

## Vadehavets sedimentomsætning belyst ved kvantitative målinger

Al B. Jakobsen

### Abstract

*Mapping of large areas of the Danish tidal area and measuring of the accretion on the fields of land reclamation form the basis for an estimation of the quantities of fine grained sediments which in the last twenty years have been lost by erosion and gained by accretion. Experiment with a new type of instrument – a siphon sampler – shows that the amount of suspended material is highly variable due to weather conditions.*

Vade- og marskområdet fra geesten til foden af vadehavsflakkets skråning ned mod Nordsøens bund består overvejende af sedimenter, der er transporteret og aflejret af havet oven på lavere liggende glacielle landskaber og senere dannede tørvelag. Ganske vist forekommer der inden for det nuværende Vadehav områder, som er dannet ved havets erosion i ikke marine sedimenter, f. eks. en del af vaderne ud for geestens kystklinter. Desuden synes visse vadestrækninger at være dannet ved udjævning eller erosion i hedesletterne, der ellers i størstedelen af vadehavsområdet sænker sig dybere ned under overfladen, jo mere man fjerner sig fra marskens indre grænse. Enkelte dele af dybene kan muligvis også være nederoderede i ældre aflejringer.

Stort set kan vadehavsområdet dog betragtes som et akkumulationsflak, hvis overfladeformer hovedsagelig er dannet af havets transporterende og formgivende kræfter, hvoraf tidevandet giver de mest karakteristiske landskaber, vadeflaket og marsken, deres særlige karakter.

På vadeflaket ud mod Nordsøen findes en zone af mere eller mindre veludviklede off-shore barrierer som højsander eller klitøer, hvis dannelse vel ikke i egentlig forstand skyldes tidevandet, men som dog i udformning bærer umiskendeligt præg heraf.

De betydelige sedimentmasser, der udgør akkumulationsflaket, må enten stamme fra moræneområder, der nu ligger ude i Nordsøen,

som f. eks. Horns Rev og Røde Klif Flak, fra smeltevandsaflejringer eller andre aflejringer på Nordsøens flade bund eller fra kystnedbrydning i Nordsø-området.

Det er givet, at Vadehavets naturforhold i tidens løb er undergået store forandringer; forbindelsen til Nordsøen har været mere eller mindre åben, og vadernes relative niveau har ændret sig ligesom formentlig også tidevandets størrelse. Der har været perioder med stor marskdannelse og stilstands- eller tabsperioder; men den nutidige tilstand må alligevel betragtes som resultatet af en langvarig opbygningsproces hovedsagelig med tilførsel af materiale udefra.

Undersøgelser og teorier vedrørende *oprindelsen af Vadehavets sedimenter* har hovedsagelig drejet sig om det fintkornede slik, der i dehydreret form udgør den vigtigste del af marskklægen. Spørgsmålet har som regel været stillet således: Stammer slikken fra floderne, fra Nordsøen eller fra selve vadehavsområdet. Da der synes at være ført gode beviser for, at hverken sandet eller slikken kan stamme fra de floder, der i nutiden udmunder i Nordsøens sydlige del (*Crommelin* 1940, 1943, *Favejee* 1951), er problemet altså, om slikken stammer fra Nordsøen eller Vadehavet.

Spørgsmålet om slikkens herkomst kan nu præciseres således: Stammer de slikmængder, der i tidens løb er aflejret i marsken og i et vist omfang i vadebunden, direkte fra Nordsøen, og foregår der stadig en tilførsel af slik til Vadehavet, eller er slikken aflejret som særlige lag eller som bestanddel af akkumulationsflakket i tidligere perioder, således at i hvert fald den yngre marskdannelse er resultatet af en intern omlejring og sortering i Vadehavet.

Undersøgelser af Vadehavets sedimenthusholdning incl. slikmaterialets herkomst har foruden stor videnskabelig også betydelig praktisk interesse, fordi landvindingsarbejderne, der foregår i meget store dele af det nordvesteuropæiske Vadehav, medfører en kunstig forøgelse af sedimentationen. Det er derfor vigtigt at kunne afgøre, om der ved en naturlig og kunstig indiceret sedimentation samt ved en eventuel sedimenttransport bort fra Vadehavet foregår en stadig formindskelse af en begrænset slikbeholdning, eller om der stadig tilføres slik fra Nordsøen.

Løsningen af de her nævnte problemer er meget vanskelig, da forholdene i tidevandszonen er uhyre komplicerede. Desværre er det ikke umiddelbart muligt at sammenligne resultaterne af de ret omfattende undersøgelser, der er foretaget i det nordvesteuropæiske Vadehav, bl. a. fordi der er grund til at antage, at der kan være ret forskellige tilstande i de forskellige tidevandsområder.

De i det danske Vadehav i de senere år udførte undersøgelser har ikke direkte taget sigte på målinger af slikkens oprindelse og sedimenthusholdningen som helhed; men de omfattende kortlægningsarbejder i Lister- og Juvre Dybs tidevandsområder har skabt grundlaget for en vis kontrol med de ændringer, som foregår i et tidevandsområde. Det er derfor muligt at belyse sedimentproblemet på en ny måde, nemlig ved en kvantitativ sammenligning mellem sedimentation og erosion. Desuden har forskellige detailundersøgelser gjort det muligt at vurdere nogenlunde, i hvor høj grad målinger på bestemte lokaliteter og i enkelte perioder er typiske for større områder og for længere tidsrum.

Det er dog langt fra muligt at tegne et sikkert helhedsbillede af sedimentomsætningen; men visse karakteristiske træk synes at kunne udledes. Det vigtigste er dog, at det inden for kortlagte områder i højere grad end tidligere er muligt at tilrettelægge undersøgelser vedrørende f. eks. sedimentomsætningen og vurdere resultaterne i den rette sammenhæng.

I den danske del af *Lister Dybs tidevandsområde* mellem Rømø-dæmningen og Rigsgrænsen kan der for perioden siden 1941, altså 20 år, gøres ret nøje rede for omfanget af marskdannelsen i landvindingsområderne langs kysten og dæmningen.

