

Danmarks geologiske Undersøgelse.

II. Række. Nr. 44.

---

---

Metoder til Undersøgelse  
af  
Lerets fysiske Egenskaber.

Af

Ellen Louise Mertz.

With an English summary.



Kjøbenhavn.

I Kommission hos C. A. Reitzel

(Indeh. Axel Sandal).

Trykt hos Nielsen & Lydiche (Axel Simmelkiær).

1926.

Pris: 3 Kr.

Danmarks geologiske Undersøgelse.

II. Række. Nr. 44.

---

---

Metoder til Undersøgelse  
af  
Lerets fysiske Egenskaber.

Af

Ellen Louise Mertz.

---

With an English summary.



Kjøbenhavn.

I Kommission hos C. A. Reitzel

(Indeh. Axel Sandal).

Trykt hos Nielsen & Lydiche (Axel Simmelkiær).

1926.



## Indholdsfortegnelse.

	Side
Indledning.....	5
Den mekaniske Jordanalyse .....	7
Lerets fysiske Egenskaber .....	13
Lerets Plasticitet .....	16
Lerets Kohæsion .....	22
Metoder .....	22
SIMON JOHANSSONS Forsøgsresultater.....	29
Leret i flydende Tilstand .....	33
Det plastiske Omraade .....	34
Omslagspunktet.....	35
Den faste Tilstand .....	37
De geotekniske Undersøgelser. ....	38
Det koniske Apparat.....	39
Geotekniske Forsøgsresultater .....	43
De svenske Forsøgs karakterer .....	43
De danske Forsøgsresultater.....	45
Betydningen af Kurvernes Form og Beliggenhed..	46
Lerarternes naturlige Vandindhold .....	52
Oversigt .....	59
Summary.....	63

---

## Indledning.

Sammen med Grus, Sand og organiske Aflejringer danner Lerarterne Jordskorpens løse Jordlag, hvis Alder og Dannelsesmaade det stedse har været en af Geologiens Hovedopgaver at faa udredet. Interessen har dog hovedsagelig samlet sig om Lagenes eventuelle Fossil- eller Stenindhold, og kun rent undtagelsesvis er Spørgsmaalet om Lerets egne Egenskaber traadt i Forgrunden.

Imidlertid har Leret og de øvrige løse Jordlag jo ikke alene Værdi som geologiske Blade i Jordens Historie; de danner Bygningsværkernes Fundamenter, de er Grundlaget for Organismernes Vækst, og de senere Aars store Krav til Jordens Ydeevne nødvendiggør et stedse grundigere Kendskab til deres Sammensætning og Konsistens. Ud fra Geologien har der derfor skilt sig to nye Videnskaber: Agrogeologien og Geotekniken; de har ikke til Formaal at udrede Jordlagenes Alder, men deres Anvendelighed, og de har derfor erstattet Studiet af Lagenes Fossilindhold med en lige saa grundig Undersøgelse af Jordarternes Egenskaber og hele Natur.

Hensigten med og Anvendelsen af de opnaede Resultater ligger den egentlige Geologi — og dermed ogsaa denne Afhandling — ret fjernt; men selve Resultaterne og Vejen, der fører til dem, har dog nogen Interesse for den geologiske Videnskab, thi gennem Kendskabet til et Jordlags Konsistens opnaar man et stærkt tiltrængt Supplement til den rent geologiske Undersøgelse af Laget, og dette vil særlig være af stor Værdi i de hyppige Tilfælde, hvor Forsteningsmaterialet er utilfredsstillende eller ganske svingter.

Agrogeologiens og Geoteknikens Hovedopgaver ligger indenfor den kemiske, den mekaniske og den fysiske Jordanalyses Omraader; de to førstnævnte har alle Dage været velkendte og benyttede Hjælpe-midler for Geologien, hvorimod Undersøgelsen af Lerets fysiske Egenskaber hidtil har været yderst stedmoderligt behandlet, rimeligvis



fordi man har overvurderet den mekaniske Analyses Betydning; denne er imidlertid kun at betragte som et — ganske vist meget vigtigt — Supplement til Bestemmelsen af Lerets fysiske Konstanter, men da den er saa nøje knyttet til denne Afhandlings Hovedopgave, skal jeg, inden jeg gaar videre, kortelig angive den mekaniske Jord-analyses Hovedlinier.

---

## Den mekaniske Jordanalyse.

Den mekaniske Jordanalyse tilstræber en Adskillelse af en Ler- eller Sandprøve i forskellige Kornstørrelse-Grupper.

Til dette Formaal er der konstrueret talrige Apparater, der — paa en enkelt Undtagelse nær — alle er baserede paa stillestaaende eller rindende Vands Evne til at holde finere Partikler opløst, medens de grovere bundfældes.

Det har vist sig meget vanskeligt at opnaa Enighed om, hvilket Slæmmeapparat der er at foretrække, idet hver Metode har sine Forkæmpere og sine Modstandere. Ved Danmarks geologiske Undersøgelse har vi valgt at benytte en Kombination af ATTERBERGS<sup>1)</sup> og SCHÖNES<sup>2)</sup> Metoder.

Fordelen herved fremgaar af nedenstaaende Beskrivelse af Slæmmeanalysens Gang:

Den Lerprøve, hvis Kornstørrelse ønskes undersøgt, udbørstes omhyggeligt under stadig Tilsætning af destilleret Vand og sprøjtes derpaa over i den ATTERBERGSKKE Slæmmecylinder, der ses afbildet paa Fig. 1. Cylinderen fyldes derpaa til en forud fastsat Højde med destilleret Vand. Efter Oprystning af Vædsken i Slæmmecylinderen henstilles denne i fuldkommen Ro et vist Antal Timer, hvorefter Vædsken aftappes gennem Aftapningsrøret. Bundfaldet oprystes derpaa igen med destilleret Vand, og Cylinderen henstaar atter samme Antal Timer som første Gang, hvorefter den tappes paany. Forsøget gentages med Benyttelse af samme Vædskehøjde og samme Tidsinterval, indtil

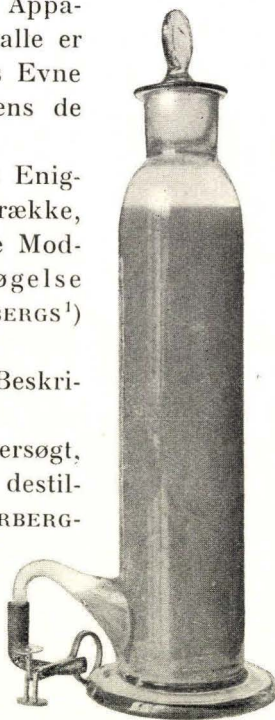


Fig. 1. ATTERBERGS  
Slæmmecylinder.

<sup>1)</sup> WAHNSCHAFFE & SCHUCHT: Anleitung zur wissenschaftlichen Bodenuntersuchung.  
3. Ausg. Berlin 1914. S. 31.

<sup>2)</sup> Samme. S. 36.



Vædsken paa det Tidspunkt, da den skal aftappes, er ganske fri for Slam. Man har da faaet Prøven delt i to Grupper, hvoraf den ene rummer alle de Korn, der ikke har formaaet at synke helt til Bunds i det benyttede Tidsinterval, og som derfor er opslæmmet i den samlede aftappede Vædske; den anden Gruppe omfatter den grovere Del af Prøven, nemlig de Korn, der er sunket til Bunds under Slæmningen.

Forsøget fortsættes nu med dette Bundfald paa ganske samme Maade, kun henstaar Cylinderen denne Gang en kortere Tid inden Aftapningen. Man faar paa denne Maade delt den oprindelige Prøve i en Række forskellige Kornstørrelser. Ved at mikroskopere disse forskellige Grupper og foretage en Række Forsøg, i hvilke Vædskehøjden og Slæmmetiden varieredes, fandt ATTERBERG følgende Skala, gældende ved Benyttelse af en Vædskehøjde paa 20 cm.

Ved 16 Timers Henstand indeholdt Vædsken Korn	<	0,002 mm
— 2 — — — — —	—	0,006—0,002 —
— 15 Min. — — — — —	—	0,02 —0,006 —
— 100 Sek. — — — — —	—	0,06 —0,02 —

Korn større end 0,06 mm i Tværmaal kan ikke udskilles ved Hjælp af denne Metode, da de alle straks synker til Bunds.

Til Adskillelse af disse grove Korn benyttes SCHÖNES Apparat i Forbindelse med ORTHS Hjælpetragt. Begge disse Apparater er tidligere beskrevet af POUL HARDER<sup>1)</sup>, hvorfor der her blot skal nævnes, at de er baserede paa det rindende Vands Evne til at holde ret grove Partikler opslæmmet; hvor grove Partiklerne kan være uden at bundfældes, afhænger — foruden af Apparatets Dimensioner — af Vandstrømmens Hastighed. Ved gradvis at forstærke denne, opnaar man at faa udskilt et Par Kornstørrelsesgrupper. SCHÖNE angiver saaledes, at

- 1) en Vandstrøm med 0,2 mm's Hastighed fraslæmmer Korn < 0,01 mm,
  - 2) en Vandstrøm med 2 mm's Hastighed fraslæmmer Korn < 0,05 mm,
  - 3) en Vandstrøm med 7 mm's Hastighed fraslæmmer Korn < 0,1 mm,
- og endelig faar man ved Benyttelse af ORTHS Hjælpetragt og
- 4) en Vandstrøm med 25 mm's Hastighed fraslæmmer Korn < 0,2 mm,

idet man ved f. Eks. 25 mm's Hastighed forstaar en Hastighed, der lader 2,5 cm<sup>3</sup> passere Slæmmetragten pr. Fladeenhed og pr. Sekund.

Korn > 0,2 mm adskilles i Grupper ved Hjælp af Sigter med Maskevidder paa henholdsvis: 0,5 mm, 1 mm og 2 mm.

Ved Danmarks geologiske Undersøgelse er det fortrinsvis de større Hastigheder, der benyttes, idet vi slæmmer med 25 mm og

<sup>1)</sup> N. STEENBERG og POUL HARDER: Undersøgelser over nogle danske Sandsorters tekniske Anvendelighed. D. G. U. II. Række, Nr. 16. Kjøbenhavn 1905. S. 32.

7 mm's Hastighed i ORTHS Hjælpetragt og med 2 mm Hastighed i SCHÖNES Apparat. Herved opnaar man Overgribning til den ATTERBERGSKE Skala, idet man ved Benyttelse af 2 mm Hastighed ifølge SCHÖNES Angivelse faar udskilt Korn  $< 0,05$  mm, og ATTERBERGS 100 Sek. Slæmning giver Korn af Størrelse 0,06—0,02 mm. Som det ses, gaar ATTERBERGS og SCHÖNES Skalaer ikke kontinuerligt over i hinanden; ATTERBERG har imidlertid paavist, at Skalaen for Slæmningen i SCHÖNES Apparat, der af SCHÖNE er beregnet teoretisk ved Hjælp af Formlen:

$$d = k \cdot \frac{11}{\sqrt{v^7}}$$

hvor k er en Konstant, d Partiklens Diameter (beregnet for kugleformede Kvartslegemer) og v Hastigheden af den benyttede Vandstrøm, ikke er af særlig stor Værdi, naar man ikke netop har med kugleformede Kvartskorn at gøre.

Hvad angaar ATTERBERGS Resultater, da er disse ikke fundne ved Hjælp af nogen teoretisk Formel, men ved Mikroskopering af Slammet fra de forskellige Aftapninger. KOPECKÝ<sup>1)</sup> har prøvet at overføre denne Metode paa SCHÖNES Slæmmeprodukter, og det viste sig da, at den SCHÖNESKE Skala var bedre i Overensstemmelse med de ved Mikroskopering opnaaede Resultater, naar den blev forskudt 0,01 mm opefter. 2 mm Hastigheden vil da svare til Kornstørrelsen 0,06—0,02 mm, 7 mm Hastigheden til 0,1—0,06 mm o. s. v.; hele Skalaen bliver paa denne Maade en direkte Fortsættelse af ATTERBERGS. En Slæmmeanalyse, der gennemføres fra ATTERBERGS 16 Timers Slæmning til Sigting med 2 mm Sigter giver da følgende Resultat:

Kornstørrelse	Slæmmetid, Hastighed eller Maskevidde	Metode
$< 0,002$ mm	16 Timer	Atterberg
0,006—0,002 —	2 Timer	—
0,02 —0,006 —	15 Min.	—
0,06 —0,02 —	100 Sek. eller 2 mm Hastighed	— Schöne
0,1 —0,06 —	7 mm Hastighed	Orth
0,2 —0,1 —	25 » »	—
0,5 —0,2 —	0,5 » Sigte	Sigte
1,0 —0,5 —	1 » »	—
2,0 —1,0 —	2 » »	—
$> 2,0$ —	Rest	—

<sup>1)</sup> J. KOPECKÝ: Ein Beitrag zur Frage der neuen Einteilung der Körnungsprodukte b. d. mechanischen Analyse. Int. Mitt. f. Bodenkunde Bd. IV. Berlin 1914. S. 201.



Korn større end 2 mm bør helst fjernes inden Slæmningen. Omstaaende Slæmmetider er, som tidligere nævnt, beregnet for 20 cm's Vædskehøjde i Slæmmeglasset. ATTERBERG har imidlertid fundet, at Slæmmetid og Vædskehøjde er ligefrem proportionale, saaledes at man f. Eks. opnaar Slæmmeproduktet 0,006—0,002 mm, hvad enten man benytter 3 Timers Henstand med 30 cm Vædskehøjde, 2 Timers med 20 eller 1 Times Henstand med 10 cm Vædskesøjle.

Som man ser af omstaaende Tabel, egner ATTERBERGS Slæmmemethode sig bedst for de finere Kornstørrelser, SCHÖNES for de grovere. Der har i Tidens Løb været fremsat stærke Anker mod ATTERBERGS Metode, bl. a. mod selve Konstruktionen af Cylindrene. Saaledes beregnedes Vædskesøjleens Højde i sin Tid fra Apparatets Bund i Stedet for fra Udløbsrøret, en Fejlkilde, der procentvis blev større, jo mindre Vædskehøjde man foretrak at arbejde med, idet den Del af Slæmmecylinderen, der ligger under Udløbsrøret, jo ikke benyttes direkte i Analysen, men kun bruges til Opsamling af Bundfaldet; desuden sad Udløbsrøret ofte (Apparaterne varierede en Del) saa lavt, at Bundfaldet dækkede dets Aabning eller let kunde rives med ved Aftapningen. Disse Fejl er dog rettede ved den nye Type af ATTERBERGS Slæmmeglas.

Hvad angaar Prøvens Forberedelse til Forsøget, da anbefaler ATTERBERG selv Sønderdeling ved Kogning; SIMON JOHANSSON foretrækker imidlertid omhyggelig Børstning, ikke alene før Forsøget, men ogsaa under dette, saaledes at Slæmmetiden først ændres, naar Bundfaldet efter grundig Børstning ikke afgiver mere Slam i det benyttede Tidsinterval. Den ATTERBERGSKE Slæmmemethode kræver endvidere destilleret Vand i Modsætning til SCHÖNES Metode, hvortil der benyttes Ledningsvand; Aarsagen hertil er Ledningsvandets Tendens til at foraarsage elektrolytiske Virkninger i Slammet, hvilket igen giver Anledning til Aggregatdannelse, hvorved selv det fineste Slam meget hurtigt bundfældes. Særlig Betydning i saa Henseende har Prøvens Kalkindhold, idet Calcium-Ionen har en koagulerende Indflydelse paa Slammet.

Ved Iagttagelse af stor Omhyggelighed ved Prøvens Forbehandling og ved Anvendelse af de høje ATTERBERGSKE Slæmmeglas, der tillader Benyttelsen af en Vædskehøjde paa 30 cm, maa man dog sikkert betegne Metoden som tilfredsstillende indenfor de 3 fineste Kornstørrelser; derimod kan Slæmningen med 100 Sek. Henstand ved Vædskehøjde 20 cm (eller 150 Sek. med 30 cm Højde) aldrig blive fuldt paalidelig; dertil spiller den Uro, Oprystningen har fremkaldt, og den Tid, der medgaar til Aftapningen, for stor en Rolle.

Et andet Spørgsmaal er, om de andre Metoder er mere tilfredsstillende ved Bestemmelsen af dette vanskelige Interval, hvis Korn

egentlig er for grove til at slæmmes ved Hjælp af stillestaaende Vædske og for fine til at adskilles ved rindende Vand. I det mindste er SCHÖNES Metode ogsaa Genstand for Kritik netop paa dette Punkt (Hastighederne 2 og 0,2 mm), idet der hævdes, dels at Ledningsvands Indhold af fremmede Bestanddele ved saa lave Hastigheder faar Tid til at foraarsage elektrolytiske Virkninger i Slammet<sup>1)</sup>, dels, at den Fejlkilde, der maa anses for altid at være til Stede ved SCHÖNES Metode, nemlig de sekundære Strømninger, som Apparatets koniske Form fremkalder, vil blive procentvis større, naar Strømmen har ringe Hastighed. Vanskeligheden ved at adskille Kornstørrelserne omkring 0,02 mm med blot nogenlunde Nøjagtighed vil saaledes være til Stede saavel i det ene Apparat som i det andet, saalænge man benytter Forholdet mellem Partiklernes og Vandets Vægtfylde dertil.

ATTERBERG<sup>2)</sup> regner Partiklerne  $< 0,002$  mm for den egentlige Lersubstans; iøvrigt inddeler han de løse Jordlag i følgende Grupper:

20	—2	mm i Tværsnit:	Grus.
2	—0,2	— - —	: Sand,
0,2	—0,02	— - —	: Mo,
0,02	—0,002	— - —	: »Lättler«.
	$< 0,002$	— - —	: Ler.

ATTERBERG mener dog ikke, at man ved Hjælp af denne Inddeling kan skille Sand fra Ler, saaledes at Korn  $< 0,02$  mm f. Eks. altid har Lerets Egenskaber og Korn  $> 0,02$  mm Sandets; det er ofte lykkedes ham at udskille Sand under denne Grænse, saaledes Sand, hvis Kornstørrelse ligger ved 0,005, ja endog ved 0,001 mm, uden at dette Sand havde alle de for Lersubstansen karakteristiske Egenskaber; men saadant Sand vil i Praksis altid blive kaldt for Ler, og ATTERBERG har derfor benyttet Betegnelserne »Lättler« og »Ler«, hvor Ordet »Ler« er taget i mere almen Betydning. Om dette Forhold skriver han<sup>3)</sup>: Sand finere end 0,02 mm viser Leregenskaber i stigende Grad, jo finere Sandet er, saaledes har Sand fra 0,02—0,002 mm den Egenskab fælles med Ler, at det kan koagulere; Sand finere end 0,002 mm har dertil den Egenskab, at det — ligesom de svære Lerarter — kun i ringe Grad er gennemtrængeligt for Vand. Alle Lerarter, selv de fineste, indeholder Sand af Finheden 0,02—0,002 mm; men Lerarterne indeholder endnu finere Partikler, saa fine, at de ikke kan skelnes sely

<sup>1)</sup> NOVAK: Zur Methodik d. mech. Bodenanalyse. Int. Mitt. f. Bodenkunde Bd. VI. Berlin 1916. S. 120.

<sup>2)</sup> ALB. ATTERBERG: Studier i Jordanalysen. Kalmar 1903. S. 231.

<sup>3)</sup> Samme: Studier öfver Lerorna I. Kalmar 1909. S. 387.



ved Benyttelse af de bedste Mikroskoper, og man er da inde i det virkelig kolloidale Omraade.

Da dette Omraade er af stor Betydning for Lerets Konsistens, er det i høj Grad ønskeligt, ogsaa her indenfor at faa Leret inddelt i Grupper. Dette lader sig forholdsvis let gøre ved, at man lader Cylinderen henstaa ud over den af ATTERBERG fastsatte Maksimumtid (16 Timer for 20 cm Vædskehøjde). Ud fra ATTERBERGS Skala er man endog i Stand til at slutte, hvilke Kornstørrelser man da opnaar; thi som det ses af Tabellen S. 9, danner Slæmmeintervallerne en Kvotientrække med Kvotienten 8 (1. Led: 100 Sek., skal dog for at kunne indgaa i Rækken rettes til 112 Sek.), og da de til Slæmmetiderne svarende Kornstørrelser ogsaa retter sig efter visse Love, kan man, forudsat at Lovmæssigheden har almen Gyldighed, blot tilføje saa mange Led i Rækken, som man ønsker. SIMON JOHANSSON<sup>1)</sup> benytter saaledes Slæmmetiden 128 Timer (Rækkens 5. Led) og antager ud fra de af ATTERBERG bestemte Kornstørrelser, at han derved faar udslæmmet Korn  $< 0,0006$  mm ( $0,6 \mu$ ). Han opnaar derved at faa delt det egentlige kolloidale Leromraade i to Grupper og har gennem Forsøg paavist, at naar to Lerprøver, der begge har f. Eks. 60 % af Kornene  $< 0,002$  mm, alligevel viser højst forskellige fysiske Egenskaber, saa er Grunden ofte den, at den ene Prøves fineste Korn ligger meget tæt ved denne Grænse, medens den anden maaske har 50 % af sine fineste Korn liggende ved  $0,0006$  mm og saaledes er en langt sværere Lerart.

Til Slut skal jeg anføre enkelte Resultater, der er opnaaet ved Benyttelse af ovennævnte Metode ved Bestemmelsen af forskellige danske Lerarters Kornstørrelser.

#### Kornstørrelsen (Millimeter).

	2-1	1-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	0,1-0,06	0,06-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	$< 0,002$
Rødt plastisk Ler, Vejle	—	—	—	—	—	1,9	2,7	1,0	94
Graat plastisk Ler, Lillebælt	—	—	—	—	0,1	2,4	8,7	7,4	81,4
Fedt Moræneler, Alssund	←	9,6	→	11,3	9,4	17,4	15,7	12,9	23,6
Magert Moræneler, Alssund	←	23,7	→	13,5	11,4	14,9	9,5	9,3	18,0

<sup>1)</sup> SIMON JOHANSSON: Die Festigkeit der Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalt. S. G. U. Årbok 1913. Stockholm 1914. S. 42.

