangenomen wordt, dat er evenwicht is (geen uitschuring, geen aanzanding).
3. Het bodemmateriaal heeft geen cohesie (dus geen slib).

De eerste concessie is wel aanvaardbaar voor de grotere snelheden, doch niet voor de kleinere waar de versnelling c.q. de vertraging een grote rol

speelt. Voor de zandbeweging zijn deze kleinere snelheden echter van minder belang, zodat over dit bezwaar heen gestapt kan worden. De tweede concessie houdt in, dat het water de bij een bepaalde snelheid behorende verzadigings-toestand heeft bereikt. Is de werkelijke zandverplaatsing minder dan de berekende, dan zal dit tekort aan de bodem onttrokken worden en treedt er uitschuring op. In het tegenovergestelde geval zal het teveel bezinken, dus is er sprake van aanzanding.

Het is nu de bedoeling om met behulp van de volgende gegevens een zandtransportberekening op te zetten:

1° de optredende stroomsnelheden.

2° de diepte.

3° de korrelgrootte van het bodemmateriaal.

Hierna zullen de uitkomsten der berekeningen getoetst worden aan de werkelijkheid. De toetsingsmogelijkheden zijn tweërlei: metingen en inhoudsveranderingen.

Als te beschouwen gebied is de keus gevallen op de Oosterschelde becoosten Zierikzee, omdat hier geen noemenswaardige dichtheidsverschillen aanwezig zijn, omdat in dit gebied zeer veel gemeten is en omdat hier ook de inhoudsveranderingen in de loop der jaren bekend zijn. We beschikken dus over de benodigde gegevens en 2 toetsingsmogelijkheden (par.5 en par.6). Bovendien zijn er in 1951 een tweetal metingen verricht speciaal met het doel een meer gedetailleerde toetsing te kunnen verrichten waarvan één meting hier besproken wordt (par. 7.)

Aangezien dit een eerste onderzoek betreft zijn de berekeningen van de Oosterschelde en de toetsing van een der 2 metingen van 1951 alsmede de gebruikte hulpgrafieken, die ter vereenvoudiging van het rekenwerk dienen, in extenso bijgevoegd om het teruggrijpen bij latere berekeningen te vergemakkelijken.

Aan het slot volgt nog een onderzoek naar de zandbeweging voor het geval er wel dichtheidsverschillen optreden (par. 8).

In par. 9 wordt een samenvatting gegeven.

Terwille van de overzichtelijkheid is de tekst beknopt gehouden en zijn de bijlagen onderwerpsgewijs gebundeld en van een letter voorzien.

Bijlage A : hulpgrafieken voor de berekeningen.

- " B : algemene gegevens Oosterschelde.
- " C : rekenformulieren berekening A.
- " D : " " " D.
- " E : M_b meetpunten raai 3
- " F : M_b 0.10 " " 3
- " G : M_r " " 3
- " H : M_b " " 4c
- " I : M_b 0.10 " " 4c
- " K : M_r " " 4c
- " L : M_b " " 6
- " M : M_b 0.10 " " 6
- " N : M_r " " 6
- " O : M_b , M_b 0.10, M_r voor gehele raai 3
- " P : idem " " 4c
- " Q : idem " " 6
- " R : verband $\frac{C}{n}$ en M_b voor de raaien 6 en 4c
- " S : staten met einduitkomsten
- " T : meting Oosterschelde van 3 October 1951
- " U : meting Volkerak van 28 September 1951.

De onderstreepte bijlagen zijn de voornaamste waarin op een of andere wijze de resultaten zijn aangegeven.

Opmerking. In deze nota wordt gebruik gemaakt van de parabolische snelheidsverticaal omdat hiermede in het beginstadium van dit onderzoek is gewerkt en een overgang naar de logaritmische snelheidsverticaal zeer veel werk met zich mee zou brengen, temeer daar de uitkomsten hierdoor niet essentieel worden beïnvloed.

par. 2. Beknopt overzicht van de theorie van de sandbeweging in stationnaire stromen onder evenwichtsvoorwaarden.

A. Zwevend transport.

De differentiaalvergelijking die de sandbeweging in stationnaire stromen beschrijft luidt:

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{\partial}{\partial h} \left(-\varepsilon_h \frac{\partial N}{\partial h} \right) - c \frac{\partial N}{\partial h} - \frac{\partial}{\partial x} \left(-\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) - v \frac{\partial N}{\partial x} \quad (1)$$

welk voor evenwichtsvoorwaarden (dwz. geen uitschuring, geen aansanding) overgaat in

$$0 = - \frac{\partial}{\partial h} \left(-\varepsilon_h \frac{\partial N}{\partial h} \right) - c \frac{\partial N}{\partial h} \quad (2)$$

waarbij termen met $\frac{dN}{dx}$ verwaarloosd worden omdat $\frac{dN}{dx} \ll \frac{dN}{dh}$. Ook is bekend dat

$$\tau = \varepsilon_h \frac{d(\rho V)}{dh} ; \quad (3)$$

uit (2) en (3) is af te leiden

$$\ln \frac{N_h}{N_{h'}} = -c \int_{h'}^h \frac{1}{\varepsilon_h} dh \quad (4)$$

en

$$\varepsilon_h = \frac{\tau}{\frac{d(\rho V)}{dh}} \quad (5)$$

Bij gebruik van de parabolische snelheidsverdeling

$$v_h = v_1 h^{1/q} \quad (6)$$

volgt

$$\varepsilon_h = \frac{g\sqrt{HI} \cdot q^2 H(1-z)s \frac{q-1}{q}}{C(q+1)} \quad (7)$$

en

$$\varepsilon_m = \frac{H \sqrt{HI} s}{C} \quad (8)$$

waarin $s = 1.62 q$ voor $q \geq 5$

Voor de logarithmische snelheidsverdeling van von Kármán in vereenvoudigde vorm:

$$v_h = v_m + \frac{\sqrt{gHI}}{k v_m} (1 + \ln z) \quad (9)$$

volgt

$$\xi_h = kH \cdot \sqrt{gHI} (1-z)z \quad (10)$$

en

$$\xi_m = \frac{kH \sqrt{gHI}}{6} \quad (11)$$

Uit (10) en (4) volgt een formule voor de zandgehalteverticaal

$$\frac{N_z}{N_a} = \left(\frac{1-z}{z} \frac{a}{1-a} \right)^{\frac{t}{k}} \quad (12)$$

en uit (11) en (4) volgt

$$\frac{N_{zb}}{N_{ab}} = e^{-6 \frac{t}{k} (z-a)} \quad (13)$$

De index b duidt op een benadering omdat hier ξ_m gebruikt is.

Tenslotte volgt uit (8) en (4)

$$\frac{N_z}{N_a} = \left[\frac{(1-z)^{1/q} e^{-(q+1)z^{1/q}}}{(1-a)^{1/q} e^{-(q+1)a^{1/q}}} \right]^{t/k} \quad (14)$$

Deze formules voor de zandgehalteverticaal geven alleen de verhoudingen, dus niet de absolute waarde.

Teneinde nu toch de absolute waarde te leren kennen moet dus een punt van de gehalteverticaal gegeven zijn.

Kalinske ontwikkelt, op grond van een waarschijnlijkheidsbeschouwing een verband tussen het bodemmateriaal en het zwevend materiaal voor een bepaalde stromingstoestand, lit.(1).

Deze formule luidt:

$$\frac{N_{ob}}{\Delta F(c)} = \frac{A}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{2w_c} e^{-w_c^2} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{w_c} e^{-w^2} dw \right) \right] \quad (15)$$

waarin $w_c = \frac{t_c}{\sqrt{2k^2}}$

De constanten A en k , zijn gevonden door van een groot aantal gehalteverticalen door extrapolatie met behulp van (13) N_{ob} te bepalen en daarna (15) aan te passen waaruit blijkt, dat (15) qua vorm redelijk voldoet terwijl $A = 39$ en $k^2 = 0.27$. (Bijlage A 1).