Der er i nævnte periode registreret aflejret noget over  $2\frac{1}{2}$  mill. m<sup>3</sup> nyt marsksediment, heraf ca. 2 mill. m<sup>3</sup> umiddelbart op til dæmningsens sydside fortrinsvis i den østlige del. Resten er afsat på landvindingsområderne ved Ballum og Højer. Hertil kommer iagttagede, men ikke målte aflejringer i tilslutning til de nye landvindingsfelter. Desuden må medregnes aflejringer på ældre forlande samt i en bugt s. f. Havneby på Rømø. En sedimentation på ca. 3 mill. m<sup>3</sup> kan således ikke betragtes som overdreven i den danske del af Lister Dybs tidevandsområde.

I ovennævnte periode er nedbrydningen af forlandsmarskens kant praktisk taget stoppet på hele fastlandssiden, medens der på østsiden af Rømø foregår erosion i marskkanten over en strækning på ca. 6 km. Hvis det aflejrede materiale skulle stamme fra denne nedbrydning, ville marskkysten på Rømø i samme periode være rykket ca. 500 m tilbage. Den konstaterede maksimale tilbagerykning på Rømøs østkyst er 25 m i løbet af 55 år (meddelt af ingeniør *H. A. Olsen*).

I den tyske del af tidevandsområdet er der bl. a. foregået store tillandinger n. f. Hindenburgdæmningen, således at man også her kan regne med, at tilvæksten er større end tabet.

Det skulle således være klart, at nedbrydningen af ældre marsk i

dette Vadehavets største tidevandsområde kun kan yde et ubetydeligt bidrag til den ny marskdannelse.

Spørgsmålet er nu, om materialet, der er aflejret, kan stamme fra vaderne og dybene. Også her kan en kvantitativ betragtning være af interesse.

Marsksedimentet består med hensyn til kornstørrelse af to hovedkomponenter, nemlig kornstørrelserne under 0,06 mm, der betegnes som silt i modsætning til den anden hovedkomponent sand, der forekommer i fraktionerne 0,06 — 0,125 mm og 0,125 — 0,250 mm, de samme fraktioner som udgør hovedparten af vadesandet.

Af slikkornstørrelserne udgør lermaterialet, mindre end 0,002 mm, mellem 25 og 35% (vægtprocent) af den ny marsk ved Højer og Ballum og noget mere ved Rømhøddæmningen. Det vil derfor ikke være meget forkert at regne med, at de afsatte ca. 3 mill. m<sup>3</sup> materiale består af  $\frac{1}{2}$  sand,  $\frac{1}{3}$  af de grovere dele af slikken (silt) og  $\frac{1}{3}$  ler.

Vaderne, der omfatter over halvdelen af tidevandsområdets areal, består overvejende af sand. Siltmængden varierer meget og kan udgøre indtil ca. 25% af visse vader, men f. eks. på Jordsands Flak kun få procent. Lermængden udgør normalt kun ganske få procent af vadesedimentet.

Sandet i marsken kan altså uden videre forklares som stammende fra vaderne, medens der til fremskaffelse af de fornødne silt- og lermængder fra vaderne skal ske en udvaskning af betydelige mængder normalt vadesediment.

I fortsættelse af vaderne, men på noget lavere niveau, findes betydelige arealer som store flader eller bassiner. Disse områder er ikke særlig godt undersøgte og kan muligvis i bundmaterialet stedvis indeholde fint materiale i større mængder. Bundprøver fra sådanne områder tyder dog på, at normalt vadesand er dominerende bundmateriale; men en del prøver viser, at der her findes noget slam som et ikke fast aflejret overfladelag. Forskellige iagttagelser fra bassinerne og løbenes kanter leder til den formodning, at mængden af slam er stærkt varierende, således at disse områder kan betragtes som temporære reservoirer for slikken.

Løbenes volumen synes gennemgående at være ret konstante, og det er næppe sandsynligt, at der i bunden af disse strømrender findes meget store, fintkornede materialmængder.

Det er muligt, at der på et vist tidspunkt inden for de permanent vanddækkede områder findes så store slammængder, at det til opbygning nødvendige silt i en begrænset periode kan tages her. En del af det opslemmede materiale vil dog under ebber transporteres ud i

Nordsøen, og beholdningen vil efterhånden opbruges. Det er utænkeligt, at der skulle findes så store, lettilgængelige slikmængder til rådighed, at de senere års sedimentation, incl. tab, vil kunne fortsætte i samme tempo. Målingerne viser ingen tegn på nedgang, så alt tyder på, at der må være andre materialkilder til rådighed.

Ser man bort fra de løse slammængder, som ved stadigt forbrug skal erstattes, og tænker man sig, at f. eks. lermaterialet skal fremskaffes ved udvaskning fra Vadehavets bund, ser regnskabet således ud: Sættes bundmaterialets, incl. de meget sandede vader, der praktisk taget ikke indeholder lerpartikler, lerindhold til 5%, skal der til fremskaffelse af 1 mill. m<sup>3</sup> ler opslemmes og udvaskes 20 mill. m<sup>3</sup> bundsediment, hvilket i og for sig ikke er umuligt over en isoleret periode på 20 år; men over længere tidsrum vil denne proces dog frigive mindre og mindre materiale, idet overfladelagene udvaskes, og de underliggende lerholdige lag dækkes med tykkere og tykkere lag af rent sand. Fremskaffes lersedimentet på denne måde, må man også regne med en stedse aftagende, tilgængelig sedimentmængde, hvilket som nævnt ikke synes at være tilfældet.

Analyser af vadesediment på samme lokaliteter i 1941 og i de senere år viser ingen ændringer i kornstørrelsessammensætningen, således at en eventuel udvaskning af ler så må foregå med meget større intensitet i de dybere dele. Går man yderligere ud fra, at materialet i de ældre marskområder er dannet på samme måde, må man forudsætte, enten at Vadehavets bundmateriale oprindeligt har været meget fintkornet, eller at der har været omlejringer af et meget betydeligt omfang.