## Lerets fysiske Egenskaber.

Som det fremgaar af forrige Kapitel, kan man ved Hjælp af forskellige Slæmmemetoder faa inddelt Ler- og Sandprøver i Grupper efter deres Kornstørrelse. Man var tidligere af den Opfattelse, at der derved opnaaedes et fuldt tilfredsstillende Kendskab til vedkommende Prøver, idet man antog, at Variationer i Lerets fysiske Egenskaber var nøje knyttet til Variationerne i dets mekaniske Sammensætning. Man lagde dog ikke større Vægt paa at faa nærmere udredet, hvorledes de fysiske Egenskaber ændredes ved Overgangen fra en Kornstørrelse til en anden, og endnu mindre vidste man naturligvis om de naturlige Jordprøver, der jo indeholder Korn fra alle Grupper i alle mulige Blandingsforhold. Først da Svenskeren ALBERT ATTERBERG ved Aarhundredets Begyndelse gik i Gang med sine Undersøgelser af Lerets Konsistens, et Arbejde, der senere er fortsat af hans daværende Assistent, nu Statsgeolog ved Sveriges geologiska Undersökning, DR. SIMON JOHANSSON, er man kommet til Klarhed over Nødvendigheden af at supplere Slæmmeanalysen med en Undersøgelse af Lerets fysiske Egenskaber. Thi ganske vist opnaar man gennem den mekaniske Analyse at faa Ler og Sand inddelt i Grupper; men Grænserne for disse beror kun paa Kornenes Vægtfylde og ikke paa deres Form og petrografiske Beskaffenhed, og disse to Faktorer har alt for stor Betydning til, at man ganske kan se bort fra dem. Som det senere skal omtales, paaviste ATTERBERG, at andre Faktorer end Kornstørrelsen ogsaa er medvirkende til at bibringe Leret netop de Egenskaber, der karakteriserer det som en særlig, fra Sandet skarpt adskilt Jordart, og at de to Jordarter, hvad Kornstørrelsen angaar, meget godt kan gribe over hinanden, saaledes at den ene af to Prøver kan være i Besiddelse af Ler-egenskaber, den anden derimod have Sandets Kendetegn, selv om der er fundet hinanden nærliggende Værdier for de to Prøvers Kornstørrelser.



Som omtalt S. 11 gør ATTERBERG opmærksom paa, at Betegnelserne Lättler og Ler i hans Skala kun udtrykker, at Sandet under Lergænsen har saa mange Egenskaber fælles med Leret, at det i Praksis betegnes som Ler; men den Omstændighed, at det ikke har samtlige Leregenskaber og muligvis mangler de mest karakteristiske, viser fuldt ud Nødvendigheden af at supplere den mekaniske Analyse med Undersøgelser, der tager Sigte paa andre Faktorer hos Leret end netop Kornstørrelsen. Opgaven bliver da først og fremmest, at finde den Egenskab, der er fælles for alle Lerarter og kun for dem, og dernæst at finde det bedst mulige Udtryk for den. Allerede den første Del af Opgaven har vist sig vanskelig nok at løse, thi vel fandtes der talrige Undersøgelser af Ler, men hvilken Bestanddel eller Egenskab, der karakteriserer dette som selvstændig Jordart, var det ikke muligt at opnaa Enighed om. I ATTERBERGS citerede Værk »Studier öfver Lerorna« giver han (S. 399) en Oversigt over de forskellige Anskuelser, der har gjort sig gældende paa dette Punkt; her skal kun givet et kortfattet Resumé, der dog sikkert fuldt ud vil vise, hvor vanskeligt det har været at fastslaa, hvad der er den karakteristiske Egenskab for Leret.

FORCHHAMMER paaviste 1834, at Feldspat danner Kaolin ved Forvitring; han angav Kaolinens Formel som  $\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$ , og kom til det Resultat, at Kaolinen er Hovedbestanddelen i Leret. Denne Hypotese er herfra gaaet over i den senere geologiske Litteratur. Begreberne Kaolin og Lersubstans betragtes som identiske, saaledes at Leret oftest kaldes uren Kaolin, og dets forskellige Egenskaber tilskrives dets større eller mindre Kaolinindhold. Enige med Forchhammer er blandt mange andre MULDER, SENFT og SACHSZE; sidstnævnte giver følgende Definition af Leret: »Man betegner som Ler de paa Kaolin rigere Lerstenarter, som paa Grund af ringe Indhold af Forureninger endnu viser Kaolinens Egenskaber temmelig uforandrede«. I samme Retning udtaler GRUNER, PIEDZICKI og HILGARD sig. Denne Hypotese, at Kaolinen skulde være den Bestanddel, der bibringer Leret dets karakteristiske Egenskaber, har dog mange Modstandere. Saaledes protesterer S. W. JOHNSONN, RAMANN, HEIDEN, HECHT og BARTEL og flere andre imod den, idet de hævder, at Kaolin ikke har samme Egenskaber som Lersubstans: den er ikke amorf (RAMANN); den har ikke Lerets høje Absorptionsevne (HEIDEN); og den kan findes paa sekundære Lokalteter ganske ren (HECHT og BARTEL). Videst gaar maaske RÖSSLER og BISCHOFF, der begge hævder, at Kaolinisering og Forvitring er to helt forskellige Processer. Der dannes aldrig Kaolin selv ved den mest gennemgribende

Forvitring; Kaoliniseringen foregaar i det faste Fjeld og fortsætter sig uforandret mod Dybet.

Selv om et og andet af de fremførte Argumenter mod Kaolinens Betydning for Lerarternes Dannelse maaske hviler paa et lidt spinkelt Grundlag, er det dog fuldt forstaaeligt, at ATTERBERG fik Lyst til at tage Spørgsmaalet op til Behandling, idet man uvilkaarligt med ham maa stille sig det Spørgsmaal: Hvis det ikke er Kaolinen, der gør Leret amorft og plastisk, og som bibringer det dets høje Absorptionsevne overfor fremmede Stoffer, hvad er det da for en Faktor i Leret, der bevirker dette. ATTERBERG peger i denne Forbindelse paa Zeolithernes store Betydning for Lerarternes Absorptionsevne og finder heri Støtte i Undersøgelser foretaget af van BEMMELLEN og RAMANN; desuden mener han, at Lerets Indhold af Biotit, Hæmatit eller Limonit i væsentlig Grad betinger dets Plasticitet. I sin Definition af Begrebet Ler tager han imidlertid ikke direkte Stilling til Spørgsmaalet, idet han foretrækker at karakterisere Leret — ikke ved en Bestanddel — men ved en Egenskab. ATTERBERGS Lerdefinition, der overalt har vundet stor Anerkendelse lyder i hans egen Fremstilling saaledes<sup>1)</sup>: »Leror äro de mineraljordarter, i hvilka slamfina partiklar förhärskas, hvilka vidare i fuktig tillstånd äro mjuka, sammanhängande och formbara (= plastiska), men hvilka vid torkning bilda hårda, svårkrossade massor«.

ATTERBERG hævder saaledes, at foruden Finkornetheden er Plasticiteten den Egenskab, der gør Leret til en selvstændig Jordart, idet selv det fineste mikroskopiske Sånd ganske mangler denne Egenskab. Hvad det er, der bevirker Plasticiteten, bliver et Spørgsmaal for sig; som ovenfor nævnt antager han, at det er enkelte bestemte Mineralers Tilstedeværelse.

SIMON JOHANSSON meddeler i sin før citerede Afhandling<sup>2)</sup> en Oversigt over, hvad forskellige Forfattere tænker sig som Aarsag til Lerets Plasticitet. SCHLOESING holder f. Eks. paa, at Plasticiteten skyldes den kolloidale Lersubstans; OSTEN tænker sig Kaolinen som Ophav til Plasticiteten; ZSCHÖKKE søger Aarsagen i Sammenspillet mellem Lerstoffet og Vandet o. s. v.

For sit eget Vedkommende beskæftiger SIMON JOHANSSON sig mere med at fastslaa Plasticitetens Ytringsform (se herom S. 19) frem for dens Aarsag.

ATTERBERGS Angivelse af Plasticiteten som den for Leret karak-

<sup>1)</sup> Studier öfver Lerorna I. S. 391.

<sup>2)</sup> I. c. S. 66.



teriske Egenskab har vundet stor Anerkendelse rundt om i Verden og har bevirket, at den fysiske Leranalyse har faaet en fremskudt Plads indenfor Metoderne til Bestemmelse af Lerets Egenskaber.

Undersøgelsen af Lerets fysiske Egenskaber omfatter Bestemmelsen af dets Vandkapacitet, Porevolumen (KOPECKÝ), »Svind«, d. v. s. Volumenforandring ved Tørring (FROSTERUS), Plasticitet og Fasthed (ATTERBERG), hvorefter de sidste vil blive omtalt i det følgende.

## Lerets Plasticitet.

I Aaret 1911 publicerede ATTERBERG sin første, større Afhandling om Konsistenslæren<sup>1)</sup>, og i de Aar, der siden er forløbet, er denne Lære blevet yderligere uddybet, ikke alene af ATTERBERG selv, men ogsaa af hans Tilhængere.

ATTERBERG udarbejdede oprindeligt sine Metoder med det praktiske Liv for Øje, og de bærer i høj Grad Præg heraf, idet de er hurtige og lette at foretage og ikke kræver stor teoretisk Viden; til Gengæld tilfredsstiller de naturligvis ikke de strengere Krav, man maa stille til Nøjagtighed m. m., naar Talen er om Undersøgelser af mere teoretisk Interesse, og det ses da ogsaa af det følgende, hvorledes ATTERBERGS oprindelige meget primitive Form for Forsøgene efterhaanden er bleven erstattet af mere videnskabelige Fremgangsmaader.

Ved Konsistenslæren forstod ATTERBERG Kendskabet til Lerets Egenskaber ved forskelligt Vandindhold. Gennem sine Undersøgelser søgte han at besvare Spørgsmaalene: Ved hvilke Vandprocenter er en Lerart flydende, plastisk og stiv og hvor flydende, hvor plastisk og hvor stiv er den indenfor de forskellige Omraader. Materialet, han arbejdede med, var Lerpulver og Vand, idet han naturligt gik ud fra, at Variationer indenfor en Lerarts Konsistens var betinget af Forholdet mellem disse to Faktorer.

Inden det egentlige Forsøg udrørte han Lerpulveret med saa meget Vand, at det dannede en flydende Masse, og ved dernæst at tilsætte smaa Mængder Lerpulver nedsatte han gradvis Lerets Vandprocent saaledes, at Lerprøven ved Forsøgets Slutning dannede en stiv, vandfattig Substans. Paa sin Vej fra det ene Yderpunkt til det andet, skiftede Leret flere Gange Karakter, og Overgangene skete saa pludseligt, at de let kunde iagttages og henføres til en bestemt Vand-

<sup>1)</sup> ALB. ATTERBERG: Die Plastizität d. Tone. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. I. Berlin 1911. S. 10.



procent. ATTERBERG fastslog gennem talrige Forsøg følgende Ændringer i Lerets Konsistens:

Naar man til den flydende Lermasse tilsætter Lerpulver, bliver den først tyktflydende og forandres dernæst til en sejt klæbende Masse. Ved endnu mindre Vandindhold lader Leret sig forme, og Klæberigheden forsvinder. Tilsættes stadig mere Lerpulver, ophører Plasticiteten; Leret er ganske vist endnu fugtigt, men kan kun ved Tryk forenes til en sammenhængende Masse. Ved endnu lavere Vandindhold bliver det umuligt at forme Leret.

Ved hvert Vandindhold har Leret saaledes ganske bestemte Egenskaber og paa Grundlag af disse opstiller ATTERBERG nedenstaaende Skema:

- 1) Den øvre Grænse for det tyktflydende Ler. Herved forstaas den Vandprocent, hvorved Leret fra at være letflydende bliver tyktflydende.
- 2) Den nedre Grænse for det tyktflydende Ler  $\alpha$ : den Vandprocent ved hvilken 2 adskilte Lermasser, der er anbragte i en Skaal, ikke længere flyder sammen ved et kraftigt Stød paa Skaalens Kant = Flydegrænsen.
- 3) Klæbegrænsen: Grænsen, ved hvilken Leret ikke længere klæber.
- 4) Udrulningsgrænsen: Grænsen, ved hvilken en Lerdejg ikke længere lader sig udrulle til Traade.
- 5) Sammenpresningsgrænsen: Grænsen ved hvilken de fugtige Lerstykker ikke længere lader sig sammenpresse.

Grænserne udtrykkes ved de paagældende Vandprocenter. Oprindelig antog ATTERBERG, at han ved Klæbegrænsen havde den øvre Grænse for den plastiske Konsistens, medens Udrulningsgrænsen betegnede den nedre Plasticitetsgrænse. Det viste sig senere nødvendigt at ændre denne Opfattelse til, at Flydegrænsen danner Skellet mellem den plastiske og flydende Tilstand, idet Klæbegrænsen hos nogle Lerarter ligger under, hos andre over Flydegrænsen.

Den endelige Form for Skemaet bliver da:

1) Den øvre Grænse for tyktflydende Ler	Leret letflydende . . . .	}	Den flydende Tilstand.
	» tyktflydende . . .		
2) Flydegrænsen . . . .	» sejt og klæbende	}	Den plastiske (formbare) Tilstand.
3) Klæbegrænsen . . . .	» ikke klæbende.		
4) Udrulningsgrænsen	» nogenlunde fast		
5) Sammenpresningsgrænsen . . . . .	» fast . . . . .	}	Leret kan ikke formes, altsaa ifl. ATTERBERG: uplastisk.
			Den faste Tilstand.

For en Prøve, hvis Grænser ligger i Overensstemmelse med Skaemaet, kan man altsaa tale om klæbende og ikke klæbende Plasticitet; ligger Klæbegrænsen derimod over Flydegrænsen, bliver hele det plastiske Omraade »ikke klæbende«.

ATTERBERG undersøgte desuden en Del Sandprøver paa samme Maade; det viste sig, at Flydegrænsen og Udrulningsgrænsen her faldt sammen, hvilket stemmer med, at det plastiske Omraade i saa Fald bliver = 0 %. ATTERBERG anser Grænserne 2 (Flydegrænsen) og 4 (Udrulningsgrænsen) for de vigtigste, da de danner Begrænsningen for Plasticitets-Omraadet. De øvrige Grænser har han ikke beskæftiget sig meget med, men kun paavist deres Tilstedeværelse. SIMON JOHANSSON paapeger imidlertid Betydningen af Sammenpresningsgrænsen, idet han antager den for at være identisk med FROSTERUS' »Svindgrænse« : den nedre Grænse for det Omraade, i hvilket en Lerarts Volumen-Formindskelse er lig Vandtabet, en Grænse, der, som det senere skal ses, er af stor Vigtighed ved Studiet af Leret.

Med Hensyn til Bestemmelsen af disse Grænsers Beliggenhed kan det jo ikke nægtes, at Bedømmelsen efter de af ATTERBERG anviste Metoder for en stor Del maa bero paa et subjektivt Skøn, ikke mindst for de to vigtigste Grænsers Vedkommende, thi hvor haardt skal man støde mod Skaalens Yderside ved Bestemmelsen af Flydegrænsen, og hvor stærkt kan den subjektive Fejlkilde ved Bedømmelsen af en Lerarts Evne til at udrulles til Traade reduceres?

Muligvis vil man kunne faa ganske god Overensstemmelse mellem sine egne Bestemmelser. ATTERBERG opnaaede saaledes udmærkede Resultater, men Metoderne er altfor afhængige af Analytikeren, til at man tør benytte dem i større Udstrækning.

Inden jeg gaar over til at omtale, hvorledes ATTERBERGS Metoder er blevet erstattede af andre mere objektive Bestemmelser, skal jeg dog omtale Hovedgrænsernes Betydning. ATTERBERG hævder, som nævnt ovenfor, at en Lerarts plastiske Omraade er begrænset af henholdsvis Flyde- og Udrulningsgrænsen. Han har undersøgt en Mængde Lerarter og paavist, at disse to Punkter ikke alene ligger snart højere snart lavere paa Vandprocentsskalaen, men ogsaa at deres indbyrdes Afstand varierer stærkt, idet den er meget stor hos svære Lerarter og aftager, jo magrere Lerarten er. Ved Undersøgelse af en Række forskellige Lerarter opnaaede han de i Tabellen paa næste Side angivne Resultater<sup>1)</sup>:

Differencen mellem Flydegrænsens og Udrulningsgrænsens Vandprocenter kalder ATTERBERG for Plasticitetstallet, og han fore-

<sup>1)</sup> l. c. 1911. S. 32.



	Flydegrænsen	Udrulningsgrænsen	Plasticitetstal
Silurler fra Øland .....	67 % Vand	40 % Vand	27
Ancylusler, Upsala .....	57 — —	30 — —	27
Glacialler, Bergqkvara .....	51 — —	26 — —	25
Postglacialler, Saltkällan .....	42 — —	25 — —	17
Ferskvandsler, Nygårde .....	52 — —	37 — —	15
Glacialler, Dalarne .....	32 — —	25 — —	7
Glacialmergel, Öland .....	30 — —	24 — —	6
Flydeler, Helsingland .....	30 — —	30 — —	0

slaar at benytte dette som et Udtryk for Lerartens Plasticitet. Ved at sammenligne Tallene for Silurleret og Ancylusleret bliver man imidlertid opmærksom paa, at benytter man udelukkende Plasticitetstallet til at udtrykke Karakteren af en Lerart, da ser man ganske bort fra, at to Prøver meget vel kan have samme Plasticitetstal, altsaa være formbare indenfor samme Antal Vandprocenter (27 %), uden at de to plastiske Omraader falder sammen (67/40—57/30); den Forskel i de to Lerarters Sammensætning, der betinger denne Uoverensstemmelse, bliver altsaa ikke udtrykt gennem Plasticitetstallet. Endvidere giver en saadan Karakter kun Oplysning om Grænserne for det plastiske Omraade, men siger intet om Plasticitetsgraden.

Ifølge ATTERBERGS Definition kan man maaske heller ikke tale om en saadan, thi enten kan en Lerart udrulles til Traade, eller ogsaa kan den det ikke, og den er saaledes lige saa plastisk ved Omraadets Ydergrænser, som alle andre Steder indenfor dette Interval; men tager man Ordet Plasticitet i mere udstrakt Betydning, kan man næppe undgaa at regne med Variationer indenfor det plastiske Omraade.

Ligesom man er uenig om Plasticitetens Oprindelse, har det ogsaa vist sig praktisk talt umuligt at blive enig om, hvad Plasticiteten egentlig er, og hvilke Udslag dens Tilstedeværelse giver. Angaaende første Del af Spørgsmaalet, faar man hos SIMON JOHANSSON følgende enkle og klare Definition af Plasticitetsbegrebet<sup>1)</sup>: Den plastiske Tilstand er den Tilstand, hvori Lerarten befinder sig, naar Partiklernes indbyrdes Bevægelsesfrihed er hæmmet, saaledes at de ganske vist kan forskydes i Forhold til hverandre under Paavirkning udefra, men beholder de nye Lejringsforhold, selv om Kraften ophører at virke.

<sup>1)</sup> I. e. S. 60.

BISCHOFF<sup>1)</sup> citerer i sin Afhandling: Die feuerfesten Tone c. 20 Forfatteres Forslag til Bestemmelsen af Plasticitetens Udslag. ATTERBERG<sup>2)</sup> deler dem i 5 Klasser.

- I. Metoder, der ved Forsøget anvender Leret i dets plastiske Form.
- II. Metoder, som beregner Plasticiteten af det tørre Lers Fasthed.
- III. Metoder, der hviler paa Lerets Evne til at optage Vand.
- IV. Metoder, hvorved man benytter sig af Lerets Evne til at optage Sand i sig uden at miste sin Fasthed.
- V. Metoder, der anvender Lerets Evne til at udblødes i Vand som Maal for Plasticiteten.

Mod disse forskellige Klasser retter ATTERBERG adskillige Indvendinger:

I Klasse I opnaar man ikke at faa bestemt Plasticiteten, men Sejgheden, der ikke er konstant for en Lerart, men som veksler med Vandindholdet.

I Klasse II og IV forsøger man at bestemme Lerets Plasticitet ud fra en Tilstand, hvori det er ganske uplastisk.

Metoderne i Klasse III er ogsaa uheldige, da Plasticiteten ikke ene kan maales ved Lerets Vandprocenter. Humusjordene optager f. Eks. en Mængde Vand, men er ikke i Besiddelse af nævneværdig Plasticitet.

Klasse V, antager han, tager ogsaa Sigte paa ganske andre Egenskaber hos Leret, og han mener saaledes, at ingen af de mange Metoder rammer det vanskelige Plasticitetsbegreb, idet han erklærer sig enig med Direktør BRONGNIART (Sèvres), der i sit Værk »*Traité des arts céramiques*« kommer til det nedslaaende Resultat: »On a souvent parlé de la plasticité, on semble la connaître, mais on n'en a qu'une vague idée«.

Som det fremgaar af ovenstaaende, har det hidtil ikke været muligt at opnaa Enighed om Plasticitetsbegrebet, men man lærer heraf at benytte Udtrykket med en vis Varsomhed og kun at tage de forskellige Resultater for det, de i Virkeligheden er. Saaledes siger ATTERBERGS Plasticitetstal os kun det Intervals Størrelse (udtrykt i Antal Vandprocent), indenfor hvilke Leret er formbart og intet mere. Om man faar bestemt en Lerarts Plasticitetsgrad ved at bestemme dens Sejghed,  $\rho$ : dens Evne indenfor det plastiske Omraade til at modsætte sig fremmede Legemers Indtrængen, staar endnu hen i det uvisse.

Da imidlertid denne Egenskab hos Leret har fuld saa stor praktisk Betydning som Plasticiteten, vil vi foreløbig beskæftige os først

<sup>1)</sup> Leipzig 1904, S. 22.

<sup>2)</sup> Die Plastizität der Tone, S. 12.



og fremmest med denne og kun angive en Lerarts Plasticitet ved de to Vandprocenter, der begrænser det plastiske Omraade.

Ved Bestemmelsen af Lerets Konsistens arbejder man saaledes efter følgende Skema:

Grænser	Tilstand	Den varierende Styrkegrad indenfor Grænserne
Flydegrænsen (øvre Plast.-gr.)	Flydende  (Leret lader sig udrulle til Traade)	Lerets Viscositet.
Udrulningsgrænsen (ATTERBERGS nedre Plast.-gr.)		Lerets Sejghed.
Svindgrænsen (SIMON JOHANSSONS m. fl. nedre Plast.-gr.)	Plastisk  (Leret lader sig ikke udrulle til Traade)	
	Fast	Lerets Fasthed.