Deze N_{ob} is dus een vrij fictieve waarde, temeer daar (13) nabij de bodem afwijkingen vertoont in die zin, dat de gehalten in werkelijkheid groter zijn, een en ander ten gevolge van het gebruik van ξ_m .

Het is nu dus mogelijk om met behulp van (13) en (15) een poging te wagen te kwantitatieve bepaling van de zandgehalten, zonder dat zandmetingen verricht worden. Verg. (12) leent zich niet tot extrapolatie naar $z = 0$. Men vindt dan $N_0 = \infty$ en $V_0 = -\infty$ (bij gebruik van (9)); (12) en (9) mogen nl. niet geëxtrapoleerd worden, omdat zij slechts gelden boven de z.g. grenslaag. Opgemerkt zij dat Einstein toch een weg heeft gevonden om tot kwantitatieve bepaling te komen. Hij extrapoleert (12) tot een hoogte van $2d$ boven de bodem en koppelt dit gehalte aan het rollend transport (wat naar hij aanneemt in de laag van $0-2d$ plaats vindt).

Aangezien zijn publicatie eerst ter beschikking kwam toen het leeuwendeel van de berekeningen die in dit rapport zijn verwerkt reeds verricht waren, is deze nieuwe zienswijze vooralsnog buiten beschouwing moeten blijven. Temeer daar de uitwerking volgens Einstein aanzienlijk bewerkelijker is, dan met de vereenvoudigde formules van Kalinske, waarbij men bovendien in overweging moet nemen, dat ook met Einstein een onzekerheid in de uitkomsten aanwezig is; zodat dit voor het tijdgebied in ieder geval tot een slechts schijnbaar grotere nauwkeurigheid in de einduitkomsten leidt.

Verg. (14) geeft op een hoogte van 0 boven de bodem eindige waarden, doch omwerking van bijlage A 1 bleek niet mogelijk, omdat de oorspronkelijke gegevens waaruit deze figuur is ontstaan niet ter beschikking stonden.

Derhalve bleef als enige mogelijkheid het gebruik van (13) en (15) om tot een kwantitatieve berekening te komen, die, zij het dan theoretisch aanvechtbaar, praktische waarde heeft.

Lijst van bijlagen.

| Bijlage | Onderwerp | N ^o Bibliotheek |
|--------------|---|----------------------------|
| A 1 t/m A 7 | Hulpgrafieken | 52.412 t/m 52.418 |
| B 1 t/m B 5 | Algemene meetgegevens Oosterschelde | 52.419 t/m 52.423 |
| C 1 t/m C 36 | Rekenformulieren berekening A | |
| D 1 t/m D 36 | Rekenformulieren berekening D | |
| E 1 t/m E 9 | Berekeningen A t/m E, M_b per meetpunt voor raai 3 | 52.424 t/m 52.432 |
| F 1 t/m F 8 | Berekeningen A t/m E, M_b 0,10 per meetpunt voor raai 3. | 52.433 t/m 52.440 |
| G 1 t/m G 5 | Berekeningen A t/m E, M_R per meetpunt voor raai 3. | 52.441 t/m 52.445 |
| H 1 en H 2 | Berekeningen A t/m E, M_b per meetpunt voor raai 4c. | 52.446 en 52.447 |
| I 1 en I 2 | Berekeningen A t/m E, M_R per meetpunt voor raai 4c. | 52.448 en 52.449 |
| K 1 en K 2 | Berekeningen A t/m E, M_b 0,10 per meetpunt voor raai 4c. | 52.450 t/m 52.451 |
| L 1 t/m L 17 | Berekeningen A t/m E, M_b per meetpunt voor raai 6. | 52.452 t/m 52.468 |
| M 1 t/m M 14 | Berekeningen A t/m E, M_b 0,10 per meetpunt voor raai 6 | 52.469 t/m 52.482 |
| N 1 t/m N 12 | Berekeningen A t/m E, M_R per meetpunt voor raai 6. | 52.483 t/m 52.494 |
| O 1 t/m O 6 | Totaal transport per raai, M_b, M_b 0,10 en M_R voor raai 3. | 52.495 t/m 52.500 |
| P 1 t/m P 3 | Totaal transport per raai, M_b, M_b 0,10 en M_R voor raai 4c. | 52.501 t/m 52.503 |
| Q 1 t/m Q 6 | Totaal transport per raai, M_b, M_b 0,10 en M_R voor raai 6. | 52.504 t/m 52.509 |
| R | M_b als functie van $\frac{c}{h}$ | 52.510 |
| S 1 1/4 | Staten met einduitkomsten | |
| T 1 t/m T 14 | Meting Schaar van Colijnsplaat | 52.511 t/m 52.524 |
| U 1 t/m U 6 | Meting Volkerak met dichtheidsverschillen. | 52.525 t/m 52.529 |

B. Het rollend transport.

Voor de berekening hiervan is gebruik gemaakt van de formule van Kalinske weergegeven in lit. (2) die luidt

$$\frac{G}{v_x \rho_{\text{zand}} D} = 2.5 \frac{\tau_c}{\tau_0} \quad (16)$$

waarin $\tau_0 = 192 \text{ d } 10^{-6} \text{ kg/m}^2$, de zg. kritische sleepkracht.

Deze formule is te vinden op bijlage A4.

Alhoewel op verscheidene punten in de ontwikkeling van deze formule bedenkingen zijn in te brengen (enkele aannames berusten b.v. op zeer weinig concrete gegevens) is het fysisch beeld wat Kalinske schildert bij de ontwikkeling van zijn gedachten aantrekkelijk te noemen, terwijl toetsing aan metingen toch bevredigend genoemd mag worden. De onzekerheden zijn uiteindelijk verwerkt in een aanpassing van enkele constanten aan de metingen, waardoor de praktische bruikbaarheid van deze formule wel vast schijnt te staan.

Einstein ontwikkelt langs geheel andere weg een bodemtransportformule en maakt hierbij evenals Meyer-Peter gebruik van een splitsing van de sleepkracht nl. in een deel, wat voor rekening komt van de wrijving en in een deel bestemd voor het zandtransport. Het voordeel hiervan is dat het verschil in een vlakke en geribbelde bodem tot uitdrukking gebracht wordt, wat uiteraard fraaier is. Kalinske maakt dit onderscheid niet en gaat uit van een vlakke bodem, doch door aanpassing van de constanten aan metingen mag verwacht worden, dat in een aantal gevallen met ribbels ook goede uitkomsten worden verkregen. Dit is bij een twaalf steekproeven gebleken. In lit. (3) worden nl. de formules van Kalinske, Meyer-Peter en Einstein onderling vergeleken, waarbij Kalinske's formule zodanig omgewerkt is, dat de sleepkracht gesplitst wordt. Voert men in Kalinske's formule de gesplitste sleepkracht in, dan vindt men na vermenigvuldiging met 2 een zeer redelijke overeenkomst met Einstein en Meyer-Peter.

Stelt men b.v. het volgende geval:

$$V_m = 1.50 \text{ m/sec}, H = 4\text{m}, C = 50, d = 500 \mu$$

dan geeft Kalinske:

$$\frac{\tau_c}{\tau_0} = \frac{192 \times 5 \cdot 10^{-4} \times 50^2}{1000 \times 1,50^2} = 0,107$$

Vlg. de grafiek van bijlage A4 volgt bij $\frac{\tau_c}{\tau_0} = 0,107$

$$\frac{G}{v_x \rho_2 g D} = 1.7 \quad G = 1.7 \times \frac{\sqrt{g} V_m}{C} \times 2650 \times 5 \cdot 10^{-4}$$

dus $G = 0,212 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$ droog gewicht

d.i. $M_r = 80 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ sec}$ zonder holle ruimte.

