

Fundering, s. 1 - 206

G. Schönweller

Lærebøger

-

1935

Dette dokument udgør en del af et større dokument, der af hensyn til downloadstiden er opdelt i ét eller flere særskilte dokumenter. De(n) øvrige del(e) af dokumentet kan hentes i biblioteket på [danskbyggeskik.dk](http://danskbyggeskik.dk) og findes via søgefunktionen hertil.

G. Schönweller

---

Fundering

eller  
ring

*H. Professor J.T. Lundbye*  
*Vendigt fra*  
*G. Schönweller.*

# F U N D E R I N G

GRUNDLAG FOR FORELÆSNINGER  
PAA DEN POLYTEKNISKE LÆREANSTALT,  
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

AF

G. SCHÖNWELLER

*Reponeret i:*  
Den polytekniske Lærestalts  
teknisk-hygieniske Samling.  
*af Professor J.T. Lundbye*

UDGIVET AF

DEN POLYTEKNISKE LÆREANSTALT,  
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

1935

DEN foreliggende Bog er skrevet som Lærebog for studerende ved Danmarks tekniske Højskole og danner Grundlag for Bygningsingeniørernes Undervisning i den under Fundering hørende Del af Vandbygningsfagene.

For saa vidt angaar de Dele af Bogen, der omhandler Konstruktion og Udførelse af Fundamenter og Undervandsbygværker, er Indholdet i Hovedsagen det samme som det, der findes i de tidligere Udgaver af min »Fundering«. Noget af Stoffet er dog omarbejdet, og der er foretaget Ændringer og Tilføjelser svarende til, hvad der er fremkommet af nyt paa de forskellige Omraader. Afsnittene om Jordbundens Forhold under Belastning og Byggegrunds Bæreevne er ny, og det samme gælder Afsnittet om Jordbundsundersøgelser. I dette sidstnævnte Afsnit er der, men i meget sammentrængt Affattelse, gjort Rede for den Slags geotekniske Undersøgelser, som man i den senere Tid er kommet ind paa ved Behandling af Problemerne om Byggegrunds Bæreevne og hvad der staar i Forbindelse dermed.

Endnu skal det nævnes, at Jordtrykslæren er taget med i den foreliggende Bog. Aarsagen hertil er, at Undervisningen i Jordtrykslære for Bygningsingeniører er blevet henlagt til Undervisningen i Vandbygningsfagene og dermed til den Del af Vandbygningsfagene, der omfatter Fundering.

Danmarks tekniske Højskole bringer jeg hermed min Tak, fordi den har paataget sig Udgivelsen af Bogen.

København, Juli 1935.

*G. Schönweller.*

## INDHOLDSFORTEGNELSE

§	Side
1—2. Indledning .....	1
<b>I. Jordbundsundersøgelser.</b>	
3. Jordbundsundersøgelsens Formaal .....	2
<b>1. Boring.</b>	
4—9. Boreredskaber .....	2
<b>2. Jordbundsundersøgelse med Sonde.</b>	
10—11. Almindelig Sonde. Spidsbor .....	6
<b>3. Jordbundens Egenskaber.</b>	
12—13. Klippebund. Jord .....	8
14. Porøsitet. Hulrumsforhold. Poretal .....	8
15. Fortætningsgrad. Relativ Tæthed .....	9
16—17. Poretal .....	9
18—20. Rumvægt .....	11
21. Jorddelenes Størrelse og Form .....	12
22—28. S sammensætning efter Kornstørrelse .....	12
29—30. Kornstørrelsesgrupper .....	17
31. Den virksomme Kornstørrelse. Uensformighedstal ..	19
32—35. Jordbundens Vandindhold .....	19
36—37. Friktion. Kohæsion .....	22
<i>Jord med luftfyldte Porer.</i>	
38—39. Indre Friktion .....	24
40—42. Tryk og Poretal .....	26
<i>Jord med vandfyldte Porer.</i>	
43—44. Porevandets Indvirkning paa Jorden .....	29
45—51. Kapillartryk. Kohæsion .....	30
52. Udkvældning .....	33
53—56. Svindgrænse. Udtørring .....	33

## VI

§	Side
57—58. Plastisk Jord .....	35
59—61. Konsistensgrænser. Plasticitetstal .....	36
62. Kegleprøve .....	37
63. Vandbestandighedsprøve .....	38
64. Indre Friktion .....	38
65—66. Tryk og Poretal .....	40
67. Jordbundens Permeabilitet .....	42

## II. Tilladelig Belastning paa Byggegrund.

68—72. Fremgangsmaader til Bestemmelse af tilladelig Belastning .....	44
---	----

*De forskellige Slags Byggegrund.*

73. Klippebund .....	47
74. Sand og Grus .....	48
75. Flydesand .....	49
76—81. Ler .....	52
82. Mergel .....	56
83. Blandinger af Ler og Sand .....	56
84. Klæg .....	56
85. Blandinger af Ler, Sand og Sten .....	56
86. Tørvejord .....	56
87. Opfyldt Grund .....	56
88—89. Almindelig anvendte tilladelige Belastninger .....	57

## III. Jordtryk.

90—95. Aktivt Jordtryk. Jordspændinger. Passivt Jordtryk. ..	61
96. Forskydningsmodstand ved Friktionsjord .....	63
97. Forskydningsmodstand ved kohæsiv Jord .....	63
98. Rumvægte og Skræntvinkler .....	65
99. Friktionsvinkler og Kohæsion .....	65
100. Forskydningsmodstand i Berøringsfladen mellem Bygværket og Jorden .....	65
101—103. Jordtrykkets Retning .....	67
104. De forskellige Jordtryksteorier .....	69

*Coulomb's Jordtryksteori.*

105 .....	70
106. Aktivt Jordtryk .....	70
107. <i>Culman's E-Linie</i> .....	71

## VII

§	Side
108. Jordoverfladen vandret, Væggen lodret, $\delta = 0$ .....	72
109. Sammenligning med Vædskestryk .....	73
110. Jordtryksdiagram .....	74
111—112. Belastet Jordoverflade .....	74
113. Vilkaarlig formet Væg og Jordoverflade .....	76
114—116. <i>Poncelet's</i> Konstruktion. Jordtryksformler .....	78
117. Jordtrykkets Fordeling .....	85
118. Passivt Jordtryk .....	88
119. <i>Culmann's E-Linie</i> .....	88
120. Jordoverfladen vandret, Væggen lodret, $\delta = 0$ .....	89
121—122. Væg og Jordoverflade hældende. Jordtryksformler..	90
123. Jordtrykkets Fordeling .....	93

124. Uoverensstemmelse mellem Forudsætningerne ved <i>Coulomb's</i> Jordtryksteori .....	94
--	----

*Jordspændinger.*

125. Normalspænding og Forskydningsspænding .....	96
126. Spændingsellipsen .....	97
127. Jordtryk som Grænseværdier af Jordspænding ....	97
128—129. Bestemmelse af Jordtryk .....	99
130. Glidefladens Retning ved Væggen .....	102
131. Glidefladens Retning ved Jordoverfladen .....	103
132. Spændingsretning og Glidefladeretning mellem Jordoverfladen og Væggen .....	105
133. Matematisk Behandling af Jordtryksproblemet .....	105

*Rankine's Jordtryksteori.*

134. Forudsætningerne ved <i>Rankine's</i> Jordtryksteori .....	111
135. Bestemmelse af Jordtrykket .....	113
136. Sammenligning mellem <i>Coulomb's</i> og <i>Rankine's</i> Jordtryksteorier .....	118

*Jordtryksberegning med Anvendelse af krumme Glideflader.*

137 .....	119
-----------	-----

*Jordtryksberegning med Hensyntagen til Kohæsionens Indflydelse.*

138. Kohæsionens Betydning ved Jordtryksberegning ....	125
139. Bestemmelse af Jordtrykket. Lodret Væg, vandret Jordoverflade .....	127
140. Jordtrykkets Fordeling .....	128
141. Væg og Jordoverflade hældende .....	128

§	Side
142. Frit staaende kohæsiv Jord .....	129
143. Jordtryk fra friktionsløs Jord .....	131
144. Krumme Glideflader .....	132
<i>Særlige Tilfælde af Jordtryksberegning.</i>	
145. Jordtryk fra lagvis uensartet Jord .....	134
146. Jordtryk sammen med Vandtryk .....	135
147. Jordtryk paa Vinkelstøttmure .....	138
148. Jordtryk under Aflastningsplade .....	141
149—153. Jordtryk paa Forankringsplader .....	143

#### IV. Jordbundens Forhold under Belastning.

##### A. FLADEBELASTNING.

###### 1. Arbejdslinie. Tryk og Nedsynkning.

155. Jordbundens Arbejdslinie .....	151
156. Tilladelig Belastning .....	152
158. Tryk og Nedsynkning ved Friktionsjord .....	154
159. Tryk og Nedsynkning ved kohæsiv Jord .....	156

###### 2. Statisk Bestemmelse af Jordbunds Bæreevne.

160. Anvendelse af Jordtryksteori .....	158
161. Brudgrænse-Formler; Friktionsjord .....	158
162. Brudgrænse-Formler; kohæsiv Jord .....	160
163. Bestemmelse af Brudgrænsen ved Jordtryksberegning .....	162

###### 3. Det til Jordbunden overførte Tryks Fordeling.

164. Trykkets Fordeling langs Belastningsfladen .....	165
165. Spændingsfordelingen i Jordbunden .....	167

###### 4. Bestemmelse af Jordbunds Bæreevne ved Prøvebelastning.

166. Anvendelse af Prøvebelastning .....	173
167. Nedsynkningens Afhængighed af Trykfladens Størrelse .....	174
168. Nedsynkningens Afhængighed af Trykfladens Form .....	177
169. Belastningstidens Indflydelse .....	178
170. Trykfladens Størrelse ved Prøvebelastning .....	178
171. Prøvebelastningens Udførelse .....	179
172. Nedsynkningstal .....	181
173. Bestemmelse af Nedsynkning uden Prøvebelastning .....	183

§	Side
---	------

#### B. PÆLEBELASTNING

174. Overførelse af Pæletryk til Jordbunden .....	184
<b>1. Bestemmelse af Pæles Bæreevne ved Prøvebelastning.</b>	
175. Arbejdslinie .....	186
176. Udførelse af Prøvebelastning .....	189
<b>2. Bestemmelse af Pæles Bæreevne ved Ramning.</b>	
177—178. Rammingsformler til Bestemmelse af Pæles Bæreevne .....	190
179. Anvendelse af Rammingsformlerne .....	197
<b>3. Statisk Beregning af Pæles Bæreevne.</b>	
180. Formler til statisk Beregning af Pæles Bæreevne .....	202
181. Pæles Modstand mod Optrækning .....	205

#### V. Fundamenter, der hviler direkte paa Byggegrunden.

##### A. Fundamenter paavirkede alene af lodrette Kræfter.

182. Massive Fundamenter .....	207
183. Bøjelige Pladefundamenter .....	210
184. Tilnærmende Bestemmelse af Reaktionsfordeling .....	217

##### B. Fundamenter og Bygværker paavirkede af skraat rettede Kræfter.

185. Beregning i Almindelighed .....	220
186. Beregning af Kajmure .....	221
187. Vandtryk paa Kajmure .....	222
188. Særlig Stabilitetsbetingelse .....	228
189. Spændinger i en Kajmurs Snitflader .....	230
190. Forskydningsstabilitet .....	232
191. Stabilitetsundersøgelse for skraat rettet Tryk i Fundamentsfladen .....	236

#### VI. Pælefundamenter.

192. Valg af Pæledimension .....	241
193. Overførelse af Bygværksbelastninger til Pælene .....	242

§	Side
<i>Beregning af Pælefundamenter.</i>	
194. Beregning i Almindelighed. Beregningsforudsætninger	245
195. Pæleværk af indbyrdes parallelle Pæle .....	247
196. Pæleværk af Pæle med rækkevis forskellig Retning ..	250
197. Simple Pæleværker .....	254
198. Anvendelse af Forankring .....	258
199. Særlig Stabilitetsbetingelse .....	259
200. Kajmur paa Pæleværk .....	260

## VII. Samling af Konstruktionsdele af Tømmer.

201. ....	263
-----------	-----

## VIII. Faskiner.

202. ....	278
-----------	-----

## IX. Pæle.

### 1. Ramning af Pæle.

203. Almindelig Rambuk .....	281
204—205. Smaa Rambukke .....	285
206. Rambukke med hurtigt paa hinanden følgende Ramslag	286
207. Rammearbejdets Udførelse .....	288

### 2. De forskellige Slags Pæle og deres Tildannelse til Ramning.

208. Træpæle .....	292
209. Jernpæle .....	297
210. Jernbetonpæle .....	301
211. Stampebetonpæle .....	304

### 3. Nedskylning af Pæle.

212. ....	307
-----------	-----

### 4. Skruerpæle.

213. ....	310
-----------	-----

§	Side
<b>X. Fremstilling af Byggegrube.</b>	

214. Udgravning af Byggegrube .....	312
215. Indfatningsvægge for Byggegruber over Grundvandet	313
216. Byggegruber under Grundvandet .....	315
217. Grundvandsænkning .....	320
218. Delvis Tørlægning af Byggegrube .....	321
219. Frysemetoden .....	323
220. Fangedæmninger .....	324
221. Fangedæmninger af Jordfyld, uden Indfatningsvægge	327
222. Fangedæmninger af Jordfyld, med een Indfatningsvæg	328
223. Kassefangedæmninger .....	329
224. Fangedæmninger paa Klippebund .....	332
225. Særlige Konstruktioner af Fangedæmninger .....	335
226. Byggegrubens Tørholdelse .....	338

## XI. Udførelse af Betonbygværker.

227. Udførelse i tørlagt Byggegrube .....	341
228. Betonstøbning under Vand .....	343
229. Indfatninger for Betonstøbning under Vand .....	352
230. Betonblokke .....	354
231. Sænkekasser .....	361
232. Fremstilling af Jernbetonsænkekasser .....	376
233. Sænkekasser af Murværk .....	378

## XII. Sænkebrønde.

234. Fremstilling af Bygværker ved Hjælp af Sænkebrønde	381
235. Sænkebrøndes Indretning .....	387
236. Udgravning i Sænkebrønde .....	392

## XIII. Trykluffundering.

237. Sænkebrønde med Trykluff .....	397
238. Trykluffsænkebrøndes Indretning .....	399
239. Arbejdskammerets Forsyning med Trykluff .....	405
240. Dykkerklokker .....	408
241. Særlige Forhold ved Arbejde i Trykluff .....	412
242. Dykker-Udrustning .....	418



§	Side
<b>XIV. Stenfundamenter, Sandfundamenter.</b>	
243. Stenfundamenter .....	422
244. Sandfundamenter .....	424
 <b>XV. Fundamenter af Slyngværk.</b>	
245. ....	430
 <b>XVI. Forstærkning af Byggegrund.</b>	
246. ....	432

## INDLEDNING

1. Ved et Bygværks Fundament forstås i Almindelighed den Del af Bygværket, gennem hvilken de paa Bygværket virkende Kræfter — Egenvægt, Jordtryk, Vandtryk, Nyttelast o. s. fr. — overføres til Jordbunden.

I Reglen udføres et Bygværks Fundament af anden Slags Materiale end selve Bygværket. I mange Tilfælde kan der ikke nøjere skelnes mellem, hvad der er at betragte som Bygværkets Fundament, og hvad der maa regnes at høre til selve Bygværket. I Husbygning betegnes ofte den Del af en Mur, der ligger neden under den nederste Etages Gulv, som Murens Fundament. Ved en Kajmur af Betonblokke, hvor Underlaget for Blokmuren dannes af et paa Bunden liggende Lag Sten, er dette Fundamentet for Blokmuren. Ved et Bygværk, der hviler paa et Betonlag, der atter bæres af Pæleværk, regnes baade Betonlaget og Pæleværket at høre til Fundamentet. Det forekommer ogsaa, at et Bygværk ikke har noget egentlig Fundament, idet Bygværket hviler direkte paa Jordbunden, saaledes som Tilfældet f. Eks. er ved en Tørdok, hvor Dokbunden hviler direkte paa Byggegrunden.

Læren om Fundering omhandler Konstruktion og Udførelse af Fundamenter og omhandler tillige Fremstillingen af saadanne specielle Bygværker eller Bygværksdele, hvis Konstruktion og Udførelse er bestemt af, at de skal føres dybt ned i Jordbunden eller ligger under Vand.

2. Ved Belastning af Jordbund vil denne altid give noget efter for det fra Bygværket overførte Tryk, og Bygværket, eller dets enkelte Dele hver for sig, vil derfor synke («sætte sig») noget. Hvor stor Eftergiven af Byggegrunden, der i givet Tilfælde kan betragtes som tilladelig, er bestemt af, at Bygværket ikke maa lide Skade ved den Nedsynkning, der er en Følge af Byggegrundens Eftergiven. Den for hvert foreliggende Tilfælde tilladelige Belastning paa Byggegrunden er derfor bestemt dels af Jordbundens Beskaffenhed (Byggegrundens Bæreevne), dels af det paagældende Bygværks Art og Konstruktion.

## I. JORDBUNDSUNDERSØGELSER.

3. **Jordbundsundersøgelsens Formaal.** Jordbundens Eftergiven for Tryk afhænger dels af Trykkets Størrelse og Virkemaade, dels af Jordbundens Beskaffenhed.

For at kunne bestemme, hvilke Dimensioner man skal give et Bygværks Fundament, maa man have Kendskab til Jordbundsforholdene det paagældende Sted, navnlig til Udstrækning og Tykkelse af de forskellige Jordlag og til de forskellige Slags Jordbunds Egenskaber.

Forud for Projekteringen af et Byggeforetagende bør der derfor finde en Undersøgelse af Byggegrunden Sted. Hovedformaalet med en saadan Grundundersøgelse er at tilvejebringe de Oplysninger om Jordbundens Beskaffenhed, der er nødvendige for, at man kan fastsætte den for det paagældende Bygværk tilladelige Belastning paa Byggegrunden. Ved Siden heraf skal de ved Grundundersøgelsen tilvejebragte Oplysninger om Bundforholdene tjene til Vejledning ved Valg af Fundamentskonstruktion og ved Valget mellem de forskellige Fremgangsmaader, der kan benyttes ved Funderingens Udførelse.

Den Dybde, til hvilken Grundundersøgelsen føres ned, bør altid være en Del større end Funderingsdybden; det er nemlig hovedsagelig de under Funderingsdybden liggende Jordlags Beskaffenhed, der er bestemmende for Grundens Bæreevne. Hvor det drejer sig om store og kostbare Bygværker, der vil lide Skade, hvis der sker større Nedsynkning end paaregnet, bør Grundundersøgelsen føres ned til saa stor Dybde, at man af Undersøgelsens Resultater i Forbindelse med Oplysninger om Stedets almindelige geologiske Forhold kan danne sig et fuldstændigt Billede af Jordbundsforholdene under og omkring Bygværkets Fundament.

Til Brug ved Jordbundsundersøgelserne maa der optages Prøver af Jordlagene paa Byggestedet. Fremskaffelsen af saadanne Jordprøver kan ske ved Boring i Jorden eller ved Gravning af Brønde.

### 1. Boring.

4. **Jordboring** foregaar ved, at man med dertil indrettet Værktøj tilvejebringer forholdsvis snævre Huller i Jorden og fra disse Huller optager Prøver af Jordlagene. Borehullets Vidde vælges i Reglen mellem 5 cm og 20 cm. Ved Boring i fast Bund kan man i Almindelighed nøjes med forholdsvis snævre Borehuller. I blød Bund, og navnlig i Tilfælde af, at der skal foretages mere omfattende Undersøgelser af de fra Bore-

hullet optagne Jordprøver, og man derfor har Brug for store og sammenhængende Jordprøver, maa der anvendes vide Borehuller.

5. **Almindelige Jordbor.** Efter Jordbundens Beskaffenhed og til dels ogsaa efter som Boreddybden er stor eller lille, anvendes forskellige Slags Jordbor.

Til forholdsvis smaa Boreddybder anvendes ofte det i Fig. 1 viste *Tallerkenbor*. Nedføring af Boret sker med Haandkraft ved Drejning af Boret og samtidig Tryk paa Borestangen, idet to Mand har fat i den foroven paa Borestangen siddende Tværstang. For hver Drejning 2—3 Omgange trækkes Boret op. I ikke særlig fast Bund, hvor den efter en Skrueflade med ringe Stigning formede Tallerken gaar nogenlunde let igennem Jordmassen, kan man faa ret store sammenhængende Klumper af Jorden op med et saadant Bor. Boret kan være forsynet med en cylindrisk Kappe langs Tallerkenens Rand. Denne Kappe tjener til at hindre, at den ved Tallerkenens Nedskruining løsnede Jord falder af, naar Boret hejses op fra Borehullet.

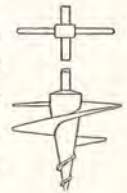


Fig. 1.

Det i Fig. 2 viste *Snitbor* og det i Fig. 3 viste *Sneglebor* (Spiralbor) føres ned i Jorden paa lignende Maade som Tallerkenboret. Snitboret har Form som en Ske og er forneden forsynet med kegleformet Spids med Skruegevind. Snegleboret egner sig til Boring i fast lejret Ler og



Fig. 2. Fig. 3.

Blandinger af Ler og Sand. Snitboret kan det være fordelagtigt at bruge til Boring i blødt Ler, Klægbund, Tørvebund o. lign. Til Optagning af Jordprøver i større Klumper egner disse Bor sig mindre godt.

Til Jordbundsundersøgelse i forholdsvis blød Bund, som f. Eks. plastisk Ler, Klæg, Tørvejord, er de forskellige Slags *Cylinderbor* velegnede. Det i Fig. 4 viste Cylinderbor bestaar af en med en Slidse forsynet cylindrisk Kappe, der forneden har en lidt skrueformet, hvælvet Bundplade. Naar man drejer Boret og samtidig trykker det ned i Jordbunden, afskrælles der Jord med Kappens og Bundpladens skærpede Kanter. De afskrællede Jorddele bliver liggende inden for Kappen og kan tages ud, naar Boret er løftet op fra Borehullet. Til særlig blød Bund og til sandet Jord anvendes Cylinderbor med en smal Slidse. Til Bund af fastere Beskaffenhed bruges Cylinderbor med bred Slidse og mere skeformet Bundplade. Den ved Boringen løsnede Jord trænger ind i Cylinderen baade forneden og fra Siden gennem Slidsen. Det kan derfor være noget vanskeligt af de med



Fig. 4.

denne Slags Bor optagne Jordprøver at danne sig et Skøn over Jordens Lejringsforhold.

Til Optagning af Jordprøver, hvoraf det kan ses, hvorledes Jorddelene ligger i den naturlige Aflejring, kan ved blød Bund anvendes *Ventilbor* (Fig. 5). Ventilboret består af et Rør, der forneden er forsynet med en Ventilklap. Ved at denne lukker sig, naar Boret løftes, hindres Jorden i at glide ud af Røret. Boret trykkes ned i Jorden uden Drejning.

Til Optagning af sammenhængende Jordprøver egner det i Fig. 6 viste *Stempelbor* sig bedre end Ventilboret, særlig hvor det gælder Optagning af Prøver af forholdsvis fast Jordbund. Stempelboret består af et med bevægeligt Stempel forsynet Rør. Det føres ned i Jorden ved Tryk eller Slag paa Rørets øverste Ende, hvorved den i Røret indtrængende Jord trykker Stemplet op i Røret. Naar Boreapparatet derefter skal tages op fra Borehullet, fastgøres Stempelstangen til den øverste Ende af Røret, hvorved den under Stemplet siddende Jordprop hindres i at glide ud under Optagningen af Boreapparatet.



Fig. 5.



Fig. 6.

**6. Mejselboring, Skylléboring.** Til Boring i *Klippebund* og til Boring gennem de i et Jordlag eventuelt forekommende Sten benyttes Mejselboring. Ved Mejselboring (Stødboring) sønderdeles Stenmateriale ved gentagne Stød med en Mejsel mod Borehullets Bund. Det sønderdelte Materiale (Boremelet) bringes op fra Borehullet enten ved Anvendelse af et Ventilbor eller bedre ved Skylning med Vand. Sker Optagning af Boremelet ved Skylning, er det ordnet saaledes, at der hele Tiden under Boringen tilføres Trykvand gennem et Tilledningsrør, der udmunder ved Bunden af Borehullet. Vandet fra Tilledningsrøret oplømmer Boremelet og strømmer op gennem Borehullet. Ved dettes Kant samles Vandet i et Kar, hvori Boremelet bundfældes. Vandtilførslen forneden tjener tillige til at holde Mejslen afkølet. Det kan være indrettet saaledes, at Borestangen, til hvilken Mejslen er befæstet, dannes af et Rør, hvorigennem Vandtilførslen sker.

Mejslen er befæstet til den nederste Ende af Borestangen. Efter Stenartens Haardhed anvendes forskelligt formede Mejsler og forskellig Skærpningsvinkel for Æggen. Til blødere Stenarter (f. Eks. Kalksten) bruges almindelig Fladmejsel (Fig. 7 a) og Skærpningsvinkel paa 90°. Til haarde Stenarter bruges 120° Skærpningsvinkel.

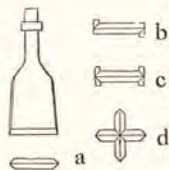


Fig. 7.

Den almindelige Fladmejsel slides mere ved Æggens Ender end paa Midten, hvorved der fremkommer opstaaende Partier ved Borehullets Omkreds. Dette kan undgaas ved at bruge Mejsel med Z-formet eller dobbelt T-formet Æg (Fig. 7 b og 7 c). Undertiden bruges Krydsmejsel (Fig. 7 d) eller Stjernebor med 3 eller flere radialt stillede Ægge.

Nedføring af Boret sker ved, at Borestangen med den paa denne siddende Mejsel løftes et Stykke og derefter falder frit. Ved hvert af Mejslens Stød sønderdeles noget af Stenmateriale. For hvert Stød drejes Borestangen lidt, saaledes at Materialets Sønderdeling sker jævnt over hele Borehullets Bund.

Mejselboring anvendes ikke alene til Boring i Klippebund og gennem Sten, men ogsaa til Boring i al Slags Jord, og da i Forbindelse med Skylning til at bringe det med Mejslen løsnede Materiale op fra Borehullet. Boringemetoden kaldes da ofte for *Skylléboring*. Ved Boring gennem Sandlag og løst lejret Jord kan Behandlingen med Mejsel udelades, idet Skyllenvandet alene er i Stand til at løsne Jorden, saaledes at Jorddelene oplømmes. En saadan Skylléboring er ofte billigere end de andre nævnte Boremetoder. Som Undersøgelingsboring betragtet er der imidlertid den Mangel ved Skylléboring, at man kun faar ret ufuldstændige Oplysninger om Jordlagenes Beskaffenhed og om deres Lejringsforhold og Fasthed. Jordprøverne faas nemlig ved Bundfældning af de i Skyllenvandet oplømmede Jorddele og giver derfor kun Oplysning om, hvilke Bestanddele Jordlaget indeholder. Ved Boring i Klippebund spiller dette Forhold ingen væsentlig Rolle, idet man ved Undersøgelse af det af Skyllenvandet bundfældede Boremelet let kan afgøre, hvilken Stenart man har med at gøre — Kalk, Granit, Sandsten, Lerskifer o. s. v. — og idet dette er tilstrækkelig Oplysning, naar Formålet med den paagældende Jordbundsundersøgelse alene er at bestemme Grundens Bæreevne.

**7. Kronebor.** Hvis det i særlige Øjemed (f. Eks. ved petrografiske Undersøgelser) ved Boring i Klippebund er nødvendigt at fremskaffe hele Stykker af det Stenmateriale, hvoraf Klippen består, anvendes Kronebor. Kroneboret består af et Rør, ved hvis nedre Ende der er fastskruet et Borelegeme af hærdet Staal. Til Boring i blødere Stenarter kan Borelegemets ringformede Kant være tildannet som et savtakket Skær. Til haardere Stenarter bruges et Skær bestaaende af sorte Diamanter, der indsættes i Borekronen, forinden denne hærdes (Fig. 8). Nedføring af Boret sker ved, at Boret drejes, idet det ved Rørets Vægt

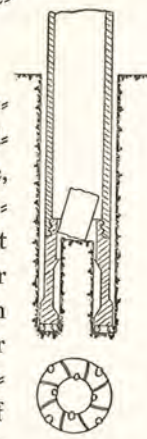


Fig. 8.

eller ved yderligere Belastning trykkes mod Borehullets Bund. Der fremstilles herved et ringformet Borehul med en massiv Kærne inden i Røret. Kærnen løsnes af i mindre Stykker, og disse tages op med en Tang. Under Boringen tilføres Skyllvand til Bortfjernelse af Boremelet.



Fig. 9.

8. Ved de almindelige Boreapparater sidder Boret fastskruet paa en *Borestang*. Boret har foroven en skrueskaaret Tap, Borestangen forneden en tilsvarende skrueskaaret Muffe. Forbindelsen kan være sikret ved en Split, saaledes at Boret, naar der drejes tilbage, fordi Boret er kommen til at sidde for fast i Jorden, hindres i at blive skruet løs fra Borestangen.

Borestangen er af firkantet Jern og delt i kortere Stykker, saaledes at Borestangen kan forlænges, efterhaanden som Boringen skrider frem. Forbindelsen mellem de enkelte Stykker af Borestangen kan være Skruetap og Skruemuffe, eller den kan udføres som vist i Fig. 9. Stængernes Ender er her tildannet som skraa Blade, der sammenspændes med 2 Skruetapper og en stramt tilpasset, firkantet Skydemuffe.

9. Foringsrør. Ved Boring igennem almindelige Jordlag maa der anvendes Foringsrør til Begrænsning af Borehullet mod den omgivende Jord og til at hindre Jorden i at falde ned i Borehullet. Ved Boringen drejes, løftes og sænkes Boreredskabet inde i Foringsrøret. Til Foringsrør anvendes mest svejste Rør eller valsede Staalrør. De enkelte Rørstykker (2 til 5 m lange), hvoraf Foringsrøret dannes, samles enten ved almindelig Skruemuffe eller med løs Muffe (Fig. 10). Ved Anvendelse af en Rørsamling som vist i Fig. 11 opnaas, at saavel Rørets udvendige som dets indvendige Flade bliver glat. Det nederste Rør kan forsynes med en Rørsko med et Skær. Foringsrøret trykkes eller rammes ned. Under Nedramningen maa den øverste Ende af Røret beskyttes med en Klods af haardt Træ, paa hvilken Ramslaget virker.

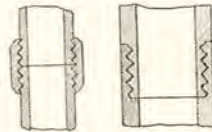


Fig. 10.

Fig. 11.

Ved Boringer til forholdsvis ringe Dybde, f. Eks. indtil 2 m, i fast leret Bund kan Foringsrør undværes.

## 2. Jordbundsundersøgelse med Sonde.

10. Mindre indgaaende Bundundersøgelser kan foretages ved Hjælp af en *Sonde*. Sonden kan simpelthen være en forneden tilspidset Stang af Rundjern. Den drives ned i Grunden ved Slæg med Kølle, idet man samtidig drejer den frem og tilbage. Af Modstanden mod Sondens Ned-

trængen kan man danne sig et Skøn over Bundens større eller mindre Fasthed. Naar Sonden trækkes op, vil der, ved leret Bund, klæbe Jorddele ved Stangen; i Sandbund bliver Sonden blankslidt. Herved kan der med Sonden faas lidt Oplysning om Jordbundens Beskaffenhed. Noget fyldigere Oplysninger om Jordbundens Beskaffenhed kan faas, hvis man forsyner Sonden med smaa skraat nedadrettede Fordybninger (Lommer), med f. Eks. 30 cm indbyrdes Afstand. I disse Lommer vil der blive siddende noget af den Jord, som Sonden har været i Berøring med ved Optrækningen af den.

11. *Spidsbor*. En særlig Konstruktion af Sonde er det i Fig. 12 viste Sondebør (ogsaa kaldet *Spidsbor*). Det bestaar af en Jernstang, til hvis nederste Ende er befæstet et spidst tildannet Spiralbor. Sondeboret benyttes særlig i de Tilfælde, hvor man skal foretage mange Undersøgelser af et forholdsvis dybt liggende Jordlag, og hvor Undersøgelse ved egentlig Boring derfor bliver ret bekostelig. Sondeboret føres til at begynde med ned i det paagældende Jordlag alene ved Belastning, idet man anbringer Vægte, 5 til 10 kg ad Gangen, paa Stangens øvre Ende. Naar Belastningen er naaet til f. Eks. 100 kg, og Sondeboret er ophørt med at synke for Belastning alene, føres det videre ned i Jordbunden ved Drejning af Boret. Naar man iagttager, hvor meget Sondeboret synker, først for hver Belastningsforøgelse og derefter for et vist Antal Omdrejninger, kan man ved Sammenligning mellem Resultaterne af tilsvarende Iagttagelser de forskellige Steder, hvor Sondeboret er blevet ført ned, danne sig et Skøn over Grundens relative Fasthed disse Steder. Ved Optagningen af Sondeboret faas en Jordprøve op fra det Jordlag, hvortil Sondeboret er naaet ned, idet der bliver noget Jord siddende i Spiralborets Skruægænger.

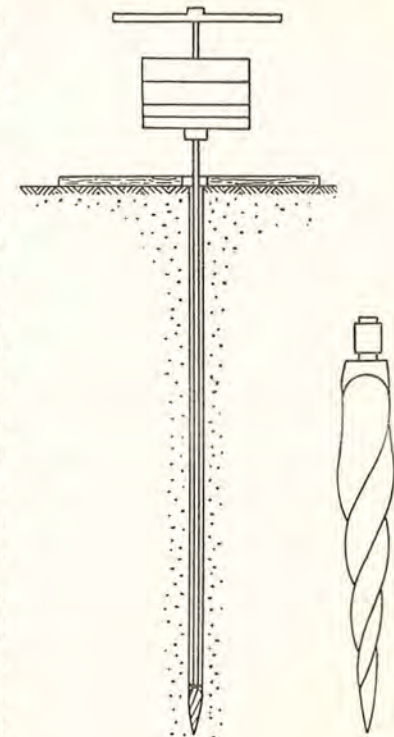


Fig. 12.

### 3. Jordbundens Egenskaber.

12. Med Hensyn til de forskellige Jordbundsarters Egenskaber som Byggegrund kan der her skelnes mellem to Hovedgrupper af Byggegrund, den ene omfattende de forskellige Arter *Klippebund*, den anden omfattende alle de Formationer, for hvilke der benyttes Fællesbetegnelsen: *Jord*.

I funderingsteknisk Henseende kan Klippebund — eruptive Bjergarter og sammenkittede Sedimenter — saa godt som altid betragtes som fuldstændig fast Bund. Klippebundens Styrke er nemlig som Regel større end eller lige saa stor som Styrken af det Byggemateriale, hvoraf Bygværkets Fundament er udført, og de af Trykket fra Bygværket forårsagede Formforandringer af Klippegrunden er ganske smaa og af samme Størrelsesorden som de Formforandringer af Bygværkets Konstruktionsdele, der forårsages af de paa disse virkende Kræfter. De forskellige Arter Klippebund behøver derfor ikke nærmere Omtale her.

De Paavirkninger, som almindelige *Jordarter* er i Stand til at modstaa, er derimod betydelig mindre end de tilladelige Spændinger for de Materialer, hvoraf Bygværkets Fundament bestaar. Endvidere er de Formforandringer, der er Følge af Jordbundens Eftergiven under Paavirkningen af Trykket fra et Bygværk, i de fleste Tilfælde ikke helt smaa, og i hvert Fald ret betydelige i Forhold til de Formforandringer, som Spændingerne i Bygværkets Konstruktionsdele fremkalder i disse.

13. *Jord* bestaar af indbyrdes usammenhængende, eller kun svagt sammenhængende, smaa Dele (Korn) af forskellig mineralisk Beskaffenhed og Oprindelse. Hulrummene mellem Kornene (Porerne) kan enten være fyldt med Luft eller med Vand.

14. En *Jordmasses* Porøsitet angives ved den paagældende *Jordmasses* Hulrumsforhold,  $n$ , eller ved det saakaldte Poretal,  $\varepsilon$ .

*Hulrumsforholdet*,  $n$ , er Forholdet mellem det samlede Volumen af *Jordmassens* Hulrum og *Jordmassens* hele Volumen. Er *Jordmassens* Volumen  $V$ , udgør dens Porevolumen  $nV$ .

*Poretallet*,  $\varepsilon$ , er Forholdet mellem *Jordmassens* Porevolumen og Rumindholdet  $M$  af *Jordmassens* Korn.

Man har da:

$$\begin{aligned} V &= M(1 + \varepsilon) \\ M &= V(1 - n) \\ \varepsilon &= \frac{n}{1 - n} \end{aligned} \quad (1)$$

Størrelsen af Hulrumsforholdet (og Poretallet) for en *Jordmasse* vil variere, efter som *Jorddelene* er mere eller mindre tæt lejrede.

15. **Fortætningsgrad, relativ Tæthed.** Ved *Jordbund*, der bestaar helt eller for en væsentlig Del af *Sand*, bruger man at angive Lejringstætheden ved *Fortætningsgraden*  $F$  eller ved *Jordbundens relative Tæthed*  $D$ .

Fortætningsgraden  $F$  for en *Jordmasse* i naturlig Aflejring udtrykkes ved Poretallet  $\varepsilon$ , svarende til den naturlige Aflejring, i Forbindelse med Poretallet  $\varepsilon_{\min}$ , gældende for den samme *Jordmasse*, naar dennes Korn er bragt til at indtage den tætteste Lejring. Den relative Tæthed  $D$  udtrykkes ved  $\varepsilon$  og  $\varepsilon_{\min}$  i Forbindelse med Poretallet  $\varepsilon_0$ , gældende for den samme *Jordmasse* i dens løseste Lejring.

Den tætteste Lejring kan man tilvejebringe ved at sammenryste *Jorden* i en Beholder og lade *Jordmassen* blive gennemstrømmet nedad af Vand. Den løseste Lejring faas, naar *Jorden* fyldes tørt og uden Sammenrystning i en Beholder.

Fortætningsgraden  $F$  er Forholdet mellem den Formindskelse i *Jordmassens* Porevolumen, som finder Sted, naar *Jordmassens* Korn bringes til at indtage den tætteste Lejring, og Porevolumenet ved den tætteste Lejring. Betegner  $M$  det samlede Volumen af de Korn, der findes i et *Jordvolumen*  $V$ , og  $V_{\min}$  Volumenet af den samme *Jordmasse*, naar denne er tættest lejret, haves:

$$F = \frac{V - V_{\min}}{n_{\min} V_{\min}} = \frac{M + \varepsilon M - (M + \varepsilon_{\min} M)}{\varepsilon_{\min} M} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\min}} \quad (2)$$

Den relative Tæthed er:

$$D = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}} = \frac{(n_0 - n)(1 - n_{\min})}{(n_0 - n_{\min})(1 - n)} \quad (3)$$

16. **Poretal for Sand.** For en *Jordmasse*, bestaaende af ligestore kugleformede Korn, haves Maksimum af Porevolumen (den løseste Lejring), naar Kornene indtager den i Fig. 13

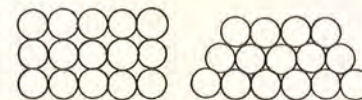


Fig. 13.

viste Stilling, og Minimum af Porevolumen (den tætteste Lejring) med Kornene i den i Fig. 14 viste Stilling.

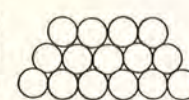


Fig. 14.

I Mellemstillinger kan Kuglerne ligge saaledes, at Centrene for 8 tættest ved

hverandre liggende Kugler danner Hjørnerne i et Rhomboeder. Er den spidse Vinkel i Rhomboedrets Sideflade  $\alpha$  er Hulrumsforholdet:

$$n = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \alpha) \sqrt{1 + 2 \cos \alpha}}$$

For den i Fig. 13 viste Lejring er:

$$n_o = 0,476; \varepsilon_o = 0,91,$$

og for den i Fig 14 viste Lejring haves:

$$n_{\min} = 0,258; \varepsilon_{\min} = 0,345.$$

Ved de naturlige Jordarter er Kornenes Form uregelmæssig, og Kornene er indbyrdes forskellige, saavel i Størrelse som i Form. De for naturlig Sandbund gældende Talværdier for  $n$  og  $\varepsilon$  afviger derfor betydelig fra de ovenfor anførte.

I Tabel 1 er angivet Talværdier for de nævnte Størrelser  $n$ ,  $\varepsilon$ ,  $F$  og  $D$ , gældende for nogle forskellige Slags Sandbund.

Tabel 1.

	Korn- størrelse mm	Hulrums- Forhold $n$	Poretal $\varepsilon$	Fortæt- ningsgrad $F$	Relativ Tæthed $D$
Kvartssand fremstillet ved Knusning af Mælkekvarts .....	0,25—0,7				
løst lejret ( $n_o, \varepsilon_o$ ).....		0,50	1,01	0,51	0,0
sammenrystet ( $n, \varepsilon$ ).....		0,44	0,79	0,18	0,65
tæt lejret ved Behandling med Vand ( $n_{\min}, \varepsilon_{\min}$ ).....		0,40	0,67	0,0	1,0
Strandsand .....	0,1—0,3				
løst lejret ( $n_o, \varepsilon_o$ ).....		0,49	0,98	0,54	0,0
i naturlig Aflejring ( $n, \varepsilon$ ).....		0,43	0,76	0,19	0,65
tæt lejret ( $n_{\min}, \varepsilon_{\min}$ ).....		0,39	0,64	0,0	1,0
Klitsand.....	ca. 0,25				
løst lejret ( $n_o, \varepsilon_o$ ).....		0,46	0,85	0,66	0,0
i naturlig Aflejring ( $n, \varepsilon$ ).....		0,36	0,55	0,07	0,9
tæt lejret ( $n_{\min}, \varepsilon_{\min}$ ).....		0,34	0,51	0,0	1,0
Flodsand, kantede Korn .....	0,8—1,3				
løst lejret ( $n_o, \varepsilon_o$ ).....		0,62	1,67	1,57	0,0
i naturlig Aflejring ( $n, \varepsilon$ ).....		0,45	0,83	0,28	0,82
tæt lejret ( $n_{\min}, \varepsilon_{\min}$ ).....		0,39	0,65	0,0	1,0
Flodsand med lidt Lerindhold.....	0,1—2,7				
løst lejret ( $n_o, \varepsilon_o$ ).....		0,42	0,71	0,71	0,0
i naturlig Aflejring ( $n, \varepsilon$ ).....		0,34	0,51	0,24	0,66
tæt lejret ( $n_{\min}, \varepsilon_{\min}$ ).....		0,29	0,41	0,0	1,0
Finkornet Flodsand med lidt Lerindhold .....	ca. 0,13				
løst lejret ( $n_o, \varepsilon_o$ ).....		0,46	0,84	0,67	0,0
i naturlig Aflejring ( $n, \varepsilon$ ).....		0,35	0,54	0,07	0,9
tæt lejret ( $n_{\min}, \varepsilon_{\min}$ ).....		0,34	0,50	0,0	1,0

Almindelig Sandbunds Lejringstæthed kan i grove Træk betegnes saaledes:

$$\begin{aligned} \text{Løs Lejring, naar:} & \quad 0 < D < \frac{1}{3} \\ \text{Middelfast Lejring, naar:} & \quad \frac{1}{3} < D < \frac{2}{3} \\ \text{Tæt Lejring, naar} & \quad \frac{2}{3} < D < 1 \end{aligned}$$

Jo mindre Fortætningsgraden er, og jo større den relative Tæthed er, desto fastere er den paagældende Jordbunds Lejring.

17. Ved *Lerbund* er Forholdene med Hensyn til Lejringstæthed meget mere komplicerede end ved Sandbund, og Størrelserne  $\varepsilon_o$  og  $\varepsilon_{\min}$  lader sig ikke bestemme paa samme simple Maade, som det kan ske ved Sand.

18. *Jordbundens Rumvægt*. En Jordmasses Vægt afhænger af, hvilken Slags Mineraler Jorddelene bestaar af, af Jordmassens Lejrings-tæthed og af dens Indhold af Vand.

Jordbundsmineralernes Vægtfylde  $\gamma_m$  er ikke meget forskellig for de forskellige Slags Jordbund. For Sand ligger  $\gamma_m$  mellem 2,6 og 2,65; for Ler ligger  $\gamma_m$  mellem 2,6 og 2,9.

Vægten af en Rumenhed Jord med Hulrumsforhold  $n$  er:

$$\gamma_e = (1-n) \gamma_m \quad (4)$$

Rumvægten for den samme Slags Jord i vandmættet Tilstand er:

$$\gamma'_e = (1-n) \gamma_m + n\gamma, \quad (5)$$

hvor  $\gamma$  er Vandets Rumvægt.

Det fra en under Vand værende Jordmasse virkende Tryk paa Underlaget bliver, idet Opdriften fraregnes, pr. Rumenhed vandmættet Jord:

$$\gamma''_e = (1-n) \gamma_m + n\gamma - \gamma = (1-n) (\gamma_m - \gamma) \quad (6)$$

Hvis man, som det i Reglen sker, gaar ud fra Rumvægten  $\gamma_e$  af Jorden, haves:

$$\text{Vandmættet Jord: } \gamma'_e = \gamma_e + n\gamma \quad (7)$$

$$\text{Jord under Vand: } \gamma''_e = \gamma_e + n\gamma - \gamma = \gamma'_e - \gamma, \quad (8)$$

eller naar der for Vand sættes  $\gamma = 1$ :

$$\gamma'_e = \gamma_e + n \quad (9)$$

$$\gamma''_e = \gamma'_e - 1 \quad (10)$$

19. *Fugtighedsgrad*. Vil man graduere Rumvægtene nærmere efter Jordens Vandindhold, naar ikke hele Porevolumenet er vandfyldt, kan

som Angivelse af Jordmassens Vandindhold benyttes Fugtighedsgraden  $G$ , hvor  $G$  er Forholdet mellem den med Vand udfyldte Del af Hulrummene og hele Porevolumenet. Er Vandindholdet  $v^0/0$  af den tørre Jordmasses Vægt, faas Fugtighedsgraden af:

$$G = \frac{v\gamma_m M}{nV} = \frac{v\gamma_m (V - nV)}{nV} = \frac{v\gamma_m (1 - n)}{n} \quad (11)$$

20. I Tabel 2 er angivet nogle omtrentlige Værdier for Rumvægte af Jord.

Tabel 2.

Sand, tørt .....	$\gamma_e = 1,55-1,65$	t/m <sup>3</sup>
» lidt fugtigt .....	$\gamma_e = 1,75-1,85$	»
» vandmættet .....	$\gamma'_e = 1,9-2,0$	»
Blanding af Sand og Ler, tør .....	$\gamma_e = 1,4-1,5$	»
» » » fugtig .....	$\gamma_e = 1,6-1,7$	»
» » » vandmættet ..	$\gamma'_e = 1,9-2,0$	»
Ler, jordfugtigt .....	$\gamma_e = 1,6-1,8$	»
» vandmættet .....	$\gamma'_e = 1,9-2,1$	»

21. **Jorddelenes Størrelse og Form.** Størrelsen af Jorddele plejer man at angive ved et Længdemaal: *Kornstørrelsen*. Den Betydning, der i Henseende til Bedømmelse af Jorddelenes Rumfang kan tillægges et saadant Maal for Kornstørrelsen, afhænger af Jorddelenes Form og af, hvilken Fremgangsmaade der benyttes til Bestemmelsen af Kornstørrelsen.

Med Hensyn til *Jorddelenes Form* kan man dele Kornene i to Grupper: 1) Korn med sammentrængt Form og 2) skælformede Korn.

Til den førstnævnte Gruppe hører kantede Korn og runde Korn — som de Korn, hvoraf almindeligt Sand for største Delen bestaar — samt Korn med aflang Form, stang eller naaleformede Korn. Den anden Gruppe omfatter særlig Korn af Glimmerminerale. Denne Slags Korn findes navnlig i Ler.

22. Bestemmelse af en Jordmasses **Sammensætning efter Kornstørrelse** sker ved Sigtning og ved Slæmmeanalyse.

Til *Sigtning* bruges et Sæt Sigter med forskellige Maskevidder. Den omhyggeligt tørrede og, hvis Jorden indeholder Ler, finsmuldrede Jordprøve rystes paa den ene efter den anden af Sigterne, i Rækkefølge fra Sigten med den største Maskevidde til Sigten med den mindste Maskevidde, og Sigteresterne udmaales ved Vejning. Kornstørrelsen for den

paa Sigte Nr.  $n$  værende Sigterest regnes for at være lig med Maskevidden paa den foregaaende, den  $(n-1)^{te}$  af Sigterne. Kornstørrelsen angives saaledes ved Vidden af den mindste af de kvadratiske Aabninger, gennem hvilken de paagældende Korn netop kan passere, naar Jordmassen rystes paa Sigten.

23. Ved **Slæmmeanalyse** sker Bestemmelsen af Kornstørrelsen paa Grundlag af Kornenes Nedsynkningshastighed i Vand, og da saaledes, at man regner Kornstørrelsen at være lig med Diameteren af en Kugle, der har samme Vægtfylde som Kornmaterialet, og som har samme Nedsynkningshastighed i Vand som de paagældende Korn. Den ved Slæmmeanalyse fundne Kornstørrelse benævnes ogsaa den *ækvivalente Kornstørrelse*. Den ækvivalente Kornstørrelse kan afvige betydeligt fra den ved Maaling bestemte Kornstørrelse, særlig ved skælformede Korn. *Atterberg* fandt f. Eks., at Lerpartikler med ækvivalente Kornstørrelser paa 0,02 mm til 0,002 mm under Mikroskop udviste en Kornstørrelse paa 0,05 mm til 0,005 mm; *Terzaghi* angiver, at der kan være endnu større Afvigelser mellem ækvivalent Kornstørrelse og maalt Kornstørrelse.

For Jordpartikler mindre end  $1 \mu$  er Bestemmelsen af Partiklernes Størrelse ved Slæmning behæftet med en Del Usikkerhed. Man maa her i Forbindelse med Slæmmeanalysen anvende Maaling under Mikroskop, idet den ved meget smaa Partikler adsorbere Vandhinde udgør en saa forholdsvis stor Del af Partiklen (Vægt og Rumfang), at *Stokes Lov* for Nedsynkningshastigheden kun gælder med ret grov Tilnærmelse.

Hvis Jorden ikke indeholder Korn, der er mindre end 0,02 mm, kan Jordanalysen efter Kornstørrelse ske alene ved Sigtning, idet Kornene ved Kornstørrelse over 0,02 mm ikke hænger sammen, naar blot Jordmassen er tør.

Hvis Jorden indeholder Dele, der er mindre end 0,02 mm, bevirker det hygroskopisk bundne Vand, at mange af Jorddelene hænger sammen og danner Klumper. Der maa da anvendes baade Sigtning og Slæmmeanalyse. Sigtning bruges til den Del af Jordprøven, hvis Korn er større end 0,1—0,07 mm, og Slæmmeanalyse til Resten af Jordprøven. I saa Fald maa Jordprøven først deles i to Dele, til Sigtning og til Slæmning. Dette kan gøres ved, at man udvasker Jordprøven i Sigten med den mindste Maskevidde, eller Adskillelsen kan ske ved Slæmning.

Anvendelse af Slæmmeanalyse til Bestemmelse af en Jordmasses Sammensætning efter Kornstørrelse er baseret paa det Forhold, at en Partikels Nedsynkningshastighed gennem Vand afhænger af Partiklens Størrelse (foruden af dens Vægtfylde).

Efter Stokes Lov er Nedsynkningshastigheden  $v$  i cm/Sek. for kugleformede Korn med Diameter  $d$  cm og med Vægtfylde  $\gamma_m$ , naar Vandets Vægtfylde er  $\gamma$  og dets Viskositet  $\eta$ , udtrykt ved

$$v = \frac{2}{9} \frac{\gamma_m - \gamma}{\eta} \left(\frac{d}{2}\right)^2 g \quad (12)$$

Med  $\gamma_m = 2,65$  (Middelvægtfylde for Lerpartikler),  $\gamma = 1,0$ ,  $\eta = 0,01$  og  $g = 981$ , faas

$$v = 0,9 \cdot 10^4 d^2 \quad (13)$$

24. I Fig. 15 er vist et Kopecky's Slæmmeapparat. Det bestaar af en Række lodrette Glas cylindre, gennem hvilke man lader gaa en Vandstrøm fra en Beholder  $D$ ; i denne holdes Vandspejlet i konstant Højde ved stadig Tilledning af Vand og Afstrømning af Overskud af Vand ad et Overløb. Ved Indstilling af en Hane paa Tilledningsrøret fra  $D$  afpasses den for den ønskede Gennemstrø-

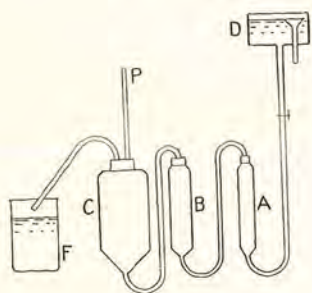


Fig. 15

ningshastighed fornødne Vandtilførsel, og ved Iagttagelse af Stighøjden i Røret  $P$  kontrolleres, at Gennemstrømningen forbliver uforandret. I Cylindrene, der har forskellig Vidde og er indbyrdes forbundne med Rørledninger, gaar Vandbevægelsen opad, og Vandets Hastighed er aftagende fra den første af Glas cylindrene til den næste i Rækken, fra denne til den næste o. s. fr. Det fra den sidste af Cylindrene afstrømmende Vand opsamles i et Cylinderglas  $F$ . Af en i Cylindren  $A$  anbragt opslæmmet Jordprøve vil det gennemstrømmende Vand skylle alle Partikler, hvis Nedsynkningshastighed er mindre end

Vandhastigheden i Cylindren  $A$ , over i den næste Cylinder  $B$ , medens Partikler, hvis ækvivalente Kornstørrelse er større end den, der svarer til denne Vandhastighed, forbliver i Cylindren  $A$ , og paa samme Maade videre for de øvrige Cylindre.

Slæmningen fortsættes, indtil det fra Cylindren  $C$  afløbende Vand er klart, og maa sædvanlig udstrækkes over flere Timer. Efter Slæmningens Ophør lader man Suspensionerne henstaa til Bundfældning, og de herved aflejedede Dele af Jordprøven maales ved Vejning efter Inddampning.

Forinden Jordprøven anbringes i Slæmmeapparatets første Cylinder, maa Jorden udrøres i Vand og behandles saaledes, at den ikke indeholder Klumper. Forbehandlingen af Jordprøven kan ske ved, at man koger Jordprøven i Vand.

25. Ved den af Atterberg angivne Fremgangsmaade til Udførelse af Slæmmeanalyse benyttes Bundfældning i stillestaaende Vand.<sup>1)</sup>

Til Slæmmeanalysen anvendes en Glas cylinder, der forneden er forsynet med et Aftapningsrør (Fig. 16). Jordprøven udbørstes (for at faa Klumperne



Fig. 16.

<sup>1)</sup> Anvendt af Danmarks geologiske Undersøgelse. Ellen Mertz: Metoder til Undersøgelse af Lerets Egenskaber. 1926.

sønderdelt) under Tilsætning af Vand og sprøjtes over i Cylindren. Denne fyldes med Vand indtil et bestemt Mærke, og det hele oprystes og henstilles til Bundfældning i et vist Antal Timer. Derefter aftappes det over det bundfældede staaende Vand i en Flaske, nyt Vand paafyldes Slæmme cylinderen, Bundfaldet oprystes, Cylindren henstaa igen det samme Antal Timer som første Gang, hvorefter det aftappes paany.

Dette gentages, indtil Vandet, der aftappes, er klart. Bundfaldet behandles derefter paa samme Maade som ved den beskrevne Behandling af den oprindelige Jordprøve, blot henstaa Slæmme cylinderen denne Gang kortere Tid til Bundfældning.