Lerets Fasthed kaldes ofte dets Kohæsiion, en Betegnelse, der først er foreslaaet af SCHUMACHER<sup>1)</sup> (egentlig »Cohärescens«) og siden benyttet af HILGER, HABERLANDT og flere. Den defineres som den Modstand, en Lerprøve i sin faste Tilstand yder imod et fremmed Legemes Indtrængen. Lerets Kohæsiion i dets faste Tilstand svarer altsaa ganske til Sejgheden indenfor det plastiske Omraade. Det samme gælder Viscositeten indenfor den flydende Form. Flere Forfattere benytter da ogsaa Ordene i Flæng; jeg vil foretrække at lade hvert Omraade beholde sin særlige Betegnelse, saaledes som de er angivet paa Skemaet ovenfor, og kun benytte Ordet Kohæsiion, naar jeg omtaler Lerets Modstand mod ydre Paa-virkning i Almindelighed uden at tænke paa noget bestemt Omraade.

<sup>1)</sup> ALB. ATTERBERG: Die Konsistenz und Bindigkeit d. Böden. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bdl II. Berlin 1912. S. 160.

## Lerets Kohæsion. Metoder.

SCHÜBLER<sup>1)</sup> var den første, der foretog en virkelig nøjagtig Bestemmelse af Jordarternes Kohæsion. Han anvendte til sine Forsøg tørrede Jordprøver, der — formede som smaa Stænger — blev anbragte under en Staalspatel, der samtidig fungerede som Vægtarm, idet den foroven bar en Vægtskaal. Paa denne blev der anbragt Lodder, indtil Spatelen formaaede at gennemskære Prøven.

Jordartens Sejghed eller vel snarere dens Klæbeevne fandt SCHÜBLER ved at bringe den ene Vægtskaal i et toarmet Vægtsystem i Berøring med den fugtige Jordart og derpaa belaste den anden, til Skaal Nr. 1 slap Prøven.

Imod denne Metode indvender ATTERBERG og PUCHNER, at Prøvens Fugtighed før Tørringen ikke indgaar i Resultatet, og førstnævnte henviser endvidere til Underlagets Betydning, der heller ikke er taget i Betragtning.

HABERLANDT<sup>2)</sup> bestemte Lerets Fasthed ved at anbringe Prøverne i Glasrør og neddyppe disse i Vand, indtil Leret var gennemfugtet, dernæst blev Leret varsomt taget ud af Røret, delt i flere Cylindre og tørret, hvorpaa Cylindrene blev trykket itu ved Hjælp af en Plade, der anbragtes ovenpaa dem og belastedes, til Lersøjlen brast. Han benyttede samme Metode til Bestemmelsen af Lerets Sejghed, kun undlod han i dette Tilfælde at tørre Prøverne, hvis Fugtighed han bestemte.

PUCHNER udtaler sig i det store og hele anerkendende om HABERLANDTS Forsøg, hvilket bedst fremgaar af PUCHNERS egen Metode, der har mange Lighedspunkter med HABERLANDTS (se S. 23).

ATTERBERG<sup>3)</sup> retter samme Indvending mod HABERLANDTS Metode som mod SCHÜBLERS, at der ikke tages tilstrækkeligt Hensyn til Underlagets Indflydelse.

HAZARDS<sup>4)</sup> Metode, der adskiller sig en Del fra de øvrige, er i Hovedtrækkene følgende: Leret æltes til en Dejg og formes til en Kugle, som tørres. 2 Stenkugler af samme Størrelse anbringes dernæst sammen med denne, saaledes at de danner Hjørnerne i en ligesidet Trekant. Over alle tre Legemer lægges derpaa et Brædt, der belastes lodret over Trekantens Midtpunkt, indtil Lerkuglen

<sup>1)</sup> Grundsätze d. Agrikulturchemie. 2. Aufl. 2. Theil. Leipzig 1838. S. 74.

<sup>2)</sup> Wissenschaftlich praktische Untersuchungen a. d. Gebiete d. Pflanzenbaus. Bd. I. Wien 1875. S. 22.

<sup>3)</sup> Die Konsistenz u. die Bindigkeit d. Böden. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. II. Berlin 1912. S. 160.

<sup>4)</sup> RAMANN: Bodenkunde. 3. Aufl. Berlin 1911. S. 312.



brister. Vedkommende Lers Belastning beregnes da lig  $\frac{1}{3}$  af Brædtets + Belastningens Vægt. PUCHNER<sup>1)</sup> mener om denne Metode, at det er vanskeligt dels at faa Vægten anbragt nøjagtigt over Trekantens Midtpunkt, dels at faa formet Lerkuglen med bestemt Diameter.

PUCHNER<sup>2)</sup> selv benytter som Arbejds materiale lufttørret Lerpulver, som anbringes i Rør af bestemte Dimensioner. Pulveret presses sammen i Rørene, der derpaa anbringes i lodret Stilling i en Vandbeholder; den nederste Rørmunding er lukket med en linned Klud. Naar

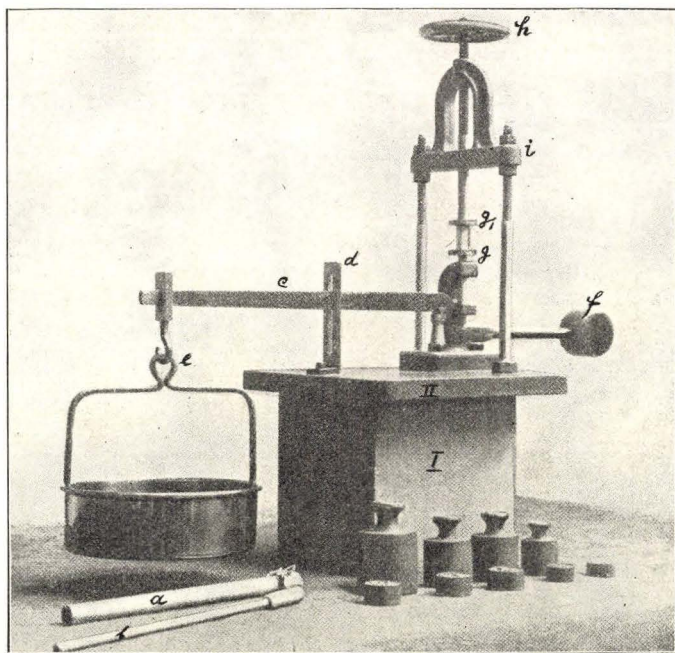


Fig. 2. PUCHNERS Apparat til Bestemmelse af Lerets Kohæesion.

Lersøjlen i Røret har opsugt saa meget Vand, at den er gennemfugtet, fjernes Vandbeholderen, Leret presses ud af Røret og deles i smaa Cylindre ved en særlig af PUCHNER konstrueret Metode. De smaa Lersøjler, der alle har samme Højde, tørres og er nu parate til den egentlige Fasthedsbestemmelse, der foretages ved Hjælp af Apparatet Fig. 2. Fremgangsmaaden er følgende: En høj Træsokkel bærer en svær kvadratisk Grundplade, der igen danner Grundlaget for det egentlige Apparat. Dette bestaar af en uligearmet Vægtstang, der fungerer som Decimalvægt. Den lange Arm bærer Vægtskaalen e. Vægtloddet

<sup>1)</sup> H. PUCHNER: Vergleichende Untersuchungen über die Kohäreszenz verschiedener Bodenarten. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. III. Berlin 1913. S. 148—150.

<sup>2)</sup> l. c. 141.

f er forskydeligt. Lercylinderen anbringes, som vist paa Figuren ( $g_1-g$ ), og ved Hjælp af et Sving h indstilles Pladen g saaledes, at den netop berører Leret. Dernæst belastes Vægtskaalen e, til Leret brister. PUCHNER har foretaget 265 Forsøg med det her beskrevne Apparat, og hans Opfattelse af Lerets KohæSION faar paa Grund af dette fyldige Materiale en vis Vægt, hvorfor jeg i Kortheit skal omtale Hovedpunkterne i hans Opfattelse af Lerets fysiske Egenskaber.

PUCHNER fandt først og fremmest, at KohæSIONen var overordentlig vekslende indenfor de undersøgte Prøver, samt at Undergrundsprøver viste størst KohæSION; han giver følgende Oversigt over Svingningerne indenfor Lerarternes Fasthed<sup>1)</sup>.

I 22 Tilfælde var KohæSIONen	> 20 kg
- 30 — - —	10 —20 -
- 57 — - —	5 —10 -
- 63 — - —	2 — 5 -
- 34 — - —	0,5— 2 -
- 59 — - —	0 — 0,5 -

Disse Resultater sammenligner han for en Del af Prøverne med Analyser af disses mekaniske Sammensætning og kommer til følgende Gennemsnitsprocenter af Kornstørrelser indenfor samme KohæSION<sup>2)</sup>.

Kornstørrelse	KohæSION (Fasthed)					
	0,5 kg	0,5—2 kg	2—5 kg	5—10 kg	10—20 kg	>20 kg
	%	%	%	%	%	%
Groft Sand . . . . .	3.095	6.210	4.786	7.115	2.916	0.677
Middel — . . . . .	5.485	9.625	2.942	2.393	0.809	0.565
Fint — . . . . .	38.016	16.738	10.303	2.644	4.515	4.936
Groft Støv . . . . .	30.560	32.697	46.651	38.362	18.588	31.009
Middel — . . . . .	17.064	23.297	27.636	33.220	39.097	32.039
Fint — . . . . .	2.252	3.584	2.709	6.104	7.387	6.981
Slam . . . . .	3.604	3.535	4.493	9.540	26.177	23.686

Kornene inddeler PUCHNER i følgende Grupper:

Sand . . . . .	3,0 —0,25 mm
Groft Støv . . . . .	0,25 —0,01 -
Middel — . . . . .	0,01 —0,005 -
Fint — . . . . .	0,005—0,0015 -
Slam . . . . .	< 0,0015 -

Med Hensyn til den samlede Jordprøves KohæSION i Forhold til hver enkelt Kornstørrelses KohæSION giver han følgende Eksempel:

<sup>1)</sup> PUCHNER: l. c. S. 183.

<sup>2)</sup> — - S. 197.



En Lerprøves<sup>1)</sup> Kohæsion var beregnet til 134 kg. Kohæsionen af Prøvens forskellige Kornstørrelses-Grupper viste sig at være følgende:

Groft Støv.....	0,2 kg
Middel — .....	35 -
Fint — .....	58 -
Slam .....	96,5 -

Dette Resultat, der blot er et af mange, viser det ejendommelige Forhold, at den stærkt uensartede Lerprøve er i Besiddelse af ikke saa lidt højere Kohæsion end Slammet. Det er altsaa ikke Finheden alene, der betinger en Lerarts Fasthed.

Medens PUCHNER i Tabellen maa indskrænke sig til at angive Middelp procenten af hver Kornstørrelse indenfor den enkelte Kohæsionsgruppe, faar man et andet Sted i Afhandlingen (S. 186—197) Lejlighed til at gøre sig bekendt med Slæmme-Resultaterne for en Del af de Forsøg, hvorpaa Tabellen er bygget.

Det er interessant at iagttage de forholdsvis store Afvigelser fra Middeltallet, som disse Prøvers Kornstørrelser viser. For Gruppen 10—20 kg's Kohæsion angiver Tabellen paa forrige Side f. Eks., at de Prøver, der indgaar i denne Gruppe, gennemsnitlig indeholder 39,097 % Middeltøv. Af Gruppens 30 Forsøg har PUCHNER i Oversigten over de enkelte Prøvers Kornstørrelser medtaget 7, og disse viser følgende Procenttal for Middeltøv: I. 24,4 %, II. 48,0 %, III. 37,4 %, IV. 61,12 %, V. 32,6 %, VI. 40,6 % og VII. 25,6 %.

Ovenstaaende giver et godt Indblik i den mekaniske Jordanalyses Utilstrækkelighed, idet man altsaa indenfor samme Kohæsionsgruppe (Prøve I og II har endog samme Kohæsionstal: 11,0 kg) kan finde saa stærke Svingninger i Jordarternes mekaniske Sammensætning.

PUCHNER fandt ligeledes, at Forvittringsjord paa primært Leje har forholdsvis højere Kohæsion end de sedimenterede Lerarter, og han forklarer dette Forhold ud fra Forskellen paa Kornenes Form i de to Lerarttyper. I førstnævnte Tilfælde er Kornene kantede og kan derfor lettere bringes til at berøre hinanden langs hele Flader; i sidstnævnte er de enkelte Korn rundslidte og berører kun hinanden i Punkter, hvilket svækker Kohæsionen. Følgende Faktorer anser han ligeledes for at have Indflydelse paa Kohæsionen:

Lerets mineralogiske Sammensætning, navnlig dets Indhold af Glimmer. Glimmerbladene ordner sig nemlig fortrinsvis horizontalt i parallelle Rækker, og er Prøven rig paa Slam, klæber dette Glimmerbladene sammen langs deres Flader, hvilket forhøjer Kohæsionen betydeligt. Er der derimod intet Bindemiddel, har Glim-

<sup>1)</sup> Lerprøven stammede fra Keuperlagene ved Ellingen.

merbladene overordentlig ringe Kohæsion paa Grund af deres store Bøjelighed.

Kornenes Spaltelighed har ifølge RAMANN og PUCHNER indirekte Betydning for Kohæsionen derved, at denne tiltager med Antallet af indbyrdes Berøringsflader, der jo stiger med Spalteligheden.

I den Omstændighed, at Keuperlagene ved Ellingen viser den højest maalte Kohæsion, ser PUCHNER et Bevis for, at Lerarternes specifikke Vægt har Indflydelse paa Kohæsionen, idet han forklarer det nævnte Tilfælde ud fra Lerets store Jernindhold, der paa Grund af Tyngdekraften bevirker en særlig stærk Sammenpresning af Laget.

PUCHNERS Metode er stærkt benyttet og i det store og hele anerkendt, selv om der under Forsøget er visse Vanskeligheder at overvinde, (det er saaledes næsten umuligt med Varsomhed at presse de fugtige Lersøjler ud af de cylindriske Rør). Hovedindvendingen maa dog — mod PUCHNERS saavel som mod HABERLANDTS Metoder — blive, at der anvendes kunstige Prøver til Forsøget i Stedet for de i Naturen forekommende Lerarter.

Resultaterne af PUCHNERS mange Forsøg har derfor kun teoretisk Interesse, idet de ikke uden Kontrol kan overføres direkte paa Analyser af naturlige Lerprøver.

ATTERBERG var klar over Ulempen ved at benytte kunstige Blandinger af renslæmmede Kornstørrelse-Grupper og indførte ogsaa i sine sidste Arbejdsaar Brugen af naturlige Jordprøver, dog er Størstedelen af hans Forsøg udført med kunstige Prøver. SIMON JOHANSSON tog imidlertid Arbejdet op, idet han bibeholdt ATTERBERGS Metoder, men med Benyttelse af de i Naturen forekommende Jordarter som Forsøgsmateriale.

#### ATTERBERGS og SIMON JOHANSSONS

##### Metode til Bestemmelse af Lerets Fasthed og Sejghed.

Til Bestemmelse af en Lerprøves Fasthed har ATTERBERG<sup>1)</sup> konstrueret det paa Fig. 3 afbildede Apparat; dette — der i mangt og meget minder om SCHÜBLERS — bestaar af en Vægtstang med Kontravægt og Vægtskaal; i Nærheden af Ophængningspunktet er anbragt en cylindrisk Stang, der forneden bærer et kileformet Staallegeme; umiddelbart under Kilen anbringes Prøvelegemet, og Vægten afbalanceres saaledes, at Kilens Kant netop berører dette. Naar Vægtskaalen derpaa belastes, vil Kilen gradvis synke ned i Leret, saafremt dette befinder sig i sin plastiske eller flydende Tilstand,

<sup>1)</sup> ALB. ATTERBERG: Die Konsistenz u. die Bindigkeit d. Böden. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. II. Berlin 1912. S. 149.



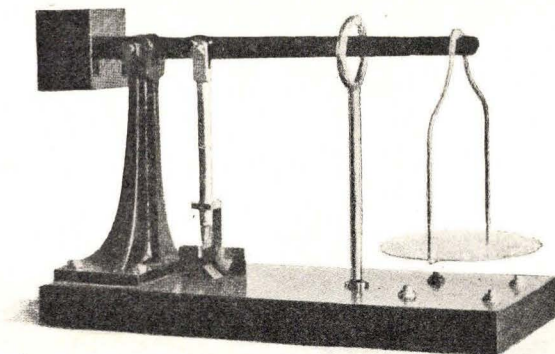


Fig. 3. ATTERBERGS Apparat til Bestemmelse af Lerets Fasthed  
(efter SIMON JOHANSSON).

eller spalte Prøvelegemet, hvis Leret er fast; den Belastning, der skal til for at trykke Kilen ned til en vis Dybde i det bløde Ler eller spalte det faste, giver et Maal for henholdsvis Lerets Sejghed eller Fasthed ved den Vandprocent, hvorved Forsøget foretages.

Til Bestemmelse af en Prøves Sejghed foretrak ATTERBERG imidlertid at benytte et mere fintmærkende Apparat (se Fig. 4). Princippet i dettes Konstruktion er det samme som i det førstnævnte; kun bærer Kilen her direkte en Skaal til Belastningen, og Kontravægten hænger i en Snor, der fra Skaalen løber over en letbevægelig Trisse.

Forsøget gaar da for sig paa følgende Maade. En Lerdejj æltes med saa meget Vand, at den i Konsistens ligger lidt over Udrulningsgrænsen — altsaa netop er plastisk; af Dejgen bliver derpaa ved Hjælp af Messingforme formet c. 4 Prismer med Dimensionerne  $2 \times 2 \times 19$  cm. I det ene af disse Prismer foretages straks Bestemmelse af dets Sejghed, de øvrige bliver derimod henstillet til Udtørring under saadanne Forhold, at Vandindholdet stadig faar Tid til at fordele sig jævnt i hele Prismet; et efter et bliver Prismene derpaa underkastet Bestemmelser

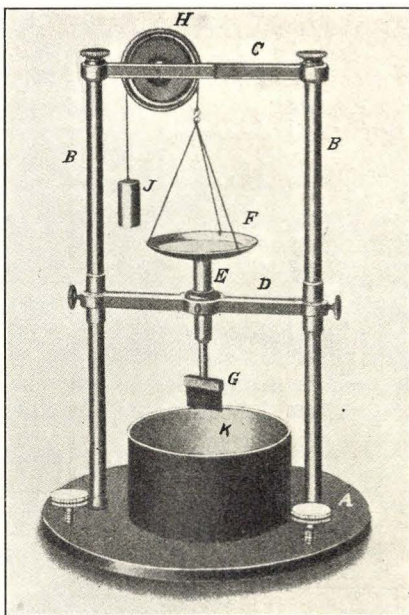


Fig. 4. ATTERBERGS Apparat  
til Bestemmelse af Lerets Sejghed  
(efter SIMON JOHANSSON).

af Sejgheden eller ved de sidste og derfor mindst fugtige — af Fastheden. For at faa flere Bestemmelser for hvert Vandindhold, deles Prismet ved Forsøget i flere, mindre Prismer, hvorefter der bestemmes Kohæsion i hvert enkelt. Saavel ATTERBERG<sup>1)</sup> som SIMON JOHANSSON<sup>2)</sup> lægger megen Vægt paa Underlagets Beskaffenhed samt paa at bestemme Prisme-Dimensionens Indflydelse m. m.; særlig det sidste Punkt er af stor Vigtighed, thi Forsøgene med en og samme Prøve foretages jo ved forskellige Vandprocenter, og paa Grund af Lerets Tilbøjelighed til Indskrumpning ved Tør-

Nr.	Betegnelse og Lokaliitet	Mekanisk Sammensætning					ATTERBERGS Plasticitetstal	Flydegrænse	Udrulnings- grænse	Maksimum Fasthed
		2-0,2 mm	0,2-0,02 mm	0,02-0,002 mm	∇ 0,002 mm	Humus				
258	Sand, lidt leret (Schwemmsand, Kalmar)	% 32,4	% 59,2	% 2,0	% 5,8	% 0,6	0	19	19	2,4
163	Sandet Ler (Moton, Ugerup)	0	36,6	29,8	33,6	0	9	26	17	39
231	Groft Ler (Schluffton, Vassbo)	0	5,1	50,1	43,4	1,4	7	31	24	23
115	Humushold. groft Ler (Schluffschwarzerde)	0,4	16,5	43,2	31,3	8,6	0	40	—	5
162	Meget svært Ler (sehr schwerer Ton)	0	13,3	16,7	69,4	0,6	26	50	24	93
121	Ugerup og Svedala	0	12,3	32,2	54,2	1,3	17	41	24	94

ring kan de forskellige Dimensioner ikke bibeholdes under hele Forsøget. ATTERBERG hævdede, at Kohæsionen er proportional med Prismets Bredde, men uafhængig af dets Tykkelse. SIMON JOHANSSON, der — meget forstaaeligt — tvivlede noget om denne Paastands Rigtighed, foretog en Række Forsøg med vekslende Dimensioner af Prismerne og kom til det Resultat, at ATTERBERG havde Ret, hvad Bredden angik, men at det derimod ikke var tilladeligt at se bort fra Tykkelsen, da det fremgik af Bestemmelserne, at Kohæsionen tiltog med Tykkelsen, uden at der dog kunde tales om ligefrem Pro-

<sup>1)</sup> ALB. ATTERBERG: Die Konsistenz u. Bindigkeit der Böden. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. II. Berlin 1912. S. 167.

<sup>2)</sup> SIMON JOHANSSON: Die Festigkeit d. Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalt. S. G. U. Årbok 1913. Stockholm 1914. S. 20.



portionalitet. Med Hensyn til de talrige Undersøgelser af de øvrige Faktorer, der kan indvirke paa Kohæsions-Resultatet: Begyndelses-Vandprocenten, Underlaget o. s. v. skal jeg indskrænke mig til at henvise til de paagældende Forfatteres Publikationer herom.

### Simon Johanssons Forsøgsresultater.

SIMON JOHANSSON fremstiller de opnaaede Resultater grafisk ved at benytte Kohæsionsbestemmelserne som Ordinator og de tilsvarende Vandbestemmelser som Abscisser i et Koordinatsystem.