Vlg lit.(3), dus met gesplitste sleepkracht, is de bewerking als volgt:

$$\mu = \left(\frac{C}{21}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{D}{H}\right)^{1/4} = \left(\frac{50}{21}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{5 \cdot 10^{-4}}{4}\right)^{1/4} = 3,68 \times 0,106 = 0,39$$

$$\frac{\Delta D}{\mu I} = \frac{1,65 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 50^2}{0,39 \cdot 1,5^2} = 2,35. \text{ Uit een grafiek welke in lit. (3) opgenomen is volg}$$

$$\frac{M_r}{D \cdot \sqrt{g \Delta}} = 1,65 \quad (\text{verbeterde lijn van Kalinske}).$$

dus $M_r = 1,65 \times 11,2 \times 4,03 \times 10^{-6} = \underline{75} \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ sec}$ zonder holle ruimte.

Gebruikt men de lijn van Einstein op dezelfde grafiek dan volgt:

$$M_r = \underline{136} \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ sec}$$

Neemt men als 2e voorbeeld:

$$V = 1 \text{ m/sec} \quad H = 10 \text{ m} \quad C = 61 \quad D = 200 \mu \text{ dan geeft}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Kalinske (vlg lit.(2)) } M_r = 16 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ sec} \\ \text{verbeterde " (vlg lit.(3)) } M_r = 11 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ sec} \\ \text{Einstein (vlg lit.(3)) } M_r = 15 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ sec} \end{array} \right\} \text{ zonder holle ruimte}$$

Hoewel deze steekproeven gelegen zijn in het onderste gedeelte van de grafiek, waar weinig metingen zijn, dus bij de grotere transporten, betreft het hier geval-

len zoals in de Nederlandse rivieren normaal voor kunnen komen en welke dus praktische betekenis kunnen hebben. Kalinske geeft dus ook voor deze gevallen met ongesplitste sleepkracht overeenkomstigere resultaten als Einstein en Meyer-Peter, en betreft de verbetering als voorgesteld in lit. (3) voor praktische toepassing in hoofdzaak een elegantere oplossing, die aan de praktische uitkomsten niet veel toe of afdoet.

par. 3. Toepasbaarheid in het getijgebied.

Past men de in de voorgaande paragrafen voorkomende formules toe in het getijgebied dan betekent dit, dat men de volgende uitgangspunten aanneemt.

a de stroming is stationnair ($\frac{dv}{dt} = 0$)

b er is evenwicht ($\frac{dN}{dt} = 0$)

c de zandbeweging is stationnair in de stromingsrichting ($\frac{dN}{dx} = 0$)

d er zijn geen dichtheidsverschillen,

e de stromingstoestand, bodemmateriaal en diepte veranderen niet boven- en benedenstrooms van het beschouwde punt.

Hoe staat het nu in werkelijkheid?

Aan geen van de bovengenoemde voorwaarden wordt in tijgebied voldaan. Hoogstens kan aan d worden voldaan, wanneer men b.v. een gebied als de Oosterschelde beschouwt, waar de dichtheidsverschillen in verticale zin vrijwel niet aanwezig zijn. Toch zijn deze uitgangspunten wel aanvaardbaar, omdat het feit dat $\frac{dv}{dt} \neq 0$ in hoofdzaak belangrijk is bij kleine stromen omstreeks de kentering; bij de grotere snelheden, die voor de zandbeweging van betekenis zijn, is deze versnellingsterm ($\frac{dv}{dt}$) ondergeschikt aan de weerstandsterm, die dan van doorslaggevende betekenis is. Zoals nader zal blijken is de ongelijkheid van $\frac{dN}{dt}$ aan 0 van uitermate ondergeschikte betekenis.

Een en ander deed verwachten, dat men toch in het getijgebied, voor zover geen dichtheidsverschillen van betekenis aanwezig zijn en het beschouwde gebied niet aan al te intensieve veranderingen (grote aanzandingen c.q. uitschuringen) onderhevig is, de zandformules geldende voor stationnaire stromingen onder evenwichtsvoorwaarden voor praktische doeleinden wel mag toepassen met het uitzicht op redelijke resultaten, al zal men dit wel met enig beleid moeten doen: In de eerste plaats speelt in alle formules het verhang I een grote rol, wat zeer voor de hand ligt. In het getijgebied heeft men voor de zandberekeningen niet zo veel aan het verhang. Immers voor $I = 0$ hoeft niet $V = 0$ te gelden en

bij $V = 0$ zal in het algemeen $I \neq 0$ gelden. Derhalve zal hier gebruik gemaakt worden van de snelheid V_m , die meer rechtstreeks de zandbeweging beïnvloedt, waar bij uitgegaan wordt van de Chézy en voor het verhang

$$I = \frac{V^2}{C^2 R}$$

geschreven wordt; dus wordt elke snelheid omgezet in een weerstandsverhang, waardoor alle overige invloeden als versnellingsterm e.d. verwaarloosd worden, wat zoals gezegd praktisch alleen onjuist is omstreeks de kentering.

Blijft nog de bepaling van C . Hier is gebruik gemaakt van de uitdrukking van Manning

$$C = \frac{H^{1/6}}{n}$$

Om reken-technische redenen is er vanaf gezien om gebruik te maken van de moderne formules voor C , temeer daar deze met Manning en Strickler in behoorlijke overeenstemming zijn. Tussen Manning en Strickler bestaat geen essentieel verschil.

Ten einde de bewerkingen niet nodeloos gecompliceerd te maken is homogeen zand verondersteld en voor maatgevende korrelgrootte de gemiddelde korrelgrootte aangehouden. Dit is voor het fijne zand in het beschouwde gebied zeer wel toelaatbaar omdat de korrelgrootteverdeling tussen vrij enge grenzen ligt.

par. 4. De gebruikte formules en wijze van berekening.

Zoals in par. 2 is gemotiveerd worden dus in dit verband de volgende formules gebruikt voor de zandgehalteverticaal:

$$N_{zb} = N_{ob} e^{-15 tz}$$

en

$$N_{ob} = \Delta F(0) \frac{\Delta}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{2w_0} e^{-\frac{w^2}{c^2}} - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-w^2} dw \right) \right]$$

Hieruit valt dus het zwevende transport per seconde per m breedte te berekenen door de producten van snelheid en zandgehalte te integreren:

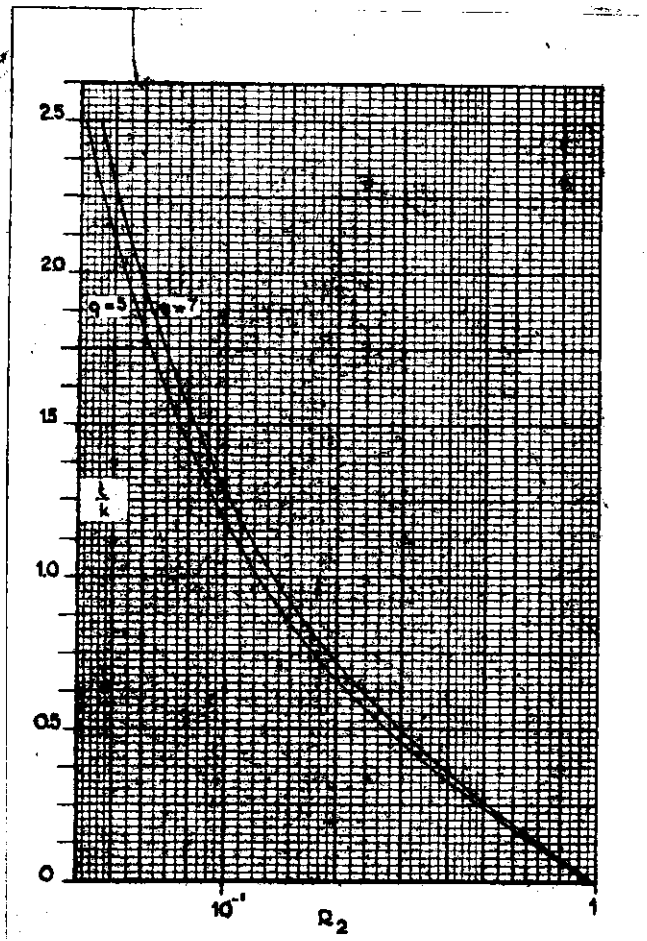
$$M_b = \int_0^1 N_{zb} \cdot V_z \cdot H \cdot dz$$

Dit geeft:

$$\boxed{M_b = N_{ob} R_2 \frac{V_z H}{m}} \quad (17)$$

waarin R_2 en N_{ob} functies zijn van dezelfde parameter t (zie lit. 1)

In onderstaande grafiek is R_2 als functie van t voorgesteld voor $q = 5$ en $q = 7$.



