

# Aggregatstabilitetsanalyse

Af Henrik Madsen

Madsen, Henrik, 1975: Aggregatstabilitetsanalyse. Geografisk Tidsskrift 74: 70-78. København, juni 1, 1975.

*A method to describe the stability and size distribution of soil aggregates by dry sifting. The profit and disadvantages of the method are discussed. A mathematical adaptation is given and further the influence of humus on the soil aggregates is discussed, as well as the possibility of the method for giving significant values in relation to soil erosion.*

Henrik Madsen, M. Sc. Geographical Institute, University of Copenhagen, Haraldsgade 68, DK-2100 Copenhagen Ø.

## Indledning

Denne artikel er et forsøg på at finde en metode til beskrivelse af en jords aggregatstabilitet og -fordeling ved tørsigtning, samt at påpege fordele og ulemper ved den valgte procedure. Under den matematiske bearbejdelse af materialet vil tesen: »mængden (gram) af aggregater, der destrueres pr. tidsenhed er proportional med den tilstedeværende intakte mængde af aggregater« blive udsat for en nøjere vurdering. Det vil endvidere blive forsøgt at belyse humusindholdets betydning for aggregatstørrelsesfordelingen og -stabiliteten. Til sidst vil analysens muligheder inden for muldflugtstudierne blive berørt.

## Strukturstabilitetsbegrebet

Ved en jords aggregatstabilitet forstås aggregaternes modstand mod mekanisk nedbrydning eller destruktion ved vands indvirken (sprængning ved fugtning eller regndråbers destruktive influens). Aggregaternes nedbrydningshastighed er en funktion af kationbelægningen på kolloiderne, jordvandets saltkoncentration, sesquioxidindholdet, rodudviklingen i jorden og ler- og humusindholdet, der ved kompleksforbindelser danner broer mellem de større primærpartikler. Endvidere spiller aggregaternes fugtighed en uhyre stor rolle, og aggregater, der ved et bestemt vandindhold er stabile, vil under andre fugtighedsforhold være ustabile.

Til bestemmelse af aggregatstabiliteten kan benyttes flere metoder, af hvilke de mest kendte er:

- a) tør og våd sigtning, hvor især den mekaniske påvirknings indflydelse på aggregatstabiliteten bestemmes.
- b) dråbemetoden: ved denne metode udsættes aggregaterne for dråber med samme størrelse og faldvej, og an-

tallet af dråber for en bestemt sønderdeling er et mål for stabiliteten. (Denne metode er vigtig til bestemmelse af en jords modstandskraft mod nedbørserosion).

c) udvaskning med NaCl: ved denne metode bliver permeabilitetsændringen grundet natriumionens dispergerende virkning et mål for stabiliteten.

d) behandling af aggregaterne med alkohol og organiske væsker.

## Aggregatstabilitetens betydning

Strukturen er af stor betydning for jordens vand- og varmebalance, udluftning samt for planternes rodudvikling o.l. En ødelæggelse af strukturen vil ændre hele det fysiske miljø i jorden og nedsætte den biologiske aktivitet. Det er derfor vigtigt at have en god og stabil struktur, der kan modstå nedbørens destruktive virkning (især på marker uden vegetation), vindens erosion og mekanisk ødelæggelse ved landbrugsmaskiner, der kan medføre pløjesåler.

Det er især gennem forbedring af infiltrationskapaciteten og den dermed forbundne mindre run-off, at strukturen har betydning for den vandinfluerede soilerosion, hvorimod det er aggregaternes størrelse og deres stabilitet, der har betydning ved vinderosion. I regioner, hvor vinderosion kan finde sted, vil en god strukturstabilitet hindre, at aggregaterne bliver slået i stykker af eventuelt saltationsmateriale og derved selv blive omdannet til dette. Hvis en sådan situation opstår, vil resultatet blive en afblæsning af en del af overjorden ved suspension, saltation og surface creep. Dette medfører en forringelse af markens dyrkningsværdi som vil tage år at genoprette, om nogensinde.

Den her anvendte tørsigtning metode vil især kunne anvendes ved studier af vinderosion, fordi aggregaterne fortrinsvis er tørre, når erosionen foregår.

## Prøveudtagning og foreløbig analyse

De til undersøgelsen anvendte aggregater blev udtaget fra en brunjord (cambisol) ved Karlstrup Kalkbrud nær Køge. Vegetationen på prøveudtagningsstedet var græs. Jordbundsprofilen, tilhørende texturanalyse (Andreasens pipetmetode for fraktionen mindre end  $63\mu$ ) og pH<sub>CaCl2</sub> ses i fig. 1.

Man bør bemærke det store lerindhold i jorden med et minimum i dybden 40 cm til 55 cm på 12 %. Efter det

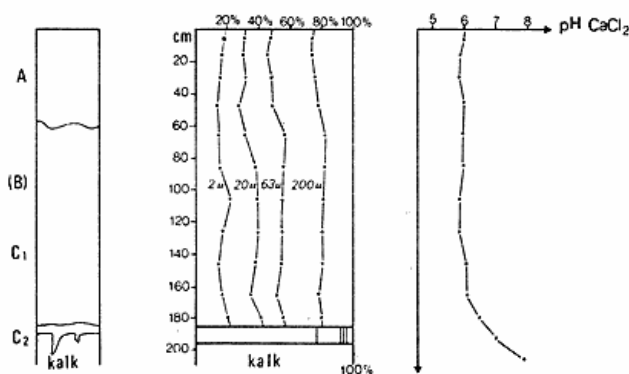


Fig. 1. Textur- og pH variation ned gennem profilet.  
Fig. 1. Variations in texture and pH down through the profile.

Aslyngske system må jorden betegnes som en lerjord. pH er konstant gennem profilet til dybden 135 cm, hvorefter der er en jævn stigning ned til kalken. Skønt det rene danienskalk fandtes i 190 cm, sporede frit calciumcarbonat først i dybden 135 cm, og da kun i yderst ringe mængde. Selv i dybden 175 cm var calciumcarbonatindholdet så ringe, at Scheiblers apparat ikke kunne anvendes. Humusprocenten blev bestemt ved Ter Meulens metode på prøverne i A-horizonten. Resultatet blev:

10-20 cm	4,2 % humus
20-40 cm	2,6 % humus
40-55 cm	1,7 % humus

Hvad strukturen angik, viste A-horizonten en svag brokket struktur, hvorimod polyledstruktur dominerede i B-horizonten. Der var rodudvikling i hele profilet med hovedparten af rødderne koncentreret i de øverste 10 cm.

#### Arbejdshypoteser og analyseprogram

Undersøgelsen kan deles i to dele:

1. en undersøgelse af aggregaterne separat i størrelsesfraktioner (hele phi)
2. en aggregatanalyse, hvor alle fraktioner deltager i analysen på samme tid (samlet aggregatanalyse).

