

Tilladelig, Belastning af Byggegrund, specielt Ler

A.E. Bretting

Tidsskrifter

BSM 2-1 Bygningsstatiske Meddelelser

1930

TILLADELIG BELASTNING AF BYGGEGRUND, SPECIELT LER.

(EFTER TERZAGHI)

AF A. E. BRETTING.

Der skal i det følgende forsøges at give en kort Oversigt over, hvad der for Øjeblikket praktisk er naaet med Hensyn til en rationel Fastsettelse af den tilladelige Belastning paa Byggegrunden, specielt naar denne bestaar af Ler.

Der vil blive givet et Resumé af de Operationer, der er nødvendige efter *Terzaghi's* Beregningsmaade, idet det synes, at den Fremstilling, *Terzaghi* selv har givet af sine Metoder i sin »Erdbaumechanik«¹⁾, af de fleste betragtes som ret svært tilgængelig.

I mange Tilfælde har man søgt at faa et Begreb om Grundens Bæreevne ved Udførelse af Prøvebelastninger, og de fleste vil vel ogsaa mene, at dette maa være et baade fornuftigt og tilstrækkeligt Grundlag for en Bedømmelse af Byggegrunden.

Dette er dog langt fra altid Tilfældet, og det faktiske Forhold er det, at det er ganske umuligt at give nogen Regel for, hvorledes man af de Resultater, som findes ved Prøvebelastningen skal kunne bedømme den tilladelige Grundbelastning for det virkelige Bygværk — i alt Fald kan man ikke give nogen Regel, som gælder for alle mulige Arter af Byggegrund.

Medens man efter *Coulomb* hidtil nærmest har arbejdet med de kohæsionsløse Jordarters Teori, er man det sidste Aarti eller to begyndt at interessere sig alvorligt for de mere kohæsive Jordarter, og man kan vel nok sige, at det paa dette Punkt er Svenskerne, der har været banebrydende, idet de først af alle har forsøgt en rationel Undersøgelse af Leret og de af dets Egenskaber, som er af Betydning for Ingeniørvidenskaben.

Her henvises særlig til det fortræffelige Arbejde, som er gjort af den

1) *Karl Terzaghi*: »Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage«. Wien 1925.

svenske geotekniske Kommission i 1914—22, hvoraf Resultaterne er nedlagt i Kommissionens omfattende Slutbetænkning.

Det er *Terzaghi's* Fortjeneste, at han som den første har givet den naturlige Forklaring paa den uhyre Forskel, der er paa Styrken af en og samme Lerprøve, eftersom denne Prøves Vandindhold er større eller mindre. Hans Teorier har gjort det muligt at underkaste disse Spørgsmaal en rent matematisk Behandling, og herefter kan Lerets Statik gennemføres paa en langt mere eksakt Maade end f. Eks. Sandets. Forklaringen er den, at det er forholdsvis let at optage en Lerprøve, som befinder sig i samme Tilstand som de naturlige Lag, hvorimod det endnu er vanskeligt at optage en Prøve Sand fra et dybt Borehul, uden at Sandets Lejringsforhold o. s. v. bliver fuldstændig forstyrrede.

De Laboratorieprøver, som det er nødvendigt at udføre for at bestemme Byggegrundens Egenskaber, er ikke meget komplicerede, og det er med de Resultater, som kan opnaas ved Hjælp af saadanne Laboratorieprøver, muligt paa et ret eksakt Grundlag at udregne, hvad man kan tillade sig at belaste den naturlige Byggegrund med.

Hvis man ikke kan gaa ud fra, at Byggegrunden er ens i alle Dybder, maa man naturligvis benytte en Kombination af de for de forskellige Lag fundne Resultater.

Det er netop i saadanne Tilfælde, at Prøvebelastninger paa forholdsvis smaa Arealer bliver af højst tvivlsom Værdi. Først naar man kender Lovene for de kohæsionsløse og de kohæsive Jordarter hver for sig, kan man gøre sig Haab om at faa et Indblik i, hvorledes Overgangsførmerne forholder sig under Belastning.

Kapillartrykket p_k.

Det, der karakteriserer Ler i Modsætning til Sand, er ikke alene, at Størrelsen af de enkelte Korn i Leret er mindre end i Sandet, men først og fremmest Formen og den mineralske Sammensætning af Lerpartiklerne.

Det er eksperimentelt paavist, at man ved at blande selv grove Korn af Sand og Glimmer i forskellige Forhold kan fremkalde praktisk talt alle de samme Egenskaber, som man observerer ved de egentlige Lerarter.

Gennem direkte Undersøgelser af forskellige naturlige Lerarter, er man naaet til en klar Erkendelse af, at Lerpartiklerne er skælfornede.

En anden fremtrædende Faktor er *Kapillartrykket*, som fremkalder en Sammenpresning af de enkelte Partikler i Lersubstansen.

Kapillartrykket virker i alle Jordarter, naar disse har en fri Overflade mod Luften, endogsaa i groft Sand, men det er her kun af ringe Størrelse.

Hollænderen *Versluys* har Æren af først — vistnok i 1916 — at have henledt Opmærksomheden paa dette Forhold.

En Række Sandskorn, som anbringes paa Linie med hinanden, omgivet af en Vædskehinde, kræver en Trækkraft for at fjernes fra hinanden. Naar Gruppen gøres større, sammenholdes alle Kornene af Kapillartrykket, og dette er, som det vil fremgaa af Fig. 1, større, naar Mellemrummet mellem Kornene ikke er helt fyldt med Vand, og aftager til en ret ubetydelig Værdi, naar Mellemrummene er helt fyldt.

Man kan danne en Klump af fugtigt Sand og holde den i den ene Ende, uden at den gaar fra hinanden.

Versluys har, saavidt vides, i sine Arbejder kun tænkt paa Virkningen af Kapillartrykket i Sand; men nøjagtig de samme Forhold bestaar naturligvis ogsaa for Ler og i endnu langt højere Grad, netop fordi Porerne er saa meget finere, og fordi Partiklerne er skælfornede.

Terzaghi har henledt Opmærksomheden paa, at Størsteparten af den saakaldte Kohæsion hos Leret netop hidrører fra Kapillartrykket, og han har ved sine Undersøgelser kunnet paavise, at dette kan blive overordentlig højt, indtil over 100 Atm.

Et saadant Tryk kan ikke forklares alene ved Snæverheden af Kanalerne.

Efter de sidste Undersøgelser er man af den Anskuelse, at Vandet i en forholdsvis stærkt udtørret Lermasse i Virkeligheden befinder sig i en fuldkommen sejt Tilstand.

At det virkelig er Vandets Overfladespænding, som forklarer Lerets Kohæsion, faar man direkte bevist derved, at Kohæsionen formindskes betydeligt, naar man i Stedet for med Vand udrører Lerpulver med Alkohol, hvis Overfladespænding jo er betydeligt mindre.

Naar vaadt Ler udsættes for Luftens Paavirkning, fordampes der Vand fra Overfladen, og dette foregaar i Begyndelsen paa den Maade, at der stadig findes Vand i Lerets Overflade, idet Lerets Volumen formindsker sig nøjagtigt svarende til Mængden af det Vand, der er fordampet.

Dette har sin Forklaring deri, at Kapillartrykket er i Stand til at sammenpresse Lermassen til et mindre Volumen. De enkelte Partikler berører altsaa hinanden tættere og tættere, efterhaanden som Fordampningen finder Sted.

Der er dog naturligvis en Grænse for, hvor tæt Partiklerne kan lejres,

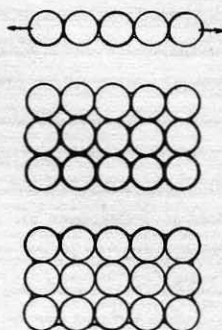


Fig. 1.

og naar man naar den Grænse, hvor selv de store Kræfter ikke kan nærme Partiklerne mere til hinanden, har man naaet Lerets Svindgrænse, og en yderligere Fordampning af Vand medfører da, at Vandoverfladen efterhaanden maa trække sig ind i Lerlegemet.

Senere fremkommer der Svindridser paa Lerets Overflade, men Hærdningen af Lerlegemet fortsætter indefter, saa længe der endnu er frit Vand, som kan fordampe. Den sidste Rest af Vand er bundet til Leret ved den stærke Adhæsion og kan kun uddrives ved Ophedning.