De snelheidsverdeling in de verticaal is in dit verband de parabolische snelheidsverdeling gebruikt en geschreven in de vorm

$$v_z = \frac{g + 1}{q} z^{1/4} v_m$$

Voor de bepaling van M_b is gebruik gemaakt van de grafiek op bijlage A 3 waar v_{ob}^2 als functie van t is gegeven.

Voor vereenvoudiging van het rekenwerk is de grafiek opgesteld van bijlage A2 voor de bepaling van t uit v_m voor verschillende waarden van H en voor $c = 0.02$ m/sec en $n = 0.024$.

$$t = \frac{c}{\sqrt{gH}} = \frac{cH^{1/6}}{\sqrt{g} n v_m}$$

In getallen met $c = 0.02$ en $n = 0.024$ werd toch van deze grafiek gebruik gemaakt en door het invoeren van een fictieve snelheid $v_m^x = \frac{0.02n v_m}{0.024 c} = \frac{n}{1.2c} v_m$

kan namelijk zal zijn, dat deze v_m^x uitsluitend gebruikt mag worden bij de grafische bepaling van t met behulp van de grafiek op bijlage A2.

Bij de bepaling van M_b , M_{bs} en M_r moet uiteraard v_m gebruikt worden.

De bepaling van M_{bs} voor een hoogte van 1 cm en breedte van 1 m geschiedt als volgt:

$$M_{bs} = M_{bs} \times v_m = M_{ob} \cdot e^{-15 tz} \times v_m \cdot 0.01 \frac{g+1}{q} z^{1/4} \quad (18)$$

M_{ob} is als functie van t weergegeven op bijlage A1.

$\frac{g+1}{q} z^{1/4}$ is als functie van z weergegeven op bijlage A6.

De formule voor het rollend transport (zie par. 2B) is als volgt omgewerkt:

$$\frac{L_s}{L_0} = \frac{0.192D \cdot 10^{-6}}{\rho g H} = 0.192 \frac{d H^{1/3}}{n^2 v_m^2} 10^{-6}$$

De factor $\frac{0.192D \cdot 10^{-6}}{\rho g H}$ is voor een gegeven meetpunt constant en behoeft dus slechts eenmaal bepaald te worden.

Noemt men nu

$$2.5 \Theta (L_s/L_0) = B$$

kan is

$$\frac{G}{V_x \rho_z g D} = B, \text{ dus}$$

$$G = B v_x \rho_z g D$$

$$= B \frac{V_m n}{H^{1/6}} \rho_z g^{3/2} D.$$

$$M_r = \frac{B \cdot d \cdot n \cdot V_m}{H^{1/6}} \times 265 \times 30.7 \times 0.60 \times 10^{-6}$$

$$\boxed{M_r = \frac{B d n V_m 5}{H^{1/6}}} \quad (19)$$

Na bepaling van τ_c/τ_0 volgt met behulp van (19) en de grafiek (bijlage A4) M_r in $\text{cm}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$.

Uitgegaan is dus van zand met 40% holle ruimte.

Ook hier is er voor een bepaald meetpunt een constante factor, welke slechts éénmaal bepaald behoeft te worden nl. 5 dn.

Rekenvoorbeeld: homogeen zand van 200μ , dus met $\Delta F(c) = 100$, een valsnelheid $c = 0.02$ en $n = 0.024$

$$H = 10\text{m}, V_m = 1\text{m}/\text{sec}, q = 5$$

Gevraagd a M_b , $M_b 0,10$ en M_r

$$b \ M_b \text{ met } c = 0.024 \text{ en } n = 0,018$$

Oplossing a: met behulp van bijlage A2 volgt $t = 0.39$

$$\text{met bijlage A3 volgt } N_{ob} \cdot R_2 = 89, N_{ob} = 670 \text{ cm}^3/\text{m}^3 \quad (\text{bijlage A1})$$

$$\text{voor } z = 0,01 \text{ volgt voor } \frac{q+1}{q} z^{1/q} = 0,47 \quad (\text{bijlage A6})$$

$$M_b = N_{ob} \cdot R_2 \cdot V_m \cdot H = 89 \times 1 \times 10 = \underline{890} \text{ cm}^3/\text{m} \cdot \text{sec}.$$

$$15 tz = 15 \times 0,39 \times \frac{0,10}{10} = 0,0585 \text{ dus } e^{-15tz} = 0,943$$

$$M_b c,10 = 70 \times 0,943 \times 1 \times 0,01 \times 0,47 = \underline{2,97} \text{ cm}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$$

Uit bijlage A6 volgt:

$$H^{1/3} = 2,15$$

$$H^{1/6} = 1,47$$

$$\tau_o/\tau_o = 0,192 \frac{200 \times 2,15}{0,024 \times 12} \cdot 10^{-6} = 0,143$$

met behulp van bijlage A4 volgt $B = 1,45$

$$M_r = \frac{B d n \sqrt{5}}{H^{1/6}} = \frac{1,45 \times 200 \times 0,024 \times 1 \times 5}{2,15} = \underline{16} \text{ cm}^3/\text{sec}$$

$$b. \quad v_m^x = \frac{n}{1,2c} \quad v_m = \frac{0,18 \times 1}{1,2 \times 0,024} = 0,625$$

met behulp van bijlage A2 volgt uit $v_m^x = 0,625$ een waarde van $t = 0,625$

Bijlage A3 geeft hiervoor $N_{ob} R_2 = 13,5$

$$M_o = 13,5 \times 1 \times 10 = \underline{135} \text{ cm}^3/\text{sec}.$$

Opmerking: het voordeel van v_m^x komt voornamelijk naar voren wanneer de correctie meerdere malen gebruikt kan worden voor het zelfde geval (zoals bij de onderhavige berekeningen in het tijgebied).

par. 5. De sandtransportberekeningen van de Oosterschelde.

In chronologische volgorde van de berekeningen zal nu het onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden in het tijgebied worden weergegeven.

1. Als te beschouwen gebied is gekozen de Oosterschelde met als Westelijke grens raai 6 (van Zierikzee-N. Beveland) en raai 4c (in het Zijpe) als Noordelijke grens (bijlage B1). De gebruikte gegevens, afkomstig van metingen van 1936, zijn ontleend aan lit.(4) waar urenkaartjes voor de stroomsnelheden voor normaal getij in voorkomen en aan de oorspronkelijke metingen voor de diepten en korrelgrootten van het bodemmateriaal. (bijlagen B3 t/m B5).

De volgende berekeningen werden uitgevoerd:

| | | |
|-----------|--|-------------|
| <u>A.</u> | korrelgrootte 200μ , $c = 0,02$ | $n = 0,024$ |
| <u>B.</u> | korrelgrootte van meetpunt tot meetpunt variabel (dus volgens de gemeten waarden), | $n = 0,024$ |
| <u>C.</u> | idem | $n = 0,020$ |
| <u>D.</u> | " doch valsnelheden 10% groter | $n = 0,020$ |
| <u>E.</u> | " " vlg. Rubey | $n = 0,020$ |
| <u>F.</u> | " " " " | $n = 0,018$ |

Voor de gebruikte valsnelheden wordt verwezen naar bijlage A5.