Det er umuligt foreløbig at overskue, om der for de egentlige sandkornstørrelser er tab eller gevinst for et tidevandsområde som helhed. For Lister Dybs område er som omtalt ca. 1 mill. m<sup>3</sup> sand siden 1941 indgået i marskaflejringer; desuden er meget betydelige mængder medgået til opbygning af den kystnære vade ved Højer. Om disse mængder, der vel i første omgang er taget fra nærliggende vader, er blevet erstattet med sand fra Nordsøen, kan ikke konstateres.

På grundlag af morfologiske studier anses det dog for sandsynligt, at i hvert fald Lister- og Juvre Dybs tidevandsområder modtager mere sand, end der tabes.

I *Juvre Dybs tidevandsområde* kan det ved målinger af erosion og sedimentation ligeledes godtgøres, at materialet til marskdannelsen ikke i nævneværdig grad kan stamme fra marsknedbrydning. Dette område er næsten fuldstændig kortlagt, og der er ikke fundet slikholdige lag af noget omfang i overfladen, hvorimod et temporært

slikreservoir er konstateret i den sydlige del af Rømø Leje. Dannelsen af et nyt løb langs Rømøs østside n. f. dæmningen — Juvre Priel — har medført frigivelse af ca. 1,5 mill. m<sup>3</sup> materiale ved erosion; men samtidig er ca. 1 mill m<sup>3</sup> materiale, overvejende sand, aflejret i østsiden af Rømø Leje, og ca. ½ mill. m<sup>3</sup> gennemgående noget finere materiale er aflejret i prielens bassin, (meddelt af ingeniør *H. A. Olsen*). Der er derfor ikke grund til at formode, at Juvre Priels dannelse er årsag til vadeoplysning og marskdannelse andre steder i tidevandsområdet i samme periode.

Ny marskdannelse er i Juvre Dybs område af betydelig mindre omfang end i Lister Dybs område, hvor den store sedimentation er foregået på sydsiden af Rømødæmningen. Det er indlysende, at dæmningen ikke i sig selv kan medføre, at der fremkommer mere materiale, men kun ændre sedimentationsbetingelserne. Man må derfor antage, at lige så store sedimentmængder (størrelsesorden 100.000 m<sup>3</sup> pr. år) har været til rådighed i området, inden dæmningen blev bygget. Disse mængder »savnes« tilsyneladende ikke som aftagende opvækst andre steder i Lister- og Juvre Dyb områderne. Formodentlig er disse sedimentmængder tidligere gået tabt til Nordsøen gennem Juvre Dyb. (*Jakobsen og Jensen, 1956*).

Ved vurdering af de mulige slikmængder og opvækstmuligheder bør det tages i betragtning, at den naturlige marskdannelse ikke fortrinsvis behøver at foregå på lokaliteter med stort sedimentindhold i vandet, og at perioder med stor marskdannelse i og for sig ikke behøver at betyde, at der har været ekstraordinært store slikmængder til rådighed. Undersøgelser vedrørende den naturlige marskdannelse og landvinding viser, at aflejringen først og fremmest afhænger af sedimentationsbetingelserne; men sedimentationens intensitet er naturligvis afhængig af de tilførte sedimentmængder.

Dette indbærer bl. a., at landvinding også kan drives på lokaliteter, der ikke har naturlig opvæksttendens. Her synes vandskellene mellem tidevandsområderne, der ofte har relativ lave vader, at have særlig gode landvindingsmuligheder — eventuelt gælder det samme for vandskellene mellem et tidevandsområdes enkelte afsnit. Undersøgelser vedrørende sedimentmængde og — transport er derfor af stor praktisk betydning.

Størstedelen af *Grådybs tidevandsområde* er endnu ikke nærmere kortlagt. Det er muligt, at nedbrydning og opvækst for området som helhed ikke giver et positivt resultat. For det isolerede område mellem Skallingen og Langli, der morfologisk og hydrografisk næppe bør betragtes som hørende til Grådyb, men som selvstændigt område

— Hobo Dybs tidevandsområde — haves ret fyldestgørende oplysninger.

Siden århundredskiftet er der på Skallingens østside aflejret ca. 500.000 m<sup>3</sup> slik. Dette materiale kan ikke skaffes fra slamaflejringer eller marsknedbrydning i tidevandsområdet. En eventuel tilførsel af erosionsmateriale fra marsken i Ho Bugt forekommer hydrografisk usandsynlig og ville i alle tilfælde betyde, at en bræmme på 40 — 50 m af hele Ho Bugt marsken skulle nedbrydes og transporteres til Skallingen.

I Grådyb området er der især i 1938 foretaget meget indgående hydrografiske undersøgelser og i forbindelse hermed en undersøgelse af det i vandet forekommende sediment. (Gry, 1942). Denne undersøgelse giver som resultat, at Grådyb området mister mere materiale, end det modtager. Hvis målingerne giver et alment billede af forholdene i Grådyb, må det være tilladt at anvende resultaterne til kvantitative betragtninger over længere tidsrum.

Målingerne viser et tab på ca. 1500 m<sup>3</sup> sand og slik pr. døgn ud gennem Grådyb, hvilket bliver ca. 500.000 m<sup>3</sup> pr. år. Tænkes denne proces uforandret i dette århundrede — altså 60 år — er tabet da 30 mill. m<sup>3</sup>. Grådybs tidevandsområde er ca. 130 km<sup>2</sup>; hvis tabet er jævnt fordelt, skulle bunden være nederoderet ca. 25 cm siden 1900. En sådan ændring kunne ikke være undgået opmærksomheden, især da det næppe er sandsynligt, at materialtabet skulle være jævnt fordelt.

Måleteknikken og beregningsmetoden forekommer tilfredsstillende, og formentlig er de ovennævnte resultater »rigtige« for løbene i måleperioden; men de giver næppe et billede af materialomsætningen som helhed. Andre i de senere år foretagne målinger i Vadehavet viser, at vandmængde- og sedimentmængdemålinger i løbene gennemgående altid giver overskud både af udgående vandmasser og sediment. Dette er i og for sig ganske naturligt, fordi strømrønderne er udformede og bruges af ebben — ebbeskår — medens de indgående vandmasser udformer og dominerer visse blinde sideløb — flodskår — ligesom store dele af vaderne har stærkere flodstrømme end ebbe-strømme. Målestationer bør derfor placeres under nøje hensyntagen til de topografiske forhold og ikke blot anbringes i sejlløbene, som netop er ebbeskårene.