Paa Fig. 5 er angivet Kurver for Lerprøver stammende fra

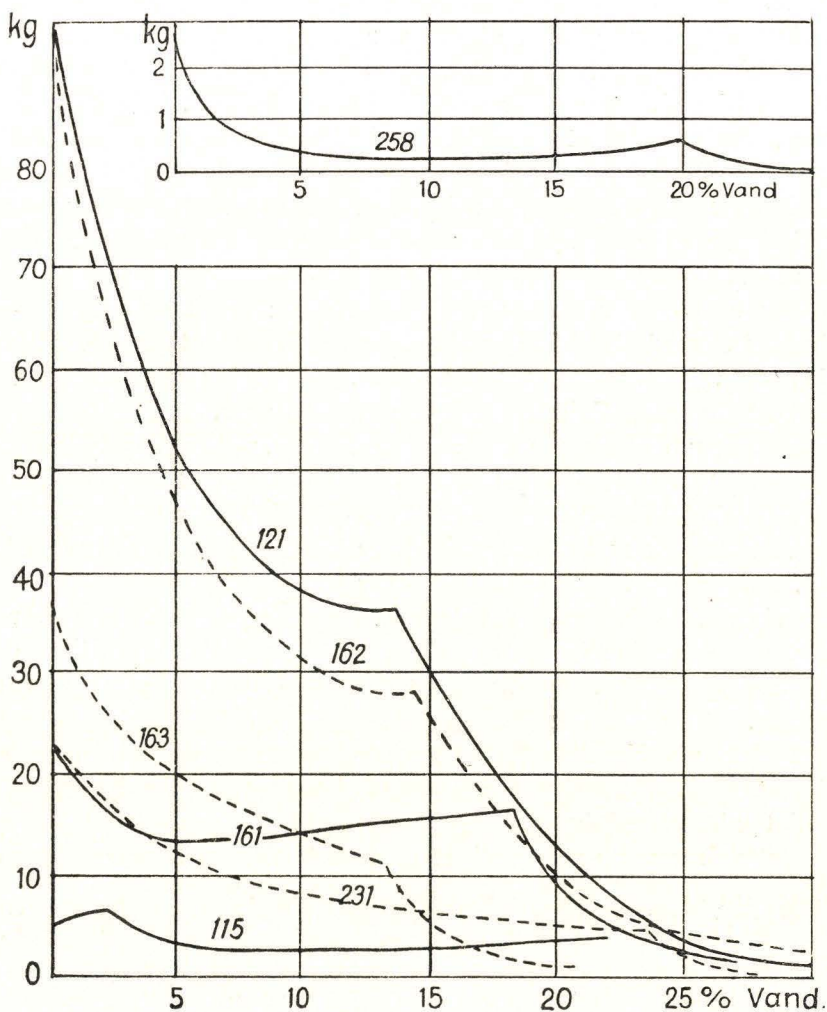


Fig. 5. Forskellige Fasthedskurver, bestemte af SIMON JOHANSSON. Kurveknæet kaldes i det følgende O-Punktet (Omslagspunktet).

forskellige Jordartsgrupper, optegnede paa Grundlag af de i Tabellen S. 28 angivne Forsøg. (I Tabellen er der kun angivet Ciffrene for »Maksimum-Fasthed«).

Som det fremgaar af Figuren, har Kurverne — deres store Ulighed til Trods — dog visse Fællestræk, idet de alle (Humusleret dog undtaget) har deres Maksimum beliggende paa selve Y-Aksen og derfra falder mere eller mindre brat til Punktet O, hvorfra de fortsættes under en anden Vinkel, saaledes at O-Punktet paa samtlige Kurver betegner et »Knæ«. Dette Punkt, der saa øjensynligt betegner en gennemgribende Konsistensforandring for Leret, er af SIMON JOHANSSON gjort til Genstand for en grundig Undersøgelse.

Det slog ham straks, at der var en vis Analogi mellem Lerets Fasthedskurve og den af van BEMMELEN<sup>1)</sup> fundne Kurve for en Hydrogel<sup>2)</sup>, en Lighed, der var for stor til at være tilfældig. Van BEMMELENS Kurve, der er afbildet paa Fig. 6, viser Sammenhængen mellem en Hydrogels Damptryk (Ordinaten) og dens Vandindhold (Abscissen), idet hans Undersøgelser gik ud paa at faa opklaret, om Hydrogeler af Kiselsyre eller lign. indeholdt alt Vandet adsorberet, eller om en Del af det fandtes i kemisk bunden Form.

Forsøget blev udført paa følgende Maade: Først blev Hydrogelen anbragt i et med Vanddamp mættet Rum. Fra Tid til anden udtoges Gelen og vejedes indtil det Tidspunkt, da Vægten viste sig at være konstant, hvorpaa Gelens Vandprocent bestemtes.

Derpaa udførtes en Række analoge Forsøg, ved hvilke Hydrogelens Damptryk trinvis sænkedes; dette opnaaedes ved at benytte Eksikatorer, indeholdende Svovlsyre af tiltagende Koncentration.

Van BEMMELEN bestemte ved hver Undersøgelse Gelens Vandindhold, naar dens Vægt var blevet konstant, samt Damptrykket. Det viste sig da, at Gelen i det Interval, der er repræsenteret af Kurven  $A_{\beta}$ , ved det synkende Damptryk, stadig afgav Vand, medens dens Volumen samtidig aftog nøjagtigt svarende til den afgivne Vandmængde.

Ved et vist Vandindhold (Kurvens Punkt O) ændredes dette Forhold, idet det viste sig muligt at sænke Prøvens Vandprocent betydeligt uden samtidig at sænke Damptrykket.

Dette Interval er fremstillet grafisk i Kurven  $A_{\alpha\beta}$  (O—O<sub>1</sub>), der paa Grund af Ordinatens Konstans er vandret.

Ved et givet Tidspunkt ændredes Forholdet atter til at ligne

<sup>1)</sup> ZSIGMONDY: Kolloidchemie. Leipzig 1912. S. 148—164.

<sup>2)</sup> Ved en Hydrogel forstaas: En vandholdig, geléagtig, halvfast, kolloidal Substans.



Forsøgets første Forløb, idet Kurven nu gradvis sænkede sig til Skæring med Abscisseaksen.

Under Forsøget viste det sig endvidere, at Gelen skiftede Karakter ved Punkterne  $O$  og  $O_1$ .

Van BEMMELEN naaede af forskellige Grunde, som jeg ikke her skal komme nærmere ind paa, til det Resultat, at Kurvens vandrette Forløb fra  $O-O_1$  ikke skyldtes Sønderdeling af Hydrater.

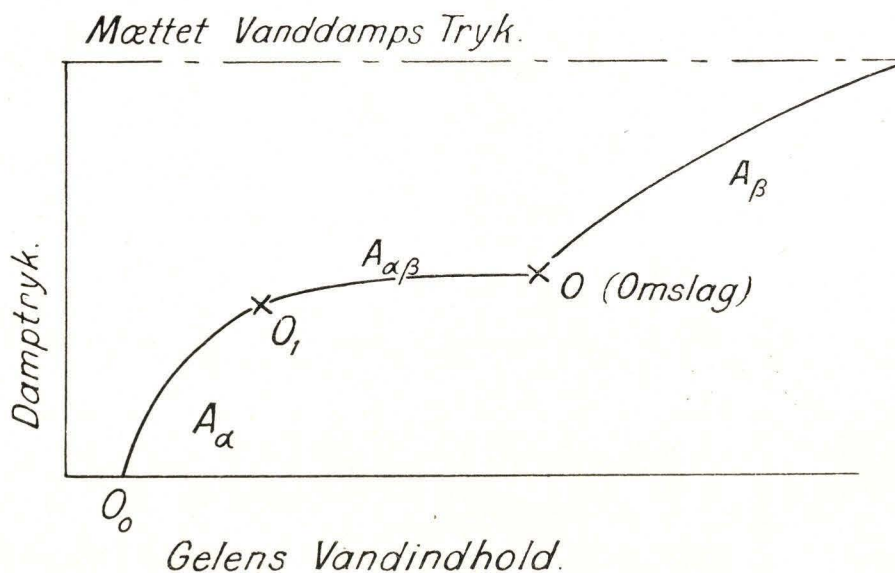


Fig. 6. Van BEMMELENS KURVE (efter SIMON JOHANSSON).

(Trykket i det dampmættede Rum var ved den paagældende Temperatur 12,7 mm.)

Paa Grundlag af ZSIGMONDYS Undersøgelser over Van BEMMELENS Forsøg giver SIMON JOHANSSON følgende Forklaring af Kurven:

Naar en Hydrogel frit har haft Lejlighed til at mætte sig med Vædske, findes der om hver enkelt Partikel en Kappe af Vand, der er underkastet Partiklens Adsorptionskraft, men desuden svømmer alle Partiklerne rundt i Vædsken uden at danne noget samlet Hele i Forhold til denne. Formindskes nu Vandindholdet, kommer Partiklerne nærmere til hverandre, da stedse mindre Vædske skiller dem, og der vil ved stadig Nedsættelse af Vandindholdet naas et Punkt, hvor Partiklerne begynder at berøre hverandre.

Fra det Øjeblik, da Partiklerne begynder at danne et fast »Skelet«, gør Haarrørsvirkningen sig gældende i de vandfyldte Porer, og konkave »Menisker« begynder derpaa at danne sig mellem Overfladens Partikler, saaledes som Tilfældet altid er ved

en Vædskes Opstigen i Kapillarrør. Den konkave Vædskeoverflade udøver en sugende Virkning paa den underliggende Vædske, og derved sammenpresses Kapillarrørens Vægge stedse stærkere, efterhaanden som Konkaviteten vokser; Trykket forplanter sig videre til Gelens Indre, indtil Partiklerne er sammenpresset til det mindst mulige Volumen og nu danner een samlet Substans med vandfyldte Porer. Imidlertid tiltager de ydre Meniskers Konkavitet og dermed deres sugende Kraft, og da Kapillarernes Vægge ikke længere giver efter for Trykket, bevirker Sugningen, at Fugtigheden i Gelens Indre overgaar i Dampform. Denne Tilstand, der indtræffer ved Punkt O paa Kurven, kan let iagttages direkte ved Betragtning af Gelen, idet denne fra at være klar og gennemsigtig, bliver mat af Farve og uklar (Omslagspunktet).

Paa Strækningen  $O-O_1$  afgiver Gelen sit Porevand, uden at Damptrykket formindskes, hvorfor Kurven bliver vandret; ved  $O_1$  er alt Porevandet afgivet, hvilket viser sig ved, at Gelen nu igen bliver klar, da Inhomogeniteten i dens Indre er forsvundet og alle Gelens Porer fyldt med et optisk ensartet Stof: Damp eller Luft.

Under Kurvens sidste Forløb fra  $O_1$  til Skæringen med X-Aksen afgiver Gelen endelig Partiklernes Adsorptionskappe under stadigt synkende Damptryk.

Det fremgaar med stor Tydelighed af SIMON JOHANSSONS Fasthedskurver for Leret, at disse har mange Lighedspunkter med van BEMMELENS Kurve for Hydrogelen, idet den nedre Del af Lerets Kurve ifølge Sagens Natur dog svarer til den øvre Del af van BEMMELENS. Saaledes har begge Kurverne den jævne Stigning ( $A_\alpha$ ) til det stærkt markerede Omslagspunkt (O), samt det horizontale Kurveforløb ( $A_{\alpha\beta}$ ) og endelig den stejle Rejsning paa Strækningen  $A_\beta$ .

Van BEMMELENS Beskrivelse af Hydrogelens Konsistens i de forskellige Intervaller viser ligeledes god Overensstemmelse med Lerets.

Vandindhold	Hydrogelens Beskaffenhed
40—30 %	Gelen lader sig skære,
20 -	— er temmelig fast,
10 -	— falder i Smaastykker,
6 -	— { lader sig findele som { tørt Pulver.



I Overensstemmelse med Fasthedskurvens Forløb deler SIMON JOHANSSON Lerets Konsistens i følgende Afsnit:

- |                                 |   |   |
|---------------------------------|---|---|
| I. a. Lerets flydende Tilstand  | } | Paa Kurverne Fig. 5: Stykket fra Skæringspunktet med X-Aksen til Kurveknæet = $A_\beta$ paa Kurven Fig. 6.                      |
| b. — plastiske —                |   |   |
| II. Omslagspunktet.....         | } | Kurveknæet paa Fig. 5 = Omslagspunktet paa Fig. 6.  |
| III. Lerets faste Tilstand..... |   | Paa Kurverne Fig. 5: Stykket fra Kurveknæet til Skæringspunktet m. Y-Aksen = $A_{\alpha\beta}$ og $A_\alpha$ paa Kurven Fig. 6. |

### Leret i flydende Tilstand.

Hvis man ælter en Lerprøve med rigeligt Vand, danner der sig, som hos Gelen, først og fremmest om hver Partikel i Leret en Adsorptionskappe  $\sigma$ : et Vandlag, der staar under Indflydelse af Partiklens Tiltrækningskraft. Bliver Tilførslen af Vand til Leret større, end der kræves til Dannelsen af disse Adsorptionskapper, er dette Overskud ikke underkastet Partiklernes Indflydelse, men danner en samlet Vædske, hvori Partiklerne, omgivne af hver sin Adsorptionskappe, frit kan bevæge sig. Leret er med andre Ord flydende og næsten lige saa bevægeligt som en Vædske; der er dog stedse nogen Gnidning mellem Partiklerne og Vædsken. Denne indre Modstand i Lersubstansen kaldes Viskositet.

Efter EINSTEINS<sup>1)</sup> og HATSCHEKS Beregninger er kolloidale, oplæmmede Partiklers Viskositet uafhængig af Partiklernes Størrelse, men tiltager med Koncentrationen. Formlen for Viskositeten er Formlen for en ret Linie, hvori Kornstørrelsen ikke indgaar. Den nedre Del af Lerets Fasthedskurve fra Skæringen med X-Aksen til Flydegrænsen (se Fig. 7 S. 34) skulde saaledes være retlinet; talrige Forsøg viser imidlertid, at Kurven fra en retlinet Begyndelse rejser sig stejlere i Nærheden af Flydegrænsen. Grunden maa ifølge SIMON JOHANSSON være, at man i dette Afsnit af Kurven har med en Lerdejg at gøre, der vel endnu maa betegnes som flydende, men hvor Koncentrationen dog er saa stærk, at Partiklerne berører hverandre, hvorfor Loven for i Vædske svævende, kolloidale Partikler ikke længere har fuld Gyldighed.

Af de to Eksempler paa Kurvernes Forløb indenfor Lerets flydende Omraade, der findes afbildet paa Fig. 7, fremgaar det, at Flydegrænsen (F) hos de forskellige Lerarter hverken ligger ved samme Vandprocent eller ved samme Fasthed. Saaledes har Prøve Nr. 111 sin

<sup>1)</sup> SIMON JOHANSSON. I. c. S. 58.

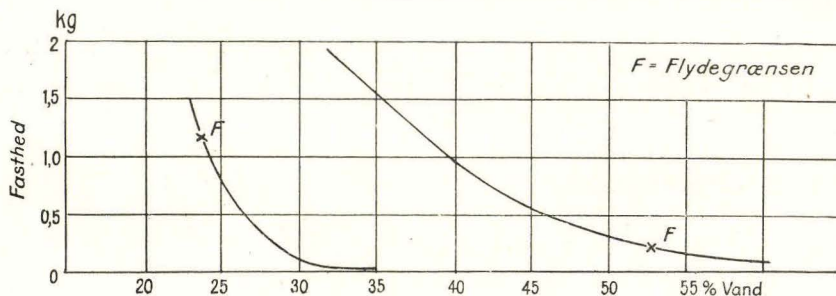


Fig. 7. Kurver for 2 Lerprøver Nr. 111 (t. v.) og 164 (t. h.)  
(efter SIMON JOHANSSON).

Flydegrænse ved 24 % Vand og c. 1,1 kg Fasthed, medens Flydegrænsen for Prøve 164 ligger ved 53 % Vand og 0,25 kg Fasthed; som det ses, fremtræder Flydegrænsen ikke som et markeret Punkt paa Kurverne; den kan derfor ikke betragtes som et naturligt Skel i Lerarternes Konsistens, men kun som en ganske konventionel Grænse.

### Det plastiske Omraade.

Ved Lerets Flydegrænse overgaar det fra sin flydende til sin plastiske Tilstand. Ifølge ATTERBERGS Plasticitet-Definition vedvarer denne Tilstand indtil Udrulningsgrænsen, thi kun indenfor dette Omraade lader Leret sig udrulle til Traade. Plasticitetsbegrebet i almen Betydning: slet og ret som Formbarhed, tillader imidlertid en Udvidelse af det plastiske Omraade, saaledes at dets nedre Grænse henlægges til Omslagspunktet, thi Leret er ogsaa — om end med Vanskelighed — formbart indenfor det Omraade, der ligger mellem Udrulningsgrænsen og Omslagspunktet. Denne Forskydning af den nedre Plasticitetsgrænse bliver yderligere tilladelig ved den Omstændighed, at Lerets Indskrumpningsevne vedvarer lige til Omslagspunktet, for at ophøre netop ved dette. I Praksis betyder Forskydningen en absolut Lettelse, da Omslagspunktet er Kurvernes mest markerede Punkt.

Indenfor det plastiske Omraade er Leret altsaa formbart  $\circ$ : Partiklerne kan ved mekanisk Kraft forskydes i Forhold til hverandre, men bibeholder deres ændrede Beliggenhed, saa snart Kraften ophører at virke.

ATTERBERG foretrak, som tidligere nævnt, at udtrykke Lerarternes Plasticitet ved Størrelsen af det plastiske Omraade, idet han regnede med konstant Plasticitet indenfor dette; herved skelnede han altsaa skarpt mellem Plasticitet og Kohæsion, thi sidstnævnte Egenskab stiger indenfor det plastiske Omraade, ligesom indenfor de to andre,



med faldende Vandprocenter. Et Blik paa et Par af SIMON JOHANSSONS Forsøgsresultater viser desuden, at man ikke engang tør bedømme to Lerarters relative Kohætion ud fra deres Plasticitetstal, thi medens Prøve 162 (se Tabellen S. 28 og Kurven Fig. 5) har Plasticitetstal 26 og Fasthed (ved Omslagspunktet) 28 kg, saa har Prøve 121 med det lavere Plasticitetstal 17 større Fasthed, nemlig 36 kg, hvilket viser, at Kohætionen i en Lerart følger sine egne Love, der til Tider kan virke modsat de for Plasticitetgrænserne gældende.

### Omslagspunktet.

Som tidligere nævnt er Omslagspunktet uden Sammenligning Kurvens vigtigste Punkt, thi ved dette forandres Lerets Egenskaber paa forskellig Vis:

- 1) Leret overgaar fra den plastiske Tilstand (taget i udvidet Betydning) til den faste Form.
- 2) Lerets Evne til at formindske sit Volumen ophører.
- 3) Kurven skifter Retning, idet Prøvens Fasthed fra Omslagspunktet forbliver konstant indenfor et forholdsvis stort Interval af Vandprocenter. Omslagspunktet danner derfor et udpræget Knæ paa Kurven og deler denne i to Grene.

Da Omslagspunktet saaledes har overordentlig stor Betydning, og da SIMON JOHANSSON yderligere forhøjer denne ved at foreslaa, at man som sammenlignende Karakterer for Lerarternes Kohætion bør benytte de paagældende Prøvers Kohætion netop ved Omslagspunktet, saa vilde det naturligvis være i høj Grad ønskeligt, om Punktet lod sig direkte bestemme, i Stedet for at hele Kurven først skal fastlægges. ARON<sup>1)</sup> har foreslaaet en meget enkel Fremgangsmaade. Han formede Prismen ved et vist Vandindhold og forsynede disse med Tværstriber, hvis indbyrdes Afstand han maalte; derpaa henstillede han Prismen til Tørring og maalte Tid efter anden Afstanden mellem Striberne; naar denne ikke længere formindskedes, bestemte han Prismens Vandprocent, der da i Følge hans Anskuelse angav Svindgrænsen. ATTERBERG har arbejdet med denne Metode; ogsaa FROSTERUS benytter den, idet han gaar ud fra en nærmere defineret Normalkonsistens for Lerarterne og derpaa ved Hjælp af ARONS Metode beregner Svindgrænsen. Vandprocentdifferensen mellem Normalkonsistens og Svindgrænse, anses af FROSTERUS<sup>2)</sup> for at kunne danne et Grundlag for humusfri Jordarters Klassifikation.

<sup>1)</sup> C. BISCHOF: Die feuerfeste Tone, 2. Aufl. Leipzig 1895. S. 27.

<sup>2)</sup> La Pédologie Nr. 4. Saint-Petersbourg 1912. S. 25.

SIMON JOHANSSON finder ikke denne Metode nøjagtig nok og bestemmer derfor Omslagspunktet (Svindgrænsen) ad anden Vej.

Til Forsøget anvender han et med Kviksølv fyldt Pyknometer, hvis Vægt han kender, samt en Lerklump (6—7 cm i Tværsnit) med et vist Vandindhold. Leret presses ned i Pyknometret, hvilket bevirker, at det til Lerklumpen svarende Kvantum Kviksølv flyder ud af Pyknometrets Munding. (Da Kviksølvet har negative Kapillaritetskonstanter, trænger det ikke ind i Lerets Porer). Lerklumpen tages op, og Pyknometret med det tilbageblevne Kviksølv vejes paany; Differensen angiver Lerprøvens Volumen ved det bestemte Vandindhold. Forsøget gentages med samme Lerklump, blot med mindre Vandindhold, der bestemmes gennem Lerets Vægttab; Metoden giver yderst tilfredsstillende Resultater. SIMON JOHANSSON fandt f. Eks. for Prøve 161 (meget fedt Ler) følgende:

Vandprocent	Volumen
28,1	4,83
24,3	4,54
20,4	4,24
16,9	3,99
12,3	3,94
9,4	3,93
3,9	3,92
2,8	3,97
2,4	3,96
0	3,95

Denne Prøves Svindgrænse maa ligge mellem 20,4—16,9% Vand, thi derefter bliver Volumet næsten konstant til Trods for, at Vandprocenten synker. Ved at betragte Prøvens Fasthedskurve (Fig. 5) ser man, at Knæpunktet ligger ved c. 17%. Disse to Bestemmelser af Omslagspunktet, foretaget ved vidt forskellige Metoder viser saaledes god Overensstemmelse; det samme var Tilfældet ved SIMON JOHANSSONS øvrige Forsøg.