Berekening A betrof een oriënterende berekening en is uitgevoerd met een $n = 0,024$ en een uniforme korrelgrootte = 200μ met als geschatte valsnelheid $c = 0,02$ m/sec. De uitkomsten van deze berekening wesen reeds uit, dat de tendens, zoals deze in werkelijkheid is, teruggevonden werd nl. raai 6 eb-overschot z.geul en een vloed-overschot in de n.geul van raai 6 en in raai 4. In het totaal: er gaat meer zand uit het beschouwde gebied dan er in komt.

De berekeningen B t/m E zijn uitgevoerd om te trachten een inzicht te verkrijgen omtrent de invloed van variaties in de waarden c en n op de uitkomsten en tevens om op verantwoorde wijze tot bevredigende kwantitatieve uitkomsten te geraken.

De bepaling van de juiste n kan geschieden uit een analyse van de snelheidsverticalen, doch hiervan is in dit verband afgezien, teneinde dit zeer tijdrovende werk te omzeilen. Uit getijberekeningen is gebleken, dat een $n = 0,020$ niet ver bezijden de juiste waarde zal liggen. De transportberekeningen zijn uitgevoerd met een $q = 5$, uit recente metingen bleek, dat een iets hogere q b.v. 7 of 8 dichter bij de werkelijkheid ligt, doch dit zal de uitkomsten niet essentieel beïnvloeden.

2. De recente metingen die, zoals reeds gezegd, speciaal verricht zijn om de toetsing meer gedetailleerd te kunnen verrichten worden in par. 7 nader onder de loupe genomen; zij zijn verricht in de Schaar van Colijnsplaat ongeveer in raai 6.

3. In par. 8 wordt de verstoring tengevolge van dichtheidsverschillen aan de hand van een speciale meting nagegaan.

De berekeningen in de raaien 3, 4c en 6 zijn verricht op de wijze als het rekenvoorbeeld in de vorige par. weergeeft. De gegevens zijn ontleend aan lit. (4) en aan de oorspronkelijke metingen, t.w. de diepte, de snelheid (urenkaartjes) en de korrelgrootten, q is gesteld op 5. (zie bijlagen B3, B4, B5.). Voor de variaties in de diepten t.g.v. de getijbewegingen is gebruik gemaakt van de gemiddelde getijkromme van Zierikzee.

De berekeningen zijn uitgevoerd op formulieren waarvan de formulieren voor de berekeningen A en D als specimen zijn bijgevoegd (bijlagen C en D).

Van deze formulieren werden voor de afzonderlijke meetpunten grafieken getekend waaruit door middel van planimetreren de eb- en vloedtransporten per getij werden bepaald.

Dit leverde voor de afzonderlijke meetpunten de volgende bijlagen:

| | raai 3 | raai 4c | raai 6 |
|-------------|--------|---------|--------|
| M_b | E | H | L |
| $M_{b0,10}$ | F | I | M |
| M_r | G | K | N |

Door de aldus gevonden eb-en vloedtransporten per getij van een meetpunt weer uit te zetten kon het zandtransport per getij door de gehele raai gevonden worden.

Hieruit ontstonden de volgende bijlagen:

| | raai 3 | raai 4c | raai 6 |
|-------------|--------|---------|--------|
| M_b | O | P | Q |
| $M_{b0,10}$ | | | |
| M_r | | | |

Hierbij is dus aangenomen dat de gemiddelde stroomrichting loodrecht op de raai stond. Dit is echter zelden het geval, zoals blijkt uit de staat van bijlage S1. De zandtransporten per meetpunt zijn hierna vermenigvuldigd met de sinus van de werkelijke gemiddelde richting t.o.v. de raai en de uitkomsten van deze richtingscorrectie staan voor de gehele raai aangegeven op staat S 3 en op bovenstaande bijlagen O, P, Q.

De transporten per jaar zijn in staatvorm aangegeven op bijlagen S2 en S3 (zonder en met richtingscorrectie). Uit bijlage S4 is ontstaan de grafiek van bijlage R waar de jaartransporten van het zwevende transport M_b zijn uitgezet als functie van de verhouding $\frac{c}{n}$, die nl. voor de berekeningen A t/m F varieerde.

Opmerkelijk is het regelmatig verloop.

Het schijnt dat men kan volstaan met de berekeningen van 2 extreme mogelijkheden en door de uitkomsten hiervan op de aangegeven wijze uit te zetten door middel van interpolatie alle tussen gelegen mogelijkheden redelijk nauwkeurig te vinden. In hoeverre dit een regel is kan nog niet worden gezegd.

Het rollend zandtransport M_r is niet in deze grafiek opgenomen omdat dit transport in het algemeen klein is t.o.v. het zwevend transport M_b (zie hiervoor de staten S2 en S3) en M_r niet afhankelijk is van c , doch van d .

Par. 6. Toetsing der berekeningen.

Van deze berekeningen, die dus in feite de sandtransportcapaciteit van de meetpunten en raaien weergeven en dus niet geheel met de werkelijke transporten behoeven overeen te stemmen zijn de uitkomsten als volgt samen te vatten

jaarlijks overschot in mill.m³.

| Berekening | raai 6 westwaarts | raai 4 noordwaarts | samen | raai 3 westwaarts |
|------------|----------------------|-----------------------|-------|----------------------|
| A | 12.6 | 2.77 | 15.37 | 1.79 |
| B | 13.5 | 2.05 | 15.55 | 1.16 |
| C | 7.5 | 0.92 | 8.42 | 0.60 |
| D | 5.4 | 0.62 | 6.02 | 0.47 |
| E | 4.25 | 0.35 | 4.60 | 1.02 |
| F | 3.12 | 0.24 | 3.36 | 0.7 |
| - | | | | |

De staat geeft dus aan:

1e dat de Oosterschelde ten Oosten van Wemeldinge verdiept.

2e dat de Oosterschelde ten Oosten van Zierikzee en ten Zuiden van het Mastgat verdiept.

Deze tendens wordt door onderzoek der hydrografische kaarten geheel gedekt.

(lit.5). Hieruit blijkt nl. dat in de periode 1933-1947 (de metingen waarop de berekeningen zijn gebaseerd zijn van 1936) de Oosterschelde ten Oosten van raai 3 verdiept is met 14.9 mill.m³, dus 1.1 mill. m³/jaar en de Oosterschelde ten Oosten van raai 6 en ten Zuiden van raai 4c met 60.1 mill.m³, dus 4.3 mill.m³/jaar

Berekening E ligt hier het dichtste bij.

Welke van de berekeningen A t/m F zijn nu het meest acceptabel? Wat de gebruikte valsnelheden betreft geniet Rubey de voorkeur en wat de n betreft een waarde van 0,020. Dit betreft berekening E.

Voor het fijne zand van circa 200 μ geeft een $n = 0,020$ à $0,022$, toegepast in getijberekeningen, goede resultaten.

Voor een $n = 0,022$ kan men de uitkomsten herleiden met bijlage R. Deze liggen tussen berekening D en E in.

Ook blijkt dat er een resulterende zandstroom loopt langs de haven van Zierikzee via Ketten, Mastgat, Zijpe naar de Kramer; in raai 6 Noordgeul en raai 4c is nl. een vloedoverschot aanwezig.

Opmerking. Steeds is gebruik gemaakt van de gemiddelde korrelgrootte. Einstein geeft de voorkeur aan de korrelgrootte welke door 60% wordt onderschreden. Dit betekent wat hogere valsnelheden, dus om tot dezelfde uitkomsten te geraken een evenredig hogere waarde van n . Indien dit juist is zal voor de berekeningen C t/m E een $n = \pm 0.022$ gelezen moeten worden.