Undersøgelserne under del 1 koncentrerer om følgende punkter:

- a. en bestemmelse af halveringstiden for de forskellige fraktioner og en sammenligning af over- og underjordens halveringstider.
- b. en undersøgelse af tesen: mængden (vægt) af aggregater, der destrueres pr. tidsenhed, er proportional med den tilstedeværende intakte mængde af aggregater dvs.:  

$$\frac{dx}{dt} = -kx \Rightarrow \ln x = -kt + c \Rightarrow \log x_t/x_0 = -kt/2,303$$
  - 1) hvor x er mængden af intakte aggregater.  $x_0$  betegner intakte aggregater ved begyndelsen (tiden 0), og  $x_t$  er intakte aggregater til tiden t. k betegnes aggregatkonstanten og varierer mellem 0 og uendeligt.

Aflæses  $\log x_t/x_0$  som funktion af t, fås, hvis teorien holder, en ret linie med hældningskoefficienten b, hvilket indsat i ligning 1) giver:  $k = -2,303 b$  2)

Halveringstiden for aggregaterne kan bruges som mål for aggregatstabiliteten. Indsættes  $x_t = x_0/2$  i ligning 1) fås ved anvendelse af ligning 2)

$$t_{1/2} = -\log 2 / b \quad 3)$$

- c. en matematisk analyse af de ud fra sigtningen fremkomne kurver, hvis teorien fra punkt b ikke er holdbar.
- d. humusindholdets indflydelse på aggregatfordelingen i intervallet 64 mm til 0,125 mm ved sammenligning af en prøve fra over- og underjorden.

Undersøgelserne under del 2 koncentrerer om følgende punkter:

- a. en samlet aggregatstabilitet bestemt ud fra ændringen i aggregatstørrelsesfordelingen ved sigtning i et bestemt tidsrum.
- b. humusindholdets indflydelse på aggregatstørrelsesfordelingen.
- c. de fine fraktioners modstand mod vinderosion.

Da de to analysemetoder er forskellige vil det være rimeligt at behandle dem særskilt. Analysemetodik og resultater fra undersøgelsen omhandlende aggregatstabiliteten indenfor de enkelte størrelsesfraktioner vil derfor først blive omtalt.

#### DEL 1

##### Analysens udførelse

Da fremgangsmåden er den samme for horisontal og vertikalsigtning, vil disse blive behandlet under et.

Jordprøverne tørres et par døgn i fri luft og sigtes derpå (i hele phi-intervaller) i tredive sekunder i hånden, hvorved en grovsortering opnås. Derefter påføres hver sigte en bund og sigtes femten sekunder i sigtemaskinen, hvorved mindre aggregater og støv, der er på vej ned gennem sigterne, fjernes. Der begynder med den groveste sigte, og bundmaterialet hældes over i den næste sigte (en phi mindre), der så bliver behandlet. Derved sikres, at en aggregatstørrelsesfordeling kan blive udtegnet. (Fejlen ved dobbeltsigtningen af nogle af aggregaterne omtales senere). Ved vertikalsigtningen førtes bundmaterialet ikke over i den næste sigte.

Aggregaterne i de forskellige størrelsesfraktioner vejes (x gram) og sigtes derefter i bestemte tidsrum, og det destruerede materiale  $D_t$  (materialet i bunden) vejes efter hver sigtning. Aggregaterne sigtes i den sigte, de under forproceduren blev holdt tilbage i. Når den sidste sigtning er tilendebragt, udvaskes aggregaterne, og residualet (primærpartikler større end hullerne i sigten) vejes og subtraheres fra totalmængden,  $x_0 = x - p$ , hvor p er mængden af primærartikler. I de fraktioner, hvor aggregatmængderne er så store, at de vil hæmme sigtningen

ved ikke at kunne bevæge sig rimeligt frit, udtages repræsentative prøver, som da bliver behandlet.

Som før beskrevet vil en del af aggregaterne under forsigtningen blive behandlet længere i sigten. Denne fejl kan nedsættes ved at ændre proceduren og rense sigterne over en stillestående bund. Dette hindrer dog ikke, at residualet skal sigtes i sigten mindre. Fejlen ved den anvendte procedure er dog minimal, hvilket nedenstående overslag viser.

Af kurverne fig. 2a og 2b ses sammenhængen mellem  $x_t/x_0$  og sigtetiden. Det ses, at den destruerede aggregatmængde efter 0,5 minuts sigtning generelt udgør under 10 % af den totale aggregatmængde ofte langt mindre, ud fra hvilket man kan slutte, at bundmaterialet under forsigtningen ikke har udgjort meget over 5 % af totalaggregatmængden. Fejlen ved aggregatstørrelsesfordelingen udtegnat på baggrund af den forbehandlede prøve vil altså være den del af bundmaterialet, der destrueres i den næste sigtning. Det ses, at den opståede fejl er uhyre lille, og kun kan få betydning ved meget ustabile aggregater.

Udtagelse af jordprøven og dennes aktuelle fysiske tilstand (vandindhold o.l.) kan indvirke på aggregatstabiliteten. Tørringen af den udtagne prøve kan også indvirke på den stabilitet, aggregaterne antager. Det vil måske være rimeligt at tilstræbe den samme tørringsproces, da det vil øge metodens reproducerbarhed. Derfor bør de behandlede prøver udtages, når jorden har et bestemt vandindhold f.eks. markkapacitet. Dette emne vil dog ikke blive behandlet yderligere i denne artikel.

Til undersøgelsen anvendtes to prøver, den ene udtaget i dybden 0-20 cm og den anden i dybden 90-110 cm.

## Resultater og diskussion

Tabel 1. Textur, pH, humus % i prøveudtagningsdybderne.  
Table 1. Texture, pH, humus % at the different sampling depths.

	<2 $\mu$	2-20 $\mu$	20-63 $\mu$	63 $\mu$ <	pH <sub>CaCl2</sub>	humus
0-15 cm	19 %	12 %	17 %	52 %	5,90	4,2 %
90-110 cm	21 %	18 %	17 %	44 %	5,80	-

a. Som mål for aggregatstabiliteten i de forskellige størrelsesfraktioner, kan man anvende aggregaternes halveringstid, altså det tidspunkt hvor  $x_t/x_0 = 1/2$ . Ofte vil man på grund af aggregaternes store stabilitet ikke sigte til  $t^{1/2}$  men beregne den, hvilket vil blive diskuteret senere. Halveringstiden er ikke et entydigt mål for aggregatstabiliteten, da alle aggregater inden for en størrelsesfraktion ikke behøver at have samme stabilitet.