Vandprocenten ved Omslagspunktet giver i Følge samme Forfatter et Fingerpeg med Hensyn til Lerets Porevolumen, idet alt Vandet i Prøven ved dette Punkt er til Stede som Porevand. Man faar saaledes her et Supplement til den mekaniske Analyse. Ligger Omslagspunktet f. Eks. ved unormal lav Vandprocent i Forhold til det ved Slæmmeanalysen fundne »Lerindhold« ( $< 0,002$  mm), saa betyder det, at dette Ler er overordentlig fint og har en Kornstørrelse omkring  $0,6 \mu$ , og man kan derved undgaa at foretage den besværlige Slæmmeanalyse med 64 Timers Slæmetid.



### Den faste Tilstand.

Ved Omslagspunktet indtræder Lerarterne i den faste Tilstand, hvilken kendetegnes ved, at Partiklerne er ubevægelige i Forhold til hverandre. Denne Del af Fasthedskurven svarer til van BEMMELENS Kurvestykker  $A_{\alpha\beta}$  og  $A_{\alpha}$ ; ligesom disse forløber den først i næsten horizontal Retning fra Omslagspunktet for dernæst at stige stejlt til Skæring med Y-Aksen.

Det ligger i Sagens Natur, at jo mindre Porevolumet er, desto større er den Del af Lerets Porevand, det er underkastet Partiklernes Tiltrækningskraft, saaledes at det fri Vand i Porerne udgør en forholdsvis ringe Part af den Vandprocent, som Omslagspunktet angiver; derfor bliver den horizontale Del af Kurven kortere, jo mere finkornet Lerprøven er (se Fig. 5). Saaledes angiver HALL<sup>1)</sup>, at i en Lerart, hvis Partikler alle er  $0,2 \mu$  og derunder, findes der overhovedet intet frit Porevand; det er dog ikke sandsynligt, at saa svære Lerarter eksisterer, og paa samtlige Kurver paa SIMON JOHANSSONS Tavler findes den horizontale Del da ogsaa i større eller mindre Udstrækning<sup>2)</sup>.

Den stærke Stigning i Fasthedskurven, der ganske svarer til van BEMMELENS  $A_{\alpha}$  Kurves bratte Fald, er det ikke let at finde tilfredsstillende Forklaring paa, da Lerets Volumen paa dette Tidspunkt er helt eller delvis konstant; hvad det er, der bevirker denne stærke Forøgelse af Lerets Fasthed, er derfor stadig et aabent Spørgsmaal.

<sup>1)</sup> SIMON JOHANSSON: l. c. S. 79.

<sup>2)</sup> Der har desværre endnu ikke været Lejlighed til at foretage disse Forsøg med danske Lerarter, da ATTERBERGS Apparater hidtil ikke er benyttede herhjemme. Forhaabentlig vil der snart blive Lejlighed til at foretage Fasthedsbestemmelser efter ATTERBERGS—S. JOHANSSONS Principer med vort tertiære plastiske Ler, thi med denne Lerart formoder jeg, at man vil opnaa at faa reduceret Kurvens horizontale Del til et rent Minimum, idet det plastiske Lers Kornstørrelse er meget nær ved at opfylde det af HALL stillede Krav (samtlige Korn  $< 0,0002$  mm).

## De geotekniske Undersøgelser.

Som nævnt i de foregaaende Kapitler var ATTERBERGS Metoder oprindelig udarbejdede som Støtte for Agronomien og derfor først og fremmest praktiske og lette at udføre. SIMON JOHANSSON har underbygget dem videnskabeligt ved sin Undersøgelse af Lerets Fasthedskurve, ved Opdagelsen af dennes Lighed med van BEMMELENS Kurve, og ved Paavisningen af Omslagspunktets grafiske og teoretiske Betydning; men ogsaa SIMON JOHANSSONS Undersøgelser var oprindelig tiltænkt Agrogeologien, selv om Resultaterne gav saa omfattende Oplysninger om Lerets fysiske Egenskaber, at de maatte paa kalde Interesse ogsaa uden for Agrogeologernes Kreds.

SIMON JOHANSSONS i det foregaaende saa ofte citerede Afhandling udkom i 1914. Samme Aar indtraf en Begivenhed, der bidrog til at gøre Undersøgelsen af Lerets fysiske Egenskaber særlig aktuel, idet de mange Dæmningsskred og andre Funderingsuheld i Sverige bevirkede Dannelsen af en geoteknisk Kommission, hvis Opgave det var at undersøge Aarsagerne til de indtrufne Katastrofer og udfinde Muligheder for at forebygge lignende Ulykker i Fremtiden<sup>1)</sup>—

Arbejdet med Løsningen af Opgavens første Del viste med stor Tydelighed, at det Gang paa Gang var Undergrundens svigtende Bæreevne, der havde foraarsaget Bygningsværkernes Sammenbrud; da dette imidlertid indirekte betød utilfredsstillende Kendskab til samme Undergrunds fysiske Egenskaber, maatte Opgavens anden Del nødvendigvis løses gennem Forsøg paa at lære disse Egenskaber at kende i videst mulig Udstrækning. Denne nye Retning indenfor Jordbundsundersøgelsen, Geotekniken, hviler saaledes paa et Samarbejde mellem den geologiske (agrogeologiske) Videnskab i saa stor Udstrækning, som denne beskæftiger sig med Jordarternes Lejringsforhold samt deres fysiske, kemiske og mekaniske Egenskaber, og

<sup>1)</sup> Statens Järnvägars geotekniska Kommission 1914—22. Slutbetänkande. Stockholm 1922.



Ingeniørvidenskaben, der er nødvendig, for at man kan overføre Resultaterne i Praksis og samarbejde dem med de gennem Tiderne indhøstede Erfaringer angaaende Jordarternes Bæreevne. Til disse Formaal fandt man naturligvis udmærket Støtte i ATTERBERGS og SIMON JOHANSSONS Undersøgelser; dog foretrak Kommissionen af rent praktiske Grunde delvis at erstatte ATTERBERGS Apparat til Bestemmelse af Jordarternes Sejghed med et hurtigere arbejdende, og Valget faldt paa det nedenfor beskrevne »koniske Apparat«. Dette er, mig bekendt, det eneste Kohæsiionsapparat, der hidtil har fundet Vej til Danmark, hvor det i de sidste Par Aar er blevet stærkt benyttet ved Danmarks geologiske Undersøgelse; jeg skal derfor i det følgende gøre det til Genstand for en mere indgaaende Beskrivelse, samt gøre opmærksom paa Metodens Fordele og Mangler.

## Det koniske Apparat.

Fremgangsmaaden ved Benyttelsen af det koniske Apparat (Fig. 8) er følgende: Den Jordprøve, der ønskes undersøgt, æltes omhyggeligt, til den danner en fuldstændig homogen, svagt plastisk Masse (Sten, Konkretioner og lign. fjernes under Æltningen). Saafremt Prøven ikke lader sig bearbejde ved sit naturlige Vandindhold, tilsættes lidt destilleret Vand. Derpaa fyldes Glasskaalen med Leret, saaledes at dets Overflade staar glat og plan paa Højde med Skaalens Rand. Keglen, der vejer 60 gr og har en Spidsvinkel paa  $60^{\circ}$ , indstilles da saaledes, at dens Spids netop berører Lerets Overflade. Ved Hjælp af en Fjeder udløses Keglen derpaa af sin Hvilestilling, og den borer sig øjeblikkelig — paa Grund af sin Vægt — et Stykke ned i Leret. Nedsynkningen aflæses direkte paa Stilkens Inddelingsskala. Forsøget gentages 3—4 Gange, og den endelige Bestemmelse af Nedsynkningen sker ved, at man tager Middeltallet af de aflæste Resultater. Hvis Prøven er tilstrækkelig godt æltet, beløber Afgivelserne fra Middeltallet sig sjældent til mere end 0,1—0,3 mm. Naar Keglen Nedsynkning i Leret er endelig fastslaaet, foretages en Bestemmelse af Lerets Vandprocent.

Dernæst æltes mere Vand ind i Lermassen, og Forsøget gentages; Keglen vil denne Gang synke lidt dybere, da Leret nu er blevet blødere; naar Nedsynkningen er fastslaaet, bestemmes det nye Vandindhold. Saaledes fortsættes Forsøget under stadig Tilsætning af destilleret Vand til Lermassen, fra det Punkt, hvor Lerets Konsistens er paa Grænsen mellem stiv og plastisk, og videre gennem det plastiske

Stadium til Skellet mellem dette og den flydende Tilstand. Der tages under Forsøget 4—5 Bestemmelser ved forskellige Vandindhold af Keglens Nedsynkning i Leret og af de tilsvarende Vandprocenter.

Afsætter man nu i et Koordinatsystem 60 gr Keglens Nedsynkninger som Ordinater og de tilsvarende Vandprocenter som Abscisser,

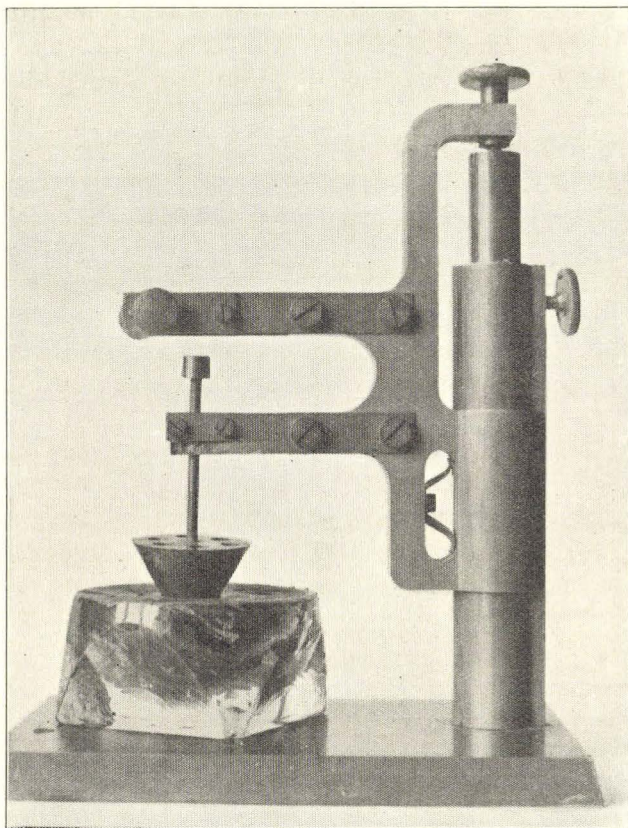


Fig. 8. Det koniske Apparat.

bliver Resultatet en Kurve, der angiver Lerets Modstand mod Keglens Nedsynkning ved de forskellige Vandprocenter (se Fig. 9a). Imidlertid har det vist sig, at denne Kurve ikke giver et fuldt tilfredsstillende Billede af Forsøgets Forløb, thi ad anden Vej er man blevet klar over, at er Leret fast eller nogenlunde fast, betyder det overordentlig meget for dets Konsistens, om det har en Vandprocent, der tillader en Nedsynkning af 60 gr Keglen paa 2 mm, eller om Vandprocenten er blot saa meget højere, at Keglen synker f. Eks. 3 mm ned i Leret.



Er Leret derimod ret blødt, betyder det ikke stort for dets Konsistens, om Keglen synker en Millimeter mere eller mindre<sup>1)</sup>.

Dette Forhold fremgaar ikke af de omtalte Kurvers Form, idet hver Millimeters Nedsynkning her tæller lige meget, hvad enten den ligger ved lave eller høje Vandprocenter. Da det imidlertid var af stor Interesse at faa Lerets Konsistenskurve saa fintmærkende som muligt, ønskede de svenske Geoteknikere, hvem man skylder alle de grundlæggende Undersøgelser af denne Metode, en Ændring af den

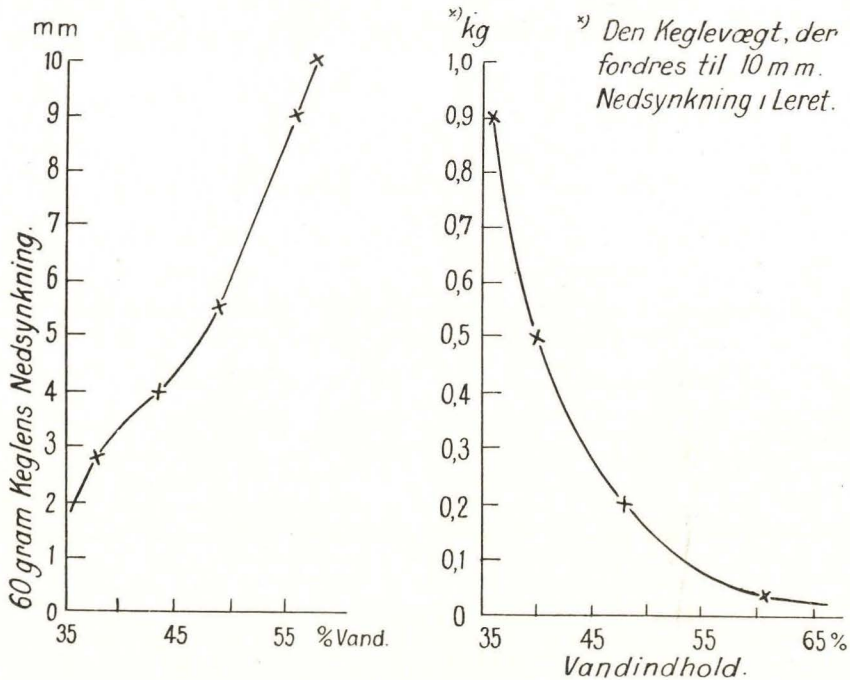


Fig. 9 a og b.

To forskellige grafiske Fremstillinger af samme Forsøgsresultat.

grafiske Fremstilling. I den Hensigt fastslog de gennem talrige Forsøg, hvor stærkt Keglen skulde belastes for at synke 10 mm ned i Leret ved de Vandprocenter, ved hvilke 60 gr Kegglens Nedsynkning var kendt. Tabellen S. 42 og Kurven (Fig. 10) over de opnaede Resultater viser bedst, hvor paakrævet en saadan Undersøgelse var.

<sup>1)</sup> Denne Forskel paa Lerets Konsistens ved selv ringe Forhøjelse af Vandprocenten indenfor det faste Omraade er saa tydelig, at man med lidt Øvelse allerede ved Æltningen af Leret er klar over, om Kegglens Nedsynkning vil blive c. 2 mm eller c. 3 mm ved den paagældende Vandprocent; derimod kan man ikke af Lerets Konsistens ved højere Vandprocenter før Aflæsningen skønne, om Resultatet vil blive f. Eks. 10 mm eller 13—14 mm.

60 gr Keglens Nedsynkning <sup>1)</sup> ved stigende Vandprocenter	Den Keglevægt, der kræves til 10 mm Nedsynkning i samme Prøve
2,0 mm .....	1200 gr
3,0 — .....	609 -
4,0 — .....	345 -
5,0 — .....	219 -
6,0 — .....	160,7 -
7,0 — .....	118,1 -
8,0 — .....	92,5 -
9,0 — .....	73,4 -
10,0 — .....	60,0 -
11,0 — .....	49,5 -
12,0 — .....	41,6 -

Den Ændring i Lerets Konsistens, der bevirker Stigningen i 60 gr Keglens Nedsynkning fra 2 mm til 3 mm, er altsaa saa betydelig, at den Keglevægt, der kræves til 10 mm Nedsynkning, derved ned-

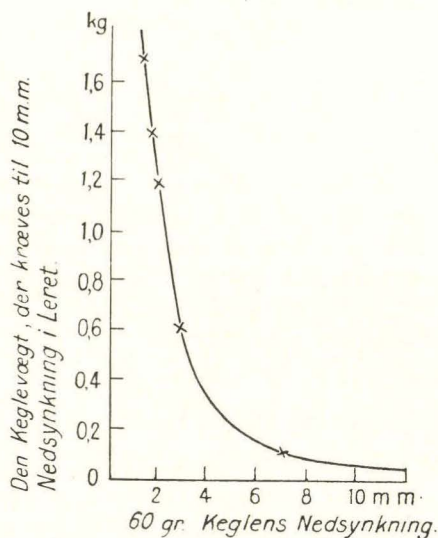


Fig. 10.

Abscissen angiver. Paa Fig. 9b ses en saadan Kurve fremstillet, hvor Abscissen angiver Prøvens Vandprocent udtrykt som Vægtprocent af Totalsubstans<sup>2)</sup> (Ler + Vand).

<sup>1)</sup> For at undgaa at arbejde med saa smaa Nedsynkninger anvendes tungere Kegler, saalænge Leret er forholdsvis fast.

<sup>2)</sup> De svenske Geoteknikere foretrækker at benytte Vægtprocent af Tørsustans ved Kurvetegningen.



## Geotekniske Forsøgsresultater.

Selv om den grafiske Fremstilling af Forsøgsresultaterne altid maa anses for at være den mest tilfredsstillende, saa gives der dog Tilfælde, hvor et talmæssigt Udtryk for Forsøget er at foretrække, i Særdeleshed naar Talen er om Sammenligningsforsøg mellem en Del forskellige Jordprøver. Der er derfor ogsaa fra de svenske Geoteknikeres Side lagt særlig Vægt paa at finde et eller andet talmæssigt Udtryk for en Lerprøves Konsistens.

Opgaven er løst paa forskellig Vis, hvilket ogsaa var at vente, da de Krav, der maa stilles til en saadan Karakterskala, afhænger af, i hvilken Hensigt Forsøget er foretaget, om det — som i de fleste Tilfælde — er for at opnaa et Grundlag for Bedømmelsen af Lerets Værdi som Funderingsbasis, eller om det drejer det sig om Forsøg af mere videnskabelig Art til Brug for Studiet af Lerets varierende fysiske Egenskaber.

I Sverige har begge Forsøgsretninger gjort sig gældende, og ogsaa her i Landet maa man, som det senere skal ses, stedse lempe Forsøgets Gang og Tydningen af Resultaterne i Overensstemmelse med Formaalet.

### De svenske Forsøgskarakterer.

Hvad nu først og fremmest angaar de svenske geotekniske Undersøgelser, da er de hovedsagelig anlagt med praktisk Formaal for Øje, og man har derfor tilstræbt den mest enkle Form for saavel Forsøg som Resultater.

For den geotekniske Kommission drejede det sig om Undersøgelser af Tusindvis af Prøver, og hvert Forsøg maatte som Følge heraf foretages paa den mindst mulige Tid. I Stedet for Kurvetegningen, der er af nyere Dato, foretog man derfor kun et eller et Par Bestemmelser af Keglens Nedsynkning i Leret, hvorefter man ved Hjælp af Tabeller — opbyggede paa Grundlag af talrige Forsøg — direkte beregnede den Vandmængde, Prøven skulde bibringes for at betinge en Nedsynkning paa 10 mm af 60 gr Keglen, eller — udtrykt grafisk — Abscissen til det Punkt paa Kurven, der har Ordinaten 60. Den fundne Karakter kaldtes Prøvens Finhedstal («Finlekstal»).

Til Fordel for denne Metode kan fremføres, at den er hurtig og derfor praktisk, samt at Karakteren udtrykker en Vandprocent, og saaledes lader sig direkte sammenligne med Prøvens oprindelige Vandindhold. Men for at kunne bestemme det nævnte Punkt paa Kurven

ud fra et enkelt Forsøg har man været nødsaget til at dele Jordarterne i Grupper efter deres Lerindhold og indføre en Middelkurve for hver Gruppe. Systemet udelukker saaledes de finere Nuancer inden for de forskellige Grupperes Lerarter; desuden forekommer det mig uheldigt, at Karakteren falder indenfor den Del af Kurven, hvis Abscisser kun i de færreste Tilfælde svarer til Lerets naturlige Vandprocenter; denne sidste Indvending gælder jo imidlertid kun Valget af den for Karaktererne fælles Ordinats (60), ikke Forsøgsmetoden som Helhed; denne er sikkert — naar det drejer sig om saa store Antal Prøver — en i Praksis tilfredsstillende Hjælp til Bestemmelse af Jordarternes relative Kohæsion.

Til de mere teoretiske Laboratorieforsøg egner ovennævnte Finhedstal sig imidlertid ikke; dertil siger det for lidt om hver enkelt Prøves Konsistens. Sveriges geologiska Undersökning, der gennem Dr. SIMON JOHANSSON og hans Medarbejder Dr. G. EKSTRÖM har haft intimt Samarbejde med den geotekniske Kommission, foretrækker derfor, saa snart det drejer sig om en mere indgaaende Undersøgelse af en eller flere Prøver, en anden Form for Karaktergivning. Forsøget udføres ganske som beskrevet S. 39; der foretages altsaa 4—5 Bestemmelser af Keglens Nedsynkning ved forskelligt Vandindhold, og Kurven tegnes. Kurven karakteriseres dernæst talmæssigt ved Differensen mellem den Vandprocent, der svarer til Ordinatsen 600 og den, der svarer til Ordinatsen 60 («Vandprocentdifferensen»).

I denne Karakter indgaar saaledes Kurvens Form, idet Vandprocentdifferensen bliver større, jo større Kurvens Hældning er; derimod indgaar ikke Kurvens Beliggenhed i Koordinatsystemet, thi parallelle Kurver vil faa samme Karakter. Dette sidste Forhold i Forbindelse med den Omstændighed, at Karakteren udtrykker et Interval, forekommer mig at indskrænke omtalte Karakters Betydning, idet det forringer Muligheden for at sammenligne Forsøgs-karakteren med Prøvens Konsistens ved den naturlige Vandprocent. De to Ciffre, som indgaar i Karakteren: Vandprocenten ved Ordinats 600 og Vandprocenten ved Ordinats 60 svarer omtrent til ATTERBERGS Plasticitetsgrænser (se S. 18), dog ligger Udrulningsgrænsen ved lavere Vandprocent end den, der svarer til Ordinats 600.

Som man vil se, minder «Vandprocentdifferensen» en Del om det ATTERBERGSKE Plasticitetstal, de to Karakterers Ulemper og Fordele er i hvert Tilfælde ganske overensstemmende.