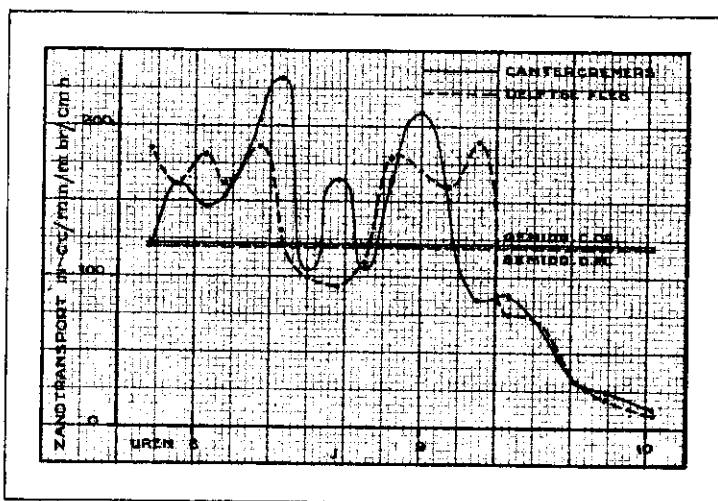
Wat $M_{b0,10}$ betreft het volgende:

Vergelijkt men de uitkomsten van bijlagen 06, P3, Q6, staat S3 met bijlage B2 waarop de meetresultaten staan, dan valt op te merken, dat de tendens, ook voor de afzonderlijke meetpunten goed wordt weergegeven; kwantitatief zijn er echter verschillen. De berekeningen zijn zoals gezegd gemaakt met gebruik van ξ_m (zie par.2 en par.4) wat wil zeggen, dat een detailberekening nabij de bodem nooit kwantitatief juiste waarde geeft.

Ook de waarden van bijlage B2 (meetresultaten) zijn echter aan critiek onderhevig, omdat deze gevonden zijn door herleiding van gemeten waarden tot waarden voor normaal getij. De toegepaste herleiding is in hoge mate twijfelachtig te noemen, omdat tot op heden nog geen juiste reductie is gevonden en men dus een aanname heeft gedaan. Zowel de berekende als de op bijlage B 2 aangegeven gemeten waarden voor $M_{b 0,10}$ zijn beide minder betrouwbaar.

Par. 7. Nader onderzoek naar de toepasbaarheid van de zandformules voor stationnaire stromen in het getijgebied.

Aangezien de beschikbare metingen zich, zoals gezegd, niet lenen voor een gedetailleerd onderzoek naar de praktische toepasbaarheid van de zandformules in het tijgebied zijn er een tweetal speciaal voor dit doel verrichte metingen beschikbaar, waarvan één hieronder zo nauwkeurig mogelijk beschouwd zal worden. Deze metingen zijn in raai 6 in de Schaar van Colijnsplaat verricht, waar geen dichtheidsverschillen van enige betekenis voorkwamen (17,4 gCl/l oppervlakte en 17,6 grCl/l bodem). Gemeten werden stroomsnelheidsverticalen en de zandtransporten op 0,13, 0,50, 1.00, 2.00 en 3 m boven de bodem gedurende een vloedgetij, als mede werden de korrelgrootten bepaald voor het op deze hoogten gevangen zand. De snelheidsmetingen geschieden met een OTT-stroomsnelheidsmeter en de zandtransporten werden bepaald met een Delftse Fles en een Canter Cremers, waarvan de gevonden waarden niet werden gecorrigeerd, omdat de juiste correctiefactoren niet bekend zijn. Uit onderstaand grafiekje blijkt, dat beide instrumenten elkaar redelijk benaderen. De grote moeilijkheid bij de analyse van deze metingen is, dat



in verband met $\frac{dV}{dt}$ de beschikbare tijd per waarneming, die op slechts enkele minuten gesteld kan worden, te kort is om gemiddelde waarden te verkrijgen. In de metingen komen nog te veel fluctuaties tot uiting (zie b.v. de snelheden op bijlage T 2. en de zandtransporten

op 0,13 en 0,50 m boven de bodem van bijlage T 1). Bij de analyse is getracht dit bezwaar te ondervangen.

Aangetoond moet worden, wil de toepassing in het tijgebied toelaatbaar zijn: le dat de theoretische verhouding der zandtransporten overeenstemt met de gemeten verhoudingen d.w.z. dat de theoretische turbulente uitwisseling overeen komt met

de werkelijke.

2e dat het berekende M_b in redelijke overeenstemming is met het werkelijke transport.

3e de aanvaardbaarheid van $\frac{dN}{dt} = 0$.

De gemiddelde korrelgrootten voor de verschillende hoogten bedroegen:

| | |
|--------|-----------|
| bodem | 210 μ |
| 0.13m+ | 200 μ |
| 0.50m+ | 170 μ |
| 1.00m+ | 165 μ |
| 2.00m+ | 165 μ |
| 3.00m+ | 145 μ |

Op bijlage T 1 staat het gemeten zandtransport voor de verschillende hoogten en tevens V_m volgens de metingen.

Uit de incidentele snelheidsverticalen is bepaling van de vorm niet nauwkeurig genoeg te verrichten. Daarom is bijlage T 2 samengesteld, en hieruit de vorm van de gemiddelde snelheidsverticaal bepaald, waardoor de vele gemeten snelheids-fluctuaties zo goed mogelijk zijn geëlimineerd. Deze gemiddelde snelheidsverticaal bleek benaderd te kunnen worden door de parabolische formule (6) met $q = 8$.

Uit de gemeten transporten (bijlage T 1) en de gemeten snelheden (bijlage T 2) is bijlage T 3 ontstaan waarop de zandgehalten staan aangegeven.

Door van (6) en (9) de verhouding $\frac{V_{max}}{V_m}$ te bepalen en aan elkaar gelijk te stellen vindt men

$$q = \frac{kC}{\sqrt{g}}$$

Met $q = 8$ geeft dit $C = 83$, wat voor een gemiddelde diepte van 8 m volgens Manning oplevert $n = \pm 0,022$.

Uitgaande van de korrelgrootte van het bodemmateriaal = 210 μ , $q = 8$, $n = 0,022$ kunnen de transporten op de verschillende hoogten berekend worden. Gebruikt is $c = 0,021$ m/sec.

De berekening geschiedt als op blz. 13 voor $M_b 0,10$ is weergegeven. De resultaten zijn te vinden op bijlage T 10. De sommatiekromme staat op bijlage T 11.

Deze berekening is t.g.v. het gebruik van ξ_m steeds aangeduid met de index b (benaderd).

De juiste theoretische zandgehalteverdeling in de verticaal wordt weergegeven door de formules (12) en (14) op blz. 5. Nagegaan zal nu worden in hoeverre deze formules de situatie in het getijgebied weergeven.

Daartoe zijn eerst de waarden van $\frac{t}{k}$ berekend gedurende de meetperiode. Volgens is bijlage T 4 samengesteld.

Hierop zijn de gemeten verhoudingen $\frac{Mz}{Na}$ (afkomstig van bijlage T 3) voor de diverse hoogten uitgeset als functie van

$$\frac{(1-z)^{\frac{1}{q}} \cdot e^{-(q+1)z^{\frac{1}{q}}}}{(1-a)^{\frac{1}{q}} \cdot e^{-(q+1)a^{\frac{1}{q}}}}$$

en $\frac{1-z}{z} \cdot \frac{a}{1-a}$.

De hierdoor getrokken lijnen voldoen aan de berekende waarden van $\frac{t}{k}$. Bij beschouwing van deze bijlagen blijkt, dat beide formules inderdaad voor het getijgebied de verhoudingen goed weergeven, m.a.w. de werkelijke uitwisselingscoefficient komt praktisch overeen met de theoretische voor stationnaire stromen.

Door de gehalteverticalen volgens de getrokken lijnen van bijlage T 5 (afkomstig van T 4) te vermenigvuldigen met de theoretische snelheidsverdeling worden de sandtransporten verkregen.