Man faar ved denne Fremgangsmaade Jordprøven delt i flere Dele, af hvilke hver kun indeholder Partikler med Kornstørrelse liggende indenfor et vist Interval. Mængden af fast Stof i hver af disse Dele findes ved Vejning efter Inddampning. Kornstørrelsen for hver af Jordprøvens Dele bestemmes ved Maaling under Mikroskop.

Efter Atterberg gælder følgende Skala for Kornstørrelse og Bundfældningstid, naar Vandspejlets Højde over Aftapningsrøret er 20 cm:

Ved 16 Timers	Henstaaen til Bundfældning indeh. Vandet	Korn < 2 $\mu$
— 2 —	— — — — —	6 $\mu$ — 2 $\mu$
— 15 Minutters —	— — — — —	6 $\mu$ — 0,02 mm
— 100 Sekunders —	— — — — —	0,02 mm — 0,06 mm

26. Ved den af A. H. M. Andreasen angivne Metode — Pipetmetoden — udføres Slæmmeanalysen paa følgende Maade.<sup>1)</sup> I  $V$  cm<sup>3</sup> Vand opslæmmes en afvejet Mængde  $P$  af Jordprøven, saaledes at alle Jordprøvens Korn er jævnt fordelt i Suspensionen, og denne fyldes over i en med Centimeter-Inddeling forsynet Cylinder (Fig. 17) og hensættes til Bundfældning. Cylindren er forsynet med Glasprop. Gennem denne gaar der en Pipette, hvis Spids naar ned til Inddelingens Nulmærke. Til forskellige Tider opsuges derefter Prøver af den ved Cylindrens Nulmærke værende Suspension, og disse Prøvers Indhold af fast Stof bestemmes ved Inddampning og Vejning. Er den oprindelige Opslæmnings Indhold af Stof pr. cm<sup>3</sup> Vand:  $c_o$  ( $= \frac{P}{V}$ ) og er  $c_t$  den til Tiden  $t$  udtagne Prøves Indhold af Stof pr. cm<sup>3</sup> Vand, vil den Del af den oprindelige Jordprøve  $P$ , der er bestemt ved  $\frac{c}{c_o} \cdot P$  kun indeholde Korn, hvis Størrelser er mindre end

$$d = k \sqrt{\frac{h}{t} \cdot \frac{\eta}{\gamma_m - \gamma}}, \quad (14)$$

hvor  $h$  er Afstanden fra Vandoverfladen til Spidsen af Pipetten (Stokes Lov). Efter Forløbet af Tiden  $t$  vil nemlig alle Korn, der er større end  $d$ , være passeret ned under Pipettens Spids, og ingen af dem derfor findes i den til Tiden  $t$  tagne Prøve, medens Korn, der er mindre end  $d$ , stadig vil være paa Vej nedad forbi Pipettens Spids, og for hver Kornstørrelse med samme Hastighed, og

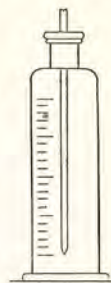


Fig. 17.

<sup>1)</sup> A. H. M. Andreasen: Über die Feinheitsbestimmung nach der Pipetmethode mit Andreasens Apparat. 1930.



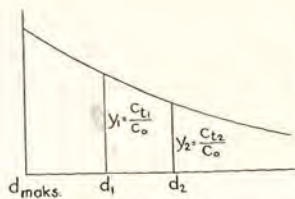


Fig. 18.

derfor med samme Antal pr. cm<sup>3</sup> Vand i Højde med Pipettens Spids, som i den oprindelige Suspension.

Størrelsen  $c_o$  kan, foruden som ovenfor nævnt af  $P$  og  $V$ , bestemmes paa samme Maade som Størrelserne  $c_t$  ved, at man med Pipetten udtager en Prøve af Suspensionen straks efter, at den er fyldt paa Cylinderen, d. v. s. inden de sidste af de største Korn har naaet at passere ned forbi Pipettens Spids. Ved Afsætning af sammenhørende Værdier af  $d$  og  $\frac{c_t}{c_o}$ , bestemt af (14), som henholdsvis Abscisser og Ordinater, faas en Kurve, der angiver Jordprøvens procentvise Stofmængdeindhold efter Kornstørrelse (Fig. 18);  $y_1$  er den procentvise Del af Jordprøven, hvis Korn er mindre end  $d_1$ ;  $y_1 - y_2$  angiver den procentvise Del af Jordprøven, for hvilken Kornstørrelserne ligger mellem  $d_1$  og  $d_2$ .

Naar Kornene forudsættes at have Tærningform, og idet  $d$  udtrykkes i  $\mu$ ,  $h$  i cm og  $t$  i Minutter, og der sættes <sup>1)</sup>:  $\eta = 0,01$ ,  $\gamma_m = 2,65$  og  $\gamma = 1$ , faas af (14):

$$d = 11 \sqrt{\frac{h}{t}} \quad (15)$$

27. En fra de almindelige Metoder til Udførelse af Slæmmeanalyse forskellig Fremgangsmaade er den af *G. Wiegner* angivne.

Det *Wiegnerske* Slæmmeapparat bestaar af et højt Glasrør *A* (Fig. 19), som ved et forneden anbragt Grenrør med Hane *H* er i Forbindelse med et Maalerør *B*. Der fyldes først Vand i Røret *A*, hvorefter Hanen *H* lukkes. Den i Vand udrørte Jordprøve bringes ned i Røret *A*, og ved Paafyldning af Vand i Maalerøret bringes Vandspejlet i dette til at staa omtrent i Højde med Vandspejlet i *A*. Begge Rørene tillukkes med Propper, og Jordprøven oprystes saaledes, at den er jævnt fordelt i Røret *A*, hvorefter Apparatet stilles op, Propperne tages af, og Hanen *H* aabnes. Vandspejlet i Maalerøret vil da stille sig et Stykke  $h$  højere end i Røret *A*, nemlig svarende til Vægtfyldedifferensen mellem den i Røret *A* værende Suspension og Vandet i Maalerøret. Efterhaanden som de opslæmmede Partikler synker ned under Grenrøret, formindskes Vægten af den over Grenrøret staaende Del af Suspensionen, og  $h$  aftager.

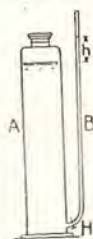


Fig. 19.

Bestemmelse af Jordprøvens Indhold af Korn af forskellige Størrelser sker ved Observation af sammenhørende Værdier af den efter Bundfældningens Begyndelse forløbne Tid  $t$  og Vandspejlsdifferensen  $h$ , og Optegning af en Kurve (Fig. 20) for disse sammenhørende Værdier.

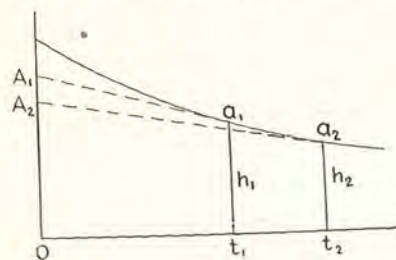


Fig. 20.

Er  $P_o$  Vægten af alle Jorddelene i den over Grenrøret staaende Del af Suspensionen ved Bundfældningens Begyndelse, og  $h_o$  Suspensionens Højde over Grenrøret, findes, ved Tangenter  $a_1 A_1$  og  $a_2 A_2$  den i Suspensionen indeholdte Kornmængde  $\Delta P$  med Kornstørrelse liggende mellem  $d_1$  og  $d_2$ :

<sup>1)</sup> § 23.

$$\Delta P = \frac{A_1 A_2}{h_o} P_o,$$

idet Relationen mellem Kornstørrelserne  $d_1$  og  $d_2$  og Tiderne  $t_1$  og  $t_2$  er bestemt ved:

$$t_1 = \frac{h_o}{v_1} \text{ og } t_2 = \frac{h_o}{v_2},$$

hvor  $v_1$  og  $v_2$  er de til Kornstørrelsen  $d_1$  og  $d_2$  (efter *Stoke's Lov*) svarende Nedsynkingshastigheder.

28. Slæmmeanalyse med strømmende Vand, som ved *Kopecky's* Apparat, egner sig bedst for grovere Partikler, fra ca. 0,2 mm til ca. 0,02 mm. Til den omtalte Adskillelse af en Jordprøve i to Dele, den Del, der kan undersøges ved Sigtning, og den Del, til hvilken der maa anvendes Slæmmeanalyse, kan der ogsaa benyttes Apparat med strømmende Vand.

Til Slæmmeanalyser, der gaar ud paa Adskillelse mellem ulige store Partikler mindre end 0,02 mm, maa man benytte *Andreasen's* eller *Atterberg's* Metoder.

Partikler, der er mindre end ca. 1  $\mu$ , holder sig svævende i Vandet i meget lang Tid, eller bundfældes slet ikke paa Grund af, at saadanne smaa Partikler er i *Brownsk Bevægelse*. For at fremkalde Bundfældning maa Partiklerne bringes til at koagulere. Dette kan gøres ved, at der tilsættes Suspensionen en Elektrolyt. Partikler mindre end ca. 100  $\mu\mu$  indgaar i Suspensionen som kolloid Opløsning.

29. Kornstørrelsesgrupper. De forskellige Kornstørrelsesgrupper betegnes ofte ved særlige Navne. *Danmarks geologiske Undersøgelse* anvender f. Eks. følgende Betegnelser:

Kornstørrelse	Sand	Mo		Melsand		Lersubstans		Ultraler
		Grovmø	Finmø	Groft Melsand	Fint Melsand	Mikroler		
						Groft Mikroler	Fint Mikroler	
	>0,2 mm	0,2—0,06 mm	0,06—0,02 mm	20 $\mu$ —6 $\mu$	6 $\mu$ —2 $\mu$	2 $\mu$ —600 $\mu\mu$	600 $\mu\mu$ —200 $\mu\mu$	< 200 $\mu\mu$

*Terzaghi* benytter følgende Betegnelser:

Kornstørrelse	Sand				Mo	
	meget groft	groft	middelfint	fint	groft	fint
	2,0—1,0 mm	1,0—0,5 mm	0,5—0,2 mm	0,2—0,1 mm	0,1—0,05 mm	0,05—0,02mm

Kornstørrelse	»Schluff« (Støv)		Kolloidslam (Mikroler)		Ultraler
	groft	fint	groft	fint	
	20 $\mu$ —6 $\mu$	6 $\mu$ —2 $\mu$	2 $\mu$ —600 $\mu\mu$	600 $\mu\mu$ —200 $\mu\mu$	< 200 $\mu\mu$

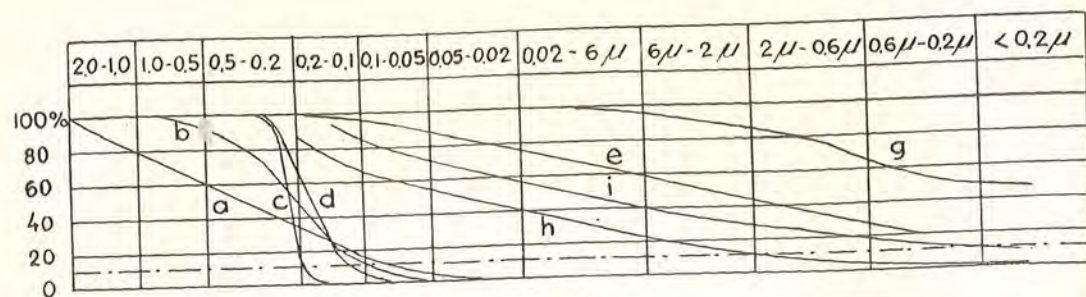


Fig. 21.

30. Grafisk Fremstilling af en Jordprøves Sammensætning efter dens Indhold af Partikler af forskellig Størrelse sker — hvis Prøven indeholder baade grove Korn og meget fine Korn — bedst ved Hjælp af en Kornfordelingskurve som den i Fig. 21 viste. Som Ordinater afsættes den Procentdel af Jordprøven, hvis Korn er mindre end den ved Abscissen angivne Størrelse, og som Abscisser Logaritmer af Kornstørrelserne. For det i Fig. 21 benyttede Koordinatsystem er den til Kornstørrelsen  $d$  (i mm) svarende Abscisse bestemt af:

$$d = 2^{-x},$$

$$x = -\frac{\log_e d}{\log_e 2} = -1,441 \log_e d.$$

Begyndelsespunktet svarer til  $d = 1$  mm.

Naar  $x$  er Abscissen svarende til  $d$ , og  $x_1$  Abscissen svarende til  $\frac{d}{2}$ ,

haves:

$$x_1 = -\frac{\log_e \frac{d}{2}}{\log_e 2} = -\left(\frac{\log_e d}{\log_e 2} - 1\right) = x + 1$$

Man faar altsaa den til  $\frac{d}{2}$  hørende Abscisse ved ud fra Abscissen for  $d$  at afsætte Længden 1.

Kurvens Stejlhed er et Maal for Jordmassens Ensformighed i Henseende til Kornstørrelse.

De i Fig. 21 gengivne Kurver er Eksempler paa Fordelingskurver for følgende Materialer og Jordarter:

- |                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| a: Pulveriseret Mælkekvarter. | f: Ler fra Røgle Klint.   |
| b: Sand fra et Vandløb.       | g: Graat Lillebæltsler.   |
| c: Klitsand.                  | h: Moræneler fra Allsund. |
| d: Strandsand.                | i: London Clay.           |
| e: Fedt Ler.                  |                           |

31. Den virksomme Kornstørrelse. Uensformighedstal. For Jordarters Gennemtrængelighed for Vand og andre lignende Forhold har det Betydning, hvor stor en Del af den hele Jordmasse den Mængde Korn udgør, der er mindre end en vis Størrelse. Som Udtryk herfor bruges Jordmassens saakaldte *virksomme Kornstørrelse*  $d_v$ . Efter A. Hazen bestemmes  $d_v$  derved, at den samlede Vægt af Korn, mindre end  $d_v$  udgør 10% af hele Jordmassen. I Stedet for denne Bestemmelse af  $d_v$  bruges det, efter Forslag af J. Kozeny, at bestemme  $d_v$  af

$$\frac{P}{d_v} = \frac{P_{1-2}}{d_{1,2}} + \frac{P_{2-3}}{d_{2,3}} + \frac{P_{3-4}}{d_{3,4}} + \dots,$$

hvor  $P$  er hele Jordprøvens Vægt,  $P_{1-2}$  Vægten af den Del af Jordprøven, hvis Kornstørrelser ligger mellem  $d_1$  og  $d_2$ , og  $d_{1,2}$  er Gennemsnitsstørrelsen af Kornene for denne Del af Jordprøven, og hvor  $P_{2-3}$ ,  $P_{3-4}$  ... og  $d_{2,3}$ ,  $d_{3,4}$  ... har tilsvarende Betydning.

I Forbindelse med den virksomme Kornstørrelse bruges endvidere Jordmassens saakaldte *Uensformighedstal* til Karakterisering af en Jordart efter dens Kornstørrelsesforhold. Uensformighedstallet angiver Forholdet mellem Kornstørrelsen svarende til 60%—Ordinaten i Jordmassens Kornfordelingskurve (Fig. 21) og Kornstørrelsen svarende til 10%—Ordinaten ( $d_v$ ).

32. Jordbundens Vandindhold. Naar Jord dykkes ned i Vand, fyldes Jordmassens Porer med Vand, medmindre Jordmassen er saa finkornet og tæt lejret, saaledes som Tilfældet er ved nogle Lerarter, at Porerne er for snævre til, at Vandet kan trænge ind i dem.

Naturligt aflejret Ler, som ligger saa dybt under Jordoverfladen, at det er beskyttet mod Udtørring, vil, selv om dets Porer er saa snævre, at Vand ikke kan trænge ind i det, dog i Almindelighed have vandfyldte Porer. Dette hidrører fra, at Leret er dannet ved Aflejring i Vand.

Naar en ved Nedykning i Vand vandmættet Jordmasse tages op af Vandet og holdes beskyttet mod Udtørring, løber kun en Del af Vandet ud af Jordmassen, idet noget af Vandet tilbageholdes i Jorden paa Grund af Haarrørskraften og paa Grund af Vandets Vedhængning ved Kornenes Overflade. Det tilbageblivende Vand kan kun drives ud af Jordmassen ved Fordampning (eller ved Planterødders Virksomhed). Mængden af det tilbageblivende Vand, udtrykt i Procent af Jordmassens Volumen, kaldes Jordens *Vandkapacitet*. Differensen mellem Jordens Hulrumsprocent og dens Vandkapacitet kaldes Jordens *Luftkapacitet*.

En Jordarts Vandkapacitet afhænger af Kornstørrelsen. Jo mere finkornet Jorden er, desto snævrere er Porerne, og i desto højere Grad

kan der af Haarrørskraften holdes Vand tilbage i Jorden. Endvidere er en finkornet Jordmasses Korn-Overflade meget større, og Mængden af Vedhængningsvand derfor ogsaa større, end Tilfældet er ved Jord bestaaende af store Korn. Ved almindeligt Sand og grovere Materiale er Vandkapaciteten forholdsvis ringe. Ved de finkornede Jordarter (Ler og Blandinger af Ler og Sand) er Vandkapaciteten stor og Luftkapaciteten derfor kun en Brøkdel af Hulrumsprocenten.

I Tabel 3 er anført nogle Eksempler paa Størrelse af Vandkapacitet og Luftkapacitet.

Tabel 3.

	Fedt Ler	Sandbl. Ler	Sandbl. Ler	Fint Sand tætlejret	Groft Sand, tæt-lejret
Kornstørrelse:					
d < 0,01 mm; Procent . . . . .	86,68	54,16	48,44	—	—
0,01 mm < d < 0,05 mm; Procent	11,04	28,48	17,76	—	—
0,05 mm < d < 0,1 mm; Procent	1,50	7,64	14,68	—	—
0,1 mm < d; Procent . . . . .	0,78	9,72	19,12	—	—
Rumvægt; t/m <sup>3</sup> . . . . .	1,34	1,26	1,29	1,90	2,18
Rumvægt af fast Stof; t/m <sup>3</sup> . . . . .	2,58	2,58	2,55	2,64	2,66
Hulrumsprocent . . . . .	48,0	51,0	49,3	28	18
Vandkapacitet . . . . .	47,6	40,2	39,3	12	5,5
Luftkapacitet . . . . .	0,4	10,8	10,0	16	13,5

33. Grundvandspejlet er det Vandspejl, der fremkommer i et i den naturlige Jordbund fremstillet Hul. Paa Grund af Haarrørsvirkningen vil Jorden være vandmættet op til et Stykke over Grundvandspejlet, og til desto større Højder over dette, jo mere finporøs Jorden er.

Af J. Kozeny angives den største kapillære Stighøjde over Grundvandspejlet at være

$$h = 0,446 \cdot \frac{1-n}{n} \cdot \frac{1}{d_v},$$

hvor  $n$  er Hulrumsforholdet og  $d_v$  den virksomme Kornstørrelse for den paagældende Jordart.

Jordens Mætning med Vand som Følge af, at Vandet ved Haarrørsvirkningen suges op over Grundvandspejlet, finder ikke Sted ved meget finporøse Jordarter (fedt Ler), fordi Porerne her er for snævre, til at Vandet kan trænge ind i dem.

Som omtrentlige Værdier af den kapillære Stighøjde angiver Singer<sup>1)</sup> for groft Sand: 0,2—0,3 m, og for fint Sand: 0,4 m. Den største Stighøjde, 1 m, haves ved Kornstørrelse ca. 20  $\mu$  (Grænsen mellem Mo og Melsand). Herfra aftager Stighøjden hurtigt med aftagende Kornstørrelse henimod 0,2 m.

<sup>1)</sup> Singer: Der Baugrund. 1932.

Terzaghi angiver større Værdier for den kapillære Stighøjde end ovenfor anført, og fremhæver, at Kapillarvandets Højde over Grundvandspejlet er større, naar Grundvandspejlet synker, end naar det stiger.

Et Stykke oven over den Højde, til hvilken Jordmassens Porer er helt vandfyldte, holder Jordmassen endnu noget Vand opsuget ved Haarrørsvirkning. Dette Vand kaldes den kapillære Fugtighed. Denne yderligere Opsugning af Vand forklares ved, at Porerne Tværsnit har uregelmæssig Form. Er Poretværsnittet f. Eks. trekantet, vil Haarrørskraften kunne holde Vand opsuget i de snævre Partier nærmest ved Porens Kanter til større Højde over Grundvandspejlet end den Højde, til hvilken hele Poretværsnittet kan holdes vandfyldt. Terzaghi angiver, at den kapillære Fugtigheds Højde over Grundvandspejlet kan blive indtil to Gange Kapillarvandets Højde.

Dersom Jordmassen har været vandmættet til en vis Højde, og Grundvandspejlet og dermed Kapillarvandet og den kapillære Fugtighed er sunket til en vis lavere Stilling, vil der oven over den Højde, til hvilken den kapillære Fugtighed naar, endnu findes noget Vand i Jordmassen, nemlig den paa Kornenes Overflade adsorbere Vandmængde.

34. Hygroskopisk Vand. En tør Jordmasse, som bringes i Berøring med fugtig Luft; optager Vanddamp fra Luften, og Dampen fortættes til Vandhinder om de enkelte Korn. Saadant fra Luften optaget Vand, der kun kan fjernes fra Jordmassen ved Fordampning, kaldes hygroskopisk Vand. En Jordmasses Evne til at optage hygroskopisk bundet Vand, er større, jo mere finkornet Jordmassen er.

Som Maal for en Jordarts Hygroskopicitet kan benyttes den Vandmængde (udtrykt i Procent af Tørstof), som Jordmassen indeholder, naar den har staaet til fuld Mætning i Vanddamp over 10 % Svovlsyre i Vacuum.<sup>1)</sup>

Som Eksempler paa nogle Jordarters Hygroskopicitet kan anføres<sup>1)</sup>:

Tabel 4.

Lerfri Mineraljord (Sverige) . . . . .	< 2 %
»Let Ler« » . . . . .	2 — 4 %
»Lettere Mellem-Ler« » . . . . .	4 — 5,5 %
»Stivere Mellem-Ler« » . . . . .	5,5— 7 %
»Stiv Ler« » . . . . .	7 —10 %
»Meget stiv Ler« » . . . . .	10 —17 %
Lillebæltsler (Danmark) . . . . .	21,4—23,8 %
Moræneler » . . . . .	4,0— 4,5 %
London Clay (England) . . . . .	10,6 %

<sup>1)</sup> Danmarks geologiske Undersøgelse, II. Række, Nr. 51, Lillebæltsler og London Clay.

35. Bestemmelse af en Jordarts naturlige Vandindhold, d. v. s. Vandindholdet i Jordmassen, saaledes som denne forekommer i naturlig Aflejring maa ske ved Undersøgelse af en Jordprøve. Denne maa, indtil Undersøgelsen kan finde Sted, opbevares i en lufttæt Beholder, f. Eks. i en Flaske med Glasprop, der tættes med udsmltet Parafin. Vandindholdet kan bestemmes ved Vejning af Jordprøven før og efter Udtørring ved Opvarmning af den optagne Jordprøve.

En anden Fremgangsmaade til Bestemmelse af Vandindholdet — som ikke kræver Udtørring, og som derfor lettere lader sig foretage paa det Sted, hvor Jordprøven optages — er følgende:

Jordprøven (Vægt:  $b$  gram) anbringes i en udmaalt Mængde ( $a$  cm<sup>3</sup>) Alkohol ( $x$  Procentholdig). Alkoholen trænger hurtigt ind i Jordmassens Porer, idet den blander sig med Vandet i disse, saaledes at Vædsken inde i Jordprøvens Porer og Vædsken uden for Jordprøven efter kort Tids Forløb faar samme Alkoholprocent  $y$ . Størrelserne  $x$  og  $y$  af Vædskens Alkoholprocent før og efter Jordprøvens Anbringelse i Vædsken maales ved Vægtfyldebestemmelse med en Flydevægt. Jordprøvens Vandindhold  $f$ , i Procent af Vægten af Jordprøven, incl. dennes Vandindhold, faas da af:

$$f = \frac{a}{b} \cdot \frac{x - y}{y} \cdot 100$$

For de i Tabel 4 nævnte Jordarter: Lillebæltssler og London Clay, fandtes ved nogle af *Danmarks Geologiske Undersøgelse* foretagne Prøver et naturligt Vandindhold paa henholdsvis 32 % og 21 %.

36. Friktion og Kohæsion. Imellem de af en Jordmasses Partikler, der er i indbyrdes Berøring, vil der være Adhæsion til Stede. Denne Adhæsion bevirker, at Jordmassen yder en vis Modstand mod Formforandring, idet en Formforandring er betinget af, at Partiklernes indbyrdes Stilling ændres, og derfor kræver, at den fra Adhæsionen hidrørende Modstand mod Partiklernes Adskillelse overvindes. Modstandskraften er større, jo større Anlægsfladerne mellem Partiklerne er, og virker saavel tangentielt i Anlægsfladerne som normalt paa disse.

Den fra Adhæsionen hidrørende Modstandskraft i en Jordmasse kaldes: *den ægte Kohæsion*. Den ægte Kohæsion er forsvindende lille — pr. Enhed af Tværnsnitsareal i Jordmassen — i Jord, der bestaar af store Korn af sammentrængt Form. Berøringsfladernes Arealer er nemlig i saadan Jord relativt smaa. Den ægte Kohæsion er større i en Jordmasse bestaaende af meget smaa Korn og yderligere større, hvis Kornene er skælformede, paa Grund af, at det samlede Berøringsareal — pr. Enhed

af Tværnsnitsareal i Jordmassen — her er større end ved Jord af store Korn med sammentrængt Form.

Foruden den ægte Kohæsion vil der som Modstand mod Formforandring af en Jordmasse tillige virke Friktion mellem de hverandre berørende Jorddele. Friktionens Opstaaen er betinget af, at der i Berøringsfladerne mellem Jorddelene er en Trykspænding til Stede. Friktionens Størrelse er proportional med Normaltrykket i Berøringsfladen, men er uafhængig af Anlægsfladernes Størrelse.

Tilstedeværelsen af det Tryk mellem Jorddelene, som betinger Friktionens Optræden, kan simpelthen skyldes Jordmassens egen Vægt, Belastning fra Jordlag over den paagældende Jordmasse eller Virkningen af andre ydre Kræfter. Imidlertid kan de for Friktionens Optræden fornødne Trykspændinger mellem Jordpartiklerne ogsaa frembringes af indre Kræfter i selve Jordmassen, nemlig i Tilfælde af, at Jordmassens Hulrum er helt eller delvis vandfyldte. I saa Fald vil der kunne optræde betydelige Spændinger i Kapillarvandet i Jordmassens Porer og optræde tilsvarende Spændinger mellem de hverandre berørende Jordpartikler og dermed ogsaa Friktion mellem disse. (Herom nærmere i §§ 46—50).

Den fra Spænding i Kapillarvandet hidrørende Trykspænding og Friktion mellem Jorddelene ytrer sig paa samme Maade som den ægte Kohæsion, nemlig ved at Jordmassen er i Besiddelse af et vist Sammenhæng, og derfor i Besiddelse af en vis Styrke saavel over for Trækpaavirkning som over for Forskydningspaavirkning. Den fra Kapillarkræfterne hidrørende Sammenhængsstyrke i en Jordmasse gaar ogsaa i Almindelighed under Navnet: Kohæsion. Til Adskillelse mellem de to, i Henseende til deres Aarsagsforhold forskellige Slags Kohæsion, kaldes den, der skyldes Adhæsionen mellem Jorddelene, som nævnt: *den ægte Kohæsion*, og den, der skyldes Kapillarkræfterne: *den uægte Kohæsion*.

En af forholdsvis store Korn af sammentrængt Form bestaaende Jordmasse (groft Sand), er kun i ringe Grad kohæsiv. Den ægte Kohæsion er ved en saadan Jordart lille, fordi Anlægsfladerne mellem Kornene er forholdsvis faa og smaa, og den uægte Kohæsion er lille, fordi Porerne er forholdsvis vide og Kapillarkræfterne derfor ret ubetydelige.

Ved en af meget smaa Korn bestaaende Jordmasse (Ler) kan saavel den ægte Kohæsion som den uægte Kohæsion være ret betydelig. Paa Grund af, at Kornene er smaa, er det samlede Areal af Berøringsflader mellem Kornene forholdsvis stort, og Betingelsen for, at der fremkommer ægte Kohæsion derfor i højere Grad til Stede end ved Jord, bestaaende af grove Korn. Endvidere er, hvis Jordmassens Korn er tæt lejrede, Jordmassens Porer snævre, hvilket medfører, at der, hvis Porerne er

vandfyldte, kan fremkomme betydelig Kapillarspænding og dermed ret betydelig uægte Kohæsion.

Med Hensyn til Kornformen gælder, at jo større Indhold af skælformede Korn Jordmassen har, desto større er den ægte Kohæsion, idet skælformede Korn giver større samlet Anlægsflade mellem Kornene pr. Rumenhed af Jordmassen end Korn af sammentrængt Form. Ogsaa den uægte Kohæsion er større, jo større Indholdet af skælformede Korn er. Dette kan forklares ved Volumenforholdet mellem de to Slags Korn. Med samme ækvivalente Kornstørrelse er et skælformet Korns Volumen langt mindre end Volumen af et Korn af sammentrængt Form, og Antallet af Korn pr. Rumenhed Jordmasse derfor større og Porerne snævrere ved en Jordmasse, der har stort Indhold af skælformede Korn, end ved en Jordmasse bestaaende af Korn af sammentrængt Form.

For Jord, som ikke eller kun i ringe Grad besidder Kohæsion, bruges ofte Betegnelsen: *Friktionsjord*.

37. En Jordbunds Bæreevne afhænger af Friktionen mellem den paagældende Jordmasses Partikler indbyrdes (den indre Friktion) og af Jordmassens Kohæsion. Ligeledes har Jordens indre Friktion og dens Kohæsion afgørende Betydning ved Bestemmelse af Jordtryk.

Vedrørende Jordbundens Bæreevne og vedrørende de Formforandringer, der fremkommer i en Jordmasse, naar denne paavirkes af ydre Kræfter, ligesom ogsaa med Hensyn til Jordtryk, spiller det i mange Tilfælde en ret væsentlig Rolle, om den paagældende Jordmasses Porer er luftfyldte, eller de er helt eller delvis udfyldte med Vand. Er Porerne luftfyldte, har man kun at gøre med et enkelt Stof, Jordmassens Korn; Jorden kan i dette Tilfælde betegnes som: *Enfasesystem*. Indeholder Porerne Vand, er baade Jordmassens faste Bestanddele, Kornene, og Porevandet bestemmende for Jordmassens Egenskaber, og man har da at gøre med et *Tofasesystem*.

38. Den indre Friktion i en kohæsionsløs Jordmasse med luftfyldte Porer (Enfasesystem).

Enhver Formforandring af en Jordmasse er ledsaget af en Ændring i nogle af Kornenes indbyrdes Stilling. For at en saadan Ændring af Kornenes Lejringsforhold kan finde Sted, maa der i Almindelighed ske en Glidning i Berøringsfladerne mellem Kornene, og herved maa Friktionen i Berøringsfladerne, den indre Friktion, overvindes.

Ændring af Kornenes Lejringsforhold medfører ved Jord bestaaende af Korn af sammentrængt Form (Sand) i Reglen tillige, at en Del af Kornene kommer til at udføre en kæntrende Bevægelse, idet det enkelte

Korn kæntrer omkring Berøringsstedet med Nabo-Kornet.

Bestemmelsen af Friktionen i en Jordmasse sker sædvanlig ved, at man maaler Modstanden mod Glidning langs en Skilleflade i Jordmassen. Hertil kan anvendes et Apparat som det i Fig. 22 viste <sup>1)</sup>. *A* er en Plade med ophøjet Kant langs Randen og forsynet med Ribber *R*. Pladen hviler paa Ruller *r*. Oven paa Pladen anbringes en Ramme *B*, der fastskrues til Underlaget, og i den af Pladen og Rammen dannede Kasse fyldes den til Under søgelse foreliggende Jordmasse. Jorden overdækkes med en Plade *C*, gennem hvilken der udøves et lodret Tryk *P* paa Jordmassen. Det Træk *T*, der er fornødent for at frembringe Bevægelse af Pladen *A*, er Glidningsmodstanden for den inden for Rammen *B* liggende Snitflade i Jordmassen.

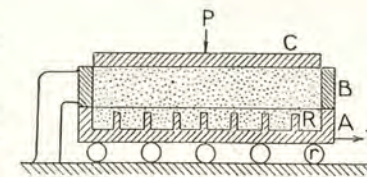


Fig. 22.

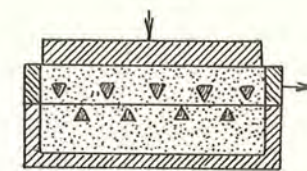


Fig. 23.

Ved, saaledes som det sædvanlig gøres, at regne den paa denne Maade fundne Glidningsmodstand at være lig med den fra den indre Friktion mellem Kornene hidrørende Modstand, begaas der en vis Fejl. Berøringsfladerne mellem de Korn, der glider paa hinanden, ligger nemlig ikke alle i den ved Underkanten af Rammen *B* bestemte Plan, og en Del af Modstanden mod Forskydningen hidrører fra, at nogle af Kornene kæntrer i Stedet for at glide i Forhold til hinanden.

*Terzaghi* anfører, at man for at faa Skillefladen i en Sandmasse til at følge Planen gennem Rammens Underkant uden for store Afvigelser, bør have Ribber paa tværs af Forskydningsretningen baade over og under Skillefladen, og har ved sine senere Undersøgelser angaaende Friktion i Sand benyttet den i Fig. 23 viste Anordning.

Ved Forsøgene fandtes, at for samme Sort Sand er Friktionskoefficienten en Del større, naar Sandet er tæt lejret, end naar det er løst lejret.

Saafernt Forskydningsmodstanden *T* udelukkende hidrører fra Friktionen mellem Kornene, skulde man have:

$$T = \mu P = P \operatorname{tg} \varphi, \quad (16)$$

hvor  $\mu$  er Friktionskoefficienten og  $\varphi$  Friktionsvinklen.

<sup>1)</sup> Denne Slags Apparater, hvis Konstruktion er angivet af *Krey*, anvendes i *Versuchsanstalt für Wasserbau u. Schiffbau*, Berlin.

Terzaghi anfører som Resultater af en Række Forsøg, at man har:

$$t = c + p \operatorname{tg} \varphi, \quad (17)$$

( $t$ ,  $c$  og  $p$  i  $\text{kg/cm}^2$ ) og følgende Talværdier:

For Sand bestaaende af afrundede, omtrent lige store Korn (Kornstørrelse fra 0,59 mm til 0,83 mm) i tæt Lejring (Hulrumsforhold:  $n = 34,8$ ):  $c = 0,2$ ,  $\operatorname{tg} \varphi = 0,69$ . Samme Sandsort i løs Lejring ( $n = 41,7$ ):  $c = 0,08$ ,  $\operatorname{tg} \varphi = 0,52$ .

For Sand bestaaende af kantede Korn i forskellige Størrelser:  $c = 0,25$ ,  $\operatorname{tg} \varphi = 0,75$ , og for en lignende Sandsort, men med noget Indhold af støvfint Materiale:  $c = 0,2$ ,  $\operatorname{tg} \varphi = 0,92$ .

De her anførte Talværdier gælder for Fladetryk  $p$  liggende mellem 1  $\text{kg/cm}^2$  og 10  $\text{kg/cm}^2$ .

For  $p < 1 \text{ kg/cm}^2$  fandtes Friktionskoefficienten at aftage saaledes:

For tæt lejret Sand: fra  $\operatorname{tg} \varphi = 1,7$  for  $p = 0,01 \text{ kg/cm}^2$  til  $\operatorname{tg} \varphi = 0,7$  for  $p = 1 \text{ kg/cm}^2$ .

For løst lejret Sand: fra  $\operatorname{tg} \varphi = 0,85$  for  $p = 0,01 \text{ kg/cm}^2$  til  $\operatorname{tg} \varphi = 0,52$  for  $p = 1 \text{ kg/cm}^2$ .

**39. Rumfangsændring og Ændring i Lejringsforhold.** Hvis en Ændring i Kornenes Lejringsforhold sker paa den ovenfor nævnte Maade, at en Del af Kornene kærtrer om Berøringsstederne med de respektive Nabokorn, vil der ved Overgangen fra den oprindelige Lejring til den ny, lige saa tætte Lejring finde en forbigaaende Forøgelse af Porevolumenet. Modvirkes denne Forøgelse af Porevolumenet, vil der være større Modstand mod Formforandring af Sandmassen.

En vandmættet Sandmasse, der er lufttæt omsluttet af en Gummihud, vil derfor være meget fast, idet den med en Forandring af Kornenes Lejring følgende Volumenforøgelse af Sandmassens Hulrum er hindret, naar der ikke kan trænge Luft ind til Sandmassen.

**40. Tryk og Poretal.** Udøves der et Tryk paa Overfladen af en Sandmasse, som er hindret i at udvide sig til Siden, komprimeres (fortættes) Sandmassen noget. Ved derpaa følgende Aflastning udvider Sandmassen sig (kvælder ud), uden at den dog naar at faa det samme Rumfang, som den havde før Belastningen. Ved gentagen Belastning med derpaa følgende Aflastning, faas atter Fortætning og Udkvældning, hver Gang med en tilbageblivende Rumfangsformindskelse, men denne bliver mindre og mindre for hver ny Belastning med paafølgende Aflastning.

Den af Trykket frembragte Fortætning kan henføres til tre Virkninger af Trykket: en mere eller mindre elastisk Sammentrykning af

de enkelte Korn, Forskydning af Kornene i Forhold til hverandre, samt Sønderbrydning af nogle af Kornene. De to sidstnævnte Virkninger af Trykket medfører en Formindskelse af Sandmassens Porevolumen.

Det Bidrag til Rumfangsformindskelsen af Sandmassen, der skyldes Kornmaterialets Sammentrykning, er ved de Paavirkninger, der kan blive Tale om ved Fundamenters Tryk paa Grunden, ganske forsvindende, og Kornmaterialets Trykstyrke er saa stor, at der, for saa vidt angaar den fra et Bygværk hidrørende Belastning paa Grunden, kan ses bort fra Muligheden for Sønderdeling af Kornene. Fortætningen og Udkvældningen maa derfor saa godt som udelukkende tilskrives Kornenes smaa Forskydningsbevægelser i Forhold til hverandre.

De af Trykket foraarsagede Forskydningsbevægelser modvirkes af den indre Friktion og er til en vis Grad reversible, nemlig i samme Grad, som Sandmassens Rumfang ved Aflastningen nærmer sig til det Rumfang, den havde før Belastningen.

Af Terzaghi er der udført en Del Forsøg med det Formaal at bestemme Relationen mellem Tryk og Rumfangsændring. I Fig. 24 er vist et Diagram for de ved et af saadanne Forsøg fundne sammenhørende Værdier af Tryk og Rumfangsændring, denne sidste udtrykt ved Poretallet ( $\epsilon$ ). Diagrammet kaldes *Tryk-Poretalsdiagram*.

Diagrammets Punkt  $A$  svarer til Tilstanden ved Forsøgets Begyndelse. Poretallets Størrelse er Maal for Sandets Lejringsforhold (løsere eller tættere Lejring), og Trykket er et vist Begyndelsestryk, f. Eks. hidrørende fra Sandmassens Egenvægt.

Ved  $B$  er der foretaget en Aflastning; Poretallet vokser da noget — Kurvestykket  $BC$  — men det til Punkt  $C$  hørende Poretal er lavere end det til Punkt  $A$  hørende Poretal. Ved fornyet Belastning aftager Poretallet (Kurvestykket  $CD$ ), men ikke saa stærkt som ved første Belastning, før Trykket har naaet omtrent den Størrelse, som det havde ved Aflastningens Begyndelse. Herfra aftager Poretallet atter noget stærkere med voksende Tryk.

Ved gentagne Belastninger og Aflastninger faas lignende Forhold. Diagrammets Kurvestykker  $BCD$ ,  $EF G$  o. s. v. («Hysterese-Sløjfer») faar dog efterhaanden noget mindre Hældning og kommer til at ligge tættere for samme Differens mellem Trykkene ved Aflastningernes Begyndelse, jo mere Trykket vokser. Diagrammets Hovedkurve,  $ABGH$ ,

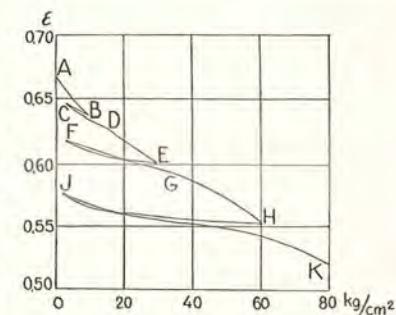


Fig. 24.

har aftagende Hældning med voksende Tryk. Hældningen er gennemgaaende større, jo løsere Sandets Lejrning er ved Begyndelsen af Sammentrykningen.

For Sand bestaaende af Korn med sammentrængt Form angives for Afhængigheden mellem Poretal ( $\varepsilon$ ) og Tryk ( $p$  i  $\text{kg/cm}^2$ ):

Ved Fortætning (Kompression):

$$\varepsilon = -a \log_e (p + p_c) - \beta (p + p_c) + c_1, \quad (18)$$

hvor  $a$ ,  $\beta$  og  $c_1$  afhænger af Sandets Beskaffenhed, og  $p_c$  af Poretallet ved Fortætningens Begyndelse. For pulveriseret Kvarts fandt *Terzaghi*:  $a = 0,0457$ ,  $\beta = 0,00165$  og  $c_1 = 0,9765$ ;  $p_c$  laa mellem 0,65 og 70,5  $\text{kg/cm}^2$  svarende til henholdsvis største og mindste Begyndelses-Poretal (henholdsvis løs Lejrning og tæt Lejrning).

Ved Udkvældning (Ekspansion):

$$\varepsilon = -\frac{1}{A} \log_e (p + p_i) + c_2, \quad (19)$$

hvor  $A$  (Kvældningstallet) er en Materialkonstant,  $c_2$  afhænger af Trykket ved Aflastningens Begyndelse, og  $p_i$  dels af Poretallet, dels af Trykket ved Aflastningens Begyndelse.

41. Naar, under Sammentrykning af en Sandmasse, den Plade, gennem hvilken Belastningen overføres til Sandet, fastholdes i den til en Belastning  $p_1$  svarende Stilling, aftager Trykket mellem Sandet og Pladen noget. Trykændringen sker til at begynde med hurtigt — de første 10—20 Minutter — derefter langsommere og nærmer sig asymptotisk en Grænseværdi. Denne er ved løst lejret Sand ca. 20 %/0, ved fast lejret Sand ca. 10 %/0 mindre end det Begyndelsestryk  $p_1$ , ved hvilket Pladen fastholdes.

Hvis man, i Stedet for at fastholde Belastningspladen, holder Trykket  $p_1$  konstant, aftager Sandmassens Poretal paa tilsvarende Maade.

Det her nævnte Forhold forklares ved, at der sker en Udligning af de af det ydre Tryk og af Kornenes indbyrdes Forskydning fremkaldte Friktionsspændinger. Hvert Kornes Ligevægt er betinget af alle de andre Kornes Ligevægt, og den Fordeling over hele Sandmassen, eller over en Del af denne, af de indbyrdes Forskydninger og af de dermed følgende Friktionsspændinger, som er nødvendig for Ligevægtstilstanden, sker ikke øjeblikkeligt sammen med Stigningen af det ydre Tryk, men tager nogen Tid. Efterhaanden som denne Fordeling finder Sted, aftager da Forskydningsspændingerne ved de nærmest ved Belastningspladen liggende Korn og dermed disse Kornes Modtryk paa Pladen.

42. Afhængigheden mellem Poretal og Trykpaavirkning ved Blandinger af Kvantssand (Korn med sammentrængt Form) og Glimmer (skælformede Korn) er undersøgt af *Terzaghi* og *G. Gilboy*. Poretallet for saadanne Blandinger fandtes at være betydelig større og at aftage meget stærkere med voksende Fladetryk end ved rent Kvantssand.

Den i Fig. 25 viste Kurve angiver Afhængigheden mellem Kvældningstallet  $A$  og det procentvise Indhold af Glimmerkorn i en Sand-Glimmer-Blanding, idet det er forudsat, at  $A = 200$  for rent Kvantssand.

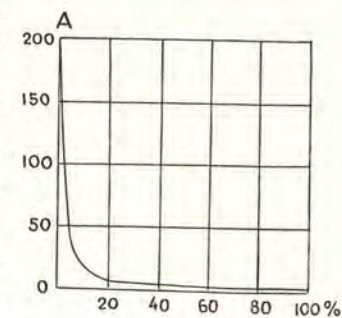


Fig. 25

Det angives endvidere, at Kvældningstallet  $A$  aftager med voksende Poretal, nemlig saaledes at der haves:

$$A = \frac{\text{Konst.}}{1 + \varepsilon}.$$

43. Jord med vandfyldte Porer (Tofasesystem). Porevandet kan paa forskellige Maader indvirke paa Jordmassens Egenskaber, nemlig: a) ved at det ændrer den indbyrdes mellem Kornene optrædende Friktion, b) ved at Porevandet fremkalder visse Trykspændinger i Jordmassens Indre, og c) ved at Formforandringer, som er betinget af Rumfangsændringer i Hulrummene mellem Kornene, medfører Ændringer af Vandindholdet, og derfor en Bevægelse af Vandet gennem Jordmassens Porer.

44. Vandets direkte Indvirkning paa den indre Friktion i Jordmassen er ganske ringe ved Jordarter bestaaende af Korn af sammentrængt Form (Kvantssand). Efter *W. B. Hardy*<sup>1)</sup> er den indre Friktion endog noget større i vaadt Sand end i tørt Sand. For Jordarter med Indhold af skælformede Korn (Ler) angives, at det saavel kan forekomme, at Vandets Tilstedeværelse bevirker en Forøgelse af Friktionen, som at Vandet bevirker en Formindskelse af Friktionen; det sidste er sædvanlig Tilfældet. At der kan være Forskel med Hensyn til Vandets Indvirkning paa den indre Friktions Størrelse, efter som det er Jord bestaaende af Korn med sammentrængt Form, eller det er Jord med stort Indhold af skælformede Korn, kan antagelig forklares ved, at ved den førstnævnte Slags Korn er Trykket i Berøringsstederne paa Grund af, at Berøringsarealerne er meget smaa, saa stort, at Kornene her trænger gennem Vandhinden om Kornene, saaledes at disse er i direkte Berøring indbyrdes, medens der ved skælformede Korn haves forholdsvis større Anlægsflader mellem

<sup>1)</sup> Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik.

Kornene indbyrdes og derfor mindre Tryk i Anlægsfladerne, saaledes at der kan bestaa en Vandhinde mellem Kornene.

I fint Sand skulde Vandindholdet herefter kunne medføre en Formindskelse af Friktionen, fordi det relativt store Antal Berøringssteder mellem Kornene bevirker, at Trykkene i Berøringsstederne er relativt smaa. Ligeledes skulde herefter Friktionen i den øverste Del af et vandfyldt Sandlag være mindre end dybere nede i Sandlaget paa Grund af Forskellen i de fra Sandmassens Egenvægt hidrørende Tryk.

45. Forholdet vedrørende de af en Jordmasses Vandindhold fremkaldte indre Trykspændinger mellem Jorddelene kan belyses ved Betragtning af, hvorledes et porøst elastisk Stof, som f. Eks. Bomuld, forholder sig. Sammentrykkes en Klump tør Bomuld i Luften, vil den, naar den atter slippes fri, udvide sig igen. Lægges Bomulden først i Vand, saaledes at Porerne udfyldes med Vand, og sammentrykkes den derefter, vil den, naar den efter at være taget op af Vandet atter slippes fri, ikke udvide sig. Lægges endelig Bomuldsklumpen, hvis nu formindskede Porevolumen er vandfyldt, atter ned i Vand, udvider den sig paany; Udvidelsen i Vand sker dog noget langsommere, end den tørre Bomulds Udvidelse i Luften.

At det vandfyldte, porøse Legeme ikke udvider sig igen, naar det frigøres fra den sammentrykkende ydre Kraft, skyldes Kapillarkræfterne, d. v. s. Overfladespændingen i det i Porerne værende Vand i Grænsefladen mellem Vandet og den omgivende Luft. I hver af Porerne vil der være et til denne Overfladespænding (og til Kapillarkraften) svarende Undertryk i Vandet, og dette Undertryk modvirker de ved Sammentrykningen fremkaldte elastiske Spændinger i Porevæggene, som tilstræber at udvide Porerne. Disse holdes derved sammensnævrede, saaledes at Bomulden ikke kan udvide sig, men holder sig fortættet til det samme lille Volumen, til hvilket den sammentrykkes af den ydre Kraft.

Naar den vandfyldte Bomuld, som af Kapillarkræfterne holdes fortættet til det forholdsvis lille Rumfang, lægges i Vand, synker Overfladespændingerne ved Porerne ydre Ender, og dermed ogsaa Undertrykket i Porerne, til Nul. De elastiske Spændinger i Bomulden er da i Stand til atter at tilvejebringe de samme Rumfangsforhold, som Bomulden havde i tør, usammentrykket Tilstand.

Den Hastighed, med hvilken Rumfangsforøgelsen sker, henholdsvis i Vand og i Luft, er afhængig af den Hastighed, med hvilken Vandet, resp. Luften, kan strømme ind i Porerne under Indvirkning af en Trykdifferens, der i hvert Øjeblik svarer til Bomuldens Elasticitetsspænding. Da Strømningshastigheden for samme Poretværsnit og samme Trykdif-

ferens er større for Luft end for Vand, vil Rumfangsforøgelsen foregaa langsommere i Vand end ved den tørre, sammentrykkede Bomulds Udvidelse i Luften.

46. Kapillartryk i Jord. Tilsvarende Forhold som de ovenfor nævnte haves ved en kornet Masse som Jord.

En Jordmasse, hvis Porer er vandfyldte, vil, naar den er omgivet af Luft, være underkastet Virkningen af Porevandets Overfladespændinger og de hertil svarende Kapillarkræfter. Undertrykket i Porevandet vil bevirke, at de Porerne begrænsende Jorddele trykkes mod hverandre paa lignende Maade, som hvis Jordmassen var omsluttet af en spædt Gummihud. Den Kraft, med hvilken Jorddelene saaledes trykkes sammen, kaldes Jordmassens Kapillartryk.

Kapillartrykket i en Jordmasse bevirker, at denne faar en vis Trækstyrke (eller Tilvækst i Trækstyrke), nemlig svarende direkte til den Kraft, med hvilken Jordmassen holdes sammenpresset af Kapillartrykket. Endvidere bevirker Kapillartrykket, at Jordmassen fortættes, idet Porerne indsnævres. Herved forøges det samlede Areal af Anlægsflader mellem Jordmassens Korn, og dette medfører, at den samlede Adhæsion mellem Kornene, d. v. s. Jordmassens ægte Kohæsion, forøges noget. Endelig foraarsager Kapillartrykket, ved at Jorddelene trykkes mod hverandre med en til Kapillartrykket svarende Kraft, at der i Anlægsfladerne mellem Jorddelene vil være en Friktionsmodstand til Stede, som modvirker Jorddelenes indbyrdes Forskydning.

Den Del af en Jordmasses Sammenhængskraft — Modstand mod Formforandring for Trækpaavirkning og Forskydningspaavirkning —, der skyldes Tilstedeværelse af Kapillartryk (Adhæsion og indre Friktion), kaldes, som tidligere nævnt,<sup>1)</sup> den uægte Kohæsion. Den uægte Kohæsion forsvinder, naar Kapillartrykket ophører at virke.

En vaad Jordmasse, der er omgivet af Luft, er i Besiddelse af en vis Kohæsion, dels ægte Kohæsion, dels uægte Kohæsion. Naar Jordmassen lægges i Vand, forsvinder den uægte Kohæsion, idet Overfladespændingen og dermed Kapillartrykket bliver Nul, ved at Jordmassen dykkes ned i Vand.

47. Kapillartrykkets Virkning i Henseende til at fortætte en Jordmasse ved Indsnævring af Porerne maa være afhængig af den poreudfyldende Vædskes Overfladespænding. *Terzaghi* har foretaget Forsøg til Oplysning om dette Forhold. Ved Udrøring af tørt Lerpulver med Vand fandtes, at Jordmassen ved at blive anbragt i Luft fortættes saaledes, at Poretallet blev:  $\varepsilon = 0,482$ , medens Jordmassen, naar der i Stedet for Vand anvendtes Alkohol, hvis Overfladespænding er omtrent  $\frac{1}{3}$  af Vandets, kun fortættes til  $\varepsilon = 0,798$ .

<sup>1)</sup> § 36.





Fig. 26

48. Kapillartrykket og dets Virkning i Henseende til Frembringelse af uægte Kohæsion er større, jo snævrere Porerne er.

I en Jordmasse med forholdsvis vide Porer kan der være (en ikke helt ubetydelig uægte Kohæsion til Stede, hvis Porerne kun er delvis fyldte med Vand. De enkelte Poreres spalteformede og snævre Del (Fig. 26) er her vandfyldt, medens der er Luft i de øvrige, vide Dele af Porerne. I de vandfyldte Partier af Porerne vil der være Overfladespænding til Stede og derfor ret betydelig Kapillartryk mellem Kornene. Kapillartrykket og dermed den uægte Kohæsion bliver meget mindre, hvis Porerne fyldes helt med Vand.

49. I en Jordmasse bestaaende af forholdsvis store Korn af sammentrængt Form (Sand), er som tidligere nævnt den ægte Kohæsion ganske ringe paa Grund af, at Anlægsfladerne mellem de hverandre berørende Korn er relativt faa og smaa. Ogsaa den uægte Kohæsion er, paa Grund af at Porerne er forholdsvis vide, ret ubetydelig, men dog saa stor, at den tydelig giver sig tilkende. I en Klump vaadt Sand er der saaledes saa megen Sammenhæng, naar den er omgivet af Luft, at den, anbragt paa en Plade, kan holde sig med lodrette Sideflader uden at skilles ad. Sænkes Sandklumpen ned i Vand, forsvinder den uægte Kohæsion. Sandet flyder da ud og danner en Bunke med hældende Sideflader.

I fugtigt Sand er den uægte Kohæsion større end i helt gennemvaadt Sand paa Grund af det i § 48 nævnte Forhold. Henstilles gennemvaadt Sand i en Skaal, vil Sandmassen, naar største Delen af Vandet efter nogen Tids Forløb er fordampet, være meget haard og tæt lejret. Efterhaanden som de vandfyldte Dele af Porerne bliver mindre, forøges Kapillartrykket; Kornene trykkes derved tættere mod hverandre, og den uægte Kohæsion — væsentligst bestaaende af indre Friktion — forøges derved betydeligt.

50. I finkornede Jordarter, som Ler, kan Kohæsionen, og navnlig den uægte Kohæsion, være meget betydelig.

Sammentrykkes en tør, finkornet Jordmasse, fortættes den, idet Porevolumenet formindskes. Ophører det ydre Tryk, ved hvilket Sammentrykningen er sket, udvider Jordmassen sig noget (kvælder ud), for det meste dog ikke til samme Volumen, som den havde før Sammentrykningen. Ved Sammentrykningen kommer flere Korn i indbyrdes Berøring, og herved forøges det samlede Areal af Anlægsfladerne mellem

Kornene og dermed ogsaa den ægte Kohæsion i Jordmassen. Hvis Jordmassen, efter at Trykket er ophørt at virke, bevarer noget af den af Trykket frembragte Fortætning, vil den ogsaa bevare en Del af den til Fortætningen svarende ægte Kohæsion. Hvor stor den ved Sammentrykningen frembragte blivende ægte Kohæsion er, afhænger af, hvor finkornet Jordmassen er, og antagelig ogsaa af Kornformen og af Kornenes Bøjelighed. Jo mindre Jorddelene er, og jo større Jordmassens Indhold af skælfornede Korn er, desto større vil den blivende ægte Kohæsion være.

Kapillartrykket i en Jordmasse med vandfyldte Porer virker paa samme Maade paa Jordmassen som en ydre sammentrykkende Kraft. Jordmassens Volumen formindskes, og det samlede Areal af Anlægsflader mellem Kornene forøges ved den af Kapillartrykket foraarsagede Fortætning af Jordmassen.

