

Sandflugt og klitdannelse.

Af Hans Kuhlman.

Indledning.

På professor dr. phil. *Niels Nielsens* initiativ foretog jeg i 1954 og 1955 en række forsøg over sandflugt på Skallingen. Eksperimenterne var en fortsættelse af tidligere studier foretaget fra Skalling-Laboratoriet (*Niels Nielsen* 1935a, 1935b). Det var hensigten at skaffe eksakte værdier for sandflugt i et relativt fugtigt klima. Forsøgene og enkelte af disses resultater skal kort omtales i det følgende.

Arbejdets afvikling.

Det meste arbejde i marken blev foretaget i somrene 1954 og 1955. Juli 1954 udvalgte tre forsøgslinier vinkelret på kysten ved Høje Knolde. Den nordligste forsøgslinie (Fl. 54, 1), som lå ud for Skomagersletten, blev inddelt i forsøgsfelter og målestationer. Linien blev senere opmålt og nivelleret. I juli 1955 blev en ny forsøgslinie (Fl. 55, 1) oprettet få meter nord for Fl. 54, 1. Forsøgslinierne gik fra havstokken ca. 200 meter ind i landet. 1954 blev vindens hastighedsprofiler over forsøgsfelterne i Fl. 54, 1 målt, og de stedbundne vindhvirvler blev iagttaget ved hjælp af røg. Både i 1954 og 1955 blev, når vejret tillod det, den vindtransporterede sandmængde målt ved i forsøgsfelterne at opstille sandfælder, hvis indhold blev hjembragt til laboratoriet i Hø, hvor vejninger blev foretaget. Her blev der også foretaget fugtighedsbestemmelser, mens kornstørrelsesanalyserne udførtes på Skalling-Laboratoriet i Esbjerg.

Tidligere resultater i forskning af sandflugt.

I humide klimater, subtropiske såvel som arktiske, skabes klitformerne ved vekselvirkning mellem plantevækst og flyvesand. Der findes en nøje overensstemmelse mellem plantesamfundenes og klitformernes udvikling; dette er klarlagt ved eksakte, botaniske ana-

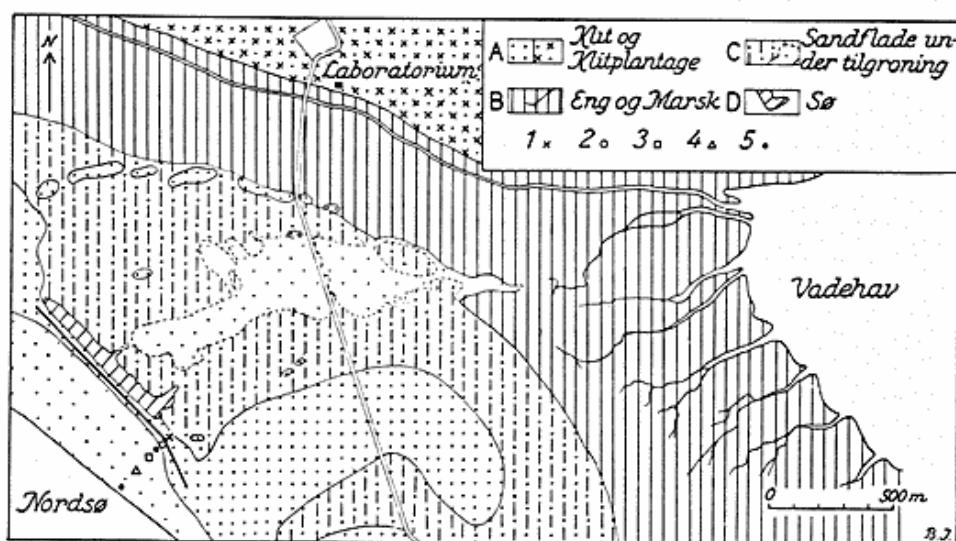


Fig. 1. Skomagersletten, Skallingen. Forsøgsområdet er markeret ved signaturtegn for de forskellige overfladetyper, fra 1 til 5.

Fig. 1. Skomagersletten, Skallingen. The research area is marked by symbols for the different surface types, from 1 to 5. A: dune and dune plantation. B: meadow and salt marsh. C: sand surface which is being covered with vegetation. D: lake. The symbols 1, 2, 3, 4 and 5 represent surface types having identical numbers, cf. the text.

lyser, især af J. W. van Dieren (1934), endvidere af E. Warming (1906, 1909), Bertel Lemberg (1933, 1934, 1935), Hefley & Sidwell (1945). Den biogene klitdannelse, som er karakteriseret ved voldklitter, parabelklitter og vandreklitter, er beskrevet af: Sokolow (1894), K. J. V. Steenstrup (1894), Gerhardt (1900), Solger (1908, 1910), Braun (1911), J. Högbom (1923), N. Hörner (1927), Hartnack (1931), Behrmann (1933), Paul (1944), A. Schou (1945, 1949), T. W. Böcher (1949, Grønland), R. F. Black (1951, Alaska).

Den plantebetingede klitdannelse er ikke væsentlig forskellig fra den fysiske klitdannelse. Den er blot en videre udvikling under humide betingelser.

De fysiske forhold ved sandflugt i aride klimater er blevet kvantitativt undersøgt af R. A. Bagnold (1935, 1936, 1937a og —37b, 1938a og —38b), hvis bog fra 1941 (2. udg. i 1954) er en hjørnesteen i vor nuværende viden om sandflugt. Han har opstillet matematiske udtryk for sandflugt; disse formler er bekræftet ved forsøg i vindtunnel og i den Libiske Ørken. Bagnold har påvist, at sandflugten i det væsentlige består af hoppende sandkorn (saltation), og at de omdiskuterede vindribber er udtryk herfor! (sml. A. Schou). Forudsætningen for Bagnolds arbejde var aerodynamikkens udvikling i dette århundrede, se O. G. Sutton (1949) og Martin Jensen (1954).