Forklaringen på resultaterne ved målingerne i Grådyb skal dog ikke først og fremmest søges i stationernes placering i ebbeskårene. Som det senere skal omtales, er sedimentmængden i Vadehavet stærkt svingende i relation til vejrforholdene, således at målinger i kortere

perioder og under relativ rolige vejrforhold ikke kan give det rigtige billede hverken af de sedimentmængder, der omsættes, eller af hovedtransportretningen.

Det er forfatterens opfattelse, at der i det danske Vadehav ikke i nutiden findes tilstrækkelige, let tilgængelige slikmængder til at forsyne den for tiden foregående marskopvækst, hvorfor en stadig tilførsel af slikmateriale fra Nordsøen forekommer sandsynlig. For Lister Dyb og Juvre Dybs vedkommende antages yderligere, at tidevandsområdernes samlede sedimentbeholdning af sand og slik tiltager. For Grådyb området savnes tilstrækkelig kortmateriale; men dette tidevandsområde afviger bl. a. niveaumæssigt fra de to sydlige tidevandsområder, hvorfor en anden materialhusholdning er mulig.

Vedrørende Nordsøen som leverandør af det fintkornede materiale skal her blot henvises til et arbejde angående Nordsøens sedimenter (*Jarke, 1955*). Nordsøbunden består overvejende af finsand; men i den oprindelige urstrømsdal fra Elbmundingen i nordvestlig retning findes betydelige aflejringer af kornstørrelser under 0,06 mm. Det er ikke utænkeligt, at dette marine slik, hvis oprindelse muligvis er smeltevandsslam, kan transporteres ind i Vadehavet.

Der findes forskellige instrumenter til indsamling af sediment over længere perioder. Da instrumenterne er relativt kostbare, er det ugørligt samtidig at gennemføre målinger på mange forskellige stationer. Desværre er målinger på få stationer ikke af større værdi til bedømmelse af et tidevandsområdes omsætning.

Som et forsøg på at fremskaffe nogle oplysninger om svingningerne i Vadehavets sedimentindhold er der i Vadehavet afprøvet et enkelt og billigt apparatur (fig. 1).

Til forsøgene er anvendt en flaske med et volumen på ca. 1 liter. I den gennemborede gummiprop anbringes 2 plastikrør (lysning 4 mm) fig. 1 A, S er beregnet til udligning af lufttrykket i flasken, således at denne kan fyldes med vand af hæverten H. Flasken fastgøres til en i vaden nedrammet pæl og påfyldes vand, således at dette når op til munden af hævertgrenens munding. Når vandet under flod når op over hæverten — ved  $h_1$  — fyldes flasken fra vandlaget  $h_2$  fig. 1 B. Flasken fyldes i løbet af ca. 90 sek., og hvis f. eks. flodstrømmen forbi stationen har en hastighed på 30 cm/sek., vil vandet i flaskens effektive volumen, mellem a og b, stamme fra et vandlegeme af 27 meters længde, således at sedimentindholdet i vandet repræsenterer gennemsnittet af en relativ stor vandmasse. Efter fyldningen, medens vandet stiger til højvandsniveau og igen falder til niveau med prop-



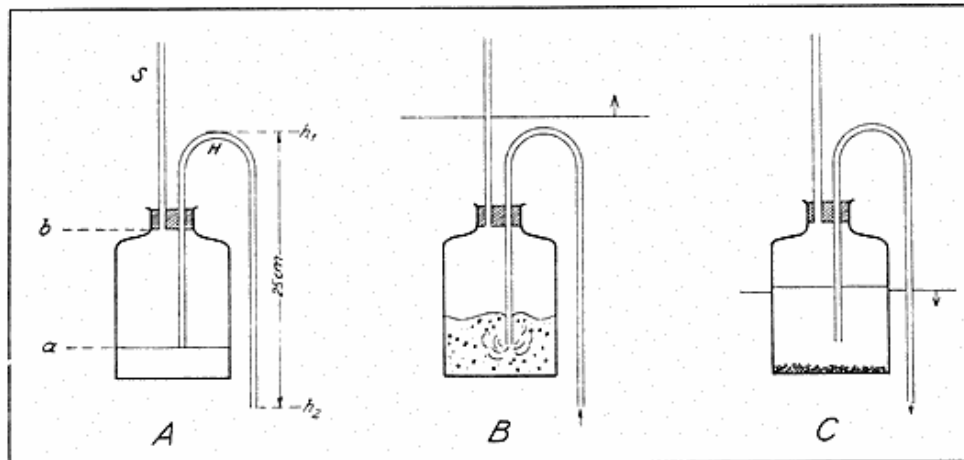


Fig. 1. Hævertsamlerens konstruktion og funktion. Se forklaring i teksten p. 94.  
 Fig. 1. Siphon sampler, construction and function. See explanation in the summary p. 103.

pens underkant, kan det i flasken værende sediment bundfældes. Flasken tømmes langsomt i takt med niveausænkningen i det omgivende vand, således at der ikke opstår nævneværdige strømninger i flasken fig. 1 C. Tømningshastigheden vil variere lidt med niveau og vejr-situation; men gennemsnitlig sænkes vandstanden i Vadehavet omkring 30 cm pr. time. I forsøgsopstillingen tager tømnningen mellem 20 og 30 min. Selv om flasken har været anbragt i nærheden af højvandsniveauet, er der således rigelig tid til, at sandpartikler og en væsentlig del af partiklerne under 0,06 mm kan bundfældes. Selv om ikke alt opslemmet materiale bundfældes, må man dog regne med, at sedimentationsbetingelserne i flasken er mindst lige så gunstige, som de kan blive under naturlige forhold. Aflejringen i flasker med forskellig sedimentationstid — afhængig af opstillingens niveau — er strengt taget ikke sammenlignelig. Muligvis kan der foretages en korrektion under hensyntagen til partiklernes faldhastighed. Det bør dog bemærkes, at materialet forekommer i naturlig form, som i øvrigt er meget forskelligartet, f. eks. forekommer en del af finsandet og slikken som relativ faste ekskrementkugler, der dannes af molluskerne. Disse kugler bundfældes meget hurtigere end det dispergerede materiale.