Lerets Stivhed paa det Omraade, hvor Porerne er fuldstændig fyldt med Vand, altsaa til noget under Svindgrænsen, staar i et ganske bestemt Forhold til dets Porevolumen og det tilsvarende Kapillartryk, og en nærmere Undersøgelse har vist, at Lerets Egenskaber indenfor dette Omraade lader sig underkaste en rent matematisk Behandling.

Af Kurven over Relationen mellem Lerets Vandindhold og dets Styrke (Fig. 5, Side 55) vil man netop tydeligt se, at Relationen ændres ved Svindgrænsen.

Naar Leret svinder, hersker der i Virkeligheden et hydrostatisk Undertryk inde i Lermassen, og man kan anskueliggøre Forholdet ved at tænke sig Leret indesluttet i en tæt Gummihinde, indenfor hvilken der fremkaldes et Vakuum.

Kapillartrykket vokser med aftagende Diameter af Porerne, og den Sammentrængning af Partiklerne og deraf følgende Formindskelse af Porerne, som Kapillartrykket fremkalder, bevirker derfor en ny Forøgelse af Kapillartrykket, lige indtil den ovennævnte Grænse naas.

Naar en Lerklump lægges i Vand, forsvinder Overfladespændingen, og paa Grund af Partiklernes Elasticitet udvider Leret sig igen og opsuger Vand, indtil der er Ligevægt mellem det ydre Tryk, Leret er underkastet, og det tilsvarende Porevolumen.

Den Hastighed, med hvilken disse hydrostatiske Spændinger kan udligne sig, afhænger i høj Grad af Lerets Permeabilitet, og er altsaa forskellig for de forskellige Lerarter og efter den Grad, til hvilken en og samme Lerart har været sammentrykt, enten dette nu skyldes en Udtørring, d. v. s. et Kapillartryk, eller en rent mekanisk Sammentrykning.

Tiden er en overordentlig vigtig Faktor ved Bedømmelsen af alle Lerets Forhold, og de store Modsætninger, der tilsyneladende bestaar mellem de nye Teorier og rent praktiske Erfaringer med Hensyn til Sætninger af Fundamenter, stammer utvivlsomt netop derfra, at man har overset Tidens dominerende Indflydelse.

Adskillige Lerarter vil, naar de henligger tilstrækkelig længe ubelastet under Vand, altsaa ogsaa uden Kapillartryk, næsten ganske miste deres

Sammenhæng, og det er aabenbart, at saadanne Lerarters Kohæsi on udelukkende skyldes Kapillartrykket.

Andre Lerarter vil derimod, selv om de mættes med Vand uden at være under Tryk, endnu bevare en betydelig Sammenhæng, og denne betegner man som Lerets ægte Kohæsi on, altsaa den Del af Kohæsi onen, som er uafhængig af, om Kapillartrykket virker eller ej.

Den Del af Kohæsi on derimod, som udelukkende fremkaldes af Kapillartrykket, betegnes som den uægte Kohæsi on og varierer overordentlig stærkt med Vandindholdet. Naar Leret anbringes under Vand, forsvinder den uægte Kohæsi on efter tilstrækkelig lang Tids Forløb.

Den ægte Kohæsi on maa antages at stamme fra den Adhæsi on, der bliver virksom, efter at Partiklerne har været presset mod hinanden, og det er ligegyldigt, om denne Sammenpresning er foregaaet mekanisk eller ved Udtørring, d. v. s. ved et Kapillartryk.

Naar det drejer sig om Lerarter i naturlig Aflejring, vil den ægte Kohæsi on derfor i Almindelighed være bestemt af Lerets geologiske Historie, altsaa af om Leret eventuelt har været overlejret af mere eller mindre mægtige Lag, eller om Lerets Overflade gennem Niveauforandringer eventuelt har været underkastet en Udtørring, saaledes at Kapillartrykket har kunnet træde i Virksomhed.

Naar man ælter en Lerprøve kraftigt, vil den ægte Kohæsi on for Størstedelen blive ødelagt, hvorimod den uægte forbliver uforandret, forsaavidt der ikke indføres Luft i Massen. Det følger heraf, at der ikke bestaar noget bestemt Forhold mellem de Stivheder, man finder for æltede og uæltede Prøver af samme Lerart.

Forskellen mellem disse Stivheder er kun et Udtryk for den ægte Kohæsi on.

At man derfor ved praktiske Undersøgelser af det Ler, hvorpaa man skal fundere sit Bygværk, skal arbejde med Prøver, der saavidt muligt befinder sig i deres fuldstændig naturlige Tilstand, er en Selvfølge.

Terzaghi har i sine oprindelige Undersøgelser tilsyneladende ikke i tilstrækkelig Grad haft Opmærksomheden henvendt paa den ægte Kohæsi on, og naar han dog har naaet en saa smuk Overensstemmelse mellem sine forskellige Forsøgsresultater, skyldes dette, at han ved alle sine Forsøg har arbejdet med æltede Prøver, og med andre Ord nærmest har konstateret Lovene for, hvorledes den uægte Kohæsi on varierer.

Definitioner.

p_k betegner Kapillartrykket i kg/cm^2 .

γ betegner Vægtfylden af de faste Partikler. Denne Størrelse varierer ikke meget for de hyppigst forekommende Jordarter, og for Ler vil den som oftest ligge mellem 2,75 og 3,0.

w betegner Vandindholdet udtrykt i Procent af Tørsubstansens Vægt.

Den matematiske Behandling bliver simplest, naar man udtrykker Vandindholdet paa denne Maade, da Tørsubstansen jo forbliver konstant for en bestemt Lermængde, naar Vandindholdet varierer.

n betegner Porevolumenet udtrykt i Procent af Totalvolumenet.

$\varepsilon = \frac{n}{1-n}$ er Poretallet og udtrykker Forholdet mellem Volumen af Porerne og det samlede Volumen af de faste Partikler.

Definitionen af ε er altsaa analog med Definitionen af w .

$G = \frac{w \cdot \gamma}{100 \varepsilon}$ er Fugtighedsgraden.

For Lerarter, hvis Vandindhold ligger over det til Svindgrænsen svarende, altsaa for hele det Omraade, hvor det er muligt at beregne Lerets Bæreevne, har man $G = 1$ altsaa

$$\varepsilon = \frac{w \cdot \gamma}{100}.$$

Den indre Gnidning i Jordarterne kan ikke angives ved en enkelt Friktionsvinkel, som man tidligere har gjort det i Jordtryksberegninger, idet man identificerede Friktionsvinklen med den naturlige Skrænt.

Jordlagene udøver, naar de befinder sig i R_0 , et større Tryk, har altsaa en mindre Friktionsvinkel φ_0 , end naar en Bevægelse, d. v. s. en Strækning begynder at finde Sted (Friktionsvinkel φ_{II}).

Det Friktionstal $\zeta_0 = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}\right)$, som gælder for R_0 , er derfor større end det tilsvarende Tal $\zeta_{II} = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_{II}}{2}\right)$ for den Tilstand, hvor en Bevægelse (Strækning) foregaar. $\operatorname{tg} \varphi_0$ er den indre Friktionskoefficient i Hviletilstanden. $\operatorname{tg} \varphi_{II}$ er den tilsvarende Friktionskoefficient for Bevægelse. ζ_0 er altsaa større end ζ_{II} .

Bestemmelsen af disse indre Friktionsvinkler (φ_0 og φ_{II}) er naturligvis af største Betydning for Bedømmelsen af Jordarternes Egenskaber.

Lerets Konsistensformer.

De Grænser, man her benytter til Definerings af Lerets Konsistensformer, er udarbejdet af *Atterberg*.

De vigtigste er:

Flydegrænsen, som haves ved det Vandindhold af Leret, hvor Sammenhængen efter helt flydende Tilstand begynder at blive kendelig.

Naar Fugtighedsindholdet formindskes, bliver Leret sammenhængende

og plastisk og forbliver plastisk, indtil man naar den næste udprægede Grænse, nemlig:

Udrulningsgrænsen eller Plasticitetsgrænsen. Denne er efter *Atterberg* karakteriseret derved, at Leret endnu med Haanden lader sig rulle ud paa et Stykke Papir til tynde Pølser uden at gaa i Smaastykker. Vandindholdet bestemmer Grænsen.

Den næste klare Grænse er **Svindgrænsen**, hvor Vandet trækker sig tilbage fra Lerets Overflade. Den bestemmes ved Maaling af Afstanden mellem Mærker afsat paa et Lerprisme, og er naaet, naar Afstanden mellem disse Mærker ikke længere formindskes. Vandindholdet bestemmes og definerer den paagældende Lerarts Svindgrænse.