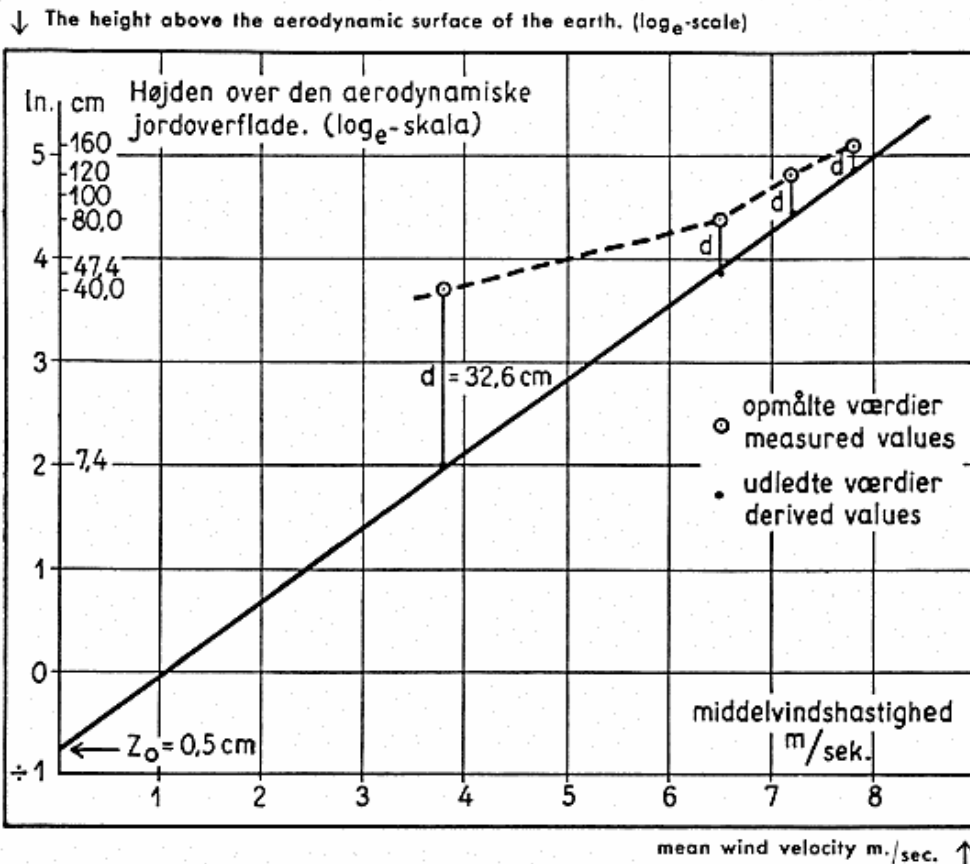


Fig. 2. Eksempel på et vindhastighedsprofil målt over den hvide klit, overfladetype 2. Abscissen angiver vindhastigheden. Ordinaten er den naturlige logaritme til målehøjden minus den nødvendige nulpunktsforskydning, som plantedækket betinger, ligning 2,2 i teksten. d er den værdi, som skal trækkes fra de reelle målehøjder, for at punkterne kommer til at ligge på en ret linie; d findes grafisk ligesom z_0 , der er den rette linies skæringspunkt med ordinataksen.

Fig. 2. Example of a wind-velocity profile measured over the white dune. Surface type 2. The abscissa indicates the wind velocity. The ordinate is the natural logarithm up to the measuring height minus the necessary dislocation of the zero point conditioned by the vegetation-cover, cf. equation 2,2 in the text. d represents the value which has to be deducted from the real measuring heights, so as to have the points situated on a straight line; d is found graphically like z_0 , which is the point of the straight line intersecting the ordinate axis.

Teori.

Mine forsøg var i hovedsagen en afprøvning af *Bagnolds* resultater, idet jeg søgte at incorporere fugtighedens indflydelse. Den maksimale sandmasse: q_m , som passerer et lodret plan vinkelret på vindretningen, kan, under aride forhold, generelt udtrykkes således:

$$q_m = C \sqrt{\frac{d_1}{D}} \cdot \frac{\rho}{g} V_*'^3 \quad (+ \text{arbitrær konstant}) \quad 1.$$

C = en konstant, afhængig af overfladens karakter (stenet eller san-

det). Den arbitrære konstant er bestemt ved den vindhastighed, hvorved sandflugten starter. d_1 = sandets middeldkornstørrelse. D = standardkornstørrelse på 0,025 cm. $\frac{p}{g}$ = luftens massefylde. Forudsætningen for ligning 1. er, at vinden er turbulent (dette vil næsten altid være tilfældet i naturen), og at luften har omtrent termisk ligevægt (overskyet). Dette gælder også for ligning 2,1, 2,2 og 2,3, hvoraf V_* kan udledes. V_*' er friktionshastigheden for vinden over det sandflugtsdækkede areal.

For en fast, vegetationsløs overflade gælder, at vindhastigheden $v(z)$ i målehøjden z kan udtrykkes:

$$v(z) = \frac{1}{ka} V_* \log_e \frac{z}{z_0} \quad 2,1.$$

ka = Kármán's konstant = 0,4 (ved termisk ligevægt). $V_* = \sqrt{\frac{\tau}{p}}$, τ er luftens træk i overfladen i dyn pr. cm². p = luftens vægtfylde. z_0 = ruhedparameteren, som er afhængig af overfladens ruhed, $v(z_0) = 0$.

For en plantedækket overflade gælder:

$$v(z) = \frac{1}{ka} V_* \log_e \frac{z+d}{z_0} \quad \text{for } z > z_0 + d \quad 2,2$$

d = den nødvendige nulpunktsforskydning af målehøjden: den aerodynamiske jordoverflade.

For en løs, nøgen sandoverflade med flugt har *Bagnold* vist:

$$v(z) = \frac{1}{ka} V_*' \log_e \frac{z}{k'} + Vt \quad 2,3.$$

Vt og k' er koordinaterne til hastighedsprofilernes focus i et diagram, som angiver funktionen $v(z)$ med z i logaritmisk skala.

For at kunne sammenligne vindhastigheden og transporterede sandmængder i de forskellige lokaliteter var det nødvendigt at få kendskab til de aerodynamiske parametre z_0 og d ; dette skete ved at måle vindhastigheden samtidig i forskellige højder: vindens hastighedsprofil.

De fundne vindhastigheder indsættes i et diagram, hvor hastigheden er abscisse, og \log_e til målehøjden er ordinat. Af diagrammet findes parametrene, se eksemplet i fig. 2.

Målemetoder.

Vindens hastighedsprofiler blev målt med instrumenter og en teknik, der er beskrevet hos *Bagnold* (1954) og *Martin Jensen*

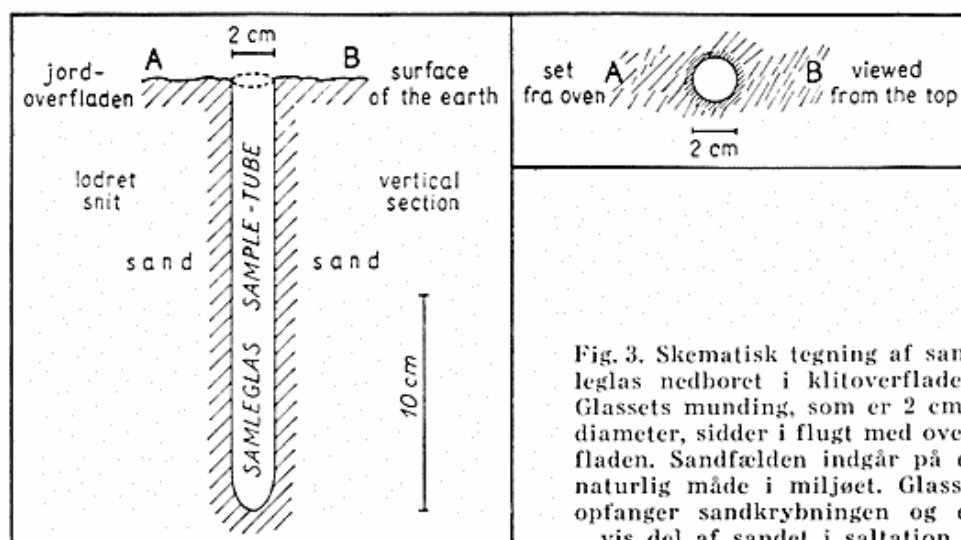


Fig. 3. Schematisk tegning af samleglas nedboret i klitoverfladen. Glassets munding, som er 2 cm i diameter, sidder i flugt med overfladen. Sandfælden indgår på en naturlig måde i miljøet. Glasset opfanger sandkrybningen og en vis del af sandet i saltation.

(1954). Pitotrør og multimanometer var med stor venlighed udlånt fra Danmarks tekniske Højskole, ved dr. techn. et phil. *Martin Jensen*.

Hver dag blev der foretaget meteorologiske observationer, nedbøren og vindretningen blev bestemt med primitive instrumenter. Temperatur og luftfugtighed målt med et Assmann-psychrometer. Vindstyrken blev registreret med et lille kopanemometer anbragt på en 1 m høj stav, frit i terrænet.

Forskellige sandfælder blev gennemprøvet. Man må forlange af en sandfælde, 1) at den kan anbringes og fjernes hurtigt, uden de naturlige forhold ændres væsentligt, 2) at den under selve målingen indvirker mindst muligt på vinden og overfladen. På Skallingen viste de af *Bagnold* anvendte fælder sig uegnede, fordi de dannede store luvhvirvler, både ved den vanskelige anbringelse og ved selve forsøgets afvikling. I 1954 anvendtes samleglas (20 × 200 mm, med spids bund) som sandfælder. Glassene kunne hurtigt bores i jorden, således at munden var i flugt med overfladen, se fig. 3.