Hævertsamleren kan opstilles i en eller flere tidevandsperioder. Efter inddragning tørres og vejes det opsamlede materiale og sættes i relation til den samlede vandmængde, der har passeret igennem flasken. Det må tilrådes at opstille hævertsamlere parvis, således at eventuelle funktionsfejl i en del af perioden, f. eks. ved tilstopning af rørene, elimineres. Ved opstilling af serier af flasker i forskellige

niveauer og med forskellig længde af hævertens frie gren kan praktisk taget alle kombinationer af overfladeniveau og prøvetagningsniveau fremstilles.

Foreløbig har der kun været gennemført nogle få langvarige målinger af det indkommende vands sedimentindhold ved hjælp af den omtalte »hævertsamler«. (Her skal kort omtales resultatet fra tre langtidsmålinger).

I 1959 opstilledes en hævertsamler ca. 100 m s. f. Mandø Ebbevej ca. 1 km fra fastlandssiden i den flade, brede lavning, der fra SV strækker sig helt ind til vandskellet mellem Juvre Dyb og Knude Dybs tidevandsområde. Det må antages, at denne lavning har større indgående end udgående vandmængder, idet en del af det indgående vand går ud gennem Knude Dyb. Vandskellet må derfor betragtes med en vis reservation, og det rigtigste vil formentlig være at betragte det topografiske vandskel som et ebbevandskel. Årsagen til denne transport af vandmængder fra syd til nord, som finder sted ved alle det sydvestjydske Vadehavs hovedvandskel, skyldes, at tidevandets størrelse aftager fra syd til nord, og at højeste vandstand indtræder lidt senere i et tidevandsområde end i det umiddelbart syd for liggende. Der foregår derfor ved højvande en udjævning af vandstandene, hvilket medfører en nordgående reststrøm over vandskellene.

Hævertsamleren opstilledes, hvor vadebunden ligger omkring kote  $\div 0,2$  m D.N.N., således at hæverten var dækket ved en vandstand på 65 cm — d. v. s. kote + 0,45 m. Det vand, der opsugedes i flasken, lå da ca. 40 cm over bund eller ved kote + 0,20 m.

I 1959 var der opsat en hævertsamler fra 3/7 til 16/7 og fra 18/8 til 12/11. Af de 191 højvandsperioder blev hævertrøret dækket af vand af 189 højvander. Det er muligt, at der i enkelte tilfælde under stærk blæst ikke er indtrådt tilstrækkelig store lavvander, til at flasken kunne tømmes, hvilket ikke kunne afgøres, da kun højvanderne blev registreret. Den mulige fejl kan kun dreje sig om få procent, og regnes med 189 fyldninger og tømninger i perioden vil det blot kunne betyde, at der er registreret mindre sediment end faktisk forekommende.

Flasken blev udskiftet 8 gange med uregelmæssige mellemrum fra 1 til 20 døgn. Der opsamledes i de to nævnte perioder 28,918 g tørret materiale sedimenteret fra 186,39 l vand, hvilket giver et gennemsnitligt sedimentindhold på 155 mg/l.

I de 8 perioder varierer den gennemsnitlige sedimentmængde fra 17 mg/l til 554 mg/l. Sidstnævnte høje værdi opnåedes for 2 højvan-

der, 18—19/10, og det vides, at langt den overvejende del heraf kom under stærk sydlig blæst i den første højvandsperiode. Højvandsstanden var da omkring + 1,95 m D.N.N. Variationen for de enkelte højvander kan da med nogenlunde sikkerhed sættes til fra mindre end 10 mg/l til ca. 1000 mg/l.

På samme station var der fra 29/6 til 3/7 opstillet en hævertsamler i samme niveau som omtalt, men med hævertmundingen kun 5 cm over bunden. Her samledes i løbet af 7 højvandsperioder 13,092 g tørt materiale eller gennemsnitlig 2200 mg/l. En væsentlig del af materialet må være kommet i løbet af 2 til 3 vandtider med stærk blæst fra VNV og høj vandstand. Enkelte vandtider må da have haft et sedimentindhold på flere tusinde mg/l. Det må tilføjes, at bunden på nævnte lokalitet næsten udelukkende består af finsand, og at de i samtlige prøver fundne sedimenter helt overvejende bestod af materiale finere end sand.

På samme station ved Ebbevejen opsattes i 1960 2 hævertsamlere; den øverste anbragtes noget højere end i 1959. Hæverten var dækket ved 85 cm vand over bunden eller kote + 0,65 m, vandet tages fra 60 cm over bunden eller kote + 0,40 m. Den nederste hævertsamler var dækket ved ca. 35 cm vand og tog vand fra 10 cm over bunden eller kote + 0,10 m. Måleperioden strakte sig fra 25/9 til 16/12. Den nederste flaske blev dækket af alle de 149 mulige højvandsperioder; men det er sandsynligt, at den ikke er blevet fyldt og tømt i alle perioder på grund af for små lavvander. I perioden opsamledes i den nederste flaske 19,343 g tørt materiale. Regner man med 149 gange fyldninger og tømninger, er det gennemsnitlige sedimentindhold 130 mg/l, hvilket formentlig er for lav en værdi. Flasken blev udskiftet 4 gange af omtrent lige store perioder. Variationerne for de enkelte, relativt lange perioder er fra 23 mg/l til 235 mg/l. På grundlag af en nærmere betragtning af vejr- og vandsituationen i perioderne samt ud fra enkeltobservationer er det sandsynligt, at variationen på de enkelte vandtider er fra mindre end 10 mg/l til mere end 500 mg/l.

Den øverste flaske har i samme periode været fyldt og tømt højst 124 gange og viser en gennemsnitlig sedimentmængde på 90 mg/l. Variationen i de 4 perioder er fra 15 mg/l til 136 mg/l. Den sandsynlige variation for de enkelte vandtider er fra mindre end 10 mg/l til mere end 300 mg/l.