Som eksempel på dette kan fraktionerne 16-8 mm, 8-4 mm og 4-2 mm fra dybden 90-110 cm fremdrages. Det ses, at halveringstiderne næsten er identiske, medens andre  $x_t/x_0$  værdier giver t-værdier, der divergerer en del. Tages  $x_t/x_0 = 0,3$ , fås en forskel på 6 min. mellem 16-8 mm prøven og 4-2 mm prøven.

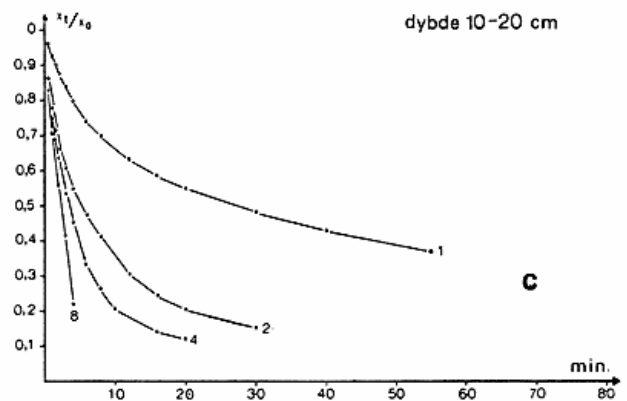
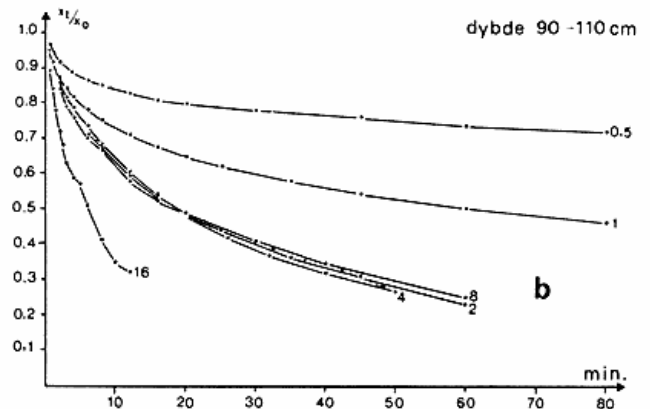
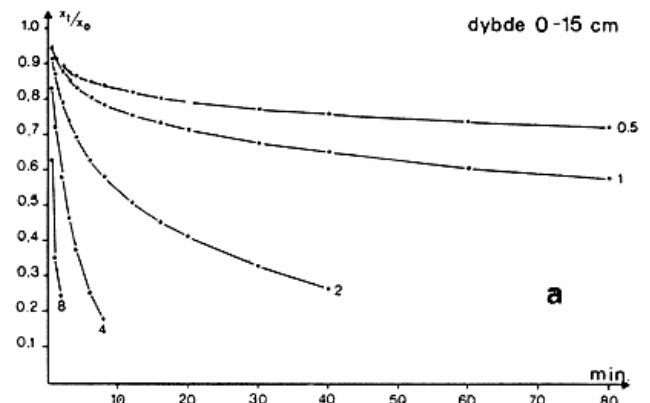


Fig. 2 a, b, c. Aggregatdestruktion vs. behandlingstid. 2 a og b er bestemt ved horisontalsigtning og 2 c ved vertikalsigtning. Tallene ved kurverne angiver sigtestørrelsen i mm.

Fig. 2 a, b, c. Destruction of aggregates versus sifting time. 2 a and b were determined by horizontal sifting and 2 c by vertical sifting. The figures at the curves indicate sieve diameter in mm.

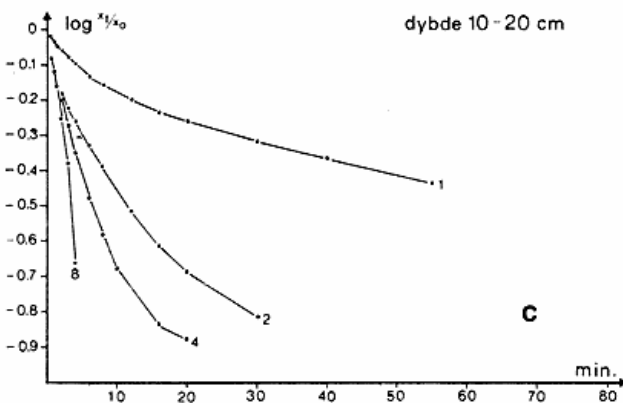
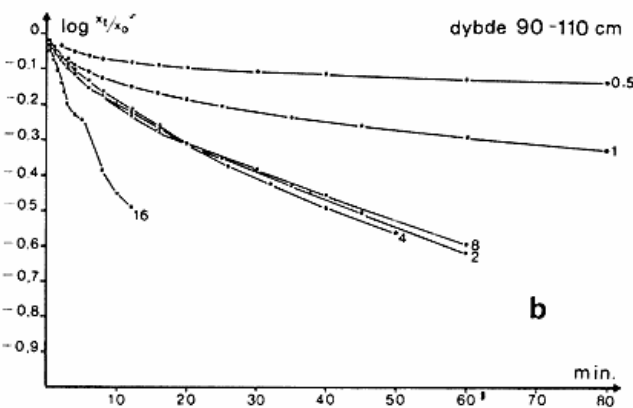
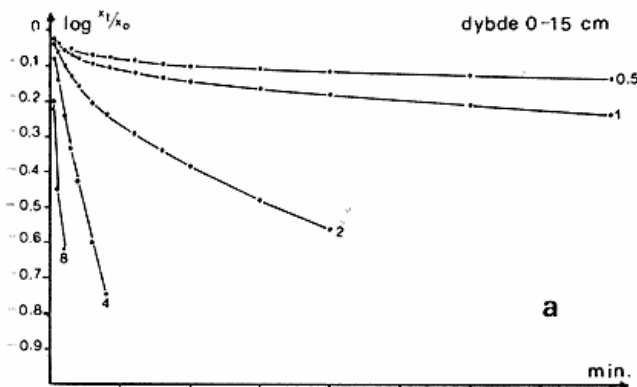


Fig. 3 a, b, c. Logaritmen til aggregatdestruktionen vs. behandlingstiden. 3 a og b er bestemt ved horisontalsigtning og 3 c ved vertikalsigtning. Tallene ved kurverne angiver sigtestørrelsen i mm.

Fig. 3 a, b, c. The logarithm of the aggregate destruction versus sifting time. 3 a and b were determined by horizontal sifting and 3 c by vertical sifting. The figures at the curves indicate sieve diameter in mm.

Ved aflæsning af kurverne fås følgende halveringstider i min.:

Tabel 2. Halveringstider i minutter for de forskellige aggregatstørrelsesfraktioner udtaget i forskellig dybde.  
Table 2. Bisecting times in minutes for the different size fractions of aggregates drawn at different depths.