Hieruit is voor de s.g. parabolische formules (9) en (12) bijlage T 6 ontstaan waarop tevens de gemeten transporten staan aangegeven. Na vermenigvuldiging van de gemeten transporten met $\frac{V_h}{V_h \text{ gemeten}}$ volgens $q = 8$ is bijlage T 7 ontstaan.

Doet men hetzelfde voor de logarithmische formules (9) en (12) dan ontstaan de bijlagen T 8 en T 9.

De resultaten zijn samengevat op bijlage T 11 en hieruit volgt een bevredigende overeenstemming met de metingen.

Wel blijkt dat M_b kwantitatief redelijk goede uitkomsten geeft, doch dat de onderlinge verhoudingen minder juist zijn, terwijl de overige berekeningen met (12) en (14) de verhoudingen goed weergeven. Dit is trouwens in overeenstemming

met de theorie. De nauwkeurigheid der berekeningen zou belangrijk opgevoerd kunnen worden wanneer de constanten A en k_1 uit (15), en dus N_0 , bekend waren voor de zandgehalte-verticaal van formule (14) en dus niet meer gewerkt behoefde te worden met N_{ob} .

Aan de beide eerste eisen van blz. 21, 22 is op bevredigende wijze voldaan.

Het onderzoek naar de invloed van $\frac{dN}{dt} \neq 0$ is te vinden op de bijlagen T 12 t/m T 14.

Uit de metingen zijn te bepalen $\frac{dN}{dt}$ en $c \frac{dN}{dh}$. Omdat echter de fluctuaties van bijlage T 3 hinderlijk zijn is bijlage T 5 gebruikt.

Bij beschouwing van bijlage T 14 blijkt dat de waarde van $\frac{dN}{dt}$ zeer gering is t.o.v. de andere termen in de differentiaal-verg. (1). Het uitgangspunt $\frac{dN}{dt} = 0$ is dus wel aanvaardbaar te achten.

par. 8. Onderzoek naar de toepasbaarheid in het tijgebied wanneer er dichtheidsverschillen aanwezig zijn.

Zoals uit de voorgaande parn. is gebleken, zijn de zandformules voor stationaire stromen voor praktische doeleinden wel bruikbaar in het tijgebied wanneer er geen dichtheidsverschillen aanwezig zijn.

Het brakwatergebied kent deze verschillen wel, dus ook het overgrote gedeelte der benedenrivieren, waardoor de toepassingsmogelijkheden weer beperkt zijn tot gebieden als Oosterschelde, Waddenzee enz.

Het is bekend dat in gevallen waarin dichtheidsverschillen optreden de snelheidsverticalen in min of meer ernstige mate verstoord worden, zelfs discontinuïteiten kunnen vertonen met als uiterste verstoring 2 tegengestelde stromingsrichtingen in een verticaal.

Het behoeft geen betoog, dat het turbulentiëvraagstuk in deze gevallen zeer veel ingewikkelder wordt. Naar de oplossing van dit vraagstuk wordt nog steeds gezocht. Dezerzijds is getracht een weg te vinden om toch een redelijke benadering te verkrijgen in de meeste dezer gevallen.

Op 28-9-1951 is daartoe in het Volkerak een soortgelijke meting verricht als in par. 7 beschreven is met dit verschil dat de chloorgehalten gedurende de meting varieerden van 6,7 - 10,1 gr Cl/1 (opp-bodem) tot 15,6 - 16,3 gr Cl/1 (opp-bodem). Het bodemmateriaal bestond uit zeer fijn zand (150μ) en de gem. waterdiepte bedroeg circa 9 m.

Dat de bewerking van de gegevens afwijkingen t.o.v. de metingen zou opleveren werd verwacht. De oorzaak hiervan ligt uiteraard in de vervorming van de gemiddelde snelheidsverticaal die na analyse over $\pm 60\%$ van de hoogte het beste benaderd kon worden door een parabool, waarvan $q = 5,5$. Indien geen dichtheidsverschillen voorgekomen waren, zou dit op een grote bodemweerstand duiden nl. $C = \pm 43$. De werkelijke bodemweerstand zal veel lager liggen i.v.m. het zeer fijn zand, b.v. $C = 65$ wat een q van rond 8 op zou leveren. Hierin zit dus een schijnbare tegenspraak.

De snelheidsgradient wordt dus in het onderhavige geval vergroot. Bij beschouwing van de formule

$$q = \frac{kC}{\sqrt{g}}$$

wordt de verlaging van q verkregen door een verlaging van kC . Zoals gezegd is een verlaging van C niet waarschijnlijk en ook niet in overeenstemming met de getijberekeningen. Logischer is het om het effect te verkrijgen door toevoeging van een correctiefactor α aan de constante van von Kármán welke factor voor gelijke dichtheid op 1 is te stellen. Zoals zal blijken geeft deze redenering behoorlijke uitkomsten.

Een verlaging van C heeft op de zandgehalteverticaal het tegenovergestelde effect als een verlaging van de waarde van αk , wat eenvoudig is in te zien, wanneer men de parameter

$$\frac{t}{\alpha k} = \frac{cC}{\alpha k \sqrt{gV_m}}$$

bezieet. Een lage waarde van $\frac{t}{\alpha k}$ geeft hogere verhoudingen bij de zandgehalteverticaal. Een verlaging van C duidt dus op intensievere turbulentie en dit is niet het geval bij dichtheidsverschillen. Deze onderdrukken namelijk de turbulentie, doordat een laag met grotere dichtheid tengevolge van het dichtheidsverschil alleen ten koste van extra energie met een daar boven gelegen laag met kleinere **dichtheid** kan mengen. Het is duidelijk dat deze extra energie de turbulentie dempt. En dit effect kan worden weergegeven door een verlaging van α (dus $\alpha < 1$), omdat $\frac{t}{\alpha k}$ dan toeneemt.

Na analyse van de snelheden (bijlage U 1) bleken de verticalen over de onderste helft de volgende waarden van q te hebben waarbij αk staat gegeven voor $C = + 65$. Uit de gemeten gehalten (bijlage U 2) welke door de getrokken lijnen zo

| tijd | q | αk | α |
|---------------------------------------|-----|------------|----------|
| 11 ^h 50-12 ^h 30 | 5,5 | 0,265 | 0,66 |
| 12 ^h 30-13 ^h 10 | 5,9 | 0,285 | 0,71 |
| 13 ^h 10-13 ^h 50 | 7 | 0,34 | 0,825 |
| 13 ^h 50-14 ^h 50 | 6,7 | 0,32 | 0,80 |
| 14 ^h 40-15 ^h 10 | 6,3 | 0,305 | 0,76 |

goed mogelijk werden geschematiseerd werd bijlage U 3 samengesteld voor de "parabolische" zandgehalteverticaal.

De lijnen op deze bijlage zijn getrokken op grond van de berekende waarden van $\frac{t}{\alpha k}$, waarbij αk aan bovenstaand staatje is ontleend ($c = 0,015$ volgens Rubey) voor de gemiddelde korrelgrootte van 150μ .

Het was dienstig om in dit geval ook na te gaan hoe de afzonderlijke korrelgrootte-fracties zich gedroegen. De splitsing van de zandgehalten in die van de fracties gebeurde met bijlage U 4. Het resultaat is te vinden op bijlagen U 5 en U 6. Over het algemeen is de overeenstemming redelijk goed te noemen.

Er zijn echter nog hier en daar vrij belangrijke afwijkingen. De oorzaken kunnen de volgende zijn:

a de bepaling van de juiste waarde van $\alpha k (q)$; met name is b.v. de waarde van q op precies 14^h hoger geweest dan gedurende het gebruikte tijdvak, dus ook k , dus steilere lijnen op bijlage U 5 voor dit tijdstip. Ook behoeft C niet constant te zijn.

b de valsnelheden volgens Rubey stemmen niet geheel met de werkelijke overeen.

c de aangenomen $C = 65$ staat niet geheel vast.

d niet alle fluctuaties in gemeten zandgehalten en stroomsnelheden zijn geëlimineerd.