Disse glas opfangede kun en del af den sandmængde, som passerede en 2 cm bred linie vinkelret på vindretningen. Det er vanskeligt at bedømme, hvor stor en del glassene fangede, fordi sandflugten udviste stor lokal variation, men det skønnes, at de fangede alt det sand, som blev skubbet frem, og en vis del af det, som hopper.

I 1955 blev der lavet en forbedret udgave af *Bagnolds* „skærm-

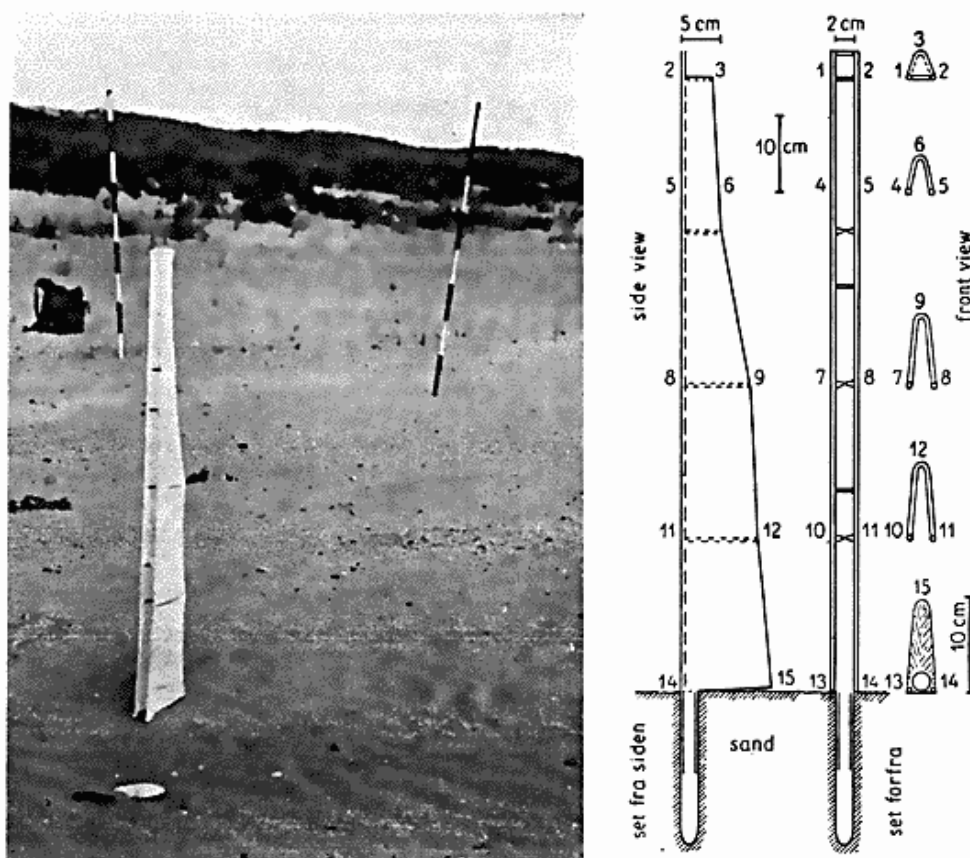


Fig. 4. Sandfælde af lignende art som Bagnold's „skærm“, der kun opfangede sandet i saltation. Denne er formet som en dyb og smal rende, der åbner sig mod vinden. Ved sandoverfladen findes åbningen ned til et samleglas, der er anbragt som vist på fig. 3. Sandfælden vender på billedet skråt fremad mod venstre, vinkelret på de svage vindribber.

Fig. 4. Sand-trap similar to Bagnold's "screen", which only catches sand in saltation. This trap is shaped like a long, narrow wedge, open side towards the wind. At the sand-surface is the mouth of a collecting tube placed as shown in fig. 2. The sand-trap is pointing forward in an oblique position to the left at a right angle to the feeble wind ripples.

fælde“. Af stålpinde og nylonstof dannedes en smal skærm (åbning: 2 cm bred), som ved en manchete hurtigt kunne anbringes i et i overfladen nedboret samleglas, se fig. 4. Ved siden af denne fælde blev et glas anbragt på sædvanlig måde (fig. 3). Tilsammen fangede disse to fælder største delen af det sand, som passerede en 2 cm bred linie vinkelret på vinden.

Der var dog også ved denne opstilling luvhvirvler; disse forsvandt næsten helt ved indførelsen af en ny sandfælde, som ses på fig. 5. Den er principielt dannet ved, at *Bagnold's* skærmfælde er blevet opdelt i led, som er rykket ud fra hverandre, dog således, at mundingerne ligger i samme lodrette plan. Den har endvidere den fordel,

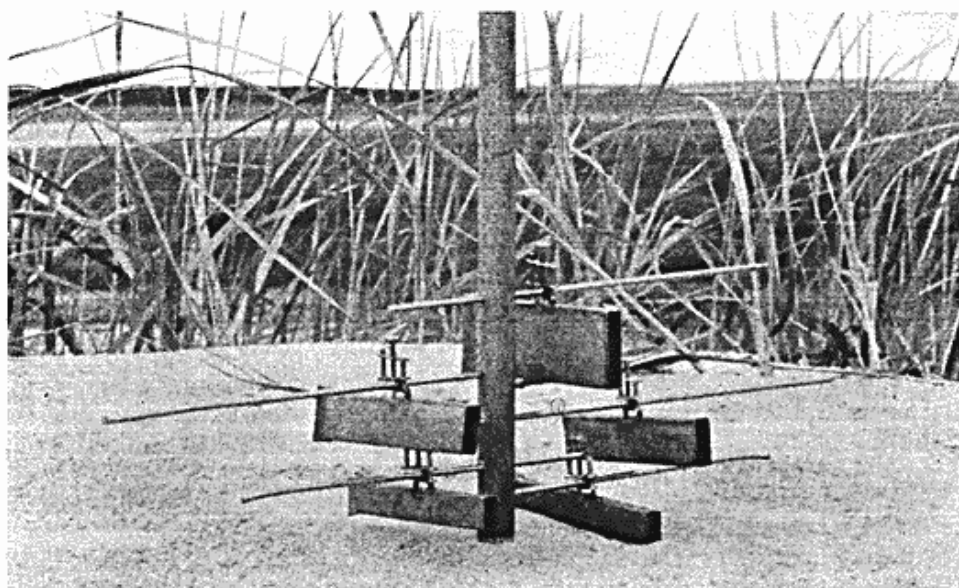


Fig. 5. Opdelt sandsamler i havklitten. Hvert led, der er en smal blikæske uden endestykker, kan monteres uafhængigt af de øvrige. Under målingen sættes prop i de åbninger, som vender bort fra vinden. Hvert led er ophængt således på stokken, at munden, som her vender fremad og til højre, er en vertikal fortsættelse af det foregående leds, blot horizontalt forskudt.

Fig. 5. Sand-collector in the dune, composed of several units. These units, each of which is a narrow tin without end-pieces, can be mounted independently. During the measuring work the openings turning away from the wind are closed. Each unit is suspended on the pole in such a manner that the mouth, which here points forward and to the right, constitutes a vertical continuation of that of the previous unit, only horizontally displaced.