Foruden ved Mandø Ebbevej oprettedes i 1960 en station ved fastlandssiden noget s. f. Ebbevejen ved Råhede i landpriellavningen i læ af en naturlig dannet marskø. Her blev anbragt 2 hævertsamlere

i samme niveau. Bundkoten i prielen er ca. + 0,45 m D. N. N. Hævert-røret er dækket ved et vandniveau på ca. + 0,90 m eller omtrent normalt højvande. Vandet indsugedes da fra ca. + 0,65 m eller 20 cm over bunden. Måleperioden strakte sig fra 25/9 til 29/11. Flaskerne blev udskiftet 4 gange; de 3 første perioder var identiske med de 3 første perioder på Ebbevejs stationen. Af de 118 vandtider i perioden kunne flaskerne maksimalt fyldes og tømmes i 56 vandtider. I perioden opsamledes i gennemsnit af de 2 flasker 9,662 g tørt materiale, hvilket giver et gennemsnitligt sedimentindhold på 173 mg/l. Variationen for de enkelte perioder er fra 24 mg/l til 562 mg/l. Den sandsynlige variation for de enkelte højvandsperioder er fra mindre end 10 mg/l til mere end 1000 mg/l. Det kan tilføjes, at de 2 ensartet opstillede flasker i de 3 af de 4 perioder har opsamlet næsten de samme sedimentmængder. Forskellen i den fjerde periode skyldes, at den ene flaskes hævert i en del af perioden blev dækket af alger.

Der har desuden i 1959—60 og 61 været opstillet enkelte flasker i en eller flere tidevandsperioder ved Rønmødæmningen og Rejsby.

Hensigten med de her omtalte opstillinger af hævertsamlere har først og fremmest været at afprøve apparatet og samle erfaring med henblik på fremtidige undersøgelser. De hidtil foretagne målinger er ikke tilstrækkelige til at drage vidtgående slutninger angående sedimentforeholdene i Vadehavet; men de foreløbige resultater harmonerer fuldt ud med iagttagelser og oplysninger om sedimenttransport, erosion og aflejring, som er fremkommet ved en lang række andre undersøgelser. Det foreløbig vigtigste resultat er dokumentationen af den meget store variation i mængden af opslemmet materiale, og at materialmængden i vandet er stærkt afhængig af vejrforholdene.

De vandmasser, der under flod strømmer ind over vaderne, vil hyppigst kun indeholde meget ringe mængder opslemmet materiale. Værdier på omkring 10 mg/l eller mindre er ikke sjældne. De relativ høje gennemsnitsværdier for længere perioder skyldes blot meget store opslemmede materialmængder i enkelte kortere tidsrum.

De største mængder forekommer under blæst og storm fra syd over vest til nordvest som regel i forbindelse med høj vandstand. Under sådanne forhold vil et materialindhold på 3—600 mg/l let kunne forekomme, og værdier på omkring 1000 mg/l vil ikke være usædvanlige under stærkt urolige forhold. Sedimentindholdet vil formentlig kunne stige til flere tusinde mg/l, således at den af *Wohlenberg* angivne værdi af 2500 mg/l under storm ikke synes at være usædvanlig høj (*Wohlenberg*, 1953).

Sedimentmængden er næppe lige stor i Vadehavets forskellige dele

i samme periode. Forholdene i dybene under storm kendes ikke; men sedimentindholdet synes at være størst i en bræmme ind mod eksponerede kyster, hvor der åbenbart sker en koncentration af opslemmet materiale. Dette er årsagen til den forholdsvis betydelige sedimentation, der foregår på sådanne lokaliteter på niveauer over den normale højvandslinie, der altså kun relativt sjældent oversvømmes.

Sedimentindholdets relation til længden og typen af den forudgående vejr- og vandsituation kan ikke afgøres på det foreliggende materiale. Iagttagelser tyder på, at en enkelt, urolig tidevandsperiode efter en periode med roligt vejr i de fleste tilfælde kun medfører en ringe stigning i sedimentindholdet; men fortsætter det urolige vejr, stiger sedimentindholdet stærkt. Det er dog konstateret, at kortvarig blæst kan medføre en stærk stigning i sedimentmængden. Høje vandstande under springtid med roligt vejr medfører som regel ingen forøgelse af det opslemmede materiale. Langvarige perioder med uroligt vejr synes ikke at medføre, at sedimentmængden efterhånden aftager, fordi en eventuelt tilgængelig sedimentmængde opbruges.

Den mindste mængde opslemmet materiale forekommer på vaderne under rolige vejrforhold; under blæst fra N til SØ er de højere vader på fastlandssiden som regel ikke vanddækkede ved højvande. I sådanne perioder opstår store lavvander med stærke ebbestrømme. Prieler og løb har da store mængder opslemmet materiale, der stammer fra de lavere vader og bassinerne og især fra de lave vader øst for øerne, der på grund af en læ-beliggenhed modtager fint materiale, som under østlig blæst atter oprives og føres ud i løbene.

Det synes indlysende, at de hidtil foretagne strøm- og sedimentmålinger i løbene ikke kan give et alment billede af det opslemmede materiales regime, dels fordi materialmængden i løbene hverken med hensyn til sammensætning eller mængde svarer til den, der samtidig findes på vaderne, dels fordi de hidtil udførte målinger som nævnt ikke er foretaget under alle vejrforhold.