Man kan her ved samme Lejlighed i et Pyknometer med Kviksølv eller paa anden Maade bestemme **Vægtfylden af Lerprismet som Helhed**, efter at dette er udtørret til Svindgrænsen, og man faar derigennem et Begreb om den paagældende Lerarts ϵ_{\min} , d. v. s. det laveste Poretal, til hvilket Partiklerne i Leret lader sig sammenpresse af Kapillartrykket.

Tilladelig Belastning.

Naar man taler om tilladelig Belastning paa Byggegrunden for et Bygværk, er der i alt væsentligt to Faktorer, som er afgørende for Størrelsen af denne.

- a) Den ene er **Byggegrundens Brudbelastning**, den Belastning i kg/cm^2 , ved hvilken Sætningerne tiltager saa stærkt, at Tilstanden maa sammenlignes med et almindelig fast Legemes Brud eller Flydegrænse. Overfor denne Brudbelastning af Grunden maa man have en passende Sikkerhedsfaktor. Denne Sikkerhedsfaktor er i Praksis ofte enten altfor stor eller altfor lille, netop fordi man hidtil ikke har haft rationelle Midler til at bestemme Grundens Brudbelastning. Hvis dette gøres paa rette Maade, og Grunden ikke er udsat for Udblødning, vil en Sikkerhedsfaktor paa 3 à 4 være fuldkommen tilstrækkelig.
- b) Den anden afgørende Faktor er **Størrelsen af de Sætninger**, som Fundamentet undergaar, inden Belastningen naar Grundens Brudbelastning. Det kan nemlig ske, at disse Sætninger, f. Eks. ved $\frac{1}{3}$ eller $\frac{1}{4}$ af Brudbelastningen, har naaet en saadan Størrelse, at de er utilladelige for den paagældende Konstruktion.

De fleste vil maaske mene, at Sætningen af en god Byggegrund aldrig er særlig stor, og at det ikke kan være den, der er afgørende. Dette kan dog meget vel være Tilfældet; men Spørgsmaalet afhænger naturligvis af Karakteren af den Konstruktion, der skal bæres af det paagældende Fundament.

Hvis det drejer sig om et isoleret Bygværk med forholdsvis ringe Grundflade, f. Eks. et Taarn, vil man kunne tillade ganske betydelige Sætninger, naar blot disse er ensartede, og man er vis paa, at Bygværket virkelig i Løbet af en eller anden Tid kommer til Ro og ikke bliver ved at synke i det uendelige. Det kan her bemærkes, at for adskillige Lerarter udkræves der uhyre lang Tid, inden Sætningerne naar deres endelige Værdi, selv om Belastningen ligger langt under Brudbelastningen. For Bygninger med en stor Udstrækning i Horisontalplanet vil man som Regel ikke kunne tillade saa store Sætninger af Hensyn til Differenserne mellem Sætningen af de forskellige Punkter. Hvis det drejer sig om en Bro, bør Sætningerne i det hele taget ikke være ret store, selv om man vælger en statisk bestemt Konstruktion. Der tænkes her særlig paa, at hvis disse Sætninger naar en betydelig Størrelse, vil Uensartetheden i dem let bevirke en Skævhed af Pillerne.

For en statisk ubestemt Bro maa de tilladelige Sætninger naturligvis være endnu mindre for at holde de deraf foraarsagede Ekstraspændinger indenfor rimelige Grænser.

Man ser, at det at fastsætte den tilladelige Belastning paa Byggegrunden er et Spørgsmaal, som afhænger ikke alene af Byggegrunden, men ogsaa af Overbygningen. Man kan derfor ikke give disse tilladelige Belastninger i en Tabel.

I det følgende skelnes mellem to karakteristiske Hovedarter af Byggegrund:

- 1) Det kohæsiønløse Sand,
- 2) Det kohæsiøve, homogene Ler.

For disse to Arter af Byggegrund kan man sige noget almindeligt om, hvorledes de forholder sig under Belastningen.

For Brudbelastningen i kg/cm^2 gælder:

- 1) a) For Sand tiltager den nogenlunde proportionalt med Belastningsfladens Størrelse.
- b) Den tiltager ligeledes med Fundamentfladens Dybde under Overflade.
- 2) a) For Ler er Brudbelastningen uafhængig af Grundfladens Størrelse.
- b) For fastere Lerarter er Brudbelastningen desuden praktisk talt uafhængig af Dybden under Lerlagets Overflade (gælder ikke for Slam).

Angaaende Sætningerne gælder indenfor Proportionalitetsgrænsen følgende:

- 1) For Sand med en bestemt Belastning pr. Arealenhed har man:
 - a) Sætningen er nogenlunde uafhængig af Grundfladens Størrelse og naar hurtigt sin fulde Værdi — som Regel i Løbet af nogle Timer eller Dage.

- b) Sætningen aftager med voksende Funderingsdybde, dog ikke proportionalt med denne Dybde, men med Forholdet mellem Dybden og Grundfladens Middeldiameter.
- 2) Som nævnt tager det for mange Lerarter en overordentlig lang Tid, inden Sætningen for en bestemt Belastning naar sin endelige Værdi. Spørgsmaalet hænger nøje sammen med Lerets Permeabilitet. Den Tid, der kræves, inden Sætningen ophører, kan variere fra eet til to Aar for blød Slam, som har en høj Permeabilitet, indtil flere Hundrede Aar for meget faste Lerarter.
- a) Grænseværdien for Sætningen vokser for cirkulært Fundament proportionalt med Diameteren. For ligedannede Fundamenter vokser den med den lineære Dimension. Hvis Fladen er aflang, bliver Sætningen forholdsvis mindre end for en kvadratisk eller cirkulær Flade. For et Sideforhold 1:3 vil Sætningen endnu udgøre 93 pCt. af Sætningen for en cirkulær Grundflade med samme Areal, for Forholdet 1:10 kun 75 pCt.²⁾
- b) For stærkt kohæsivt Ler er Grænseværdien for Sætningen omtrent uafhængig af den Dybde under Lerets Overflade, i hvilken man funderer.

Som Illustration af de her nævnte Forhold henvises til Fig. 2³⁾. Kurven c_1 giver Relationen mellem Sætninger og Belastning i kg/cm^2 for en eller anden Jordbund med en Belastningsflade med Diameter d .

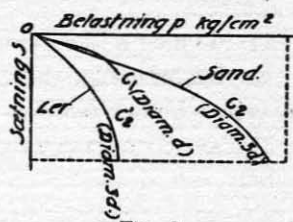


Fig. 2.

- 1) Hvis Jordbunden er Sand, og man maaler Sætningen for Diameter $3d$, vil Kurven forløbe omtrent efter c_2 . Som det ses, bliver Brudbelastningen 3 Gange saa stor, og Sætningen ved Brudbelastningen ogsaa betydelig større; men indenfor en rimelig Brøkdelen af Brudbelastningen for det lille Fundament, vil der kun være ringe Forskel mellem Sætningerne for det store og det lille Fundament ved samme Belastning i kg/cm^2 .
- 2) Hvis Byggegrunden er Ler, vil Sætningskurven for Fundamentet med Diameter $3d$ forløbe omtrent efter c'_2 . Det ses, at Brudbelastningerne er omtrent lige store, hvorimod Sætningerne for det store Fundament overalt er ca. 3 Gange saa store som for det lille.

Sætningerne hidrører dels fra en virkelig Sammentrykning af de underliggende Lag og dels fra, at disse Lag under Trykket trænges ud til Siden og forskyder de omgivende Lag udefter og opetter.

²⁾ Schleicher: Theorie des Baugrundes, Bauingenieur 1926, Heft 48 - 49.

³⁾ Redlich-Terzaghi-Kampe: Ingenieurgeologie, S. 466.

Teorien for de plastiske Legemers Forhold overfor en saadan Paavirkning er nærmere udformet af *Prandtl*⁴⁾, og der er gennem hans Arbejde aabnet Mulighed for en mere rationel Bedømmelse af Bæreevnen af Byggegrund bestaaende af plastiske Lerarter.

Ved symmetrisk Belastning af fast Ler er den permanente Belastning afgørende for Sætningerne. Forbigaaende Belastning, Vind o. s. v. faar ikke Tid til at frembringe kendelige Sætninger.

Paa den anden Side vil det egentlige Brud ikke kræve længere Tid for at udvikle sig, hvorfor man overfor »Kanttryk« fra den bevægelige Belastning maa have den fornødne Sikkerhed mod Brud.