51. Kapillartrykket kan i meget finporøse Jordarter være meget stort. I fedt Ler kan Kapillartrykket efter de af *Terzaghi* foretagne Undersøgelser være 100 kg/cm<sup>2</sup> eller mere. Tilstedeværelsen af saa store Kapillartryk kan ikke forklares alene ved Porerens Snæverhed, men antages for en Del at have sin Aarsag i, at Vandets Viscositet er betydelig mindre og dets Overfladespænding betydelig større i de meget snævre Porer end under normale Forhold.

52. **Udkvældning.** Udignes Kapillartrykket, ved at Jordmassen dykkes ned i Vand, vil Jordmassen kvælde ud. Ved Udkvældningen skal der i Jordmassen optages en vis Mængde Vand, nemlig svarende til den med Udkvældningen følgende Forøgelse af Porevolumen. Udkvældningen foregaar ret langsomt paa Grund af, at der er forholdsvis stor Modstand mod Vandets Bevægelse i de meget snævre Porer (jfr. § 45, Bomuldsklumpens Udvidelse i Vand). Hvor lang Tid, der medgaar til Udkvældningen, afhænger af den paagældende Jordarts Permeabilitet.

De forskellige Jordarter forholder sig forskelligt med Hensyn til Udkvældningen. Nogle Lerarter kvælder saaledes stærkere ud end andre. Hvis en Lermasse, hvis Kohæsion skyldes Virkningen af Kapillartryk, ved Ophævelse af Kapillartrykket (Neddykning i Vand) udvider sig helt til det samme Rumfang, som den havde forinden Sammentrykningen, mister Lermassen al Kohæsion og smuldrer eller flyder hen. Udvider Lermassen sig ikke helt til det oprindelige Rumfang, bevarer den en Del af Kohæsionen. Den tilbageblivende Kohæsion er ægte Kohæsion.

53. **Svindgrænsen.** Naar en finporøs Jordmasse med vandfyldte Porer er omgivet af Luft, vil der ske Fordampning af Vandet fra Jordmassens Overflade. Til at begynde med foregaar Fordampningen stadig

fra Jordmassens Overflade, idet der suges Vand ud fra Porerne, og disse indsnævres derved mere og mere. Denne Indsnævring af Porerne bevirker en Volumenformindskelse af Jordmassen og samtidig en Forøgelse af Kapillartrykket og dermed Forøgelse af den uægte Kohæsion. I Almindelighed vil ogsaa den ægte Kohæsion vokse som Følge af, at Jorddelene presses tættere og tættere sammen. Jo mere Porerne indsnævres og Jordmassen derved fortættes, desto større bliver imidlertid ogsaa Modstanden mod yderligere Fortætning. Jordmassen vedbliver at svinde som Følge af Fordampningen, indtil Modstanden mod yderligere Poreindsnævring er lige saa stor som det til Overfladespændingen ved Porerne svarende Undertryk i det i Porerne værende Vand. Naar denne Grænse, *Svindgrænsen*, er naaet, vil den fortsatte Fordampning af Porevand medføre, at Porevandet Overflade trækker sig tilbage fra Jordmassens Yderflader. Kapillartrykket og den uægte Kohæsion forsvinder da i den Del af Jordmassen, hvorfra Porevandet er trukket tilbage, medens Kapillartryk og uægte Kohæsion vedbliver at være til Stede i den indre Del af Jordmassen, hvor Porerne er vandfyldte.

54. Som ovenfor nævnt kan en finkornet Jordmasse bibringes nogen ægte Kohæsion ved, at den sammentrykkes, og denne ægte Kohæsion kan vedblive at være til Stede, efter at Trykket er ophørt at virke. I den ved Porevandets Fordampning udtørrede Jordmasse kan der ligeledes, efter at Kapillartrykket er forsvundet, vedblivende være Kohæsion til Stede. Denne er den ægte Kohæsion, der er frembragt ved den af Kapillartrykket forårsagede Kompression af Jordmassen.

Hvis den udtørrede Del af Jordmassen ikke bevarer den af Kapillartrykket forårsagede fortættede Lejrning, og den derfor efter Udtørringen ikke besidder ægte Kohæsion, smuldrer den.

Ved at Vandet ved Fordampning forsvinder fra Jordmassens Porer og disse fyldes med Luft, forandres i Reglen Jordmassens Farvetone fra mørk til lys.

Hvis Jordmassens Overflade er stor, som f. Eks. Tilfældet er, hvor et vandfyldt Lerlag afdækkes saaledes, at dets Overflade kommer til at ligge frit i Luften, danner der sig paa Grund af Lerets Volumenformindskelse Svindrevner i Lerets Overflade, efterhaanden som Porevandet trækker sig bort fra Overfladen.

55. Ved Lufttørring af fedt Ler fordamper ikke alt det i Jorden værende Vand. *Terzaghi* angiver, at Fordampningen ophører, naar Lerets Vandindhold er reduceret til 4—7 Vægtprocent af Lermassens Tørstof. Det i Leret tilbageholdte Vand, der helt eller delvis kan være hygroskopisk bundet Vand, udfylder kun de snævre Dele af Jordmassens Porer og frembringer derved (jfr. §

48) forholdsvis stor uægte Kohæsion. Lufttørret Ler kan derfor være i Besiddelse af saavel den af Kapillartrykkets Fortætningsvirkning forårsagede ægte Kohæsion som af uægte Kohæsion.

56. Naar en finkornet Jordmasse, efter at den er lufttørret indtil Svindgrænsen, dykkes ned i Vand, eller overhældes med Vand, forsvinder, som nævnt, Kapillartrykket, og Jordmassen kvælder ud. Paa Grund af Modstanden mod Indtrængen af det til Udfyldning af Porerne fornødne Vand forplanter Udkvældningen sig forholdsvis langsomt fra Jordmassens Yderflade til dens Indre. Herved opstaar der Spændinger i Jordmassen, og dette kan bevirke, at der løsner sig Skaller fra Jordmassen, efterhaanden som Udkvældningen skrider frem i Jordmassen.

57. **Plastisk Jord.** Nogle Jordarter har den særlige Egenskab, at Jordmassen ved et vist Vandindhold er *plastisk*.

Det karakteristiske ved den plastiske Tilstand er, at Jordmassen for en forholdsvis ringe ydre Paavirkning (Tryk eller Forskydning) undergaar betydelig blivende Formforandring. Ved denne forskydes Jorddelene i Forhold til hverandre, uden at Jordmassen derfor mister sin Sammenhæng, og Formforandringen forårsager ikke væsentlige indre Spændinger i Jordmassen. Dette udtrykkes ofte kort saaledes, at en plastisk Jordmasse er formbar.

I en plastisk Jordmasse er den indre Friktion ganske ringe, og den Del af den uægte Kohæsion, som er betinget af den indre Friktion (Kapillartryk  $\times$  Friktionskoefficient), er derfor ogsaa lille. Derimod kan en plastisk Jordmasse godt være i Besiddelse af forholdsvis stor ægte Kohæsion og i Besiddelse af den Del af den uægte Kohæsion (Adhæsionen mellem Kornene), der skyldes en af Kapillartrykket forårsaget tættere Berøring mellem Jorddelene.

En Jordmasse, der bestaar af Korn med sammentrængt Form (f. Eks. almindeligt Sand), kan ikke blive plastisk. I Sand er nemlig enhver gennemgribende Formforandring, som sker, ved at Kornenes indbyrdes Stillingsændres, betinget af en, omend forbigaaende, Rumfangsforøgelse af Jordmassen (jfr. § 39).

Af de naturligt forekommende Jordarter er det visse Slags Ler, der kan blive plastiske. Hos de Lerarter, der kan blive plastiske, kan der forekomme forskellige Grader af Plasticitets-Egenskaber.

58. Anskuelserne om, hvilke af en Jordmasses fysiske Egenskaber det er, der betinger, at Jordmassen kan blive plastisk, er noget delte. De fleste gaar ud paa, at det er Kornstørrelsen og tildels Kornenes Form, samt Jordmassens Indhold af Lersubstans i kolloid Opløsning, der har afgørende Betydning. Efter nogle Angivelser skal Jordmassen, for at den skal kunne blive plastisk, for den væsentligste Del bestaa af Korn med Størrelse  $< 2 \mu$ , og indeholde betydelige Mængder af skælformede Korn.

Af *Atterberg* er der foretaget en Del Forsøg til Oplysning om dette Forhold.<sup>1)</sup> Han pulveriserede forskellige Slags Mineraler: Kvarts, Kalifeldspat, Talk, Serpentin, Clorit, Kaliglimmer, Magnesiaglimmer o. a., adskilte Knusningsproduktet for hver af disse Mineraler efter Kornstørrelse (Mo, Mikroler, Ultraler) og undersøgte Plasticitetsforholdene ved de fremkomne Slæmmeprodukter. Herved fandtes, at kun de af Slæmmeprodukterne, hvis Kornstørrelse var mindre end  $2 \mu$ , var plastiske, og at ingen af Slæmmeprodukterne af Kvarts og Feldspat — der ikke indeholdt skælfornede Korn — var plastiske. Slæmmeprodukterne af de andre Mineraler havde skælfornede Korn.

59. **Konsistensgrænser.** Til Karakterisering af en Jordart i Henseende til Vands Indvirkning paa Jordmassen anvendes ved jordbundstekniske Undersøgelser ofte det af *Atterberg* foreslaaede *Konsistensgrænse-System*.

Konsistensgrænsen angives ved det Vandindhold, udtrykt i Procent af Jordmassens Tørsubstans, ved hvilket Jordmassen gaar over fra den ene til den næste af en Række af *Atterberg* nærmere definerede *Konsistensformer*. Disse forskellige Konsistensformer er anført i nedenstaaende Tabel 5.

Tabel 5.

Hovedkonsistensform	Konsistensform efter Atterbergs Forslag	Konsistensgrænser
Fast	Helt fast	} Svindgrænse } Udrulningsgrænse. Nedre Plasticitetsgrænse
	Nogenlunde fast	
Plastisk	Ikke klæbende	} Klæbegrænse } (Flydegrænse). Øvre Plasticitetsgrænse } Nedre Flydegrænse
	Sejg og klæbende	
	Sejgt flydende	
Flydende	Tykt flydende	} Øvre Flydegrænse
	Tyndt flydende	

De anførte Konsistensformer er definerede saaledes:

1. »Helt fast«: Jordmassens Rumfang formindskes ikke ved Udtørring. To Prøvestykker af Jordmassen hæfter ikke ved hinanden ved svagt Tryk. Ved Porevandets Fordampning trænger der Luft ind i Porerne.

2. »Nogenlunde fast«: Prøvestykker af Jordmassen svinder ved Udtørring, og der trænger ikke Luft ind i Prøvestykket. To Prøvestykker, der trykkes sammen, hæfter ved hinanden.

<sup>1)</sup> Internationale Mitteilungen für Bodenkunde. 1913.

3. »Ikke klæbende«: Massen lader sig forme og udrulle til ca. 4 mm tykke Traade. Jorddelene klæber ikke til det Værktøj, Massen behandles med.

4. »Sejg og klæbende«: Massen lader sig let udrulle til Traade. Jorddelene klæber til Værktøjet.

5. »Sejgt flydende«: Massen har dejagtig Konsistens, og, anbragt paa en Plade, flyder den ud, saaledes at den danner et Lag paa ikke under 1,5 cm Tykkelse.

6. »Tykt flydende«: Massen har Konsistens som en tynd Dejj. Naar der med en Glasstang trækkes en Fure i Massen, løber de ved Furen adskilte Dele af Massen sammen i Løbet af ca.  $\frac{1}{2}$  Minut, idet der dog bliver en Fuge tilbage mellem de to Dele.

7. »Tyndt flydende«: Jordmassen er opslåmmet i Overskud af Vand; de grovere Bestanddele bundfældes efterhaanden.

60. **Plasticitetstal.** I Forbindelse med Anvendelsen af Konsistensgrænserne bruges det ogsaa at karakterisere en Jordmasse ved et Plasticitetstal. Plasticitetstallet er Differensen mellem Flydegrænsen og Udrulningsgrænsen. Plasticitetstallet angiver saaledes det Vandprocentinterval over Udrulningsgrænsen, i hvilket Jordmassen befinder sig inden for det plastiske Omraade, men siger intet om Plasticitetsgraden inden for Omraadet eller om dettes Beliggenhed paa Vandprocentsskalaen for Konsistensgrænserne.

61. **Bestemmelsen af Konsistensgrænserne og af Plasticitetstallet** sker ved, at man sammenælder Prøver af Jordmassen med Vand i forskellig Mængde og udfører de til de ovenfor anførte Definitioner af Konsistensgrænser hørende Forsøg.

Bestemmelsen af Konsistensgrænserne og Plasticitetstallet efter den *Atterbergske* Skala er, som det vil forstaas af de anførte Definitioner, behæftet med nogen Usikkerhed, idet Bedømmelsen af Jordmassens Tilstand ved de forskellige Vandprocenter er i nogen Grad afhængig af Undersøgerens subjektive Skøn.<sup>1)</sup>

62. **Kegleprøve.** Af andre Undersøgelser til Brug ved Karakterisering af Jordarter, som kan antage plastisk Konsistens, skal nævnes den saakaldte Kegleprøve. Denne Undersøgeltesmaade er indført af den svenske *Geotekniske Kommission* og anvendt bl. a. af *Danmarks geologiske Undersøgelse*.

<sup>1)</sup> *Gilboy* har udviklet andre Metoder til Bestemmelse af Konsistensgrænserne og har konstrueret Apparater til Brug ved disse Bestemmelser. Proc. Am. Soc. of Civ. Eng. 1931.

Ved Undersøgelse af en Jordart ved Hjælp af Kegleproven karakteriseres Jordarten ved Størrelserne af de Vægte, med hvilke et kegleformet Legeme skal belastes for at synke et vist Stykke ned i en med en vis Mængde Vand sammenlættet Prøve af Jordmassen. Proven kan ogsaa foretages paa den Maade, at man ved gentagne Forsøg bestemmer, hvor stort Vandindhold den æltede Jordprøve skal have, for at en Kegle af en vis Vægt og Form (60 gram og  $60^\circ$  Topvinkel) skal synke 1 cm ned i Jordmassen.

**63. Vandbestandighedsprøve.** En særlig Form for Undersøgelse af en Jordarts Forhold overfor Vand er den saakaldte, af *Terzaghi* foreslaaede Vandbestandighedsprøve.<sup>1)</sup> Denne Undersøgelingsmaade grunder sig paa det i § 56 omtalte Forhold, at en delvis udtørret Jordmasse, i hvilken der er Kapillartryk til Stede; sonderdeles, naar den overhældes med Vand, idet der løsner sig Skaller fra Jordmassen, efterhaanden som Vandet trænger ind i Jordmassen. Vandbestandighedsprøven er af *Terzaghi* foreslaaet udført saaledes: Jordprøven æltes med Vand til sejt plastisk Konsistens, og af Jordprøven tildannes et cylinderformet Legeme (f. Eks. 2,5 cm i Diameter og 2,5 cm højt), der tørres i Ovn ved en Temperatur af ca.  $100^\circ$ . Prøvelegemet anbringes paa en Metalring med lidt mindre Diameter end Prøvelegemet, og dette overhældes med Vand. Jordartens Vandbestandighed angives da ved den Tid, som det tager, for Prøvelegemet er saa vidt sonderdelt, at det falder ned gennem Ringen.

**64. Den indre Friktion i Jord med vandfyldte Porer.** Bestaar Jordmassen af forholdsvis store Korn af sammentrængt Form, kan Bestemmelsen af den indre Friktion ske paa lignende Maade som beskrevet i § 38, idet Vandets Tilstedeværelse i dette Tilfælde ikke kræver særlige Forholdsregler.

Ved finkornede og ved kohæsive Jordarter maa det Jordlegeme, for hvilket Glidningsmodstanden skal bestemmes, under Maalingens Udførelse holdes neddykket i Vand, da Virkningen af den uægte Kohæsion ellers griber forstyrrende ind. Det angives imidlertid<sup>2)</sup>, at man, selv om Friktionsbestemmelsen sker paa denne Maade, kan komme til ret forskellige Resultater for samme Jordart.

Afhængigheden mellem Forskydningsmodstanden  $t$  og det Tryk  $p$ , som virker paa Jordmassen, er udtrykt ved

$$t = c + p \operatorname{tg} \varphi,$$

hvor  $c$  er den Del af Forskydningsmodstanden, der skyldes Kohæsionen, og  $\operatorname{tg} \varphi$  er Friktionskoefficienten.

Den ægte Kohæsion forøges, naar Trykket vokser, og Jordmassen

<sup>1)</sup> *Redlich-Terzaghi-Kampe*: Ingenieurgeologie. 1929.

<sup>2)</sup> *Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik*. 1931.

bevarer en Del af den ved Trykket frembragte ægte Kohæsion, naar Trykket ophører. Har man saaledes ved et Forsøg, hvor der er anvendt Tryk indtil  $p_1$ , fundet den ved Linien  $c_0 a$  (Fig. 27) bestemte Afhængighed mellem  $t$  og  $p$ , og lader man derefter Trykket aftage til Nul og gentager Forsøget, findes andre sammenhørende Verdier for  $t$  og  $p$ , f. Eks. som fremstillet ved Linien  $c'_0 a'$ .

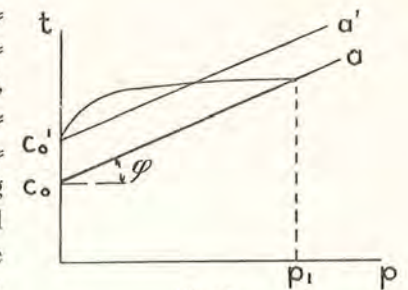


Fig. 27.

Ved det andet Forsøg er Jordmassens ægte Kohæsion  $c'_0$  ved Forsøgets Begyndelse større end ved det første Forsøg.

For de Resultater med Hensyn til Størrelse af Friktionsmodstand og Kohæsion, der kan udledes af saa-

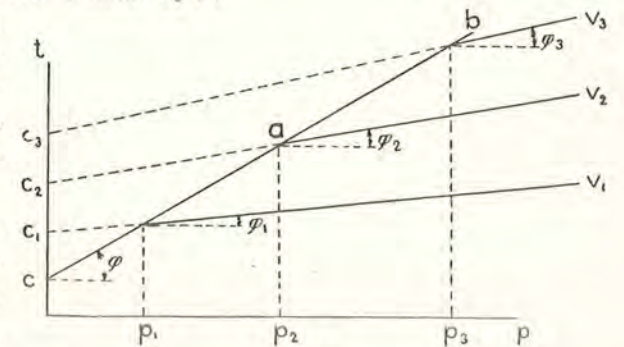


Fig. 28.

danne Maalinger af en Jordmasses Glidningsmodstand, har det endvidere Betydning, om man under hele Forsøget lader hengaa tilstrækkelig lang Tid for hver Forøgelse af Belastningen, til at Jordprøvens Vandindhold kan afpasse sig efter Trykket, eller om Trykstigningen sker forholdsvis hurtigt. Foretages Forsøget f. Eks. saaledes, at Vandindholdet, naar dette er formindsket til den Størrelse  $v_2$ , der svarer til Trykket  $p_2$ , derefter holdes uforandret, idet man lader Trykstigningen ske meget hurtigt, faas den ved Linien  $c a v_2$  (Fig. 28) fremstillede Afhængighed mellem  $t$  og  $p$ . Tænker man sig hele Forsøget gennemført med konstant Vandindhold  $v_2$ , vilde hertil svare Linien  $c_2 v_2$ . Den ægte Kohæsion  $c_2$  vilde være større, og Friktionskoefficienten  $\operatorname{tg} \varphi_2$  vilde være mindre end de tilsvarende Værdier ved et Forsøg, hvor Vandindholdet stadig afpasses efter Trykket (Linien  $c a b$ ).

For konstant Vandindhold  $v_1$ , større end  $v_2$ , d. v. s. et Vandindhold svarende til et Tryk  $p_1 < p_2$ , vil faas en Linie som f. Eks.  $c_1 v_1$ , nemlig baade mindre ægte Kohæsion og mindre Friktionskoefficient end ved Vandindhold  $v_2$ . For konstant Vandindhold  $v_3$ , d. v. s. et Vandindhold svarende til et Tryk  $p_3 > p_2$ , faas en Linie  $c_3 v_3$ , nemlig baade større ægte Kohæsion og større Friktionskoefficient end for Vandindhold  $v_2$ . De her nævnte Forhold finder for Kohæsionens Vedkommende sin For-

klaring i, at jo større Vandindhold Jordmassen har, desto mindre tæt er Lejringsen, og desto mindre er det samlede Areal af Anlægsflader mellem Kornene, og for Friktionskoefficientens Vedkommende i, at en Del af Trykket overføres fra Belastningspladen til Underlaget for Jordmassen gennem Porevandet, saaledes at kun en Del af Trykket fra Belastningspladen kommer til Virkning i de Anlægsflader mellem Jorddelene, langs hvilke Glidningen finder Sted.

Ved Fastsættelse af Værdier for Friktionens Størrelse, til Brug ved Beregning af Jordtryk, kan det her omtalte Forhold have ret stor Betydning, naar det drejer sig om Jordtryk fra dybt liggende Jordlag, der er underkastet stort Tryk fra Vægten af de overliggende Jordlag. Under saadanne Omstændigheder er det af Vigtighed at bestemme Størrelsen af Vandindholdet i den paagældende Jordmasse med størst mulig Nøjagtighed.<sup>1)</sup>

**65. Tryk og Poretal.** Vedrørende Afhængigheden mellem Tryk og Poretal ved en finkornet Jordmasse med vandfyldte Porer, naar Jordmassen er hindret i at udvide sig til Siden, haves lignende Forhold som de i § 40 omtalte. Jordmassen fortættes, naar den belastes, og kvælder ud, naar den aflastes. Tryk-Poretalsdiagrammet har en lignende Form som det i Fig. 24 viste.

Da imidlertid en Del af det i Jordmassen værende Vand under Jordmassens Fortætning skal fortrænges fra Porerne, og der skal indsuges Vand i Porerne, naar der finder Udkvældning Sted, og da Modstanden mod Vandets Bevægelse i Porerne paa Grund af disses overordentlig ringe Vidde er meget betydelig, maa det ved Udførelsen af Forsøg til Bestemmelse af Jordartens Tryk-Poretalsdiagram indrettes saaledes, at Porevandet kan passere ud af, resp. ind i, den behandlede Jordmasse. Endvidere maa Belastningstilstandens Varighed for hvert Trin i Forsøgene udstrækkes over tilstrækkelig lang Tid til, at de med Porevandets Bevægelse følgende hydrodynamiske Spændinger kan naa at blive udligenede, forinden Belastningstilstanden ændres.

Tryk-Poretalsdiagrammet har et lignende Forløb som ved Sand. Efter *Terzaghi* kan Afhængigheden mellem Poretal ( $\varepsilon$ ), og Tryk ( $p$  i  $\text{kg/cm}^2$ ) for Fortætning udtrykkes ved:

$$\varepsilon = -a \log_e (p + p_c) - \beta (p + p_c) + c_1,$$

eller, idet  $\beta$  er en forholdsvis lille Størrelse:

$$\varepsilon = -\frac{1}{C} \log_e (p + p_c) + c_1 \quad (20)$$

<sup>1)</sup> Se § 142.

$C$  er en Materialkonstant (Fortætningstallet). For Udkvældning — ved Aflastning — haves:

$$\varepsilon = -\frac{1}{A} \log_e (p + p_i) + c_2, \quad (21)$$

hvor  $A$  ligeledes er en Materialkonstant (Kvældningstallet). Størrelserne  $p_c$ ,  $p_i$ ,  $c_1$  og  $c_2$  har lignende Betydning som de tilsvarende i § 40 nævnte Størrelser.

**66. Forsøg til Bestemmelse af en Jordmasses Sammentrykning, naar Udvidelse til Siden ikke er hindret, kan kun foretages med kohæsiv Jord.** Af den paagældende Jordprøve fremstilles terningformede Prøvelegemer med forskelligt Vandindhold, og man maaler de til forskellige Tryk  $q$  svarende Sammentrykninger  $\Delta h$  for disse Prøvelegemer. Af Hensyn til den med Sammentrykningen følgende Vandbevægelse i Porerne maa man her lade der hengaa en passende Tid mellem hver Gang, Trykket ændres.

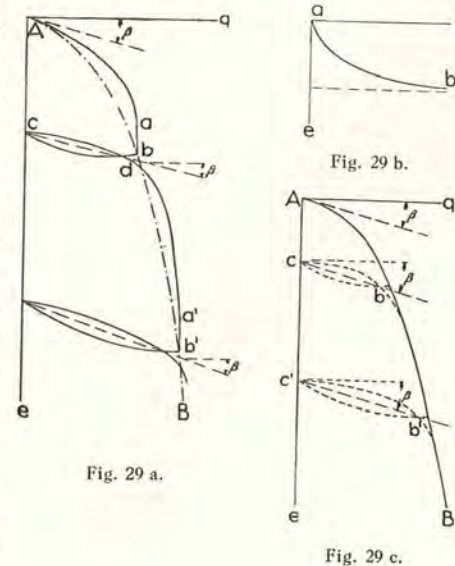
Størrelsen af Sammentrykningen angives i Forhold til Prøvelegemets Indhold af fast Jordmasse. Er Højden af Prøvelegemet  $h$ , Jordmassens Poretal  $\varepsilon$  og maales for en Belastning  $q$  en total Sammentrykning  $\Delta h$ , er Sammentrykningen  $e$ , henført til Prøvelegemets Indhold af fast Jordmasse og pr. Længdeenhed:

$$e = \frac{\Delta h}{h} (1 + \varepsilon) \quad (22)$$

Ved Aflastning udvider Prøvelegemet sig, dog uden at dets Højde bliver lige saa stor som ved Belastningens Begyndelse. For hver Belastning med paafølgende Aflastning faar Prøvelegemet en blivende Sammentrykning.

Ved Optegning af de ved saadanne Forsøg fundne sammenhørende Værdier for  $q$  og  $e$  faas Jordmassens Arbejdslinie. I Fig. 29a er vist en saadan Arbejdslinie. Kurvestykket  $bcd$  (Hysteresesløjfe) svarer til, at der ved den til  $b$  hørende Belastning er foretaget Aflastning og derpaa ny Belastning.

Som nævnt har Belastningens Varighed Indflydelse paa, hvor



stor Sammentrykning der fremkommer. Arbejdslinien kan korrigeres for Belastningstidens Indflydelse ved, at man holder Belastningen konstant i nogen Tid for et passende Antal Belastningstrin. Holdes f. Eks. ved den til Punkt *a* svarende Belastning, denne konstant i længere Tid end ved de foregaaende Belastninger, og maales for denne konstante Belastning de sammenhørende Værdier af *e* og Tidsforløbet *t*, kan der paa Grundlag af disse Maalinger optegnes en Kurve, Fig. 29 b, ved Hjælp af hvilken man med en til Formaalet passende Nøjagtighed kan bestemme den til  $t = \infty$  svarende Værdi af *e*. Denne Værdi af *e* giver et Punkt *b* af den til  $t = \infty$  svarende (korrigerede) Arbejdslinie *AB*.

*Terzaghi* fandt, at Hældningen af Hysterese-Sløjferne var nogenlunde konstant for samme Lerprøve, og har derefter defineret den paagældende Jordprøves Elasticitetstal *E* som Cotangens af denne Hældningsvinkel:

$$E = \text{ctg } \beta . \quad (23)$$

Arbejdslinien fandtes at svare nogenlunde til Ligningen:

$$e = \frac{q}{E} + c \left( \frac{q}{E} \right)^3 , \quad (24)$$

hvor *c* er en Materialkonstant. Denne er hovedsagelig afhængig af den faste Jordmasses Beskaffenhed, og kun i mindre Grad afhængig af Vandindholdet. En stiliseret Arbejdslinie for Belastninger *q*, hver af uendelig Varighed, vil herefter have en Form, som vist i Fig. 29 c. Kurvestykkerne *bc* og *b'c'* fremstiller Arbejdsliniens Forløb svarende til Aflastninger med derpaa følgende Belastning.

**67. Jordbundens Gennemtrængelighed for Vand (Jordbundens Permeabilitet).** For Vands Bevægelse gennem en Jordmasses Porer gælder *Darcy's* Formel:

$$Q = k i F . \quad (25)$$

hvor *F* er Jordmassens Areal vinkelret paa Vandets Strømningsretning, *i* betegner Faldet i hydraulisk Tryklinie, *Q* Gennemstrømningsmængden pr. Tidsenhed og *k* en af Jordens Beskaffenhed afhængig Koefficient (Permeabilitets-Koefficienten).

Hvor det ikke drejer sig om synderlig nøjagtig Bestemmelse af *k*, og Jordmassen bestaar af ikke alt for fine Korn af sammentrængt Form, kan *k* bestemmes ved Forsøg med Anvendelsen af et simpelt Apparat som det i Fig. 30 angivne.

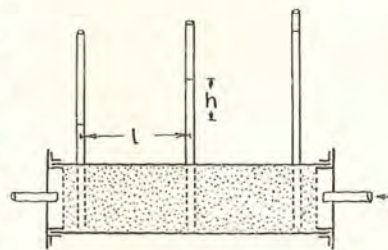


Fig. 30.

Det bestaar af et for begge Ender tillukket Rør, i hvilket Jordprøven anbringes; der tilledes Trykvand ved den ene Ende af Røret, og den i Forsøgstiden passerende Vandmængde maales. Af Vandspejlsforskellen *h* i Stigrørene findes  $i = \frac{h}{l}$ .

Ved finkornede Jordarter og navnlig ved Jord med skælformede Korn (Ler) maa man gaa mere omstændeligt tilværks ved Forsøgene, idet Vandgennemtrængeligheden ved saadanne Jordarter er i høj Grad afhængig af det Tryk, hvorunder Jordmassen befinder sig. I Forsøgsapparatet maa Jordprøven derfor underkastes det samme Tryk som det, der findes i det paagældende naturlige Jordlag.

Til Bestemmelse af *k* ved Beregning, naar man kender Jordmassens Hulrumsforhold, haves forskellige Formler. Af *Terzaghi* angives for Sand:

$$k = C \frac{\eta_o}{\eta_t} \left( \frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_v^2 , \quad (26)$$

hvor, idet *k* angives i  $\frac{\text{cm}}{\text{Sek.}}$ ,  $\frac{\eta_o}{\eta_t}$  er Forholdet mellem Vandets Viskocitet ved  $10^\circ$  og ved  $t^\circ$ , *n* er Hulrumsforholdet, *d<sub>v</sub>* den virksomme Kornstørrelse udtrykt i cm, og *C* en Koefficient, der for glatte Korn kan sættes til ca. 800 og for ru, kantede Korn til ca. 460.

For lerholdigt Sand er *C* betydelig mindre.

For Ler haves:

$$k = C \frac{\eta_o}{\eta_t} \frac{(1,15 n - 0,15)^3}{(1 - n)^4} d_v^2 , \quad (27)$$

hvor *C* er ca. 2.

Permeabiliteten ved Jord med skælformede Korn er langt mindre — 50—100 Gange saa lille — som ved Jord med Korn af sammentrængt Form, for samme virksomme Kornstørrelse. Dette har sin Aarsag i, at Porerne ved den førstnævnte Slags Jord har spalteagtig Form, medens de ved den sidstnævnte Slags Jord mere har Form som Rør, og at Modstanden mod Vandets Bevægelse er større i spalteformede Porer end i rørformede Porer.

## II. TILLADELIG BELASTNING PAA BYGGEGRUND.

68. Formaalet for Byggegrundsundersøgelser og for den Slags Jordbundsundersøgelser som de i Afsnit I omtalte, er at erhverve sig det Kendskab til Jordbundens Egenskaber, der er fornødent, for at man kan fastsætte den for hvert foreliggende Tilfælde tilladelige Belastning paa Byggegrunden, d. v. s. Kendskab til, hvor meget Jordbunden vil give efter for det fra det paagældende Bygværk til Jordbunden overførte Tryk.

Løsning af Problemet om Jordbundens Eftergiven, paa tilsvarende Maade som det for Byggematerialers Vedkommende sker ved Hjælp af Materialprøvning, er forbundet med ret store Vanskeligheder. Dette skyldes flere forskellige Forhold. De i Naturen forekommende Arter Jordbund er indbyrdes meget forskellige saavel i Henseende til Sammensætning efter Kornstørrelse, Kornform og Bestanddelenes mineralske Beskaffenhed, som i Henseende til Porevolumen og til Vands Indflydelse paa Jordbundsegenskaberne, og er derfor et meget uensartet Materiale at arbejde med, og Jordarter, der er ens i Kornsammensætning og Porevolumen, kan godt være ret forskellige indbyrdes med Hensyn til Jordlagets Bæredygtighed, idet Jordlagenes Dybdebeliggenhed og deres geologiske Alder og Tilblivelsesmaade herved spiller en væsentlig Rolle. Hertil kommer for øvrigt, at Spørgsmaalet om, hvorledes det fra et Fundament hidrørende Tryk fordeles ned i Jordbunden, er ret kompliceret og kun ufuldstændig løst.

69. Ved Behandlingen af Problemet om tilladelig Belastning paa Jordbund kan man gaa den Vej, at man i hvert foreliggende Tilfælde foretager Prøvebelastning paa den paagældende Jordbund, eller, hvis Jorden egner sig dertil, udtager Prøver af Jordbunden og undersøger disses Styrkeegenskaber paa Laboratorium. Det nærmere herom og om de Resultater, der kan naas ad denne Vej, vil blive omtalt i et senere følgende Afsnit<sup>1)</sup>, idet de Betragtninger, der kan gøres gældende med Hensyn til Spændingsforholdene i belastet Jordbund, paa visse Punkter er knyttet til Jordtrykslæren.

En anden Fremgangsmaade til Bestemmelse af tilladelig Belastning paa Byggegrund er, at den tilladelige Belastning fastsættes alene, eller i Hovedsagen, paa Grundlag af et vist Erfaringsmateriale, d. v. s. det Kendskab til Belastnings- og Nedsynkningsforhold, der haves fra eksisterende Bygværker paa Jordbund af samme Beskaffenhed som den i det givne Tilfælde foreliggende Jordbund.

Bestemmelse af tilladelig Belastning paa denne Maade er betinget

<sup>1)</sup> Se Afsnit IV.

dels af, at der haves et tilstrækkelig omfattende Erfaringsmateriale til Raadighed, dels af, at man er i Stand til med tilstrækkelig Sikkerhed at kunne identificere de forskellige Slags Jordbund med Hensyn til de Egenskaber, der har Betydning for Jordbundens Bæredygtighed.

De i de senere følgende Tabeller 7—10 anførte Værdier for tilladelig Belastning paa forskellige Slags Jordbund er de erfaringsmæssigt fastsatte Størrelser, som man de forskellige Steder plejer at regne med som normgivende for tilladelige Belastninger.

Med Hensyn til Identificering af en foreliggende Jordbund med den Jordbundsart, for hvilken den tilladelige Belastning kan fastsættes efter Regler, svarende til de i nævnte Tabeller indeholdte Angivelser, plejer man under almindelige Forhold, d. v. s. hvor det ikke drejer sig om større eller i konstruktiv Henseende mere usædvanlige Bygværker, og hvor Jordbunden ikke frembyder særlige Vanskeligheder, at bestemme Jordbundens Art ved at sammenholde de Oplysninger om den paagældende Jordbunds Beskaffenhed, der kan faas ved Besigtigelse af de ved Boring tilvejebragte Jordprøver, med en Inddeling af de almindeligt forekommende Arter Jordbund efter disses Egenskaber som Byggegrund, saaledes som anført i §§ 72—89, idet der da anvendes de til denne Jordbundsinddeling hørende Angivelser for tilladelige Belastninger.

70. Synderlig stor Sikkerhed i Afgørelsen af, hvor stor Belastning paa Byggegrunden man i givet Tilfælde kan gaa til, opnaas dog ikke paa denne Maade. Ved større Bygværker paa Steder, hvor Jordbundens Bæredygtighed er forholdsvis lille, og navnlig ved Bygværker, ved hvilke uens Nedsynkning af de forskellige Dele af Bygværket medfører store Ekstraspændinger i Bygværkets Konstruktionsdele, er det af Vigtighed at kende Forholdet mellem Nedsynkning og Belastning for den paagældende Jordbund saa nøje som muligt. I de senere Aar er man kommet ind paa saadanne mere vidtgaaende Undersøgelser af de forskellige Slags Jordbunds Beskaffenhed og Egenskaber, som de i §§ 21—67 omtalte<sup>1)</sup>. Maalet for denne Art Jordbundsforskning er Erhvervelsen af tilstrækkeligt Kendskab til de forskellige Faktoreres Indflydelse med Hensyn til Jordbundens Bæredygtighed, saaledes at man i Praksis ved Hjælp af nogenlunde simple Undersøgelser af Jordprøver kan fastsætte Størrelsen af den for det paagældende Bygværk og den paagældende Jordbund tilladelige Belastning af Byggegrunden.

Der findes en Del Steder, ved eller i Tilknytning til vedkommende Lands tekniske Højskoler, Jordlaboratorier, hvor der arbejdes paa at løse de forskellige Spørgsmaal angaaende Jordbundens Bæredygtighed m. v. . Forskningsarbejderne paa dette Omraade er imidlertid ikke saa

<sup>1)</sup> Se ogsaa § 173.

vidt fremskredne, at der paa Grundlag af Resultaterne af dem kan opstilles Regler, efter hvilke Bestemmelse af en Byggegrunds Bæredygtighed kan ske ved Hjælp af let gennemførlige Undersøgelser af Jordprøver.

71. Der er i de senere Aars Faglitteratur fremkommet forskellige Forslag, angaaende hvilke Undersøgelser af de i det foregaaende omtalte der bør anvendes til Karakterisering af de forskellige Slags Jordbund, og Forslag til saadanne *Undersøgelses Standardisering* og til skematisk Opstilling af Forsøgsresultater. I Tabel 6 er <sup>1)</sup> som Eksempel anført Resultater af en Jordbundsundersøgelse. I det omhandlede Tilfælde kunde der ved Besigtigelse af de ved Boringen optagne Jordprøver kun skelnes mellem de øverst i Tabellens Kolonner angivne fem Slags Jordbund. Af de anførte Talstørrelser for de ved de foretagne nærmere Undersøgelser fundne Jordbundsegenskaber ses, at der forekommer meget store Forskelle med Hensyn til disse Egenskaber inden for hver af de fem Slags Jordbund.

Tabel 6.

	FintSand	Melsand	Melsand med organiske Bestanddele	Sandet Ler	Ler
VirksommeKornstør. $d_v$ ; mm	0,2—0,02	0,02—0,002	0,02—0,002	0,02—0,002	0,002
Uensformighedstal	1,5—5	21—10	2—10	100—200	10—100
Indhold af organisk Stof; %	0	0	0,5—3	0	0
Fortætningstal	100—15	20—15	20—5	50—15	20—1
Kvældningstal	260—130	130—25	130—25	260—65	70—8
Vandgennemtrængeligheds-koefficient $k$ ; cm/Minut	$1—10^{-5}$	$10^{-4}—10^{-6}$	$10^{-4}—10^{-6}$	$10^{-4}—10^{-7}$	$10^{-5}—10^{-8}$
Kohæsion; kg/cm <sup>2</sup> <sup>2)</sup>	0	0,8—5	0,8—5	2—5	0,8—10
Vandbestandighed, Sønderdelingstal	0—5 Min.	5 Min—1 Time	1 Time—flere Dage	5 Min.—1 Time	10 Min.—flere Dage
Plasticitetstal	0	5—15	5—15	0—10	10—100
Svindgrænse, Vandindh.; %	12—25	10—25	10—25	10—20	8—25
Nedre Plasticitetsgrænse, Vandindhold; %	0	18—25	20—65	20—25	20—50
Nedre Flydegrænse, Vandindhold; %	12—25	23—40	25—80	20—35	30—150
Kegle-Prøve med 60 grams—60 <sup>o</sup> Kegle og 1 cm. Kegle-nedsynkn., Vandindh. %	30	30—38	90	—	39—90
Trykstyrke af et tørret Prøvelegeme; kg/cm <sup>2</sup>	0—5	5—30	5—30	20—40	30—100

72. Ved Klassifikation i grove Træk af de forskellige Slags Jordbund, til Brug ved Fastsættelsen af en Byggegrunds Bæredygtighed paa Grund-

<sup>1)</sup> Redlich-Terzaghi-Kampe: Ingenieurgeologie. 1929.

<sup>2)</sup> De her anførte Værdier for Kohæsionen er unormalt store. Jfr. § 99.

lag af Boringsresultater og blot Besigtigelse eller mindre indgaaende Undersøgelse af Jordprøver, inddeles Jordbundsarterne i 3 Hovedgrupper: God Byggegrund, middelgod Byggegrund og daarlig Byggegrund, og inden for disse Grupper inddeles efter de for de paagældende Arter Jordbund sædvanlig benyttede tilladelige Belastninger. Noget nærmere end efter den Karakterisering, der er udtrykt ved de nævnte Betegnelser, bruges det ofte at definere Godhedsgraderne saaledes, at man ved »god Byggegrund« forstaar Jordbund med tilstrækkelig Bæreevne til, at der kan opføres (permanente) Bygværker, hvilende direkte paa Grunden, uden at det er nødvendigt at give Fundamentet væsentlig større bærende Flade end den paagældende Bygværksdels Grundflade (f. Eks. ved et almindeligt Hus: Fundamenternes Bredde ikke væsentlig større end Murenes Tykkelse), ved »middelgod Byggegrund« en Jordbund, som vel er i Stand til at bære et Bygværk, men ved hvilken det er nødvendigt, at det til Grunden overførte Tryk fra Bygværket fordeles gennem Fundamentet over en betydelig større Flade end selve Bygningsdelens Underflade, for at Nedsynkningen kan holdes inden for de for almindelige Bygværker passende Grænser, og ved »daarlig Byggegrund« en saadan Jordbund, paa hvilken der ikke kan opføres permanent Bygværk hvilende direkte paa Grunden.

73. Klippebund. Med Klippebund betegnes Bund, bestaaende af sammenhængende Dannelser af Sten, de eruptive Dannelser: Granit, Syenit, Basalt o. s. v., og de sedimentære og metamorfiske: Sandsten, Skifer, Kalksten o. a.. Klippebund, som ikke er udsat for Forvitring og ikke er lagdelt, er udmærket Byggegrund. Hvis Klippebunden er lagdelt, og der under den fine Jordbund med ringe Bæreevne, regnes Klippebunden for at være god Byggegrund, saafremt Lagdelingen er horisontal og det bærende Lags Tykkelse  $\geq 3$  m. Ved Klippebund med hældende Lagdeling kan der, hvis der under det Lag, der skal danne Byggegrund, findes uforstenede Lag af Ler, og Klippebunden paa Grund af tilstedeværende Spalter ikke er vandstandsende, trænge Nedbørsvand ned til det underliggende Lerlag og samles paa dettes Overflade. Leret kan da, ved at det optager Vand, blive plastisk, eventuelt flydende, og dette kan bevirke, at det overliggende Klippelag glider efter Lagets Faldlinie.

Foruden som egentlig Kalkklippe, hvor Stenmaterialet (bestaaende af Kalkskaller, der er sammenkittede med udskilt krystallinsk Kalk) danner sammenhængende Klippemasse til stor Dybde eller meget tykke Lag, forekommer Kalkbund i Form af løse, forholdsvis smaa Kalksten for det meste sammen med Sten af Flint, liggende i en Masse bestaaende af løse Kalkpartikler, eller den forekommer i Form af sammenhængende, men ret tynde Lag af haard Kalksten (ofte afvekslende med sammen-



hængende Lag af Flint), hvorimellem ligger Lag af løs Kalk, eller endvidere som Kridtformationer. Egentlig Kalkklippe har betydelig større Bæreevne end de øvrige Slags Kalkbund, men disse kommer dog under sædvanlige Forhold ogsaa ind under Gruppen »God Byggegrund«. Kridtformationer falder dog i mange Tilfælde ind under Gruppen »Middelgod Byggegrund«.

74. Sand og Grus bestaar for den væsentligste Del af Kvartskorn; ved Siden heraf indeholder det mindre Mængder Korn af Glimmer, Feldspat, Hornblende, Kalk o. a. Langt den største Del af Kornene har sammentrængt Form.

Efter Kornstørrelsen skelner man mellem<sup>1)</sup>:

Grus .....	Kornstørrelse	2 —5 mm
Meget groft Sand .....	—	1 —2 »
Groft Sand .....	—	0,5—1 »
Middelfint Sand .....	—	0,2—0,5 »
Fint Sand .....	—	0,1—0,2 »

Grus og groft Sand er i Almindelighed god Byggegrund, naar det er tæt lejret og nogenlunde ensartet i Henseende til Kornstørrelse, samt under Forudsætning af, at der, hvis Tykkelsen af Grus eller Sandlaget er mindre end 3—5 m eller mindre end 2 Gange Fundamentets Bredde, ikke findes mindre bæredygtig Jordbund under Grus eller Sandlaget. Tilstrækkelig tæt Lejring til, at Grus og Sandlag danner god Byggegrund, forefindes i Reglen, hvis Laget er dannet ved Aflejring i Vand, saaledes som Tilfældet er ved Grus og Sandlag i Flodlejer og paa Havbunden.

Grus og Sand, som indeholder større Mængder af ulige store Korn, har i mange Tilfælde mindre tæt Lejring. Nedsivende Nedbørsvand eller Rystelser (fra Færdsel) kan ved saadan Bund bevirke, at der sker Ændringer i Lejringen, og dermed, at der sker Sætninger i Byggegrunden. Morænedannelsernes Grus og Sandlag har for det meste mindre tæt Lejring og bestaar af ulige store Korn; disse Grus og Sandlag er ofte iblandet mindre Mængder Ler. Denne Slags Bund er middelgod Byggegrund. I nogenlunde stor Dybde (f. Eks. 5—10 m) under Overfladen vil Lejringen dog i Reglen være en Del tættere end nær ved Overfladen. Dette skyldes dels den ved den overliggende Jords Vægt tilvejebragte Fortætning af de dybere liggende Lag, dels Nedsivningsvandets Virkning.

Ved Bund, bestaaende af Grus eller groft Sand med nogenlunde lige store Korn har det med Hensyn til Bundens Egenskaber som Byggegrund ingen Betydning, om der er Vand til Stede i Grunden eller ej. De almindelig forekommende Grundvandsstrømninger og Forandringer i

<sup>1)</sup> Jfr. § 29.

Grundvandspejlets Højde har her heller ikke Indflydelse paa Grundens Bæredygtighed.

Middelfint Sand og fint Sand regnes sædvanlig for at være middelgod Byggegrund. I saadant Sand og i Sand, der indeholder større Mængder Korn af meget forskellige Størrelser, vil Grundvandsstrømning og navnlig mulig forekommende opadgaaende Vandbevægelse gennem Sandet bevirke, at Sandet bliver løsere lejret og dets Kvalitet som Byggegrund derved forringet.

75. Flydesand. Sand kan, naar der er Vand til Stede i Sandet, under visse Forhold have Konsistens som en træg Vædske og kaldes da Flydesand. Flydesand kan ikke, saaledes som tørt Sand og fugtigt — op indtil vandmættet — Sand, staa med skraanende Overflade, men indstiller sig som en Vædske med vandret Overflade. Et Legeme med større Vægtfylde end Flydesandets synker til Bunds i det.

Flydesandets særlige Egenskaber beror paa, at det indeholder mere Vand, end hvad der svarer til Sandets Porevolumen. Sandkornene berører derfor ikke hverandre, men er adskilte ved et Vandlag. En Sandmasse kan bringes til at optage større Vandvolumen end Sandets Porevolumen, naar der ved Sandmassens Underside tilføres Vand under et vist Tryk. Størrelsen af det fornødne Tryk er afhængig af Sandets Kornstørrelse og Lejringstæthed.

Ved Optagelsen af Vandet drives Sandkornene lidt bort fra hverandre, og den Modstand mod Formforandring, der er til Stede i den oprindelige Sandmasse paa Grund af den indre Friktion og paa Grund af, at Formforandring af Sandmassen er betinget af de enkelte Kornes Kæntringsbevægelse om Berøringspunktet med Nabokorn, forsvinder saa at sige ganske. Optagelsen af den større Vandmængde medfører en Volumenforøgelse af Sandmassen.

Af Singer<sup>1)</sup> angives, at Sand, hvis Mætningsvandmængde var 33 til 45 %, omdannedes til Flydesand, naar Vandindholdet forøgedes til 65 %. Ved at indlede Vand fra nedenunder i et med Sand fyldt lodret staaende Rør fandtes, at Omdannelsen af Sandet til Flydesand begyndte, naar Vandspejlet i Tilledningsrøret stod i en vis Højde over Sandets Overflade. Saafremt Sandet var løst lejret, var denne Højde omtrent lig med Sandsøjlets Højde. Hvis Sandet var tæt lejret, skete Omdannelsen til Flydesand ved et Overtryk, maalt i Vandsøjlehighøjde, omtrent lig 1½ Gange Sandsøjlets Højde.

Jo finere Sandet er, og jo mere afrundede Sandkornene er, ved desto mindre Overtryk sker Omdannelsen til Flydesand. Om Sandet indeholder større eller kun mindre Mængder Glimmer, synes ikke at have Betydning med Hensyn til Omdannelse til Flydesand.

<sup>1)</sup> M. Singer: Der Baugrund. 1932.

Schönweller: Fundering.

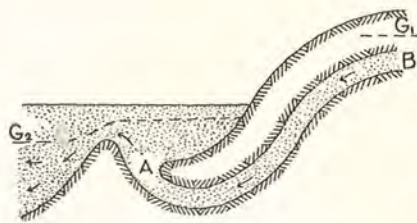


Fig. 31.

Et Sandlag med fri Overflade er uanvendeligt som Byggegrund, hvis der i Sandlaget og i dets Omgivelser er saadanne Grundvandsforhold til Stede, at Sandet er udsat for at blive omdannet til Flydesand, f. Eks. saadanne Forhold, som skematisk vist i Fig. 31. En vandførende, stor-

kornet Sandaare  $AB$  udmunder ved  $A$  i et finkornet Sandlag med fri Overflade.  $G_1$  er Grundvandshøjden ved  $B$  og  $G_2$  Grundvandspejlet i det finkornede Sandlag, saaledes at der foregaar Vandbevægelse som angivet paa Figuren.

Paa Grund af den forholdsvis store Modstand mod Vandbevægelsen i det finkornede Sand vil der ved, og i en vis Udstrækning omkring, Sandaarens Udmunding i det finkornede Sand, i dets vandfyldte Porer være et Overtryk, ligesom i et med Sand fyldt Rør, til hvilket der tilledes Trykvand fra neden. I en vis Udstrækning omkring Sandaarens Udmunding vil det finkornede Sand derfor være Flydesand.

Hvis Flydesandet er helt omsluttet af tætte Jordlag, saaledes at det ikke kan undvige, forringer Flydesandets Tilstedeværelse ikke det over Flydesandet liggende Jordlags Bæredygtighed i væsentlig Grad. Belastes et saadant Jordlag ved Opførelse af et Bygværk, vil den derved forarsagede Forøgelse af Trykket paa Flydesandet bevirke, at dette sammentrykkes, idet en Del af Flydesandets Overskudsvand presses ud gennem de omgivende Jordlag. Men denne Sammentrykning er ikke væsensforskellig fra den, der finder Sted ved Belastning af løst lejret almindeligt Sand eller af Lerbund, og har for saa vidt ikke noget at gøre med Flydesandets Vædske-Egenskaber.

En anden Sag er, at Flydesand i Undergrunden kan frembyde visse Farer for et Bygværk, der staar paa det oven over Flydesandet liggende Jordlag. Hvis der foretages en Udgravning i Nærheden af Bygværket, saaledes at der fremkommer en Aabning i de Jordlag, der omslutter Flydesandet, vil dette kunne flyde ud ad denne Aabning. Herved dannes Hulrum under det Jordlag, hvorpaa Bygværket hviler, saaledes at Jordlaget og Bygværket synker.

Ret almindeligt er det, at man faar at gøre med Flydesand og de med dets Tilstedeværelse følgende Vanskeligheder ved Udgravning af Byggegrube i almindelig vandfyldt Sandbund, naar Byggegrubens Tørholdelse for det tilstrømmende Grundvand sker ved Udpumpning fra Byggegruben. Ved Udgravning af en Byggegrube som vist i Fig. 32 ( $CD$  er Grundvandspejlet,  $AB$  Jordoverfladen og  $EF$  Indfatningsvægge),

vil der i den i Figuren fremstillede Situation, hvor der er udgravet til  $GH$ , i Sandet under  $GH$  være et opad virkende Vandtryk, omtrent lig med Vandhøjden  $DG$ . For en af Sandets Beskaffenhed og Lejringsforhold afhængig Størrelse af dette Overtryk kan Sandet under  $GH$  omdannes til Flydesand. En saadan Omdannelse til Flydesand medfører, at Sandet fra Siderne flyder ind i Gruben lige saa hurtigt, som det graves op, og Gravemateriellet — Tipvognsspor, Vogne og Graveredskaber m. v. — synker ned i Sandet. Det nævnte Overtryk er noget mindre end Højden  $DG$ , nemlig saa meget mindre end  $DG$ , som den Trykhøjde, der kræves til Overvindelse af Ledningsmodstanden ved Vandbevægelsen gennem Sandet. I fint Sand er Vandtilstrømningen mindre end i groft Sand. Omdannelsen til Flydesand sker derfor i fint Sand allerede, naar Grubens Bund er ført et forholdsvis lille Stykke ned under Grundvandspejlet.

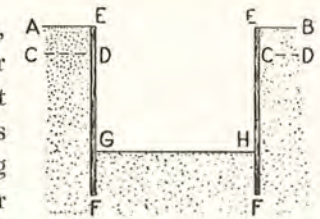


Fig. 32.

Sandbunds Byggegrunds-Egenskaber kan ogsaa paa anden Maade forringes ved Vandets Indtrængen i Byggegruben end ved Sandets Omdannelse til Flydesand, nemlig ved at det op gennem Byggegrubens Bund indstrømmende Vand fører noget af Bundens Sand med sig. Herved bliver Sandbundens Lejring efterhaanden løsere, og dette medfører, at der fremkommer betydelige Sætninger, naar Bygværket senere opføres paa Sandbunden. Det er især ved Sandbund, der bestaar af Korn af meget forskellige Størrelser, at det i Byggegruben indtrængende Vand virker paa denne Maade. Denne Virkning af det indtrængende Vand er som nævnt forskellig fra den, der haves ved Sandets Omdannelse til Flydesand, men forveksles ofte dermed.

Ved Opfyldning med Sand, hvor Sandet opslæmmes i Vand og pumpes ind paa Opfyldningsstedet, bevarer Sandet sin Konsistens som Flydesand i nogen Tid efter Indpumpningen, nemlig saalænge, indtil Overskudsvandet er trukket ned i Undergrunden eller ledet bort. Kastes en Sten ud i saadant nylig indpumpet Sand, synker den ned deri, og der dannes Bølger i Sandmassen ligesom i en Vædske.

Som Eksempel paa, hvorledes Sands Omdannelse til Flydesand kan forvolde Skade, kan nævnes følgende Tilfælde ved Opfyldning med indpumpet Sand inden for en Indfatningsvæg (Fig. 33). I den i Fig. viste Situation under Op-

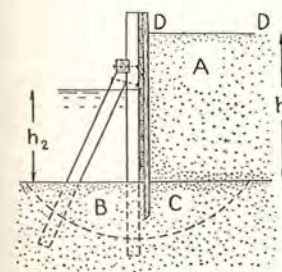


Fig. 33.

fyldningen, hvor det opslæmmede Sands Overflade er  $DD$ , vil der i den naturlige Sandbunds Porer være et Overtryk til Stede, svarende til Vægtforskellen mellem det paa den ene Side af Væggen værende Lag opslæmmede Sand ( $h_1$ ) og det paa Væggens anden Side værende Vand ( $h_2$ ). For en vis Størrelse af dette Overtryk, afhængig af den naturlige Sandbunds Beskaffenhed, omdannes Sandbunden til Flydesand (f. Eks. ned til den i Fig. viste punkterede Linie), og idet da baade det indpumpede Sand  $A$  og Sandlegemerne  $B$  og  $C$  er Flydesand, trykkes Sandet  $B$  bort af det inden for Væggen værende Sand, og dette flyder ud under Indfatningens Plankevæg.