De hidtidige målinger viser, at der selv under relativt rolige vejrforhold i løbene findes opslemmet fint materiale i overfladen på omkring 50 mg/l (*Gry*, 1942 — *Wohlenberg*, 1953). På enkelte lokaliteter findes større værdier. (Målingerne i Juvre Priel giver ca. 75—175 mg/l slam i overfladen). Bundvandet indeholder større mængder, 2—300 mg/l synes at være almindeligt. Sandet kan i de stærkeste strømperioder antage relativt store værdier; men sandmængden aftager hurtigt med aftagende strøm. Målinger i løbene viser overvejende sediment under ebbestrømmen, og sammenholdt med andre iagttagelser må man antage, at lavere vader, bassiner og løb har tab af slik-

materiale under rolige vejrforhold og især under østlig blæst. Under blæst og storm fra S over V til NV og høj vandstand føres store mængder opslemmet materiale ind over vaderne. Sand forekommer i forbavsende ringe mængde i hævertsamlerprøver. Sandtransporten er formentlig overvejende en bundtransport med kortvarig opslemning. Stærkt sedimentholdigt vand opstaves langs med de vesteksponerede kyster, og hvis der forefindes dæmninger på vandskellene da i særlig stor mængde på sydsiderne. En vis mængde af slikken aflejres, men ellers føres sedimentet i stormperioder ved højvande atter og atter ind mod kysterne. (Det sand, der aflejres på forlandene ofte som tykke lag, skyldes lokal oprivning af brændingen på de kystnære vader.) Under påfølgende rolige vejrforhold med normale vandstande findes mindre aflejringer af slik på vaderne. Langt den største slikmængde må enten aflejres i bassiner og dyb eller transporteres ud i Nordsøen. Efter en længere rolig periode er næsten alt overfladisk slik fjernet fra vesteksponerede vader og under østenblæst som nævnt også fra de østeksponerede.

Den foreløbige opfattelse er altså den, at der kun under urolige perioder med blæst og storm fra vestlig komponent tilføres vadehavskysten — og formentlig Vadehavet i almindelighed — sediment, under andre vejrforhold viser sedimentregnskabet ligevægt eller tab.

Hydrografiske målinger i længere perioder omfattende både løb, vader og kyster vil være meget vanskelige og bekostelige at gennemføre; men det skulle være muligt ved hjælp af hævertsamlere at fremskaffe et noget bedre materiale, end der hidtil har foreligget. Ganske særlig vil hævertsamleren være velegnet til løsningen af begrænsede opgaver, som f. eks. materialtransporten over vandskellene og hvilke sedimentmængder, der i årets løb transporteres ind over kystvader og landvindingsfelter.

Det siger sig selv, at det vil være af stor praktisk interesse at kunne afgøre, hvor store mængder af det i vandet opslemmede materiale, der faktisk aflejres i landvindingsområderne. Dette vil naturligvis endnu kræve ret omfattende målinger; på det foreløbige materiale kan der kun foretages løselige skøn.

I følge *H. A. Olsen*, 1959, vil den samlede vandsøjle i årets løb over et forlandsområde i niveau + 1,2 m D. N. N. være ca. 273 m i modsætning til den samlede vandsøjle ved højvandslinie + 0,9 m D. N. N., der er ca. 524 m.

På forlandsområder omkring 1,2 m D. N. N. vil en årlig aflejring på omkring 2,5 cm være normalen. Hertil kræves, at der af hver liter af det vand, der har stået over stedet, er sedimenteret gennemsnitlig 50 mg.

Som det fremgår af ovenstående resultater fra hævertsamleren, vil en gennemsnitlig sedimentmængde i vadevandet langt overstige 50 mg/l. Da forlandsarealer på 1,2 m normalt kun oversvømmes under uroligt vejr, må man skønne, at der på disse vegetationsdækkede og for sedimentationen gunstigste områder maksimalt aflejres halvdelen af det opslemmede materiale. Foretages en lignende vurdering og sammenligning mellem *H. A. Olsens* undersøgelser ved Røhmø-dæmningen og hævertsamlermålingerne på Ebbevejen fås følgende:

Med en bundkote på 0,1 m D.N.N. vil der med en sedimentation på omkring 45 mg/l af den i årets løb dækkende vandmængde aflejres et lag på omkring 5 cm's tykkelse. For undersøgelsesperioden ved Ebbevejen i 1959 og 60 er det gennemsnitlige sedimentindhold omkring 140—150 mg/l. Kunne således blot  $\frac{1}{3}$  af dette materiale bringes til aflejring, ville man i dette område kunne få en lignende opvækst som ved Røhmø-dæmningen. Det må dog endnu en gang fremhæves, at materialet endnu er spinkelt, og at flere målinger over lange perioder er nødvendige til en eksakt vurdering af forholdene.

Der er ikke grund til at antage, at sedimentationen, hvor forholdene er gunstige, foregår som en kontinuerligt løbende proces med en vis procentisk størrelse i forhold til vandets sedimentindhold. Iagttagelser tyder snarere på, at sedimentationen overvejende foregår i korte perioder, når sedimentindholdet i vandet er særlig stort.

---

## SUMMARY

Morphologically the tidal area in the southwest part of Denmark – the Wadden Sea – may be described as a terrace of deposits laid over earlier glacial areas. A highly debatable question is the origin of the fine-grained material, silt and clay, that forms the bulk of the salt-marsh sediments. It would seem to be an established fact that the salt-marsh clay cannot originate from the rivers, so the problem is whether sediments are transferred to the Wadden Sea from the North Sea, or the materials involved in the recent formation of the salt marsh come from within the Wadden Sea area as a result of erosion in its shores or from the tidal flats and the deeper parts of the Sea. If the formation of the salt marsh is an internal redeposition in the Wadden Sea the possibilities of reclamation will be reduced; consequently it is of considerable practical importance to determine whence the salt-marsh clay comes.

In some parts of the Wadden Sea it is possible, by means of surveys and comprehensive cartographic work, to determine the extent of the deposition and erosion over long periods, so that by means of quantitative comparisons it can be made to seem probable that the finer components

of the marsh cannot originate in any large volume from coastal erosion or from leaching of the tidal flats.

In the tidal area of Listerdyb at least 3 million cbm. of marsh sediment was deposited between 1941 and 1961 in the Danish part alone; of this quantity a million cbm. are clay. This clay cannot have been due to coastal erosion, which is very slight there. The tidal flats contain only some few per cent of clay (maximum 5 per cent on an average). This means that the transfer of a million cbm. of clay sediment would involve at least the leaching of 20 million cbm. of tidal flat sediments. This can scarcely have been the case, because sediment analyses in 1941 and in the period 1955–61 reveal no alteration in the grain-size composition of the flats; at the same time deposition increased as a result of reclamation work.