Ifølge de nyeste Undersøgelser har »Kanttrykket« beregnet efter den almindelige trapezformede Fordeling kun lidet at gøre med de virkelig optrædende Spændinger.

Ældre Prøver.

Tidligere har man forsøgt at karakterisere Kvaliteten af de forskellige Jordarter, specielt de lerholdige, ved Bestemmelsen af bl. a. følgende Faktorer:

1) Mineralsammensætningen.

En Bestemmelse heraf kræver ganske overordentlig kostbare og besværlige Undersøgelser, hvis Værdi for Tekniken synes meget tvivlsom.

2) Porevolumenet.

Selv om dette er en vigtig Faktor, som ved Sand giver et vist Begreb om Lejringsstæthed og derigennem om Bæreevnen, er Porevolumenet for Ler absolut ikke noget Udtryk for dettes Bæreevne og heller ikke for dets Permeabilitet, som spiller en saa stor Rolle for Risikoen for Udblødning og Størrelsen af de Sætninger, man kan vente.

3) Den granulometriske Sammensætning.

Denne bestemmes ved mekanisk Analyse, Sigting og Slemmeprøver, og er vel af stor videnskabelig Interesse; men for Lerets Vedkommende giver Kornstørrelsesforholdet alene intet Begreb om Modstandsevnen, og den mekaniske Analyse har utvivlsomt her kun videnskabelig Værdi. Det er derimod selvfølgelig af stor praktisk Betydning at bestemme Indholdet af grovere Bestanddele i en sandblandet Ler.

Fig. 3 viser et Eksempel paa en grafisk Fremstilling af Sammensætningen af 5 Lerprøver fra samme Boring.

4) Vandprocenten.

Denne er en meget vigtig Faktor, som altid bør bestemmes, skønt der, særlig for Ler, ikke bestaar nogen bestemt Relation mellem Vandprocenten og Bæreevnen.

⁴⁾ Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Heft 1, 1921.

MEXANISK ANALYSE AF JORDPRØVER NR 51-55
BORING IX. VIADUKT GOEKSOU

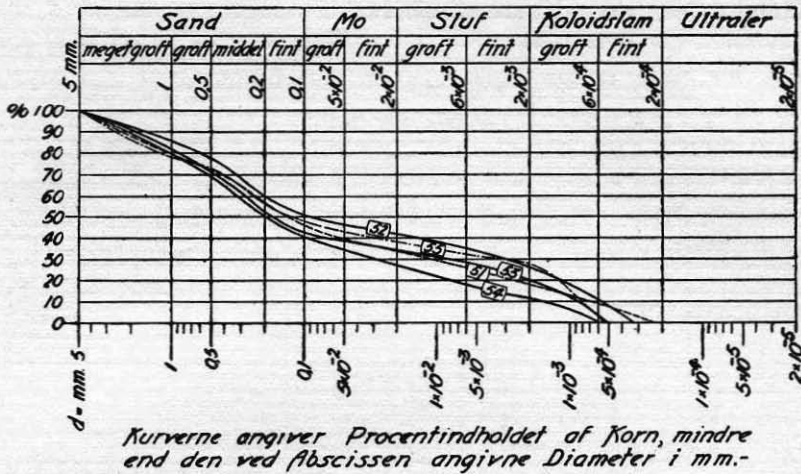


Fig. 3.

Som det fremgaar af Kurverne Fig. 5 Side 55 varierer ganske vist Modstandsevnen for en bestemt Lerart stærkt med Vandindholdet; men to forskellige Lerarter kan ved samme Vandindhold have ganske forskellig Bæreevne.

5) Kolloidindhold.

Man har tidligere gjort sig overmaade megen Ujævnhed for at bestemme Indholdet af de saakaldte Kolloider i de forskellige Lerarter. Man har ment, at Kolloidet var et bestemt Stof, som tjente til at give Leret dets Sammenhæng og Plasticitet, og har haabet gennem Bestemmelsen af Mængden af dette Stof at faa en Mening om Lerets Styrke.

Der eksisterer imidlertid ikke noget bestemt Kolloidstof; men mange forskellige Mineraler optræder som Kolloider, naar de forefindes i fintdelt, skælformig Tilstand.

Lerarternes Styrke selv ved en bestemt Vandprocent staar ikke i noget bestemt Forhold til Kolloidindholdet.

Nyere Prøver.

Terzaghi har indført Prøvning af Lerterninger, idet han maaler de til forskellige Belastninger svarende Sammentrykninger og derigennem bliver i Stand til at optegne en fuldstændig Arbejdslinie for Leret. Se Fig. 4.

Belastningen forøges med Tidsintervaller paa 3 Minutter, og her og der holdes Belastningen konstant, medens man maaler Sammentryknin-

gerne som Funktion af Tiden som vist paa den lille Figur tilhøjre. Der næst aflastes Teringen fuldstændig, og den udvider sig igen efter den opadgaaende Kurve. Ved Belastning paany til den tidligere Belastning fremkommer den viste Hysteresissløjfe. Forsøget gennemføres indtil Brud.

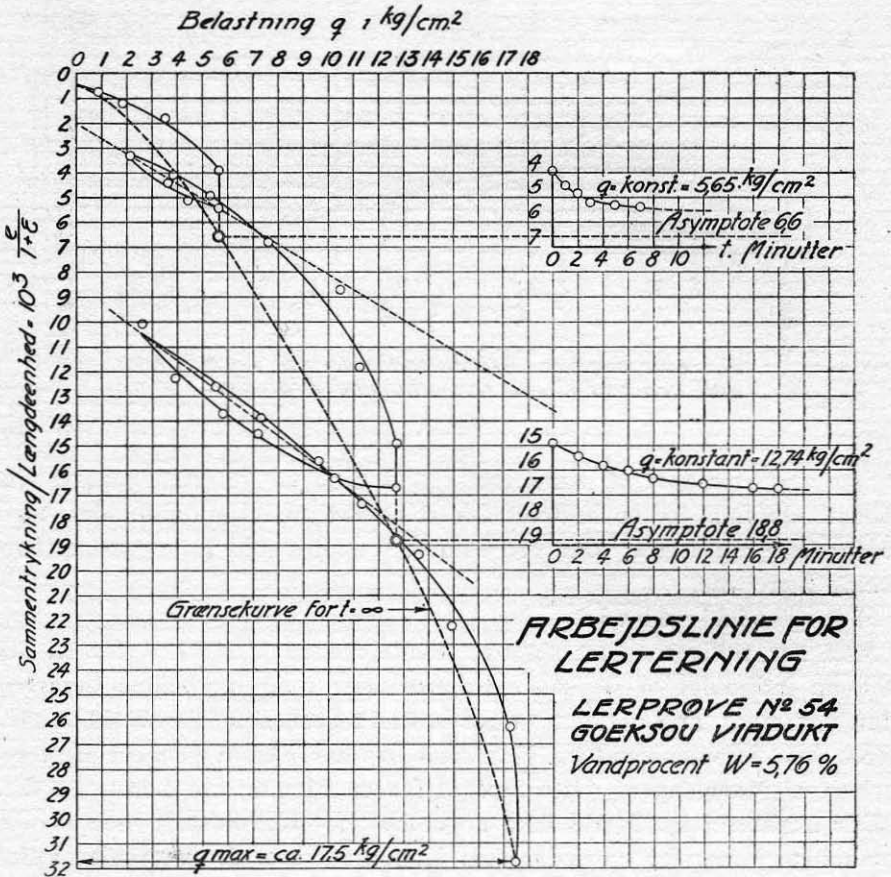


Fig. 4.

Det ejendommelige for Lerets Arbejdslinie er, at Hældningen af Hysteresissløjferne er nogenlunde konstant, og vi definerer Lerets Elasticitetskoefficient som denne Hældning.

Brudbelastningen for en Tering af en og samme Lerart varierer stærkt med dennes Vandindhold, se Fig. 5, der er optegnet efter en Række Maalinger med Ler Nr. 1, foretaget af Terzaghi⁵⁾.