## De danske Forsøgsresultater.

Da Danmarks geologiske Undersøgelse i 1922 paabegyndte sine Forsøg over Lerets Konsistens efter de svenske Principper, altsaa med Benyttelse af Kegelapparatet, var det egentlig ikke paatænkt hermed at iværksætte geotekniske Undersøgelser af danske Lerarter. Apparatet blev kun anskaffet for gennem disse Forsøg at faa et yderligere Hjælpemiddel til at bestemme og sammenligne Lerarter fra forskellige geologiske Perioder, navnlig Prøver fra Lag uden eller med mangelfuldt Forsteningsmateriale. I Danmarks geologiske Undersøgelses Borearkiv træffer man ofte Betegnelsen »stenfrit Ler uden Forsteninger. Alder?«, en Etikette, der naturligvis svækker Boringens geologiske Værdi. Hidtil har man kun haft Slæmningen at holde sig til ved saadanne Prøver, men foruden de rent praktiske Ulemper ved Slæmmemetoden, bl. a. dens Langsomhed, giver Bestemmelsen af en Lerprøves Kornstørrelse som tidligere nævnt ikke saa godt et Billede af Prøven, at ikke yderligere Hjælpemidler nok kan tiltrænges. I Haab om at finde et saadant i Lerets Konsistenskurver paabegyndte jeg derfor efter Opfordring af Direktør, Dr. VICTOR MADSEN en Række Bestemmelser af danske Lerarters Konsistens. Opgaven havde saaledes oprindelig kun geologisk Interesse, idet dens Maal var en Sammenligning mellem de forskellige Konsistenskurvers Form og Beliggenhed uden Forsøg paa deraf at drage videre Slutning om Lerarternes forskellige Værdi som Basis for Ingeniørarbejder.

Imidlertid ændredes denne Plan ved en Anmodning fra De danske Statsbaner til Danmarks geologiske Undersøgelse om at benytte det geotekniske Apparat til en Undersøgelse efter de svenske Principper af Bundprøver fra Lillebælt og senere fra Alssund. Da Danmarks geologiske Undersøgelse gik ind paa at foretage Bestemmelserne af paagældende Lerarters Konsistens ved Hjælp af Kegelapparatet, maatte den rent teoretiske Side af Sagen delvis vige Pladsen for den praktiske.

De danske Statsbaner udtog c. 300 Prøver ved de to Serier Boringer, og disse blev tilsendt Danmarks geologiske Undersøgelse. Hver Prøve var umiddelbart efter Udtagelsen blevet befriet for sit yderste Jordlag, der eventuelt kunde indeholde Forureninger, dernæst var Prøven blevet anbragt i en Glasflaske, hvis Prop man parafinerede; der var saaledes lagt størst mulig Vægt paa, at Prøven ved Ankomsten til Danmarks geologiske Undersøgelse havde sit naturlige Vandindhold. Ankommen hertil foretog Kemiker cand. polyt. JOHS. ANDERSEN Bestemmelse af Vand og Kalk i Prøverne, hvorefter jeg udførte Forsøgene med Kegelapparatet.

Kurverne blev optegnet paa Grundlag af 4—5 Bestemmelser af Kegleens Nedsynkning ved forskellige Vandindhold. Da Hovedparten af Prøverne fra Lillebælt bestod af det eocæne (paleocæne?) plastiske Ler<sup>1)</sup>, og Hovedparten af Prøverne fra Alssund af Moræneler, varierede Kurvernes Beliggenhed indenfor hver af de to Serier selvsagt ikke stærkt.

### Betydningen af Kurvernes Form og Beliggenhed.

Paa Fig. 11 a S. 48 er fremstillet et Koordinatsystem, hvori der er indtegnet Kurverne for forskellige Lerarter, undersøgt efter den her beskrevne Metode. Af Figuren fremgaar klart det allerede af ATTERBERG påpegede Forhold, at bibringes forskellige Lerarter ved kunstig Tilsætning en og samme Vandprocent, da vil der ved denne være stor Forskel paa Lerarternes Konsistens. Betragter man f. Eks. de forskellige Lerprøvers Kurver ved Vandprocenten 30, vil det ses, at der ved denne kræves følgende vidt forskellige Keglevægte til 10 mm Nedsynkning i Prøverne:

Plastisk Ler (Lillebælt) .....	> 2000	gr
Argile plastique .....	c. 1700	—
London clay .....	- 325	—
Paleocænt Ler (Kjøbenhavn) .....	- 250	—
Moræneler (Alssund) .....	< 10	—

Det plastiske Lillebæltssler er altsaa ved denne Vandprocent forholdsvist fast, Moræneleret praktisk talt flydende. Ønsker man omvendt at faa et Overblik over, hvilke Vandprocenter Prøverne er i Besiddelse af, naar de yder samme Modstand overfor Kegleens Indsynkning, f. Eks. de Vandprocenter, ved hvilke 900 gr Keglen synker 10 mm ned i Prøverne, faar man nedenstaaende Resultat:

Humushold. Ler (Alssund) ..	c. 43 %	(af Totalsubst.)
Plastisk Ler (Lillebælt) ....	- 38	- - -
Argile plastique .....	- 33	- - -
London clay .....	- 26	- - -
Paleocænt Ler (Kjøbenhavn) -	24	- - -
Moræneler (Alssund) .....	- 15	- - -

Naar Lillebæltssleret og Moræneleret har den Konsistens, der betegner en Keglevægt paa 900 gr for 10 mm Nedsynkning, indeholder Lillebæltssleret altsaa c. 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Gange saa høj en Vandprocent som Moræneleret; det er derfor kun ved Bedømmelsen af Prøver

<sup>1)</sup> De danske Statsbaner har for denne Lerart benyttet Betegnelsen Lillebæltssler; da dette Navn ogsaa tidligere er blevet knyttet til samme Lerart, (se herom POUL HARDER: Om Grænsen mellem Saltholmskalk og Lellinge Grønsand. D. G. U. II. Række Nr. 38. S. 69), vil det ogsaa blive anvendt i den følgende Omtale af Forsøgsresultaterne.



stammende fra samme Lag, at Vandindholdet alene kan give et Fingerpeg angaaende paagældende Prøvers relative Fasthed.

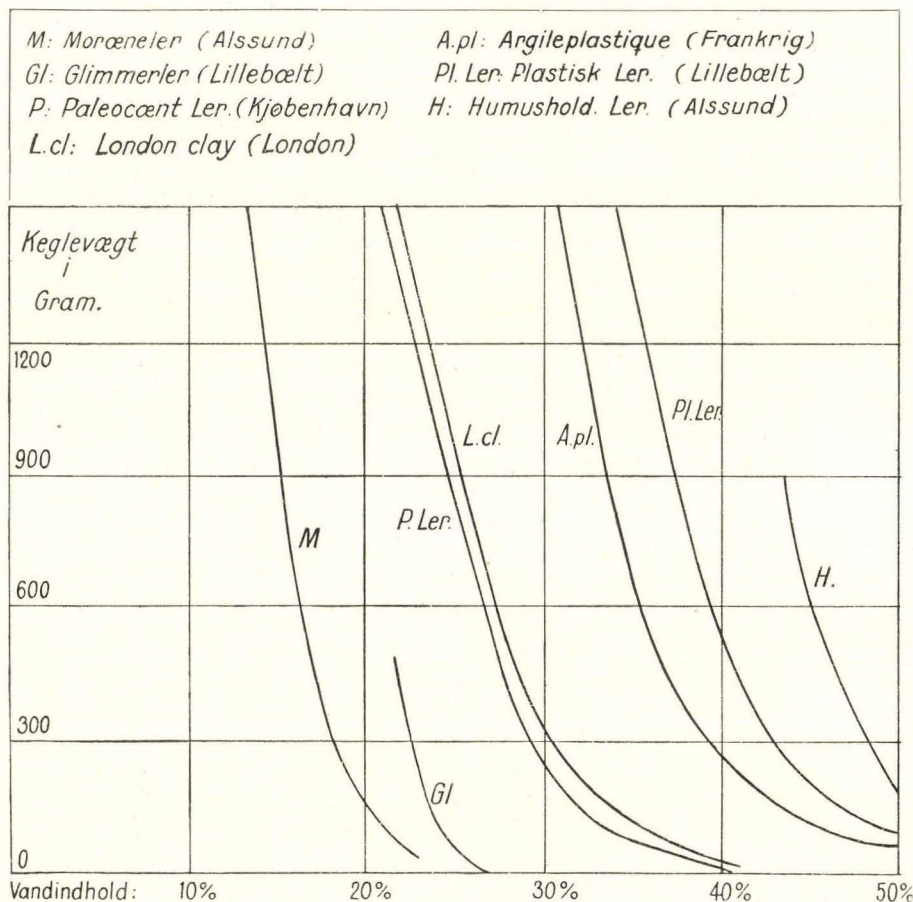
Af Figuren fremgaar det endvidere, at jo længere en Prøves Kurve ligger til højre i Koordinatsystemet, jo mere Vand skal der indælttes i Prøven for at svække dens Modstand mod Keglens Ned-synkning, og jo mindre Rolle spiller Variationer indenfor Vandprocenterne. Medens saaledes hele Faldet i Morænelerets Modstandskurve fra Ordinat 900 til Ordinat 300 ligger indenfor en Vandprocentdifferens paa 3 (15 %—18 %), saa er Differensen mellem de til samme Ordinator svarende Vandprocenter c. 6 for Lillebæltserets Vedkommende.

Om en Prøves Kurve faar sin Plads fjernere eller nærmere Ordinataksen, afhænger af flere Forhold og er ikke altid let at afgøre paa Forhaand; dog kan man være sikker paa, at svampede Tørveprøver og meget fede Lerprøver (f. Eks. Lillebæltser) har deres Kurver liggende længst til højre, de meget magre Lerarter derimod længst til venstre. Men lige saa lidt som en Prøves Vandprocent er tilstrækkeligt Grundlag for en Bedømmelse af dens Fasthed, lige saa lidt kan man — og det maa udtrykkeligt paapeges — af Kurvernes Beliggenhed i Koordinatsystemet afgøre, om den ene Lerart i naturlig Aflejring er fastere end den anden. Thi ganske vist skal f. Eks. det plastiske Ler være i Besiddelse af en særlig høj Vandprocent for at miste sin Kohæsi on, men det er ogsaa i Besiddelse af en langt større Vandsugningsevne end de magre Lerarter (se herom S. 52), og den Omstændighed, at Moræneleret, der er velkendt som tilfredsstillende fast Grundlag for Ingeniørarbejder o. l. har sin Kurve liggende saa tæt ved Ordinataksen, medens det i den Hensende ganske uanvendelige Humusler ligger længst til højre, kan vel for stedse forhindre Forsøg paa alene gennem Kurvernes Beliggenhed at vurdere Jordarternes indbyrdes Fasthed.

Hvad ingen af de to Faktorer, Prøvens Vandprocent og dens Konsistenskurve, er i Stand til at udrette ene, opnaas imidlertid ved at benytte begge i Forening, idet man derved, som det skal ses i det følgende, kan skaffe sig et godt Grundlag for Bedømmelsen af Lerarternes relative Kohæsi on.

Ved Undersøgelsen af De danske Statsbaners Prøver gjaldt det særligt om at tage det størst mulige Hensyn til de Faktorer, der har praktisk Betydning; det nyttede saaledes ikke at fremstille en Middelskurve for hvert af Jordlagene med tilhørende Middelvandprocent, thi da Forsøgene kun har Værdi i Praksis som relative Fasthedsbestemmelser, var det ønskeligt, at faa konstateret Prøvernes relative Fasthed indenfor de enkelte Lag, altsaa netop Afvigelserne fra Nor-

malprøven for Laget. Ligeledes havde det naturligvis nok nogen Interesse at konstatere Lerets Egenskaber ved forskelligt, kunstigt frembragt Vandindhold, men Hovedvægten maatte dog lægges paa en Redegørelse for Prøvens Konsistens ved det Vandindhold, der havde Betydning for Teknikerne, nemlig det naturlige.



Paa dette Punkt slog hverken »Finhedstallet« eller »Vandprocentdifferensen« til (se Definitionerne af disse S. 43 og 44), og heller ikke Kurvens Beliggenhed i Forhold til Normalkurven for Laget var, som nævnt ovenfor, tilstrækkelig til at belyse Jordarternes relative Fasthed: thi hvad kan det nytte, at en Prøve som den, hvis Kurve er afbildet Fig. 13a, S. 53, har sin Kurve liggende længere til højre i Koordinatsystemet end Normalkurven, og har større Finhedstal og større Vandprocentdifferens end denne, naar Prøvens naturlige Vandprocent af en eller anden maaske tilfældig Aarsag er saa høj, at den



tillader en Kegel paa kun 850 gr at synke 10 mm ned i Leret, medens Normalprøven kræver en Kegelbelastning paa c. 2000 gr til den samme Nedsynkning ved Normalvandprocenten.

For at faa indført Lerets naturlige Vandprocent som Faktor i Lerets Konsistenskarakter, definerede vi derfor et Konsistenstal<sup>1)</sup>, idet vi som Karakter for hver enkelt Prøve angiver den Keglevægt, der

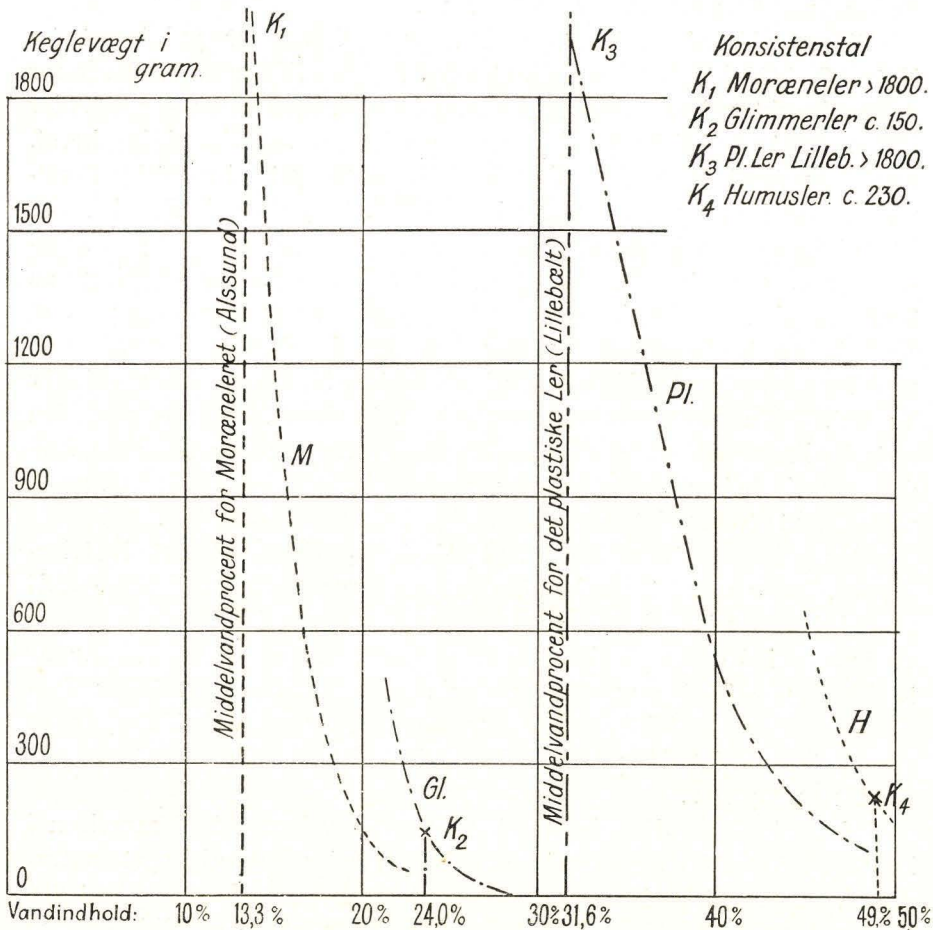


Fig. 11 b. Konsistenskurver, hvor den naturlige Vandprocent er indtegnet.

<sup>1)</sup> I Beretningen til de danske Statsbaner har jeg desværre benyttet Navnet Plasticitetstal uden at erindre, at dette allerede var beslaglagt af ATTERBERG i en anden Betydning (se herom S. 14). I Ingeniør S. BRANNOVS Artikel om »Forarbejderne til Lillebæltsbroen«, Ingeniøren 1925, Nr. 4, i hvilken Afsnittet om Prøvernes Undersøgelse er skrevet paa Grundlag af Danmarks geologiske Undersøgelser Beretning, er Udtrykket »Plasticitetstal« derfor benyttet i den danske Definition. Forhaabentlig vil Betegnelsen blive begrænset til denne ene Publication, idet jeg — saasnt jeg blev klar over den dobbelte Benyttelse af Ordet — erstattede det med »Konsistenstal«.

kræves til 10 mm Nedsynkning i Prøven, ved dennes naturlige Vandprocent, eller, grafisk fremstillet: Ordinaten til det Punkt paa Kurven, hvis Abscisse angiver Prøvens naturlige Vandprocent. Medens »Finhedstallet« og »Vandprocentdifferensen« indeholder konstante Ordinater (henholdsvis 60, 600 og 60), varierer det danske Konsistenstal saaledes baade for Ordinaternes og Abscissens Vedkommende med hver enkelt Prøve.

Skønt »Konsistenstallet« som nævnt allerede er publiceret (se Noten S. 49), skal jeg dog med et Par Ord gøre lidt nærmere Rede for denne Karakters Fordele og Mangler, dels fordi Rammerne for Ingeniør BRANNOVS Artikel ikke tillod nogen mere indgaaende Udredning heraf, men især fordi denne Karakter foreløbig er benyttet i samtlige Beretninger fra Danmarks geologiske Undersøgelse til De danske Statsbaner og vel ogsaa vil blive anvendt ved fremtidige nye Undersøgelser, saafremt man ikke forinden finder en bedre Løsning paa Spørgsmaalet. Lad mig først og fremmest gøre opmærksom paa, at Konsistenstallet, der angiver den æltede Prøves Konsistens ved Prøvens naturlige Vandindhold, altid kun har relativ Værdi, thi nogen Omsætningsformel fra Keglens Nedsynkning i den æltede Prøve til den uæltede Prøves Fasthed er endnu ikke funden, og vil heller ikke, ifølge nyere Undersøgelser af CALDENIUS<sup>1)</sup>, være let at finde, idet flere forskellige Forhold spiller ind.

Man kan altsaa ikke ved Hjælp af Konsistenstallet beregne, hvor meget en Jordart kan bære; men det har Værdi som Hjælpemiddel ved Bedømmelsen af hvilke Prøver, der er svage i Forhold til det normale Ler, og hvilke, der er forholdsvis faste; med andre Ord: Konsistenstallet erstatter Teknikerens ofte subjektive Bedømmelse af Prøven ved Udtagningen med et talmæssigt Udtryk for Prøvens Konsistens i Forhold til Lagets Gennemsnitsprøve.

Naturligvis er Konsistenstallet lige saa vel som Bedømmelsen i Marken beheftet med den Usikkerhed, som Svingninger i Lagets naturlige Vandprocent bevirker, idet det kun har Prøvens Vandprocent ved Modtagelsen at støtte sig til. Karakteren er derfor paalideligst, jo større Vinkel Kurven danner med Ordinataksen, idet smaa Svingninger i Vandprocenten da ikke kommer til at spille saa stor en Rolle (se Fig. 11 b, S. 49). Paa Grund af ovenstaaende egner det sig bedst til en relativ Bedømmelse af Prøver fra samme Lerart; dog kan det ogsaa have Værdi, naar man har Lejlighed til gennem et stort Antal Prøver fra to forskellige Lag at danne sig et Begreb om de

<sup>1)</sup> C. CIZON CALDENIUS: Bidrag till kännedomen om relationen mellan markbeskaffenhet och markbärighet, etc. Ingeniørsvetenskapsakademiens Hdl. Nr. 42. Stockholm 1925.



paagældende Lags Middelkurver og Middelvandprocenter, der da kan danne Grundlaget for en Sammenligning mellem Lagene.

Paa Fig. 11 b er afbildet Kurver for de samme Lerarter: Lillebæltssler, Glimmerler og Moræneler<sup>1)</sup>, som paa Fig. 11 a samt Ordinaterne til deres Vandprocenter. Det fremgaar heraf, at det Indtryk, man faar af de paagældende Prøvers relative Kohæsion ved Betragtning af Fig. 11 a, maa ændres, idet Moræneleret ganske vist vilde have lavest Kohæsion, hvis de tre Prøver havde samme Vandprocent, men at det indenfor sit naturlige Vandprocentinterval har mindst lige saa fast en Konsistens som det plastiske Lillebæltssler ved sin Middelvandprocent og langt højere Konsistenstal end Glimmerleret<sup>2)</sup> ved sit naturlige Vandindhold.

Til Slut skal gives et Par Eksempler paa Konsistenstallets Svingninger indenfor samme Lerart (Fig. 13 a—d, S. 53) samt en Kopi af de Blanketter, som blev udfærdiget paa Foranledning af De danske Statsbaner og udfyldt paa Grundlag af Danmarks geologiske Undersøgelser Forsøgsresultater.

Samtlige Kurver paa Figuren stammer fra Undersøgelsen af det plastiske Ler fra Lillebæltss Bund.

Den til Kurven paa Fig. 13 a svarende Prøve vilde man uden at kende Vandprocenten bedømme som værende fastere end Normalprøven; den unormalt høje Vandprocent bevirker imidlertid, at den maa kaldes relativt svag, da den ved denne kun kan hindre Kegler under 850 gr Vægt i 10 mm Nedsynkning.

Fig. 13 b er et Eksempel paa det modsatte Tilfælde. Kurven er svagere end Middelkurven, men har en lav Vandprocent og faar derfor en forholdsvis god Karakter (Konsistenstal 2000).

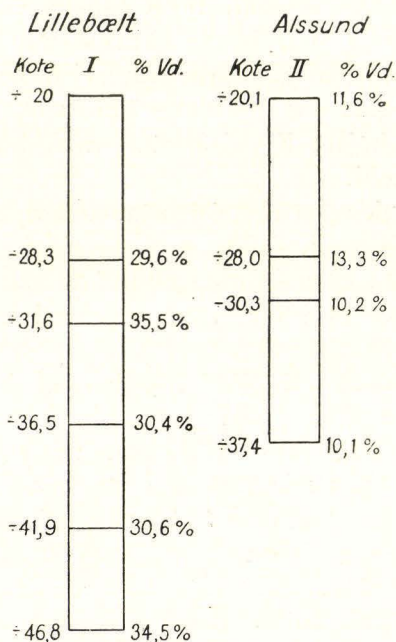
I disse to Eksempler har Vandprocent og Kurve modarbejdet hinanden, i de to næste virker de derimod begge i samme Retning. Kurven Fig. 13 c viser en Prøve, der er fast i Forhold til Normalprøven, og den relativt lave Vandprocent forstærker dette Indtryk. Kurven Fig. 13 d er derimod svagere end Normalkurven og har tilmed en høj Vandprocent, der yderligere nedsætter Karakteren.