	32-16	16-08	08-04	04-02	02-01
horisontalsigte 0-15 cm		0,7	2,6	12,8	168
horisontalsigte 90-110 cm	6,3	19,0	19,2	18,9	63
vertikalsigte 10-20 cm		2,4	3,4	5,2	27

Ud af tabellen ses, at  $t^{1/2}$  generelt vokser med faldende aggregatstørrelse, hvilket bl.a. skyldes forholdet overfladeareal contra vægt, der medfører, at store aggregater bliver udsat for større påvirkning pr. arealenhed. Man bør dog bemærke de ens halveringstider for de førømtalte fraktioner.

Sammenlignes halveringstiderne for de to rundsigter ses, at i de grovere fraktioner er underjordens aggregater betydelig mere stabile end overjordens, men med faldende aggregatstørrelse udlignes dette, og i fraktionen 1-2 mm er overjordens aggregater stærkere. Da sigtekurverne for aggregatfraktionen 1-1/2 mm er næsten identiske for de to prøver sættes forholdet mellem deres halveringstider lig 1, og en kurve visende det relative forhold mellem de to prøvers halveringstider kan udteget (fig. 4).

Halveringstiderne for den lodrette sigtning kan ikke direkte sammenlignes med den horisontale sigtning, da aggregaterne bliver udsat for forskellig behandling ved de to procedurer. I den horisontale sigtning poleres aggregaterne ved en glidende rullende bevægelse hen over sigten, hvorimod vertikalsigtningen medfører, at aggregaterne bliver udsat for et fald. Man må derfor forvente, at de relative stabiliteter mellem aggregater udtaget i samme niveau vil blive forskellig ved horisontal- og vertikal sigtning, hvilket også kan ses af tabel 2.

Ved studier af vinderosion må stabilitetsværdien ved vertikalsigtning være velegnet til beskrivelse af aggregatstabiliteten i saltationsmaterialet, idet den hoppende bevægelse i nogen grad efterlignes ved sigtebevægelsen. Stabilitetsværdien ved horisontalsigtning vil derimod være velegnet til beskrivelse af aggregatstabiliteten for det materiale, som saltationsmaterialet rammer, samt for den del af overjorden, der deltager i reptationen.

For visse fraktioner må evt. begge værdier anvendes, hvis det ene øjeblik er flyvende materiale (vertikalstabiliteten) og i det næste fastliggende (horisontalstabiliteten). Det bør bemærkes, at de i artiklen behandlede fraktioner til halveringstidsbestemmelse alle er for store til at være saltationsmateriale af betydning.

Man bør derfor medtage endnu mindre størrelsesfraktioner, men dette kræver en beregning af halveringstiderne, da disse vil blive meget store.

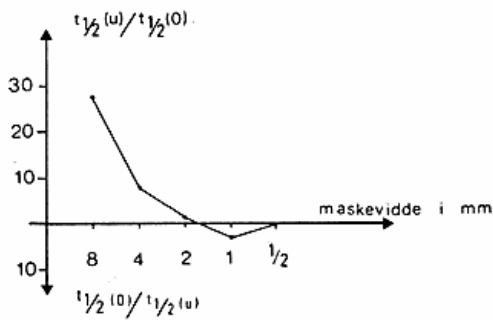


Fig. 4 forholdet mellem under- og overjordens halveringstider.  
Fig. 4. The ratio between the bisecting time for subsoil and topsoil respectively.

b. De opnåede kurver, se fig. 3abc, er ikke rette linier, som man kunne forvente ud fra de teoretiske beregninger side 71 (b). Det bemærkes derimod, at næsten alle kurverne er krumme og på en sådan måde, at hældningen på tangenten er faldende gennem kurven.

Dette kan skyldes flere ting, hvoraf skal nævnes:

1. aggregaterne inden for samme størrelsesfraktion har ikke samme stabilitet, det vil sige, at de ustabile let bukker under, medens de stabile næsten ikke er til at slide op.

2. aggregatstørrelsesfordelingen inden for samme fraktion begunstiger den aftagende hældning på kurverne ved at have mange små og få store aggregater. Det omvendte tilfælde kan også tænkes, og da vil den modarbejde krumningen af kurven.

3. aggregatmængden og dennes ændring i sigten. En for stor aggregatmængde i sigten vil hæmme sigtepåvirkningen i begyndelsen, da aggregaterne vil være låst fast. Denne effekt vil nærmest modarbejde formen på kurverne, da den formindsker destruktions i begyndelsen. Ved færre aggregater i sigten kan der opstå en gnidningseffekt, hvor aggregaterne foruden afslibning mod sigten også sliber hinanden.

4. store aggregater vil ved sammenstød med mindre aggregater kunne knuse eller presse dem gennem sigten.

5. aggregaterne bliver under sigtningen afrundede.

Dette er sandsynligvis den væsentligste årsag til den aftagende hældning gennem kurverne, og samtidigt analysens største svaghed. Ved sigtningens begyndelse er aggregaterne ofte kantede, og disse spidser og hjørner vil først blive angrebet, da kraften her angriber på et meget lille areal. Resultatet er, at aggregaterne hurtigt bliver ægformede og dermed mere resistente. Den aftagende hældning gennem kurven bliver derfor mere et udtryk for en formændring, end for at aggregaterne, der er tilbage, var mere stabile fra begyndelsen. Denne afrundingseffekt er størst ved den horisontale sigtning, da aggregaterne der slides ved rulning og glidning, hvorimod vertikalsigtningen foruden horisontalsigtningseffekterne også deler og flækker aggregaterne, men dog i så ringe mængde, at afrundingen heller ikke der undgås.

Da kurverne systematisk buer, vil det være umuligt at beskrive aggregatfordelingen ved hjælp af en ret linie. Man må derfor forkaste tesen: »Mængden af aggregater der destrueres pr. tidsenhed er proportional med den tilstedeværende intakte aggregatmængde« og gå over til en matematisk analyse af problemet.

#### Matematisk analyse

Til beskrivelse af de fremkomne kurver, fig. 2 abc, er valgt polynomiet  $y = ax^b$ . Konstanterne  $a$  og  $b$  er blevet bestemt ved mindste kvadraters metode.  $y$  er i dette tilfælde mængden af destrueret materiale målt i procent af totalaggregatmængden, og ikke som i fig. 2 den intakte aggregatmængde. Resultatet af analysen ses i nedenstående tabel.

Tabel 3. Ligninger for kurverne der viser aggregatdestruktionen vs. sigtetiden.