Tilhøjre er Kurven optegnet i almindelige Koordinater med Vandindholdet udtrykt i Procent af Tørvægten som Abscisse og med Brudbe-

⁵⁾ Erdbaumechanik, Tabelle 20, S. 73.

lastningen i kg/cm^2 som Ordinater. Tilvenstre er den samme Kurve op- tegnet med logaritmiske Ordinater, og det ses, at Brudstyrken her va- rierer nogenlunde efter en ret Linie indtil et vist Punkt, hvorefter den kun tiltager langsommere. Dette Punkt ligger i Nærheden af Lerets

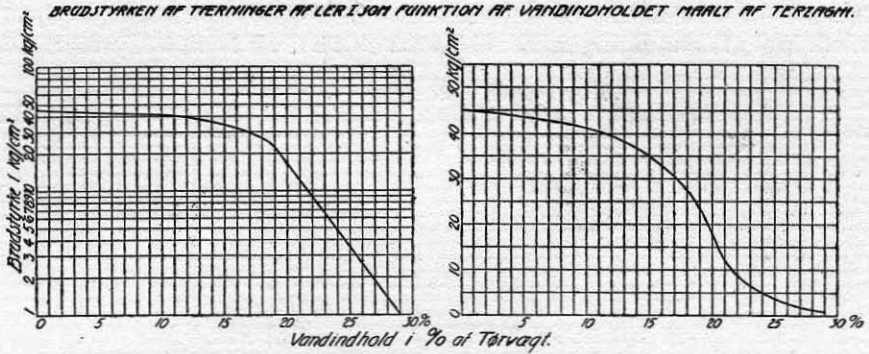


Fig. 5.

Svindgrænse, og den førstnævnte retlinede Del repræsenterer det Om- raade, hvor samtlige Porer er fuldstændig fyldt med Vand.

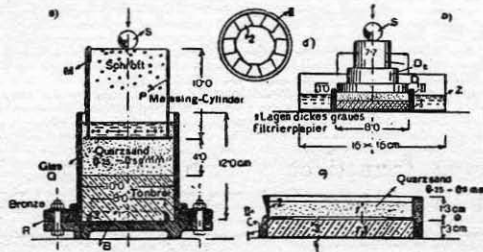


Fig. 6.

Det andet Hovedforsøg, *Terzaghi* har foreslaet, er Bestemmelsen af det saakaldte Tryk-Poretalsdiagram (Kompressions- og Ekspan- sionskurverne). Bestemmelsen af Diagrammet foretager man ved at be- laste en Prøve af Leret under Vand og maale Relationen mellem Belast- ningen i kg/cm^2 og Poretallet, som jo er direkte proportionalt med Vand- indholdet i Procent af Tørvægten.

Apparats Indretning fremgaar i Princippet af Fig. 6.⁶⁾ Lerprøven er anbragt indesluttet i en Metalring, saaledes at en Udvidelse til Siderne ikke kan finde Sted. Over og under Prøven er anbragt Sandfilter og Fil- trerpapir, som sikrer, at det Vand, der presses ud af Lerprøven under Belastningen, har frit Afløb.

⁶⁾ Erdbaumechanik, S. 83, Fig. 13.

Poretallet bestemmes ved Beregning af Vandindholdet, der findes ved Vejning af den indenfor Ringen indsluttede Lerprøve efter de forskellige Belastninger. Tilsidst maa Prøven naturligvis tørres, for at man kan bestemme Mængden af Tørstoffet.

Diagrammets Form bliver, som vist paa Fig. 7. Denne og Fig. 3 og 4 stammer fra nogle Lerundersøgelser, Forfatteren har ladet foretage i Anledning af Funderingen af Göksu=Viadukten i Tyrkiet, som

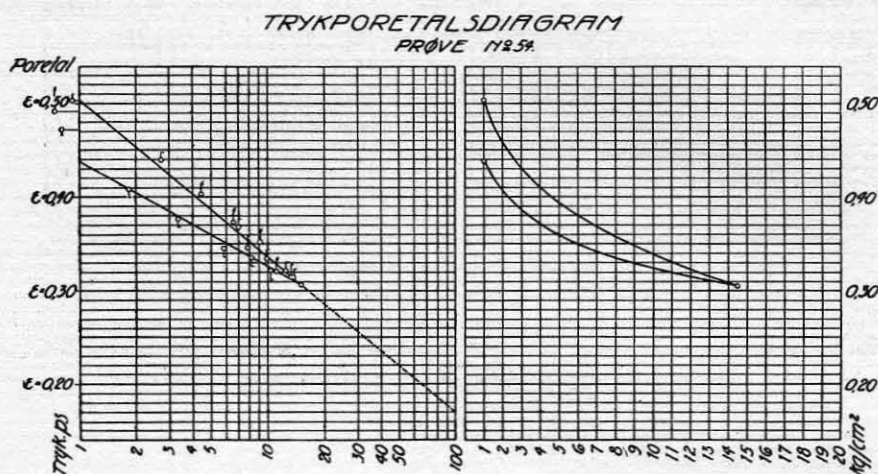


Fig. 7.

for Tiden bygges af den svensk-danske Gruppe for Jernbaneanlæggene i Tyrkiet.

Tilhøjre er Kurven fremstillet i almindelige Koordinater og til venstre med logaritmiske Abscisser. Den opadgaende Gren faas ved gradvis Aflastning af Prøven, og repræsenterer Udbulningskurven eller Ekspansionskurven, der viser i hvilken Grad Leret suger Vand til sig og bulner ud, efter at Belastningen er borttaget.

I logaritmiske Koordinater er begge Grene af Kurven nogenlunde ret-linede, og dette stemmer ogsaa med den Form, *Terzaghi* har udledet af sine Forsøg.

Disse Kurver har saa vidt vides ikke tidligere været fremstillet i logaritmiske Koordinater, skønt man herved faar en langt bedre Oversigt over Maalingerne og lettere Udledning af Observationerne.

I Forbindelse med Maalingen af Tryk-Poretalsdiagrammet foretages paa tilsvarende Maade som ved Terningforsøgene en Maaling af Sammentrykningerne som Funktion af Tiden, idet Trykket holdes konstant

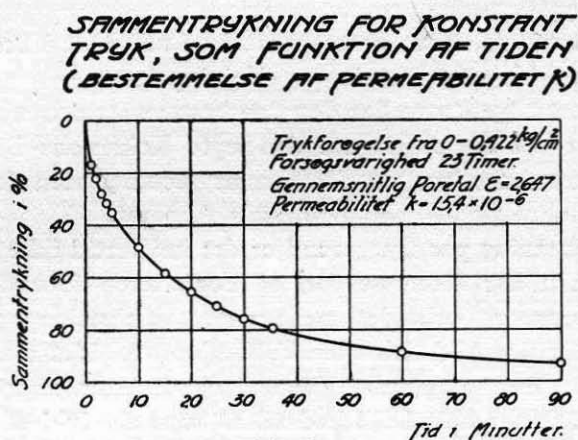
Disse Maalinger giver Diagrammer som Fig. 8, der stammer fra en Række Forsøg af *Terzaghi*.⁷⁾ Diagrammet tillader en Bestemmelse af

⁷⁾ Ingenieurgeologie, S. 329.

Lerets Permeabilitet k , som bl. a. naturligvis er en Funktion af Poretallet, der igen er en Funktion af Trykket.

De foregaaende Diagrammer giver de nødvendige Data til Bestemmelse af Lerets uægte Kohæsi on, som stammer fra Kapillartrykket. Desuden maa man bestemme den ægte Kohæsi on, som ikke kommer til Udtryk i de nævnte Forsøg, men som i Virkeligheden kan spille en ret betydelig Rolle.

Terzaghi har foreslaaet at bestemme denne Kohæsi on ved Forskydningsforsøg; men disse Metoder er endnu ikke helt udformede.



Professor Buisman har angivet et udmærket Apparat⁸⁾, hvor Forskydningsmodstanden maales under Vand, og hvor Kohæsi onen derfor kan findes ved Variation af Belastningen.

Et mere direkte Begreb om den Side af den ægte Kohæsi on, der er afgørende for Bæreevnen, faar man ved at bestemme Styrken af Leret, efter at dette har faaet Lejlighed til selv at suge sig fuldt af Vand.

De i det foregaaende omtalte Prøver er i alt væsentligt angivet af Terzaghi og danner et nogenlunde tilstrækkeligt Grundlag for en ensydig Definition af Jordarternes mekaniske Egenskaber.

Metoderne er fortrinlige, men ikke særlig simple. Der kræves omhyggelige Maalinger, øvede Folk og gode Apparater.