Som et andet Eksempel kan nævnes: I en under Vand udgravet Byggegrube rammes der Fundamentspæle af Træ ned i Sandbunden. Da Byggegruben senere udpumpes, omdannedes derved Sandet under Byggegrubens Bund til Flydesand, og dette bevirkede, at de nedrammede Pæle som Følge af Opdriften paa dem løftedes op fra Bunden.

**76. Ler** er i Modsætning til Sand et i udpræget Grad heterogent Materiale, saavel i Henseende til Kornstørrelse og Kornform og til mineralsk Sammensætning, som i Henseende til Jordbundens Struktur. Endvidere spiller Vandindholdet her en meget væsentlig Rolle med Hensyn til Jordbundens Egenskaber som Byggegrund. Som Byggegrund er Ler langt vanskeligere at have at gøre med end Sand.

**77. Lerets Bestanddele.** Ler bestaar af meget smaa og i Størrelse meget forskellige Korn. I Fig. 21 (S. 18) er anført Eksempler paa nogle Lerarters Sammensætning efter Kornstørrelse. Hovedbestanddelen af Ler er Forvittringsprodukter af Granit og andre feldspatrige Stenarter. Den mineralske Sammensætning kan dog være meget forskellig de forskellige Steder og i de forskellige Jordlag paa samme Sted.

*Goldschmidt* fandt ved nogle af ham undersøgte Lerarter følgende Sammensætning efter Kornform og Bestanddelenes mineralske Art:

Skælformede Korn: Glimmerminerale, Klorit, Brucit, Kaolin, Hydrargyllit.

Stangformede Korn: Hornblende, Epidot, Pyroxen.

Sammentrængt formede Korn: Kvarts, forskellige Feldspat-Mineraler.

Efter Lerets større eller mindre procentvise Indhold af de mest fine kornede Dele — Mikroler (Kolloidslam), Ultraler — og tilsvarende mindre eller større Indhold af de noget grovere Bestanddele — Mo, Melsand — kan der skelnes mellem »federe« og »magrere« Ler (»stivere« eller »lettere« Ler). Antagelig spiller herved ogsaa Kornformen en vis Rolle, saaledes at Lerets Karakter som fedt Ler hører sammen med forholdsvis stort Indhold af skælformede Korn.

Ler er ofte iblandet mindre Mængder Svovlkis, Kalkspat, Gips o. a.

**78. Lerets Struktur.** De ved Lerets Dannelse i Naturen særlige Forhold, der antages at være Aarsag til, at Lers Struktur er forskellig fra Sands, er efter *Terzaghi* og *Casagrande*<sup>1)</sup> følgende: Naar under Lerpartiklernes Aflejring i Vand et Korn er naaet ned til det allerede aflejrede Stof og kommer til at ligge an mod et andet Korn, vil der i Anlægsfladen mellem de to Korn virke en Adhæsion, og dennes Størrelse vil være afhængig af Størrelsen af Anlægsfladen mellem de to Korn. Hvis det paagældende Korn ( $A$ , Fig. 34) er forholdsvis stort og tungt, vil Tyngdens Moment om Berøringsfladens Kant være større end Adhæsionens Moment, saaledes at Kornet kæntrer og ruller ned i Hulrummet ved Siden af det Korn, det først kom til at ligge an imod.

Hvis det paagældende Korn ( $B$ ) er lille og dets Overflade derfor stor i Forhold til dets Vægt, vil Tyngdens Moment ikke være i Stand til at overvinde den fra Adhæsionen i Anlægsfladen hidrørende Modstand mod, at Kornet kæntrer som før nævnt; Kornet forbliver da liggende i den først indtagne Stilling.

De meget smaa Partikler, Mikroler og Ultraler, synker ikke til Bunds enkeltvis, idet de hindres deri af de *brownske* Bevægelser i den af Partiklerne og Vandet bestaaende Sol. Ved Koagulation forenes en Del af disse meget smaa Partikler til fnugagtige Aggregater ( $C$ ). Naar disse har naaet en vis Størrelse, er de i Stand til at overvinde den fra de brownske Bevægelser hidrørende Modstand mod Nedsynkning gennem Vandet. Ved Aflejringen forholder disse Aggregater sig paa samme Maade som de førnævnte relativt smaa Partikler  $B$ .

De i Havvand indeholdte Salte har stærk koagulerende Virkning. Ved Aflejring i Havvand vil derfor ogsaa større Partikler end de førnævnte (Mikroler og Ultraler) kunne samles til Aggregater og aflejres som saadanne.

Det som Sediment dannede Stof faar paa denne Maade en celleagtig Struktur, saaledes som skematisk vist i Fig. 34.

Under Virkningen af Vægten af det ved den fortsatte Aflejring stadig voksende Jordlag komprimeres de underliggende Lag. Den ved Kompressionen foregaaende Formindskelse af Porerne sker ikke ensformig fordelt over det hele Porevolumen, men saaledes, at Porerne i de Aggregater, der udfylder de snævrere Steder ( $AA$ , Fig. 35) mellem de større Korn, sammenpresses mest. Trykkene overføres fra det ene af de større Korn til det andet, hovedsagelig gennem de paa disse snævre Steder af Mellemrummene mellem de større Korn værende stærkt sammenpressede Partikelgrupper, medens den øvrige Del af Lermassen kun i meget ringe Grad deltager i Trykoverførelsen.

Svarende hertil skulde Lerets Struktur være som vist i Fig. 35. Denne Struktur kaldes *Cellestruktur* eller *Ske-*

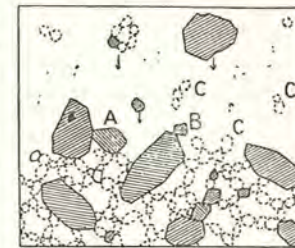


Fig. 34.

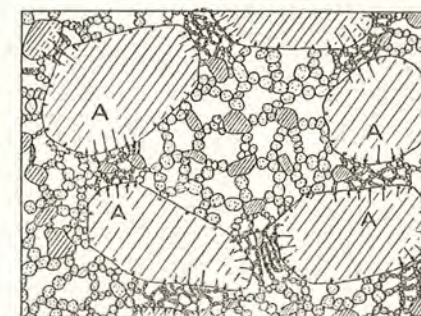


Fig. 35.

<sup>1)</sup> Publication. Mass. Inst. of Technology, 1932.

letstruktur<sup>1)</sup>). — I Jord med en saadan Struktur er for en Del af Porerne Vedkommende disse større end Kornene omkring Porerne, og Hulrumsforholdet for hele Jordmassen er relativt stort<sup>2)</sup>.

79. **Lerets Vandindhold.** Det er tidligere nævnt, paa hvilke Maader Vandindholdet i en finkornet Jordmasse som Ler kan have Indflydelse paa Jordmassens Egenskaber.

Ler med Vandindhold mindre end det, der svarer til den paagældende Lerarts Svindgrænse (jfr. § 59), den faste Konsistensform, er i Reglen i Besiddelse af betydelig Kohæsion og indre Friktion. Ler med Vandindhold større end Svindgrænsens Vandprocent vil være mere eller mindre plastisk. I den plastiske Tilstand er Leret i Reglen i Besiddelse af en Del Kohæsion, medens den indre Friktion er ganske ringe. Ved endnu større Vandindhold er ogsaa Lerets Kohæsion ganske ringe. Leret har da flydende Konsistens.

Den flydende Konsistens svarer nærmest til den Tilstand, som det øverste Lag af et Slæmmeprodukt er i umiddelbart efter, at Aflejringen har fundet Sted. Ler med flydende Konsistens forekommer ofte i Naturen i de øverste Dele af Lerlag, som efter Aflejringen stadig er dækket af Vand (Lerdynd). Ler med plastisk Konsistens kan forekomme i de noget dybere liggende Dele af Lerlag, som af Vægten af de overliggende Dele af Lerlaget eller af andre Jordlag i Tidernes Løb er blevet komprimeret, saaledes at Vandindholdet er blevet mindre og Leret bragt nogen ægte Kohæsion. I endnu større Dybde findes Ler med fast Konsistens.

Lermassens Omdannelse fra flydende Konsistens til plastisk Konsistens eller videre til fast Form kan imidlertid, som tidligere nævnt, ogsaa ske ved Kapillartrykkes Virkning. Ler, til hvilket Luften har Adgang, og Ler, som paa Grund af Niveauforandringer i tidligere geologiske Perioder har været underkastet Udtørring og senere atter er blevet dækket af Vand, vil derfor ogsaa for de øverste Dele af Lagets Vedkommende have fast Konsistens.

Forandringer i Lerets Konsistens foregaar meget langsomt. For at Lermassens Fortætning skal finde Sted, maa der presses Vand ud af Po-

<sup>1)</sup> For den simple Struktur, som almindeligt Sand har, bruges Betegnelsen: *Enkeltkorn-Struktur*.

<sup>2)</sup> Ved at opdele Kvartpulver ved Slæmmeanalyse i forskellige Grupper efter Kornstørrelse og opslæmme hver af Grupperne for sig, fandt *Terzaghi*, at de fremstillede Sedimenter for Kornstørrelse  $>$  ca. 0,1 mm havde Enkeltkorn-Struktur. For Kornstørrelser fra 0,1 mm og nedefter havde Sedimenterne større Hulrumsforhold, jo mindre Kornene var. Ved Kornstørrelse 0,05 mm var Hulrumsforholdet en Del større end Hulrumsforholdet ved den løseste Lejrning af lige store, kugleformede Korn ( $n_0 = 0,476$ ).

rerne, og Modstanden mod Vandbevægelsen er overordentlig stor paa Grund af Porerne Snæverhed.

Naar de Kræfter, som har foraarsaget Lerets Fortætning — Vægten af overliggende Jordlag eller Kapillartryk — ophører at virke, kvælder Leret ud, og er der Vand til Stede, vil Leret da ved at optage Vand kunne omdannes fra fast Form til plastisk Tilstand og videre til flydende Konsistens. Om Leret saaledes omdannes til plastisk Ler, eventuelt til Flydeler, afhænger af, hvor stor Vandmængde det optager, og derfor af, i hvor høj Grad Leret kvælder ud. Antagelig hænger dette atter sammen med, i hvor stor Udstrækning den paagældende Lerart er i Stand til at bevare den ved Lerets Fortætning frembragte ægte Kohæsion.

Er Leret i Stand til at bevare den ægte Kohæsion nogenlunde ufor mindsket, vil Udkvældningen være ringe, og Leret derfor ikke tilbøjeligt til at blive plastisk eller flydende.

De forskellige Lerarter forholder sig meget forskelligt i Henseende til Udkvældning og dermed følgende Optagelse af Vand og Overgang til plastisk eller flydende Tilstand. Hvad der med Hensyn til Lerets Beskaffenhed er det afgørende for, om Leret har større eller mindre Tilbøjelighed til at optage saa meget Vand, at det bliver plastisk eller flydende, kendes ikke. Det angives, at Rystelser (fra Færdsel, Maskinfundamenter) fremmer Lerets Tilbøjelighed til at blive plastisk eller flydende. At Rystelser virker paa denne Maade, kan maaske tilskrives, at den ægte Kohæsion delvis gaar tabt ved Rystelserne. Et lignende Forhold kendes fra Laboratorieundersøgelser af Ler. Ved kraftig Æltning af en Lerprøve forsvinder dennes ægte Kohæsion.

80. **Lerbunds Eftergiven for Belastning** er ganske ringe, naar Belastningen er kortvarig, men forholdsvis betydelig ved langvarig Belastning. Aarsagen til, at Belastningstiden har saa stor Indflydelse, er det tidligere omtalte Forhold vedrørende Vandets Udpresning af Porerne. Bygværker, der staar paa Lerbund, vedbliver i mange Tilfælde at sætte sig gennem en lang Række af Aar.

Ved stærkt udtørret Lerbund sker Sætningen hurtigt efter Belastningens Anbringelse, fordi Lerets Porer her er helt eller delvis luftfyldte.

81. **Lerbund som Byggegrund.** Lerbund, hvis naturlige Vandindhold er ringe (lig med eller mindre end Svindgrænsen) hører ind under Klassen: god Byggegrund. Saadan Lerbunds Paalidelighed som god Byggegrund er imidlertid betinget af, at Lerbunden er beskyttet mod Tilførsel af Vand ude fra, eller at Leret er af en saadan Beskaffenhed, at Vandindholdet, hvis Leret udsættes for at kunne optage Vand ude fra,

ikke derved forøges ud over Svindgrænsen (udblødes) saaledes, at Leret bliver plastisk eller flydende.

Ler med større Vandindhold end det, der svarer til den paagældende Lera's Svindgrænse, hører til Klassen: middelgod Byggegrund, eller, under uheldige Forhold med Hensyn til Muligheden for Lerets Optagelse af Vand, til Klassen: daarlig Byggegrund.

82. **Mergel** eller Mergeller er Ler med forholdsvis stort Indhold af Kalk. Dets Indhold af Mikroler og Ultraler er mindre end det rene Lers Indhold af disse de mindste Lerpartikler. Mergel er derfor en forholdsvis mager Jordart. Sædvanligvis er Mergel god Byggegrund.

83. Meget almindelig forekommende Jordbund er **Blandinger af Sand og Ler**. Er Blandingens Indhold af Kvartskorn (i Størrelser op til ca. 0,5 mm) mindre end 30 %, betegnes Jordarten som Ler. Er Jordbundens Indhold af Kvartskorn større end 70 %, betegnes den som Sand.

Efter det inden for Grænserne 30 % og 70 % liggende større eller mindre procentvise Indhold af Kvartskorn kan der skelnes mellem: Lerholdigt Sand, Leret Sand, Sandet Ler og Sandholdigt Ler. For saadanne Blandinger af Sand og Ler gælder, i store Træk, at den paagældende Jordart besidder Leregenskaber i samme Grad, som den er lerholdig. Er Indholdet af større Kvartskorn saa lille, at Jordmassens Kvartskorn ikke er i indbyrdes Berøring, men helt omgivet af Ler, har Jordbunden omtrent helt Lerets Egenskaber.

84. **Klæg** er sandholdigt Ler, hvor Kvartskornene dog er betydelig mindre end i de almindelige Blandinger af Sand og Ler. Klæg er i den almindelig forekommende Form, som Marskdannelser, et Sediment af, i geologisk Henseende, forholdsvis sen Oprindelse, og med stort Vandindhold. Klæg hører nærmest ind under Gruppen middelgod Byggegrund, eller er snarere af endnu ringere Kvalitet.

85. Foruden de nævnte Blandinger af Ler og Sand forekommer Jordbund, bestaaende af Ler eller Mergel, Sand, Grus og Sten i meget forskellige Størrelser. Saadan Jordbund er tæt og fast lejret og har kun ringe Vandindhold, selv om Laget er i direkte Berøring med Vand (Havbund). Denne Slags Jordbund er god Byggegrund.

86. **Tørvejord** er daarlig Byggegrund. Det samme gælder de fleste andre Arter af Jordbund med stort Indhold af organiske Bestanddele.

87. **Opfyldt Grund** bestaaende af *Grus* eller *groft Sand*, *aflejret i Vand*, er god Byggegrund. Fint Sand lejrer sig ikke helt tæt og er derfor som Byggegrund af noget ringere Kvalitet. *Tør-Opfyldninger* af Grus

eller Sand har ligeledes mindre tæt Lejring og hører derfor til Klassen middelgod Byggegrund.

Opfyldning, bestaaende af *Ler* eller *Ler-Sandblandinger*, er sædvanligvis daarlig Byggegrund. En saadan Opfyldning vil nemlig vedblive at synke sammen igennem en længere Aarrække, og Nedsynkningerne er betydelig større end de, der kan tillades ved et almindeligt permanent Bygværk. Sammensynkningen kan blive  $\frac{1}{10}$  af Opfyldningshøjden eller mere, saafremt Jorden lægges ud i stor Højde, uden at der træffes Foranstaltninger til at forøge Lejringstætheden. Udlægges Fylden i nogenlunde tynde Lag (f. Eks. 0,3 m tykke Lag), og vandes og stampes eller tromles Jorden lagvis, faas større Lejringstæthed og mindre Sætning efter Opfyldningens Fuldførelse. Endnu større Formindskelse af den færdige Opfyldnings senere Sammensynkning kan opnaas, ved at man foretager Opfyldningen paa den Maade, at Fylden opslæmmes i Vand og pumpes eller skylles ind paa Opfyldningsarealet, saaledes at Fylden aflejres i Vand.

En saadan Leropfyldning vil imidlertid, ligesom Tilfældet er ved den øverste Del af et naturligt dannet Lerlag, komme til at indeholde betydelig større Mængder Vand, end hvad der svarer til den naturlige Vandprocent for den samme Jordart i fast Aflejring, og have betydelig større Porøsitet end Jorden i naturlig fast Aflejring.

Selv om en saadan Opfyldnings Sammensynkning, saalænge det opfyldte Areal henligger ubelastet, i det hele vil være betydelig mindre end en tilsvarende Tør-Opfyldnings Sammensynkning, vil de Sætninger, der fremkommer ved Opførelsen af et Bygværk, sædvanligvis dog være saa betydelige, at en saadan Opfyldning under almindelige Forhold maa henregnes til Klassen: daarlig Byggegrund.

88. **Almindelig anvendte tilladelige Belastninger**. I de efterfølgende Tabeller 7—10 er angivet de i almindelig Byggepraksis forskellige Steder benyttede empiriske Regler for Fastsættelse af tilladelig Belastning paa Byggegrund.

En Mangel ved disse Regler er, at de ikke indeholder Angivelse af Størrelsen af de til de anførte Belastninger svarende Nedsynkninger og heller ikke Oplysninger om Brudgrænsen for de forskellige Slags Jordbund. Der vides derfor ikke noget om, hvor stor den Sikkerhedsgrad er, som man faar indført ved Benyttelsen af Reglernes Talværdier for tilladelig Belastning. I de fleste af de i Praksis forefaldende Tilfælde er de omhandlede Regler dog tilstrækkelige for Bestemmelse af Dimensionerne for et Bygværks Fundamenter. At dette er Tilfældet, ligger i, at ved Størsteparten af Bygværker af mere almindelig Art har Stør-

relsen af de Sætninger af Bygværket, der sker ved god og middelgod Byggegrund, praktisk taget ingen Betydning for Konstruktionsdelenes Paavirkning, og dernæst i, at det ved almindelige Bygværker paa god eller middelgod Byggegrund ikke gør meget fra eller til i økonomisk Henseende, om man giver Fundamentets bærende Flade netop den Størrelse, som Grundens Bæreevne i Virkeligheden kunde berettigede til, eller man gør Fundamentet væsentlig større, og saaledes holder sig rigeligt paa den sikre Side med Hensyn til Paavirkning paa Byggegrunden.

I de mere specielle Tilfælde, hvor det er af Betydning, at der haves Kendskab til Størrelsen af Nedsynkningerne paa Grund af Jordbundens Eftergiveness for Belastning, fordi disse Nedsynkninger i det givne Tilfælde skal holdes inden for visse, under Hensyn til Bygværkets Konstruktion fastsatte Grænser, eller hvor det paa Grund af Jordbundens mindre gode Beskaffenhed som Byggegrund spiller en væsentlig Rolle i økonomisk Henseende, at Jordbundens Bæreevne udnyttes saa nær til Grænsen som mulig, er de i de omtalte empiriske Regler indeholdte Angivelser af tilladelige Belastninger ikke tilstrækkelige. Man maa da, som nævnt i § 69, gaa den Vej, at der foretages Prøvebelastning af den foreliggende Jordbund i Forbindelse med nøjere Undersøgelse af denne.

89. I de af *Dansk Ingeniørforening* i 1926 udgivne *Normer for Beregning af Husbygningskonstruktioner* angives følgende Regler for tilladelig Belastning af Byggegrund:

Tabel 7.

	Trykfordelingen paa Fundamentets Underflade ikke meget uensformet; Tilladeligt Middeltryk
<i>Meget god Byggegrund</i> , f. Eks. fastlejret, tørt eller middelfugtigt groft Sand og Grus .....	4 kg/cm <sup>2</sup>
<i>God Byggegrund</i> , f. Eks. fastlejret, meget fugtigt groft Sand og Grus, eller fastlejret, ikke meget fugtigt Sand og Grus med indtil ca. 1/3 Ler, eller fast, nogenlunde rent Ler, der ikke er udsat for at udblødes .....	3 »
<i>Tømmelig god Byggegrund</i> , f. Eks. finere tørt Sand eller meget fugtigt Sand og Grus med indtil ca. 1/3 Ler eller fugtigt Sand og Grus med forholdsvis mere Ler .....	2 »

I Tilfælde, hvor en korrekt Beregning af største Kanttryk gennemføres, f. Eks. ved Skorstene, Støttemure o. lign., kan den tilladelige Værdi af Kanttrykket regnes til 1 1/2 Gange de ovenfor angivne Værdier. *Singer* <sup>1)</sup> angiver:

Tabel 8.

	Tilladelig Belastning
Haard, fast Klippe .....	15—40 kg/cm <sup>2</sup>
Blødere Stenarter .....	8—12 »
Ældre tertiær Aflejring af Sand og Sten .....	4—7 »
Ældre tertiær Aflejring af (Brakvands- eller Havvands-) Ler .....	4—6 »
Yngre tertiær Aflejring af Sand og Sten .....	4—7 »
Yngre tertiær Aflejring af fint Sand .....	3—4 »
Yngre tertiær Aflejring af (Ferskvands-, Brakvands- eller Havvands-) Ler .....	3—4 »
Bundmoræne-Dannelser med stort Kalkindhold .....	4—6 »
Bundmoræne-Dannelser med stort Lerindhold .....	2—3,5 »
Diluvialt Grus .....	4—6 »
Diluvialt skarpt Sand .....	4—5 »
Diluvialt Melsand .....	3 »
Diluvialt Ler med stort Kalkindhold .....	4 »
Diluvialt Ler med stort Indhold af Glimmer .....	2 »
Vindaflejret Melsand .....	3 »
Klitsand .....	2 »
Ældre alluvialt Grus og Sten .....	4—5 »
Ældre alluvialt skarpt Sand .....	3 »
Ældre alluvialt fint Sand .....	2 »
Yngre alluvialt Grus og Sten .....	3—4 »
Yngre alluvialt skarpt Sand .....	2—3 »
Yngre alluvialt fint Sand .....	1—1,5 »
Yngre alluvialt sandblandet Ler .....	1 »
Yngre alluvialt Ler .....	1 »
Opfyldt Grund .....	0,5—1 »

For de i Tabel 8 anførte Værdier for Belastninger angiver *Singer*, at Nedsynkningerne kan regnes: for Sand 0—1 cm og for Ler 2—3 cm.

<sup>1)</sup> *Singer*: Der Baugrund. 1932.

*Brennecke-Lohmeyer*<sup>1)</sup> anfører følgende i England sædvanlig anvendte Værdier:

	Tilladelig Belastning
Klippebund, efter Fasthed og Lagdeling .....	8,7—20 kg/cm <sup>2</sup>
Sandsten, der kan sønderbrydes i Haanden .....	1,6—1,9 »
Tæt lejret Grus .....	7,6—9,8 »
Meget fast lejret Sand (Funderingsdybde ikke under 6 m), og sandet Grus .....	6,5—7,6 »
Fast lejret Sand i Flodmundinger .....	4,9—5,5 »
Kridt med Indhold af Grus .....	2,2—3,3 »
Blødt Kridt (lerholdigt og uden Grus) .....	1,1—1,6 »
Fast, blaat Ler, fast Mergel .....	5,4—8,7 »
Gult Ler .....	4,4—6,5 »
Fast Ler, blandet med fint Sand .....	4—5 »
Vaad Lerbund .....	1,6—2,2 »
Alluvial Bund, lerblandet Sand .....	0,8—1,6 »

Endelig skal, efter *Terzaghi*<sup>2)</sup>, anføres de af *American Foundation-Committee* indsamlede Oplysninger om de i U. S. A. benyttede Størrelser for tilladelig Belastning:

	Tilladelig Belastning
Klippebund .....	11—54,5 kg/cm <sup>2</sup>
Haard Mergel, beskyttet mod Luft, Vand og Frost ....	8,7—19,6 »
Fast Mergel .....	6,5—11 »
Sandsten .....	6,5—11 »
Lagdelt Klippe, Lerskifer med ringere Styrke end bedste Sort Murstens-Murværk .....	5,4— 8,7 »
Tæt lejret, groft Sand .....	3,3— 6,5 »
Fast, tørt Ler og sandblandet Ler, fastlejret fint Sand..	2,2— 4,4 »
Ler og Sand i skiftende Lag .....	2,2— 5,4 »
Temmelig tørt Ler og fint, tørt og rent Sand .....	1,9— 4,4 »
Vaad Ler og blødt, vaadt Sand .....	1,1— 2,2 »
Blødt Ler .....	0,8— 3,3 »
Vandfyldt, fint Sand og alluvial Bund .....	0,54— 1,1 »

At de i Tabellerne 9 og 10 anførte tilladelige Belastninger ikke er angivne i runde Tal, hidrører fra Omsætningen fra engelsk Maal til kg/cm<sup>2</sup>.

<sup>1)</sup> *Brennecke-Lohmeyer*: Der Grundbau. 1930.

<sup>2)</sup> *Terzaghi*: Erdbaumechanik. 1925.

### III. JORDTRYK.

90. **Jordtryksproblemet i dets simpleste Form** møder man ved Behandling af Opgaver vedrørende Dimensionering af Støttemure og andre lignende Bygværker, der tjener til at danne Begrænsning for en Jordmasse.

En løs Jordmasse vil, naar den ikke begrænses af en Støttemur eller en Indfatningsvæg, indstille sig med en skraanende Flade  $AF$  (Fig. 36). Denne Flade er, bortset fra dens øverste og nederste Del, en Plan. Planens Hældningsvinkel  $\varrho$  kaldes den paagældende Jordarts *naturlige Skråntvinkel*.

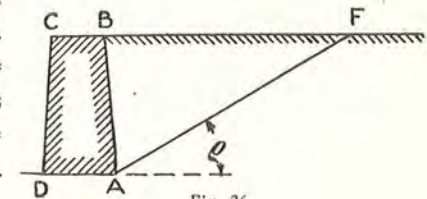


Fig. 36.

91. **Aktivt Jordtryk.** Hvis Jorden begrænses af en Støttemur  $ABCD$ , vil Jordmassen udøve et vist Tryk mod Bagsiden  $AB$  af Muren. Det Tryk, som Muren i det mindste skal være i Stand til at modstaa, for at Jordmassen netop skal være hindret i at skride ud, kaldes det aktive Jordtryk. Dette Tryk lader man være bestemmende for de, af Hensyn til Murens Stabilitet, fornødne Dimensioner af Muren og dens Fundament.

Det aktive Jordtryk er herved at betragte som en paa Muren virkende ydre Kraft, om hvilken der dog gælder det særlige, at Kraften paaregnes først at optræde med den for Murens Dimensionering bestemmende Størrelse og Virkemaade i den Situation, hvor Muren er ved at give efter, og Jordmassen er ved at skride ud.

92. **Jordspændinger.** I ethvert Snit i en Jordmasse, der er i Hviletilstand, vil der være visse indre Spændinger, hvis Størrelse afhænger af Jordmassens Lejringsforhold, Porøsitet, Vandindhold, Belastning m. v., og i Begrænsningsfladen mellem Jordmassen og Støttemuren vil der ligeledes være saadanne Spændinger til Stede. Disse Spændinger kan kaldes (naturlige) Jordspændinger.

Jordspændingen i en Snitflade vil ændre sig i Størrelse og Retning, hvis der indtræder Bevægelse i Jordmassen langs den paagældende Snitflade. Det aktive Jordtryk er den Grænseværdi, som Jordspændingen i Anlægsfladen  $AB$  mellem Muren og Jordmassen vil kunne antage ved Overgangen fra Hviletilstand til Bevægelse i Jordmassen i Tilfælde af, at Muren giver efter for Trykket.

93. **Jordspændingens Størrelse.** Jordspændingen i Snitfladen  $AB$  kan være betydelig større end det aktive Jordtryk, og er det antagelig ogsaa

i de fleste Tilfælde. Hvis man f. Eks. ved Tilfyldning bag en stærk og sikker Støttemur udlægger Jorden i tynde Lag og stamper Jorden omhyggeligt, vil det paa Murens Bagside fra Jordmassen hidrørende Tryk blive meget større og ugunstigere virkende for Murens Stabilitet end det aktive Jordtryk. Først i Tilfælde af, at Muren begynder at give efter, gaar den tilstedeværende Jordspænding ned til det aktive Jordtryks Størrelse og Virkemaade. Ved en Bolværksvæg  $AB$ , som holdes

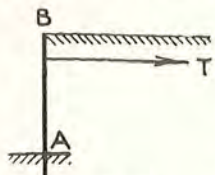


Fig. 37.

i Stilling af en Forankring  $T$  (Fig. 37), vil man ved at tilspænde Ankerbolten  $T$  kunne frembringe betydelig større Jordtryk paa Væggen end det aktive Jordtryk. Hvis Forankringen begynder at give efter, reduceres Jordspændingerne til det aktive Jordtryk.

Blandt de mulige (lavere) Grænseværdier, som Jordspændingen i Begrænsningsfladen  $AB$  kan antage ved Ligevægtsforstyrrelse mellem Jordmassen og Muren, maa man naturligvis af Sikkerhedshensyn vælge den største (eller den for Murens Stabilitet ugunstigst virkende) til Brug ved Bestemmelsen af Murens Dimensioner. Den ydre Kraft (det aktive Jordtryk), der indføres ved saadanne Dimensionsberegninger, er altsaa en Maksimumsværdi af de nævnte Grænseværdier for Jordspændingerne.

94. **Passivt Jordtryk.** Udøves der et Tryk  $K$  mod en Væg  $AB$ , der begrænser en Jordmasse (Fig. 38), vil Væggen give lidt efter for Trykket, idet Jorden komprimeres (fortættes) noget. Størrelsen af Væggens Bevægelse vil afhænge af, om Jorden er løst eller fast lejret. Forøges Trykket, vil der, naar Trykket har naaet en vis Størrelse  $K$ , dannes en Skilleflade  $AC$  i Jordmassen, og Jordlegemet  $ABC$  forskydes langs denne Skilleflade. Jordmassens Tryk mod Fladen  $AB$  i den Situation, hvor saadan Bevægelse er paa Nippet til at indtræde, kaldes *det passive Jordtryk* eller *Jordmodstanden*. Det passive Jordtryk er den Kraft, med hvilken Jordmassen i det højeste tør paaregnes at virke paa en Væg, naar denne skal være sikret mod af ydre Kræfter at kunne bevæges til den Side, hvor Jordmassen findes, idet der herved ses bort fra den, i Reglen ringe, Bevægelse, som kun medfører, at Jordmassen komprimeres.

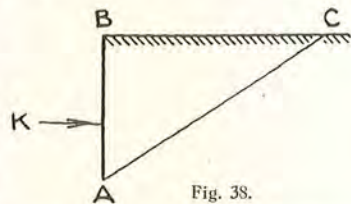


Fig. 38.

95. Optræden af aktivt eller passivt Jordtryk (de Grænseværdier for Jordspændingerne, som man lægger til Grund for Stabilitets- og Dimensionsberegninger vedrørende Bygværker, der er paavirkede af Jordtryk) forudsætter, at der i en eller anden Skilleflade i Jordmassen og i

Grænsefladen mellem Jorden og Bygværket sker en lille Bevægelse, eller at en saadan Bevægelse er paa Nippet til at finde Sted. For at en saadan Bevægelse skal kunne ske, maa Snitkraften det paagældende Sted have saa stor Hældning mod Normalen til Skillefladen, at dens tangentielle Komponent er i Stand til at overvinde Forskydningsmodstanden.

*Forskydningsmodstanden i en Snitflade i selve Jordmassen*<sup>1)</sup> er afhængig af Jordmassens indre Friktion og dens Kohæesion.

96. **Forskydningsmodstand ved Friktionsjord.** Ved Sand og andre praktisk taget kohæisionsfri Jordarter (Friktionsjord) plejer man at lade den paagældende Jordmasses Skræntvinkel være Maal for den indre Friktion, idet man, hvis Normaltrykket i den paagældende Flade er  $p$ , sætter Forskydningsmodstanden lig  $p \operatorname{tg} \varrho$ .

Helt rigtigt er det imidlertid ikke saaledes at regne Skræntvinklen  $\varrho$  identisk med Vinklen for den indre Friktion i Jordmassen. Som omtalt i § 38 er Forskydningsmodstanden nemlig ikke helt proportional med Normaltrykket, og Friktionsvinklen heller ikke helt uafhængig af Normaltrykket. Ved de almindeligt i Praksis forefaldende Tilfælde er den Fejl, der begaas ved at regne Friktionsvinklen lig med Skræntvinklen, dog uvæsentlig, men man maa være opmærksom paa, at Fejlen gaar i den Retning, at den indre Friktion aftager noget med voksende Tryk, og at Fejlen i det beregnede Jordtryk derfor er større, jo højere den paagældende Væg er, samt at der ved Bestemmelsen af Jordtryk paa en forholdsvis høj Væg derfor findes et for lille Jordtryk, naar man regner Friktionsvinklen lig med Skræntvinklen.

97. Ved **kohæsiv Jord** vil det være rationelt ved Jordtryksbestemmelse at medregne saavel Kohæesionens som Friktionens Andel i Forskydningsmodstanden langs Skillefladen i Jordmassen, og i det senere følgende vil det ogsaa blive omtalt, hvorledes Jordtryksberegningen kan udføres, naar der tages Hensyn til saavel Kohæesionen som Friktionen i Jordmassen.

Ved almindelige Jordtryksbestemmelser anvendes imidlertid i Reglen ikke den mere komplicerede Beregningsmaade, ved hvilken der tages Hensyn til Kohæesionens og Friktionens Indflydelse hver for sig, men man benytter den noget simplere Jordtryksberegning, ved hvilken der gaas ud fra, at hele Forskydningsmodstanden er at betragte som Friktion.

Aarsagen hertil er, at det i de fleste Tilfælde er meget vanskeligt at danne sig et blot nogenlunde sikkert Begreb om, i hvilken Udstrækning og med hvilken Størrelse Kohæesionen kan komme til Virkning i den Jordmasse, som udøver Tryk mod Bygværket. I en JordOpfyldning vil

<sup>1)</sup> Jfr. §§ 38 og 64.



der saaledes først fremkomme Kohæsion, efterhaanden som Jorden i Tidens Løb lejrer sig tæt. Kohæsionens Størrelse vil her tiltage med Lejringsstæthed, men iøvrigt være i væsentlig Grad afhængig af den til enhver Tid i Jorden tilstedeværende Mængde Vand og af flere andre Forhold (f. Eks. vil Rystelser i Jordmassen bevirke, at Kohæsionen bliver mindre).

Som anført i § 64 er Forskydningsmodstanden i kohæsiv Jord udtrykt ved:

$$t = c + p \operatorname{tg} \varphi ,$$

Ved at regne med, at hele Forskydningsmodstanden er en Friktion, begaas da den Tilnærmelse, at der sættes:

$$t = p \operatorname{tg} \varphi_1 ,$$

idet  $\varphi_1$  er en vis Gennemsnitsværdi, f. Eks. bestemt ved et passende Antal ( $n$ ) Forskydningsforsøg, som de tidligere omtalte, med forskellige Værdier for  $p$ , og:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\sum \frac{t}{p}}{n} . \quad (28)$$

En Bestemmelse af Vinklen  $\varphi_1$  paa denne Maade kræver imidlertid Udførelse af mere vidtgaaende (laboratoriemæssige) Undersøgelser af den paagældende Jordart, end det i de fleste Tilfælde kan betale sig at foretage, navnlig under Hensyn til den ovenfor omtalte Usikkerhed med Hensyn til Kohæsion i en Jordopfyldning. Man plejer derfor simpelt hen enten at se helt bort fra Kohæsionens Indflydelse og regne  $\varphi_1 = \varphi$ , og da, ligesom ved kohæsionsløs Jord, erstatte Vinklen for den indre Friktion,  $\varphi$ , med Skræntvinklen  $\varrho$ , altsaa regne  $\varphi_1 = \varrho$  eller, hvis særlige Omstændigheder i det paagældende Tilfælde begrundes, at der i nogen Grad tages Hensyn til Kohæsionsvirkningen, da at gøre dette ved for  $\varphi_1$  at regne med en lidt større Vinkel end Skræntvinklen  $\varrho$ .

Ved at undlade at medregne Kohæsionens Indflydelse kommer man til større Værdier for aktivt Jordtryk og mindre Værdier for passivt Jordtryk, end hvis Kohæsionens Virkning indføres i Beregningen. Man er derfor ved de almindelige Dimensionsbestemmelser paa den sikre Side, naar der ses bort fra Kohæsionens Indflydelse. Den ved Undladelse af at medregne Kohæsionen indførte Sikkerhed kan man eventuelt lade ækvivalere med en vis Del af den Sikkerhedsfaktor, som alligevel skal indføres i de samlede Beregninger for det paagældende Bygværk.

Saa fremt Kohæsionens Indflydelse tages med i Regning, ved at man, som ovenfor nævnt, efter Skøn sætter Vinklen  $\varphi$  til en noget større

Værdi end Skræntvinklen  $\varrho$ , maa man være opmærksom paa, at der her ved indføres en vis Fejl i Jordtryksbestemmelsen, idet der da regnes, som om Kohæsionens Bidrag til Forskydningsmodstanden var proportionalt med Normaltrykket, ligesom Friktionsmodstanden er det, medens Forholdet i Virkeligheden er, at Kohæsionen — der tænkes her alene paa den ægte Kohæsion — ikke eller kun i ringe Grad er afhængig af Normaltrykket<sup>1)</sup>.

98. I Tabel 11 er angivet de ved Jordtryksberegninger almindelig anvendte Værdier for Rumvægte og for Skræntvinklen  $\varrho$  for forskellige Jordarter.

	Rumvægt	Skræntvinkel $\varrho$
Smaasten, runde Korn .....	1,8 t/m <sup>3</sup>	30°—35°
— kantede Korn .....	1,8 »	35°—45°
Grus, tørt .....	1,7 »	35°—40°
— vandmættet .....	1,9 »	35°—40°
Sand, tørt .....	1,6 »	30°—35°
— fugtigt .....	1,7 »	35°—40°
— vandmættet .....	1,9 »	25°—30°
Almindelig Dæmningsjord, tør .....	1,6 »	35°—40°
— fugtig .....	1,7 »	40°—45°
— vandmættet .....	1,9 »	27°—30°
Sandblandet Ler, tørt .....	1,5 »	40°—45°
— vandmættet .....	1,9 »	20°—25°
Ler, tørt .....	1,6 »	40°—50°
— vandmættet .....	2,0 »	20°—25°

99. I Tabel 12 er angivet nogle Værdier for Friktionsvinkel og Kohæsion, fundne ved Undersøgelser, der er udført paa Afdelingen for Jordbundstekniske Forsøg ved *Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin*<sup>2)</sup>. De i Tabellen anførte Værdier for Vandindhold og Rumvægte gælder for Tryk paa 0,1—8 kg/cm<sup>2</sup>, Værdierne for Kohæsion og Friktionsvinkel for Tryk > 1,0 kg/cm<sup>2</sup>.

100. Med Hensyn til Forskydningsmodstanden i Berøringsfladen mellem Bygværket og Jorden gælder, at man for denne Snitflades Vedkommende saa godt som altid lader Kohæsionen være ude af Betragtning, idet Forbindelsen mellem Bygværket og Jorden i Berøringsfladen kun rent undtagelsesvis er en saadan, at der kan være Mulighed for Optraeden af Kohæisionskræfter her.

<sup>1)</sup> Se § 138.

<sup>2)</sup> Krey: Erddruck, Erdwiderstand. 1932.

Tabel 12.

	Hulrumsprocent	Vandindhold i Vægtprocent af Totalsubstans	Rumvægt t/m <sup>3</sup>	Kohæsion kg/cm <sup>2</sup>	Friktionsvinkel $\varphi$
Sand, løst lejret, tørt . . . . .	47,6—36	—	1,42—1,71	—	31°
— fugtigt . . . . .		11,0— 9,0	1,58—1,87	—	—
— vandmættet . . . . .		25,2—17,5	1,89—2,07	—	31°
Sand, tæt lejret, tørt . . . . .	32,0—29	—	1,83—1,90	—	32,5°
— fugtigt . . . . .		8,0— 6,0	1,99—2,02	—	—
— vandmættet . . . . .		15,0—13,0	2,15—2,19	—	32,5°
Sand, meget tæt lejret, tørt . . . . .	28,0—24,5	—	1,94—2,04	—	33,5°
— fugtigt . . . . .		6,0	2,06—2,16	—	—
— vandmættet . . . . .		12,5—10,7	2,22—2,28	—	33,5°
Grus, løst lejret, tørt . . . . .	30,0—24,0	—	1,80—1,90	—	30°
— fugtigt . . . . .		3,0	1,85—1,95	—	—
— vandmættet . . . . .		14,0—10,5	2,19—2,29	—	30°
Grus, meget tæt lejret, tørt . . . . .	18,0	—	2,18	—	33,5°
— fugtigt . . . . .		3,0	2,25	—	—
— vandmættet . . . . .		7,5	2,39	—	33,5°
Sandblandet Ler, Slik, Mergel . . . . .	36,0—24,0	17,5—10,0	2,07—2,26	0,01—0,03	22° —26°
Lidt sandholdigt Ler . . . . .	50,0—30,0	27,0—14,0	1,83—2,17	0,03—0,06	16,5°—22°
Fedt Ler . . . . .	69 —38	45,0—19,0	1,53—2,03	0,06—0,12	11,5°—16,5°
Mosejord . . . . .	—	—	1,1 —1,4	0,0 —0,05	22° —26°

Svarende til Definitionen af aktivt og passivt Jordtryk er det for Forskydningsmodstanden bestemmende Normaltryk selve Jordtrykkets Normalkomponent, og Forskydningsmodstanden er derfor bestemt ved den Vinkel  $\delta$ , som Jordtrykkets Retning danner med Normalen til den Flade, paa hvilken Jordtrykket virker.

Hvis den Væg, paa hvilken Jordtrykket virker, var absolut glat, vilde Jordtrykket være rettet efter Normalen til Vægfladen, d. v. s.  $\delta = 0$ .

Er Væggen ru, vil Friktionen mellem Jorden og Væggen bevirke, at Vinklen  $\delta$  kan blive lig med Friktionsvinklen for Glidning af Jorden mod Væggen. Herved er dog at bemærke, at  $\delta$  ikke kan være større end Vinklen ( $\varphi$ ) for den paagældende Jordarts indre Friktion, eller, med den Tilnærmelse angaaende den indre Friktion, som er omtalt i det foregaaende, ikke større end Jordens Skræntvinkel ( $\varrho$ ). Hvis Væggen nemlig er meget ru, vil den Jord, der sidder i Væggens Fordybninger, følge med Væggen, naar denne bevæges i Forhold til hele Jordmassen, og den Skilleflade mellem Muren og Jorden, i hvilken Jordtrykket virker, vil derfor ikke dannes af selve Murvæggen, men helt eller delvis være en Snitflade i Jordmassen.

Om Friktionen i Vægfladen optræder med sin fulde Størrelse, og om Friktionen virker opad eller nedad i Vægfladen, beror imidlertid paa Væggens Bevægelsesretning i den Situation, hvor Jordtrykket kommer til Virkning. Med Hensyn til den Indflydelse, som Friktionen i Vægfladen har for Bestemmelsen af Vinklen  $\delta$ , kan der derfor kun siges, at Friktionsvinklen for Glidning af Jord mod Væg eller, hvis Skræntvinklen er mindre end denne Friktionsvinkel, da Skræntvinklen er den numeriske Maksimumsværdi for Vinklen  $\delta$ .

**101. Jordtrykkets Retning.** Hvilken Indflydelse Væggens Bevægelsesretning har med Hensyn til Bestemmelsen af Vinklen  $\delta$ , kan belyses ved følgende:

Ved en Mur paa Pæleværk, som den i Fig. 39 viste, kan Muren, hvis den giver efter for Jordtrykket, tænkes at blive løftet, nemlig ved at Skraapælene rejser sig, idet der foregaaer en Drejning f. Eks. om Skraapælenes nederste Ender. (Det forudsættes, at Skraapælene ikke synker for den fra Muren hidrørende Belastning). Herved vil Væggen  $AB$  bevæges opad i Forhold til Jorden, og Friktionen mellem Væggen og Jorden derfor kunne optræde med sin fulde Størrelse. I dette Tilfælde vil man derfor kunne regne  $\delta$  lig Friktionsvinklen for Glidning af Jord mod Mur, eventuelt  $\delta = \varrho$ .

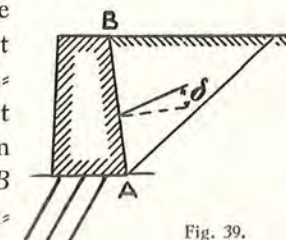


Fig. 39.

Har man en Mur, der, paa Grund af at den hviler paa et eftergivende Underlag, synker, vil Væggen, paa hvilket Jordtrykket virker, kunne bevæge sig nedad i Forhold til Jordmassen. Jordtrykket vil i saa Tilfælde blive skraat opad rettet, d. v. s. Vinklen  $\delta$  blive negativ, eventuelt  $\delta = -\varrho$ .

En Mur, opført paa almindelig god Byggegrund, vil, før Jordfylden anbringes bag Muren, udøve et vist Tryk paa Grunden, f. Eks. fordelt som angivet i Fig. 40 ved  $ADEF$ . Jordtrykket  $E$  vil bevirke en Ændring i Belastningen paa Grunden, saaledes at Trykket ved  $D$  bliver større. Trykfordelingen kan f. Eks. antages at være som angivet ved  $Dgh$ . Ændringen i Belastningen vil medføre en vis lille Eftergiven af Grunden. I Punktet  $F$ , bestemt ved Skæringen mellem  $ef$  og  $gh$ , vil Spændingen være den samme, før og efter Jordtrykket kom til at virke, og Murens Bevægelse som Følge af Jordtrykkets Optræden vil derfor bestaa i en Drejning omkring  $F$ . Den nederste Del af Væggen  $AB$  vil

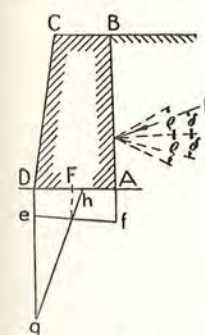


Fig. 40.

herved bevæges et større Stykke opad i Forhold til Jorden end den øverste Del af Væggen, og svarende hertil kunde der da være Anledning til at regne med en mindre Vinkelværdi for  $\delta$  for den øverste Del af Væggen end for den nederste Del af denne.

Bestaar den Bevægelse af Muren, der vil finde Sted, hvis Muren giver efter for Jordtrykket, i en Glidning paa Underlaget, vil Væggen  $AB$  i hele Højden bevæge sig bort fra Jorden. Det vil i dette Tilfælde være rimeligt at ansætte en mindre Værdi for Vinklen  $\delta$  end i de før nævnte Tilfælde. Hvis Bevægelsen er rettet efter Normalen til Væggen, maa der efter det anførte regnes med, at Friktionen ikke kommer til Virkning, d. v. s. man bør sætte  $\delta = 0$ .

**102. Regler for Fastsættelse af Vinklen  $\delta$ .** Af det foranstaaende vil det forstaaes, at Spørgsmaalet om Jordtrykkets Retning er ret kompliceret, og at det ikke lader sig gøre alene ud fra jordtryksteoretiske Betragtninger at fastslaa Regler for Bestemmelsen af Vinklen  $\delta$ . Spørgsmaalet, der forøvrigt har været og ogsaa er ret omstridt, har i de senere Aar været gjort til Genstand for Undersøgelser ved laboratiemæssige Forsøg. Noget sikkert kan der dog efter de hidtil af saadanne Forsøg fremkomne Resultater ikke angives om Jordtrykkets Retning i Forhold til Væggenormalen.

I Praksis er man derfor henvist til at anvende visse empiriske Regler til Vejledning ved Fastsættelsen af passende Værdier for Vinklen  $\delta$ . Begrundelsen for saadanne Regler er i Hovedsagen, at man ved at anvende dem i Forbindelse med den i det følgende omtalte, almindeligt benyttede Jordtryksberegning ved Beregning af Støttemure og lignende Bygværker finder saadanne Dimensioner, som erfaringsmæssigt har vist sig at være passende. De i Faglitteraturen angivne Regler om Fastsættelse af Vinklen for Jordtrykkets Retning er imidlertid ikke synderlig præcise og lader ret vidt Spillerum for skønsmæssig Vurdering af de Omstændigheder, som i de enkelte Tilfælde kan have Indflydelse paa, hvor stor Vinkel, der kan regnes med. Bestemmelsen af den Værdi for Vinklen  $\delta$ , der skal indføres ved Jordtryksberegningen, maa derfor træffes under Hensyn til, hvor stor Sikkerhed der forlanges for det paagældende Bygværks Stabilitet, og derfor ogsaa under Hensyn til, med hvilken Grad af Sikkerhed de øvrige Faktorer (ydre Kræfter, Funderingsforhold), hvoraf Bygværkets Stabilitet er afhængig, lader sig bestemme. I mange Tilfælde er der ingen anden Vej at gaa, end at man ved flere Gennemregninger, med forskellige Værdier for Vinklen  $\delta$ , undersøger, hvilken Indflydelse en Ændring af Jordtrykkets Retning vil have paa Bygværkets Stabilitets-Sikkerhed.

**103. Som Vejledning ved Fastsættelsen af Vinklen  $\delta$  kan følgende benyttes:**

Støttemure og lignende Bygværker, funderet paa Pæleværk:  $\delta = \frac{2}{3}\rho - \rho$ .

Støttemure og lignende Bygværker funderet direkte paa Byggegrunden: Ved Beregning af de paa Byggegrunden virkende Tryk:  $\delta = \frac{2}{3}\rho - \rho$ . Ved Undersøgelse af Sikkerhed mod Glidning langs Understøtningsfladen:  $\delta = \frac{1}{2}\rho - \frac{2}{3}\rho$ .

Tynde Vægge (Bolværker og lignende Konstruktioner):  $\delta = 0 - \frac{1}{3}\rho$ .

For alle de anførte Tilfælde gælder, at  $\delta$  ikke maa ansættes til større Værdi end Friktionsvinklen for Glidning mellem Jord og Væg, samt at  $\delta$  bør vælges forholdsvis lille, hvis Jorden er vandmættet, eller hvis Jordmassen kan blive udsat for Rystelser, eller hvis der paa den Del af Jordmassen, som udøver Tryk mod Bygværket, kan forekomme betydelige koncentrerede Belastninger.

I Stedet for at anvende de ovenfor anførte Størrelser af Vinklen  $\delta$  kan man bestemme denne Vinkel under Hensyntagen til dens Afhængighed af Væggens Bevægelsesretning i Forhold til Jorden efter følgende Regel: Vinklen  $\delta$  sættes lig med Skræntvinklen  $\rho$  (eventuelt lig med Friktionsvinklen for Glidning mellem Væg og Jord), multipliceret med  $\cos \alpha$ , hvor  $\alpha$  er Vinklen mellem Væggens Bevægelsesretning (bort fra Jorden) og Væggens Plan<sup>1)</sup>.

Ved Anvendelsen af denne sidstnævnte Regel kan man møde den Vanskelighed, at Vinklerne  $\alpha$  er meget forskellige for de forskellige Dele af Væggen. For at undgaa alt for store Besværligheder ved Jordtryksberegningen maa der da indføres en Gennemsnitsværdi for  $\delta$  for hele Væggen, eller flere Gennemsnitsværdier for passende store Dele af Væggen.

**104. Jordtryksteorier.** De sædvanlig anvendte Beregningsmaader til Bestemmelse af aktivt (og passivt) Jordtryk paa Støttemure, Bolværker og lignende Konstruktioner er baserede paa den af *Coulomb* (1773) fremsatte Jordtryksteori. Forud for *Coulomb* havde *Couplet* (1728) behandlet Spørgsmaalet om en Jordmasses Tryk paa en Støttemur. *Couplet* tænkte sig Jordmassen dannet af lige store, kugleformede og regelmæssigt lejrede Korn (Fig. 41). Til Bestemmelse af Jordtrykket  $E$  havs da Ligevægtsbetingelsen for de tre Systemer af

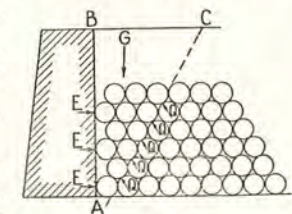


Fig. 41.

<sup>1)</sup> Dansk Ingeniørforenings Regler for Jernbetonkonstruktioner i Vandbygning, 1926.

Kræfter: Vægten  $G$  af Jordmassen (Glideprismet) mellem Væggen  $AB$  og Skrænten  $AC$ , Kræfter  $E$ , lig med og modsat rettede de søgte Jordtryk, og Reaktionen  $Q$  i Skillefladen  $AC$ .

Ved *Coulomb's Jordtryksteori* forudsættes ligeledes, at Størrelsen af Jordtrykket er bestemt af Ligevægtsbetingelserne for et Jordlegeme, der til den ene Side er begrænset af Støttemurens Væg, og til den anden Side af en eller anden Skilleflade i Jordmassen. Hvis Muren ikke giver efter for Jordens Tryk, eller hvis Jorden ikke giver efter for et eventuelt paa Muren ind mod Jorden virkende Tryk, dannes der ikke nogen Skilleflade i Jordmassen. Den *tænkte* Skilleflade, hvis Beliggenhed er bestemmende for Størrelsen af det *aktive* Jordtryk, regnes da at være den, der, saafremt Muren gav efter for Jordens Tryk, vilde give den *største* Værdi for Jordtrykket, og den *tænkte* Skilleflade, hvis Beliggenhed er bestemmende for Størrelsen af det *passive* Jordtryk, at være den, der, saafremt Jorden gav efter for Murens Tryk, vilde give den *mindste* Værdi for Jordtrykket.

Den videre Udformning af *Coulomb's* Jordtryksteori — den beregningsmæssige og grafiske Behandling af Jordtryksproblemerne — er senere givet af *Poncelet* (1844), *Rebhann* (1871), *Winkler* (1872), *Müller-Breslau* (1906) o. fl.

Omkring 1850 fremkom en anden Jordtryksteori, som navnlig er kendt under den Form, som *Rankine* gav den. *Rankine's* Jordtryksteori hviler paa visse Betragtninger angaaende Jordspændinger i en ubegrænset Jordmasse. Yderligere Behandling af Jordtryksproblemerne paa dette Grundlag er givet af *Culmann* (1866), *Mohr* (1905), *Müller-Breslau*, *Krey* (1926) og flere.

### Coulomb's Jordtryksteori.

105. Ved Beregninger til Dimensionering af Støttemure og lignende Bygværker er det, som nævnt, sædvanlig *Coulomb's* Jordtryksteori, der finder Anvendelse i Praksis, og denne Jordtryksteori skal derfor her omtales først og mest udførligt.

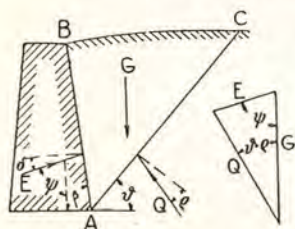


Fig. 42.

106. *Aktivt* Jordtryk. Ved Behandlingen af Jordtryksproblemerne vil vi foreløbig antage, at Jorden er Friktionsjord uden Kohæsion, eller hvis det er kohæsiv Jord, at der da enten ses bort fra Kohæsionen eller eventuelt tages Hensyn til Kohæsionens Indflydelse ved passende Valg af Værdien for Friktionsvinklen for den paagældende Jord. Endvidere forud-

sættes det, at man i Stedet for med Vinklen  $\varphi$  for den indre Friktion i Jorden regner med Jordens Skræntvinkel  $\varrho$ .