Table 3. Equations for the curves showing the destruction of aggregates vs. sifting time.

procedure	stør. frkt.	ligning.	fit kvotient
lodr. sigt	16- 8 mm	$y = 24,96x^{0,81}$	99,63
»	8- 4 mm	$y = 29,76x^{0,39}$	99,71
»	4- 2 mm	$y = 26,74x^{0,36}$	98,27
»	2- 1 mm	$y = 11,00x^{0,45}$	99,67
hori 0-15 cm	16- 8 mm	$y = 55,68x^{0,52}$	99,04
»	8- 4 mm	$y = 29,00x^{0,52}$	99,86
»	4- 2 mm	$y = 16,79x^{0,41}$	98,84
»	2- 1 mm	$y = 11,37x^{0,29}$	99,71
»	1-1/2 mm	$y = 9,78x^{0,23}$	99,98
hori 90-110	32-16 mm	$y = 18,89x^{0,53}$	99,06
»	16- 8 mm	$y = 13,44x^{0,43}$	99,70
»	8- 4 mm	$y = 11,26x^{0,49}$	99,92
»	4- 2 mm	$y = 13,08x^{0,44}$	99,23
»	2- 1 mm	$y = 12,68x^{0,32}$	99,53
»	1-1/2 mm	$y = 8,49x^{0,26}$	99,96

Af fit kvotienterne ses, at tilpasningen med polynomiet er brugbar, dog er der en tendens til ensidig afvigelse, og formlen er derfor ikke velegnet til extrapolation. Udtrykket  $y = a + bc^x$ , hvor (0,1) ikke medtages i beregningen, har vist sig velegnet til beskrivelse af en del af kurverne uden ensidig afvigelse, og kan da bruges til at extrapolere  $t_{1/2}$ .

#### Aggregatstørrelsesfordelingen

For at klarlægge de to prøvers aggregatstørrelsesfordeling er denne udtegnet som histogrammer og kumulative kurver, fig. 5 (a, b, c). Som ordinatakse i histogrammerne haves sigtefraktionens procentvise vægtandel af totalaggregatmængden større end 125 $\mu$  og som abscisseakse sigtefraktionerne afsat i  $\phi$ . Det samme er tilfældet for de kumulative kurver, hvor ordinataksen er den summerede vægt. Af tabel 1 ses, at textursammensætningen af jorden i de to prøveudtagningshøjder minder en del om hinan-

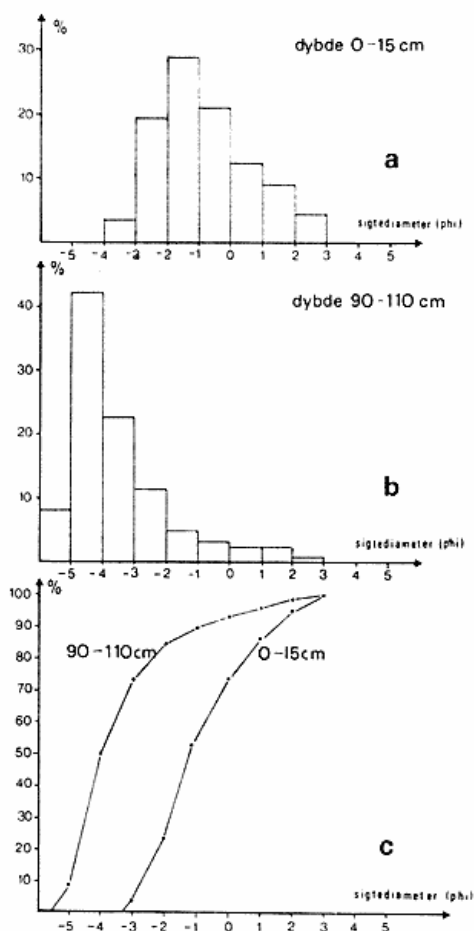


Fig. 5 a, b, c. Aggregatstørrelsesfordelingen udtegnet som histogrammer og kumulative kurver for prøverne udtaget i dybden 0-15 cm og 90-110 cm.

Fig. 5 a, b, c. The size distributions of the aggregates drawn as histograms and cumulative curves for the samples drawn at a depth of 0-15 cm and 9-110 cm.

den, og især bør man bemærke det høje lerindhold i begge jorde. Derfor vil det være rimeligt at tolke forskellene i størrelsesfordelingen som et resultat af de to prøvers forskellige humusindhold.

Som mål for aggregatstørrelsen kan man anvende  $d_{50}$  aflæst på de kumulative kurver. I dette tilfælde fås:

$$d_{50} (0-15) = -1,2 \text{ phi}$$

$$d_{50} (90-110) = -4,0 \text{ phi}$$

Det ses, at den humusholdige prøves aggregater gennemsnitligt er ca. tre gange mindre end underjordens.

Som et mål for jordens aggregering kan man anvende differensen mellem teksturkurvens og aggregatkurvens  $d_{50}$ -værdier målt i phi.

I dette tilfælde fås:

$$0-15 = 6,1 \text{ phi}$$

$$90-110 = 8,6 \text{ phi}$$

Det ses, at underjorden er mere aggregeret end overjorden. Man må gøre sig klart, at metoden er behæftet med den fejl, at der er en nedre begrænsning på aggregaterne (i dette tilfælde  $125\mu$ ), medens texturanalysen medtager alle partikler uanset størrelse. Man må derfor regne med andre aggregeringsværdier, hvis aggregater ned til  $37\mu$  medtages. Det er i det hele taget et problem, hvor små aggregater man skal medtage i sine sigtninger. De fleste laboratorier har normalt kun sigter ned til størrelsen  $63\mu$  eller  $37\mu$ . Ved aggregatanalyser, hvor hovedparten af elementerne er mindre end  $37\mu$ , må specialapparat udvikles. I det aktuelle tilfælde vil en  $37\mu$  sigte være tilstrækkelig, da kun få procent af prøverne er mindre, og endda kun en del af det er aggregater.

Da de gunstigste dyrkningsvilkår opnås med et såbed, hvor der er mange aggregater mellem 3 mm og 0,5 mm, ses af de kumulative kurver, at humusindholdet har en gunstig indvirkning på størrelsesfordelingen. Dette emne vil blive videreført under del 2, hvor endnu to humusholdige prøver vil blive inddraget i analysen.

## DEL 2

I dette afsnit vil en samlet aggregatanalyse blive beskrevet, og følgende emner i relation til analyseresultaterne vil blive behandlet:

- den samlede aggregatstabilitet målt ud fra ændringen af partikelstørrelsesfordelingen ved mekanisk påvirkning.
- humusindholdets indflydelse på aggregatstørrelsesfordelingen.
- de fine fraktioners modstand mod vinderosion.