I Modsætning hertil er den af den svenske geotekniske Kommission angivne Kegelprøve overordentlig simpel.⁹⁾

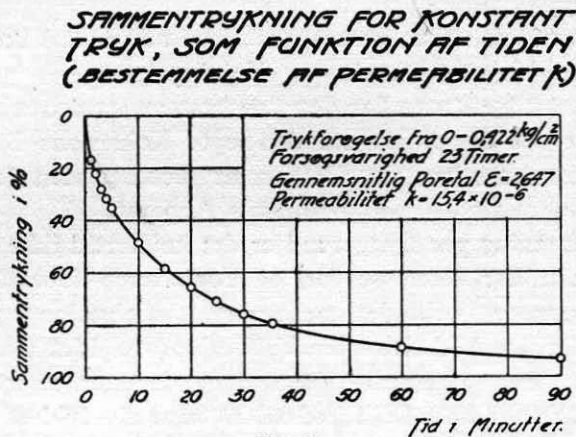
⁸⁾ De Ingenieur 1928, S. 140—141.

⁹⁾ (Svenske geotekniske Kommissions Slutbetænkning. — Mertz: Metoder til Undersøgelse af Lerets fysiske Egenskaber).

Lerets Permeabilitet k , som bl. a. naturligvis er en Funktion af Poretallet, der igen er en Funktion af Trykket.

De foregaaende Diagrammer giver de nødvendige Data til Bestemmelse af Lerets uægte Kohæsi on, som stammer fra Kapillartrykket. Desuden maa man bestemme den ægte Kohæsi on, som ikke kommer til Udtryk i de nævnte Forsøg, men som i Virkeligheden kan spille en ret betydelig Rolle.

Terzaghi har foreslaaet at bestemme denne Kohæsi on ved Forskydningsforsøg; men disse Metoder er endnu ikke helt udformede.



Professor Buisman har angivet et udmærket Apparat⁸⁾, hvor Forskydningsmodstanden maales under Vand, og hvor Kohæsi onen derfor kan findes ved Variation af Belastningen.

Et mere direkte Begreb om den Side af den ægte Kohæsi on, der er afgørende for Bæreevnen, faar man ved at bestemme Styrken af Leret, efter at dette har faaet Lejlighed til selv at suge sig fuldt af Vand.

De i det foregaaende omtalte Prøver er i alt væsentligt angivet af Terzaghi og danner et nogenlunde tilstrækkeligt Grundlag for en ens tydig Definition af Jordarternes mekaniske Egenskaber.

Metoderne er fortrinlige, men ikke særlig simple. Der kræves omhyggelige Maalinger, øvede Folk og gode Apparater.

I Modsætning hertil er den af den svenske geotekniske Kommission angivne Kegelprøve overordentlig simpel.⁹⁾

⁸⁾ De Ingenieur 1928, S. 140—141.

⁹⁾ (Svenske geotekniske Kommissions Slutbetænkning. — Mertz: Metoder til Undersøgelse af Lerets fysiske Egenskaber).

Den almindelige Opfattelse synes at være, at Kegleprøven kun giver et relativt Begreb om de forskellige Lerarters Modstandsevne og deres Egnethed til Byggegrund, men ikke nogen absolut Maalestok for Grundens Bæreevne. Forfatteren er imidlertid af en anden Mening og har allerede gjort et vist Arbejde i denne Retning, som ventelig vil føre til et godt Resultat.

Oversigt over Terzaghi's Metoder til Undersøgelse af Lergrund.

- 1) Der udtages Prøver af Leret, der saa nøje som muligt repræsenterer den naturlige Forekomst. De opbevares i Glas forseglede med Parafin.
- 2) For den naturlige Prøve bestemmes Vandindholdet i Procent af Tørvægten ved Vejning, Tørring og Vejning igen.
- 3) For den naturlige Prøve bør desuden bestemmes den ægte Kohæsion. Forsaavidt det drejer sig om den ægte Kohæsions Bidrag til Forskydningsmodstanden, vil dette samt Koefficienten for den indre Friktion kunne findes med *Buisman's* Apparat.

Ved Belastning paa Byggerund er det imidlertid ikke direkte dette Bidrag, man har Interesse for, og Forfatteren foreslaar derfor, at man bestemmer Forholdet mellem ægte Kohæsion og ægte plus uægte Kohæsion ved den svenske Kegleprøve, idet man undersøger Boreprøven først i naturlig Tilstand og derefter, naar den gennem længere Tid har haft Lejlighed til at suge sig fuld af Vand.

I mange Tilfælde, især ved magrere Lerarter, vil den ægte Kohæsion være betydningsløs, og man kan benytte de ved *Terzaghi's* Metoder fundne Resultater uden Korrektion.

- 4) Dernæst bestemmes med Pyknometer Vægtfylden af Tørs substansen. Ved grovere Undersøgelser kan man regne med en Middelvægtfylde paa ca. 2,8 à 2,85 forsaavidt angaar de Dele, hvis Kornstørrelse er under 0,6 mm. Under Svindgrænsen er nu Poretallet

$$\varepsilon = \frac{w}{100} \cdot \gamma.$$

- 5) Der bør dernæst bestemmes paa tidligere omtalte Maade de vigtigste af **Konsistensgrænserne**:
 - a) Flydegrænse,
 - b) Udrulningsgrænse eller Plasticitetsgrænse,
 - c) Svindgrænse.
- 6) Den indre Friktionskoefficient for Bevægelse bestemmes under Vand ved *Buisman's* Apparat (se 3)).
- 7) Belastning af **Terningprøver** med bekendt Vandindhold w og Bestemmelse af Arbejdslinien (Fig. 4). Det giver en god Kontrol

at foretage Forsøget med Terninger med forskelligt Vandindhold, da der, saa længe man holder sig under Svindgrænsen, bestaar en lovmæssig Sammenhæng mellem Resultaterne; men eet enkelt Terningsforsøg er principielt tilstrækkeligt. Herved findes altsaa de til eet eller flere bestemte Vandindhold w, σ : til bestemte Poretal ε svarende Værdier af Elasticitetskoefficienten E og Brudbelastningen $q_{d \max}$.

Ved at holde Trykket konstant og observere Sammentrykningerne faas en Kurve, der muliggør Bestemmelsen af Asymptoten for Tiden $t = \infty$.

Paa denne Maade faas i Arbejdslinien nogle Punkter af Grænsekurven, der er kraftigt punkteret. Hældningen af Hysteresissløjferne giver en direkte Bestemmelse af Elasticitetskoefficienten E , og man har Kontrol derved, at Grænsekurven efter *Terzaghi* har Ligningen

$$e = \frac{q}{E} + c \left(\frac{q}{E} \right)^3,$$

hvor

$$e = \frac{\Delta h}{h} (1 + \varepsilon)$$

$\frac{\Delta h}{h}$ = den relative Sammentrykning (observeret)

ε = Poretal for Terningen

E = Elasticitetskoefficienten

q = Belastningen i kg/cm^2

c = Konstant.

8) Bestemmelse af Tryk-Poretalsdiagrammet.

(Kompressions- og Ekspansionskurven under Vand, Fig. 7). Man maaler direkte paa Diagrammet Konstanterne for de to Kurvers Ligninger.

Ekspansionskurven:

$$\varepsilon = -\frac{1}{A} \cdot \ln(p_s + p_i) + c_2, \text{ hvor}$$

A = Konstant (Ekspansionstallet) (i »Ingenieurgeologie« betegnet $\frac{1}{A}$)

p_s = Belastningen i kg/cm^2 ,

p_i = Konstant, der hidrører fra at Udbulningen hører op ved et endeligt Poretal. p_i er for Ler oftest ubetydelig (Størrelsesorden 0,001 — 0,01 kg/cm^2).

c_2 = Konstant.

Anvendes almindelig logaritmisk Inddeling for Abscisserne, bliver Ligningen

$$\varepsilon = -\frac{2,30}{A} \cdot \log(p_s + p_i) + c_2.$$

Naar p_i er forsvindende, og ε og $\log p_s$ benyttes som variable, haves altsaa Ligningen for en ret Linie, hvor Retningskoefficienten

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{2,30}{A} \quad \text{og} \quad c_2 = \varepsilon \quad \text{for} \quad p_s + p_i = 1.$$

Kompressionskurven:

$$\varepsilon = -C \cdot \ln(p_s + p_c) + c_1, \text{ hvor:}$$

$$\frac{1}{C} = \text{Fortætningstallet} = \text{Konstant.}$$

p_c svarer til p_i og er ubetydelig.

$c_1 = \text{Konstant.}$

$$\varepsilon = -2,30 C \cdot \log(p_s + p_c) + c_1.$$

$$\operatorname{tg} \alpha = -2,30 C.$$

$$c_1 = \varepsilon \text{ for } p_s + p_c = 1.$$

- 9) Arbejdslinien for Terningen giver eet Sæt sammenhørende Værdier af ε og E .