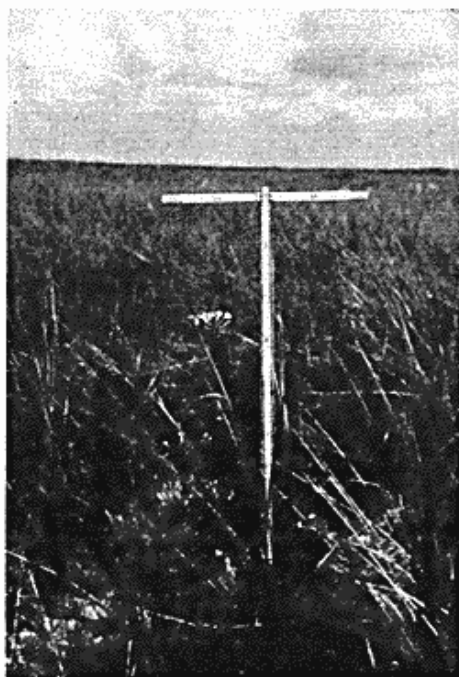


Fig. 6. Overfladetype 1, den grå klit. Målestokken, som er 1 m høj, viser, at plantetuerne er omkring 80 cm høje, men lidt ujævnt fordelt med 5—20 cm imellem. Den blomstrende plante ved målestokken er *Oenothera muricata* var. *ammophila*. Sandet kan ikke ses.

*Fig. 6. Surface type 1, the grey dune. The measuring rod, which is 1 m. high, shows that the tussocks have a height of about 80 cm. and are rather unevenly dispersed, at intervals of 5—20 cm. The plant in flower which is seen near the rod is *Oenothera muricata* var. *ammophila*. The sand is not visible.*



Fig. 7. Overfladetype 2, den hvide klit. Sandet ses tydeligt mellem de mange tuer af hjælme (*Ammophila arenaria*), som ifølge den indsatte målestok er 60-70 cm høje. Ca. 30 cm højere når de blomstrende svinemælk (*Sonchus arvensis*), der ses midt i billedet.

*Fig. 7. Surface type 2, the white dune. The sand is clearly seen among the many tussocks of marram-grass (*Ammophila arenaria*), which the measuring rod shows to have a height of 60—70 cm. The sowthistle in flower (*Sonchus arvensis*), which is seen in the middle of the photo, may grow to about 30 cm higher.*



Fig. 8. Overfladetype 3, embryonalklitten, som har store partier af nøgent sand mellem hjælmeplanterne (*Ammophila arenaria*), hvis højde samt indbyrdes afstand er 30—40 cm.

*Fig. 8. Surface type 3, the embryonal-dune, has big areas of bare sand between the marram-grass plants (*Ammophila arenaria*), the height of which, as well as their mutual distance, is 30—40 cm.*

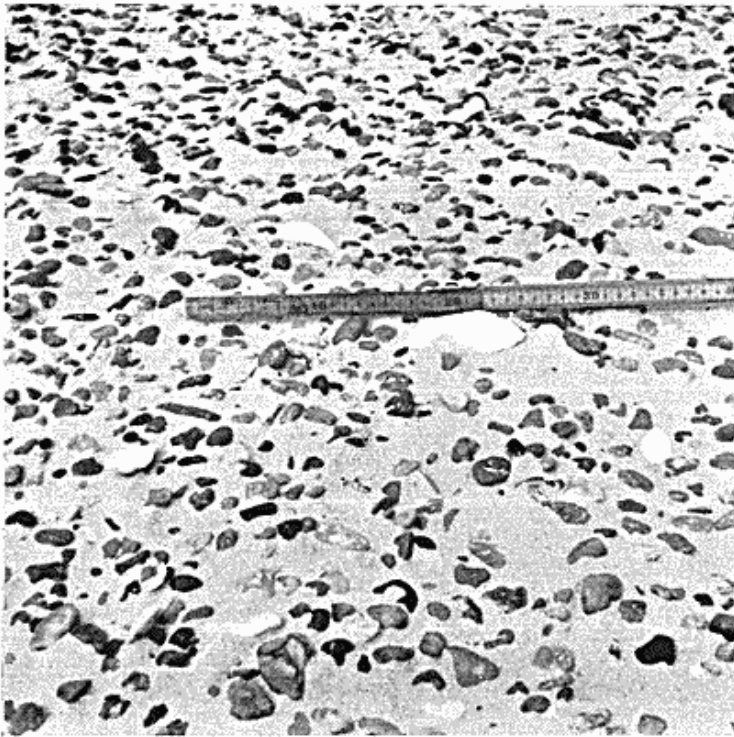


Fig. 9. Overfladetype 4, den stenbestroede sandflade. Målestokken viser, at stenene er 2—3 cm store, og deres indbyrdes afstand er af samme dimension. Muslingen ved målestokken er en almindelig sandmusling (*Mya arenaria*).

*Fig. 9. Surface type 4, a sand-surface strewn with stones. The measuring rule shows that the stones are 2—3 cm. big, and that the distance between them is of the same order. The clam shown beside the measuring rule is a common long clam (*Mya arenaria*).*

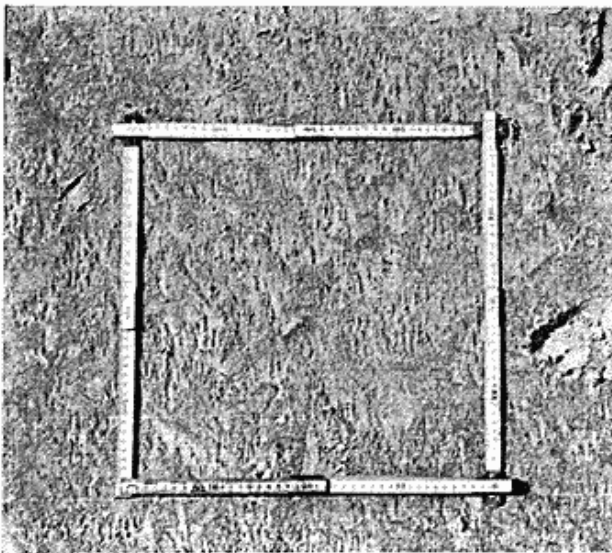


Fig. 10. Overfladetype 5, den faste, fugtige sandoverflade. Målestokken danner et kvadrat, hvis sider er 40 cm. Vinderosionen har dannet „mikrojordpyramider“ i sandet.

Fig. 10. Surface type 5, a firm, moist sand-surface. The measuring rule forms a square, the sides of which are 40 cm. The wind erosion has formed "micro-earth pyramids" in the sand.

at sandtransporten i forskellige højder over jorden kan måles. I et dansk klitområde ser denne type ud til at være anvendelig.

Mens de forskellige sandfælder registrerede, målte kopanemometret vindens hastighed i 1 m's højde. Måleperiodens længde var fra 2 til 30 minutter.

Kornstørrelsesanalyserne blev foretaget med sigter på den måde, som er anført hos *Krumbein & Pettijohn* (1938), og som er blevet anvendt af *Kaj Hansen* (1951).

Sandets fugtighed blev bestemt ved at finde vægttabet (i %) i en sandprøve, som blev tørret til konstant vægt.

Beskrivelse af forsøgstederne. Overfladetyper.

Forsøgsområdet kan fordelagtigt inddrages i overfladetyper, som alle er repræsenteret ved kysten ud for Skomagersletten: *Type 1.* (fig. 6): klitsandet ($Md = 0,2$ mm) har et relativt tæt plantedække, den grå klit. *Type 2.* (fig. 7): klitsandet (0,2 mm) har jævnt fordelt vegetation af hjælme og marehalm, den hvide klit, *dunus anticus*. *Type 3.* (fig. 8): spredte tuer af klitgræsser — embryonalklitter. *Type 4.* (fig. 9): sand (0,2 (0,3) mm) bestrøet med sten og moluskskaller (2—3 cm i middelstørrelse). Denne type kan yderligere opdeles; dette er ikke forsøgt. *Type 5.* (fig. 10): fast, fugtig sandoverflade (2—4%), som på andre lokaliteter kan være gennemsat af algetråde. *Type 6.:* tørt, nøgent sand.