### Analysens udførelse

Der bliver ved denne analyse arbejdet med størrelsesklasserne i phi og med mindste sigte  $4,75 \text{ phi}$  ( $37\mu$ ). Fremgangsmåden ved forbehandlingen af prøven er den samme som under del 1. Efter at aggregaterne er udskilt i de forskellige størrelsesklasser, halveres aggregatmængden i hver af fraktionerne. Den ene halvdel bruges som nulprøve og skal vise aggregatstørrelsesfordelingen ved tiden 0. Den anden del behandles ved horisontalsigtning i femten minutter. Sigterne er stablet med faldende sigtediameter nedefter, hvorved opnås, at de destruerede aggregater ikke bliver til bundmateriale som under del 1, men til aggregater i mindre fraktioner. Vægten af materialet i de forskellige fraktioner bestemmes for både nul prøven og 15 min. prøven, og efter udvaskning af aggregaterne ligeledes vægten af enkeltkornene. Derved sikres, at aggregatmængden i prøverne kan bestemmes.

Til analysen anvendtes to prøver fra Karlstrup-profilet udtaget i dybderne 25-35 cm og 40-55 cm.

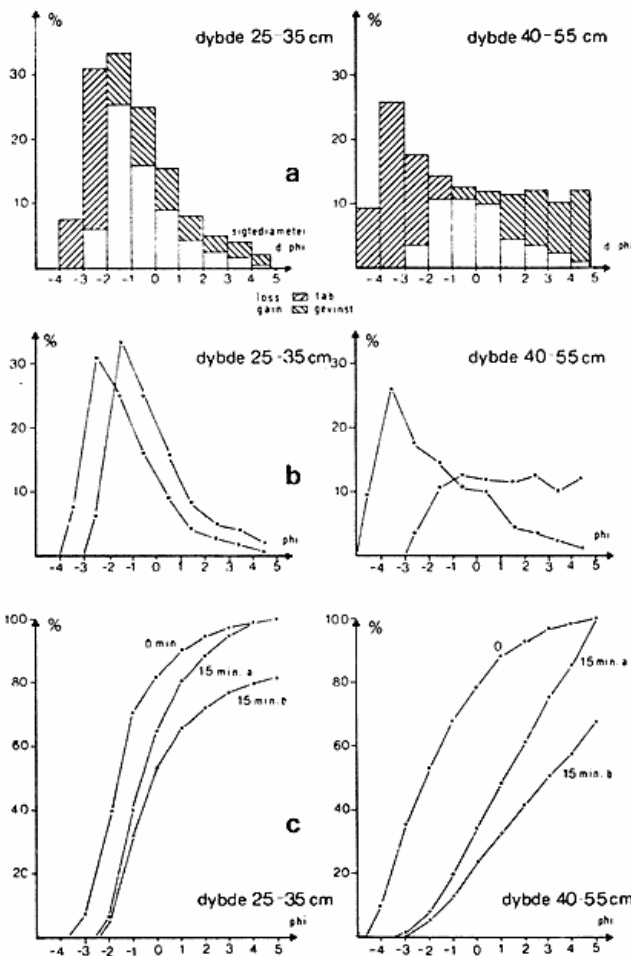


Fig. 6 a. Ændringen af aggregatstørrelsesfordelingen ved horisontalsigtning i 15 min.

Fig. 6 a. Changes in the size distribution of the aggregates by horizontal sifting for 15 minutes.

Fig. 6 b. Aggregatstørrelsesfordelingen før og efter sigtningen af de to prøver.

Fig. 6 b. Size distribution of the aggregates before and after sifting the two samples.

Fig. 6 c. Den kumulerede aggregatstørrelsesfordeling før og efter sigtning i 15 minutter. Kurven 15 min. a er udregnet på basis af aggregatmængden  $> 37\mu$  efter sigtningen og 15 min. b på basis af aggregatmængden  $> 37\mu$  før sigtningen.

Fig. 6 c. The cumulated size distribution of the aggregates before and after sifting for 15 minutes. The curve 15 min. a has been calculated on the basis of the amount of aggregates  $> 37\mu$  left after the sifting and 15 min. b on the basis of the amount of aggregates  $> 37\mu$  present before the sifting.

## Resultater og diskussion

Table 4. Textur, pH, humus % i prøveudtagningsdybderne.  
Table 4. Texture, pH, humus % at the different sampling depths.

	$< 2\mu$	2-20 $\mu$	20-63 $\mu$	$> 63\mu$	pH <sub>CaCl2</sub>	humus
25-35 cm	16,0	15,8	16,1	52,1	5,79	2,6 %
40-55 cm	12,2	16,6	20,5	50,7	5,99	1,7 %

På baggrund af sigtningerne er kurverne i fig. 6 udteget. Udregningen af de anvendte procenter til kurverne (minus kurve 15 min. b fig. 6c) er sket på baggrund af den aktuelle aggregatmængde, som er større end  $37\mu$ , dvs. at de kumulative kurver vil vise 100 % ved  $37\mu$  uanset aggregatmængdens størrelse. For kurverne 15 min. b i fig. 6c er procenterne regnet ud på baggrund af nulprøvens aggregatmængde større end  $37\mu$ . Slutprocenten på den kumulative kurve bliver da den procentdel af aggregatmængden større end  $37\mu$ , der stadig er større end den værdi efter 15 minutters sigtning. Den NØ-SV gående skravering viser det procentvise nettotab ved sigtningen og den NV-SØ gående skravering den procentvise nettogevinst. Det ses, at for begge prøver har der været tab i de store fraktioner, hvilket er naturligt, da de i fraktionen destruerede aggregater ikke kan erstattes »ovenfra«. Det bemærkelsesværdige er, at prøven 40-55 cm har et nettotab helt ned i 4-2 mm klassen, dvs. tab i fire fraktioner, hvorimod 25-35 cm prøven kun har tab i to fraktioner. Ud fra histogrammerne kan man endvidere se, at fordelingskurvens form i 25-35 cm prøven er uforandret efter sigtningen, blot er maximumværdien (prøvens modalklasse) forskudt en phi til højre. Derimod forandrer formen sig for 40-55 prøvens vedkommende og bliver nærmest udjævnet. Dette kan skyldes det lavere ler- og humusindhold i den sidstnævnte prøve.

a. Som mål for den samlede aggregatstabilitet kan man anvende den procentdel af aggregaterne, der hverken er nettotab eller -gevinst. Rent visuelt er den samlede aggregatstabilitet det uskrevne område i histogrammerne. I det aktuelle tilfælde bliver resultatet:

25-35 : 66,9

40-55 : 51,8

Et andet mål for den samlede aggregatstabilitet er den relative forskydning i  $d_{50}$  eller forskydningen målt i phi. Denne forskydning måles mellem kurverne 0 min. og 15 min a i fig. 6c. Opgives denne værdi sammen med slutværdien på kurve 15 min. b fig. 6c fås et mål for ændringen af aggregatstørrelsesfordelingen større end  $37\mu$  samt hvor stor en del af aggregaterne, der »overlevede behandlingen«. I det aktuelle tilfælde måles forskydningen i phi og resultatet er:

25-35 cm : 1,0 phi 80,5 %

40-55 cm : 3,3 phi 67,6 %

Jo større phi-forskydningsværdier, jo dårligere er den samlede aggregatstabilitet. Den sidstnævnte metode har den fordel, at værdien giver udtryk for, hvor mange gange aggregaterne gennemsnitligt er halveret, da en phi svarer til en halvering. En svaghed ved metoden er, at den ikke tager højde for lokale ændringer i yderfraktionerne.