Fra Kompressionslinien kendes et stort Omraade af (ε, p_s) -Kurven, som paa Grund af Retlinetheden tillader Extrapolering.

a) Nu er $\frac{E}{p_s} = c_s$ ifølge *Terzaghi's* Forsøg en Konstant for samme Lerart, uafhængig af ε . c_s kan altsaa findes.

b) Mellem Friktionstallet ζ_0 for indre Gnidning i Hviletilstand og Poissontallet $\frac{1}{m}$ bestaar følgende Relation:

$$\frac{1}{m} = \frac{1 + \zeta_0 + 2\zeta_0^2}{2\zeta_0^2}.$$

Mellem Ekspansionstallet A , Konstanten c_s , ζ_0 og m bestaar følgende Relation:

$$\frac{c_s}{A} = \frac{1 + 2\zeta_0}{3} \cdot \frac{1 + \zeta_0 - 4\zeta_0^2 \cdot m}{(1 + \zeta_0)}.$$

Denne sidste Relation findes ikke angivet af *Terzaghi*, men udledes direkte af hans Udvikling.

Mellem p_s og Kapillartrykket p_k bestaar efter *Terzaghi* Relationen:

$$p_k = p_s \cdot \frac{1 + 2\zeta_0}{3}, \text{ altsaa er } p_k \text{ proportional med } p_s.$$

Med ζ_0 som uafhængig variabel er det nu let at opstille følgende Tabel, der giver sammenhørende Værdier af ζ_0 , $\frac{1}{m}$, $\frac{c_s}{A}$ og $\frac{p_k}{p_s}$.

ζ_0 varierer i Almindelighed mellem 0,6 for magre og 0,75 for fede Lerarter. For skarpt Sand er ζ_0 ca. 0,42.

Tabel for ζ_0 , $\frac{c_s}{A}$, $\frac{p_k}{p_s}$.

ζ_0	$\frac{1}{m}$	$\frac{c_s}{A}$	$\frac{p_k}{p_s}$
0,75	2,55	0,55	0,83
0,70	2,73	0,66	0,80
0,65	2,96	0,77	0,77
0,60	3,23	0,88	0,73
0,55	3,56	0,99	0,70
0,50	4,00	1,11	0,67
0,45	4,58	1,23	0,63
0,40	5,37	1,37	0,60

c) Med den fra Ekspansionskurven bekendte Værdi af A og den under a) omtalte Værdi $\frac{E}{p_s}$ af c_s findes $\frac{c_s}{A}$, og med denne kan man gaa ind i Tabellen og bestemme ζ_0 og $\frac{p_k}{p_s}$, som begge er Konstanter for Lerarten, uafhængige af Vandindholdet, saalænge man er nedenfor Svindgrænsen.

ζ_0 kan ogsaa bestemmes direkte ved Friktionsforsøg indenfor Ring (forhindret Sideudvidelse).

- 10) Med det bekendte Vandindhold i den naturlige Prøve bestemmes $\varepsilon = \frac{w}{100} \cdot \gamma$ (se 4).
- 11) Af Tryk-Poretalsdiagrammet findes paa Kompressionskurven den til ε svarende Værdi af p_s .
- 12) Med den under 9c) bestemte Værdi af $\frac{p_k}{p_s} = \text{Konstant}$ bestemmes derefter p_k for den naturlige Prøve.
- 13) Til Bestemmelse af Grundens Brudbelastning behøves desuden Kendskab til $\zeta_{II} = \text{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi_{II}}{2}\right)$. Denne er ogsaa en Konstant for Jordarten og kan bestemmes af

$$\zeta_{II} = \frac{p_k}{p_k + q_{d\max}} < \zeta_0.$$

Det synes ikke altid paalideligt at beregne ζ_{II} af ovenstaaende Formel, medmindre man har haft Terninger med flere forskellige Vandindhold og har valgt den mindste af de Værdier, som faas for disse. Værdien vil almindeligvis variere mellem 0.45 og 0.60.

For ζ_{II} har man ogsaa en højere Grænse gennem de Værdier, der eventuelt bestemmes ved direkte Friktionsforsøg, idet der i Ler i Virkeligheden ikke dannes egentlige Glidflader, men Deformationen foregaar plastisk.

- 14) Man kan herefter gaa over til at bestemme Brudbelastningen for en Lerkærne, som ligger under et Fundament og er indesluttet af Ler paa alle Sider.

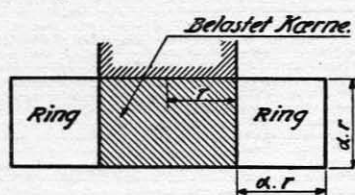


Fig. 9.

Terzaghi¹⁰⁾ tænker sig her et simplificeret Spændingsbillede (Fig. 9), idet han tænker sig Kærnens Sideudvidelse modvirket af en omgivende Ring af Jordarten, indenfor hvilken Ring Bruddeformationerne i det væsentlige foregaar.

For Sand regner Terzaghi $\alpha = 2$ (se Fig. 9) efter udførte Forsøg.

For Ler foreligger intet Forsøgsmateriale, men Terzaghi antager $\alpha = 1$. Usikkerheden i α har ikke stor Indflydelse paa Brudbelastningen.

- 15) Vi kender nu samtlige Faktorer, som er nødvendige for at bestemme Bæreevnen af Grunden. Som Eksempel skal nævnes Formelen for en cirkulær Grundflade, gældende for Ler i stivplastisk Tilstand og for en Belastning, der er hurtig i Forhold til den Tid, det tager at udligne de hydrodynamiske Spændinger i Leret, altsaa saaledes som Forholdene oftest er i Praksis.

Brudbelastning:

$$q_{0,g'} = \frac{p_k}{\zeta_{II}} \left(1 + \frac{\alpha}{2} + \zeta_0 - \zeta_{II} - \zeta_0 \zeta_{II} \right) = c \cdot p_k.$$

Brudbelastningen er altsaa proportional med Kapillartrykket for Leret med dets naturlige Vandindhold.

Da Størrelserne ζ_0 og ζ_{II} kun varierer indenfor ret snævre Grænser, vil Størrelsesordenen for Konstanten c være ca. 2 à 3.

Da Kapillartrykket ved Udrulningsgrænsen plejer at ligge ved ca. 3,5 kg/cm² for fede og 6—7 kg/cm² for sandrigere Lerarter, vil Brud-

¹⁰⁾ Erdbaumechanik, S. 241, Fig. 47.

belastningen ved Udrulningsgrænsen være henholdsvis ca. 7 à 10 kg/cm² og ca. 12 à 20 kg/cm².

16) Sætningerne.

Af Kompressionskurven:

$$\varepsilon = -C \cdot \ln(p_s + p_c) + c_1$$

faas

$$a = -\frac{d\varepsilon}{dp_s} = +\frac{C}{p_s + p_c} \infty + \frac{C}{p_s}$$

p_s og C er bekendt fra tidligere.

Sætningen s, lig Grænseværdien for Tiden $t = \infty$, udregnes under Forudsætning af, at Sideudvidelsen er helt hindret, og til Gengæld regnes over hele Kærnetværsnittet med samme lodrette Normaltryk som i Midten. Spændingsfordelingen bestemmer *Terzaghi*¹¹⁾ efter *Boussinesq* og *Strohschneider*.

Sætningen s hidrørende fra Sammentrykningen af Lagene mellem Dybderne Nul og z_0 er efter *Terzaghi*, idet σ_z er lodret Komposant af Trykket i Dybden z , ε_s Poretallet og q Belastningen pr. Arealenhed i Fundamentfladen:

$$s = \frac{a}{1 + \varepsilon_s} \int_0^{z_0} \sigma_z \cdot dz, \text{ hvor } \sigma_z = q(1 - \cos^3\varphi); \text{ tg } \varphi = \frac{r}{z}; \text{ tg } \varphi_0 = \frac{r}{z_0},$$

altsaa

$$\int_0^{z_0} \sigma_z \cdot dz = q \cdot r \left(2 - \text{tg } \frac{\varphi_0}{2} - \sin \varphi_0 \right) \quad (\text{I } \textit{Terzaghi's} \text{ tilsvarende Formel findes Fortegnsfejl}).$$

For $z_0 = \infty$ faas

$$\int_0^{\infty} \sigma_z \cdot dz = 2 \cdot q \cdot r.$$

$$s = \frac{2 \cdot a \cdot r}{1 + \varepsilon_s} \cdot q \quad \text{for } \begin{cases} t = \infty \\ z_0 = \infty \end{cases}$$

$$\frac{\int_0^{z_0} \sigma_z \cdot dz}{\int_0^{\infty} \sigma_z \cdot dz} = \frac{1}{2} \left(2 - \text{tg } \frac{\varphi_0}{2} - \sin \varphi_0 \right) = k.$$

Altsaa Sætningen for Grænsen z_0 er k Gange Sætningen for $z_0 = \infty$.