Lad  $AB$  (Fig. 42) være den mod Jorden vendende Flade af en Støttemur, og  $BC$  Jordoverfladen. Man tænker sig da, at der i den Grænsetilstand for Ligevægt, hvor Muren er paa Nippet til at give efter for Jordtrykket, dannes sig en eller anden Skilleflade  $AC$ , langs hvilken Jordlegemet vilde glide, hvis Muren gav efter. Denne Glidning hindres, ved at Muren udøver et Modtryk  $E$  (lig med og modsat rettet Jordtrykket) mod Jordlegemet. I Fladen  $AC$  (kaldet: Glidefladen) vil der være en vis Reaktion  $Q$ . Vægten af Jordlegemet  $ABC$  (kaldet: Glideprismet) er  $G$ .

Kendes Retningerne for  $E$  og  $Q$  samt Glidefladens Beliggenhed, kan  $E$  findes, f. Eks. ved en Krafttrekant, som den i Figuren viste. For forskellige Stillinger af Glidefladen  $AC$  faas forskellige Værdier af  $E$ . Det *aktive* Jordtryk bestemmes da som *Maksimumsværdien* af disse Størrelser  $E$ .

Ved *Coulomb's* Jordtryksteori forudsættes, at Glidefladen  $AC$  er en Plan, og forudsættes, at Jordtrykkets Retning (d. v. s. Vinklen  $\delta$ ) er fastlagt.

Med disse Forudsætninger kan Størrelsen af Jordtrykket  $E$  for de forskellige Stillinger af Glideplanen  $AC$  let findes.

Idet hele Forskydningsmodstanden i Glidefladen, som ovenfor anført, regnes at være Friktionsmodstand, er Retningen for  $Q$  bestemt ved, at  $Q$  danner Vinklen  $\varrho$  med Normalen til Glidefladen.

Af den i Fig. 42 viste Krafttrekant faas ved lodret og vandret Projektion af Kræfterne for en Glideplansstilling, bestemt ved Glideplanens Hældningsvinkel  $\vartheta$ :

$$G = Q \cos (\vartheta - \varrho) + E \cos \psi \quad (29)$$

$$E \sin \psi = Q \sin (\vartheta - \varrho) ,$$

hvoraf:

$$E = G \frac{\sin (\vartheta - \varrho)}{\sin \psi \cos (\vartheta - \varrho) + \cos \psi \sin (\vartheta - \varrho)} \quad (30)$$

$$E = G \frac{\sin (\vartheta - \varrho)}{\sin (\vartheta - \varrho + \psi)} . \quad (31)$$

Heri er som bestemmende for Jordtrykkets Retning, i Stedet for Vinklen  $\delta$  mellem Jordtrykket og Normalen til Væggen  $AB$ , indført Vinklen  $\psi$  mellem Jordtrykkets Retning og Vertikalen.

Er Væggens Hældningsvinkel  $\beta$ , haves:

$$\psi = \beta - \delta . \quad (32)$$

107. *Culmann's E-Linie*. Har Jordoverfladen en uregelmæssig Form, maa Bestemmelsen af Jordtrykket ske, ved at man prøver sig frem med

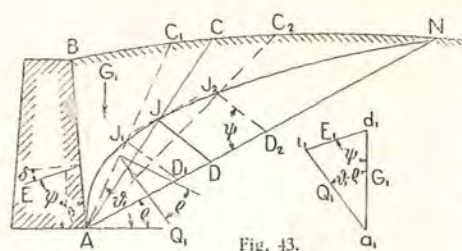


Fig. 43.

forskellige Stillinger af Glideplan (forskellige Værdier af Vinklen  $\vartheta$ ). Trækkes (Fig. 43) Linien  $AN$  med Hældningsvinkel  $\rho$  (Skræntlinien), og afsættes ud ad denne Linie  $\overline{AD_1} = G_1 =$  Vægten af Glideprismet  $ABC_1$  svarende til Glideplansvinklen  $\vartheta_1$ , samt trækkes Linien  $D_1I_1$  under Vinklen  $\psi$  med  $AN$ , hvor  $I_1$  ligger paa  $AC_1$ , faas:

$$\triangle AD_1I_1 \cong \triangle a_1d_1i_1.$$

Idet  $a_1d_1i_1$  er Krafttrekanten svarende til Glideplanen  $AC_1$ , er:

$$\overline{D_1I_1} = E_1.$$

Bestemmes paa denne Maade en Række Punkter,  $I_1, I_2, \dots$  svarende til forskellige Glideplansstillinger  $AC_1, AC_2, \dots$ , faas en Kurve — *Culmann's E-Linie* —, hvis Punktets skraa Afstand, under Vinklen  $\psi$ , til Skråntlinien  $AN$  direkte angiver de til de forskellige Glideplansstillinger svarende Størrelser  $E$ . Ved Hjælp af en saadan Kurve er det let at finde en tilstrækkelig nøjagtig Værdi af det aktive Jordtryk =  $E_{\text{maks.}} = E_a = \overline{DI}$  og Beliggenheden af den dertil svarende Glideplan  $AIC$ .

Det ses, at for Glideplanen sammenfaldende med den naturlige Skrånt  $AN$  og for Glideplanen sammenfaldende med Væggen  $AB$  faas  $E = 0$ .

I første Tilfælde falder i Krafttrekanten  $Q$  sammen  $G$ , i sidste Tilfælde bliver  $G = 0$ ; for begge Tilfælde svarer hertil  $E = 0$ .

108. Jordoverfladen vandret, Væggen lodret,  $\delta=0$ . (Fig. 44). For dette simple Tilfælde, der ofte forekommer i Praksis ved almindelige Jordtryksopgaver, kan man let udlede et analytisk Udtryk for Størrelsen af det aktive Jordtryk.

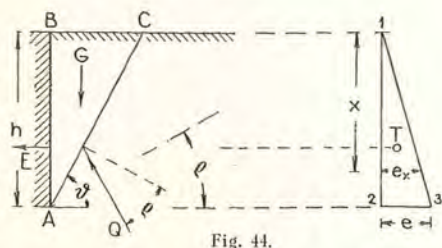


Fig. 44.

Af Formel (31) faas for den vilkaarlige Glideplansstilling  $AC$ , Hældningsvinkel  $\vartheta$ , idet  $\psi = 90^\circ$ ,

$$E = G \frac{\sin(\vartheta - \rho)}{\sin(\vartheta - \rho + 90^\circ)} = G \operatorname{tg}(\vartheta - \rho) \quad (33)$$

Idet Væggens Højde er  $h$ , og Jordens Rumvægt er  $\gamma$ , havas:

$$\begin{aligned} G &= \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{ctg} \vartheta, \\ E &= \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{ctg} \vartheta \operatorname{tg}(\vartheta - \rho). \end{aligned} \quad (34)$$

Den til  $E_{\text{maks}}$  svarende Størrelse af Glideplansvinklen  $\vartheta$  faas af  $\frac{dE}{d\vartheta} = 0$ , hvilket giver:

$$\frac{dE}{d\vartheta} = \frac{1}{2} \gamma h^2 \left( \frac{\operatorname{ctg} \vartheta}{\cos^2(\vartheta - \rho)} - \frac{\operatorname{tg}(\vartheta - \rho)}{\sin^2 \vartheta} \right) = 0. \quad (35)$$

$$\operatorname{ctg} \vartheta \sin^2 \vartheta - \operatorname{tg}(\vartheta - \rho) \cos^2(\vartheta - \rho) = 0$$

$$\sin \vartheta \cos \vartheta - \sin(\vartheta - \rho) \cos(\vartheta - \rho) = 0$$

$$\sin 2\vartheta - \sin 2(\vartheta - \rho) = 0$$

$$2 \cos \frac{1}{2}(4\vartheta - 2\rho) \sin \frac{1}{2}2\rho = 0$$

$$\cos(2\vartheta - \rho) = 0$$

$$\vartheta = 45^\circ + \frac{\rho}{2}, \quad (36)$$

som indsat i (34) giver det aktive Jordtryk:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{ctg} \left( 45^\circ + \frac{\rho}{2} \right) \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right).$$

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right). \quad (37)$$

(37) kan ogsaa skrives:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho}. \quad (38)$$

Den til det aktive Jordtryk ( $E_a$ ) svarende Glideplansvinkel er bestemt ved (36).

109. Sammenligning med Vædskestryk. Trykket fra en Vædske, med Rumvægt  $\gamma$ , mod en Væg af Højden  $h$  er:

$$V = \frac{1}{2} \gamma h^2.$$

Ved Sammenligning med (37) ses, at Jordtrykket = Vædskestrykket  $\times$  en Koefficient ( $\lambda_a$ ).

$$E_a = V \lambda_a,$$

hvor

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right), \quad (39)$$

d. v. s. alene afhængig af Størrelsen af Jordens Skråntvinkel.

For Jord havet altid  $\lambda_a < 1$ . Jordtrykket<sup>1)</sup> er altsaa mindre end Trykket fra en Vædske med samme Rumvægt som Jordmassen.

110. **Jordtryksdiagram.** Af Sammenligningen med Vædskestryk ses, at Jordtrykkets Diagram er en Trekant 1-2-3 (tegnet ud til højre i Fig. 44), bestemt af:

$$\frac{1}{2} h e = E = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right),$$

$$\overline{2-3} = e = h \gamma \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) = h \gamma \lambda_a. \quad (40)$$

Angrebspunktet for det samlede Jordtryk  $E$  ligger i Højden  $\frac{h}{3}$  over Væggens Underkant  $A$ .

Den ved (37) udtrykte Størrelse af Jordtrykket gælder for en Længde, vinkelret paa Papirets Plan, lig Længdeenheden. Indsættes  $h$  i Meter og  $\gamma$  i  $t/m^3$ , faas  $E$  i tons pr. løb. m Væg.  $e$  er Jordtrykket ( $t/m^2$ ) pr. Arealenhed ved den nederste Ende af Væggen.

I Dybden  $x$  under Jordoverfladen er Trykket:

$$e_x = x \gamma \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) = x \gamma \lambda_a. \quad (41)$$

111. **Belastet Jordoverflade.** For en Væg  $AB_1$  med Højde  $h + h_1$ , og Jordoverfladen  $B_1C_1$  (Fig. 45) faas, idet Trykket i Dybden  $h_1$  er:

$$e_{(h_1)} = h_1 \gamma \lambda_a,$$

og i Dybden  $(h + h_1)$ :

$$e_{(h+h_1)} = (h + h_1) \gamma \lambda_a,$$

Jordtrykket paa Vægdelene  $AB$ :

$$E = \frac{1}{2} (e_{(h_1)} + e_{(h+h_1)}) h =$$

$$\frac{1}{2} \gamma h^2 \lambda_a + \gamma h_1 h \lambda_a =$$

$$\frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) + \gamma h_1 h \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) = E_1 + E_2. \quad (42)$$

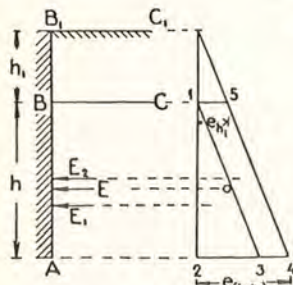


Fig. 45

<sup>1)</sup> Hvor det ikke kan misforstås, bruges i det følgende i Stedet for Betegnelsen »aktivt Jordtryk« kort Betegnelsen: Jordtryk og Bogstav  $E$  (uden Indeks). Hvor der er Tale om baade aktivt Jordtryk og passivt Jordtryk, betegnes disse med henholdsvis  $E_a$  og  $E_p$ .

Hele dette Jordtryk er fremstillet ved Trapezet 1-2-4-5. Det ses, at den ene Del af hele Jordtrykket, nemlig

$$E_1 = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) = \frac{1}{2} \gamma h^2 \lambda_a,$$

er det Jordtryk, der vilde virke paa Væggen  $AB$ , saafremt Jorden ikke naaede højere end til  $BC$ . Dette Jordtryk er fremstillet ved Trekanten 1-2-3.

Paa den under  $BC$  værende Del af Jorden virker Jordlaget mellem  $BC$  og  $B_1C_1$  med dette Jordlags Vægt, d. v. s. som en lodret Belastning,  $\gamma h_1$  pr.  $m^2$ . Bidraget til Jordtrykket paa Væggen  $AB$ , hidrørende fra denne Belastning, ses at være:

$$E_2 = \gamma h_1 h \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) = \gamma h_1 h \lambda_a, \quad (43)$$

d. v. s. et i hele Højden af Væggen  $AB$  ensformig fordelt Jordtryk, der pr.  $m$  af Væghøjden er:

$$e_2 = \frac{\gamma h_1 h \lambda_a}{h} = \gamma h_1 \lambda_a = \gamma h_1 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right). \quad (44)$$

Det til Andelen  $E_2$  i hele Jordtrykket svarende Diagram er Parallelogrammet 1-3-4-5.

Jordtryksforøgelsen  $E_2$  hidrører alene fra den paa Fladen  $BC$  virkende Belastning fra Vægten af den over  $BC$  liggende Jord. Man vil derfor faa det samme Jordtryk paa Væggen  $AB$ , hvis man erstatter Jordlaget over  $BC$  med en Belastning  $p$  pr.  $m^2$ , naar:

$$p = \gamma h_1.$$

112. Heraf udledes følgende Regel for Bestemmelse af Jordtrykket paa en Væg  $AB$  (Fig. 46), naar der paa Jordoverfladen virker en ensformig fordelt Belastning  $p$  ( $t/m^2$ ):

Det hele Jordtryk findes som

$$E = E_1 + E_2 = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right) + p h \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right). \quad (45)$$

Hvis det i Stedet for Jord var en Vædske, der udøvede Tryk mod Væggen  $AB$  af en Beholder, og der virkede et Tryk  $p$  paa Vædskeoverfladen, vilde der derved fremkomme en Trykforøgelse  $ph$  paa hele Væggen. Ved Jord ses Trykket at blive  $\lambda_a \times$  Vædskestrykket.

Grafisk Bestemmelse af hele Jordtrykket kan herefter ske saaledes:

Der afsættes  $\overline{2-3} = e_h = \gamma h \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right)$ . Arealet af Trekant

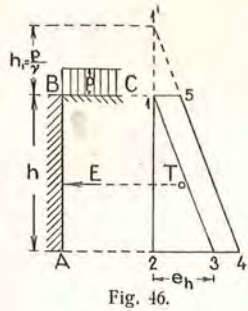


Fig. 46.

1-2-3 er da lig Jordtrykket  $E_1$  svarende til ubelastet Jordoverflade BC. Der afsættes endvidere  $I-I' = \frac{p}{\gamma}$ ;  $h_1$  er Højden af et Lag Jord (med samme Rumvægt som den Jord, der udøver Tryk mod Væggen AB), som giver samme lodrette Belastning som  $p$ . Derefter trækkes  $I'-5-4 \parallel I-3$ . Arealet af 1-2-4-5 er da lig hele Jordtrykket  $E$ . Beliggenheden af Angrebepunktet for  $E$  faas ved en vandret Linie gennem Tyngdepunktet  $T$  for 1-2-4-5 til Skæring med Væggen.

113. Vilkaarlig formet Væg og Jordoverflade. I Fig. 47 fremstiller AB Bagvæggen af en Støttemur. BF er Jordoverfladen og  $BPP_1F$  fremstiller en paa Jordmassen virkende lodret Belastning.

AN er Skråntlinien gennem A. Jordtrykkene paa Fladerne 1, 2, 3... er  $E_1, E_2, E_3...$  Jordtrykkenes Retninger (Vinklerne  $\delta_1, \delta_2, \delta_3...$  med Vægnormalerne og Vinklerne  $\psi_1, \psi_2, \psi_3...$  med Vertikalen) forudsættes kendt, og det forudsættes, at Størrelserne af Jordtryk-

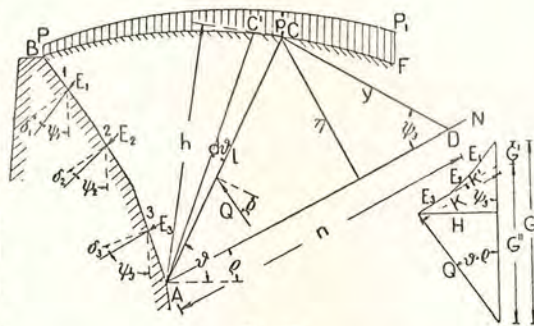


Fig. 47.

kene  $E_1$  og  $E_2$  er fundet paa den i det følgende beskrevne Maade, saaledes at Opgaven er at bestemme Jordtrykket  $E_3$ .

Lad AC med Hældningsvinklen  $\vartheta$  være den til det søgte Jordtryk  $E_3$  svarende Glideplan, og lad endvidere G være Summen af Vægten af Jordlegemet ABC og den paa dette virkende Del af Overfladebelastningen (paa Strækning BC), samt Q den i Glideplanen virkende Reaktion mod Jordlegemet. Idet der skal være Ligevægt mellem Kræfterne  $E_1, E_2, E_3, Q$  og G, er  $E_3$  bestemt ved den i Figuren viste Kraftpolygon. Forlængelsen af Siden  $E_3$  deler G i  $G'$  og  $G''$ .  $G'$  er kendt paa Forhaand, idet man kender  $E_1$  og  $E_2$  samt Retningen for  $E_3$ .

Man har:

$$K = E_3 + K', \quad (46)$$

hvor  $K'$  er Summen af Komposanterne af  $E_1$  og  $E_2$  i  $E_3$ 's Retning.

Til Bestemmelse af det søgte  $E_3$  har man, at  $E_3$  skal være Maksimum for  $\vartheta$  som Variabel. Da  $K'$  er uafhængig af  $\vartheta$ , faas den til Maksimum af  $E_3$  svarende Værdi af  $\vartheta$  af:

$$\frac{dK}{d\vartheta} = 0.$$

Ved vandret og lodret Projektion faas:

$$K \sin \psi_3 = Q \sin (\vartheta - \varrho), \quad \text{og} \quad (47)$$

$$G'' = K \cos \psi_3 + Q \cos (\vartheta - \varrho),$$

hvoraf

$$K = \frac{G'' \sin (\vartheta - \varrho)}{\cos \psi_3 \sin (\vartheta - \varrho) + \sin \psi_3 \cos (\vartheta - \varrho)} = \frac{G'' \sin (\vartheta - \varrho)}{\sin (\vartheta - \varrho + \psi_3)}. \quad (48)$$

$$\frac{dK}{d\vartheta} = 0 \text{ giver:}$$

$$\sin (\vartheta - \varrho + \psi_3) \left( \sin (\vartheta - \varrho) \frac{dG''}{d\vartheta} + G'' \cos (\vartheta - \varrho) \right) - G'' \sin (\vartheta - \varrho) \cos (\vartheta - \varrho + \psi_3) = 0$$

$$G'' \sin \psi_3 + \frac{dG''}{d\vartheta} \sin (\vartheta - \varrho) \sin (\vartheta - \varrho + \psi_3) = 0. \quad (49)$$

Vi vil indføre følgende Betegnelser:

$h$  er Afstanden fra A til Tangenten i C,  $p$  Belastningen (pr. Arealenhed) i C,  $\overline{AC} = l$ ,  $\angle CAC' = d\vartheta$  og, idet  $\gamma$  er Jordmassens Rumvægt:

$$\gamma' = \gamma + \frac{2p}{h}. \quad (50)$$

For et Element ACC' af Jordlegemet haves, at den paa Elementets Overflade  $CC' = ds$  virkende Del af Belastningen er:

$$dp = p ds, \text{ eller, idet:}$$

$$ds = \frac{l^2 d\vartheta}{h},$$

$$dp = \frac{p l^2 d\vartheta}{h}. \quad (51)$$

Til en Forøgelse af Vinklen  $\vartheta$  med  $d\vartheta$  svarer en Formindskelse af G og dermed af  $G''$  med:

$$\gamma \cdot \Delta ACC' + dp = \frac{1}{2} \gamma l^2 d\vartheta + \frac{p l^2 d\vartheta}{h}.$$

Man har da:

$$dG'' = - \left( \frac{1}{2} \gamma l^2 d\vartheta + \frac{p l^2 d\vartheta}{h} \right) = - \frac{1}{2} \gamma' l^2 d\vartheta. \quad (52)$$

Trækkes  $CD$  under Vinklen  $\psi_3$  med  $AN$ , og betegnes:  $\overline{AD} = n$ ,  $\overline{CD} = y$  og Afstanden fra  $C$  til  $AD$  med  $\eta$ , havest:

$$\frac{\sin(\vartheta - \varrho + \psi_3)}{\sin \psi_3} = \frac{n}{l} \quad \text{og} \quad (53)$$

$$\sin(\vartheta - \varrho) = \frac{\eta}{l}, \quad (54)$$

som ved Indsættelse i (49) i Forbindelse med (52) giver:

$$G'' = \frac{1}{2} \gamma' \eta n. \quad (55)$$

Man ser heraf, at den til Maksimum af  $E_3$  svarende Beliggenhed af Glideplanen er bestemt ved:

$$\gamma' \cdot \Delta ACD = G''. \quad (56)$$

Denne Regel kaldes *Rebhann's Regel*<sup>1)</sup>.

Naar den til (56) svarende Beliggenhed af Glideplanen — ved at man prøver sig frem — er fundet, faas  $K$  og dermed  $E_3$  af (48).

Ved Indsættelse af (53), (54) og (55) i (48) faas, idet:

$$\sin \psi_3 = \frac{\eta}{y},$$

$$K = \frac{1}{2} \gamma' y \eta. \quad (57)$$

Summen af de vandrette Komposanter af Jordtrykkene  $E_1$ ,  $E_2$  og  $E_3$  faas af:

$$\Sigma E_v = H = K \sin \psi_3 = \frac{1}{2} \gamma' \eta^2 \quad (58)$$

**114. Poncelet's Konstruktion.** Hvis Væggen  $AB$  er plan og Jordoverfladen ligeledes plan, samt Belastningen ensformig fordelt (Fig. 48),

<sup>1)</sup> Den er først fremsat af *Rebhann*, men kun for det mere simple Tilfælde: Plan Væg og plan Jordoverflade. Den ovenfor givne Udvikling skyldes *Müller-Breslau*.

bliver, idet  $\overline{BC} = d$ :

$$\begin{aligned} G'' &= G \\ &= \frac{1}{2} \gamma' h d, \quad \text{og} \\ K &= E. \end{aligned}$$

Den ved (55) udtrykte Betingelse for Maksimum af  $K (= E)$  bliver da:

$$\begin{aligned} \text{Areal } \triangle ABC \\ &= \text{Areal } \triangle ACD. \end{aligned}$$

Det ses heraf, at Beliggenheden af Glideplanen  $AC$  er uafhængig af Belastningens Størrelse og af Jordens Rumvægt  $\gamma$ .

Trækkes  $DO \parallel AC$  og  $BI \parallel CD$ , faas med de i Figuren benyttede Betegnelser:

$$\triangle AOC = \triangle ACD,$$

$$\text{altsaa } \triangle AOC = \triangle ABC, \text{ hvoraf:}$$

$$\overline{BC} = \overline{CO} = d.$$

Endvidere havest:

$$\triangle NCA \sim \triangle NOD, \text{ hvoraf:}$$

$$\frac{c}{d} = \frac{b}{n}, \quad (59)$$

og  $\triangle NBI \sim \triangle NCD$ , hvoraf:

$$\frac{c}{d} = \frac{b-n}{n-a}. \quad (60)$$

Af (59) og (60) faas:

$$n^2 = ab. \quad (61)$$

Det ser heraf, at de Jordtrykket bestemmende Størrelser,  $y$  og  $\eta$ , samt Beliggenheden af Glideplanen  $AC$  kan findes ved følgende Konstruktion (*Poncelet's Konstruktion*):

Fra  $B$  trækkes  $BI$  under Vinklen  $\psi$  med  $AN$  (eller under Vinklen

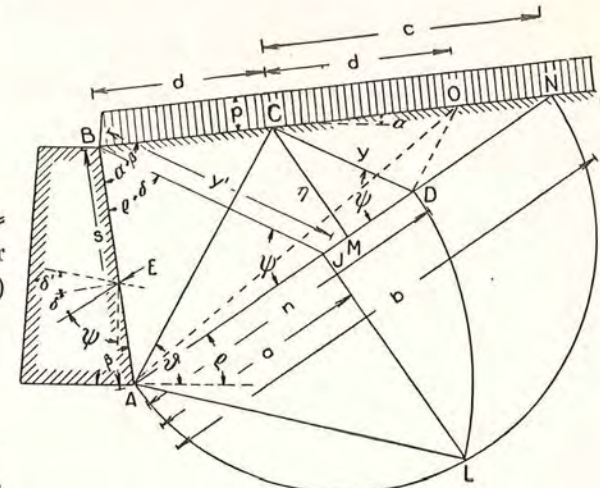


Fig. 48.



$\varrho + \delta$  med  $AB$ ), der tegnes en Halvcirkel med  $AN$  som Diameter og trækkes  $IL \perp AN$ .  $\overline{AL}$  ( $= n$ ) afsættes ud ad  $AN$  til  $D$  ( $\overline{AD} = \overline{AL}$ ), og der trækkes  $DC \parallel BI$  samt  $CM \perp AN$ .  $AC$  er da den søgte Glideplan  $\overline{CD} = y$ ,  $\overline{CM} = \eta$ , og Jordtrykket:

$$E = \frac{1}{2} \gamma' y \eta. \quad (62)$$

Er Jordoverfladen ubelastet, er  $\gamma' = \gamma$  og Jordtrykket er:

$$E = \frac{1}{2} \gamma y \eta. \quad (63)$$

Linien  $BI$  kaldes Orienteringslinien. Ved Afsætningen af denne maa det erindres, at  $\delta$  skal regnes med Fortegn og saaledes, at  $\angle ABI = \varrho + \delta$ , naar Jordtrykkets Retning i Forhold til Væggens Normal er som vist i Figuren med fuld Linie, og  $\angle ABI = \varrho - \delta'$ , naar Retningen er som vist med punkteret Linie. I sidstnævnte Tilfælde erstattes (32) med  $\psi = \beta + \delta'$ .

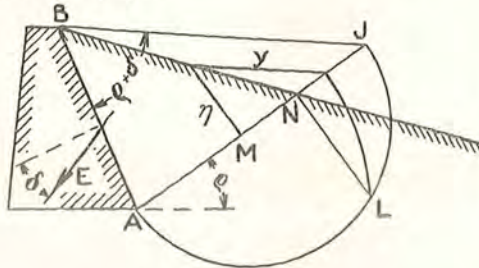


Fig. 49

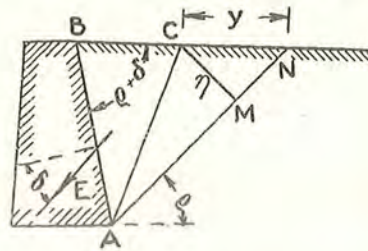


Fig. 50

Hvis Orienteringslinien falder oven over Jordoverflade-Linien (Fig. 49), tegnes Halvcirklen over  $AI$  som Diameter, og  $L$  bestemmes ved den vinkelrette paa  $AN$  i Punktet  $N$ .

Saaframt (Fig. 50) Orienteringslinien falder sammen med Jordoverflade-Linien ( $\angle ABN = \varrho + \delta$ ), falder Punktet  $D$  i Punkt  $N$ . Den foran anførte Regel:  $\triangle ABC = \triangle ACD$  giver:  $\triangle ABC = \triangle ACN$ .  $C$  bestemmes da som Midtpunktet mellem  $A$  og  $N$ , og man har  $\overline{CN} = y$  og  $\overline{CM} = \eta$ .

Er Jordoverfladens Hældningsvinkel lig med Skråtvinklen ( $\varrho$ ), rykker Punktet  $N$  uendelig fjernt (Fig. 51). Størrelserne  $y$  og  $\eta$  bliver da uafhængige af Beliggenheden af Punkt  $C$ .

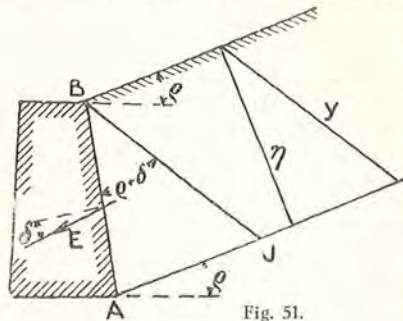


Fig. 51.

**115. Formler til Beregning af Jordtryk.** Ved Hjælp af Fig. 48 og Relationen (61) kan der udledes analytiske Udtryk for Størrelsen af Jordtrykket.

Lad Jordoverfladens Hældningsvinkel være  $\alpha$ , og Væggens Højde, maalt

i Væggens Plan:  $\overline{AB} = s$ . Med de i Fig. 48 i øvrigt anvendte Betegnelser haves da:

$$\frac{y}{y'} = \frac{b-n}{b-a}, \text{ eller idet } n^2 = ab:$$

$$y = y' \frac{b - \sqrt{ab}}{b-a} = \frac{y'}{1 + \sqrt{\frac{a}{b}}}$$

og

$$\frac{a}{s} = \frac{\sin(\varrho + \delta)}{\sin \psi}, \quad \frac{b}{s} = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\varrho - \alpha)}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho - \alpha)}{\sin \psi \sin(\alpha + \beta)}$$

$$y' = s \frac{\sin(\beta + \varrho)}{\sin \psi}.$$

Endvidere haves:

$$E = \frac{1}{2} \gamma' y \eta = \frac{1}{2} \gamma' y^2 \sin \psi.$$

Ved Indsættelse heri faas:

$$E = \frac{1}{2} \gamma' s^2 \frac{\sin^2(\beta + \varrho)}{\sin \psi \left( 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho - \alpha)}{\sin \psi \sin(\alpha + \beta)}} \right)^2}, \quad (64)$$

og den vandrette Komponent af Jordtrykket:

$$E_v = E \sin \psi = \frac{1}{2} \gamma' s^2 \frac{\sin^2(\beta + \varrho)}{\left( 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho - \alpha)}{\sin \psi \sin(\alpha + \beta)}} \right)^2}, \quad (65)$$

Glideplanens Beliggenhed er bestemt ved:

$$\overline{BC} = s \frac{\sin(\beta + \varrho) \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho - \alpha)}{\sin \psi \sin(\alpha + \beta)}}}{\sin(\varrho - \alpha) \left( 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho - \alpha)}{\sin \psi \sin(\alpha + \beta)}} \right)}. \quad (66)$$

I ovenstaaende Udtryk er indført baade Vinklen  $\psi$  og Vinklerne  $\beta$  og  $\delta$ . Den ene af disse Vinkler kan elimineres, idet man har (32):  $\psi = \beta - \delta$ .

Er Væggen lodret (Fig. 52), d. v. s.  $\beta = 90^\circ$ , faas:

$$E_v = \frac{1}{2} \gamma' s^2 \frac{\cos^2 \varrho}{\left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho - \alpha)}{\cos \delta \cos \alpha}}\right)^2}. \quad (67)$$

For lodret Væg ( $\beta = 90^\circ$ ) og vandret Jordoverflade ( $\alpha = 0$ ), faas:

$$E_v = \frac{1}{2} \gamma' s^2 \frac{\cos^2 \varrho}{\left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta) \sin \varrho}{\cos \delta}}\right)^2}. \quad (68)$$

Hvis der her regnes med den størst mulige Værdi af Vinklen  $\delta$ , nemlig  $\delta = \varrho$ , faas:

$$E_v = \frac{1}{2} \gamma' s^2 \frac{\cos^2 \varrho}{(1 + \sqrt{2} \sin \varrho)^2}. \quad (69)$$

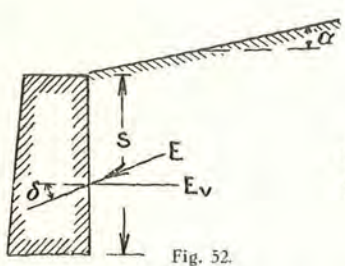


Fig. 52.

For lodret Væg, vandret Jordoverflade og vandret virkende Jordtryk ( $\beta = 90^\circ$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\delta = 0$ ) faas:

$$E = E_v = \frac{1}{2} \gamma' s^2 \frac{\cos^2 \varrho}{(1 + \sin \varrho)^2} = \frac{1}{2} \gamma' s^2 \frac{1 - \sin \varrho}{1 + \sin \varrho}$$

$$= \frac{1}{2} \gamma' s^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varrho}{2}\right). \quad (\text{jfr. Formel (37)}).$$

I Formlen (64) og i de øvrige til denne svarende Formler skal Vinklerne  $\alpha$  og  $\delta$  regnes med Fortegn og saaledes, at  $\alpha$  regnes positiv, naar Jordoverfladens Plan ligger over Horisontallinien, negativ, naar den ligger under Horisontallinien, og for Vinklen  $\delta$  saaledes, at denne regnes positiv, naar Jordtrykkets Retning (fra Jordmassen mod Væggen) ligger over Vægnormalen, negativ, naar den ligger under Vægnormalen.

For det i Fig. 53 viste Tilfælde, Jordoverfladen staaende med naturlig Skrænt, skal saaledes i Formel (64) indsættes  $\alpha = -\varrho$  (og  $\delta = 0$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $\psi = 90^\circ$ ), hvorved faas:

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\cos^2 \varrho}{(1 + \sqrt{2} \sin \varrho)^2}. \quad (70)$$

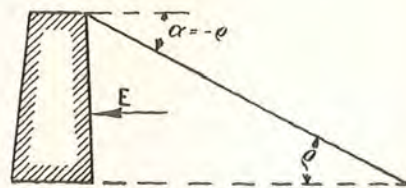


Fig. 53.

116. Poncelet's Konstruktion (§ 114) og de af denne udledede Formler til Bestemmelse af Jordtrykket lader sig ogsaa anvende i Tilfælde af, at den mod Jorden vendende Væg og ligeledes Jordoverfladen dannes af flere plane Flader (Fig. 54).

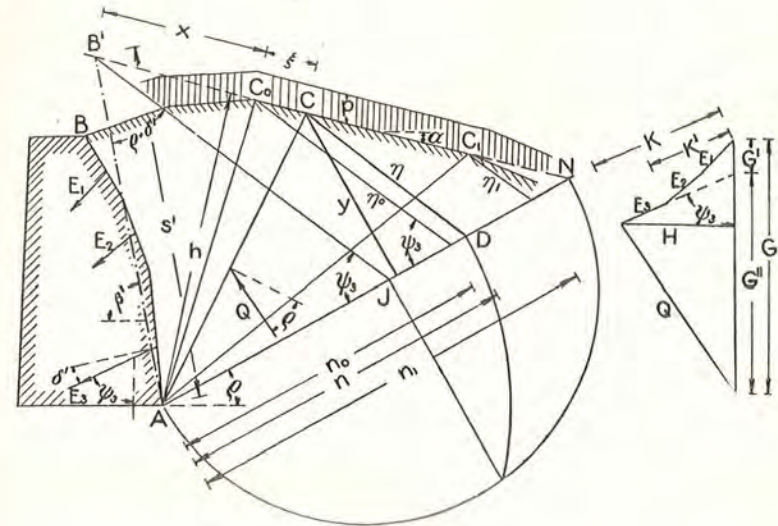


Fig. 54.

Det antages, at Jordtrykkene  $E_1$  og  $E_2$  er fundne, og at Opgaven derefter er at bestemme  $E_3$ . Man finder først de til Glideplaner ( $AC_0, AC_1 \dots$ ) gennem Knækpunkterne i Jordoverfladen svarende Størrelser  $n$  og  $\eta$  ( $n_0, \eta_0, n_1, \eta_1 \dots$ ), ved at man fra Knækpunkterne trækker Linier under Vinklen  $\psi_3$  med  $AN$ .

Lad  $G_0$  være Summen af Vægten af det til venstre for  $AC_0$  værende Jordlegeme og den til venstre for  $C_0$  faldende Belastning paa Jordoverfladen, og  $G_1$  være den tilsvarende Størrelse for Planen  $AC_1$ .

Den til det søgte Jordtryk  $E_3$  svarende Glideplan vil da skære Jordoverfladen i et Punkt  $C$ , liggende mellem  $C_0$  og  $C_1$ , saafremt

$$\frac{1}{2} \gamma' n_1 \eta_1 > G_1' = G_1 - G' \quad (71)$$

$$\frac{1}{2} \gamma' n_0 \eta_0 < G_0' = G_0 - G'.$$

Antages, at  $AC$  er den til  $E_3$  svarende Glideplan, haves i Følge (55) og (56)

$$G'' = \gamma' \cdot \Delta ACD = \frac{1}{2} \gamma' n \eta.$$

Bestemmes endvidere Punktet  $B'$  liggende paa Forlængelsen af Linien  $C_0 C_1$  saaledes, at Arealerne af Trekkanterne  $AB'C$  og  $ACD$  er lige store, bliver  $AD$  Mellempportionalen mellem  $AT$  og  $AN$  i Henhold til det ved Udledelsen af (61) anførte. Kendes derfor Punktet  $B'$ , kan man bestemme  $D$  og dermed  $C$  ved Poncelet's Konstruktion samt Størrelserne  $y$  og  $\eta$  som antydet i Figuren.

Til Bestemmelse af Punktet  $B'$  haves, idet  $\Delta AB'C = \Delta ACD$ ,

$$\gamma' \cdot \Delta AB'C = \gamma' \cdot \Delta ACD = G'' = G - G'.$$

Sættes  $\overline{C_0 C} = \xi$  og  $\overline{C_0 B'} = x$  haves endvidere, idet  $G = G_0 + \frac{1}{2}\gamma' \xi h$ :

$$\gamma' \cdot \Delta AB'C = \frac{1}{2}\gamma' (x + \xi) h = G_0 + \frac{1}{2}\gamma' \xi h - G',$$

hvoraf:

$$x = \frac{G_0 - G'}{\frac{1}{2}\gamma' h} = \frac{G_0 - G'}{\frac{1}{2}\gamma h + p}. \quad (72)$$

Man faar da:

$$K = \frac{1}{2}\gamma' y \eta$$

og

$$E_3 = K - K'.$$

Vil man benytte det analytiske Udtryk til Bestemmelse af Jordtrykket, gøres dette bedst ved Anvendelse af (65). Heri skal da indsættes: for  $s$  Højden  $s'$  af »Erstatningsvæggen«  $AB'$ , for  $\alpha$  Hældningsvinklen for Jordoverfladen  $C_0 C_1$  (i Figuren er  $\alpha$  negativ), for  $\beta$  Vinklen  $\beta'$  mellem »Erstatningsvæggen« og Horizontallinien, og for  $\delta$  Vinklen  $\delta'$  mellem Jordtrykket  $E_3$  og »Erstatningsvæggen«s Normal, saaledes at man, idet  $H$  er Summen af de vandrette Komposanter af Jordtrykkene  $E_1$ ,  $E_2$  og  $E_3$  har:

$$H = \Sigma E_v = \frac{1}{2}\gamma' (s')^2 \frac{\sin^2 (\beta' + \varrho)}{\left(1 + \sqrt{\frac{\sin (\varrho + \delta') \sin (\varrho - \alpha)}{\sin \psi \sin (\alpha + \beta')}}\right)^2}, \quad (73)$$

og

$$E_{3(v)} = H - (E_{1(v)} + E_{2(v)}). \quad (74)$$

I det i Fig. 55 viste simple Tilfælde kan Punktet  $B'$  let findes ved Konstruktion. Man skal her have:

$$\text{Areal } ACD = \text{Areal } ACC_0 B.$$

Da for »Erstatningsvæggen«  $AB'$ :

$$\Delta AB'C = \Delta ACD.$$

faas  $B'$  ved, at der tegnes  $BB' \parallel AC_0$ , idet da

$$\text{Areal } AB'C = \text{Areal } ACC_0 B.$$

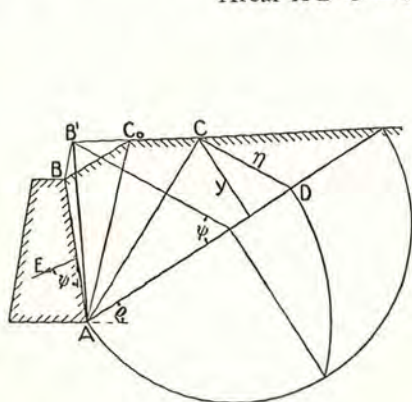


Fig. 55.

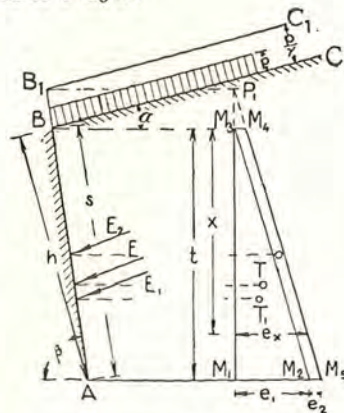


Fig. 56.

117. Jordtrykkets Fordeling. Ved plan Væg, plan Jordoverflade og Belastningen paa denne ensformig fordelt (jfr. Fig. 48) haves Jordtrykkets Størrelse bestemt ved Formel (64). Indføres (Fig. 56) som bestemmende for Væggens Højde i Stedet for  $s$  Punktet  $A$ 's Dybde  $t$  under  $B$ , haves:

$$s = \frac{t}{\sin \beta},$$

og (64) kan da skrives:

$$E = \frac{1}{2}\gamma' t^2 \frac{\sin^2 (\beta + \varrho)}{\sin^2 \beta \sin \psi \left(1 + \sqrt{\frac{\sin (\varrho + \delta) \sin (\varrho - \alpha)}{\sin \psi \sin (\alpha + \beta)}}\right)^2} \quad (75)$$

eller:

$$E = \frac{1}{2}\gamma' t^2 \lambda, \quad (76)$$

hvor, idet:

$$\lambda = \frac{\sin^2 (\beta + \varrho)}{\sin^2 \beta \sin \psi \left(1 + \sqrt{\frac{\sin (\varrho + \delta) \sin (\varrho - \alpha)}{\sin \psi \sin (\alpha + \beta)}}\right)^2},$$

$\lambda$  er en Jordtrykoefficient, der alene er afhængig af Jordens Skræntvinkel, Jordoverfladens Hældningsvinkel, Væggens Hældning og Jordtrykkets Retning (jfr. § 109).

Idet (50):

$$\gamma' = \gamma + \frac{2p}{h}$$

og

$$h = s \sin (\alpha + \beta) = \frac{t \sin (\alpha + \beta)}{\sin \beta},$$

haves:

$$E = \frac{1}{2}\gamma t^2 \lambda + p \frac{t \sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} \lambda = E_1 + E_2. \quad (77)$$

$E_1 = \frac{1}{2}\lambda t^2 \lambda$  er den til ubelastet Jordoverflade svarende Del af det hele Jordtryk  $E$ . Jordtryksdiagrammet for denne Del af Jordtrykket ses at være den viste Trekant  $M_1 M_2 M_3$  med Højden  $t$  og Grundlinien:

$e_1 = \gamma \lambda t$ . Angrebepunktet for  $E_1$  ligger i Højden  $\frac{t}{3}$  over  $A$ . I Dybden  $x$  under  $B$  er Trykket  $e_{1(x)} = \gamma \lambda x$ .

Jordtrykket  $E_2$  er det fra Belastningen  $p$  hidrørende Bidrag til det hele Jordtryk. Denne Del af Jordtrykket er, pr. Arealenhed,

$$e_2 = p \frac{\sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)} \lambda. \quad (78)$$

$E_2$  er fremstillet ved det viste Parallelogram  $M_2 M_3 M_4 M_5$  og An- grebspunktet for  $E_2$  ligger Højden  $\frac{t}{2}$  over  $A$ .

Trækkes en Linie  $B_1 C_1 \parallel BC$  og i Afstanden  $\frac{P}{\gamma}$  fra  $BC$ , og trækkes endvidere gennem  $B_1$ , der er Skæringspunktet mellem  $AB$  og  $B_1 C_1$ , en vandret Linie, faas ved Skæring med  $M_1 M_3$  Punktet  $P_1$ . Man ser, at:

$$\overline{M_3 P_1} = \frac{p}{\lambda} \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$$

og heraf, idet  $e_2 = p \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \lambda$ , at  $M_4 M_5$  gaar gennem  $P_1$ .

Heraf udledes følgende Fremgangsmaade til Bestemmelse af Jord- trykket og af Diagrammet for dets Fordeling. Jordtrykket for ubelastet Jordoverflade findes ved *Poncelet's* Konstruktion, og af det fundne Jord- tryk ( $E_1 = \frac{1}{2} \gamma y \eta$ ) bestemmes Tryktrikanten  $M_1 M_2 M_3$  ved, at der af- sættes:

$$\overline{M_1 M_2} = e_1 = \frac{2 E_1}{t}$$

Derefter bestemmes Punktet  $P_1$ , som ovenfor beskrevet, og Linien  $P_1 M_4 M_5$  trækkes parallel med  $M_2 M_3$ . Hele Jordtrykket ( $E = E_1 + E_2$ ) er fremstillet ved Arealet af Trapezet  $M_1 M_3 M_4 M_5$ . Trykcentret for  $E$  faas ved den vandrette Linie gennem Tyngdepunktet  $T$  for Trapezet til Skæring med Væggen. Trykket i Dybden  $x$  under  $B$  er:  $e_x = e_{1(x)} + e_2$ .

Hvis Jordoverfladen ikke er plan, eller hvis Belastningen er uensfor- mig fordelt, kan Bestemmelsen af Jordtrykkets Fordeling ske paa føl- gende Maade (Fig. 57):

$AB$  er Væggen og  $BC$  Jordoverfladen. Man opdeler Væggen i pas- sende smaa Stykker,  $BA_1, A_1 A_2, A_2 A_3 \dots$  og bestemmer, f. Eks. ved at man prøver sig frem, Jordtrykkene  $E_1$  paa  $A_1 B$ ,  $E_2$  paa  $A_2 B$ , o. s. fr., samt Jordtrykket  $E$  paa hele Væggen  $AB$ . (De til disse Jordtryk svarende Glideplaner er ikke indbyr- des parallelle). Ud fra en Linie  $M M_0$  afsættes  $\overline{M_1 N_1}$  saaledes, at  $\triangle M_0 M_1 N_1 = E_1$ ; hvis Jordoverfla- den er belastet, erstattes  $\triangle M_0 M_1 N_1$  med et Tra- pez. Endvidere afsættes  $\overline{M_2 N_2}$  saaledes, at Areal  $M_1 N_1 N_2 M_2 = E_2 - E_1$ ,  $\overline{M_3 N_3}$  saaledes, at Areal  $M_2 N_2 N_3 M_3 = E_3 - E_2$  o. s. fr. Arealet  $M_0 M N$  er da lig Jordtrykket  $E$ . Tyngdepunktet  $T$  giver An- grebspunktet for  $E$ . Trykket i Dybden  $x$  under  $B$  er  $e_x$ .

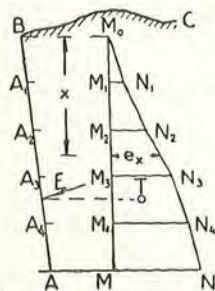


Fig. 57.

Hvis Belastningen paa Jordoverfladen er uens- formig fordelt (Fig. 58), eller hvis der virker kon- centrerede Belastninger eller Enkeltkræfter paa Jordoverfladen (Fig. 59), betaler det sig i Reglen ikke at anvende *Poncelet's* Konstruktion eller de af denne udledede Jordtryksformler paa den i § 116 omtalte Maade, nemlig ved Bestemmelse af »Erstatningsvæg«, men man maa hellere gaa den Vej, at man ved at prøve sig frem med forskel- lige Glideplansstillinger finder den Glideplans- stilling, der giver Maksimum af  $E$ . De til de for- skellige Stillinger af Glideplan svarende Værdier af  $E$  findes af Formel (31) eller af en Kraftpoly- gon.

Ved en saadan forsøgsvis Bestemmelse af Jordtrykket faar man en god Oversigt over, hvor- ledes  $E$  varierer med Glideplansvinklen, ved Op- tegning af *Culmann's*  $E$ -Linie. Idet Størrelsen  $G$  skal indbefatte baade Vægten af Glideprismet og den paa dettes Over- flade faldende Del af Jordoverfladens Belastning, vil  $E$ -Linien ikke faa et jævnt Forløb, saaledes som Tilfældet er, naar Jordoverfladens Form er jævn, og Belastningen er ensformig eller omtrent ensformig fordelt, men vil udvise Spring for de Stillinger af Glideplanen, hvor denne skæ- rer Jordoverfladen i Punkter med Spring i Belastningen. Maksimum af  $E$  vil derfor ofte faas netop for Glideplanen gaaende gennem et af de Punkter af Jordoverfladen, hvor der er Spring i Belastningen.

Ved Bestemmelse af Jordtrykkets Fordeling er man, hvis da ikke en skønsommæssig Fordeling kan være fyldestgørende, henvist til at gaa frem efter den ovenfor angivne noget besværlige Metode. Jordtryksdiagrammet vil udvise Spring svarende til Springene i Belastningen paa Jordoverfla- den. Et saadant diskontinuerligt forløbende Jordtryksdiagram giver dog rimeligvis ikke det rigtige Billede af Trykfordelingen paa Væggen. Spring i Belastningen paa Jordoverfladen, en koncentreret Belastning eller en Enkeltkraft vil nemlig ved Overførelsen gennem Jorden til Væggen for- deles over et fra Jordoverfladen nedad og hen mod Væggen voksende Jordvolumen, og Virkningen heraf vil være, at Trykket paa Væggen bliver mere jævnt fordelt, end hvad der svarer til Uensformigheden i Fordelingen af Belastningen paa Jordoverfladen. En eventuel Udjævning af det fundne Jordtryksdiagram maa foretages efter Skøn.

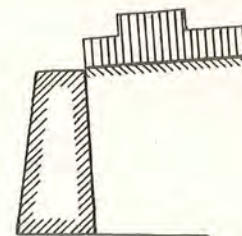


Fig. 58.

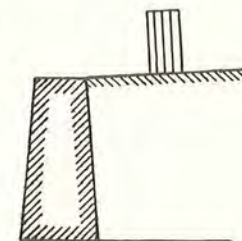


Fig. 59.

118. **Passivt Jordtryk.** Trykkes Væggen  $AB$  (Fig. 60) af en ydre Kraft ind mod Jorden, indtil denne giver efter, saaledes at Jordlegemet  $ABC$  forskydes opad langs en Glideplan  $AC$ , vil Jordlegemet  $ABC$ , naar det er paa Nippet til at glide, udøve et Modtryk  $E$ . I Glideplanen vil der paa Jordlegemet virke en Reaktion  $Q$ , og dennes Komposant i Glideplanens Retning vil være rettet skraat nedad, nemlig mod Jordlegemets Bevægelse.  $Q$  vil have den paa Figuren viste Retning, dannende Vinklen  $\varrho$  med Normalen til Glideplanen, idet der her, ligesom ved aktivt Jordtryk,

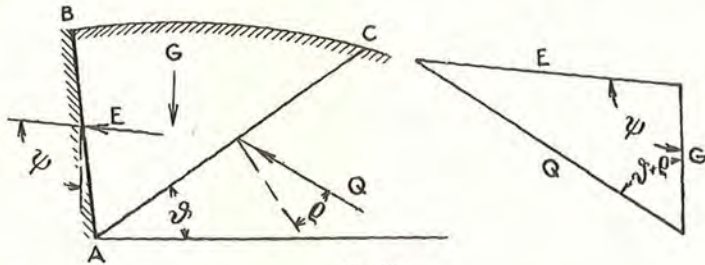


Fig. 60.

enten forudsættes kohæsionsfri Jord eller regnes med, at der kan tages Hensyn til den eventuelle Kohæsions Bidrag til Forskydningsmodstanden ved passende Valg af Værdien for Friktionsvinklen, og idet det ligeledes forudsættes, at der faas tilstrækkelig god Tilnærmelse, naar man i Stedet for Vinklen for den indre Friktion i Jorden sætter Jordens Skræntvinkel  $\varrho$ .

Retningen for Jordtrykket  $E$  maa betragtes som paa Forhaand fastlagt, under Hensyn til Væggens Ruhed, til Retningen for den ydre Kraft, af hvilken Væggen trykkes mod Jorden, eller til Væggens Bevægelsesretning.  $G$  er Vægten af Jordlegemet  $ABC$ . Størrelsen  $E$  af Jordtrykket vil da være bestemt ved den paa Figuren viste Krafttrekant.

Til forskellige Stillinger af Glideplanen  $AC$  svarer forskellige Værdier af  $E$ . Det passive Jordtryk ( $E_p$ ) bestemmes da som den mindste af disse Størrelser  $E$ .

Af Krafttrekanten faas paa lignende Maade som ved aktivt Jordtryk (jfr. (31)):

$$E = G \frac{\sin(\vartheta + \varrho)}{\sin(\vartheta + \varrho + \psi)} \quad (79)$$

119. Har Jordoverfladen uregelmæssig Form, maa Bestemmelsen af det passive Jordtryk, ligesom Tilfældet er ved aktivt Jordtryk, ske ved, at man prøver sig frem med forskellige Stillinger af Glideplan.

Trækkes (Fig. 61) Linien  $AN'$  under Vinklen  $-\varrho$  med Horizontal-linien, og afsættes ud ad denne Linie  $AD_1 = G_1 =$  Vægten af Glidepris- met  $ABC_1$ , svarende til Glideplansvinklen  $\vartheta_1$ , samt trækkes Linien  $D_1I_1$  under Vinklen  $\psi$  med  $AN'$ , hvor  $I_1$  ligger paa  $AC_1$ , faas:

$$\triangle AD_1I_1 \cong \triangle a d_1 i_1,$$

saaledes at

$$\overline{D_1I_1} = E_1.$$

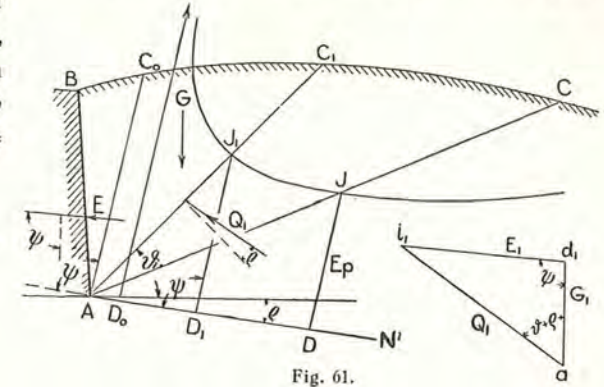


Fig. 61.

Bestemmes paa denne Maade en Række Punkter,  $I_1, I_2, \dots$ , svarende til forskellige Glideplansstillinger  $AC_1, AC_2, \dots$ , faas en Kurve, *Culmann's E-Linie*, hvis Punkters skraa Afstand under Vinklen  $\psi$  til Linien  $AN'$  direkte angiver de til de forskellige Glideplansstillinger svarende Størrelser  $E$ . Ved Hjælp af en saadan Kurve er det let at finde en tilstrækkelig nøjagtig Værdi af det passive Jordtryk  $= E_{\min} = E_p$  og Beliggenheden af den dertil svarende Glideplan  $AIC$ .

Det ses, at for en Glideplan  $AC_0$  under Vinklen  $\psi$  med  $AN'$  faas Jordtryksværdien  $\infty$ . For denne Glideplansstilling havnes:

$$\vartheta_0 = 180^\circ - (\psi + \varrho),$$

og Vinklen mellem  $Q_0$  og Vertikalen:

$$\vartheta_0 + \varrho = 180^\circ - \psi,$$

d. v. s. Retningen for  $Q_0$  og  $E_0$  er sammenfaldende. Betydningen heraf er, at der ikke kan finde Glidning Sted langs  $AC_0$ .

For aftagende Værdier af  $\vartheta$  vokser  $G$  og dermed ogsaa  $E$  mod  $\infty$ .

De mod  $\infty$  gaaende Grene af Kurven har kun formel Betydning.