<sup>1)</sup> Den paa Fig. 11 b angivne Kurve for Moræneleret repræsenterer paa det nærmeste Middelkurven og Middelvandprocenten for Moræneleret fra Allsund. Derimod stammede den i den omtalte Artikel i »Ingeniøren« anvendte Kurve fra en enkelt Prøve af Allsund Moræneleret, idet nævnte Artikel blev publiceret, forinden den egentlige Undersøgelse af Allsundprøverne var paabegyndt.

<sup>2)</sup> Dette Glimmerlers Kurve ligger fjernere Ordinataksen, end dets Kornstørrelse gav Grund til at formode. Aarsagen maa rimeligvis søges i Glimmerbladens Evne til at forøge Kohæsionen, naar det nødvendige Bindemiddel er til Stede.

## Lerarternes naturlige Vandindhold.

I det foregaaende er omtalt, hvor vigtigt det er at tage det fornødne Hensyn til Lerets Vandprocent under de naturlige Lejringsforhold, og det er paapeget, at disse Vandprocenter, foruden at bestemmes af de lokale ydre Forhold (Tryk, Afvandingsmuligheder o.l.), ogsaa i høj Grad er afhængige af den Lerarts fysiske Egenskaber, hvori de forekommer.



I: Profil gennem plastisk Ler

II: " " Moræneler

Fig. 12.

Profil I  
Lillebælt.

Profil II  
Alssund.

Hosstaaende 2 Profiler, der angiver de fundne Vandprocenter, — Profil I stammer fra den dybest beliggende Boring i Lillebælt, Profil II fra den dybest beliggende Boring i Alssund — viser bedst dette Forhold.

Under nogenlunde ensartede Betingelser har Lillebæltsleret indstillet sig med 29,6—35,5 % Vand, Moræneleret med c. 10,1—13,3 %. Lignende Forhold genfindes i de øvrige Boreprofiler: Lillebæltsleret indeholdt paa enkelte Undtagelser nær Vandprocenter fra 25—35 % af Totalsubstans, Moræneleret fra Alssund derimod 10—15 %.

Blandt Boreprøverne fra Lillebælt fandtes desuden enkelte Prøver af Glimmerler med Middelvandprocenten 24.

Ved en Undersøgelse af Prøver fra Boringer, som De danske Statsbaner lod udføre i København (N. Fasanvej), fandtes omtrent samme Vandprocentgrænser for Moræneleret som ved Boringerne i Alssund.

I disse tre Tilfælde var der ved Udtagelsen af Prøverne truffet de bedst mulige Foranstaltninger for at bevare de naturlige Vandprocenter, og disse kunde derfor indgaa direkte i Forsøgsresultatet.

Langt vanskeligere, ja foreløbig næsten uløselig, stiller den Opgave sig at bestemme en Lerarts naturlige Konsistens, naar man ikke har Lejlighed til at bestemme dens Vandindhold ved Udtagelsen. Som Eksempel herpaa kan nævnes de talrige Forsøg paa at opnaa et Grundlag for en Sammenligning mellem den naturlige Konsistens for det plastiske Lillebæltsleret og den jævndreende Lerart: Lon-



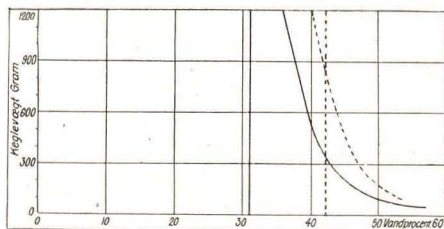


Fig. 13 a.  
Forholdsvis blød Prøve  
(Konsistenstal: c. 850).

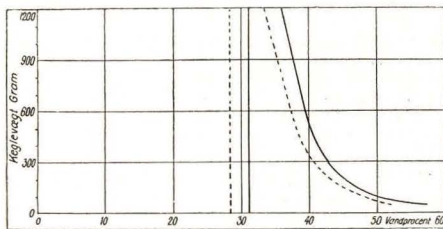


Fig. 13 b.  
Forholdsvis fast Prøve  
(Konsistenstal: c. 2000).

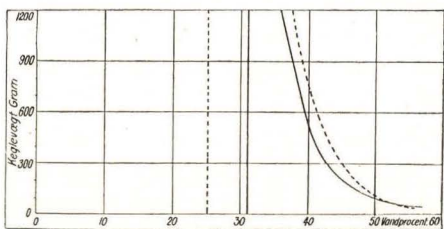


Fig. 13 c.  
Forholdsvis meget fast Prøve  
(Konsistenstal: over 2000).

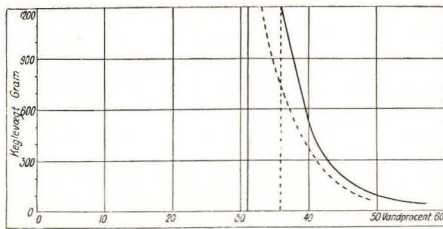


Fig. 13 d.  
Forholdsvis blød Prøve  
(Konsistenstal: c. 750).

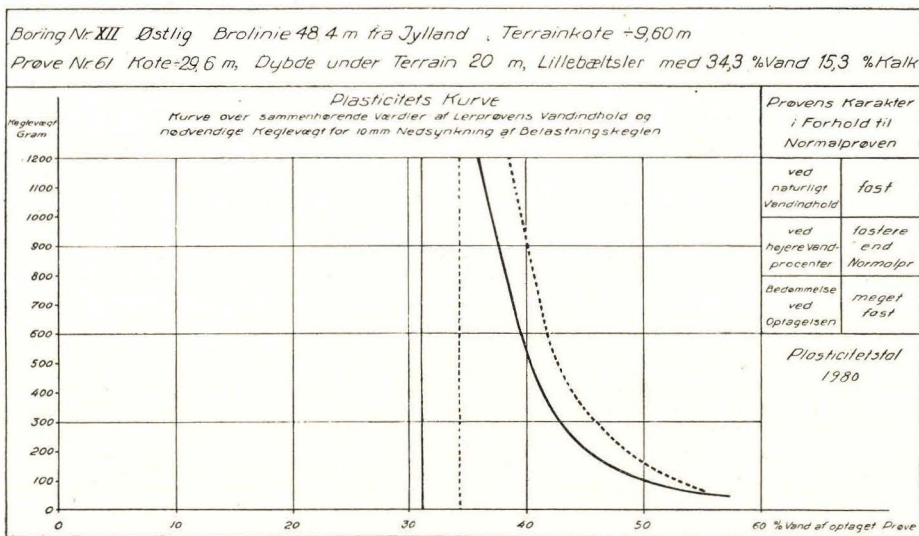


Fig. 13 e.

Fig. 13 (a—e).

- Middelkurve og Middelvandsprocent for Lillebæltseret.
- ..... Kurve og Vandprocent for den enkelte Prøve.

don clay. Spørgsmaalet har stor praktisk Interesse, da London clay er velkendt som et tilfredsstillende Funderingsgrundlag. Af de Prøver, som Danmarks geologiske Undersøgelse velvilligst fik tilstillet fra The Geological Survey of Great Britain<sup>1)</sup>, fremgik det, at Konsistenskurven for London clay ligger en Del nærmere Ordinataksen end Lillebæltlerets (se Fig. 11a). Førstnævnte har altsaa svagere Konsistens end det danske Ler ved samme kunstigt frembragte Vandprocent; men om de to Lerarters relative Kohæsi on i naturlig Aflejring kan intet fastslaas, da man ikke ved Funderingsarbejder i England har bestemt Lerets Vandprocent ved Udtagningen, og man saaledes foreløbig er afskaaret fra at karakterisere Prøven ved et Konsistenstal. Det samme er Tilfældet med de Prøver af »Argile plastique«, som Professor ved Universitetet i Lille, Dr. G. DUBOIS elskværdigst har foranlediget mig tilsendt: Konsistenskurven kan bestemmes, men ikke Konsistenstallet. Det er forøvrigt ikke alene ved disse Eksempler paa udenlandske Lertyper, at man møder denne Ulempe, thi den er altid til Stede, saasnaart man maa benytte Museumsprøver eller utilstrækkeligt emballerede Prøver fra Kærneboringer, for slet ikke at tale om Prøver fra Skulleboringer, der i det hele taget kun daarligt egner sig til disse Konsistensforsøg.

Da Bestemmelsen af Vandprocenten er et saa vigtigt Led i den geotekniske Undersøgelse, bliver det et stedse mere brændende Spørgsmaal, om man gennem et eller andet Laboratorieforsøg vilde være i Stand til at bestemme Lerets Tendens til at optage Vand. Naar Lillebæltleret saaledes i samtlige Boreprofiler, saavel øverst som nederst i Laget, har Vandprocenter indenfor et saa snevert Interval som det paaviste, har man Ret til at formode, at de Love, hvorefter det har indstillet sig med netop denne næsten konstante Vandprocent, er betinget af et Sammenspil mellem de lokale Lejringsforhold og bestemte Egenskaber hos netop denne Lerart. En Bestemmelse af Lerets Vandsugningsevne kan kun blive relativ, idet den førstnævnte Faktor selvsagt skifter fra Lokaltet til Lokaltet, men den anden maa kunne efterspores ved Analysering af Leret. Ved at faa Lerets Tendens til Vandsugning bestemt vilde man opnaa et godt Hjælpemiddel til Bedømmelsen af det Vandprocentomraade, Lerarter i Naturen har indstillet sig i, idet man samtidig bør søge at udrede Lejringsforholdenes Indflydelse paa Vandsugningsevnen.

Til Bestemmelse af denne Egenskab hos Leret har man maaske

<sup>1)</sup> Fra anden Side modtog De danske Statsbaner to Prøver af London clay, udtagne ved et Funderingsarbejde i England; desværre var den ene Prøve for uren, den anden for utilstrækkeligt emballeret, til at man ud fra deres Vandprocenter turde drage nogen Slutning angaaende det paagældende London clay's Konsistens i naturlig Aflejring.



et Hjælpemiddel i Hygroskopicitetstallet, der udtrykker den Vandprocent, en Jordart opnaar ved frit at kunne indsuge Fugtighed fra dampmættet Luft, efter at den først har været fuldstændig udtørret. Kemiker ved Danmarks geologiske Undersøgelse, cand. polyt. JOHNS ANDERSEN<sup>1)</sup> har velvilligst bestemt 5 Prøvers Hygroskopicitet efter MITSCHERLICH'S Metode med følgende Resultat:

Tertiært Ler fra Lillebælt .....	21,4
» » » » .....	21,6
Moræneler fra Allsund .....	4,0
» » » .....	4,5
London clay .....	10,6

Da Hygroskopicitetstallet udtrykker Vandprocent af Tørstof, ses det, at saavel Lillebæltleret som Allsund-Moræneleret har en langt større Vandprocent i naturlig Aflejring end ovennævnte Hygroskopicitetstal angiver (henholdsvis c. 46 % og 15 % af Tørstoffet). I det hele taget er det vel et Spørgsmaal, hvor stor Værdi man tør tillægge Hygroskopicitetstallet som Grundlag for Bedømmelsen af den naturlige Vandprocent, snarere giver det Oplysning om Lerets Porevolumen og herigennem om dets Finkornethed, thi det bestemmer jo Lerets Vandsugningsevne under ganske specielle Forhold, nemlig umiddelbart efter fuldstændig Udtørring, hvorved selv dets relative Værdi som Maal for Lerets Tendens til Vandsugning formindskes. Det er imidlertid givet, at der findes en vis Forbindelse mellem Lerets Vandsugningsevne og dets Finkornethed.

SIMON JOHANSSON, der har undersøgt disse Forhold, navnlig med Henblik paa de af de svenske Ingeniører saa frygtede Flydeler-Aflejringer, kommer til Resultater, der her skal gengives i Korthed<sup>2)</sup>.

Naar en Lerarts Vandprocent er saa lav, at den med Hensyn til Konsistens befinder sig i Omraadet indenfor (til venstre for) Omslagspunktet (se Fig. 5, S. 29), saa indeholder den luftfyldte Hulrum, og vil, naar den har Lejlighed dertil, opsuge Vand, indtil alle Porer er vandfyldte, (altsaa til den naar Omslagspunktet), og derpaa yderligere optage et Par Procent Vand i sig.

Hvis Leret inden Forsøgets Begyndelse har en Vandprocent lig den, der svarer til Omslagspunktet, saa indstiller den sig ligeledes ved en Vandprocent lidt over Omslagspunktets, hvis den faar Lejlighed til frit at opsuge Vand. Slutresultatet bliver i begge Tilfælde det samme, men det Antal Vandprocenter, hvormed Leret har Tendens til at forhøje sit oprindelige Vandindhold, afhænger altsaa af dettes Størrelse i Forhold til Omslagspunktets.

<sup>1)</sup> WAHNSCHAFFE und SCHUCHT: Anleitung z. wissenschaftl. Bodenuntersuchung. 3. Aufl. Berlin 1914. S. 182.

<sup>2)</sup> SIMON JOHANSSON: I. c. S. 83.

Det er disse sidste Par Vandprocenter over Omslagspunktet, der bestemmer, om Leret bliver Flydeler eller ikke; thi hvis en Lerart har sin Flydegrænse liggende tæt ved sit Omslagspunkt, hvilket er Tilfældet for de magre Lerarter, der har stejle Kurver (se f. Eks. Nr. 111, Fig. 7, S. 34), saa bevirker de faa Procent Forhøjelse af Vandindholdet, at Leret overskrider sin Flydegrænse og bliver Flydeler. Dette Forhold giver imidlertid en nedre Grænse for Kornstørrelsen hos de Lerarter, der fra Naturen er bestemt til at være Flydejord, thi jo finere Kornstørrelsen er, jo større Vinkel danner Kurven med X-Aksen, og jo mindre Betydning har derfor de faa Procents Forhøjelse af Vandindholdet. Der gives imidlertid ogsaa en øvre Grænse for Flydejordens Finkornethed, idet alle større Korn, Konkretioner m. m., der findes i Jordmassen, virker hæmmende paa dens Letbevægelighed. SIMON JOHANSSON finder saaledes, at Jordarter, hvis Kornstørrelse ligger indenfor Grænserne: 0,0006—0,05 mm har størst, man tør maaske bruge Udtrykket medfødte, Muligheder for at blive Flydejord.

Imidlertid er Flydejordene jo ikke de eneste Jordarter, der kan danne Skredfænomener m. m., thi enhver Lerart kan omdannes til en Flydejord, naar den bibringes en saa høj Vandprocent, at Flydegrænsen overskrides, og har Lerets Finkornethed ikke formaaet at hindre denne høje Vandprocents Tilstedeværelse, da betyder den en absolut Forhøjelse af Flydeevnen. En Lerarts Indhold af grove Korn, Kalkpartikler o. l. vil derimod under alle Forhold holde igen paa Lerets Evne til at skride.

Det bedste Eksempel herpaa har vi i det danske plastiske Ler, der overalt, hvor det danner Skrænter ved vore Kyster, forarsager store Skreddannelser. Det fungerer da som Flydejord, til Trods for at dets overordentlige fine Kornstørrelse (c. 85—90 % < 0,002 mm, ja endog < 0,0002 mm) ikke berettiger til en saadan Betegnelse. Aarsagen maa søges i, at det plastiske Ler overalt, hvor det kommer frem i Dagen som oversøisk Skrænt, af de ydre Forhold bliver paatvunget et saa stort Vandindhold i sine ydre Lag, at end ikke dets usædvanlig fine Kornstørrelse hindrer Leret i at komme over Flydegrænsen. Af den grafiske Fremstilling af Lerartens Konsistens Fig. 11 a, S. 48 fremgaar det, at et Par Procents Forhøjelse af Vandindholdet ved Omslagspunktet (der ikke kan beregnes med det geotekniske Apparat, men som i hvert Tilfælde ligger ved højere Ordinater end 2000) intet har at sige i denne Forbindelse; der kræves et Tillæg af mindst 15 Vandprocenter for, at Leret fra at befinde sig ved Omslagspunktet (Ordinat > 2000) kan bringes over sin Flydegrænse (Ordinat < 200) og optræde som Flydeler. Erfaringen viser imidlertid, at denne Forhøjelse af Vandprocenten opnaas i Skrænterne, og at Lerets Finhed, naar dets Modstand først er brudt, netop bidrager



til Skreddannelsen. Undersøger man nu hvilke Forhold, der bevirker Vandprocent-Forhøjelsen paa disse Lokaliter, saa finder man vel en af Grundene i Vejrligets Indvirkning paa Lerets ydre Lag. I Sommervarmen udtørres Leret, hvorved det faar stor Vandsugningsevne, om Vinteren fryser Vandet i dets Porer og sprænger derved den stærke Sammenhængskraft mellem Partiklerne; ved Tøbruddet er der altid rigelig Fugtighed parat til at opfylde det ved Frosten fremkomne større Porevolumen, hvorved Vandprocenten forhøjes, et Forhold, der yderligere forværres ved, at de indre, uomdannede Lag stadig besidder det plastiske Lers vandstandsende Egenskaber, hvorved Afvandingen af de ydre Lag yderligere vanskeliggøres. Skiftende Snefald og Regnskyl hindrer endvidere Fordampningen, og Resultatet af alle disse Kræfters Arbejde bliver, at Leret overskrider sin Flydegrænse og — da intet Skelet af større Partikler holder det tilbage — omdannes til Flydeler i sine ydre Lag.

Som Helhed kan man derfor udtrykke Lerets Tendens til Vandsugning saaledes:

- I. Enhver Lerart, der ikke er udsat for Forvitring, søger at indstille sig med et Par Procent Vand over sit Omslagspunkt; derved bringes Lerarter med stejl Kurve (altsaa magre Lerarter) over deres Flydegrænse og omdannes til Flydeler, saafremt de ikke indeholder tilstrækkelige grove Partikler, der hindrer Bevægelsesfriheden. De federe Lerarters Konsistens svækkes derimod ikke i nævneværdig Grad af de faa Procents Forhøjelse, og de danner derfor ikke Flydejord.
- II. En Lerart, der paa Grund af sine Lejringsforhold er udsat for Vejrligets Indflydelse, faar derved sine Porer sprængt, hvilket ændrer dens Konsistens (Omslagspunkt o. l.); paa Trods af selv den størst mulig Hældning af Konsistenskurven kommer den derfor over sin Flydegrænse og danner Flydejord. I dette Tilfælde er de fede, kalkfattige Lerarter særligt udsatte, da intet i deres indre Bygning modsætter sig Bevægelsen.

I det foregaaende Kapitel har jeg væsentligst holdt mig til de geotekniske Undersøgelser, saaledes som de i Sverige og ved Danmarks geologiske Undersøgelse er benyttede til Bestemmelse af Lerets relative Konsistens ved forskellige Vandprocenter, først og fremmest de naturlige; endvidere er det paaapeget, at Konsistenskurven i Forbindelse med den naturlige Vandprocent kan yde en god Hjælp ved Bedømmelsen af Lerprøvers relative Fasthed.

Sammenholder man nu SIMON JOHANSSONS Fasthedskurve (Fig. 5, S. 29) med Konsistenskurven bestemt ved det geotekniske Apparat

(Fig. 9b, S. 41), vil man se, at medens førstnævnte omfatter Lerets Konsistens fra Max. af Fasthed (Vandprocent 0) til Kurvens Skæring med X-Aksen (Fasthed 0), saa arbejder det geotekniske Apparat kun med Fordel indenfor Lerets plastiske og flydende Omraade, hvor det til Gengæld giver en udmærket god Kurve.

Ved Benyttelsen af det geotekniske Apparat faar man saaledes ikke fastlagt Omslagspunktet, og dette forringer naturligvis Værdien af Apparatet ved de mere teoretiske Forsøg. Til Bestemmelse af den svenske Vandprocentdifferens (Vd:pr: ved Ord. 60 ÷ Vd:pr: ved Ord. 600), Finhedstallet og — hvis den naturlige Vandprocent er kendt — Konsistenstallet, har denne Mangel ved Undersøgelsermetoden intet at sige, thi de Punkter paa Kurven, der indgaar i de to førstnævnte Karakterer findes jo netop indenfor det plastiske Omraade, og hvad Konsistenstallet angaar, da maa man, ifølge de ovenfor nævnte Undersøgelser af SIMON JOHANSSON, gaa ud fra, at en Prøves naturlige Vandprocent ved Udtagningen altid ligger i det mindste nogle Procent over Omslagspunktet<sup>1</sup>). Det maa derfor være tilladt at bestemme Konsistenstallet ved at forlænge Kurven til Skæring med den naturlige Vandprocentordinat, hvis Prøven er saa fast, at Skæringspunktet ikke ligger indenfor Apparatets Arbejdsfelt (se Fig. 11b).

Ved Undersøgelse af Prøver, hvor man ikke har Lejlighed til at konstatere den naturlige Vandprocent, og ved samtlige Undersøgelser, der ikke netop tager Sigte paa den praktiske Side af Spørgsmaalet, men tilstræber et Kendskab til Lerets fysiske Egenskaber i Almindelighed, er Omslagspunktet derimod alt for vigtigt et Punkt til, at man tør undlade at bestemme det; man bør derfor ved slige Forsøg altid benytte Metoder, hvorved man kan faa Kurvens fulde Forløb fastlagt, og dernæst for det plastiske Omraades Vedkommende supplere Resultatet med den »geotekniske« Kurve. En saadan Fremgangsmaade danner da ogsaa Grundlaget for den Undersøgelse af danske Lerarters Kohæsi on m. m., som nu, efter at Undersøgelsen af Boreprøverne fra Lillebælt og Alssund er afsluttet, atter vil blive genoptaget. Der vil ved denne Opgave blive lagt særlig Vægt paa at bestemme Konsistenskurvernes Form og Beliggenhed i Koordinat-systemet, samt Aarsagerne hertil, hvilket atter forudsætter en Undersøgelse af Lerarternes mineralogiske og mekaniske Sammensætning.

<sup>1</sup>) Saafremt da Leret ikke i sin naturlige Aflejring er udsat for Vejrsmuldring, men i saa Tilfælde kan der overhovedet ikke tales om noget bestemt Interval for den naturlige Vandprocent, og Konsistenstallet kan altsaa ikke bestemmes.



## Oversigt.

Lerartsgruppen omfatter de Jordarter, der indeholder kolloidale Partikler, og som er plastiske (formbare), naar de har et vist Vandindhold.

Gennem den mekaniske Jordanalyse faar man adskilt en Lerprøves forskellige Kornstørrelser; men man opnaar intet Kendskab til de enkelte Grupper — endsige til hele Prøvens — forskellige Egenskaber, saasom Kornenes Form og petrografiske Beskaffenhed, deres Plasticitet og Sammenhængskraft ved forskellige Vandindhold o. s. v.