Kurven er optegnet paa Fig. 10, som kan være nyttig ikke alene

¹¹⁾ Erdbaumechanik, S. 223 og 258.

til Bedømmelse af, hvor stor Sætningen er ved en begrænset Dybde af de bærende Lerlag, men ogsaa til Bedømmelse af Virkningen af isolerede Lag, der ligger dybere nede (Differensen mellem to Ordinateer paa Kurven).

- 17) Naar Lermassen er sandblandet i ikke for høj Grad, kan man maaske betragte den som en Slags Beton, og naar der er den fornødne Mørtelmængde, er det i det væsentlige »Mørtelen« d. v. s.

SÆTNINGER FOR ENDELIG MÆGTIGHED AF LERLAGET SOM FUNKTION AF SÆTNINGEN FOR UENDELIG STOR MÆGTIGHED

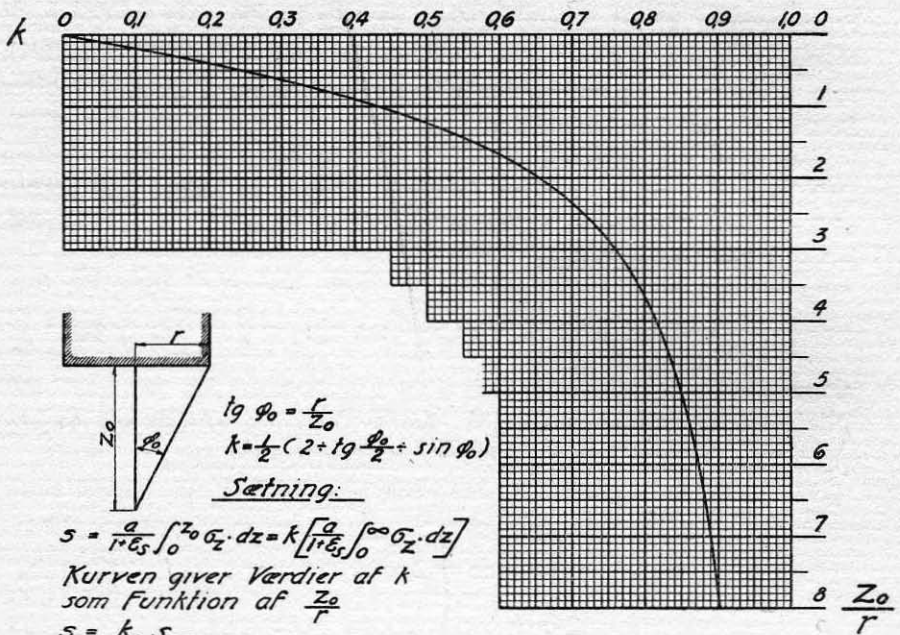


Fig. 10.

selve Lerets Styrke, der er det afgørende. Man kan derfor ganske roligt, som foreslaet af Terzaghi, frasigte de grove Partikler over 0,6 mm inden Terningprøver, Trykporetalsprøver o. s. v. Men naturligvis maa man foretage mekanisk Analyse af den naturlige Prøve og bestemme Vandindholdet i denne. Man maa da tage i Beregning, at en vis Vandprocent i Forhold til Tørvægten i hele den naturlige Lermasse svarer til en større Vandprocent i »Mørtelen« alene, og det er denne Vandprocent, der er afgørende.

Ved Beregning af »Sætningerne« kan man sikkert gaa ud fra, at Sandkornene $> 0,6$ mm, naar de er helt omgivet af Lermørtel, ikke

bidrager til Sammentrykningen, og derfor reduceres de for ren Mør-
tel beregnede Sætninger i Forhold til Indholdet af grovere Korn.

De sidstnævnte Regnemaader benyttedes ved Undersøgelserne af
Leret ved Göksu-Viadukten i Tyrkiet.

- 18) Tidens Indflydelse paa Sætningerne lader sig bedømme, naar Per-
meabiliteten er bekendt; denne kan bestemmes i Forbindelse med
Tryk-Poretalsdiagrammet.

Noget almindeligt kan der dog ogsaa siges herom. Sammentryknin-
gen er, saa længe man holder sig væsentligt under Brudbelastningen,
i Hovedsagen en Udpresning af Vand fra Porerne. Det hele er med
andre Ord en hydrodynamisk Proces, og man kan gaa frem efter
Modelloven. For samme Belastning i kg/cm^2 , samme Tilstand af
Leret, men n Gange saa stor Radius forandres kun Længdemaale-
stokken, medens Kraftmaalestokken og Trykkene forbliver ens; men
det hydrostatiske Fald ændres, idet Vandets Vej multipliceres med
 n , Tværsnittet med n^2 og Vandmængden med n^3 .

De Tidsrum, som er nødvendige for at fremkalde en bestemt Sæt-
ning s_1 for den store og den lille Belastningsflade, forholder sig
derfor som 1 til n .

Maksimalværdierne af Sætningerne, som naas for Tiden ∞ , for-
holder sig ligeledes som 1 til n , og de Tider, som er nødvendige til
at fremkalde en vis Brøkdæl af disse Maksimalværdier for de to
Fundamenter, forholder sig som 1 til n^2 . Heraf følger ogsaa, at den
store Fundamentflade kræver n^2 Gange saa lang Tid til at naa sin
fulde Sætning som den lille Fundamentflade.

Ved Udførelsen af en Prøvebelastning paa Ler maa man derfor være
forberedt paa, at de Sætninger, man faar ved en lille Grundflade,
bliver meget smaa i Forhold til de Sætninger, der faas for det virke-
lige Fundament og derfor vanskelige at maale, navnlig da det tager
lang Tid at faa den fulde Sætning, og at det desuden er vanskeligt
at holde den belastede Grund beskyttet mod Vejrligets Indflydelse.

Ved at anvende en større Grundflade og en dertil svarende større
total Belastning paa Prøvestemplet vil man naturligvis faa en større
og derfor bedre maalelig Værdi af Sætningen; men for dobbelt saa
stor Diameter af Stemplet maa man vente 4 Gange saa lang Tid, før
man kan faa sit Resultat.

Dette Forhold bliver af desto større Betydning, jo mindre Lerets
Permeabilitet er, altsaa i Almindelighed jo mere finkornet og uigen-
nemtrængeligt for Vand Leret er.

En fuldstændigere Oversigt over de ovenfor behandlede Forhold findes
i følgende Skrifter:

Terzaghi: The Science of Foundations — its Present and Future (Transactions of Am. Soc. of C.E. 1929, Pag. 270).

Bierbaumer: Vorschläge für die Beurteilung von Flach- und Pfahlgründungen (Zeitschr. d. Österreich. Ing. u. Arch. Verein 1929, Heft 19/20, 27/28 og 29/30).

Foruden de i Fodnoterne iøvrigt nævnte Kilder kan, især hvad angaar tilladelig Belastning af de kohæsionsløse Jordarter og Trykfordelingen i Grunden, henvises til følgende:

Buisman: Eenige beproevingsmethoden ter bepaling van den inwendigen wrijvingsweerstand van grondsoorten. De Ingenieur 1928, Nr. 21.

Itersen: Tragfähigkeit des Baugrundes. Bauing. 1928, Heft 47—48.

Kögler: Belastung des Baugrundes. Bauing. 1927, Heft 44.

Kögler u. *Scheidig*: Druckverteilung im Baugrunde. Bautechnik, 1927. Heft 29 u. 31, 1928, Heft 15 u. 17, 1929, Heft 18 u. 52.

Krey: Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes, 3. Aufl., Berlin 1926, med udførlig Litteraturfortegnelse.

Fugl Meyer: Funderingsproblemer i Floder. »Ingeniøren« 1929, Nr. 16.

Pihera: Druckverteilung, Erddruck, Erdwiderstand, Tragfähigkeit. Wien 1928.

Press: Druckverteilung im Baugrunde. Bauing. 1929, Heft 32.

Terzaghi: Principles of final soil classification. Public Roads, Maj 1927, samt flere mindre Artikler i samme Tidsskrift i de sidste Aar.

Terzaghi: Eng. News Record. 1925 no. 19, 20, 23, 25, 26, 27.