Type 1 og 2 findes i den store voldklit (havklit) mellem havet og Skomagersletten, type 1 nærmest sletten. Type 3 til 5 findes på forstranden, hvor 4 er mest udbredt, type 5 findes nær havet og ved klittens fod (fig. 1). På Skallingens sydstrand ud for Sibirien dækker type 5 store arealer. Type 6 udgør større eller mindre dele af både forstranden og havklitten, *Bagnolds* undersøgelser drejer sig næsten udelukkende om sandflugt over denne overfladetype.

I danske klitområder udgør type 6 en lille del, som er afhængig af vejret, idet 6 let ændres til type 5, som sammen med 4 er dominerende i ikke dæmpede sandflugsarealer. 4 forefindes især på strandflader og afblæsningsflader. På grund af den megen tilplantning af klitområder har type 1 og 2 i dag langt den største udbredelse i det samlede danske sandflugtsareal.

Meteorologi. Somrene 1954 og 1955.

De egentlige målinger af sandflugt skete i juli-august 1954 og 1955. Disse to somre var meget forskellige i deres meteorologiske karakter. „1954“ var blæsende og regnfuld, idet lavtryk med til-

hørende front-systemer hyppigt passerede Danmark, det sydlige Norge og Sverige. I „1955“ var vejret tørt og svagt blæsende, idet lavtrykkene vandrede nord om Skandinavien og Nordsøen, hvorover der lå et relativt stabilt højtryk. I fig. 11 og 12 er disse karakteristiske træk anskueligt fremstillet. Sommeren 1954 var „atlantisk“, mens juli-august 1955 havde kontinentalt præget vejr.

Resultater. Vindens hastighedsprofiler.

Resultaterne fra målingen af vindens hastighedsprofiler over de forskellige overfladetyper er angivet i tabel I.

Tabel I.

NAVN	Overfladetype nr.	Nulpunkts- forskydning d (cm)	Ruheds- parameteren z_0 (cm)	Antal målinger
Egne mål	1	20	8,2	1
O. G. Sutton	langt græs ca. 60 cm	30	4—9	—
Martin Jensen	græs 30 cm	—	7,0	14
Egne mål	2	28	0,77	4
Egne mål	3	0	0,1	9
Egne mål	4	0	0,01	6
O. G. Sutton	„level desert“	0	0,03	—
Åke Sundborg	„transportflade“	0	0,02—0,04	—
Egne mål	5	0	0,002	4
R. A. Bagnold	fugtige vindribber	0	ca. 0,002	—
O. G. Sutton	is	0	0,001	—

Over den grå klit (overfladetype 1) bliver vinden løftet op over sandet, idet $d = 20$ cm. Med den høje, dækkende plantevækst kan sandflugt ikke forventes. z_0 - og d -værdien svarer godt til *Suttons* (1949) og *Martin Jensens* (1954) angivelser.

Ved den hvide klit er z_0 forbavsende lille, men da de høje planter her er spredte, må ruhedstætheden influere. *Schlichting* (1936) har

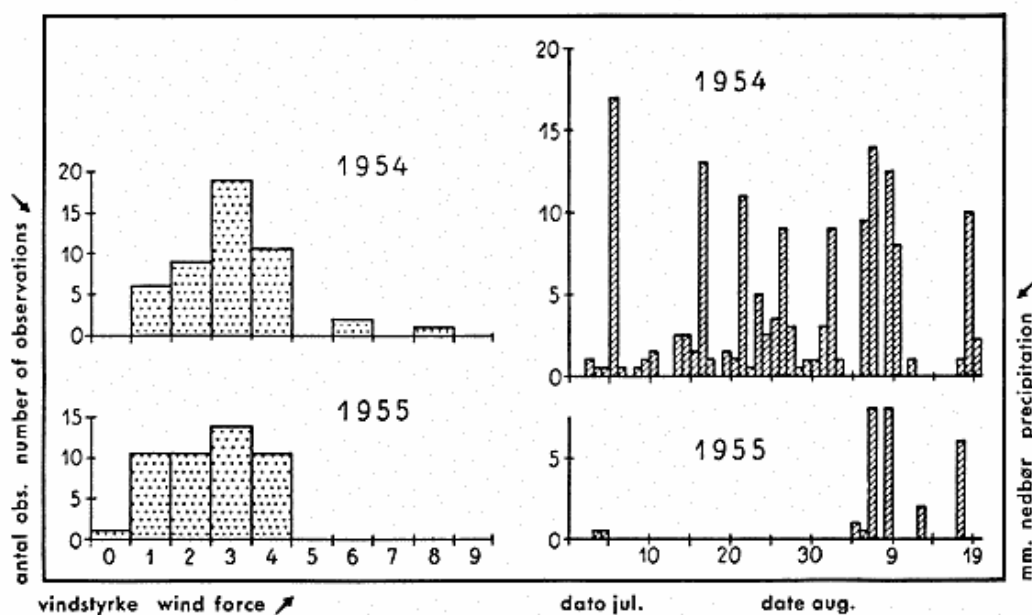


Fig. 11.

Fig. 12.

Fig. 11. Fordelingen af de daglige vindstyrker i somrene 1954 og 1955 ved Skallingen. Abscissen angiver vindstyrken i Beaufort's skala, ordinaten er antal observationer. Hver dag er repræsenteret ved een morgenobservation ved Blåvand fyr i perioden 3. juli—21. august, begge dage inklusive. 1955-perioden var mindre blæsende, idet ca. $\frac{1}{2}$ af observationerne viste vindstyrker under 3, og ingen over 4.

Fig. 11. Distribution of the daily wind-force in the summers 1954 and 1955 at Skallingen. The abscissa indicates the wind-force on the Beaufort scale; the ordinate is the number of observations. Each day is represented by one morning observation at the Blåvand Light in the period 3rd July—21st August, both dates included. The 1955-period was less windy, about half of the observations showing wind-speeds below 3, none of them above 4.

Fig. 12. Nedbøren i somrene 1954 og 1955 ved Skallingen. Abscissen er datoerne fra den 3. juli til og med den 21. august, ordinaten er nedbøren i mm pr. døgn. 1955 havde 4 ugers tørke, mens det året forud regnede næsten hver dag.

Fig. 12. The precipitation in the summers 1954 and 1955 at Skallingen. The abscissa are the dates from the 3rd July till the 21st August included; the ordinate is the precipitation indicated in mm, per 24 hours. 1955 had 4 rainless weeks, whereas in 1954 the rain was falling almost every day.

vist, at ruhedselementerne skal være tæt placerede for at ændre ruhedsparemeteren kendeligt. Vidt spredte ruhedselementer er uden indflydelse. Hertil kommer, at græsbladene bøjes for vinden, hvorved overfladen på en måde udjævnes. På dette grundlag er z_0 - og d -værdierne for overfladetyperne 2 og 3 acceptable. Rundt regnet er ruhedsparemeteren for embryonalklitter (3) $\frac{1}{8}$ af tilsvarende for „den hvide klit“, og $\frac{1}{80}$ af paremeteren for „den grå klit“.

Mine måleresultater fra den stenbestrøede overflade (type 4) passer omtrent med, hvad Sutton (1949) og Åke Sundborg (1955)

meddeler. z_0 -værdien fra type 5 er svær at vurdere, da den er i god overensstemmelse med *Bagnolds* (1954) angivelse side 58, men svarer meget dårligt til *Suttons*.