De resultaten zijn echter toch van dien aard, dat men vertrouwen mag bij de uitwerking van toekomstige metingen een nog betere overeenstemming te vinden mits alle aandacht gegeven wordt aan een zo hoog mogelijke frequentie van de zand- en stroommetingen zodat de verschillende grootheden zo goed mogelijk bepaald kunnen worden.

In hoeverre het mogelijk is om extreme vervormingen op deze wijze te benaderen is nog niet onderzocht kunnen worden. Zonder meer zal dit wel niet gelukken. Mogelijk dat een partiële benadering van de snelheidsverticaal uitkomst kan brengen. Het ligt in de bedoeling om ook in deze richting verdere onderzoekingen te doen.

Par. 9. Samenvatting.

Allereerst wordt na de inleiding een overzicht gegeven van de gebruikte formules voor de zandbeweging in stationnaire stromen. Hierna wordt nagegaan in hoeverre het mogelijk is om voor het tijgebied bij afwezigheid van dichtheidsverschillen uitkomsten te verkrijgen met voor praktische doeleinden voldoende nauwkeurigheid, wanneer men de formules voor stationnaire stromen gebruikt.

Uit enige berekeningen waarin de zandtransporten in de Oosterschelde worden berekend blijkt dat zowel de tendens als de kwantiteit behoorlijk in overeenstemming is met de werkelijkheid: beoosten Zierikzee-Noord Beveland en ten zuiden van het Zijpe verdiept de Oosterschelde jaarlijks met 4 á 5 miljoen m³; langs Zuid- en Noord-Beveland trekt een resulterende zandstroom westwaarts en langs Duiveland via het Ketten- het Zijpe een kleinere zandstroom noordwaarts. Een en ander wordt bevestigd door de resultaten van cubering en metingen.

Een detailonderzoek naar de overeenkomst tussen de zandgehalteverdelingen in de Oosterschelde met de theoretische voor stationnaire stromen geldende verdelingen gaf een behoorlijk resultaat.

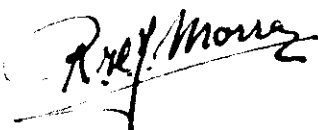
Ook is het mogelijk gebleken om de formules voor stationnaire stromen toepasselijk te maken voor gebieden met dichtheidsverschillen, wanneer deze tenminste niet uitzonderlijk groot worden en zodoende aanleiding geven tot zeer sterke vervormingen van de snelheidsverticaal. Dit resultaat is bereikt door aan de constante van von Kármán een correctiefactor toe te voegen waardoor de verminderde turbulentie tot uitdrukking wordt gebracht.

Het onderzoek zal in deze richting verder worden voortgezet waartoe nog vele metingen vereist zijn. De meettechniek zal aangepast moeten worden.

Conclusie: De moderne formules voor de zandbeweging zoals deze voor stationnaire stromen uitgaande van de turbulentie-theorie zijn opgesteld kunnen ook voor het tijgebied worden gebruikt mits dit met overleg gebeurt.

's-Gravenhage, 1. November 1952

De Technisch-Opzichter A,



(R.H.J. Morris)

Gebruikte afkortingen.

| | |
|---|--|
| A : constante = 39 | |
| C : constante van Rytelwein | $m^{1/2} sec^{-1}$ |
| D : korrelgrootte in m | m |
| $\Delta F(o)$: aantal procenten, dat van een bepaalde fractie in het bodem- materiaal aanwezig is | - |
| G : gewicht | kg |
| H : hoogte waterspiegel boven bodem | m |
| I : verhang waterspiegel | - |
| M_b : zwevend zandtransport over de gehele hoogte | $cm^3 sec^{-1}$ per m breedte x) |
| $M_{b 0.10}$: " " op de hoogte 0.10 m | $cm^3 sec^{-1}$ per m breedte x) en cm hoogte |
| M_r : rollend zandtransport | $cm^3 sec^{-1}$ per m breedte x) |
| N : sandgehalte | $cm^3 m^{-3}$ |
| R : hydraulische straal | m |
| $R_2 = \int_0^1 e^{-6 \frac{t}{k} z} \frac{q+1}{q} z^{1/q} dz$ | - |
| V : watersnelheid | $m sec^{-1}$ |
| a : relatieve hoogte boven de bodem $\frac{h}{H}$ | - |
| c : valensnelheid zand in stil water | $m sec^{-1}$ |
| d : korrelgrootte in μ | $10^{-6} m$ |
| e : grondtal natuurlijke logaritmestelsel | - |
| g : versnelling der zwaartekracht = 9.81 | $m sec^{-2}$ |
| h : hoogte boven de bodem | m |
| k : constante van von Kármán = 0.4 | - |
| k_s : constante = $\sqrt{0,27}$ | - |
| n : ruwheidsfactor van Manning | $m^{-1/3} sec$ |
| q : graad van snelheidsparabool | - |
| t : parameter $\frac{c}{\sqrt{gHI}}$ | - |
| v_x : wrijvingsnelheid = \sqrt{gHI} | $m sec^{-1}$ |
| x : stroomrichting | - |
| z : relatieve hoogte boven de bodem $\frac{h}{H}$ | - |
| α : correctiefactor op constante van von Kármán | - |
| ξ_h : uitwisselingscoëfficiënt in de richting h | $m^2 sec^{-1}$ |
| ξ_x : " " " " " x | $m^2 sec^{-1}$ |
| τ : sleepkracht op de hoogte h ($= \rho gHI(1-z)$) | $kg m^{-2}$ |
| τ_o : kritische sleepkracht op de hoogte o | $kg m^{-2}$ |
| τ_o : sleepkracht op de hoogte o = ρgHI | $kg m^{-2}$ |
| ρ : dichtheid | $kg m^{-1} sec^2$ |

index b duidt op benaderd
" m " " gemiddeld
" $\begin{Bmatrix} a \\ h \\ z \end{Bmatrix}$ " " hoogte
" r " " rollend

x) zowel per seconde, als per getij, als per jaar, als voor de gehele breedte. Dit staat steeds op de bijlagen en staten aangegeven.

LITERATUUR.

- 1^x) Norra, R.H.J., "De sandgehalteverticaal bij stationnaire stromen onder evenwichtsvoorwaarden".
a. 44 blz., 22 fig.
Rapp.nr.9, Dec. 1948; Den Haag. R 311. C 936
b. "De Ingenieur" Nr. 51, B.131-3, 22 Dec. 1950. R.517.
- 2^x) Norra, R.H.J., "Het rollend sandtransport in rivieren".
Rapp.Nr. 1, 1951. 11 blz, 2 vaste bijlagen. R 451. C 1151
3. Elserman,ir.J.J., "Present State of the investigations on bed-load movement en ir. H.C. in Holland". In:"Assemblée Gén.de Bruxelles 1951. Tome III, Frijlink publ.nr.34 de l'Assoc.int.d'hydrologie. blz.100-116.
4. Velde,ir.P.A.v.d. "Nota betreffende een onderzoek naar de verbeteringsmogelijkheden voor het Brabantsche Vaarwater". 58 blz. 21 bijlagen. 's-Gravensande. 1940. R 129. D 279.
5. Haring, Jac., "Diepteveranderingen van de Oosterschelde". 10 blz., 29 bijl 6 bijl. Rapp.Nr.4, 1947. Den Haag. R.278. D 484.
6. Einstein,H.A. "The bed-load function for sediment transportation in open channel flows". publ. by the U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service. Wash. D.C. 1950. 71 blz. Techn.Bull. Nr. 1026. R 491. B 1482.

x). Beide rapporten steunen veer een groot deel op Amerikaanse publicaties van Kalinske e.a., waarvoor verwezen wordt naar de daarin opgenomen literatuurlijst.