Hydrographic research in Grådyb in 1938 made it evident that there was a loss of sediment from that part of the Wadden Sea; but if we calculate the loss, for instance for the period 1900–1960, the entire tidal area of Grådyb – 130 sq. km. – would have to lose a layer 25 cm thick in that time, which it did not. The error must be due to two causes: the hydrographical stations are established in the cbb channels (fairways) and the measurements were not taken in periods of rough weather when sediment translation is at its height.

For the purpose of investigating the quantity of suspended material in flood tides over long periods a new instrument has been tested in the Wadden Sea. Fig. 1 A shows the design of the siphon sampler. As the tide rises the bottle is filled by the siphon fig. 1 B, and it is emptied again at ebb tide, fig. 1 C. As it takes 20 to 30 minutes to empty, the sediment which has settled in the bottle cannot return to a state of suspension. The siphon sampler can thus collect material in several tidal periods. The variation of the quantity of suspended material ranges from 10 mg/l in quiet periods to 1000 mg/l, and sometimes several thousand mg/l in stormy periods. The average content of suspended material from several stations is between 90 and 173 mg/l over long periods. These investigations so far have been few in number; but on the basis of the preliminary measurements it may be estimated that under the best possible conditions for sedimentation – in dense salt-marsh vegetation – not more than half of the material suspended in the water is deposited. The sediment sampler is also applicable for instance for ascertaining if localities with no natural salt-marsh formation nevertheless receive so much suspended material that reclamation is possible.

---

#### LITTERATUR

- Crommelin, R. D.* (1940): De herkomst van het zand in de Waddenzee. T. K. N. A. G. 57, Amsterdam.
- Crommelin, R. D.* (1943): De herkomst van het Waddenslib met korrelgrootte boven 10 micron. Verh. Geol. Mijn. Gen., Geol. Serie 13. Haag.
- Favejee, J. Ch. L.* (1951): The origin of the »Wadden« mud. Meded. Landbouwhogeschool 51, 5. Wageningen.



of the marsh cannot originate in any large volume from coastal erosion or from leaching of the tidal flats.

In the tidal area of Listerdyb at least 3 million cbm. of marsh sediment was deposited between 1941 and 1961 in the Danish part alone; of this quantity a million cbm. are clay. This clay cannot have been due to coastal erosion, which is very slight there. The tidal flats contain only some few per cent of clay (maximum 5 per cent on an average). This means that the transfer of a million cbm. of clay sediment would involve at least the leaching of 20 million cbm. of tidal flat sediments. This can scarcely have been the case, because sediment analyses in 1941 and in the period 1955–61 reveal no alteration in the grain-size composition of the flats; at the same time deposition increased as a result of reclamation work.

Hydrographic research in Grådyb in 1938 made it evident that there was a loss of sediment from that part of the Wadden Sea; but if we calculate the loss, for instance for the period 1900–1960, the entire tidal area of Grådyb – 130 sq. km. – would have to lose a layer 25 cm thick in that time, which it did not. The error must be due to two causes: the hydrographical stations are established in the cbb channels (fairways) and the measurements were not taken in periods of rough weather when sediment translation is at its height.

For the purpose of investigating the quantity of suspended material in flood tides over long periods a new instrument has been tested in the Wadden Sea. Fig. 1 A shows the design of the siphon sampler. As the tide rises the bottle is filled by the siphon fig. 1 B, and it is emptied again at ebb tide, fig. 1 C. As it takes 20 to 30 minutes to empty, the sediment which has settled in the bottle cannot return to a state of suspension. The siphon sampler can thus collect material in several tidal periods. The variation of the quantity of suspended material ranges from 10 mg/l in quiet periods to 1000 mg/l, and sometimes several thousand mg/l in stormy periods. The average content of suspended material from several stations is between 90 and 173 mg/l over long periods. These investigations so far have been few in number; but on the basis of the preliminary measurements it may be estimated that under the best possible conditions for sedimentation – in dense salt-marsh vegetation – not more than half of the material suspended in the water is deposited. The sediment sampler is also applicable for instance for ascertaining if localities with no natural salt-marsh formation nevertheless receive so much suspended material that reclamation is possible.

---

#### LITTERATUR

- Crommelin, R. D.* (1940): De herkomst van het zand in de Waddenzee. T. K. N. A. G. 57, Amsterdam.
- Crommelin, R. D.* (1943): De herkomst van het Waddenslib met korrelgrootte boven 10 micron. Verh. Geol. Mijn. Gen., Geol. Serie 13. Haag.
- Favejee, J. Ch. L.* (1951): The origin of the »Wadden« mud. Meded. Landbouwhogeschool 51, 5. Wageningen.

- Gry, Helge* (1942): Quantitative Untersuchungen über den Sinkstofftransport durch Gezeitenströmungen. Folia Geogr. Dan. II, 1. Medd. fra Skall.-Lab. X. København.
- Hansen, Kaj* (1951): Preliminary Report on the Sediments of the Danish Wadden Sea. Medd. fra Geol. Foren. 12. Medd. fra Skall.-Lab. XIII. København.
- Jakobsen, B. & Jensen, Kr. M.* (1956): Undersøgelser vedrørende landvindingsmetoder i Det danske Vadehav. Geogr. Tidsskr. 55. Medd. fra Skall.-Lab. XV. København.
- Jakobsen, B.* (1954): The Tidal Area in South-Western Jutland and the Process of the Salt Marsh Formation. Geogr. Tidsskr. 53. Medd. fra Skall.-Lab. XV. København.
- Jarke, J.* (1955): Neue Ergebnisse zur Bodenbedeckung der Deutschen Bucht. Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen. Deutscher Geographentag Hamburg.
- Møller, J. T.* (1960): Mandø Ebbevej. Folia Geogr. Dan. VIII, 2. København.
- Nielsen, Niels* (1938): Nogle Bemærkninger om Marskdannelsen i det danske Vadehav. Geogr. Tidsskr. 41. Medd. fra Skall.-Lab. VI. København.
- Olsen, H. A.* (1959): The Influence of the Rømø Dam on the Sedimentation in the Adjacent Part of the Danish Wadden Sea. Geogr. Tidsskr. 58. København.
- Wohlenberg, E.* (1953): Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste 2. Heide i. Holst.
-