Skønt resultaterne i tabel I må modtages med en vis forsigtighed, bidrager de dog til at øge vor viden om relationen mellem overfladens karakter og vinden. Fra tabellen kan foretages en række udledninger. Her skal eksempelvis nævnes, at når vinden passerer fra en fugtig, fast sandflade ind over et stenbestroet areal, vil den reduceres i hastighed (de jordnære lag først). Man må ved sandflugt forvente en vis aflejring blandt stenene.

Sandflugten i 1954 og 1955. Fugtighedens indflydelse.

De målte mængder af vindtransporteret sand skal ikke omtales nærmere her, derimod vil sandflugtens relation til nedbøren blive behandlet.

Fugtighed i sandet hæmmer sandflugt, men ikke i det omfang, man umiddelbart venter. Er sandflugten først startet, vil man iagttage, at den relativt let passerer store arealer af fugtigt, fast sand (overfladetype 5), som har en fugtighedsprocent på 3—5; herved bliver selve flyvesandet fugtigt, men blot 0,2—0,5%. Den maksimale fugtighed, som blev målt i flyvesand, var 1% ved en vindhastighed på omkring 15—16 m pr. sek. Vindens bevægende kraft synes ofte (ved overfladetype 5) betydeligt større end fugtighedens sammenholdende virkning på sandskornene. Starten til sandflugt blev også iagttaget under forbavsende fugtige forhold. Kort efter en kraftig regnbyge kunne man iagttage, at sandet begyndte at fyge stedvis i forsøgslinierne, forudsat at det blæste tilstrækkeligt, nemlig 5—6 m pr. sek. for $z = 100$ cm (sml. *Paul* 1944, side 327).

I den fugtige sommer 1954 (fig. 12) var sandflugten af næsten samme dimensioner som i den ekstremt tørre sommer 1955, som havde de mest „ørkenagtige“ forhold, der kan forventes i et dansk klitområde. Det spørgsmål meldte sig: „Hvor gemte vinden det depot af sand, som gjorde den i stand til at skabe sandfygning trods regn og fugt?"; dette førte til en nøje analyse af overfladesandets fugtighed og tørhed.

Fugtigheden havde inden for cm-korte afstande en overordentlig stor variation, både horizontalt og vertikalt. Dette skyldes, at der i klitten og på stranden findes lag af tørt sand, som selv efter timers, ja dages, regn ikke bliver fugtigt. Disse lag, som havde form af linser med længste akse parallelt med overfladen, lå nær overfladen og overlejreredes af lag (2—30 mm tykke), der efter regn var meget

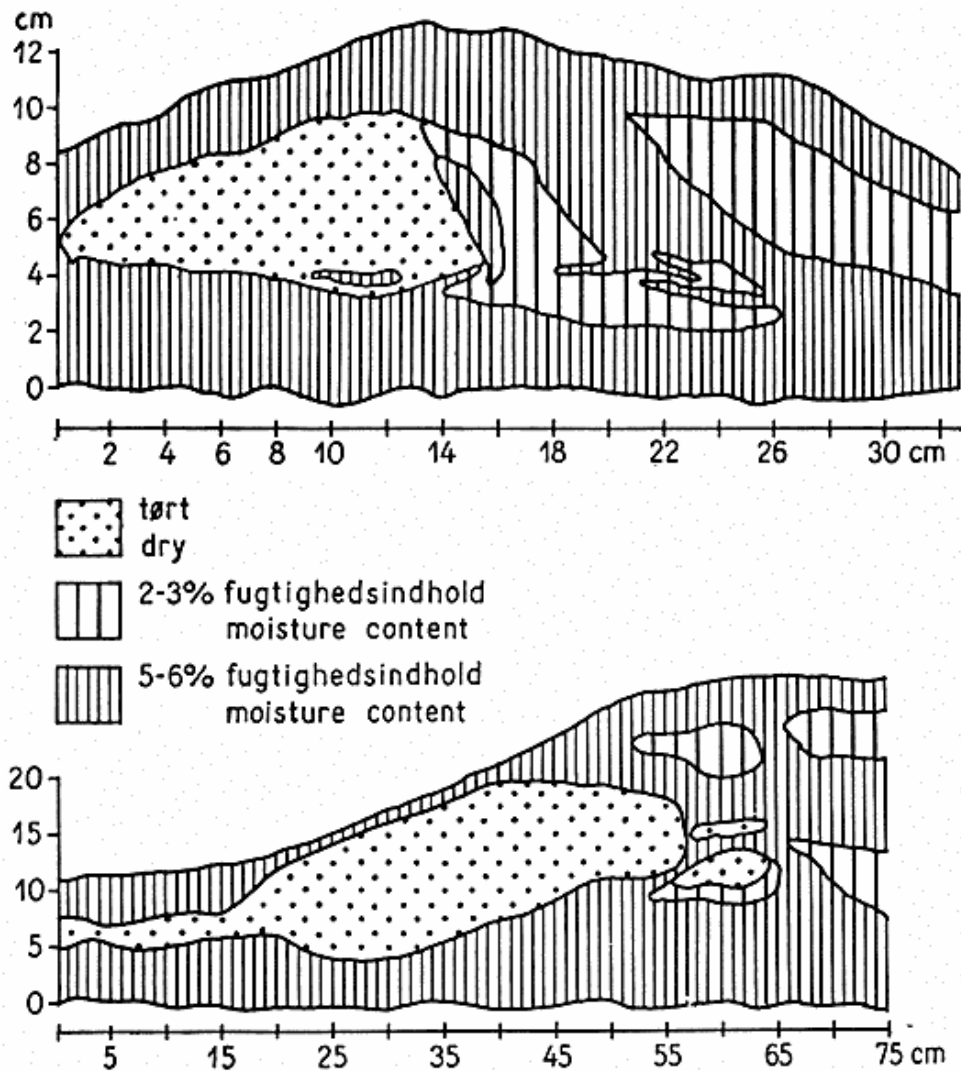


Fig. 13. Skematiske tegninger af profiler i klitoverfladen. De tørre sandlinsers beliggenhed er vist, idet tørt sand er markeret med prikker. Det krydsskraverede er 2—3% fugtigt sand, mens 5—6% fugt er angivet ved skråskravering. I øverste tegning svarer de store tern til et profiludsnit på 2,2 cm, i nederste til 5,5 cm.
 Fig. 13. Schematic drawings of profiles in the surface of the dune; the situation of the dry sand-lenses is shown, the dry sand being indicated by means of dots; the cross-hatched section represents sand with a moisture content of 2—3%; the diagonal hatching indicates a moisture content of 5—6%. In the upper drawing the big crosses correspond to a profile section of 2,2 cm., in the lowest drawing to a profile section of 5,5 cm.

våde. Selve sandlinsen var oftest en decimeter tyk og 20-30-100 cm bred. Hvis man efter regn skar profiler i sandoverfladen, fremtrådte sandlinsene, som det vises på fig. 13 og 14. Under papkassen i fig. 14 ses udskredet, tørt sand, som har en skarp grænse til det fugtige sand, der står med lodret væg i snitfladen. De tørre lag bestod altid af løst sand, som enten nylig var omlejret af vinden eller optrampet

af mennesker og dyr. Det fugtige sand lige ved siden af var fast og tæt pakket.

Under en regnbyge vil vandet i overflader med tørre linser have en ringe vertikal bevægelse, men en udpræget horizontal. Man kan se regnvand perle hen over løst sand, som havde vandet været kviksølv. Forklaringen på, at det løse sand vanskeligt vædes, er formodentligt: det løse sand tørres let, og er det først blevet helt udtørret, lader det sig meget vanskeligt fugte af regn, fordi vandet skal udføre et stort arbejde for at udbrede sin overflade. Tætpakket sand bliver sjældent helt tørt, og som følge heraf skal vandet udføre et mindre arbejde for at gennemvæde det.