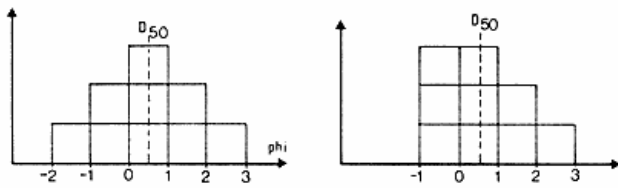


Fig. 7. Eksempel på ændring i aggregatstørrelsesfordelingen uden ændring i  $d_{50}$ .

Fig. 7. Example of changes in the size distribution of aggregates without changes in  $d_{50}$ .

Af det tænkte eksempel fig. 7 ses, at en prøve kan have samme  $d_{50\phi}$ -værdi før og efter en behandling, men aggregatstabiliteten har ikke været 100 %, dvs. at i dette tilfælde vil  $d_{50\phi}$ -metoden overvurdere den samlede aggregatstabilitet.

b. Det vil i dette afsnit blive forsøgt at finde en sammenhæng mellem prøvens humusindhold, aggregaternes modalklasse og mængden af aggregater mellem 3 mm og 0,5 mm. For at kunne sammenligne de fire prøvers aggregatstørrelsesfordeling må disse være defineret inden for det samme størrelsesområde, dvs. at  $125\mu$  i det aktuelle tilfælde må blive den nedre grænse, da det var den mindste sigte under del 1. Der må altså udregnes nye procenter for 25–35 og 40–55 prøvernes størrelsesfordelinger. Ved at gøre størrelsesfordelingerne sammenlignelige bliver også aggregatmængden mellem 3 mm og 0,5 mm sammenlignelig. Det vil derfor være muligt ud fra de forbehandlede prøvers aggregatstørrelsesfordelinger at finde sammenhængen mellem prøvens humusindhold, prøvens modalklasse og mængden af aggregater mellem 3 mm og 0,5 mm udregnet i procent af totalaggregatmængden (Tabel 5).

Tabel 5. Humusindholdet, aggregaternes modalværdi og den procentvise aggregatmængde mellem 3 mm og  $1/2$  mm fra 4 prøve-udtagningsdybder.

Table 5. Humus content, modal values, and the percentage share of aggregates between 3 mm and  $1/2$  mm from four sampling depths.

	humus	modalv.	agg. 3– $1/2$ mm
0–15	4,2 %	4–2 mm	48,0 %
25–35	2,6 %	8–4 mm	39,0 %
40–55	1,7 %	16–8 mm	28,5 %
90–110	–	32–16 mm	8,5 %

Det kan altså konstateres, at selv hvor der er texturforskelle (90–110 21 % ler, 40–55 12 % ler) har humusindholdet en kraftig indvirkning på aggregatstørrelsesfordelingen, således at modalklassens størrelse bliver omvendt proportional med humusindholdet. Det ses endvidere, at med øget humusindhold stiger antallet af aggregater i de fraktioner, der befordrer en god plantekultur. De ovennævnte betragtninger gælder kun inden for de i tabellen

opgivne humusprocenter, dvs. at man ikke kan slutte ud fra det ovennævnte, at aggregatstørrelsesfordelingen vil blive endnu mere gunstig ved at øge humusprocenten til f.eks. 8.

c. Ud fra resultaterne i tabel 5 har man en mulighed for at vurdere de fine fraktioners vinderodibilitet, hvis prøverne som overfladelag var exponerede for vindens virke. Fra studier om muldflugt på danske jorde i begyndelsen af 60'erne ved man, at vinderosion ikke vil forekomme i nævneværdigt omfang på marker, hvis primærpartikler er bundet i aggregater større end 0,5 mm. Det vil derfor være gunstigt, om de vindexponerede og derved truede jorde har deres primærpartikler mindre end  $500\mu$  bundet i aggregater større end  $500\mu$ . Det er vigtigt at beskytte jordens fine fraktioner mod afblæsning, da det er på kolloidernes adsorptionskomplekser, næringsionerne er beliggende, samt at de finere fraktioners elementer ofte danner rammerne om de porer, der tilbageholder det tilgængelige vand. For en jord med en god struktur mod vinderosion vil brøken (vægt% tekstur  $\langle$  0,5 mm – vægt% aggregater  $\langle$  0,5 mm) / vægt% tekstur  $\langle$  0,5 mm være nær 1. Størrelsen betegnes VE  $\langle$  0,5. Man bør bemærke, at værdien ikke beskriver den absolutte mængde, der er truet, men er et relativt mål for hvor stor en del af fraktionerne (tekstur) mindre end 0,5 mm, der er i fare for afblæsning. Man kan teoretisk tænke sig, at der vil være en større afblæsning mængdemæssigt fra en mark, der har en højere VE  $\langle$  0,5 end en anden, hvis den sidstnævnte f.eks. er en meget mager jord. Hvis man er interesseret i at bestemme, hvor stor en del af lerfraktionen, der er bundet i aggregater større end 0,5 mm, må man lave en texturanalyse separat på aggregaterne større og mindre end denne værdi. Man kan også ud fra aggregatstørrelsesfordelingskurverne danne sig et indtryk af, hvor stor en del af aggregatmængden, der vil være truet under en storm.

Det er af uvurderlig betydning, at aggregaternes stabilitet er stor, således at aggregaterne større end 0,5 mm ikke under bombardement af saltationsmaterialet bliver gjort »egnede« til afblæsning. Denne stabilitet kan bestemmes som ændringen i VE  $\langle$  0,5 værdien ved mekanisk påvirkning.

I tabel 6 er VE  $\langle$  0,5 udregnet for 0–15, 25–35 og 40–55 prøven og ændringen af VE  $\langle$  0,5 ved horisontalsigtning i femten minutter ligeledes for 25–35 og 40–55 prøverne.

Tabel 6. VE  $\langle$  0,5 indexet for forskellige prøver før og efter sigtning i 15 min.

Table 6. The VE  $\langle$  0,5 index for different samples before and after 15 min. sifting.

	VE $\langle$ 0,5 (0)	VE $\langle$ 0,5 (15)
0–15	0,85	
25–35	0,90	0,79
40–55	0,87	0,46



Det ses, at 25-35 prøven er lidt mere resistent mod vind-erosion end 40-55 prøven i begyndelsen, men senere under saltationsmaterialets bombardement vil forskellen blive forstørret kraftigt. Man må altså i det aktuelle tilfælde forvente en større procentvis afblæsning af finfraktionen fra 40-55 prøven end fra 25-35 prøven, hvis de andre faktorer, der betinger soil erosion, er ens for de to jorde.