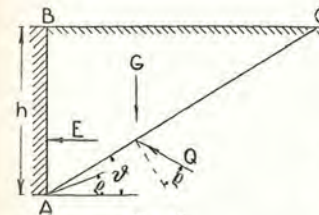


Fig. 62.

120. Paa lignende Maade som ved aktivt Jordtryk kan man i det i Fig. 62 fremstillede simple Tilfælde, hvor Væggen er lodret, Jordoverfladen vandret, og Jordtrykket virker

vandret, let finde et analytisk Udtryk for Størrelsen af det passive Jordtryk.

Idet man her har  $\psi = 90^\circ$  faas af (79):

$$E = G \operatorname{tg}(\vartheta + \varrho),$$

og af Figuren:

$$G = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{ctg} \vartheta,$$

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{ctg} \vartheta \operatorname{tg}(\vartheta + \varrho). \quad (80)$$

Ved  $\frac{dE}{d\vartheta} = 0$  og Udregninger svarende til de i § 108 anførte faas:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) = \frac{1}{2} \gamma h^2 \lambda_p, \quad (81)$$

og den hertil svarende Værdi af Glideplansvinklen:

$$\vartheta = 45^\circ - \frac{\varrho}{2}. \quad (82)$$

(81) kan ogsaa skrives:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{1 + \sin \varrho}{1 - \sin \varrho}. \quad (83)$$

Ud fra samme Betragtninger som de, der gælder for aktivt Jordtryk, faas Trykdiagrammet for passivt Jordtryk (Fig. 63):

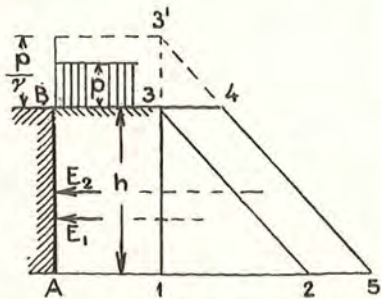


Fig. 63.

For ubelastet Jordoverflade: Trekant 1-2-3, bestemt ved:

$$\overline{1-2} = e_{p(h)} = \gamma h \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right),$$

og for Jordoverfladen belastet med  $p$  (t/m<sup>2</sup>): Trapezet 1-3-4-5, bestemt ved:

$$\overline{3-4} = \overline{2-5} = p \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right),$$

eller ved:

$$\overline{3-3'} = \frac{p}{\gamma} \quad \text{og} \quad 3'-4-5 \parallel 2-3.$$

121. For de Tilfælde, der med Hensyn til Væggens og Jordoverfladens Form er mere komplicerede end det ovenfor behandlede, kan der ligeledes anstilles samme Betragtninger som de, der gælder for aktivt Jordtryk. Blot maa der, saaledes som det fremgaar ved Sammenligning mellem (31) og (79), i Stedet for Skråntvinklen  $\varrho$  indføres den negative Vinkel,  $-\varrho$ .

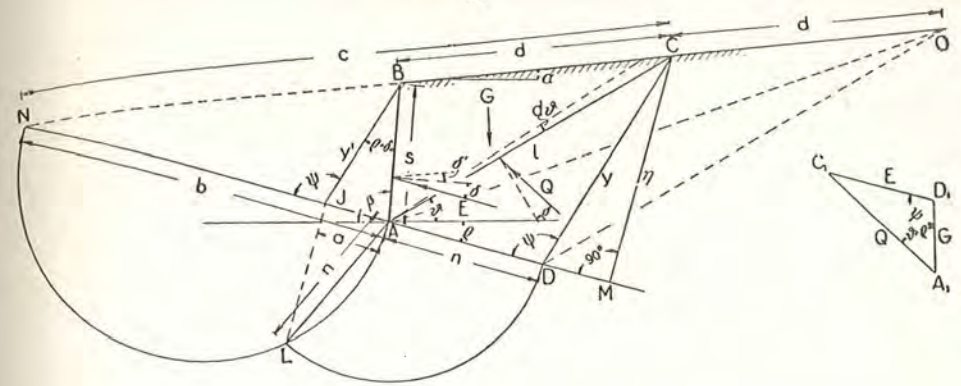


Fig. 64.

For Kortheds Skyld skal her kun behandles det Tilfælde, hvor man har plan Væg og plan Jordoverflade (Fig. 64).

Jordtrykkets Retning forudsættes fastsat, dannende Vinklen  $\delta$  med Normalen til Væggen AB, eller Vinklen  $\psi$  med Vertikalen. Er Væggens Hældning bestemt ved Vinklen  $\beta$ , haves:

$$\psi = \beta + \delta. \quad (84)$$

Med Betegnelser svarende til de tidligere, for aktivt Jordtryk anvendte, haves:

$$E = G \frac{\sin(\vartheta + \varrho)}{\sin(\vartheta + \varrho + \psi)},$$

og den til  $E_p$  hørende Glideplansstilling AC bestemt ved  $\frac{dE}{d\vartheta} = 0$ .

Dette giver:

$$G \sin \psi + \frac{dG}{d\vartheta} \sin(\vartheta + \varrho) \sin(\vartheta + \varrho + \psi) = 0. \quad (85)$$

For en Forøgelse af Glideplansvinklen  $\vartheta$  med  $d\vartheta$  faas:

$$dG = -\frac{1}{2} \gamma l^2 d\vartheta.$$

Skræntvinklen  $\varrho$  afsættes her neden for Horisontallinien, og Linien AN trækkes til Skæring (N) med Forlængelsen af Jordoverfladen. Trækkes endvidere CD under Vinklen  $\psi$  med AN, og CM vinkelret paa AN, faas af Figuren:

$$\sin(\vartheta + \varrho) = \frac{\eta}{l},$$

og

$$\frac{\sin(\vartheta + \varrho + \psi)}{\sin \psi} = \frac{n}{l}.$$

Ved Indsættelse faas:

$$G = \frac{1}{2} \gamma n \eta.$$

Da  $G = \gamma \Delta ABC,$

faas som bestemmende for, at  $AC$  er den til  $E_p$  hørende Glideplan, at:

$$\Delta ABC = \Delta ACD \text{ (Rebhann's Regel),}$$

og for Størrelsen af  $E_p$ , idet  $\Delta ACD$  er ligedannet med Krafttrekanten  $A_1 C_1 D_1$ :

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma y \eta. \quad (86)$$

Trækkes dernæst  $DO \parallel AC$  og  $BI \parallel CD$ , haves:

$$\Delta AOC = \Delta ACD,$$

altsaa  $\Delta AOC = \Delta ABC$ , hvorfra:

$$\overline{BC} = \overline{CO} = d.$$

Endvidere haves:

$$\Delta NCA \sim \Delta NOD, \text{ hvorfra:}$$

$$\frac{c}{d} = \frac{b}{n}, \quad (87)$$

og  $\Delta NBI \sim \Delta NCD$ , hvorfra:

$$\frac{c}{d} = \frac{b+n}{n+a}. \quad (88)$$

Af (87) og (88) faas:

$$n^2 = ab. \quad (89)$$

Det ses heraf, at de Jordtrykket bestemmende Størrelser, nemlig  $y$  og  $\eta$ , samt Beliggenheden af Glideplanen  $AC$  kan findes ved *Poncelet's* Konstruktion paa følgende Maade:

Fra  $B$  trækkes  $BI$  under Vinklen  $\psi$  med  $AN$ , der tegnes en Halvcirkel over  $AN$  som Diameter og trækkes  $IL \perp AN$ .  $\overline{AL}$  ( $= n$ ) afsættes ud ad Forlængelsen af  $NA$  til  $D$  ( $\overline{AD} = \overline{AL}$ ), og der trækkes  $DC \parallel BI$  samt  $CM \perp AN$ .

$AC$  er da Glideplanen,  $\overline{CD} = y$ ,  $\overline{CM} = \eta$  og det passive Jordtryk:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma y \eta.$$

Det ses endvidere, at  $\angle ABI = \varrho + \delta$ . Dette kan ogsaa benyttes til Afsætning af Orienteringslinien  $BI$ . Herved maa det erindres, at Vinklen  $\delta$  skal regnes med Fortegn og saaledes, at  $\angle ABI = \varrho + \delta$ , naar Jordtrykkets Retning er som vist med fuld Linie i Figuren, og  $\angle ABI = \varrho - \delta'$ , naar Retningen er som vist med punkteret Linie. I sidstnævnte Tilfælde bliver (84):

$$\psi = \beta - \delta'. \quad (90)$$

122. Ved Hjælp af Fig. 64 og Relationen (84) kan udledes **analytiske Udtryk** for Størrelsen af det passive Jordtryk.

Lad Jordoverfladens Hældningsvinkel være  $\alpha$  og Væggens Højde, maalt i Væggens Plan, være  $\overline{AB} = s$ . Med de i Fig. 64 i øvrigt anførte Betegnelser haves da:

$$\frac{y}{y'} = \frac{b+n}{b-a}, \text{ eller idet } n^2 = ab:$$

$$y = y' \frac{b + \sqrt{ab}}{b-a} = \frac{y'}{1 - \sqrt{\frac{a}{b}}} \quad \text{og}$$

$$\frac{a}{s} = \frac{\sin(\varrho + \delta)}{\sin \psi}, \quad \frac{b}{s} = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\varrho + \alpha)},$$

$$\frac{a}{b} = \frac{\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho + \alpha)}{\sin \psi \sin(\alpha + \beta)},$$

$$y' = s \frac{\sin(\beta - \varrho)}{\sin \psi}.$$

Endvidere haves:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma y \eta = \frac{1}{2} \gamma y^2 \sin \psi.$$

Ved Indsættelse heri faas:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma s^2 \frac{\sin^2(\beta - \varrho)}{\sin \psi \left( 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho + \alpha)}{\sin \psi \sin(\alpha + \beta)}} \right)^2} \quad (91)$$

123. Med Hensyn til **Jordtryksdiagrammet** for passivt Jordtryk kan der udledes ganske tilsvarende Regler som de, der gælder for aktivt Jordtryk.

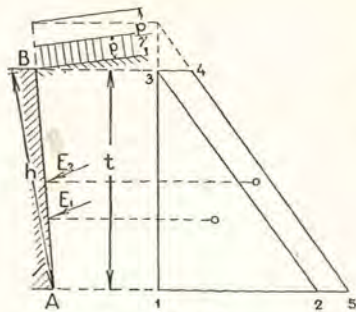


Fig. 65.

som det fremgaar af Fig. 65 (jfr. Fig. 56).

124. Uoverensstemmelse mellem Forudsætningerne ved Coulomb's Jordtryksteori. Imellem de Forudsætninger, der ligger til Grund for Coulomb's Jordtryksteori og det af denne udledede om Jordtrykkets Fordeling, er der, saaledes som det fremgaar af det følgende, en vis Uoverensstemmelse til Stede.

Af den sidste Ligning i (29) faas:

$$Q = E \frac{\sin \psi}{\sin (\vartheta - \varrho)}$$

For Kortheds Skyld vil vi nøjes med at betragte det Tilfælde, hvor der haves plan Jordoverflade og plan Væg, og hvor Jordoverfladen er ubelastet.

For den til det aktive Jordtryk svarende Stilling af Glideplan haves (57):

$$E = \frac{1}{2} \gamma y \eta .$$

og altsaa:

$$Q = \frac{1}{2} \gamma y \eta \frac{\sin \psi}{\sin (\vartheta - \varrho)} .$$

eller, idet (Side 78):

$$\sin \psi = \frac{\eta}{y} \quad \text{og} \quad \sin (\vartheta - \varrho) = \frac{\eta}{l} :$$

$$Q = \frac{1}{2} \gamma l^2 \sin (\vartheta - \varrho) .$$

Som det ses, er  $Q$  proportional med  $l^2$  og maa derfor regnes at være fordelt over Glideplanen  $AC$  paa samme Maade, som Jordtrykket er fordelt over Væggen  $AB$  (Fig. 66). Herefter er Beliggenheden af Angrebepunkterne for alle de tre Kræfter  $E$ ,  $Q$  og  $G$  bestemt, nemlig for  $E$ : Punktet i Afstanden  $\frac{1}{3} s$  fra  $A$ , for  $Q$ : Punktet i Afstanden  $\frac{1}{3} l$  fra  $A$  og

for  $G$ : Tyngdepunktet for Trekanten  $ABC$ . Endvidere er Retningerne for de tre Kræfter fastlagte, nemlig for  $G$ : lodret, for  $Q$ : en Linie, der danner Vinklen  $\varrho$  med Normalen til Glideplanen, og for  $E$ : en Linie under Vinklen  $\delta$  med Vægnormalen.

At de tre Kræfter,  $G$ ,  $Q$  og en Kraft lig og modsat rettet  $E$ , er i Ligevægt, er imidlertid betinget af, at Kræfterne gaar gennem samme Punkt, men denne Betingelse ses efter det foran anførte ikke at være opfyldt i Almindelighed.

I de særlige Tilfælde (Fig. 67), hvor Væggen er lodret, og Jordtrykkets Retning er parallel med Jordoverfladen, ses det, at de nævnte tre

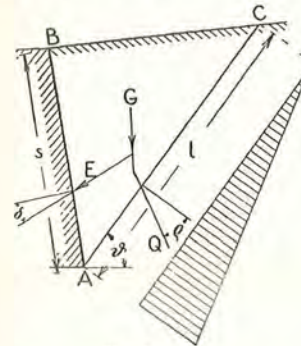


Fig. 66.

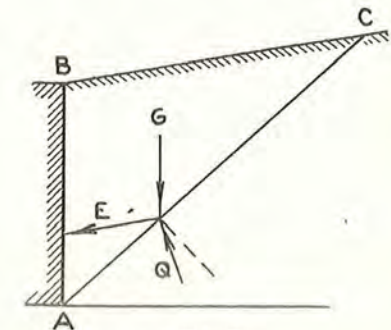


Fig. 67.

Kræfter gaar gennem samme Punkt;  $G$ , lodret gennem Tyngdepunktet for Trekant  $ABC$ , og  $E$ , gaaende gennem Trediedelspunktet af  $AB$ , skærer nemlig da hinanden i Trediedelspunktet af  $AC$ . I disse særlige Tilfælde er de for Coulomb's Jordtryksteori gældende Forudsætninger derfor ikke i Modstrid indbyrdes.

Under alle andre Forhold end de her nævnte specielle Tilfælde er man, hvis saadanne Uoverensstemmelser som de anførte skal undgaas, nødsaget til ved den teoretiske Behandling af Jordtryksproblemerne at gøre Brug af andre Forudsætninger end de for Coulomb's Jordtryksteori gældende. Der kan herved være Tale om enten at gaa bort fra Antagelsen om, at Jordtrykkets Retning er bestemt ved Friktionen mellem Jorden og Væggen (eventuelt i Forbindelse med Væggens Bevægelsesretning<sup>1)</sup>) eller at opgive Forudsætningen om, at Glidefladen er en Plan.

Endelig kan der ogsaa være Tale om at ændre paa det Resultat, som Coulomb's Jordtryksteori fører til med Hensyn til Beliggenheden af Angrebepunkterne for  $E$  og  $Q$ , saaledes at Jordtrykket  $E$  og Reaktionen  $Q$  kommer til at skære hinanden paa Kraftlinien for  $G$ . Man kunde herved f. Eks. indføre den Betingelse, at Jordtrykkets Angrebepunkt

<sup>1)</sup> § 101.



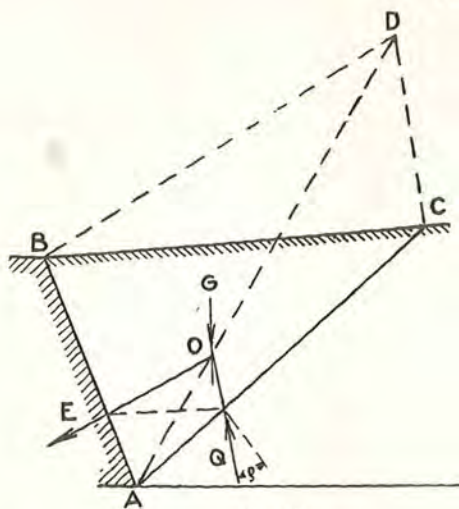


Fig. 68.

paa Væggen  $AB$  (Fig. 68) og Angrebspunktet for Reaktionen i Glideplanen skal ligge i samme Dybde under Jordoverfladen.

Bestemmelsen af Angrebspunkterne kunde da ske saaledes: der trækkes Linien  $BD$  parallel med Jordtrykkets Retning og  $CD$  parallel med Retningen for Reaktionen  $Q$ . Skæringen mellem Linien  $AD$  og Vertikalen gennem Tyngdepunktet for Trekanten  $ABC$  giver da det Punkt  $O$ , gennem hvilket  $E$  og  $Q$  skal gaa.

De Resultater med Hensyn til Størrelse og Virkemaade af Jordtryk, som man kommer til ved i Behandlingen af Jordtryksproblemerne at indføre andre Forudsætninger end de, der gælder for *Coulomb's* Jordtryksteori, afviger sædvanligvis ikke meget fra de Resultater, som Anvendelsen af *Coulomb's* Jordtryksteori fører til. Ved de i Praksis almindeligt forefaldende Opgaver vedrørende Dimensionering af Støttemure og lignende Bygværker benyttes derfor den af *Coulomb's* Jordtryksteori udledede Beregningsmaade uanset de Uoverensstemmelser i Forudsætningerne, der, som ovenfor nævnt, er til Stede.

### Jordspændinger.

125. Som omtalt i § 92 vil der i et Snit i en Jordmasse være visse Spændinger til Stede. Om disse Spændingers Variation med Snitretningen kan der gøres samme Betragtninger gældende som de, der anvendes ved Behandlingen af det tilsvarende Problem for faste Legemers Vedkommende, dog med de Begrænsninger med Hensyn til Ligevægt mellem Jorddelene indbyrdes, der er Følge af Jordmassens særlige Egenskaber, nemlig som et løst Stof med ingen (eller kun ganske ringe) Sammenhæng mellem de enkelte Dele. Disse Egenskaber er i denne Forbindelse karakteriseret ved, at Forskydningsspændingen  $\tau$  i en Snitflade  $ds$  i Jordmassen ikke kan overstige en vis af Normalspændingen  $\sigma_n$  afhængig Værdi, idet Betingelsen for, at der ikke skal ske Bevægelse mellem Jordmassens Dele i det betragtede Snit, er:

$$\tau ds \leq (\sigma_n \mu + c) ds, \tag{92}$$

hvor  $\mu$  er en Friktionskoefficient og  $c$  den fra Kohæsionen hidrørende Forskydningsmodstand.

Ved Friktionsjord, og idet der regnes, at man med tilstrækkelig Tilnærmelse kan sætte Vinklen for den indre Friktion lig med Jordens Skræntvinkel  $\varrho$ , reduceres (92) til:

$$\tau \leq \sigma_n \operatorname{tg} \varrho. \tag{93}$$

126. Spændingsellipsen. Ved (93) er udtrykt, at Vinklen mellem Snitkraften og Snitfladens Normal skal være  $\leq$  Skræntvinklen  $\varrho$ .

Paa Sidefladerne  $dx$ ,  $dy$  og  $ds$  af et Element af Jordmassen (Fig. 69) virker Snitkræfterne  $S_1 = \sigma_1 dx$ ,  $S_2 = \sigma_2 dy$  og  $S_3 = \sigma_3 ds$ . Ligevægtsbetingelsen for Elementet kan, idet  $S_3$  opløses i Komponenterne  $\xi ds$  og  $\eta ds$  efter Retningerne for henholdsvis  $S_1$  og  $S_2$ , skrives:

$$\sigma_1 dx = \xi ds, \quad \sigma_2 dy = \eta ds,$$

eller:

$$\frac{\xi}{\sigma_1} = \frac{dx}{ds} = \cos a, \tag{94}$$

$$\frac{\eta}{\sigma_2} = \frac{dy}{ds} = \sin a,$$

hvoraf:

$$\frac{\xi^2}{\sigma_1^2} + \frac{\eta^2}{\sigma_2^2} = 1. \tag{95}$$

(95) er Ligningen for en Ellipse i et skævvinklet Koordinatsystem med Akseretninger parallelle med  $S_1$  og  $S_2$ , den saakaldte Spændingsellipse.

For forskellige Værdier af  $a$  — Drejning af Fladen  $ds$  — faas de tilhørende  $\sigma_3$ , i Størrelse og Retning, som Resultant af  $\xi$  og  $\eta$ . Spændingsellipsens Hovedakser giver største og mindste Spænding (Hovedspændingerne  $q_1$  og  $q_2$ ) i det paagældende Punkt i Jordmassen.

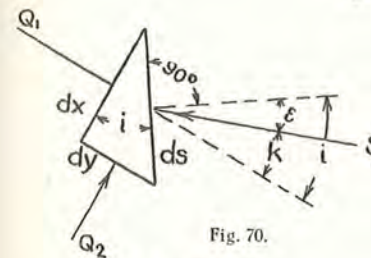


Fig. 70.

Schönweller: Fundering.

127. Jordtryk som Grænseværdier af Jordspænding. Det retvinklede trekantprismatiske Element (Fig. 70) lægges saa-

ledes, at dets Katheteflader  $dx$  og  $dy$  falder sammen med Retningerne for Hovedspændingerne. Vinklen mellem Snitkraften  $S$  og Retningen for den ene Hovedspænding  $Q_1$  er  $k$ , Vinklen mellem  $S$  og Normalen til  $ds$  er  $\varepsilon$  og  $k + \varepsilon = i$ . Idet man har:

$$\begin{aligned} Q_1 &= q_1 dx \\ Q_2 &= q_2 dy, \end{aligned}$$

samt Ligevægtsbetingelsen:

$$S \sin k = Q_2, \quad S \cos k = Q_1,$$

faas:

$$\operatorname{tg} k = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{q_2 dy}{q_1 dx},$$

eller idet  $\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} i$ , og der sættes  $\frac{q_1}{q_2} = n$ :

$$\operatorname{tg} i = n \operatorname{tg} k.$$

Af  $\varepsilon = i - k$  faas derefter:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \operatorname{tg} (i - k) = \frac{\operatorname{tg} i - \operatorname{tg} k}{1 + \operatorname{tg} i \operatorname{tg} k} = \frac{(n-1) \operatorname{tg} k}{1 + n \operatorname{tg}^2 k}. \quad (97)$$

Ved Friktionsjord kan  $\varepsilon$  kun have Værdier  $\leq \varrho$  (jfr. (93)). Idet aktivt og passivt Jordtryk er de Grænseværdier for Jordspændingerne, der svarer til en Spændingstilstand i Jordmassen, hvor Forstyrrelse af Ligevægten mellem Jorddelene er paa Nippet til at indtræde, er det specielt disse Grænseværdier, der har Interesse.

For Grænsetilstanden haves:

$$\operatorname{tg} \varepsilon_{(\text{maks})} = \operatorname{tg} \varrho.$$

Af  $\frac{d\varepsilon}{dk} = 0$  faas:

$$\operatorname{tg} k = \pm \sqrt{\frac{1}{n}}, \quad (98)$$

hvilket giver:

$$\operatorname{tg} \varepsilon_{(\text{maks})} = \operatorname{tg} \varrho = \pm \frac{(n-1) \sqrt{\frac{1}{n}}}{2}. \quad (99)$$

Af (99) kan man for en given Værdi af  $\varrho$  finde Forholdet mellem Hovedspændingerne  $\left(n = \frac{q_1}{q_2}\right)$  svarende til den nævnte Grænsetilstand, hvor Jordspændingen bliver lig med det aktive eller passive Jordtryk.

I Tabel 13 er angivet nogle sammenhørende Værdier af  $\varrho$  og  $n$ :

Tabel 13.

$\varrho = 0$ ca.	$6\frac{1}{2}^\circ$	$11\frac{1}{2}^\circ$	$19\frac{1}{2}^\circ$	$25\frac{1}{3}^\circ$	$30^\circ$	$33\frac{2}{3}^\circ$	$36\frac{3}{4}^\circ$	$41\frac{3}{4}^\circ$	$45\frac{1}{2}^\circ$	$53^\circ$	$54\frac{3}{4}^\circ$
$\operatorname{tg} \varrho = 0$	0,112	0,204	0,353	0,474	0,577	0,67	0,75	0,89	1,02	1,33	1,42
$n = 1$	1,25	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	9	10

128. Bestemmelse af Jordtryk. Kendes den ene af de til Grænsen for Ligevægtstilstand svarende Hovedspændinger, kan man af (99) finde den anden.

Tages det simple Tilfælde, hvor Jordoverfladen er vandret og Jorden begrænses af en lodret fuldstændig glat Væg, og betragtes Berøringsfladen mellem Væggen og Jorden som en Snitflade i Jordmassen, haves, at Trykket mod denne Snitflade (paa Grund af Forudsætningen om Væggens fuldstændige Glathed) er vinkelret paa denne, og derfor den ene Hovedspænding ( $q_2$ ). Den anden Hovedspænding i et Punkt i Dybden  $h$  under Jordoverfladen er i dette Tilfælde kendt, idet den under Forudsætning af, at Jordmassen er homogen, er bestemt ved Vægten af den overliggende Jordmasse:

$$q_1 = \gamma h.$$

Man har da:

$$q_2 = \frac{1}{n} q_1 = \frac{1}{n} \gamma h.$$

Af (99) udledes:

$$n = (\operatorname{tg} \varrho \pm \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varrho})^2, \quad (100)$$

som indsat giver:

$$q_2 = \frac{\gamma h}{(\operatorname{tg} \varrho \pm \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varrho})^2}.$$

Trykket paa hele den lodrette Flade fra Jordoverfladen til Dybden  $h$  bliver da:

$$Q_2 = \frac{1}{2} q_2 h = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{1}{n} = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{1}{(\operatorname{tg} \varrho \pm \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varrho})^2} \quad (101)$$

Dette Tryk er, med Plus-Tegnet foran Kvadratroden, det aktive Jordtryk, med Minus-Tegnet foran Kvadratroden, det passive Jordtryk.

Indføres i (100)  $\operatorname{tg} \varrho$  udtrykt ved  $\operatorname{tg} \frac{\varrho}{2}$ , faas:

$$(\operatorname{tg} \varrho + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varrho})^2 = \frac{\left(1 + \operatorname{tg} \frac{\varrho}{2}\right)^2}{\left(1 - \operatorname{tg} \frac{\varrho}{2}\right)^2} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varrho}{2}\right)}$$

og

$$(\operatorname{tg} \varrho - \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varrho})^2 = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varrho}{2}\right)},$$

hvilket indsat i (101) giver følgende Værdier for  $Q_2$  for henholdsvis Plus-Tegnet og Minus-Tegnet for Kvadratroden:

$$\begin{aligned} Q_2 &= \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varrho}{2}\right) \\ Q_2 &= \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varrho}{2}\right). \end{aligned} \tag{102}$$

Disse Udtryk ses at være de samme som de tidligere fundne Udtryk for henholdsvis aktivt Jordtryk (Formel (37)) og passivt Jordtryk (Formel (81)).

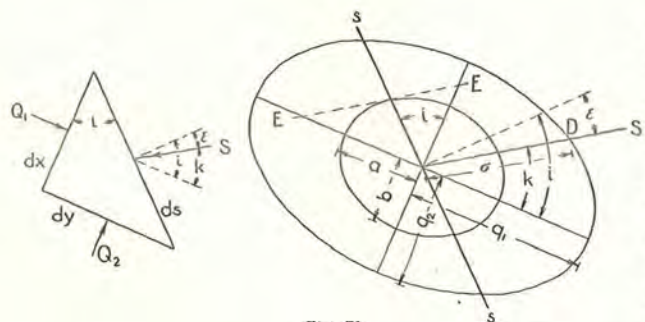


Fig. 71.

129. Kendes en af Spændingsellipsens Halvakser (Hovedspændingerne  $q_1$  og  $q_2$ ) for en given Jordart (given Værdi af  $\varrho$  og dermed kendt Værdi af  $n$ ) og endvidere Hovedaksernes Stilling i Jordmassen, kan

man, f. Eks. ved Optegning af Ellipsen, finde den til enhver Snitretning svarende Spænding.

Man har (Fig. 71):

$$S = \sigma ds = \sqrt{Q_1^2 + Q_2^2}, \quad ds = \sqrt{dx^2 + dy^2},$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{q_1^2 dx^2 + q_2^2 dy^2}{dx^2 + dy^2}} = q_1 \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{n^2} \frac{dy^2}{dx^2}}{1 + \frac{dy^2}{dx^2}}},$$

eller idet:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} i, \quad \text{og (96): } \operatorname{tg} i = n \operatorname{tg} k,$$

$$\sigma = q_1 \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{n^2} \operatorname{tg}^2 i}{1 + \operatorname{tg}^2 i}} = q_1 \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 k}{1 + n^2 \operatorname{tg}^2 k}}. \tag{103}$$

(103) er Spændingsellipsens Ligning i retvinklet Koordinatsystem. Indføres nemlig i (103):

$$\begin{cases} x = \sigma \cos k \\ y = \sigma \sin k \end{cases} \sigma^2 = x^2 + y^2 \quad \text{og} \quad \operatorname{tg} k = \frac{y}{x},$$

faas:

$$\sigma^2 = x^2 + y^2 = q_1^2 \frac{1 + \frac{y^2}{x^2}}{1 + \frac{n^2 y^2}{x^2}},$$

$$\frac{x^2}{q_1^2} + \frac{y^2}{q_2^2} = 1.$$

Tegnes en anden Ellipse, med samme Akser som Spændingsellipsen, men med Længderne af Halvakserne:

$$a = \sqrt{q_1} \quad \text{og} \quad b = \sqrt{q_2},$$

bliver denne Ellipses Ligning:

$$\frac{x^2}{q_1} + \frac{y^2}{q_2} = 1.$$

Sammenhørende Spændingsretninger ( $\sigma$ ) og Snitretninger ( $s$ -s) er konjugerede Diametre i denne Ellipse. Man har nemlig, idet  $n = \frac{q_1}{q_2}$  og  $\operatorname{tg} i = n \operatorname{tg} k$ :

$$\operatorname{tg} k \cdot \operatorname{tg} (90^\circ + i) = -\frac{\operatorname{tg} k}{\operatorname{tg} i} = -\frac{q_2}{q_1}.$$

Den til Snittet  $s$ -s hørende Spændingsretning faas ved Tangenten  $EE$  til Ellipsen med Halvakserne  $\sqrt{q_1}$  og  $\sqrt{q_2}$ . Størrelsen af Spændingen faas af Spændingsellipsen ( $O$  er Ellipsens Midtpunkt):

$$\sigma = \overline{OD},$$

Det er kun i visse specielle Tilfælde, som f. Eks. det i § 128 omhandlede, at man kender Størrelsen af en af Hovedspændingerne. Spændingsellipsen lader sig derfor i Almindelighed ikke anvende direkte til Bestemmelse af aktivt og passivt Jordtryk.

Ved Hjælp af Spændingsellipsen kan man imidlertid danne sig Forestilling om de teoretisk rigtige Glidefladers Form og Beliggenhed og derved danne sig et Skøn over, hvorvidt de Antagelser angaaende disse Glideflader, der indføres ved Jordtryksberegninger, er mere eller mindre rimelige.

130. Glidefladens Retning ved Væggen. Spændingsellipsens Stilling i Forhold til Snitfladen kan bestemmes, naar man kender Vinklen  $\varepsilon$

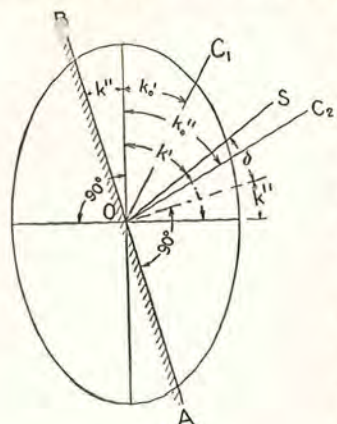


Fig. 72.

mellem Spændingsretningen og Snitfladenormalen. Hvis det betragtede Snit er Anlægsfladen mellem Jordmassen og den Væg, mod hvilken Jorden udøver Tryk, er denne Vinkel  $\varepsilon$  — for den Grænsetilstand, hvor Jordspændingen bliver lig med det aktive (eller det passive) Jordtryk — den samme, som den i § 100 omhandlede Vinkel  $\delta$ .

Lad i Fig. 72  $AB$  være den Væg, mod hvilken Jorden ligger an.  $k'$  er Vinklen mellem Spændingsretningen og Spændingsellipsens ene Hovedakse,  $k''$  Vinklen mellem samme Hovedakse og  $AB$ . Vinklerne  $k'$  og  $k''$  er bestemt ved Ligning (97), ved

at der heri for  $\varepsilon$  indsættes  $\delta$ , i Forbindelse med:

$$k'' + k' + \delta = 90^\circ.$$

Man faar heraf:

$$\operatorname{tg} k' = \frac{n-1}{2n \operatorname{tg} \delta} + \sqrt{\left(\frac{n-1}{2n \operatorname{tg} \delta}\right)^2 - \frac{1}{n}}. \quad (104)$$

$$\operatorname{tg} k'' = \frac{n-1}{2n \operatorname{tg} \delta} - \sqrt{\left(\frac{n-1}{2n \operatorname{tg} \delta}\right)^2 - \frac{1}{n}}. \quad (105)$$

Man kan endvidere finde den Vinkel, der bestemmer Spændingsellipsens Stilling i Forhold til Glidefladen, og herved er man da ogsaa i Stand til at finde Glidefladens Vinkel med Væggen  $AB$ .

Lad den søgte Vinkel mellem Spændingsellipsens Hovedakse og Glidefladen være  $k_0$ . Glidefladen er i Følge det tidligere anførte den Snitflade i Jordmassen, i hvilken Spændingen har den størst mulige Hældning, altsaa den Snitflade, for hvilken Vinklen  $\varepsilon$  mellem Spændingsretningen og Fladenormalen er lig med  $\varrho$ . Til Bestemmelse af Vinklen  $k_0$  haves derfor Ligningerne (97) og (98):

$$(\operatorname{tg} \varepsilon) \operatorname{tg} \varrho = \frac{(n-1) \operatorname{tg} k_0}{1 + n \operatorname{tg}^2 k_0},$$

$$\operatorname{tg} k_0 = \pm \sqrt{\frac{1}{n}},$$

hvoraf faas:

$$\operatorname{tg} \varrho = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 k_0}{2 \operatorname{tg} k_0} = \operatorname{ctg} 2 k_0.$$

$$k_0 = \begin{cases} 45^\circ - \frac{\varrho}{2} = k'_0 \\ 45^\circ + \frac{\varrho}{2} = k''_0 \end{cases}, \quad (106)$$

og svarende hertil de to mulige Stillinger af Glidefladen.

Til hvilken Side af Væggen  $AB$  Spændingsellipsens Akse skal afsættes, og hvilken af de fundne Glideplansretninger der svarer til aktivt Jordtryk, og hvilken til passivt Jordtryk, ses lettest ved direkte Betragtning af de i hvert enkelt Tilfælde mulige Bevægelsesretninger for Væggen og Jorden.

For det i § 128 omhandlede simple Tilfælde: lodret Væg, vandret Jordoverflade og vandret virkende Jordtryk, haves  $\delta = 0$ .

Man faar her:  $k' = 90^\circ$ ,  $k'' = 0$ , altsaa Spændingsellipsens ene Hovedakse sammenfaldende med Væggen. For Vinklerne  $\vartheta'$  og  $\vartheta''$  mellem Horisontallinien og Glideplanerne findes her:

$$\vartheta' = 90^\circ - k'_0 = 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \text{ (aktivt Jordtryk),}$$

$$\vartheta'' = 90^\circ - k''_0 = 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \text{ (passivt Jordtryk),}$$

overensstemmende med det tidligere for dette Særligt Tilfælde fundne: (36) og (82).

131. Glidefladens Retning ved Jordoverfladen. Vi vil dernæst betragte en ubegrænset homogen Jordmasse, om hvilken det forudsættes, at der ikke ved Jordmassens Dannelse er opstaaet uensformig fordelte indre Spændinger mellem Jorddelene. I en Plan parallel med Jordmassens Overflade i en Afstand  $h$  fra denne (Fig. 73) vil der være en lodret Spænding:  $\gamma h$  med Komposanterne  $\gamma h \cos \alpha$  vinkelret paa, og  $\gamma h \sin \alpha$  parallel med Overfladen. Lægges to lodrette Snitflader  $AD$  og  $BC$  ( $\overline{AB} = \overline{DC} = ds$ ), og kaldes de i  $AD$  og  $BC$  virkende Snitkræfter, opløste efter Retning parallel med Jordoverfladen

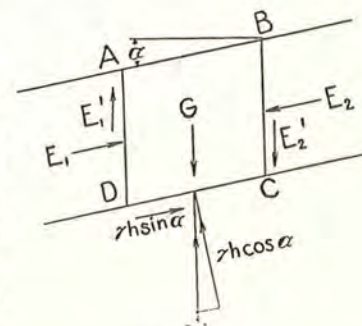


Fig. 73.

og Vertikalen, henholdsvis  $E_1, E_1'$  og  $E_2, E_2'$ , og er  $G$  Vægten af Jordlegemet  $ABCD$ , faas som Ligevægtsbetingelse ved lodret og vandret Projektion:

$$\gamma h ds + E_1 \sin a + E_1' = G + E_2 \sin a + E_2'$$

og

$$E_1 \cos a = E_2 \cos a,$$

hvoraf:

$$E_1 = E_2 \text{ og } E_1' = E_2'.$$

Tages Moment, faas endvidere som Ligevægtsbetingelse for det betragtede Jordlegeme:

$$E_1' = E_2' = 0.$$

Det ses heraf, at i en ubegrænset homogen Jordmasse, der er i Hvile, vil under den anførte Forudsætning Retningen af Jordspændingen i et lodret Snit være parallel med Jordmassens Overflade. Da Spændingen i det med Jordoverfladen parallelle Snit er lodret, er de to Retninger, Jordoverfladens og Vertikalen, konjugerede Retninger.

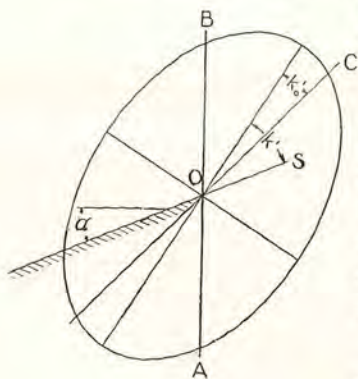


Fig. 74.

Idet Spændingsretningen for en lodret Snitflade tæt ved Jordoverfladen saaledes er en given Retning, nemlig parallel med Jordoverfladen, kan man paa lignende Maade som omtalt i § 130 finde Spændingsellipsens Stilling og dermed Glidefladens Retning for et Punkt i Jordoverfladen.

Lad (Fig. 74) Jordoverfladens Hældningsvinkel være  $a$ . I den lodrette Snitflade  $AB$  danner Spændingen  $S$  da Vinklen  $a$  med Snitfladens Normal. Den for Spændingsellipsens Stilling bestemmende Vinkel  $k'$  faas derfor af Ligning (104), ved at man heri erstatter  $\delta$  med  $a$ :

$$\operatorname{tg} k' = \frac{n-1}{2n \operatorname{tg} a} \pm \sqrt{\left(\frac{n-1}{2n \operatorname{tg} a}\right)^2 - \frac{1}{n}}, \quad (107)$$

hvor  $n$  faas af Ligning (100). Glidefladens Retning  $OC$  er dermed bestemt, nemlig ved dennes Vinkel  $k'_0$  (106) med Spændingsellipsens Akse.

Den saaledes bestemte Glideflade kan vi kalde den *naturlige Glideflade*, og i denne Forbindelse den for et Punkt af en Væg  $AB$  (Fig. 72) bestemte Glideflade: den *tvungne Glideflade*.

Den tvungne Glideflades Retning er, som det ses af (104), afhængig

af Vinklen  $\delta$ , d. v. s. afhængig af Friktionen mellem Jorden og Væggen, og af Væggens Bevægelsesretning, samt endvidere afhængig af Væggens Hældning, medens den naturlige Glideflades Retning alene er bestemt ved Jordoverfladens Hældning. De to Retninger vil, bortset fra visse særlige Tilfælde, ikke være sammenfaldende, og Glidefladen kan derfor i Almindelighed ikke være en Plan.

Saafernt Væggen er lodret og desuden  $\angle \delta = \angle a$ , og i de Tilfælde, hvor, ved hældende Væg, Spændingsellipsens Stilling for et Punkt af Væggen er en saadan, at der for en lodret Snitflade gennem det paa-gældende Punkt af Væggen faas en Spændingsretning, der er parallel med Jordoverfladen, falder Retningen for den tvungne Glideflade sammen med Retningen for den naturlige Glideflade. I disse særlige Tilfælde er der derfor Overensstemmelse mellem Forudsætningen om plan Glideflade (Coulomb's Jordtryksteori) og det ud fra Ligevægtsbetingelserne i en ubegrænset homogen Jordmasse udledede om Glidefladens Beliggenhed, og i disse Tilfælde kommer man ogsaa til samme Resultater ved Beregning af Jordtrykkets Størrelse, hvad enten der ved Beregningen benyttes Coulomb's Jordtryksteori eller (den senere omtalte) Rankine's Teori, eller Bestemmelsen af Jordtrykket sker ved Hjælp af Spændingsellipsen.

**132. Spændingsretning og Glidefladeretning mellem Jordoverfladen og Væggen.** Hvorledes Glidefladen i andre Tilfælde end de i den foregaaende Paragraf nævnte særlige Tilfælde forløber i Jorden fra Væggen til Jordoverfladen, kan man ikke direkte udlede af det foran anførte. Ved Undersøgelser, som det imidlertid vil føre for vidt at komme ind paa her, af Grænse-Ligevægtsbetingelserne for parallelepipediske Jord-elementer med Sideflader parallelle med henholdsvis Væggen og Jordoverfladen findes, saaledes som Krey har vist, at den Kraft, der virker i en Snitflade i Jordmassen, ændres i Størrelse og Retning med Snitfladens Afstand fra Væggen, indtil den i en lodret Snitflade virkende Spænding bliver parallel med Overfladen. Retningsændringerne for Kraften ligesom ogsaa Ændringerne i Glidefladens Hældning er forholdsvis store i Nærheden af Væggen. Kraftretningen og Glidefladens Hældning nærmer sig med voksende Afstand fra Væggen asymptotisk til den for et Punkt i Jordoverfladen gældende Spændingsretning resp. Glidefladehældning.

**133. Matematisk Behandling af Jordtryksproblemet.** Anvisning paa Fremgangsmaade til matematisk Behandling af Jordtryksproblemet er givet af Kötter (1888). Til Anvendelse ved almindelige Jordtryksbestem-

melser egner denne Fremgangsmaade sig ikke, fordi den er alt for omstændelig i Forhold til, hvad der med Hensyn til større Nøjagtighed af Jordtryksbestemmelser kan vindes ved den. For Fuldstændigheds Skyld, og fordi der, ved at man foretager Beregning af Jordtryk blot for enkelte typiske Tilfælde, kan faas et Begreb om, hvor god — eller daarlig — Tilnærmelsen er ved *Coulomb's* Jordtryksberegning, skal Hovedtrækene i den nævnte matematiske Behandling af Jordtryksproblemet anføres her.

Lad (Fig. 75)  $AB$  være Væggen og  $AC$  Glidefladen. I ethvert Element  $ds$  af Glidefladen vil

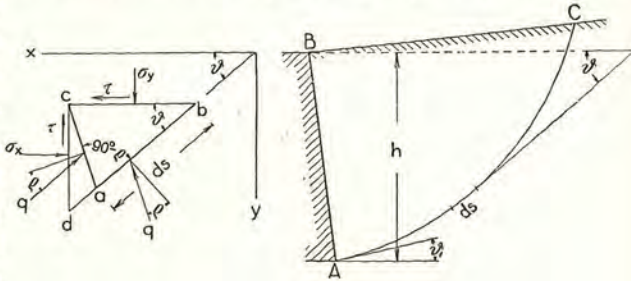


Fig. 75.

Spændingens Retning danne Vinklen  $\varrho$  med Fladenormalen i den til Opstaaen af aktivt (eller passivt) Jordtryk svarende Situation, hvor Glidning er paa Nippet til at indtræde. Idet, som tidligere nævnt, Snitsfladens og Spændingens Retninger er konjugerede, vil der findes to sammenhørende Snit,  $ab$  og  $ac$ , i hvilke den paagældende Spændings Retning danner Vinklen  $\varrho$  med det tilhørende Snits Normal. Vinklen mellem disse to Snit er  $90^\circ - \varrho$ . Spændingerne ( $q$ ) i disse Snit er numerisk lige store. I den vandrette Snitflade  $cb$ , der begrænser Elementet  $abc$ , antages at være en Normalspænding  $\sigma_y$  og en Forskydningsspænding  $\tau$ . Med de i Figuren angivne Betegnelser havs:

$$\overline{ab} = ds, \quad \overline{ac} = ds \frac{\sin \vartheta}{\cos (\vartheta - \varrho)}, \quad \overline{bc} = ds \frac{\cos \varrho}{\cos (\vartheta - \varrho)},$$

og, idet de paa Elementet virkende Snitkræfter  $q \cdot \overline{ac}$ ,  $q \cdot \overline{ab}$ ,  $\tau \cdot \overline{bc}$  og  $\sigma_y \cdot \overline{bc}$  skal være i Ligevægt, faas ved vandret og lodret Projektion:

$$\tau = q \frac{\sin 2 \vartheta - \sin 2 (\vartheta - \varrho)}{2 \cos \varrho} \quad (108)$$

$$\sigma_y = q \frac{\sin^2 \vartheta + \cos^2 (\vartheta - \varrho)}{\cos \varrho} \quad (109)$$

Betragtes paa samme Maade et Element  $acd$ , i hvis lodrette Begrænsningsflade Spændingerne antages at være  $\sigma_x$  og  $\tau$  faas:

$$\sigma_x = q \frac{\cos^2 \vartheta + \sin^2 (\vartheta - \varrho)}{\cos \varrho} \quad (110)$$

Endvidere havs den almindelige Ligevægtsbetingelse:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} = X \quad (111)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial x} = Y, \quad (112)$$

hvor  $X$  og  $Y$  er Komposanterne af de pr. Rumenhed paa Elementet virkende ydre Kræfter, hvilke Ligninger, idet man har:  $X = 0$  og  $Y$  lig Jordens Rumvægt, bliver:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0. \quad (113)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial x} = \gamma. \quad (114)$$

Ved at man finder  $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}$ ,  $\frac{\partial \tau}{\partial x}$  og  $\frac{\partial \tau}{\partial y}$  af (108)-(110) og indsætter i (113) og (114), faas to Ligninger til Bestemmelse af  $\frac{\partial q}{\partial x}$  og  $\frac{\partial q}{\partial y}$ , og ved Indsættelse af disse Størrelser i Ligningen:

$$\frac{dq}{ds} = \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{dx}{ds} + \frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{dy}{ds}, \quad (115)$$

$$\frac{dq}{ds} = \frac{\partial q}{\partial x} \cos \vartheta + \frac{\partial q}{\partial y} \sin \vartheta$$

en Differentialligning i  $q$ ,  $\vartheta$  og  $s$ , der kan omformes til:

$$\frac{dq}{ds} - 2q \operatorname{tg} \varrho \frac{d\vartheta}{ds} = \gamma \sin (\vartheta - \varrho). \quad (116)$$

Af (116) findes:

$$q = e^{2\vartheta \operatorname{tg} \varrho} \left( \gamma \int_0^s e^{-2\vartheta \operatorname{tg} \varrho} \sin (\vartheta - \varrho) ds + C \right). \quad (117)$$

Konstanten  $C$  bestemmes ved den for Jordoverfladen gældende Randbetingelse. Hvis f. Eks. Jordoverfladen er ubelastet, skal man for  $s = 0$  have  $q = 0$ .

<sup>1)</sup> Se: *H. O. C. Olsen: Jordtrykkets rationelle Teori. Ingeniøren* Nr. 33, 1926.

Indsættes dernæst Udtrykket (117) for  $q$  i (109) og (110), haves dermed Størrelsen af Komposanterne  $\sigma_x$  og  $\sigma_y$  af Jordtrykket pr. Arealenhed i et vilkaarligt Punkt af Væggen.

I et særlige Tilfælde, hvor man har lodret Væg, vandret ubelastet Jordoverflade og Jordtrykket virkende efter Vægnormalen ( $\delta = 0$ ), faas følgende:

Hældningsvinklen for Glidefladen ved Væggen (den tvungne Glideflade) er her lige stor med Hældningsvinklen for Glidefladen ved Jordoverfladen (den naturlige Glideflade) og, for aktivt Jordtryk, lig  $45^\circ + \frac{\varrho}{2}$  (jfr. § 130, Slutning). Glidefladen er saaledes her en Plan med  $\vartheta = 45^\circ + \frac{\varrho}{2}$ , og man faar for det nederste Punkt af Væggen, naar dennes Højde er  $h$ :

$$q = \gamma e^{2\vartheta \operatorname{tg} \varrho} \cdot e^{-2\vartheta \operatorname{tg} \varrho} \sin(\vartheta - \varrho) \int_0^s ds = \gamma h \frac{\sin\left(45^\circ - \frac{\varrho}{2}\right)}{\sin\left(45^\circ + \frac{\varrho}{2}\right)}$$

$$\sigma_{x(h)} = q \frac{\cos^2 \vartheta + \sin^2(\vartheta - \varrho)}{\cos \varrho} = \gamma h \frac{\sin\left(45^\circ - \frac{\varrho}{2}\right)}{\sin\left(45^\circ + \frac{\varrho}{2}\right)} \cdot \frac{\cos^2\left(45^\circ + \frac{\varrho}{2}\right) + \sin^2\left(45^\circ - \frac{\varrho}{2}\right)}{\cos \varrho}$$

$$= \gamma h \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varrho}{2}\right),$$

og Jordtrykket paa hele Væggen:

$$E = \frac{1}{2} h \sigma_{x(h)} = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varrho}{2}\right),$$

hvilket Udtryk ses at være det samme som det, der faas ved Anvendelse af *Coulomb's* Jordtryksteori.

I andre end de nævnte særlige Tilfælde er Udførelsen af Jordtryksbestemmelsen betinget af, at man kender Relationen mellem  $\vartheta$  og  $s$ , saaledes at det i (117) indgaaende Integral kan findes, d. v. s. betinget af, at man kender Glidefladen.

At bestemme Glidefladen er imidlertid en ret kompliceret Opgave<sup>1)</sup>. De hidtil fremkomne Løsninger af denne Opgave fører til, at Bestemmelsen maa ske ved, at man prøver sig frem. Man finder først en Række

<sup>1)</sup> Opgaven er behandlet bl. a. af: *F. Kötter*: Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin, 1888, *Müller-Breslau*: Erddruck auf Stützmauern, 1906, *H. O. C. Olsen*, *Ingeniøren*, Nr. 33, 1926, *Carl Jensen*: Metode til Løsning af det teoretiske Jordtryksproblem for plan Jordoverflade og plan Forflade. *Bygningsstatistiske Meddelelser*, 1931.

forskellige Glideflader. De enkelte Punkter af hver af disse kan f. Eks. bestemmes ved successiv Beregning af  $q$  og  $\frac{d\vartheta}{ds}$ , idet man gaar ud fra

Punktet i Jordoverfladen, for hvilket Glidefladens Hældningsvinkel let kan findes (den til Jordoverfladens Hældning svarende naturlige Glideflade). Ved Interpolation mellem de saaledes beregnede Glideflader søges da den, hvis Hældningsvinkel ved Væggen svarer til den givne Vinkel ( $\delta$ ) mellem Jordtrykkets Retning og Vægnormalen. Den søgte Glideflade er den, hvis Hældningsvinkel ved Væggen er lig med Hældningsvinklen for den tvungne Glideflade. Den sidstnævnte Hældningsvinkel kan f. Eks. findes ved den i § 130 angivne Fremgangsmaade.

Af *C. Jensen* er i *Bygningsstatistiske Meddelelser* 1931 meddelt de her i Tabel 14 anførte Resultater af matematisk Jordtryksbestemmelse for de i Fig. 76 a-f og Fig 77 a-f viste typiske Eksempler.

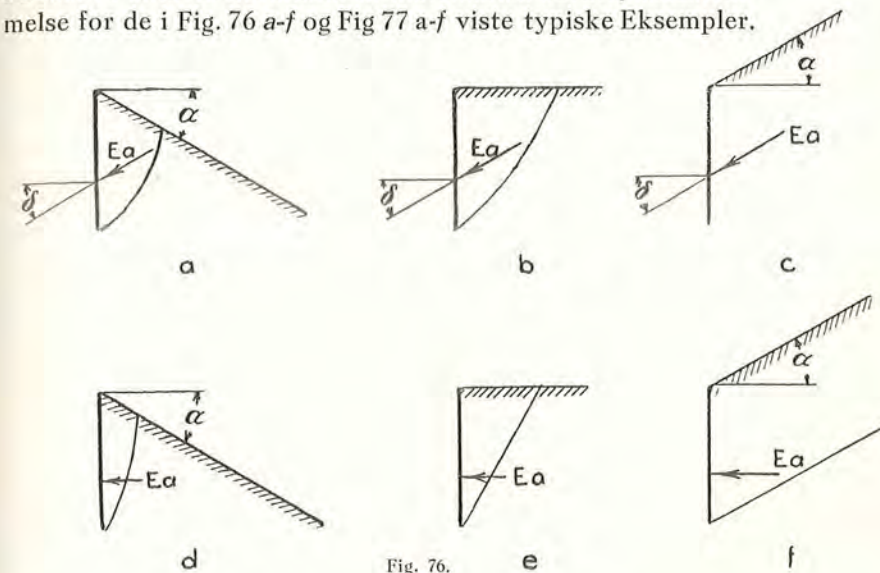


Fig. 76.

Tabel 14 a. Aktivt Jordtryk.

	Jordtrykkets Vinkel med Vægnormalen $\delta$	Jordoverfladens Hældningsvinkel $\alpha$	Vandret Komponent af Jordtryk: $E_v = \frac{1}{2} \gamma \lambda h^2$	
			$\lambda$	$\lambda$ efter <i>Coulomb</i>
Fig 76 a	$30^\circ$	$-30^\circ$	0,2052	0,1875
b	$30^\circ$	0	0,27	0,2574
c	$30^\circ$	$30^\circ$	0,75	0,75
d	0	$-30^\circ$	0,262	0,2574
e	0	0	0,333	0,333
f	0	$30^\circ$	0,884	0,75

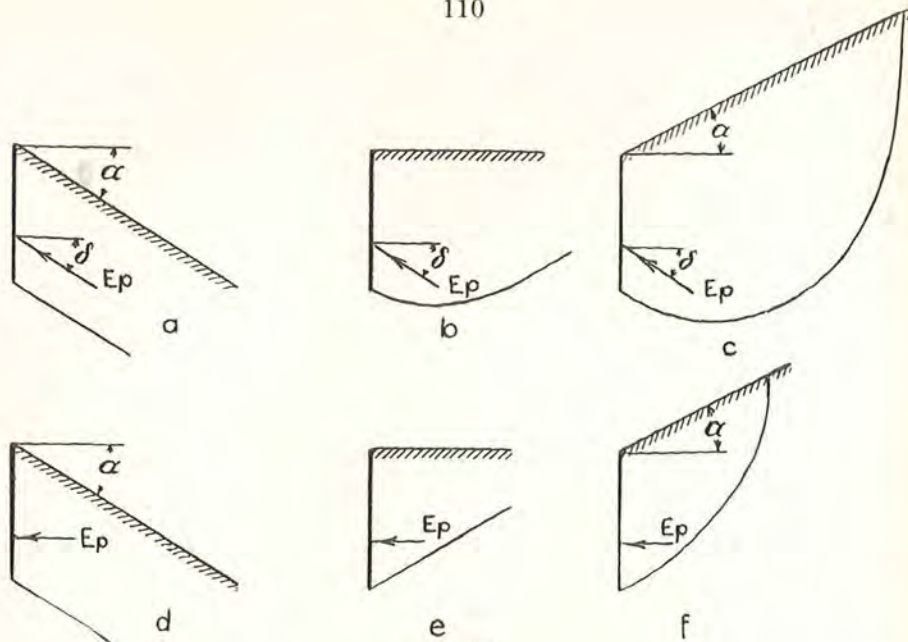


Fig. 77.