Disse tørre sandlinser var det depot, som betingede, at 1954 havde så stor sandtransport trods hyppig nedbør. Det blev iagttaget, at den sporadiske sandbevægelse efter regn var knyttet til de steder, hvor de tørre sandlag blev fundet. Da linsernes materiale var nyligt aflejret, betød det, at sandet, som blev aflejret den ene dag, var det første til at flyve den næste dag. Linserne optrådte som „Tordenskjolds soldater“ og bevarede herved sandflugten igennem fugtige, regnfulde perioder. I juli 1954 blev sandflugten således observeret yderst på forstranden, men næsten ikke i havklitten. I august var nogle af sandlinserne vandret ind til havklitten, hvor der nu var stor sandbevægelse, mens forstranden lå i ro.

Denne indvandring, i løbet af sommeren 1954, af en mindre sandmasse var meget iøjnefaldende, især da dens kornstørrelser afveg fra det normale i forsøgslinien, idet de var noget grovere.

Det er heraf klart, at det er meget kompliceret at indføre en størrelse, som skal udtrykke fugtighedens indflydelse. Man kan ikke blot sige, at fugtigheden i overfladen er så og så mange %. Det er nødvendigt at tage hensyn til fugtigheden i overfladens profil til en dybde af 10—20 cm. Det er afgørende vigtigt, om vinden blot behøver at fjerne 1 cm fugtigt sand for at nå et 9 cm tørt lag, eller om den graver i stadig fugtigere sand.

Ved bedømmelsen af de meteorologiske betingelser for æolisk virksomhed er det derfor nødvendigt at tage overfladens fugtighedsprofil med i betragtningerne (sml. *Sundborg* 1955). På grund af de tørre sandlinser kan regnfyldt og blæsende vejrlig have en næsten „ørkenagtig“ sand-støv-transport.

Den store subarktiske vinderosion på Island kan sikkert ses i relation til dette. De hyppigt passerende lavtryk fremkalder store vindstyrker og megen nedbør, men nedbøren behøver kun at have ringe hæmmende virkning på de æoliske processer.



Fig. 14. En tør sandlinse, som er skredet ud ved frembringelsen af profilet i sandet. Man ser, at laget var omgivet af fugtigt sand, der står med lodret snitflade. Linsen lå tæt ved overfladen.

Fig. 14. A dry sand-lense which has slipped at the cutting of the profile in the sand. As will be seen, the layer is surrounded by moist sand, which appears with a vertical cut. The lense was found within a few centimetres of the surface.

Linserne har også en kulturgeografisk betydning. Det er velkendt, at mennesker ved uagtsom destruktion af plantevæksten i klitter kan skabe sandflugtsødelæggelser, men det er ikke bemærket, at disse ødelæggelser fremmes, ved at menneskers og dyrs færden i det nøgne sand skaber tørre, løse sandlag,

Disse vigtige sandlag er sandsynligvis ikke tidligere blevet påpeget. *W. Hartnack* (1931) nævner dog i en fodnote side 197 en iagttagelse, som tyder på, at han har set dem.

Sammenfatning.

Under en række forsøg over sandflugt på Skallingen er følgende resultater blandt andet opnået:

- 1) En i danske klitter anvendelig sandfælde er fremstillet.
- 2) Den aerodynamiske parameter z_0 er målt for en række overfladetyper.
- 3) Der er påvist overfladelag af løst sand, som meget vanskeligt vædes, og som derved afgørende fremmer sandflugt under fugtige vejrforhold. Disse sandlinser er, så vidt det vides, ikke tidligere blevet omtalt i litteraturen.

SUMMARY

In 1954 and 1955 measurements of the wind and its transport of sand were carried out on the peninsula Skallingen northwest of Esbjerg. The experiments constituted a continuation of previous work on sand drift in Skallingen, *Niels Nielsen 1935*.

The object of these experiments was to procure qualitative values for sand drift in a moist climate like that of Denmark. *Bagnold's* work, which has been used and further developed by *Chepil, W. S. Zingg, A. W. and K. von Sindowski*, has formed the theoretical basis of the present work. This preliminary exposition touches only a few of the main points of the results obtained.

The field of research was the beach and the dunes facing the North Sea, northwest of Høje Knolde, the northern part of Skallingen. According to *van Dieren's* terminology, the predominant types of dune are: *Dunus embryonalis fundatus* and *Dunus anticus*. It has been considered convenient to describe the region in question by means of surface types, as shown in figures 6, 7, 8, 9 and 10. To these types must be added a sixth: dry, bare sand (the sand is defined as in *Wentworth's* scale); the predominant grain size in the area is about 0,2 mm. The classification of types which has been chosen for the present work must be compared with that of *H. Schlichting (1936)*.

As the sand drift was considered in relation to wind-velocity at a standard height level it was necessary to measure the roughness parameter, z_0 , for each surface type, cf. the equations 2,1 and 2,2. This was done by means of a technique described by *Bagnold and Martin Jensen (1954)*, and the computed results are given in table no. I; the figures shown are average values. As will be seen, the roughness parameter is less than might have been expected. This is probably due to the fact that the roughness elements are rather sparse, cf. *H. Schlichting (1936)*; another contributing factor, as far as the surfaces with vegetation-cover are concerned, is that at growing wind-velocity the grass is bent, thus forming a smoother surface. A similar observation has been made by *K. L. Calder (1949)*.

Some sand-traps erected in order to catch the wind-transported sand were thoroughly tested. In the figures 3, 4 and 5 are shown three types of sand-traps which are considered suitable, though not ideal, because the suspended material escapes. Furthermore, in the case of type: fig. 4, leeward whirls are formed. The best results were obtained with a combination of 3 and 5.

During the measuring of the quantity of wind-transported sand, the restraining effect of rain and moisture proved astonishingly small. Only a few minutes after a shower, the sand was apt to drift. An investigation into the moisture-content of the sand-surface after rain showers revealed that within distances of only some centimetres the moisture-content of the sand showed a very great horizontal and vertical variation. This is because on the beach and in the dunes are found layers of dry sand which do not become moist after rainy periods of hours or even days. These layers, with the shape of lenses, the long axis parallel to the

surface, are situated close to the surface and are superposed by wet layers 2—30 mm. thick. If, after rainfall, profiles were cut in the sand, the sand-lenses appeared as shown in figures 13 and 14. In size, the lenses most often had a thickness of 10 cm., with a breadth of 20—100 cm.; they always consisted of loose sand, newly deposited, whereas the moist sand close by was firm and compact to the touch.

The probable reason why the loose sand becomes moist only with difficulty is that this sand has completely dried out; this means that the water will have to perform a good deal of work in order to moisten the sand. During a shower, water-movements of a pronouncedly near-horizontal character may be seen to surround the dry sand-layers.

It seems that these layers play a decisive role in sand drift in a moist climate; they offer conditions for sand-transport even in rainy periods, provided that the wind-velocity is sufficiently great.