#### SUMMARY

A method is discussed to describe the stability of soil aggregates by dry sifting. The analysis is divided into two parts: 1) a total measurement including all size fractions for stability and 2) a separate investigation of the stability of the individual size fractions.

The soil analysed is a cambisol taken at Karlstrup Kalkbrud 5 km NW of Køge. Samples were taken from the top soil as well as from the subsoil.

At the analysis of the separate size fractions the following hypothesis was put forward: the amount (weight) of aggregates destroyed per unit of time is proportional to the present, intact amount of aggregates investigated. This was not true, as the aggregates by sifting passed through a change of shape and became more resistant. The size distribution of aggregates, the different stability within the size fractions, and the change of quantity of material in the sieve through time can all have an influence on the progress of the destruction of aggregates.

The mathematical analysis indicated that the polynomial  $Y = ax^b$  described the produced diagrams to satisfaction. However, it is not possible to use the formula for extrapolation because of a certain trend to systematic deviation.

The bisecting time for the different size fractions can be used as a unit of measurement for the stability of the aggregates. However this value is not synonymous, i.e. 2 samples may have the same bisecting time ( $t^{1/2}$  value), but not the same stability.

The influence of the humus content on the distribution of size

of aggregates is discussed by making a comparison between the unit content of the four samples and their size distribution of aggregates. At increasing contents of humus (up to 5 %) the size-distributions modal-class 32-16 mm was falling to 4-2 mm, at the same time would the amount of aggregates between 3 and  $1\frac{1}{2}$  mm rise considerably. The last mentioned development is favourable for a seed bed.

At the total analysis the stability of the aggregates was measured, as the amount of aggregates from which there were neither netloss nor netgain for the size fractions at the sifting. Another method is to determine the displacement of  $d_{50}$  (measured in phi) at the sifting, and at the same time indicate, which percentage of the aggregates is still above the minimum fixed.

The fine fraction's resistance to wind erosion can be evaluated on the basis of size distribution and stability of the aggregates after a dry sifting. As particles above 0.5 mm are only slightly movable by wind it is possible to estimate to which extent the fine fractions are exposed to erosion. The formula:

$$\frac{\text{texture } <0.5 \text{ mm (weight \%)} - \text{aggregates } <0.5 \text{ mm (weight \%)}}{\text{texture } <0.5 \text{ mm (weight \%)}}$$

shows the share of particles less than 0.5 mm that is aggregated in structural elements above 0.5 mm. It is thereby possible to estimate the risk of wind erosion.

#### LITTERATUR

- Aslyng, H. C.* (1968): Klima, jord og vandbalance i jordbruget. S. 107-112, 4. udgave DSR.
- Aslyng, H. C.*: Øvelsesvejledning i kulturteknik. KVL København.
- Baver, Gardner & Gardner* (1972): Soil Physics. S. 130-229, 4. udgave.
- Koenigs, F. F. R. & Schuffelen, A. C.*: Mathematical treatment of aggregate-stability determination. 7. int. cong. soil sci. vol. 1.
- Kuhlman, H.* (1960): Den potentielle jordfygning på danske marker. Geografisk tidsskrift bd. 59.

Det ses, at 25-35 prøven er lidt mere resistent mod vind-erosion end 40-55 prøven i begyndelsen, men senere under saltationsmaterialets bombardement vil forskellen blive forstørret kraftigt. Man må altså i det aktuelle tilfælde forvente en større procentvis afblæsning af finfraktionen fra 40-55 prøven end fra 25-35 prøven, hvis de andre faktorer, der betinger soil erosion, er ens for de to jorde.

#### SUMMARY

A method is discussed to describe the stability of soil aggregates by dry sifting. The analysis is divided into two parts: 1) a total measurement including all size fractions for stability and 2) a separate investigation of the stability of the individual size fractions.

The soil analysed is a cambisol taken at Karlstrup Kalkbrud 5 km NW of Køge. Samples were taken from the top soil as well as from the subsoil.

At the analysis of the separate size fractions the following hypothesis was put forward: the amount (weight) of aggregates destroyed per unit of time is proportional to the present, intact amount of aggregates investigated. This was not true, as the aggregates by sifting passed through a change of shape and became more resistant. The size distribution of aggregates, the different stability within the size fractions, and the change of quantity of material in the sieve through time can all have an influence on the progress of the destruction of aggregates.

The mathematical analysis indicated that the polynomial  $Y = ax^b$  described the produced diagrams to satisfaction. However, it is not possible to use the formula for extrapolation because of a certain trend to systematic deviation.

The bisecting time for the different size fractions can be used as a unit of measurement for the stability of the aggregates. However this value is not synonymous, i.e. 2 samples may have the same bisecting time ( $t^{1/2}$  value), but not the same stability.

The influence of the humus content on the distribution of size

of aggregates is discussed by making a comparison between the unit content of the four samples and their size distribution of aggregates. At increasing contents of humus (up to 5 %) the size-distributions modal-class 32-16 mm was falling to 4-2 mm, at the same time would the amount of aggregates between 3 and  $1\frac{1}{2}$  mm rise considerably. The last mentioned development is favourable for a seed bed.

At the total analysis the stability of the aggregates was measured, as the amount of aggregates from which there were neither netloss nor netgain for the size fractions at the sifting. Another method is to determine the displacement of  $d_{50}$  (measured in phi) at the sifting, and at the same time indicate, which percentage of the aggregates is still above the minimum fixed.

The fine fraction's resistance to wind erosion can be evaluated on the basis of size distribution and stability of the aggregates after a dry sifting. As particles above 0.5 mm are only slightly movable by wind it is possible to estimate to which extent the fine fractions are exposed to erosion. The formula:

$$\frac{\text{texture } <0.5 \text{ mm (weight \%)} - \text{aggregates } <0.5 \text{ mm (weight \%)}}{\text{texture } <0.5 \text{ mm (weight \%)}}$$

shows the share of particles less than 0.5 mm that is aggregated in structural elements above 0.5 mm. It is thereby possible to estimate the risk of wind erosion.

#### LITTERATUR

- Aslyng, H. C.* (1968): Klima, jord og vandbalance i jordbruget. S. 107-112, 4. udgave DSR.
- Aslyng, H. C.*: Øvelsesvejledning i kulturteknik. KVL København.
- Baver, Gardner & Gardner* (1972): Soil Physics. S. 130-229, 4. udgave.
- Koenigs, F. F. R. & Schuffelen, A. C.*: Mathematical treatment of aggregate-stability determination. 7. int. cong. soil sci. vol. 1.
- Kuhlman, H.* (1960): Den potentielle jordfygning på danske marker. Geografisk tidsskrift bd. 59.