Det er derfor nødvendigt at supplere den mekaniske Jordanalyse med Undersøgelser, der tager Sigte paa Bestemmelsen af de nævnte Egenskaber.

Aarsagen til Lerarternes Plasticitet ligger ifølge ATTERBERG ikke saa meget i Lerets Indhold af Kaolin, som i visse andre Mineralers Tilstedeværelse, f. Eks. Hæmatit, Biotit, Limonit og Zeoliter.

Ved Konsistenslæren forstaas Læren om Lerets Konsistens ved forskellige Vandindhold. De Konsistensgrænser, en Lerart passerer, naar dens Vandindhold gradvis nedsættes, er følgende:

Den øvre Grænse for tungtflydende Ler: Grænsen, ved hvilken Leret fra at være letflydende (som Vædske) bliver tungtflydende (som Lim).

Klæbegrænsen: Grænsen, ved hvilken Leret ophører med at være klæbende (vedhængende).

Flydegrænsen: Grænsen, ved hvilken Leret fra at være en flydende Substans gaar over til at være plastisk, saaledes at det kan udrulles i Traade. Denne Grænse ligger undertiden over Klæbegrænsen.

Udrulningsgrænsen: Grænsen, ved hvilken Leret ophører med at kunne udrulles til Traade. (Ifølge ATTERBERG: den nedre Plasticitetsgrænse).

Svindgrænsen: Grænsen, ved hvilken Lerets Volumen ikke længere aftager med synkende Vandprocent, = Grænsen, ved hvilken Leret ikke længere lader sig forme. (Ifølge flere Forfattere: den nedre Plasticitetsgrænse).

ATTERBERG anvender som Maal for Lerarternes Plasticitet det Antal Vandprocenter, indenfor hvilke en Lerart er plastisk. (Ifølge ATTERBERG: Flydegrænsens Vandprocent  $\div$  Udrulningsgrænsens); denne Karakter kaldes Plasticitetstallet.

Lerets indre Sammenhængskraft: dets Modstand mod fremmede Legemers Indtrængen kaldes under eet dets Kohæsion. Indenfor de forskellige Vandprocentomraader benævnes denne Egenskab paa følgende Maade:

Indenfor det flydende Omraade (Omraadet over Flydegrænsen): Viskositet.

Indenfor det plastiske Omraade (Omraadet mellem Flydegrænsen og Svindgrænsen): Sejghed.

Indenfor det faste Omraade (Omraadet under Svindgrænsen): Fasthed.

SIMON JOHANSSONS Fasthedskurve angiver den Belastning, der kræves til en Kiles Indtrængen i Leret ved forskelligt Vandindhold. Kurven er for samtlige Lerarter togrenet med jævn Stigning fra Skæringspunktet med Abscisseaksen til Knæpunktet (svarende til det flydende og det plastiske Omraade). Fra Knæpunktet (Omslagspunktet = Svindgrænsen) har Kurven vandret Forløb, men stiger tilsidst stejlt til Skæring med Ordinataksen (Kurven fra Knæpunktet svarer til det faste Omraade).

SIMON JOHANSSON foreslaar at benytte Lerarternes Kohæsion ved Omslagspunktet som Grundlag for Sammenligning mellem de forskellige Lerarters Sammenhængskraft.

Med geotekniske Undersøgelser tilstræbes en praktisk Anvendelse af Kendskabet til Lerets fysiske Egenskaber, og de betinges derfor af et Samarbejde mellem Geologien og Tekniken.

Den svenske geotekniske Kommission, der havde til Opgave at undersøge Aarsagen til de mange svenske Dæmningsskred for om muligt derved at blive i Stand til at forebygge nye Katastrofer, benyttede som Maal for Lerets Konsistens en Staalkegles Nedsynkning i Leret ved forskellige kunstigt frembragte Vandprocenter.

Den geotekniske Konsistenskurve for en Lerart angiver,



hvor stor en Belastning ovennævnte Kegle skal bibringes for at synke 10 mm ned i Leret ved de Vandindhold, som Abscissen udtrykker.

Som sammenlignende Karakter for Lerarterne anvendte den svenske geotekniske Kommission: den Vandprocent, som Leret bibringes, for at en Kegle paa 60 gr kunde synke 10 mm ned i Prøven; denne Karakter kaldes: »Finlekstallet«.

Til mere teoretiske Forsøg anvender Sveriges geologiska Undersökning som Sammenligningsgrundlag: Differensen mellem de Vandprocenter, der betinger en 10 mm Nedsynkning af Kegler paa henholdsvis 600 og 60 gr (Keglens Spidsvinkel er konstant 60°).

Danmarks geologiske Undersøgelses Forsøg paa ved Hjælp af det ovenfor nævnte Apparat at faa Kendskab til Lerets Konsistens falder i to Afsnit:

- I. De teoretiske Forsøg, der tilsigter at supplere Kendskabet til Lerets Indhold af Forsteninger o. l. med en Undersøgelse af dets fysiske Egenskaber for derved at faa yderligere Hjælp til at parallelisere Lerarter fra jævnaldrende Lokalteter.

Til denne Undersøgelse benyttes Kurven i sin fulde Udstrækning, suppleret med Bestemmelse af Omslagspunktet (der ikke lader sig bestemme ved Hjælp af det koniske Apparat, men f. Eks. ved Benyttelsen af ATTERBERGS Kohæsionsapparat (Fig. 3 og 4, S. 27).

Desuden knytter der sig til denne Undersøgelse en Bestemmelse af Lerets Kornstørrelse og mineralogiske Bestanddele.

- II. De praktiske Forsøg, der tilsigter at give et Fingerpeg angaaende Lerets relative Kohæsion i naturlig Aflejring (svarer til den svenske geotekniske Kommissions Laborieforsøg). Ved dette Arbejde tiltrænges en Karakterskala til Brug ved Sammenligning mellem Prøverne, og Danmarks geologiske Undersøgelse benytter hertil det saakaldte Konsistenstal, der udtrykker: den Keglevægt, som kræves til 10 mm Nedsynkning i Prøven ved dennes naturlige Vandindhold (sammenlign denne Karakter med »Finlekstallet«).

I Konsistenstallet indgaar Lerets naturlige Vandprocent; denne Karakter kan derfor kun benyttes i de Tilfælde, hvor der ved Prøvernes Udtagning er taget tilstrækkeligt Hensyn til, at den naturlige Konsistens for Prøven bibeholdtes. Imidlertid har SIMON JOHANSSON paavist, at Lerarterne har Tendens til at indstille sig ved en Vandprocent, der ligger lidt over den til Omslagspunktet svarende, og dette kan muligvis faa Betydning ved Bestemmelse af Konsistenstallet for de Lerater, hvis naturlige Vandprocentomraade ikke er

kendt; dog maa der naturligvis altid tages Hensyn til de lokale Lejringsforholds Indflydelse paa Lerets Vandprocent, samt de Svingninger denne er underkastet i Leret.

Alle de her nævnte Forsøgskarakterer: Finlekstallet, Vandprocentdifferencen og Konsistenstallet har kun relativ Værdi ved Bestemmelsen af Lerarternes Konsistens; de siger intet om, hvormeget en Lerart kan bære, men angiver kun, hvilke Prøver i et Lerlag, der er relativt faste, og hvilke der er relativt svage.



## Introduction.

The continually increasing demands which during the later years have been made to the productiveness of the soil as also the necessity of the greatest possible economy in building operations have given rise to two new sciences related to geology, viz. agrogeology and geotechnics, both dealing with investigations into the mechanical, chemical and physical properties of soils. The two former have indeed always enjoyed the interest of geologists, whereas the physical properties of soils frequently have been neglected, probably owing to the fact that the importance of the mechanical soil analysis has been overrated.

### The Mechanical Soil Analysis.

The object of the mechanical soil analysis is to divide a sample of clay or sand into groups according to the size of the grains. At the Geological Survey of Denmark (Danmarks geologiske Undersøgelse) a combination of ATTERBERG'S (see fig. 1), SCHÖNE'S and ORTH'S sedimentation-methods is used<sup>1)</sup>.

The result arrived at is the division of the soils into groups as indicated in the table p. 12, but no knowledge is obtained as to the mineralogical and physical properties of the individual groups, not to mention those of the whole sample; for even if ATTERBERG fixed the limit between sand and clay at a definite size of grain (0,02 mm), this does not signify that all grains below this limit possess the properties characteristic of clay, these being only found with certainty within the colloidal range: grains < 0,002 mm; the limit between sand and clay is only fixed at 0,02 mm, because the grains under this size are so minute as to be termed clay in practise.

As the properties characteristic of clay are not entirely dependent upon the size of grains, it is necessary to supplement the mechanical soil analysis with investigations by means of which knowledge as to the characteristic properties of clay is obtained.

### The Characteristic Properties of Clay.

For many years the question as to which properties characterizes clay as an independent species of soil has been the subject of much discussion.

FÖRCHHAMMER, RAMANN, HILGARD and others have maintained that the kaolin contents of clay determined its properties, so that clay might rightly be

<sup>1)</sup> WAHNSCHAFFE u. SCHUCHT: Anleitung zur wissenschaftlichen Bodenuntersuchung  
3rd ed. 1914, pp. 31, 36.

designated as impure kaolin. On the other hand, BISCHOF, HECHT, BARTELS and others maintained that weathering and kaolinization are two different things which must not be confused, and they do not consider kaolin as the characteristic property of clay<sup>1)</sup>.

ATTERBERG is of the opinion that this property should rather be sought in the zeolites contained in the clay, basing his view on tests made by van BEMMELEN and RAMANN as to the adsorptive power of zeolites and other minerals (Limonite, Hæmatite). Nevertheless he prefers to characterize clay by properties instead of by constituents, and he comes to the conclusion that the plasticity of clay, i. e. its capacity for being formed into threads in a moist condition is the property which distinguishes it from the other soils.

Also the views as to the cause of plasticity vary greatly: SCHLOESING<sup>2)</sup>, for example, contends that it is due to the presence of colloidal matter in clay; OSTEN<sup>2)</sup> attributes the plasticity of clay to kaolin; ZSCHOKKE<sup>2)</sup>, on the other hand, seeks the cause of plasticity in the mutual attraction of clay and water; SIMON JOHANSSON<sup>2)</sup> defines plasticity of clay as the condition in which clay finds itself when the mutual mobility of particles is checked, although they may be displaced by means of external forces in relation to each other, retaining, however, their new position even if these forces cease to operate.

ATTERBERG, whose view of plasticity bears some resemblance to that of ZCHOKKE, investigated the consistency at various moisture contents, stating that its properties are changed at the following stages which a clay paste, the water percentage of which is gradually reduced, passes on its way from liquid to solid state:

- 1) The lower limit of easily flowing clay.
- 2) The flow-limit.
- 3) The adhesion-limit.
- 4) The »rolling-out« limit.
- 5) The cohesion-limit.

ATTERBERG regards clay as plastic between the flow-limit and the rolling-out limit, and it is therefore of supreme importance to arrive at a determination of these two limits.

The limits are expressed by the percentages of water which they contain. The interval between the flow-limit and the rolling-out limit ATTERBERG terms the plasticity number, using this as a character of clay. Thus the plasticity number indicates the size of the interval in which clay is plastic, but not the variations in plasticity within the interval or its position in relation to the water percentage scale, traversed by clay on its way from liquid — through plastic — to solid state.

Within the range of plasticity of clay ATTERBERG prefers to use the term degree of viscosity instead of degree of plasticity, as the latter, according to his definition, is unchanged within the whole of the range. The solidity degree of clay within the range of solidity, its viscosity in plastic condition and its viscosity in liquid state may be expressed collectively by its cohesion, i. e. its power of withstanding the invasion of extraneous bodies.

<sup>1)</sup> ATTERBERG: Studier öfver Lerorna. Kalmar 1909.

<sup>2)</sup> SIMON JOHANSSON: Die Festigkeit d. Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalt. Sveriges geologiska Undersökning. Årbok 1913. Stockholm 1914.



### Measurements of the Cohesion of Clay.

Numerous varying methods exist by means of which the cohesion of clays may be measured; thus SCHÜBLER, HABERLANDT, PUCHNER (fig. 2) and ATTERBERG (fig. 3—4) have indicated various paths, leading to the determination of this property of clay.

When determining the cohesion of clay of various water contents, SIMON JOHANSSON, who employed ATTERBERG's apparatuses, found the consistency curves for various clays by using the cohesion number as ordinate and the corresponding percentage of water as abscissa (see fig. 5).

He was immediately struck by the fact that all the curves bore a strong resemblance to the draining curve of hydrogel (see fig. 6) recorded by van BEMMELEN — or rather that the lower part of his curve corresponded to the upper part of that of van BEMMELEN — and he therefore assumed that the course of the curve was due to the same reason. Just as the gel in the interval  $A_\beta$  yields its adsorbed water, on the distance  $A_{\alpha\beta}$ , on the other hand, the pore water which is disposed of by constant steam-pressure, and finally in the interval  $A_\alpha$  the water adsorbed by the pore walls, the clay behaves correspondingly, and the shape of the curves are thus uniform. On the distance  $A_\beta$  to 0 (the »changing point«) the volume of clay decreases, at 0 it becomes constant, and the cohesion is not increased even if the percentage of water is further reduced; on the distance  $A_\alpha$  the solidity is highly increased as the final rest of adsorbed water is now disposed of.

By comparing ATTERBERG's consistency limits with SIMON JOHANSSON's curves it will be seen that the flow-limit and the rolling-out limit are not marked on the curve and may thus be designated as artificial limits. On the other hand, the changing point, which SIMON JOHANSSON regards as identical with the cohesion-limit, shows a pronounced »break« on the curve and must therefore be considered as a natural limit. The latter is also, in fact, recognized as an important limit, inter alia by FROSTERUS. As clay is plastic until the changing point is attained, even if it cannot be rolled out to threads, as stated by ATTERBERG, SIMON JOHANSSON is of the opinion that the changing point ought to be fixed as the lower limit of the range of plasticity instead of the rolling-out limit.

### The Geotechnical Clay Investigations.

At the beginning of this century several large railway-landslides in Sweden made a closer knowledge as to the varying bearing capacity of the soil layers desirable, in order that similar catastrophes might be avoided at new constructions. For the examination of the thousands of samples which in this case were involved, an apparatus, as shown in fig. 8, was constructed by means of which a steel-cone's immersion into a prepared clay paste was determined. With that several tests were made on the same sample, the only difference being the varying percentages of water artificially added. In Denmark determinations have been made as to the consistency of clay in boring samples drawn at foundation works in the Little Belt and in Als Sound for some larger engineering works. In Sweden the results of the investigations were in practise expressed by the volume of water which was required in order to immerse the cone (weight 60 gr) 10 mm into the clay, and, by comparing this volume of water with that originally contained in the sample, an impression as to the relative solidity of the clay was obtained. To meet the demands of more theoretical laboratory tests a consistency

curve, however, was recorded on the basis of 5—6 determinations, using as ordinate that conic weight which is required for a 10 mm immersion into the sample at the volume of water indicated by the abscissa (fig. 9b).

The same mode of procedure is applied at the soil investigations of »Danmarks geologiske Undersøgelse«, and some instances of test results can be seen graphically represented in fig. 11. Hence it is plainly evident, as already pointed out by ATTERBERG, that the water volume of a clay sample is not a sufficient basis in order to judge of its consistency.

At 30 percentage of water of the total substance of the various clays, the curves of which are represented in the figure, indicate that the following widely differing weights for a 10 mm immersion of the cone are required:

Plastic tertiary clay from the Little Belt . . . . .	c. 2000 gr
(dating from the same period as London Clay)	
Argile plastique (Northern France) . . . . .	- 1700 -
London clay (London) . . . . .	- 325 -
Clay dating from lower Paleocæne (Denmark) . . . . .	- 250 -
Boulder clay (Denmark) . . . . .	< 10 -

On considering the percentages of water which the various samples require in order to cause an identical resistance to external action, the same impression is conveyed.

When the samples are of a consistency allowing a cone weighing 900 gr to penetrate 10 mm into the clays, they contain the following percentages of water:

Plastic tertiary clay from the Little Belt . . . . .	c. 38 %
Argile plastique . . . . .	- 35 -
London clay . . . . .	- 26 -
Boulder clay . . . . .	- 15 -

Hence it is only in samples from the same layer that the percentage of water alone may suggest anything as to the consistency of the layer.

Further it is evident from the figure that the more to the right in the coordination system the consistency curve of a sample occurs, the more water must be added to the sample in order to reduce its resistance to the penetration of the cone, and the less is the part played by the variations within the percentages of water of the clay. While thus the entire decline in the consistency curve of boulder clay from ordinate 900 to ordinate 300 is within a water percentage difference of 3 (15—18 %), the difference between the percentages of water corresponding to the same ordinates is ca. 6 as regards the clay from the Little Belt.

From the curves direct readings are obtained as to the power of resistance of the samples at the same percentage of water, but not as to the relative solidity of the same sample in natural sedimentation; a determination of this kind requires an intimate knowledge of the hygroscopic power of clay, provided the proper conditions are present. In order to reduce the power of resistance of plastic clay, e. g., an extremely high percentage of water is required. It adsorbs, however, water extremely readily, whereas boulder clay, which becomes liquid at a far lower percentage of water, is not nearly as hygroscopic. At the abovementioned two large investigations, the bulk of the samples from the one series of boring (Little Belt) consisted of tertiary, calciferous, plastic clay, in the other (Als Sound), however mainly



of boulder clay. The mean percentage of water in the samples from the Little Belt was c. 31, in the samples from the Als Sound c. 13.

In order to get both factors, viz. the consistency and the natural percentage of water incorporated in the test result, each sample was, after the termination of the test, designated by a consistency number, i. e. the force required to cause the steel cone to penetrate 10 mm into the sample when this contains its natural water content, or — graphically represented — the ordinate of the point on the curve, the abscissa of which indicates the natural percentage of water of the sample (see fig. 11b, p. 49).

The consistency number can only be used relatively as it is determined for prepared samples, and no methods have as yet been discovered by means of which the result might be transposed so as to be applicable to unprepared samples. Further, only an approximately correct determination may be obtained, the only working hint being the sample's percentage of water when received at the laboratory. The sole value of the consistency number lies in the fact that it substitutes the preliminary purely subjective estimation in the field as to the solidity of the samples for a character based on objective examinations, by means of which a comparison between the consistency of the various samples is considerably facilitated. It is best suited for estimating samples from the same or related layers. At more detailed investigations of clay samples most importance ought to be attached to the shape and position of the curve, and at theoretical investigations the abscissa of the changing point ought preferably to be used as character of the various samples as suggested by SIMON JOHANSSON. This author demonstrated that the latter, besides being the most pronounced point on the curve, possesses the advantage of indicating the shrinkage limit, i. e. the lower limit of plasticity according to his definition, being at the same time an extremely important feature at the estimation of the hygroscopic power of clay. It has, in fact, been proved by tests that clay, when it has the opportunity of adsorbing water freely, in the first place adsorbs so much water that all pores are filled with water or in other words, that it is trying to reach the changing point; and when this is accomplished it still adsorbs a few percentages of water.

As the changing point is difficult to determine by means of the geotechnical apparatus which is chiefly adapted for examinations within the plastic ranges, affording in this case more gradated results than those obtained by the use of that of ATTERBERG, the practical value of the former is restricted to those cases where the changing point is not needed in the calculation of the percentage of water in clay, i. e. when we have the natural percentage of water to go upon as, e. g., in the examination of the samples from the Als Sound and Little Belt.

On the other hand, at more detailed investigations of the consistency of clay the work ought to be carried out by means of ATTERBERG's cohesion apparatus or other machines designed on the same lines in order to obtain a knowledge of the entire consistency curve, primarily the changing point of clay, a mode of procedure which also will be followed by me in my future investigations of the consistency of Danish clays.

## Litteraturfortegnelse.

- ALB. ATTERBERG. 1903. Studier i Jordanalysen. Kalmar.  
» » 1909. Studier öfver Lerorna. Kalmar.  
» » 1911. Die Plastizität d. Tone. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. I. Berlin.  
» » 1912. Die Konsistenz u. Bindigkeit d. Böden. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. II. Berlin.  
» » 1913. Die Plastizität u. Bindigkeit liefernden Bestandteile d. Tone. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. III. Berlin.
- C. BISCHOF. 1895 & 1904. Die feuerfesten Tone. 2. og 3. Aufl. Leipzig.
- C. CZON CALDENIUS. 1925. Bidrag till kännedom om relationen mellan markbeskaffenhet och markbärighet, etc. Ingeniør-Vetenskaps-Akademiens Hdl. Nr. 42. Stockholm.
- BENJ. FROSTERUS. 1912. Über die Einteilung d. Bodenablagerungen in Moränengebieten nach d. Korngrösse u. d. physikalischen Eigenschaften. La Pédologie Nr. 4. Saint-Pétersbourg.
- SIMON JOHANSSON. 1914. Die Festigkeit d. Bodenarten b. verschiedenem Wassergehalt. S. G. U. Årbok (1913). Stockholm.
- J. KOPECKÝ. 1914. Ein Beitrag zur Frage d. neuen Einteilung d. Körnungsprodukte b. d. mechanischen Analyse. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. IV. Berlin.
- E. A. MITCHERLICH. 1911. Ein Beitrag z. Bestimmung d. Hygroskopizität u. d. Bewertung d. physikalischen Bodenanalyse. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. I. Berlin.
- W. NOVAK. 1916. Zur Methodik d. mech. Bodenanalyse. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. VI. Berlin.
- H. PUCHNER. 1913. Vergleich. Untersuchungen über die Kohäsions verschiedener Bodenarten. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. III. Berlin.
- E. RAMANN. 1911. Bodenkunde. 3. Aufl. Berlin.
- Statens Järnvägars geotekniska Kommission 1914—22. Slutbetänkande. 1922. Stockholm.
- N. STEENBERG og POUL HARDER. 1905. Undersøgelser over nogle danske Sandsorters tekniske Anvendelighed. D. G. U. II. Række, Nr. 16. Kjøbenhavn.
- F. WAHNSCHAFTE und F. SCHUCHT. 1914. Anleitung z. wissenschaftlichen Bodenuntersuchung. 3. Aufl. Berlin.
- R. ZSIGMONDY. 1912. Kolloidchemie. Leipzig.
- I. P. v. ZYL. 1918. Der Atterbergsche Schlämmzylinder. Int. Mitt. f. Bodenkunde. Bd. VIII. Berlin.