LITTERATUR

- Bagnold, R. A.* (1935): The Movement of Desert Sand. Geogr. Journ. 85. London.
- Bagnold, R. A.* (1936): The Movement of Desert Sand. Proc. Roy. Soc. A. 157. London.
- Bagnold, R. A.* (1937): The Size-Grading of Sand by Wind. Proc. Roy. Soc. A. 163. London. (a).
- Bagnold, R. A.* (1937): The Transport of Sand by Wind. Geogr. Journ. 89. London. (b).
- Bagnold, R. A.*: (1938): Grain Structure of Sand Dunes and its Relation to their Water Content. Nature 142. London. (a).
- Bagnold, R. A.* (1938): The Measurement of Sand Storms. Proc. Roy. Soc. A. 167. London. (b).
- Bagnold, R. A.* (1941 & 1954): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. 1. & 2. udg. London.
- Behrmann, W.*: se *Klute, F.*
- Black, R. F.* (1951): Eolian Deposits of Alaska. Arctic 4. Ottawa.
- Braun, G.* (1911): Entwicklungsgeschichtliche Studien an europäischen Flachlandsküsten und ihren Dünen. Veröf. d. Inst. f. Meereskunde. H. 15. Berlin.
- Böcher, T. W.* (1949): Climate, Soil and Lakes in Continental West Greenland in Relation to Plantlife. Medd. om Grønland 147:2. København.
- Calder, K. L.* (1949): Eddy Diffusion and Evaporation in Flow over Aerodynamically Smooth and Rough Surfaces. Quart. J. Mech. a. Appl. Math. 2. Oxford.
- Chepil, W. S.* (1945-46): Dynamics of Wind Erosion. Soil Sci. 60-61. Baltimore.
- Dieren, J. W. van* (1934): Organogene Dünenbildung. Haag.
- Falk, A.*: se *Hjulström, F.*
- Gerhardt, P.* (udg.) (1900): Handbuch des deutschen Dünenbaues. Berlin.
- Hansen, Kaj* (1951): Preliminary Report on the Sediments of the Danish Wadden Sea. Medd. f. Dansk Geol. Foren. 12:1. København.

surface, are situated close to the surface and are superposed by wet layers 2—30 mm. thick. If, after rainfall, profiles were cut in the sand, the sand-lenses appeared as shown in figures 13 and 14. In size, the lenses most often had a thickness of 10 cm., with a breadth of 20—100 cm.; they always consisted of loose sand, newly deposited, whereas the moist sand close by was firm and compact to the touch.

The probable reason why the loose sand becomes moist only with difficulty is that this sand has completely dried out; this means that the water will have to perform a good deal of work in order to moisten the sand. During a shower, water-movements of a pronouncedly near-horizontal character may be seen to surround the dry sand-layers.

It seems that these layers play a decisive role in sand drift in a moist climate; they offer conditions for sand-transport even in rainy periods, provided that the wind-velocity is sufficiently great.

LITTERATUR

- Bagnold, R. A.* (1935): The Movement of Desert Sand. Geogr. Journ. 85. London.
- Bagnold, R. A.* (1936): The Movement of Desert Sand. Proc. Roy. Soc. A. 157. London.
- Bagnold, R. A.* (1937): The Size-Grading of Sand by Wind. Proc. Roy. Soc. A. 163. London. (a).
- Bagnold, R. A.* (1937): The Transport of Sand by Wind. Geogr. Journ. 89. London. (b).
- Bagnold, R. A.*: (1938): Grain Structure of Sand Dunes and its Relation to their Water Content. Nature 142. London. (a).
- Bagnold, R. A.* (1938): The Measurement of Sand Storms. Proc. Roy. Soc. A. 167. London. (b).
- Bagnold, R. A.* (1941 & 1954): The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. 1. & 2. udg. London.
- Behrmann, W.*: se *Klute, F.*
- Black, R. F.* (1951): Eolian Deposits of Alaska. Arctic 4. Ottawa.
- Braun, G.* (1911): Entwicklungsgeschichtliche Studien an europäischen Flachlandsküsten und ihren Dünen. Veröf. d. Inst. f. Meereskunde. H. 15. Berlin.
- Böcher, T. W.* (1949): Climate, Soil and Lakes in Continental West Greenland in Relation to Plantlife. Medd. om Grønland 147:2. København.
- Calder, K. L.* (1949): Eddy Diffusion and Evaporation in Flow over Aerodynamically Smooth and Rough Surfaces. Quart. J. Mech. a. Appl. Math. 2. Oxford.
- Chepil, W. S.* (1945-46): Dynamics of Wind Erosion. Soil Sci. 60-61. Baltimore.
- Dieren, J. W. van* (1934): Organogene Dünenbildung. Haag.
- Falk, A.*: se *Hjulström, F.*
- Gerhardt, P.* (udg.) (1900): Handbuch des deutschen Dünenbaues. Berlin.
- Hansen, Kaj* (1951): Preliminary Report on the Sediments of the Danish Wadden Sea. Medd. f. Dansk Geol. Foren. 12:1. København.

- Hartnack, W.* (1931): Zur Entstehung und Entwicklung der Wanderdünen an der deutschen Ostseeküste. *Zeit. f. Geomorph.* 6.
- Hefley, H. M. & Sidwell, R.* (1945): Geological and Ecological Observations of some High Plains Dunes. *Am. Journ. of Sci.* 243:7. New Haven.
- Hjulström, F., Sundborg, Ake & Falk, A.* (1955): Problems Concerning the Deposits of Windblown Silt in Sweden. *Geogr. Ann.* 37:2. Stockholm.
- Hogbom, J.* (1923): Ancient Inland Dunes of North and Middle Europe. *Geogr. Ann.* 5. Stockholm.
- Hörner, N.* (1927): Brattforsheden. Ett värmländskt randdeltakomplex och dess dyner. *Sveriges geol. und. C.* 342. Stockholm.
- Jensen, Martin* (1954): Shelter Effect. København.
- Klute, F. (W. Behrmann)* (1933): Handbuch der geogr. Wissenschaft. I. Allgemeine Geographie. Potsdam.
- Krumbein, W. C. & Pettijohn, F. J.* (1938): Manual of Sedimentary Petrography. New York-London.
- Lemberg, Bertel* (1933-34-35): Über die Vegetation der Flugsandsgebiete an den Küsten Finlands I-II-III. *Acta Bot. Fennica* 12-13-14. Helsingfors.
- Nielsen, Niels* (1935): Den videnskabelige Undersøgelse af Halvøen Skallingen. *Medd. f. Skall.-Lab. I.* København. (a).
- Nielsen, Niels* (1935): Eine Methode zur exakten Sedimentationsmessung. *Medd. f. Skall.-Lab. I.* København. (b).
- Paul, K. H.* (1944): Morphologie und Vegetation der Kurischen Nehrung. *Nova Acta Leopoldina. N. Folge B.* 13:96. Halle.
- Pettijohn, F. J.*: se *Krumbein, W. C.*
- Schlichting, H.* (1936): Experimentelle Untersuchungen zum Rauheitsproblem. *Ing. Archiv B.* 7:1.
- Schou, A.* (1945): Det marine Forland. *Folia Geogr. Danica IV.* København.
- Schou, A.* (1949): Atlas over Danmark I. Landskabsformerne. København.
- Sidwell, R.*: se *Hefley, H. M.*
- Sindowski, K. von* (1956): Korngrößen- und Kornformen — Auslese beim Sandtransport durch Wind. (Nach Messungen auf Norderney). *Geol. Jahrbuch* 71. Hannover.
- Solger, R.* (1908): Parabeldünen. *Zeit. f. Deutsch. Geol. Ges.* 60. Monatb. 3. Berlin.
- Solger, R.* (udg.) (1910): Dünenbuch. Stuttgart.
- Sokolow, N. A.* (1894): Die Dünen. Bildung. Entwicklung und innerer Bau. Berlin.
- Steenstrup, K. J. V.* (1894): Om Klitternes Vandring. *Medd. f. Dansk Geol. Foren.* 1. København.
- Sundborg, A.*: se *Hjulström, F.*
- Sutton, O. G.* (1949): Atmospheric Turbulence. London.
- Warming, E.* (1906 & 1909): Dansk Plantevækst 1 og 2. København.
- Zingg, A. W.* (1953): Wind-tunnel Studies of the Movement of Sedimentary Material. State Univ. o. Iowa. *Studies in Engin. Bull.* 34. Iowa City.