Tabel 14 b. Passivt Jordtryk.

	Jordtrykkets Vinkel med Vægnormalen $\delta$	Jordoverfladens Hældningsvinkel $\alpha$	Vandret Komponent af Jordtryk: $E_p = \frac{1}{2} \gamma \lambda h^2$	
			$\lambda$	$\lambda$ efter <i>Coulomb</i>
Fig. 77 a	30°	-30°	0,75	0,75
b	30°	0	5,9	8,843
c	30°	30°	13,0	$\infty$
d	0	-30°	ca. 0,75	0,75
e	0	0	3,0	3,0
f	0	30°	7,8	8,843

I Figurene er Glidefladens Form angivet. Fig. 76 gælder for aktivt Jordtryk, Fig. 77 for passivt Jordtryk. For Jordens Skræntvinkel er regnet med  $\varrho = 30^\circ$ . Til Sammenligning med de teoretisk beregnede Jordtryk er i Tabellen anført de tilsvarende efter *Coulomb's* Jordtryksteori bestemte Jordtryksværdier.

Af de i Tabellen for aktivt Jordtryk anførte Værdier ses, at de efter *Coulomb* bestemte Værdier for Jordtrykket er mindre end de Værdier, som den matematiske Beregningsmaade fører til — bortset fra de særlige Tilfælde (c og e), hvor der er Overensstemmelse — men at Afvigelserne dog ikke er saa store, at der af den Grund er Anledning til at opgive Anvendelsen af den tilnærmende Beregningsmaade efter *Coulomb's* Jordtryksteori. Blot maa det herved have i Erindring, at der ved Anvendelse

sen af den tilnærmende Beregningsmaade begaas en vis Fejl, for hvilken der maa være Dækning i den ved Beregningen til Dimensionsbestemmelse indførte Sikkerhedsfaktor.

Med Hensyn til det passive Jordtryk ses det af de i Tabellen anførte Værdier, at — bortset fra de særlige Tilfælde, hvor der er Overensstemmelse — giver Beregningen efter *Coulomb* for store Værdier, og endvidere, at Afvigelserne mellem de Værdier, der faas ved en Beregning, ved hvilken der tages Hensyn til Glidefladens virkelige Form, og de Værdier, der faas ved Tilnærmelsesberegning efter *Coulomb*, kan blive saa betydelige, at Tilnærmelsesberegningen i de Tilfælde, hvor den giver forholdsvis store Værdier for passivt Jordtryk, maa anses for uanvendelig. De meget store Afvigelser er særlig knyttet til de Tilfælde, hvor Jordoverfladen har Hældning nedad mod Væggen, og det passive Jordtryk virker skraat opad mod Væggen (smlgn. Fig. 77 c).

*Krey* anbefaler kun at anvende de efter *Coulomb* bestemte Værdier for passivt Jordtryk, naar de i Tabellen med  $\lambda$  betegnede Størrelser findes mindre end 5 til 10, og, saafremt de findes større, da i Stedet for *Coulomb's* tilnærmende Beregningsmaade at anvende en anden, ganske vist ligeledes tilnærmende, Beregningsmaade, nemlig den, ved hvilken Glidefladen forudsættes at være en cirkulær Cylinderflade. (Se herom: § 137). Undersøgelse af, om Beregningen efter *Coulomb* giver urimelig store Værdier for passivt Jordtryk, kan lettest ske ved Hjælp af Formel (91). Man ser af denne, at der faas  $E_p = \infty$ , naar

$$1 - \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho + \alpha)}{\sin \psi \sin(\alpha + \beta)}} = 0.$$

For lodret Væg faas heraf, idet man da har:

$$\psi = 90^\circ + \delta, \quad \beta = 90^\circ,$$

$$\sin(\varrho + \delta) \sin(\varrho + \alpha) = \cos \delta \cos \alpha,$$

$$\frac{1}{2} \cos(\delta - \alpha) - \frac{1}{2} \cos(2\varrho + \delta + \alpha) = \frac{1}{2} \cos(\delta - \alpha) + \frac{1}{2} \cos(\delta + \alpha),$$

$$\cos(2\varrho + \delta + \alpha) = -\cos(\delta + \alpha),$$

og heraf:

$$\varrho + \delta = 90^\circ - \alpha$$

som Betingelse for  $E_p = \infty$ .

### Rankine's Jordtryksteori.

134. Ved *Rankine's* Jordtryksteori gøres, ligesom Tilfældet er ved *Coulomb's* Jordtryksteori, den Forudsætning, at Glidefladen er en Plan, men medens man ved Jordtryksberegninger efter *Coulomb* gaar ud fra, at det paa en Væg virkende Jordtryk har en af Friktionen mellem Jord-





Den her fundne Størrelse af Jordtrykket ses let at være den samme som den, der faas efter *Coulomb's* Jordtryksteori. Man har:

$$\begin{aligned} \overline{M_1 F} &= \overline{M_1 P} = r, \\ r &= (r + x) \sin \varrho, \\ h - x &= 2r, \end{aligned}$$

hvoraf:

$$x = h \frac{1 - \sin \varrho}{1 + \sin \varrho} = h \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right), \quad (119)$$

$$E = \frac{1}{2} \gamma h x = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right).$$

Den i det ovenstaaende angivne Jordtryksbestemmelse gælder for aktivt Jordtryk. Ved i Stedet for den i Figuren viste Cirkel med Centrum  $M_1$  at benytte den ydre Cirkel med Centrum  $M_2$  paa samme Maade, som beskrevet, findes det passive Jordtryk.

Er Væggen  $AB$  hældende og Jordoverfladen vandret (Fig. 80), kan Jordtrykkets Størrelse og Retning findes ved følgende Konstruktion. Der afsættes  $\overline{AF} = h$  og tegnes Cirklen som i forrige Tilfælde.  $PK$  er Glideplanens Retning; Glideplanen er  $AC$ , parallel

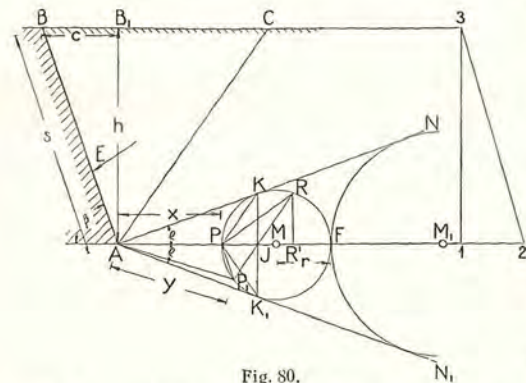


Fig. 80.

med  $PK$ .  $\gamma \cdot \overline{AP} = \gamma x$  er Jordtrykket pr. Arealenhed i Punktet  $A$ , virkende paa den lodrette Snitflade  $AB_1$ .  $PP_1$  trækkes parallel med  $AB$ , og Linien  $P_1I$  giver Punktet  $R$ .  $PR$  er da den til Væggen  $AB$  som Snitflade hørende Spændingsretning, d. v. s. Retningen for Jordtrykket  $E$  paa  $AB$  er parallel med  $PR$ .

Størrelsen af Jordtrykket pr. Arealenhed i Punktet  $A$  er lig:  $\gamma \cdot \overline{AP_1} = \gamma y$ , og hele Jordtrykket paa  $AB$  faas:

$$E = \frac{1}{2} \gamma \cdot \overline{AB} \cdot y = \frac{1}{2} \gamma s y$$

med Trykdiagram 1-2-3, hvor  $\overline{1-2} = \frac{\gamma s y}{h}$ . At den her angivne Beregningsmaade fører til det samme Resultat som det, der faas, ved at man gaar frem som anført i § 134, ses ved følgende Efterregning.

Da  $PP_1 \parallel AB$ , er  $\angle IPP_1 = \beta$ , og  $\angle PFP_1 = 90^\circ - \beta = \angle PRR_1$ .

$$\angle PRR' = 180^\circ - (\beta + \angle PIP_1); \quad \angle IP_1P = 180^\circ - (\beta + \angle PIP_1).$$

$$\frac{\sin \angle IPP_1}{\sin (\beta + \angle PIP_1)} = \frac{\sin \beta}{\sin (\beta + \angle PIP_1)} = \frac{\overline{P_1I}}{\overline{PI}} = \frac{\overline{P_1I}}{r(1 - \sin \varrho)}$$

$$\frac{\sin \angle FP_1I}{\sin \angle IFP_1} = \frac{\cos \angle IP_1P}{\cos \beta} = \frac{-\cos (\beta + \angle PIP_1)}{\cos \beta} = \frac{r(1 + \sin \varrho)}{\overline{P_1I}}.$$

Heraf faas  $\angle PRR'$  mellem Jordtryksretningen og Vertikalen:

$$\operatorname{tg} \angle PRR' = -\operatorname{tg} (\beta + \angle PIP_1) = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} \cdot \frac{1 - \sin \varrho}{1 + \sin \varrho} = \frac{h}{c} \cdot \frac{1 - \sin \varrho}{1 + \sin \varrho}.$$

Foretages Bestemmelsen af  $E$ , saaledes som anført i § 134, ved Samsætning af Jordtrykket  $E'$  i Fladen  $AB_1$  med Vægten af Jordprismet  $ABB_1$ , faas for Vinklen  $\psi$  mellem Jordtrykket og Vertikalen:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\frac{1}{2} \gamma x h}{\frac{1}{2} \gamma c h},$$

eller, med Benyttelse af (119):

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{h}{c} \cdot \frac{1 - \sin \varrho}{1 + \sin \varrho},$$

altsaa:  $\psi = \angle PRR'$ .

Med Hensyn til Jordtrykkets Størrelse haves følgende: Af Fig. 80 faas:

$$\overline{AP_1}^2 = y^2 = x^2 + \overline{PP_1}^2 + 2x \cdot \overline{PP_1} \cos \beta,$$

eller, idet

$$\overline{PP_1} = 2r \cos \beta = \frac{2rc}{s}, \quad s = \sqrt{h^2 + c^2};$$

og

$$x = h - 2r$$

samt

$$E = \frac{1}{2} \gamma s y,$$

$$E = \frac{1}{2} \gamma \sqrt{x^2 s^2 + 4c^2 (r^2 + r x)} = \frac{1}{2} \gamma \sqrt{x^2 h^2 + c^2 (x^2 + 4r^2 + 4rx)}$$

$$E = \frac{1}{2} \gamma h \sqrt{x^2 + c^2},$$

hvilket ses at være det samme Resultat som det, der faas, ved at man sammensætter  $E' = \frac{1}{2} \gamma h x$  (Jordtrykket paa Væggen  $AB_1$ ) med Vægten af Jordprismet  $ABB_1 = \frac{1}{2} \gamma h c$ .

For hældende Væg og hældende Jordoverflade (Fig. 81) sker Bestemmelsen af Jordtrykket ved Hjælp af *Mohr's* Cirkel paa følgende Maade:

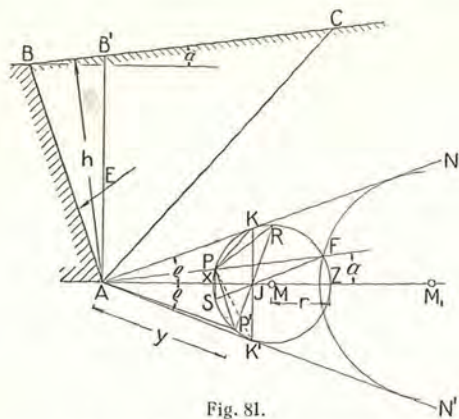


Fig. 81.

Ud ad  $AF$ , der er parallel med Jordoverfladen, afsættes  $\overline{AF} = h$ , hvor  $h$  er Afstanden fra  $A$  til Jordoverfladen, og gennem  $F$  og tangerende  $AN$  og  $A'N'$  tegnes en Cirkel.  $KK'$  bestemmer Involutionenscentret  $I$ .  $PK$  angiver Glideplanens Retning; Glideplanen er da  $AC$ . Man skal nu i Følge Rankine's Teoriens Forudsætning have Jordtrykket paa (Jordspændingen i)  $A'B'$  parallelt med Jordoverfladen. Svarende hertil

gaar, idet  $PS$  er trukket lodret,  $SF$  gennem  $I$ .  $\overline{AP} = x$  angiver Jordtrykket pr. Arealenhed i Punktet  $A$  for den lodrette Snitflade  $AB'$ ; dette Tryk er derfor lig  $\gamma x$ . Retning og Størrelse af Jordtrykket paa Væggen  $AB$  faar man ved at trække  $PP'$  parallel med  $AB$ . Linien  $P'I$  giver Punktet  $R$ .  $PR$  er da Jordtrykkets Retning.

$AP' = y$  angiver Størrelsen af Jordtrykket pr. Arealenhed i Punktet  $A$  for Væggen  $AB$ ; dette Tryk er derfor lig  $\gamma y$ , og hele Jordtrykket  $E$  paa Væggen  $AB$  faas deraf:

$$E = \frac{1}{2}\gamma \cdot \overline{AB} \cdot y = \frac{1}{2}\gamma sy.$$

Det her fundne Jordtryk er det aktive Jordtryk. Ved Bestemmelse af det passive Jordtryk gaar man frem paa tilsvarende Maade, idet man blot i Stedet for Cirklen med Centrum  $M$  benytter Cirklen med Centrum  $M_1$ .

I Stedet for at anvende *Mohr's* Cirkel til direkte Bestemmelse af Jordtrykket paa Væggen  $AB$ , kan man naturligvis ogsaa her benytte den i § 134 angivne Fremgangsmaade, nemlig først finde Jordtrykket  $E'$  paa den lodrette Snitflade  $A'B'$  og derefter sammensætte dette Jordtryk med Vægten af Jordprismet  $AB'B'$ . Bestemmelsen af Jordtrykket  $E'$  paa  $A'B'$  kan enten ske ved Hjælp af *Mohr's* Cirkel, eller man kan anvende *Poncelet's* Konstruktion. Følgende Efterregning viser, at de to Metoder giver samme Resultat.

Af Fig. 81 faas:

$$\overline{AP} + \frac{1}{2}\overline{PF} = \overline{AM} \cos a$$

$$2\overline{AP} + \overline{PF} = \overline{AP} + \overline{AF} = 2\overline{AM} \cos a$$

$$\overline{AP} \cdot \overline{AF} = \overline{AK}^2 = \overline{AM}^2 \cos^2 a$$

$$\overline{AF} = \overline{AM} (\cos a \pm \sqrt{\cos^2 a - \cos^2 \varrho})$$

eller, idet:

$$\overline{AF} = h,$$

$$\overline{AM} = \frac{h}{\cos a \pm \sqrt{\cos^2 a - \cos^2 \varrho}}.$$

Endvidere havs:

$$r = \overline{AM} \sin \varrho$$

$$\overline{AX} = \overline{AM} - r = \overline{AM} (1 - \sin \varrho)$$

$$\overline{AZ} = \overline{AM} + r = \overline{AM} (1 + \sin \varrho),$$

og

$$x = \overline{AP} = \frac{\overline{AX} \cdot \overline{AZ}}{\overline{AF}} = \frac{\overline{AM}^2 (1 - \sin^2 \varrho)}{h} = \frac{h \cos^2 \varrho}{(\cos a \pm \sqrt{\cos^2 a - \cos^2 \varrho})^2}$$

Jordtrykket paa hele Snitfladen  $A'B'$  bliver herefter:

$$E' = \frac{1}{2} \gamma x s',$$

eller, idet  $AB' = s'$ ,

$$h = s' \cos a,$$

$$E' = \frac{1}{2} \gamma (s')^2 \frac{\cos a \cos^2 \varrho}{(\cos a \pm \sqrt{\cos^2 a - \cos^2 \varrho})^2} \quad (120)$$

Plus-Tegnet for Kvadratrodten gælder for aktivt Jordtryk, Minus-Tegnet for passivt Jordtryk.

Det til Bestemmelsen ved *Poncelet's* Konstruktion svarende analytiske Udtryk for Størrelsen af aktivt Jordtryk er det i Formel (64) anførte. (For passivt Jordtryk: Formel (91)). Idet den her betragtede Væg, Snitfladen  $AB'$ , er lodret, og Jordtrykkets Retning, i Følge den for *Rankine's* Teori gældende Forudsætning, har samme Hældningsvinkel,  $a$ , som Jordoverfladen, skal der i de nævnte Formler indsættes:  $\delta = a$ ,  $\psi = 90^\circ - a$  og  $\beta = 90^\circ$ .

Man faar da:

$$E' = \frac{1}{2} \gamma (s')^2 \frac{\cos^2 \varrho}{\cos a \left( 1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\varrho + a) \sin(\varrho - a)}{\cos^2 a}} \right)^2}$$

$$E' = \frac{1}{2} \gamma (s')^2 \frac{\cos a \cos^2 \varrho}{(\cos a \pm \sqrt{\cos^2 a - \cos^2 \varrho})^2},$$

hvilket Udtryk ses at være det samme som (120).

Formel (120) er det almindelige analytiske Udtryk for Størrelsen af Jordtrykket paa en lodret Væg efter *Rankine's* Jordtryksteori.

136. Sammenligning mellem *Coulomb's* og *Rankine's* Jordtryksteorier. Der stiller sig ganske naturligt det Spørgsmaal, hvilken af de to Beregningsmaader, den efter *Coulomb's* Jordtryksteori eller den efter *Rankine's* Jordtryksteori, man bør foretrække.

For dem begge gælder, at de er tilnærmende Beregningsmaader, idet der nemlig baade ved *Coulomb's* Jordtryksteori og ved *Rankine's* Jordtryksteori er benyttet den i Almindelighed urigtige Forudsætning, at Glidefladen er en Plan. Forskellen mellem de to nævnte Jordtryksteorier bestaar i, at man ved *Coulomb's* Jordtryksteori lader Jordtrykkets Retning være bestemt af Friktionen mellem Væggen og Jorden, i Forbindelse med Hensynet til, hvorledes Væggen maa forudsættes at bevæge sig, hvis den giver efter for Jordtrykket, medens Jordtrykkets Retning ved *Rankine's* Jordtryksteori er bestemt af Jordoverfladens Hældning, uden Hensyn til Væggens Beskaffenhed eller til Retningen for dens Bevægelse.

Den for *Rankine's* Jordtryksteori gældende Forudsætning angaaende Jordtrykkets Retning fører i visse Tilfælde til Resultater med Hensyn til Jordtrykkets Retning og Størrelse, som maa forekomme at være i Modstrid med de virkelige Forhold.

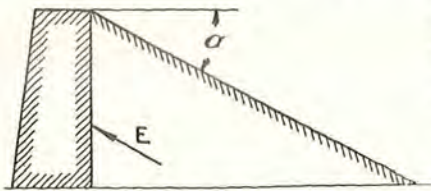


Fig. 82.

Hvis f. Eks. Jordoverfladens Hældning er som vist i Fig. 82 ( $\alpha$  negativ), skal det aktive Jordtryk efter *Rankine's* Jordtryksteori virke skraat opad paa Murens Væg. Hviler Muren imidlertid paa fast Underlag, kan den ikke bevæge sig nedad i Forhold til Jorden, og Jordtrykket kan derfor ikke komme til at virke skraat opefter. Endvidere kommer man efter *Rankine's* Jordtryksteori til det Resultat, at en Mur, ved hvilken Jordoverfladen hælder som vist i Fig. 82, vil være farligere paavirket til Forskydning og til Væltning, end den vilde være, hvis Jordoverfladen var vandret.

Et andet Forhold, som maa tages med i Betragtning ved Spørgsmaalet om, hvilken af de to Beregningsmaader man bør foretrække, er, at man ved at benytte de til *Coulomb's* Jordtryksteori svarende Regler til Bestemmelse af Jordtryk er Herre over at kunne indføre en efter de særlige Forhold ved en foreliggende Beregning af en Støttemur eller et lignende Bygværk afpasset ekstra Sikkerhed netop ved Fastsettelsen af Jordtrykkets Retning — man kan f. Eks. vælge Jordtrykkets Vinkel med Vægnormalen noget mindre end, hvad Murens Ruhed og dens Fundaments Soliditet i og for sig berettiger til —, medens Indførelse af ekstra Sikkerhed paa saadan Maade ikke lader sig forene med Anvendelsen af Jordtryksberegningen efter *Rankine's* Teori.

Paa Grund af det her anførte, i Forbindelse med, at Jordtryksbestemmelse efter *Coulomb's* Jordtryksteori maaske er lidt simplere end efter *Rankine's* Jordtryksteori, er det, som allerede tidligere nævnt, *Coulomb's* Beregningsmaade, der sædvanlig anvendes i Praksis.

### Jordtryksberegning med Anvendelse af krumme Glideflader.

137. Ved at man som Grundlag for Jordtryksberegningerne, i Stedet for Antagelse om plan Glideflade, indfører den Forudsætning, at Glidefladen, eller en Del af den, er en krum Flade af en mer eller mindre simpel Form, kan der i mange Tilfælde opnaas noget bedre Overensstemmelse mellem de paa dette Grundlag bestemte Jordtryk og de Jordtryk, der findes ved Hjælp af en matematisk Behandling af Jordtryksproblemet, end den, der faas, naar man anvender *Coulomb's* Beregningsmaade.

Af Fremgangsmaader til Beregning af Jordtryk med Anvendelse af »Erstatnings-Glideflader« skal nogle omtales her, men ganske kort, idet der angaaende det nærmere om disse Beregningsmaader iøvrigt henvises til den paagældende Special-Litteratur.

*Müller-Breslau* <sup>1)</sup> har undersøgt, hvorledes det stiller sig med Hensyn til Jordtrykkets Størrelse, naar Glidefladen forudsættes dannet af to plane Flader,  $A A_1$  og  $C C_1$ , samt en cylindri- lær Cylinderflade  $A_1 C_1$  (Fig. 83).  $A A_1$  er den af Jordtrykkets Retning bestemte tvungne Glideplansretning,  $C C_1$  den af Jordoverfladens Hældning for en lodret Snitflade gældende (den naturlige) Glideplansretning <sup>2)</sup>. For lodret Væg og vandret Jordoverflade og med  $\varrho = 30^\circ$  og  $\delta = 30^\circ$ , angiver *Müller-Breslau* følgende

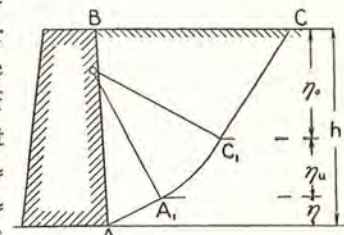


Fig. 83.

Værdier af Jordtrykkets vandrette Komponent  $E_v$ , svarende til de angivne Forhold mellem de plane Dele og den krumme Del af Glidefladen:

$\eta_u =$	0	0,05 h	0,1 h	0,2 h
$\eta_o =$	0,924 h	0,893 h	0,857 h	0,8 h
$\eta =$	0,076 h	0,057 h	0,043 h	0
$E_v = \frac{1}{2}\gamma \lambda h^2$ : $\lambda =$	0,284	0,282	0,276	0,274

<sup>1)</sup> *Müller-Breslau*: Erddruck auf Stützmauern, 1906.

<sup>2)</sup> Jfr. § 131.

Ved Sammenligning med de i Tabel 14 anførte Værdier for  $\lambda$  ses, at der med Erstatnings-Glideflade svarende til det i Fig. 83 angivne faas lidt for store Jordtryksværdier.

J. Schultze<sup>1)</sup> har foreslaaet Anvendelsen af en Erstatnings-Glideflade  $A A_1 C_1 C$  (Fig. 84), hvor  $A A_1$  er den tvungne,  $C_1 C$  den naturlige Glideplansretning og  $A_1 C_1$  er en logaritmisk Spiral, og hvor Punkterne  $A_1$  og  $C_1$  er bestemt ved, at Linierne  $B A_1$  og  $B C_1$  danner Vinklen  $90^\circ - \varrho$  med henholdsvis  $A A_1$  og  $C_1 C$ .

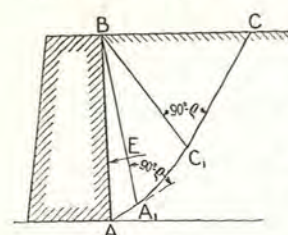


Fig. 84.

H. Pihera<sup>2)</sup> anvender en Erstatnings-Glideflade, der paa hele Strækningen fra Væggens nederste Kant til Jordoverfladen dannes af en Cylinderflade med en logaritmisk Spiral til Ledelinie.

En anden Løsning paa Spørgsmaalet om en passende Erstatnings-Glideflade skyldes F. Kann<sup>3)</sup>. Denne Løsning gaar ud paa (Fig. 85), at der regnes med en Glideflade, bestaaende af to Planer:  $AD$ , den tvungne Glideplansretning, og  $DC$ , den naturlige Glideplansretning, hvor Punktet  $D$  er bestemt som Skæringspunkt mellem  $AD$  og Jordtrykkets Retningslinie gennem det i Højden  $\frac{1}{3}h$  over  $A$  liggende Punkt af Væggen  $AB$ . Bestemmelsen af Jordtrykket sker ved Sammensætning af Vægtene  $G_1$  og  $G_2$  af Jordprismerne  $DD_1C$  og  $ABD_1D$  med Reaktionserne  $Q_1$  og  $Q_2$ , idet det herved erindres, at  $G_1$  og  $Q_1$  tilsammen giver et Jordtryk  $E_1$  i Snitfladen  $DD_1$ , virkende parallelt med Jordoverfladen. Man kan f. Eks. først finde  $E_1$  og dernæst tegne en Kraftpolygon med Siderne  $E_1, G_2, Q_2$  og  $E$ , for hvilke to sidstnævnte man paa Forhaand kender Retningerne.

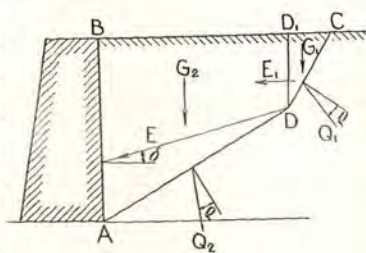


Fig. 85.

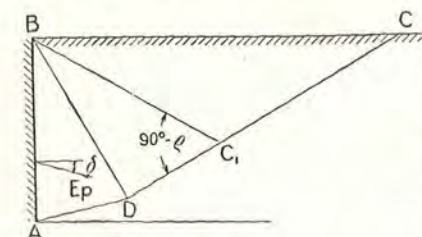


Fig. 86.

A. Streck anbefaler til Bestemmelse af passivt Jordtryk Anvendelsen af en Erstatnings-Glideflade, ligeledes bestaaende af to Planer, parallelle med henholdsvis den tvungne og den naturlige Glideplansretning (Fig. 86). Punktet  $D$  bestemmes her ved Linien  $BD$ , som halverer Vinklen mellem Væggen  $AB$  og en Linie  $BC_1$  under

1) J. Schultze: Gekrümmter Erdgleitflächen. Beton u. Eisen. 1915.  
 2) H. Pihera: Druckverteilung, Erddruck, Erdwiderstand, Tragfähigkeit. 1929.  
 3) F. Kann: Erddruck, Futter- und Stützmauern. 1928.

Vinklen  $90^\circ - \varrho$  med den naturlige Glideplansretning  $DC$ . De passive Jordtryk, beregnede med Anvendelse af en saadan Erstatnings-Glideflade, angives at stemme godt overens med Resultaterne af nogle af Franzius ved den tekniske Højskole i Hannover udførte Forsøg.

Spørgsmaalet om Anvendelse af cirkulærcylindrisk Erstatnings-Glideflade er behandlet af K. E. Petterson<sup>1)</sup> — i Forbindelse med nogle specielle Stabilitetsundersøgelser vedrørende en Kajindfatning — og senere af S. Hultin, W. Fellenius<sup>2)</sup>, H. Krey o. fl. .

Efter W. Fellenius sker Bestemmelsen af Jordtryk med Anvendelse af Forudsætningen om, at Glidefladen dannes af en cirkulær Cylinderflade, simpelthen paa den Maade, at man ved at prøve sig frem opsøger den gennem Væggens nederste Kant  $A$  (Fig. 87) gaaende cirkulærcylindriske Glideflade, der giver den største Værdi for Jordtrykket  $E$  paa Væggen, idet der for denne Glideflade iøvrigt ikke fastsættes nogen Betingelse med Hensyn til dens Stilling i Forhold til Væggen eller i Forhold til Jordoverfladen.

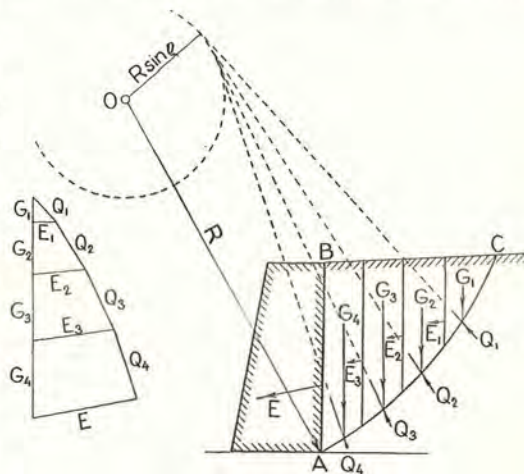


Fig. 87.

Lad  $AC$  være en vilkaarlig valgt cirkulærcylindrisk Glideflade. For at finde det til denne Glideflade svarende Jordtryk  $E$  opdeler man Jordlegemet  $ABC$  ved lodrette Snit i passende smaa Dele:  $1, 2, 3 \dots$  med Vægtene  $G_1, G_2, G_3 \dots$ . I de tilsvarende Dele af Glidefladen virker Reaktionserne  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots$ . For hvert af Elementerne:  $1, 2, 3 \dots$  forudsættes der at være Ligevægt mellem Kræfterne  $G, Q$  og Snitkræfterne  $E$  i de to det paagældende Element begrænsende Snitflader. Kræfterne  $G$  virker i de respektive Elementers Tyngdepunkter. Med Hensyn til Reaktionserne  $Q_1, Q_2 \dots$  forudsættes det, at de gaar gennem Skæringspunkterne mellem Glidefladen og Kraftlinierne for  $G_1, G_2 \dots$ , og at hver af dem virker under Vinklen  $\varrho$  med Normalen til den tilhørende Del af Glidefladen, saaledes at de alle tangerer Cirklen med Centrum  $O$  og Radius  $R \sin \varrho$  ( $R = OA$ ). Her-

1) K. E. Petterson: Kajrasen i Göteborg. Tekn. Tidsskrift. 1916.  
 2) W. Fellenius: Jordstatiska Beräkningar med Friktion och Kohesion för cirkulærcylindriska Glidytor. 1926.

ved begaas der en vis Fejl, men denne er dog ret uvæsentlig, naar Glidefladens Radius er stor.

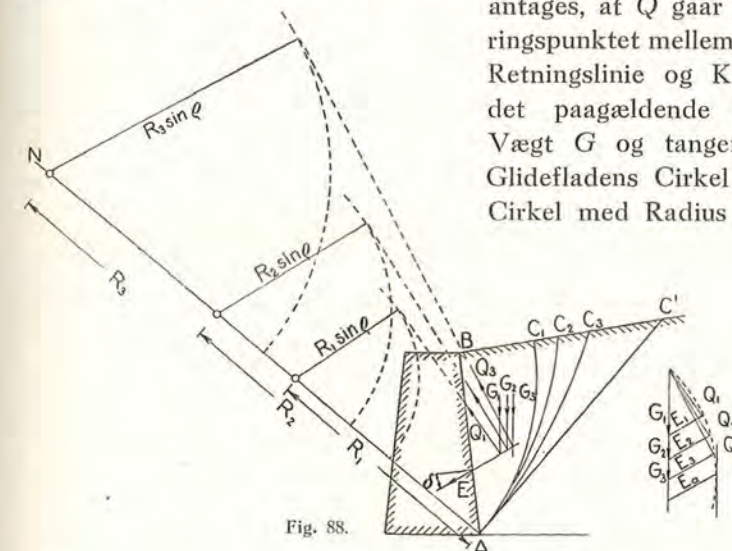
Retningen for det paa Væggen  $AB$  virkende Jordtryk forudsættes at være bestemt paa Forhaand ud fra de for Bestemmelsen af Jordtrykkets Retning sædvanlig gældende Hensyn (Friktion mellem Jorden og Væggen og dennes Bevægelsesretning). Idet Bestemmelse af Jordtrykket for den valgte Glideflade sker ved, at man ved Sammensætning af de paa Elementerne  $1, 2, 3 \dots$  virkende Kræfter efterhaanden finder Snitkræfterne  $E_1, E_2 \dots$  og derved til Slut det paa Væggen virkende Jordtryk  $E$ , ses det, at Opgavens Løsning er betinget af, at Retningen for hver af Snitkræfterne  $E_1, E_2 \dots$  ligeledes er kendt. Hvis man med Hensyn til Retningen for disse Snitkræfter holder sig til den samme Forudsætning som den, der benyttes ved Rankine's Jordtryksteori, nemlig at Retningen for Snitkraften i en lodret Snitflade i Jorden er parallel med Jordoverfladen, fremkommer der imidlertid det særlige Forhold, at der for det nærmest Væggen liggende Elements Vedkommende maa regnes med en pludselig Ændring af Snitkraftretningen, nemlig fra Retningen for Snitkraften i Elementets ene Begrænsningsflade, den lodrette Snitflade i Jordmassen, til Jordtrykkets Retning i Elementets anden Begrænsningsflade, Væggen  $AB$ . For at komme uden om denne Vanskelighed er man da nødsaget til — hvis man ikke vil opgive at lade Jordtrykkets Retning være fastsat ud fra Hensyn til Friktion mellem Jorden og Væggen og til dennes Bevægelsesretning — at vælge Retningerne for Snitkræfterne  $E_1, E_2 \dots$  skønmæssigt; f. Eks. kan man lade  $E_1$  være parallel med Jordoverfladen og fra denne Retning ændre Retningerne for  $E_2, E_3 \dots$  jævnt til den for Jordtrykket  $E$  fastsatte Retning.

Med Antagelser, som ovenfor nævnt, angaaende Kraftretningerne er der derefter ingen Vanskeligheder ved Bestemmelsen af Størrelsen af det til den valgte Glideflade svarende Jordtryk. Den fortsatte Undersøgelse bestaar i, at der foretages tilsvarende Bestemmelse af Jordtrykkets Størrelse for en ny Glideflade gennem  $A$  og saaledes videre, indtil man finder den af Glidefladerne, for hvilken der faas Maksimum af Jordtryk  $E$ .

H. Krey angiver en Fremgangsmaade til Bestemmelse af Jordtryk med Anvendelse af cirkulærcylindrisk Glideflade, der er lettere at gennemføre end den ovenfor omtalte, idet han indfører den Begrænsning med Hensyn til Antallet af mulige Erstatnings-Glideflader, at disse alle, hvor de skærer Væggen, skal tangere den til den fastlagte Jordtryksretning og Jordens Skræntvinkel svarende tvungne Glideflade, d. v. s.

tangere en Linie  $AC'$  (Fig. 88), hvis Vinkel med Jordtrykkets Retning, og dermed med Væggen, er bestemt paa den i § 130 omtalte Maade ved Formel (104) i Forbindelse med (106). Herved indskrænkes den Række af cirkulærcylindriske Glideflader, som der kan være Tale om at prøve, til at omfatte Cirklerne  $AC_1, AC_2, AC_3 \dots$  med Centerer liggende paa Linien  $AN \perp AC'$ . Endvidere er der her benyttet den mere simple Fremgangsmaade til Bestemmelse af den til hver af de forsøgsvis valgte Glideflader svarende Størrelse af Jordtryk, at hele Glidelegemet, f. Eks.  $ABC_1$ , er behandlet under eet. Vanskeligheden med Hensyn til Bestemmelsen af Retningslinie og Beliggenhed af Angrebepunkt for Reaktionen  $Q$  er omgaaet ved, at det som tilnærmende Forudsætning

antages, at  $Q$  gaar gennem Skærringspunktet mellem Jordtrykkets Retningslinie og Kraftlinien for det paagældende Glidelegemes Vægt  $G$  og tangere den med Glidefladens Cirkel koncentriske Cirkel med Radius  $R \sin \varrho$ .



Fremgangsmaaden ved Bestemmelsen af Jordtrykkets Størrelse vil i øvrigt let forstaas af Fig. 88. Jordtrykkets Retning og Angrebepunkt i Væggen forudsættes fastlagt. Med Centerer liggende paa Linien  $AN$  tegnes et passende Antal Cirkler  $AC_1, AC_2, AC_3 \dots$  repræsenterende forskellige mulige Glideflader, og Cirkler med Radier  $R_1 \sin \varrho, R_2 \sin \varrho \dots$  til Bestemmelse af Retningerne for  $Q_1, Q_2 \dots$ . For hver af Glidefladerne beregnes Vægtene  $G_1, G_2 \dots$  af Glidelegemerne  $ABC_1, ABC_2 \dots$  og bestemmes derefter ved Krafttrekanterne  $G_1 Q_1 E_1, G_2 Q_2 E_2 \dots$  de tilhørende Jordtryk  $E_1, E_2 \dots$ . Ved at der gennem Endepunkterne af de saaledes som vist i Figuren afsatte Jordtryk  $E_1, E_2 \dots$  tegnes en Kurve, findes let Maksimumsværdien ( $E_a$ ) for Jordtrykket.

Ved Bestemmelse af passivt Jordtryk skal Retningslinierne for  $Q$  tangere Cirklerne med Radier  $R \sin \varrho$ , saaledes som vist i Fig. 89, nemlig svarende til, at Friktionen i Glidefladen er rettet mod Bevægelsen, og til, at denne sker saaledes, at Glidelegemet bevæges opad langs Glidefladen.

For saa vidt angaar *aktivt Jordtryk* fører en Jordtryksbestemmelse med Anvendelse af cirkulærcylindrisk Glideflade ikke til Resultater, der afviger saa meget fra de Værdier for Jordtrykket, som man kommer til ved at regne med plan Glideflade (*Coulomb*), at der er Anledning til at foretrække den mere besværlige Beregningsmaade med krum

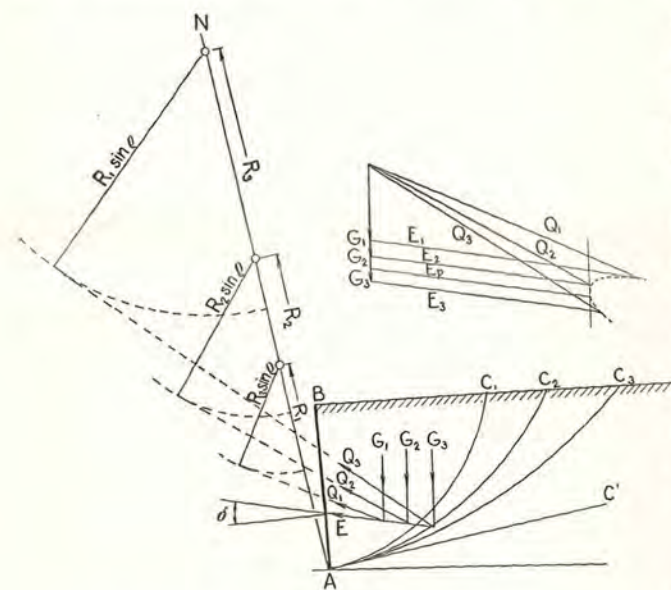


Fig. 89.

Glideflade, selv om denne vel giver noget større Jordtryk end Beregningen med plan Glideflade. Som Eksempel kan anføres, at man for lodret Væg og vandret Jordoverflade og for  $\varrho = 30^\circ$  og  $\delta = 20^\circ$  finder ( $E = \frac{1}{2} \gamma \lambda h^2$ ) med cirkulærcylindrisk Glideflade:

$$\lambda = 0,31,$$

og efter *Coulomb*:

$$\lambda = 0,30.$$

Ved *passivt Jordtryk* stiller Forholdene sig noget anderledes. Forskellen mellem Jordtrykkene for henholdsvis cirkulærcylindrisk Glideflade og plan Glideflade kan her blive meget betydelig. Ved passivt Jordtryk er de til cirkulærcylindrisk Glideflade svarende Størrelser af Jordtrykkene mindre end de Værdier for Jordtrykkene, der findes, hvis der regnes med plan Glideflade. Særlig i de Tilfælde, hvor Jordtrykket er rettet skraat opad, som angivet i Fig. 89, er Forskellen stor.

I Tabel 15 er anført nogle Værdier for passivt Jordtryk gældende for lodret Væg og vandret Jordoverflade.

Antagelig ligger de Værdier for passivt Jordtryk, som faas, ved at der regnes med cirkulærcylindrisk Glideflade, nogenlunde i Nærheden

Tabel 15.

Skræntvinkel $\varrho$	Jordtrykkets Vinkel med Væg- normalen $\delta$	Vandret Komponent af passivt Jordtryk: $E_{p(v)} = \frac{1}{2} \gamma \lambda h^2$	
		med cirkulærcylindrisk Glideflade $\lambda$	med plan Glideflade, efter <i>Coulomb</i> $\lambda$
20°	0	2,0	2,0
20°	20° 1)	3,0	3,3
30°	0	3,0	3,0
30°	20° 1)	4,2	5,3
30°	30° 1)	5,9	8,8
35°	0	3,7	3,7
35°	20° 1)	5,4	6,8
35°	35° 1)	8,4	18,6

1) Jordtrykket virkende skraat opad.

af de Værdier, som man vilde komme til ved at benytte den i § 133 omhandlede nøjagtigere Beregningsmaade. I de Tilfælde, hvor Beregning af det passive Jordtryk efter *Coulomb* fører til forholdsvis store Værdier af  $\lambda$  (f. Eks. større end 5 til 10), maa det anbefales at foretage Omregning med Anvendelse af cirkulærcylindrisk Glideflade og benytte den derved fundne Værdi for det passive Jordtryk.<sup>1)</sup>

### Jordtryksberegning med Hensyntagen til Kohæsionens Indflydelse.

138. I de Jordtryksberegninger, der er omhandlet i det foregaaende, indgaar der af Jordkonstanter, foruden Jordens Rumvægt  $\gamma$ , kun Jordens Skræntvinkel  $\varrho$ . Strengt taget gælder disse Jordtryksberegninger derfor kun for Friktionsjord (uden Kohæsion).

Som tidligere nævnt<sup>2)</sup> bruges det dog ret almindeligt at lade de omhandlede Jordtryksberegninger være gældende ogsaa for kohæsiv Jord, idet man da enten ser helt bort fra Kohæsionens Indflydelse (hvorved man sædvanlig er paa den sikre Side), eller eventuelt tager Hensyn til Kohæsionen ved for Vinklen  $\varrho$  at indføre en noget større Vinkel end Jordfriktionsvinklen. Tillægget til Jordfriktionsvinklen maa sædvanligvis fastsættes skønsmæssigt. Hvis man har Resultater fra Maalinger af Jordprøvers Forskydningsmodstand  $t$  ved forskellige Tryk  $p$

1) Jfr. § 133, Slutning.

2) § 97.

til Raadighed, kan der for  $\varrho$  indføres den ved (28)<sup>1)</sup>:  $\operatorname{tg} \varrho = \frac{\sum t}{p}$ , bestemte Værdi af  $\varrho$ .

Hvis Kohæsionens Indflydelse tages med i Beregningen, saaledes som her nævnt, maa man imidlertid være opmærksom paa, at der derved indføres en Fejl<sup>1)</sup> i Jordtryksbestemmelserne. Modstanden mod Forskydning i Glidefladen er ved de almindelige Jordtryksberegninger forudsat at være en ren Friktionsmodstand, og altsaa for hvert Punkt af Glidefladen forudsat at være proportional med Normaltrykket i denne. Forudsætningen om Proportionalitet er imidlertid kun rigtig, for saa vidt angaar den Del af Forskydningsmodstanden, der hidrører fra Friktionen, men er ikke rigtig for den Dels Vedkommende, der skyldes Kohæsionen. Har man f. Eks. ved Forsøg fundet den til et vist Normaltryk  $p$  — det vil sige, den til en vis Dybde  $h$  under Jordoverfladen — svarende Værdi af  $t$  og i Jordtryksberegningen indført en Vinkel  $\varrho$ , bestemt af  $\operatorname{tg} \varrho = \frac{t}{p}$ , vil der derved begaaes den Fejl, at der for de Dele af Glidefladen, der ligger højere end det til Normaltrykket  $p$  i Glidefladen svarende Punkt, regnes med et for lille Kohæsionsbidrag til Forskydningsmodstanden, men for den dybere liggende Del af Glidefladen regnes med et for stort Kohæsionsbidrag. Med Hensyn til Bedømmelse af Fejlens Størrelse maa det erindres, at den fra Friktion hidrørende Forskydningsmodstand i Glidefladen vokser med 2den Potens af Væghøjden, medens den fra Kohæsion hidrørende Forskydningsmodstand kun vokser med 1ste Potens af Væghøjden.

Den fra det her nævnte Forhold hidrørende Fejl ved Jordtryksberegningerne kan undgaas ved, at man i Stedet for at benytte samme Vinkel  $\varrho$  for hele Væggen indfører forskellige Vinkelstørrelser  $\varrho$  for de enkelte Dele af Væggen efter disses Dybde under Jordoverfladen, eller — hvad der bør foretrækkes — ved at man i Jordtryksberegningerne holder Kohæsionens Bidrag og Friktionens Bidrag til Forskydningsmodstanden i Jordmassen adskilte.

Det er særlig ved forholdsvis stor Væghøjde og ved Jordarter med stor Kohæsion og lille indre Friktion, at de almindelige Jordtryksberegninger, med skønnet Vinkel  $\varrho$  eller med  $\varrho$  bestemt af  $\operatorname{tg} \varrho = \frac{t}{p}$ , ikke giver tilstrækkelig god Tilnærmelse, og at man derfor maa gaa over til Jordtryksberegninger med Adskillelse mellem Kohæsionens og Friktionens Indflydelse paa Jordtrykket.

<sup>1)</sup> § 97.

139. Bestemmelse af Jordtrykket paa en lodret Væg, naar Jordoverfladen er vandret og Jordtrykket ligeledes vandret (Fig. 90), kan ske paa følgende Maade, idet der med Hensyn til Glidefladens Form (plan Glideflade) og Ligevægtsbetingelsen for det mellem Væggen og Glidefladen liggende Jordlegeme benyttes samme tilnærmende Forudsætninger som ved *Coulomb's* Jordtryksteori.

De i Udtrykket  $t = c + p \operatorname{tg} \varphi$ <sup>1)</sup> indgaaende Jordkonstanter:  $\varphi$ , Friktionsvinklen, og  $c$ , den fra Kohæsionen hidrørende Del af Forskydningsmodstanden, forudsættes kendte (f. Eks. fundne ved Forsøg med Jordprøver).

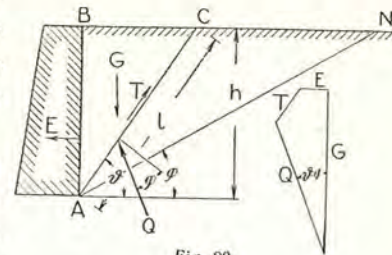


Fig. 90.

AC er en foreløbig vilkaarlig valgt Glideplan. Paa Jordlegemet ABC virker: Jordlegemets Vægt  $G$ , den i Glidefladen optrædende Reaktion, bestaaende af  $Q$ , der virker skraat opefter under Vinklen  $\varphi$  med Glidefladens Normal, og  $T = cl$ , virkende i Glidefladen, samt en Kraft  $E$ , lig og modsat rettet Jordtrykket paa Væggen.

Af Ligevægtsbetingelserne faas:

$$E + T \cos \vartheta = Q \sin (\vartheta - \varphi),$$

$$G = T \sin \vartheta + Q \cos (\vartheta - \varphi),$$

hvoraf:

$$E = G \operatorname{tg} (\vartheta - \varphi) - T (\cos \vartheta + \sin \vartheta \operatorname{tg} (\vartheta - \varphi)),$$

eller, idet

$$G = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{ctg} \vartheta \quad \text{og} \quad T = cl = \frac{c h}{\sin \vartheta}.$$

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{ctg} \vartheta \operatorname{tg} (\vartheta - \varphi) - ch (\operatorname{ctg} \vartheta + \operatorname{tg} (\vartheta - \varphi)). \quad (121)$$

Af  $\frac{dE}{d\vartheta} = 0$  findes den til Maksimum af  $E$  hørende Glideplansvinkel:

$$\vartheta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2},$$

og ved Indsættelse heraf i (121) findes det aktive Jordtryk:

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2 c h \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (122)$$

eller

$$E = \gamma \lambda \frac{h^2}{2} - \gamma \varepsilon h, \quad (123)$$

<sup>1)</sup> § 64.



hvor  $\lambda = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$  og  $\varepsilon = \frac{2c}{\gamma} \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ .

Den her fundne Værdi for Glideplansvinklen ses (jfr. (36)) at være den samme som den, man kommer til, naar Kohæsionen ikke medregnes.

140. Med Hensyn til Jordtrykkets Fordeling over Væggen kan der gøres følgende Betragtning gældende.

Ved Friktionsjord vilde Størrelsen af Jordtrykket være  $\gamma \lambda \frac{h^2}{2}$ , og Diagrammet for dette Jordtryk være Trekanten  $ABC$  (Fig. 91). Kohæsionens Virkning ses af (123) at være, at nævnte Jordtryk formindskes med det ensformigt over hele Højden  $h$  fordelte Tryk  $\gamma \varepsilon h = ABDF$ . Diagrammet for det resulterende Jordtryk bliver derefter  $BDIFC$ . Den øverste Trekant  $BDI$  af dette Diagram svarer imidlertid til et negativt Tryk, d. v. s. til en Trækspænding mellem Jorden og Væggen. Den Sammenhæng mellem Jorddelene indbyrdes og mellem

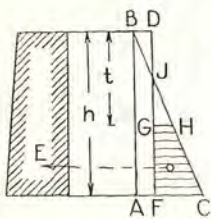


Fig. 91.

Væggen og Jorden, der betinger en saadan Trækspænding mellem Jorden og Muren, vil kun i sjældent forekommende Tilfælde være til Stede, eller det vil i hvert Fald være noget risikabelt at regne med den, hvis den virker til Gunst for det paagældende Bygværks Stabilitet. I Almindelighed maa der derfor ses bort fra, at der kan overføres Trækspænding mellem Jorden og Muren, og regnes med, at der danner sig en Fuge langs den øverste Del af Væggen. Idet det samlede Jordtryks Størrelse er lig Areal  $ABC - \text{Areal } ABDF$ , bliver Jordtryksdiagrammet herefter Trapezet  $FGHC$ , bestemt ved  $\overline{ID} = \overline{IG}$ .

Man har:

$$\overline{BD} = \overline{GH} = \gamma \varepsilon, \quad \overline{FC} = \gamma \lambda h - \gamma \varepsilon.$$

$$\overline{ID} = \overline{IG} = \frac{\varepsilon}{\lambda}$$

$$\overline{FG} = h - t = h - \frac{2\varepsilon}{\lambda}$$

$$\text{Areal } FGHC = E = \gamma \lambda \frac{h^2}{2} - \gamma \varepsilon h.$$

141. I andre Tilfælde end det i § 139 omhandlede, f. Eks. naar man har hældende Væg, hældende Jordoverflade og skraat virkende Jordtryk, kan Bestemmelsen af den til Maksimum af Jordtryk svarende

Glideplansvinkel og det tilhørende Jordtryks Størrelse ske ved, at man prøver sig frem med forskellige Størrelser af Glideplansvinkel. For en vilkaarlig valgt Glideplan (Fig. 92) faas det hertil svarende  $E$ , ved Hjælp af en Kraftpolygon, af Glidelegemets Vægt  $G$  og Kohæsionskraften  $T = cl$ , idet Retningerne for  $Q$  og  $E$  kendes. Ved at man prøver med forskellige Glideplansstillinger findes let med tilstrækkelig Nøjagtighed den Glideplan, der giver Maksimum af  $E$ .

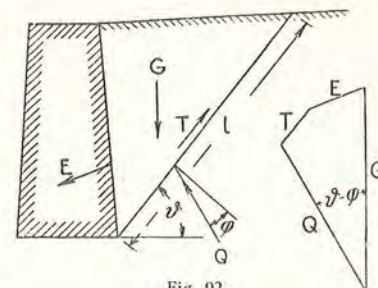


Fig. 92.

Ved Bestemmelsen af Jordtryksdiagrammet kan man gaa frem paa tilsvarende Maade som beskrevet foran.

142. Frit staaende kohæsiv Jord. En kohæsiv Jordmasse kan staa med lodret Begrænsningsflade til en vis Højde uden at være støttet af nogen Væg. Denne Højde kan findes ved i (122) at sætte  $E = 0$ . Heraf faas:

$$\frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c h \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = 0,$$

$$h = \frac{4c}{\gamma \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}. \quad (124)$$

Er f. Eks. <sup>1)</sup>  $\gamma = 1800 \text{ kg/m}^3$ ,  $\varphi = 15^\circ$  og  $c = 1200 \text{ kg/m}^2$ , findes, at saadan Jordart vil kunne staa med lodret Væg uden at udøve Jordtryk til en Højde:  $h = \text{ca. } 3,5 \text{ m}$ .

Omvendt kan man, hvis man erfaringsmæssigt kender  $h$  og ved dertil afpassede Forsøg har fundet Friktionsvinklen  $\varphi$ , af (124) bestemme Kohæsionens Størrelse  $c$ .

Ved Anvendelse af en paa denne Maade bestemt Værdi af Kohæsionen til Beregning af Jordtryk maa man være opmærksom paa, at en under visse ydre Forhold for Jordmassen konstateret Kohæsion i denne kan forsvinde helt eller for største Delen, naar Jordmassen kommer under andre Forhold. Ved Bygning f. Eks. af en Kajmur, hvor Opførelsen sker i tørlagt Byggegrube, kan det, hvis Jordbunden bestaar af Ler, maaske vise sig, at Jorden under en foretagen Udgravning kan staa med lodret Yderflade til forholdsvis stor Højde. Den Kohæsion, som er Aarsagen hertil, kan imidlertid for en væsentlig Del være uægte

<sup>1)</sup> Jfr. Tabel 12, Side 66.

Kohæsion <sup>1)</sup>, hvis Tilstedeværelse skyldes Kapillarkræfterne, idet den kun delvis vandfyldte Jordmasse er omgivet af Luft. Naar Jorden, efter at Kamuren er opført og Vandet atter lukket ind i Byggegruben, dykkes helt i Vand, forsvinder den uægte Kohæsion, og tilbage bliver da kun den, i Reglen langt mindre, ægte Kohæsion.

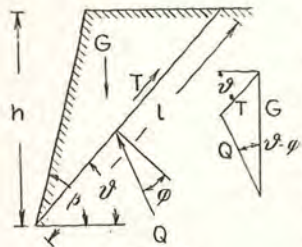


Fig. 93.

I denne Forbindelse maa det ligeledes erindres, at Rystelser i en Jordmasse, f. Eks. hidrørende fra Færdsel, kan bevirke, at Jordmassens Kohæsion formindskes væsentligt <sup>2)</sup>.

Som almindelig Regel gælder, at man ved Jordtryksberegninger bør være varsom med Hensyn til at medregne Kohæsionen, naar denne virker til Gunst for det paagældende Bygværks Stabilitet.

Hvis en Jordmasse staar med Skraaning (Fig. 93), kan Jordhøjden gøres større, end hvis Jorden staar med lodret Flade. Den største Højde, til hvilken Jorden kan staa uden at skride, kan i dette Tilfælde findes saaledes:

Betingelsen for, at Jorden ikke skrider, er, at de tre Kræfter  $G$ ,  $Q$  og  $T$  holder hinanden i Ligevægt:

$$G \sin(\vartheta - \varphi) = T \cos \varphi,$$

hvor

$$G = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\beta - \vartheta)}{\sin \beta \sin \vartheta}, \quad \text{og} \quad T = c l = c \frac{h}{\sin \vartheta}.$$

Man faar heraf:

$$h = \frac{2c}{\gamma} \frac{\cos \varphi \sin \beta}{\sin(\beta - \vartheta) \sin(\vartheta - \varphi)}.$$

Af  $\frac{dh}{d\vartheta} = 0$  faas:

$$\vartheta = \frac{\beta + \varphi}{2},$$

som indsat i Udtrykket for  $h$  giver:

$$h = \frac{2c \cos \varphi \sin \beta}{\gamma \sin^2 \frac{\beta - \varphi}{2}}.$$

For Glidningsvinkler  $\vartheta \geq \frac{\beta + \varphi}{2}$  er den til Forhindring af Skridning fornødne Kohæsionskraft  $T$  mindre end  $c \frac{h}{\sin \vartheta}$ .

<sup>1)</sup> § 36.

<sup>2)</sup> § 79.

143. Jordtryk fra friktionsløs Jord. I særlige Tilfælde kan der være Tale om, at man ved Jordtryksundersøgelser maa se bort fra Friktionen. Jordtrykket bliver da alene afhængigt af Jordmassens Kohæsion. Underkastes en vandmættet Jordmasse et Tryk, og er Vandet hindret i at undvige fra Jordmassen, vil Porevandet deltage i Trykoverførelsen fra det ene Snit i Jordmassen til det andet, og i Snitfladen vil derfor kun optræde en vis Brøkdel af den til Trykoverførelsen svarende Jordfriktion <sup>1)</sup>.

Ved Jordtryksberegninger faar dette Forhold Indflydelse paa den Maade, at man, naar der forudsættes samme Friktionsvinkel for de dybt liggende Dele af Jorden som for de øverste Lag, kommer til at regne med større Forskydningsmodstand i Glidefladen end den, der i Virkeligheden er til Stede, og saaledes ved Jordtryksberegningen finder Jordtryksværdier, der er for smaa.

Under almindelige Forhold vil det overskydende Porevand ganske vist efterhaanden blive presset ud af Jordmassen, men ved meget fin- kornet Jord, som f. Eks. fedt Ler, vil der hengaa meget lang Tid, inden Overskuds Vandet er presset ud og Jordmassen har antaget den til Trykket svarende endelige Konsistens, og indtil da vil Jordtrykket kunne optræde med en Størrelse svarende til, at der ikke eller kun i ringe Grad er Friktion til Stede.

Hvor man har at gøre med stærkt vandholdigt Ler, hvori Friktionen, ogsaa naar Vandindholdet er mindre, kun er forholdsvis ringe, men som er i Besiddelse af relativ stor Kohæsion, kan der ved Jordtryksberegninger blive Anledning til at bestemme Jordtrykkets Størrelse med Anvendelse af den Forudsætning, at der i Glidefladen kun optræder Kohæsionskræfter.

For lodret Væg og vandret Jordoverflade findes Jordtrykket ved Ligevægtsbetingelsen for Glidelegemet  $ABC$  (Fig. 94). Idet  $Q$  her virker efter Normalen til Glideplanen  $AC$ , havas:

$$E = G \operatorname{tg} \vartheta - \frac{T}{\cos \vartheta},$$

$$G = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{ctg} \vartheta \quad \text{og} \quad T = c l = \frac{c h}{\sin \vartheta},$$

som indsat giver:

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 - \frac{c h}{\sin \vartheta \cos \vartheta}.$$

Af  $\frac{dE}{d\vartheta} = 0$  faas:

$$\vartheta = 45^\circ$$

<sup>1)</sup> Jfr. § 64.

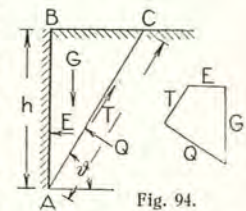


Fig. 94.

og deraf:

$$E = \frac{1}{2} \gamma h^2 - 2 c h. \quad (125)$$

Det ses, at Jordtrykket er lig med Trykket fra en Vædske med Rum vægt  $\gamma$  minus Kohæsionsbidraget  $2 c h$ . Som Diagram for Jord-

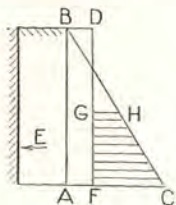


Fig. 95.

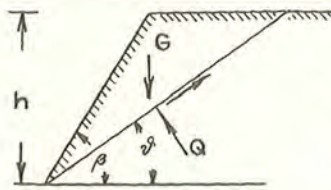


Fig. 96.

trykket findes, ud fra samme Betragtninger som i § 140 anført, Trapezet  $F G H C$  (Fig. 95), hvor  $\overline{AC} = \gamma h$ ,  $\overline{AF} = \overline{GH} = 2 c$  og  $\overline{GD} = \frac{4 c}{\gamma}$ .

I andre Tilfælde end

det her nævnte simple Tilfælde maa Glideplansvinklen og Jordtrykket bestemmes ved, at man prøver sig frem med forskellige Stillinger af Glideplan.

Den Højde, til hvilken Jorden kan staa frit med lodret Flade, findes af (125), idet man for en saadan fritstaaende Jordmasse af Højden  $h$  skal have:  $E = 0$ . Der faas heraf:

$$h = \frac{4 c}{\gamma}.$$

Staar Jorden med Skraaning med Hældningsvinkel  $\beta$  (Fig. 96), udtrykkes Ligevægtsbetingelsen ved:

$$\frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\beta - \vartheta)}{\sin \beta} = \frac{c h}{\sin \vartheta}. \quad (126)$$

Af

$$\frac{d h}{d \vartheta} = 0$$

faas:

$$\vartheta = \frac{\beta}{2},$$

som indsat i (126) giver:

$$h = \frac{4 c}{\gamma} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}.$$

**144. Krumme Glideflader.** I det i det foranstaaende anførte om Jordtryksberegning med Hensyntagen til Kohæsionens Virkning er det forudsat, at Glidefladen er plan. Ligesom ved Jordtryksberegning, hvor der alene regnes med Friktion, kan der ogsaa her være Tale om at foretage Jordtryksundersøgelser for andre Former af Glideflade. Selv med saa forholdsvis enkel Form af Glideflade som en cirkulærcylindrisk er imidlertid Bestemmelsen af aktivt (og passivt) Jordtryk i Reglen besværlig, idet den maa foretages ved, at man prøver sig frem med forskelligt beliggende Glideflader paa lignende Maade som omtalt i § 137. Foruden Kræfterne  $G$ ,  $Q$  og Snitkræfterne i de lodrette Snitflader hav-

her yderligere Kohæsionskræfter  $T$ , virkende tangentielt i Glidefladens Elementer.

Saafernt der af Forskydningskræfter i Glidefladen kun medregnes Kohæsionskræfterne, bliver Opgaven noget simplere. Reaktionen  $Q$  i Glidefladen  $A C$  regnes at gaa gennem dennes Centrum  $O$  (Fig. 97). Er, svarende til det i Fig. 97 viste, Væggen lodret og Jordoverfladen vandret, faas ved Opstilling af Ligevægtsbetingelserne for Glidelegemet  $A B C$ , idet der tages Moment om  $O$ , og af Maksimumsbetingelsen for  $E$ , efter nogle Udregninger <sup>1)</sup>:

$$\operatorname{tg} 2 \vartheta = -3 \operatorname{ctg} a$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{3 \left( \frac{2 a}{180} \pi \cos 2 a - \sin 2 a \right)}{2 \left( \sin^2 a - \frac{a}{180} \pi \sin 2 a \right)}$$

til Bestemmelse af Hældningsvinklen for Korden  $A C$  og til Bestemmelse af Centrets Beliggenhed (ved Vinklen  $A O C = 2 a$ ).

Af ovenstaaende Ligninger faas:

$$\vartheta = \text{ca. } 47^{\circ} 30' \quad \text{og} \quad a = \text{ca. } 15^{\circ}.$$

(Med plan Glideflade havs:  $\vartheta = 45^{\circ}$ ).

For Jordtrykket findes:

$$E = \frac{\gamma h^2}{2} - 2 c h \cdot 0,958,$$

som det ses et Resultat, der ikke afviger nævneværdigt fra den til Forudsætning om plan Glideflade svarende Værdi af Jordtrykket (125).

Undersøgelserne med cirkulærcylindriske Glideflader kan ogsaa finde

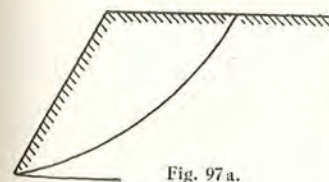


Fig. 97 a.

Anvendelse i de Tilfælde, hvor det drejer sig om at bestemme, til hvor stor Højde en Jordmasse, naar den er i Besiddelse af en vis Kohæsion, kan være fritstaaende med lodret Flade eller, hvad der har større praktisk Betydning, med en eller anden forholdsvis stejl Skraaning (Fig. 97 a). De Højder, som findes,

naar der regnes med cirkulærcylindrisk Glideflade, afviger her en Del fra de Højder, som man kommer til ved Benyttelse af Forudsætningen om plan Glideflade.

<sup>1)</sup> W. Fellenius: Jordstatiska Beräkningar med Friktion och Kohäsion för cirkulærcylindriska Glidytor. 1926.

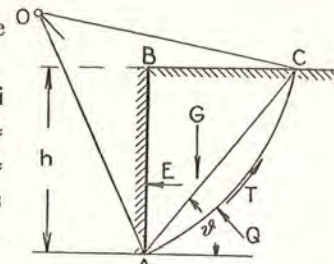


Fig. 97.

### Nogle særlige Tilfælde af Jordtryksberegning.

145. Jordtryk fra lagvis uensartet Jord. Hvis den mod en Væg støttende Jord er uens med Hensyn til Rumvægt og Skræntvinkel i de forskellige Dybder, maa det fra hvert af de forskellige Jordlag hidrørende Jordtryk bestemmes for sig. Jordtryksberegningen frembyder for saa vidt ingen Vanskeligheder, idet man blot behøver at betragte den over et af Jordlagenes Overflade liggende Jord, i Henseende til dennes Indvirkning paa Jordtrykket fra det paagældende Jordlag, som en paa dets Overflade virkende ensformig fordelt Belastning. Et i Praksis hyppigt forekommende Tilfælde af lagvis uensartet Jord er, at Jorden indtil en vis Højde, — f. Eks. Grundvandspejlshøjden — er vandfyldt, og oven

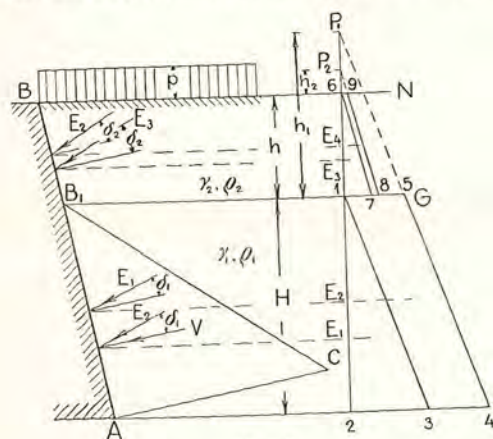


Fig. 98.

over denne er tør. Jordtryksberegningen kan her foretages paa følgende Maade. I Fig. 98 er  $B_1G$  Grundvandspejlet og  $BN$  Jordoverfladen, som her er antaget at være vandret. Paa Jordoverfladen virker en Nyttelast  $p$ . Rumvægt, Skræntvinkel og Jordtrykkets Vinkel med Vægnormalen antages at være henholdsvis  $\gamma_1$ ,  $\varrho_1$ ,  $\delta_1$  for Jorden under Vandlinien  $B_1G$  og  $\gamma_2$ ,  $\varrho_2$ ,  $\delta_2$  for Jorden over Vandlinien. For  $B_1G$  som ubelastet Jordoverflade bestemmes det paa Vægdelene  $AB_1$  faldende Jordtryk  $E_1$  paa sædvanlig Maade (Konstruktion eller Beregning, Formel (64)), og Diagrammet for dette Jordtryk 1-2-3 tegnes (Areal 1-2-3 =  $E_1$ ). Gennem Punktet  $P_1$ , bestemt ved:

$$h_1 = \frac{\gamma_2 h + p}{\gamma_1},$$

trækkes  $P_1-5-4$ .  $E_2 =$  Areal 1-3-4-5 er da den Del af Jordtrykket paa  $AB_1$ , der hidrører fra den over  $B_1G$  liggende Jord og fra Nyttelasten  $p$ . Det ses, at  $h_1$  er bestemt som Højden af det Jordlag med Rumvægt  $\gamma_1$ , der vilde udøve samme lodrette Tryk paa Fladen  $B_1G$ , som det mellem  $B_1G$  og  $BN$  liggende Jordlag og Nyttelasten  $p$  tilsammen udøver paa Fladen  $B_1G$ .

Bestemmelsen af Jordtrykkene  $E_3 =$  Areal 1-6-7 og  $E_4 =$  Areal 6-7-8-9 sker paa tilsvarende Maade. Punktet  $P_2$  faas ved  $h_2 = \frac{p}{\gamma_2}$ .

146. Jordtryk sammen med Vandtryk. I Forbindelse med den i § 145 omhandlede Jordtryksberegning stiller der sig Spørgsmaalet om, paa hvilken Maade der bør regnes med Hensyn til Rumvægt og Opdrift for den Del af Jorden, der ligger under Vandlinien  $B_1G$ . Der kan her være Tale om enten at regne uden Opdrift paa Jorden og i saa Fald ogsaa uden Vandtryk paa Væggen, eller at regne med Opdriftsvirkning paa Jorden og da med et til Vandspejlsstillingen  $B_1G$  svarende Vandtryk paa Væggen. Hvilken Beregningsforudsætning der i givet Tilfælde er den rigtige, kan det være vanskeligt at afgøre. Om der kan komme til at virke Opdrift paa Jorddelene og Vandtryk paa Væggen, vil nemlig afhænge dels af Jordens Beskaffenhed, dels af hvor tæt Jorden ligger an mod Væggen.

Ved en Jordmasse, bestaaende af forholdsvis store Korn, som f. Eks. Grus, er Virkningen af Vedhængningen mellem Vandet og Kornene kun ringe i Henseende til at holde Vandet opsuget i Jordmassen. Vandet kan her frit udøve Tryk mod de Flader, der begrænser Hulrummene i Jordmassen, og der vil derfor i dette Tilfælde ikke være Tvivl om, at der bør regnes med Opdrift paa Jorddelene og med Vandtryk paa Væggen.

Er Jorden derimod meget finporet (Ler), holdes Vandet bundet til Jorddelene af Vedhængningen mellem Vandet og Jorddelene, saaledes at der ikke vil virke Opdrift paa disse og heller ikke Vandtryk paa Væggen. Herved er dog at bemærke, at Udebliven af Vandtryk paa Væggen er betinget af, at Jordmassen slutter saa tæt op til Væggen, at Hulrummene mellem denne og Jordmassen ikke er større end Jordmassens Porer. Under praktiske Forhold tør man imidlertid i Almindelighed ikke forudsætte, at denne Betingelse er opfyldt, fordi tilfældige Omstændigheder her kan bevirke, at Jorden ikke slutter tæt til Væggen. Hvis f. Eks. den Jord, der anbringes bag Væggen, er klumpet, eller hvis der findes Sten i Fyldjorden eller endelig, hvis Væggen som Følge af en eller anden ydre Paavirkning nogle Steder bevæges lidt ud fra Jordmassen, vil der være, eller dannes der let, forholdsvis store Hulrum mellem Væggen og Jorden, og idet disse Hulrum fyldes med Vand, optræder der Vandtryk paa Væggen.

Med Hensyn til Afgørelsen af, om der ved Dimensionering af Støttemure og i lignende Tilfælde bør regnes med den ene eller med den anden af de ovenfor nævnte Forudsætninger, kan følgende Betragtning gøres gældende.

Lad  $AB$  (Fig. 99) være en i Vand frit staaende Flage, der er drejelig omkring  $A$ . Denne Flage vil være i Ligevægt, idet den paavirkes paa hver af de to Sider af lige store Vandtryk  $V$ . Fyldes der Jord op mod

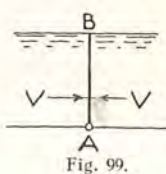


Fig. 99.

Flagen paa dennes højre Side, vil Flagen vælte mod venstre. (Vi ser her bort fra de særlige Forhold, der kan forekomme, hvis Jorden er meget finporet og slutter fuldstændig tæt til Flagen). Beregnes nu det paa Flagen virkende Jordtryk under den Forudsætning, at der paa Flagens højre Side kun haves Jordtryk, og idet der, svarende hertil, ikke regnes med Opdrift paa Jorden, faas imidlertid — naar der ses bort fra de Tilfælde, hvor Jordens Skræntvinkel er særlig lille — at Jordtrykket er mindre end Vandtrykket  $V$ . Virkningen af, at der anbringes Jord op mod Flagen, skulde altsaa herefter være, at Flagen af Vandtrykket paa den modsatte Side blev trykket ind mod Jorden, medens Erfaringen viser, at Flagen giver efter for Trykket paa Jordsiden (vælder), d. v. s. at Trykket paa Jordsiden i Virkeligheden er større end Trykket paa Vandsiden af Flagen<sup>1)</sup>. Regnes derimod for Kræfterne fra højre Side med baade Vandtryk  $V$  og Jordtryk, for dette sidstes Vedkommende da med Hensyntagen til Opdrift paa Jordmassen, giver Beregningen, idet Vandtrykkene paa Flagens to Sider ophæver hinandens Virkning, et Væltningmoment til venstre, overensstemmende med, at Flagen i Virkeligheden vælter til denne Side.

Saafernt Jordens Skræntvinkel er lille, giver en Beregning, ved hvilken der forudsættes, at der paa Flagens højre Side kun er Jordtryk (dette bestemt uden Hensyntagen til Opdrift), større Tryk paa Flagens højre Side (Jordsiden) end paa dens venstre Side (Vandsiden), i dette Tilfælde altsaa et Resultat, der ikke er i Modstrid med de virkelige Forhold med Hensyn til Retningen for Væltningmomentet.

Imidlertid faas i *alle* Tilfælde, uanset Skræntvinklens Størrelse, større Væltningmoment mod Vandsiden, naar der regnes med Jordtryk (dette bestemt med Hensyntagen til Opdrift) samt Vandtryk paa Flagens Jordside, end hvis der regnes alene med Jordtryk (uden Opdrift) og intet Vandtryk paa Jordsiden. Dette vil ses af følgende:

<sup>1)</sup> At en Flage som den nævnte ikke giver efter for Jordtrykket, naar der ligger vandfyldt Jord paa dens ene Side, og der paa den anden Side kun haves Vandtryk, er dog ogsaa muligt, nemlig i Tilfælde af, at Jorden er meget finporet og overalt slutter saa tæt op til Flagen, at der ikke kan trænge Vand ind mellem denne og Jordmassen, ud over det Vand, der er bundet til Jorddelene. Eksempler paa, at saadanne Forhold kan optræde, forekommer ogsaa, omend undtagelsesvis, i Praksis. At gamle Bolværksvægge, hvis Forankring er tørret bort i Tidens Løb, bliver staaende i forholdsvis lang Tid uden Forankring, kan antagelig i mange Tilfælde finde sin Forklaring i, at der paa den ene Side af Væggen alene haves Jordtryk, og at dette er mindre end det paa Væggens ydre Side virkende Vandtryk.

For den i Fig. 99 viste Flage er Jordtrykket  $E_1$ , naar der ikke regnes med Opdrift paa Jorden, bestemt ved:

$$E_1 = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right).$$

Regnes der med Vandtryk paa Flagens Jordside samt med Jordtryk, for dette sidstes Vedkommende med Hensyntagen til Opdrift paa Jorden, faas Summen af Vandtryk og Jordtryk:

$$S = \frac{1}{2} h^2 + \frac{1}{2} (\gamma - 1) h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\rho}{2} \right).$$

Det ses heraf, at  $S > E_1$  for alle Værdier af  $\rho > 0$ .

Hvis Jorden indeholder saa stort Overskud af Vand, at den har Konsistens som Vælling (Dynd), er Trykvirkningen paa Flagen den samme som en Vædskes ( $\rho = 0$ ). I dette Tilfælde kan Jordmassen og det i denne indeholdte Vand ikke udøve Tryk hver for sig. For dette Grænsetilfælde faas imidlertid  $S = E_1$ , og det er derfor her beregningsmæssigt set ligegyldigt, om der gøres den ene eller den anden af de nævnte Forudsætninger med Hensyn til Vandtryk og Opdrift paa Jordmassen.

Af det i det foranstaaende anførte vil det forstaaes, at man ved Dimensionering af Støttemure og lignende Bygværker bør regne med fuldt Vandtryk paa den Del af Væggen, der ligger under Grundvandspejlet  $B_1 G$  (Fig. 98), og da for Jordtrykkets Vedkommende regne med Opdrift paa Jorden, idet Beregningsforudsætningerne, ved at man regner paa denne Maade, da i mange Tilfælde (forholdsvis storkornet Jord) er praktisk taget helt i Overensstemmelse med de virkelige Forhold, og i alle Tilfælde saadanne, at man ved Beregningen af de til Ugunst for Støttemurens Stabilitet virkende Kræfter er paa den sikre Side.

Ved den i § 145 omhandlede Jordtryksbestemmelse skal der i Overensstemmelse med det her anførte sættes<sup>1)</sup>:

$$\gamma_2 = \gamma_e \quad \text{og} \quad \gamma_1 = \gamma'_e - I,$$

idet der da til de paa Væggen (Fig. 98) virkende Jordtryk skal føjes et Vandtryk:

$$V = \frac{1}{2} H \cdot \overline{AB_1}$$

med Trykdiagram  $AB_1 C$ .

<sup>1)</sup> § 18.

147. Jordtryk paa Vinkelstøttemure. Ved Stabilitetsundersøgelser og Dimensionering af Støttemure o. lign. Bygværker af sædvanlig Form kan Jordtryksberegningerne uden særlige Vanskeligheder ske efter de Regler, der fremgaar af det i det foregaaende om Jordtryk i Almindelighed anførte.

Drejer det sig om en Støttemur af det i Fig. 101 viste Profil (en saakaldt Vinkelstøttemur), møder der visse Vanskeligheder med Hensyn til Spørgsmaalet om, paa hvilken Maade Jordtrykket skal regnes at virke paa Murens Flader, og hvorledes Virkningen af den over Støttemurens Fodplade liggende Jords Vægt skal føres i Regning.

Ved Behandlingen af den Opgave, at bestemme Jordtrykkene paa en saadan Vinkelstøttemur, vil vi først benytte Rankine's Jordtryksteori, hvorved der altsaa gøres den Forudsætning, at kun Jordoverfladens

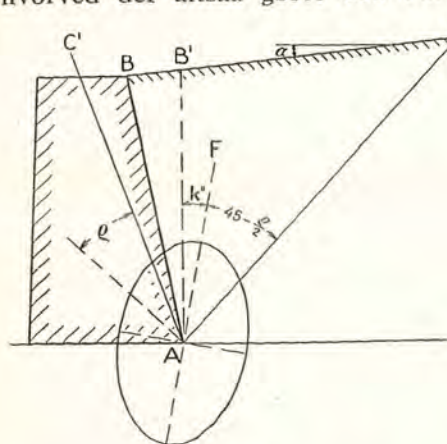


Fig. 100.

Hældning (i Forbindelse med Jordens Skræntvinkel) er bestemmende for Jordtrykkets Retning. Ved en almindelig Støttemur med plan Væg som vist i Fig. 100 vil under den for Rankine's Jordtryksteori gældende Forudsætning den almindelige Glideplan være bestemt ved, at Spændingsretningen for en lodret Snitflade ( $A B'$ ) i Jorden er parallel med Jordoverfladen.

Glideplanens Stilling kan findes ved, at man af (105)<sup>1)</sup> bestemmer Vinklen  $k''$ , idet der for Vinklen  $\delta$  mellem Spændingsretning og Fladenormal her indsættes Jordoverfladens Hældningsvinkel  $\alpha$ . Vinklen  $k''$  giver Retningen for Spændingsellipsens ene Hovedakse  $A F$ , og ved ud fra denne at afsætte  $\angle F A C = k'_0 = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$  faar man

Glideplanen  $A C$ . En anden Maade at bestemme Glideplansstillingen er den i § 135 beskrevne, ved Hjælp af Mohr's Cirkel; ved Linien  $P K$  i Fig. 80 (og Fig. 81) faas Glideplanens Retning. Det vil erindres, at Glideplanen er den Plan, for hvilken den til Planen hørende Spændingsretning danner Vinklen  $\rho$  med Planens Normal, og at Planens Retning og den tilhørende Spændingsretning ( $A C'$ ) er indbyrdes konjugerede. Da

$\angle C A F = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$ , er  $A C'$  symmetrisk med  $A C$  med Hensyn til

<sup>1)</sup> § 130.

Ellipsens Akse  $A F$ , og  $\angle C A C' = 90^\circ - \rho$ . Da  $A C$  og  $A C'$  er konjugerede, kan de ombyttes. Om Planen  $A C'$  gælder derfor, at den, hvis den laa inden for Jordlegemets Omraade, vilde opfylde samme Betingelse, som gælder for Planen  $A C$ , nemlig, at den til Planen hørende Spændingsretning danner Vinklen  $\rho$  med Planens Normal. Spændingstilstanden i Snitfladen  $A C'$  vilde derfor, hvis denne Snitflade laa i Jordmassen, være en Grænseligevægtstilstand, ligesom Spændingstilstanden i Snitfladen  $A C$  er det. Som Glideplan kan Planen  $A C'$  imidlertid i det her omhandlede Tilfælde lades ude af Betragtning, fordi den skærer ind i Murlegemet og saaledes ligger uden for Jordmassen. Ved indtrædende Bevægelse i Jorden (Optræden af Jordtryk) vil Bevægelsen være bundet til at ske dels langs Glideplanen  $A C$ , fordi Spændingstilstanden her netop er paa Grænsen af Ligevægt, dels langs Murens Bagvæg  $A B$ , fordi denne danner Begrænsningen for Jordmassen. Langs nogen Plan liggende mellem  $A B$  og  $A C$  kan der ikke foregaa Forskydning, idet Spændingsretningen for enhver af Planerne mellem  $A B$  og  $A C$  danner en Vinkel  $< \rho$  med den tilhørende Normal.

Ligesom Glideplanen  $A C$  kan ogsaa Planen  $A C'$  bestemmes ved Hjælp af Mohr's Cirkel, i Stedet for

ved Hjælp af Spændingsellipsens Hovedakse. I Fig. 81 faas Retningen for den nævnte Plan  $A C'$ , ved at man trækker Linien  $P K'$ .

Ved den i Fig. 101 viste Vinkelstøttemur kan der ligeledes indlægges de to Glideplaner  $A C$  og  $A C'$  ( $\angle C A C' = 90^\circ - \rho$ ), men i Modsetning til, hvad Tilfældet er ved den omtalte Støttemur, falder her ogsaa Planen  $A C'$  inden for Jordlegemet. Betydningen heraf er, at ved Indtræden af Bevægelse af Vinkelstøttemuren vil der ske Glidning dels langs Glideplanen  $A C$  paa sædvanlig Maade, dels ske Bevægelse langs Planen  $A C'$ , medens der ingen Bevægelse finder Sted langs Anlægsfladerne mellem Murlegemet og det mellem dette og Planen  $A C'$  liggende Jordlegeme.

Ved Bestemmelsen af det paa Vinkelstøttemuren  $A D B$  virkende Jordtryk skal man derfor betragte Jordlegemet  $A C' B D$  som hørende med til Muren og virkende med sin Vægt paa Fodpladen  $A D$ , og for Jordtrykkets Vedkommende beregne dette ( $E$ ) for Fladen  $A C'$ , som om

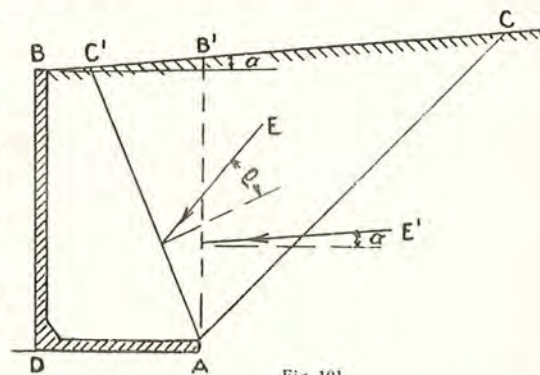


Fig. 101.

denne var Murens Bagvæg, med Jordtrykket virkende under Vinklen  $\varrho$  med Normalen til  $AC'$ . Under den givne, ovenfor nævnte Forudsætning, at Jordtryksretningen for en lodret Snitflade er parallel med Jordoverfladen (*Rankine's* Jordtryksteori) kommer man til samme Resultat med Hensyn til de paa Vinkelstøttemuren  $ADB$  virkende Kræfter, hvad enten man, som ovenfor angivet, regner med  $AC'$  som Murens Bagvæg og Jordtrykket her virkende under Vinklen  $\varrho$ , eller man regner med  $AB'$  som Væg, altsaa hele Jordlegemet  $AB'BD$  som hørende med til Muren, og Jordtrykket virkende under Vinklen  $\alpha$  med Normalen til  $AB'$ .

Hvis specielt Jordoverfladen er vandret, ligger Spændingsellipsens Hovedakse (lodret) i  $AB'$ , og man har da:  $\angle C'AB' = \angle C'AB = 45^\circ - \frac{\varrho}{2}$ .

Hvis Støttemurens Væg er høj i Forhold til Fodpladens Bredde, saaledes som det f. Eks. kan forekomme ved et Bygværk (Kajindfatning)

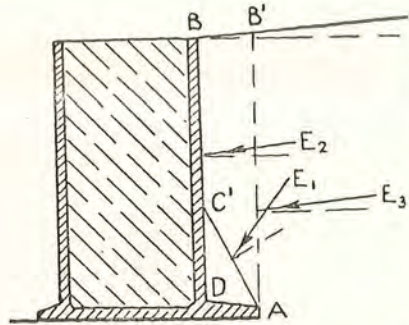


Fig. 102.

bestaaende af en Jernbeton-sænkekasse (Fig. 102), skærer Planen  $AC'$ , Støttemurens Vægflade. Her betragtes da Jordlegemet  $AC'D$  som hørende med til Støttemuren, og denne regnes paavirket af: I Fladen  $AC'$ : Jordtrykket  $E_1$  under Vinklen  $\varrho$  med Normalen, og i Fladen  $C'B$ : Jordtrykket  $E_2$ , parallelt med Jordoverfladen. Beregningsmæssigt kommer man til samme Resultat med Hensyn til de paa Bygværket virkende

Kræfter, hvad enten man regner som her nævnt, eller der regnes med den lodrette Skilleflade  $AB'$ , Jordlegemet  $ADB B'$  som hørende med til Støttemuren og Jordtrykket  $E_3$  paa Fladen  $AB'$ , virkende parallelt med Jordoverfladen.

Hvis Væggen  $DB$  ikke er lodret, skal Retningen for Jordtrykket  $E_2$  bestemmes efter de for Jordtryksberegning efter *Rankine's* Jordtrykssteori gældende Regler.

Som nævnt er Anvendelsen af den her beskrevne Beregningsmaade betinget af, at det kan forudsættes, at kun Jordoverfladens Hældning i Forbindelse med Jordens Skræntvinkel er bestemmende for Jordtrykkets Retning, og saaledes betinget af, at der ses bort fra den Indflydelse, som Væggen Ruhed og Retningen for Murens Bevægelse har paa Jordtryksretningen.

Forskellen mellem den angivne Beregningsmaade og den almindelige

Jordtryksberegning (efter *Coulomb*) vil lettest forstaaes ved Betragtning af Forholdene ved et Bygværk som det i Fig. 102 fremstillede. Drejer det sig om Undersøgelse af Bygværkets Stabilitet mod Kæntring, vilde det, hvis Væggen ikke er særlig glat, være berettiget<sup>1)</sup> for Jordtrykkets Vinkel med Vægnormalen at sætte:  $\delta = \frac{2}{3}\varrho - \varrho$ . Ved den omhandlede Beregningsmaade er der sat  $\delta = \alpha$  (ved vandret Jordoverflade:  $\delta = 0$ ), og man er derfor, for saa vidt angaar Jordtrykket  $E_2$ , paa den sikre Side, men maaske ogsaa urimelig meget paa den sikre Side. Drejer det sig om Undersøgelse af Bygværkets Sikkerhed mod Glidning paa Underlaget, bør der, som tidligere nævnt, for  $\delta$  regnes med en betydelig mindre Vinkel end Skræntvinklen. Ved at man forudsætter Jordtrykket  $E_1$  virkende under Vinklen  $\varrho$  med Normalen, er man derfor ved den beskrevne Beregningsmaade i dette Tilfælde paa den usikre Side.

Vil man (saaledes som det er Reglen ved den almindelige Jordtryksberegning efter *Coulomb*), lade det paagældende Bygværks og dets Fundaments Egenskaber i Henseende til Bagvæggen større eller mindre Ruhed og til Retningen for Væggen Bevægelse i den Situation, hvor Jordtrykket kommer til Virkning, være bestemmende for Jordtrykkets Retning, kan den omtalte Beregningsmaade ikke anvendes. Jordtryksberegningen maa da foretages ved en forsøgsvis Bestemmelse af den for Bygværkets Stabilitet ugunstigste Stilling af Skillefladen  $AC'$ . I Reglen vil det forøvrigt ikke være særlig besværligt at bestemme Beliggenheden af  $AC'$  med en for praktiske Formaal tilstrækkelig Nøjagtighed, idet den samlede Virkning af Jordtrykkene og af det paa Fodpladen hvilende Jordlegeme ikke varierer meget med Beliggenheden af Skillefladen  $AC'$ .

148. **Jordtryk under Aflastningsplade.** Ved en Støttemur af den i Fig. 103 viste Form vil den fra Murens Bagvæg udgaaende vandrette Plade  $BD$  bevirke, at Jordtrykket paa den neden for Pladen værende Del af Væggen bliver mindre, end det vilde være, hvis Muren ikke var forsynet med en saadan Plade, idet Belastningen fra den paa Pladen hvilende Jord og fra den tilhørende Del af Nyttelasten overføres gennem Pladen til Muren og derfor ikke kommer til at virke til Forøgelse af Trykket fra Jorden under Pladen, saaledes som det ellers vilde være Tilfældet.

Ved Bestemmelsen af Jordtrykket paa  $AB$  kan man betragte  $BDF$  som Jordoverflade, idet der da paa den uden for Pladens Kant  $D$  værende Del af denne Flade  $BDF$  regnes at virke en Belastning  $p_1 = \gamma h + p$ , nemlig en Belastning lig med Summen af den over  $BF$

<sup>1)</sup> §§ 102 og 103.

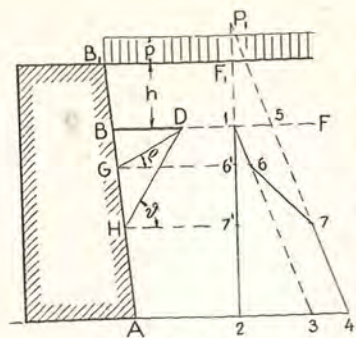


Fig. 103.

Lad Jordtrykket paa Væggen AB for ubelastet Jordoverflade BF være det ved Diagrammet 1-2-3 fremstillede, og Jordtrykket paa Væggen AB for den virkelige Jordoverflade  $B_1F_1$  og Nyttelasten  $p$  være det ved Diagrammet 1-2-4-5 fremstillede Jordtryk. (Linien 4-5 || Linien 1-3 og gennem  $P_1$ ;  $\overline{F_1P_1} = \frac{p}{\gamma}$ ). Man bestemmer Punktet G ved  $\angle BDG = \varrho$  og Punktet H ved DH parallel med den Glideplan, der svarer til det ved Diagrammet 1-2-3 fremstillede Jordtryk. (Hvis Væggen AB er lodret, og Jordoverfladen, saaledes som her forudsat, er vandret, haves:  $\angle BDH = 45^\circ + \frac{\varrho}{2}$ ). Det paa Væggen AB virkende Jordtryk regnes da at være det ved Diagrammet 1-2-4-7-6 fremstillede.

Den Betragtning, der ligger til Grund for den her angivne Beregningsmaade, er med Hensyn til Bestemmelsen af Punktet G, at en paa Fladen BF virkende Belastning, der kun naar til D, ikke vil have nogen Indflydelse paa Størrelsen af det paa Vægdelen BG faldende Jordtryk. Man gaar altsaa herved ud fra, at en Belastning af den vandrette Overflade af et Jordlegeme (Fig. 104), der staar med Skraaning med Hældningsvinkel lig med Skræntvinklen, ikke vil foraarsage Udskridning i Jordmassen. Med Hensyn til Bestemmelsen af Punkt H gøres der den Antagelse — i Modstrid med de af Coulomb's Jordtryksteori udledede Regler — at Retningen for den til Jordtryk ved uensformig belastet Jordoverflade svarende Glideplan er uafhængig af Væggens Højde og er den samme som den Glideplansretning, der svarer til Jordtryk for ubelastet eller ensformig belastet Jordoverflade. Herefter vil Belastningsforholdene paa Stykket BD af den tænkte Jordoverflade BF ikke have nogen Indflydelse paa Størrelsen af den Del af Jordtrykket, der falder ned for H (jfr. Fig. 105), saaledes at Jordtrykket paa

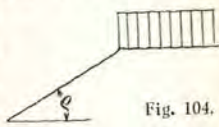


Fig. 104.

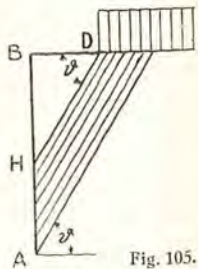


Fig. 105.

liggende Jords Vægt og Nyttelasten  $p$ , medens Stykket BD af Fladen er ubelastet. Opgaven ses at være et specielt Tilfælde af den i § 117 (Slutning) omhandlede Bestemmelse af Jordtryk (uensformig fordelt Belastning paa Jordoverfladen) og kan løses paa den i nævnte Paragraf angivne Maade. Denne er imidlertid noget omstændelig og erstattes derfor i Reglen med følgende Tilnærmelsesberegning.

Vægdelen AH kan regnes at være det ved Diagrammet 2-7'-7-4 fremstillede. Endelig antages det, med Hensyn til det paa Vægdelen GH virkende Jordtryk, at dette vokser jævnt fra det for Punkt G til det for Punkt H bestemte Jordtryk. Svarende hertil sættes den paa GH faldende Del af Jordtrykket lig med det ved Diagrammet 6'-6-7-7' fremstillede Jordtryk.

149. Jordtryk paa Forankringsplader. Ved Bolværker og lignende Konstruktioner anvendes ofte Forankringsplader, anbragt i den bag Bolværket liggende Jord, til Optagelse af vandrette Kræfter.

Den i Fig. 106 skematisk viste Bolværksvæg AB, der tænkes paa- virket af Jordtryk fra den bag Væggen liggende Jord og af eventuelle andre ydre Kræfter, forudsættes understøttet forneden i A, f. Eks. ved, at Væggen er ført et Stykke ned under Jordbunden foran Væggen, og desuden fastholdt i B, idet der her findes en Ankerbolt BC, der forbinder Væggen med Forankringspladen C. Konstruktionens Stabilitet over for Paavirkning af de ydre Kræfter er betinget af, at det til disse Kræfter svarende Træk P i Ankerbolten kan optages af det paa Forankringspladens Forside optrædende passive Jordtryk.

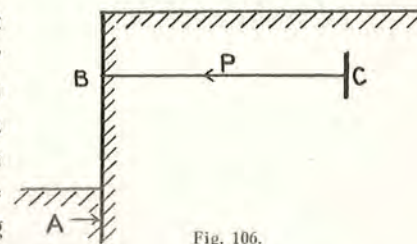


Fig. 106.

Vi vil forudsætte, at Jordoverfladen er vandret, og foreløbig tillige, at Forankringspladen er ført igennem i hele Væggens Længde (vinkelret paa Figures Plan).

150. Hvis Forankringspladen naar helt op til Jordoverfladen (Fig. 107), er Bestemmelsen af Forankringspladens Højde ganske simpel. Med Anvendelse af de sædvanlige Betegnelser er Størrelsen af det passive Jordtryk pr. løbende m Plade udtrykt ved:

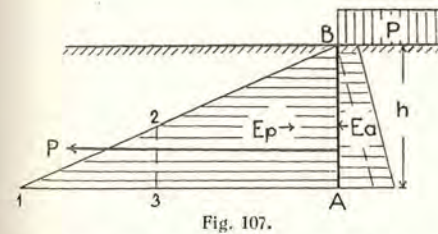


Fig. 107.

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right).$$

Paa Forankringspladens Bagside virker der et aktivt Jordtryk, der, hvis Jordoverfladen er ubelastet, er:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right).$$

eller, hvis der kan forekomme en tilfældig Belastning  $p$  paa Jordoverfladen:



$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right) + p h \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right).$$

Til Bestemmelse af  $h$  haves da, med Sikkerhedsfaktor  $n$ :

$$n P \leq E_p - E_a.$$

Det er herved en Forudsætning, at Resultanten af  $nP$  og  $E_a$  gaar igennem det ved Jordtryksdiagrammet  $A-B-1$  bestemte Trykcentrum for det passive Jordtryk. Hvis Ankerbolten af en eller anden Grund ikke lader sig anbringe paa den til denne Fordring svarende Plads, skal Forankringspladen have en saadan Højde, at Trykcentret for den med  $A-B-2-3$  betegnede Del  $E_p'$  af det passive Jordtryk falder sammen med Angrebspunktet for Resultanten af  $nP$  og  $E_a$ , og at man har:

$$n P = E_p' - E_a.$$

151. Forankringspladen naar ikke helt op til Jordoverfladen (Fig. 108). Hvis man i Analogi med Beregningsmaaden for aktivt Jordtryk regner

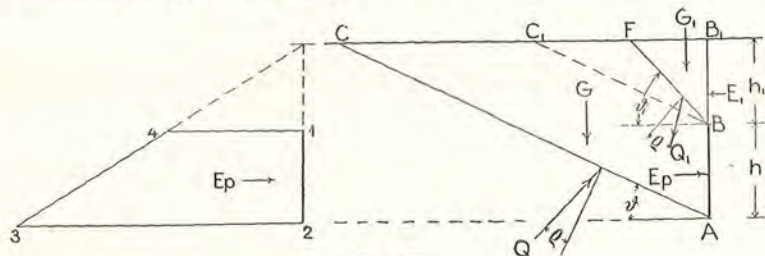


Fig. 108.

det passive Jordtryk paa Fladen  $AB$  i Størrelse lig med den med fulde Linier viste Del af det til venstre i Figuren angivne, for hele Fladen  $AB_1$  gældende Jordtryksdiagram, forudsættes dermed, at det passive Jordtryks Størrelse er bestemt af den Forskydningsmodstand i Glidefladen  $AC$ , der svarer til Vægten af Glidelegemet  $ABC_1C$  ( $BC_1 \parallel AC$ ). Det vil imidlertid ses, at man herved regner med en for lille Værdi for det passive Jordtryk, idet der, for at der skal kunne foregaa en Bevægelse af det nævnte Glidelegeme, maa overvindes, foruden Forskydningsmodstanden langs  $AC$ , ogsaa en Forskydningsmodstand langs  $BC_1$ .

Opgaven at bestemme Størrelsen af det passive Jordtryk paa Fladen  $AB$  kan søges løst paa tilsvarende Maade som den, der anvendes ved sædvanlige Jordtryksberegninger, nemlig ved at man bestemmer de Hældningsvinkler for Glideplanerne  $AC$  og  $BF$ , der giver Minimum af passivt Jordtryk.

Lad  $G$  og  $G_1$  være Vægtene af Jordlegemerne  $ABFC$  og  $BB_1F$ . Det førstnævnte af disse skal være i Ligevægt for Kræfterne  $G$ ,  $Q$ ,  $E_p$  og  $Q_1$ , denne sidste virkende skraat nedefter, mod Bevægelsen langs  $BF$ .

Jordlegemet  $BB_1F$  skal være i Ligevægt for Kræfterne  $G_1$ ,  $E_1$  og  $Q_1$ , denne sidste virkende skraat opad. Med de sædvanlig anvendte og de paa Figuren angivne Betegnelser haves da:

$$\left. \begin{aligned} G + Q_1 \cos(\vartheta_1 - \varrho) &= Q \cos(\vartheta + \varrho) \\ E_p + Q_1 \sin(\vartheta_1 - \varrho) &= Q \sin(\vartheta + \varrho) \end{aligned} \right\} \quad (127)$$

samt

$$G_1 = Q_1 \cos(\vartheta_1 - \varrho), \quad Q_1 = \frac{G_1}{\cos(\vartheta_1 - \varrho)},$$

som indsat i (127), og ved Elimination af  $Q$  giver:

$$E_p = (G + G_1) \operatorname{tg}(\vartheta + \varrho) - G_1 \operatorname{tg}(\vartheta_1 - \varrho). \quad (128)$$

Endvidere haves:

$$G + G_1 = \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 \operatorname{ctg} \vartheta,$$

$$G_1 = \frac{1}{2} \gamma h_1^2 \operatorname{ctg} \vartheta_1,$$

som indsat i (128) giver:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 \operatorname{ctg} \vartheta \operatorname{tg}(\vartheta + \varrho) - \frac{1}{2} \gamma h_1^2 \operatorname{ctg} \vartheta_1 \operatorname{tg}(\vartheta_1 - \varrho).$$

Minimum af  $E_p$  faas for:

$$\vartheta = 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \quad \text{og} \quad \vartheta_1 = 45^\circ + \frac{\varrho}{2}, \quad \text{hvorefter der findes:}$$

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) - \frac{1}{2} \gamma h_1^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right). \quad (129)$$

Fradrages det paa Pladens Bagside virkende aktive Jordtryk, faas, at der til Optagelse af Trækket  $P$  i Ankerbolten haves:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) - \frac{1}{2} \gamma h_1^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right) - \left( \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 - \frac{1}{2} \gamma h_1^2 \right) \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) - \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right). \end{aligned}$$

Som det vil ses, kommer man ved at regne paa den her anførte Maade til det samme Resultat, som man vilde faa for en Forankringsplade med Højde  $h + h_1$ , der naar helt op til Jordoverfladen. At en Forankringsplade skulde kunne yde samme Modstand, uanset hvor lille dens Højde er i Forhold til hele Højden fra Pladens Underkant til Jordoverfladen, maa imidlertid forekomme at være i Modstrid med de virkelige Forhold; det saaledes fundne Resultat kan i det mindste ikke have Gyldighed, hvis  $h$  er meget lille i Forhold til  $h_1$ .

Af *W. Buchholz*<sup>1)</sup> er udført nogle Laboratorieforsøg vedrørende pas-

<sup>1)</sup> *W. Buchholz*: Erdwiderstand auf Ankerplatten. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft. 1930—31.

sivt Jordtryk paa Forankringsplader. Ved Forsøgene anvendtes Sand, hvis Sammensætning efter Kornstørrelse var:

2 mm < d	:	ca. 3 %
1 » < d < 2 mm	:	- 7 %
0,5 » < d < 1 »	:	- 35 %
0,24 » < d < 0,5 »	:	- 40 %
d < 0,24 »	:	- 15 %

og for hvilket iøvrigt havdes:

Rumvægt (tørt) .....	$\gamma = 1,67 \text{ t/m}^3$ .
Poretal .....	$\epsilon_0 = 0,534$ .
— (i Forsøgs-Tilstand).....	$\epsilon = 0,442$ .
— .....	$\epsilon_{\text{min}} = 0,381$ .
Fortætningsgrad .....	$F = 0,402$ .
Relativ Tæthed i Forsøgs-Tilstand .....	$D = 0,60$ .
Friktionsvinkel .....	$\varphi = \text{ca. } 33^\circ$ .
Skræntvinkel .....	$\varrho = \text{ca. } 33^\circ$ .

Forsøgene udførtes med Forankringsplader af Dimensioner fra  $10 \times 10$  cm til  $30 \times 40$  cm (Højde  $\times$  Bredde) og med fra 0,37 m til 0,92 m Jordhøjde over Pladeunderkant. Forsøgene viste, at Glidelegemerne

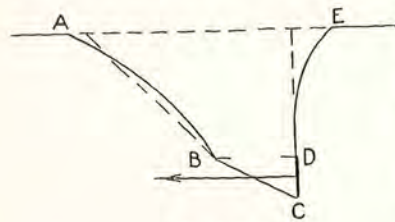


Fig. 109.

(*ABCDEA*, Fig. 109) naaede op til Jordoverfladen ved Pladen, og at Glidefladen var omtrent plan paa det nederste Stykke (indtil i Højde med Pladens Overkant) og her med Hældningsvinkel omtrent lig  $45^\circ - \frac{\varrho}{2}$ , medens den fra *B* og videre til Jordoverfladen havde et væsentligt stejlere Forløb.

Paa Grundlag af Resultaterne fra de her omhandlede Forsøg foreslaar *W. Buchholz* at sætte:

$$E_p = \mu \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 \text{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) \quad (130)$$

med Gyldighed for  $\frac{h+h_1}{h} < 5,5$ , idet der for  $\mu$  anvendes følgende Værdier:

	$\varrho = 25^\circ$	$30^\circ$	$35^\circ$
	$\mu$	$\mu$	$\mu$
$\frac{h+h_1}{h} = 1$	1,0	1,0	1,0
2	0,95	0,96	0,98
3	0,93	0,94	0,97
4	0,91	0,93	0,95
5	0,90	0,92	0,94

Fradraget for aktivt Jordtryk paa Ankerpladens Bagside skal her regnes lig med det til hele Højden  $h + h_1$  svarende aktive Jordtryk.

Som det ses af ovenstaaende Talværdier for Koefficienten  $\mu$ , er den ved (130) bestemte Størrelse for  $E_p$  kun i ringe Grad afhængig af Forholdet mellem Pladens Højde og Jordhøjden, altsaa noget nær overensstemmende med, hvad der faas af den ovenfor udledede Formel (129).

Af forsigtighedsmæssige Grunde bør man dog, indtil Erfaringen fra Praksis har godtgjort Berettigelsen af, at der kan regnes med passivt Jordtryk bestemt ved Formel (130),

ved Dimensionsberegninger nøjes med at ansætte det passive Jordtryk til den Størrelse, der svarer til det i Fig. 108 viste Diagram 1-2-3-4, eventuelt forøget med en skøns mæssig anslaaet Brøkdæl af Differensen mellem denne Størrelse for det passive Jordtryk og den Størrelse, der faas af (130).

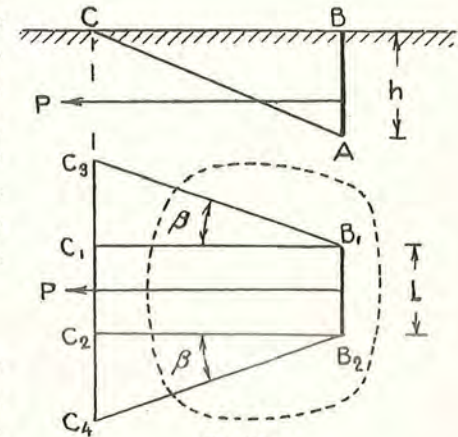


Fig. 110.

152. Korte Forankringsplader (Fig. 110). Hvis Pladens Længde er  $l$ , vilde der for det passive Jordtryk paa Pladen *AB* (der her er forudsat at naa helt op til Jordoverfladen), beregnet efter de almindelige Regler, faas:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 \text{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) l,$$

svarende til et prismatisk Glidelegeme *ABC* af Længde  $l$ . Pladen vil imidlertid yde større Modstand mod Bevægelse, end hvad der faas af ovenstaaende Udtryk, paa Grund af, at der foruden Forskydningsmodstanden i Glideplanen *AC* ogsaa vil være Forskydningsmodstande i de lodrette Skilleflader *B1C1* og *B2C2* at overvinde, hvis det betragtede Glidelegeme skal forskydes.

Vil man fastholde Forudsætningen om det prismatisk formede Glidelegeme *ABC*, kunde det ligge nær at søge de nævnte yderligere Forskydningsmodstande indført ved at regne med aktive Jordtryk i Snitfladerne *B1C1* og *B2C2* (Arealet af hver af disse lig med Trekantsarealet *ABC*) og sætte Forskydningsmodstandene lig med en Friktionskoefficient Gange disse aktive Jordtryk. Det Resultat, man kommer til ved at regne paa denne Maade, stemmer dog kun daarligt overens med Erfaringsresultater (giver for smaa Værdier for den samlede Modstand

mod Pladens Forskydning), og den nævnte Beregningsmaade forekommer ogsaa lidet rimelig af den Grund, at man ved kohæsiv Jord vilde finde mindre Værdier for aktivt Jordtryk og altsaa mindre Værdier for Forskydningsmodstandene langs Glidelegemets Sideflader end for kohæsionsfri Jord, medens Forholdet i Virkeligheden er, at Kohæsionen bevirker en Forøgelse af Modstanden mod Pladens og Glidelegemets Forskydning.

En Beregningsmaade, der antagelig fører til passende Værdier for Jordtryk i det her omhandlede Tilfælde, gaar ud paa, at der i Stedet for det prismatiske Glidelegeme regnes med et Glidelegeme, der nedadtil er begrænset af den sædvanlige Glideplan  $AC$  og til Siderne af de to lodrette Planer  $B_1C_3$  og  $B_2C_4$ , og da med et passivt Jordtryk, der forholder sig til det til Glidelegemet  $B_1C_1C_2B_2$  svarende passive Jordtryk, som Volumen af Glidelegemet  $B_1C_3C_4B_2$  forholder sig til Volumen af Glidelegemet  $B_1C_1C_2B_2$ . Vinklen  $\beta$  sættes i Reglen lig med  $\varrho$ , eller, under usikre Forhold med Hensyn til Vurderingen af Friktionsmodstandene, til en skønmæssig anslaaet noget mindre Størrelse.

For  $\beta = \varrho$  faas, hvis Jordoverfladen er vandret og det passive Jordtryk ligeledes er vandret:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) \left[ l + \frac{2}{3} h \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) \operatorname{tg} \varrho \right]. \quad (131)$$

Saafernt Forankringspladen ikke naar helt op til Jordoverfladen, maa der indføres en Reduktion af det paa den her angivne Maade bestemte passive Jordtryk, efter samme Regel, som man vil anvende for en lang Forankringsplade.

De før omtalte af *W. Buchholz* udførte Forsøg drejede sig særlig om Undersøgelse vedrørende korte Forankringsplader. Foruden det før nævnte angaaende Glidelegemets Form i lodret Snit vinkelret paa Pladen fandtes, at Glidelegemet ogsaa i Retningen parallel med Pladen i Form afveg en Del fra det for Udledelsen af Udtrykket (131) forudsatte (i Fig. 110:  $B_1C_3C_4B_2$ ). Skæringslinien mellem Glidelegemets Begrænsningsflade og Jordoverfladen fandtes at ligge omtrent som vist med punkteret Linie i Fig. 110, og den Fordybning i Sandet, som fremkom, naar Glidelegemets Sand gravedes ud, havde Form som et Krater.

Paa Grundlag af Forsøgsresultaterne har *Buchholz* foreslaaet at sætte:

For en kvadratisk Plade med Højde  $h$  og med Overkanten i Dybden  $h_1$  under Jordoverfladen:

$$E_p = \eta \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) h,$$

og for en rektangulær Plade med Højden  $h$  og Længden  $l$ :

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma (h + h_1)^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) (\mu l + (\eta - \mu) h), \quad (132)$$

hvori der, for  $\varrho = 32,5^\circ$ , sættes:

$\frac{h + h_1}{h} =$	$\mu$	$\eta$
1	1	2,1
2	0,97	2,2
3	0,96	2,4
4	0,95	2,7
5	0,93	3,0

For en Forankringsplade, der naar helt til Jordoverfladen, faas af (132), for  $\varrho = 32,5^\circ$ :

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 (3,3 l + 3,6 h),$$

medens (131) giver:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 (3,3 l + 2,56 h).$$

Som det vil ses er Forskellen mellem de to Værdier for  $E_p$  ikke stor.

En Betingelse for, at der for passivt Jordtryk paa korte Forankringsplader kan regnes saaledes, som anført i det foranstaaende, er, at den indbyrdes Afstand mellem Forankringspladerne er saa stor, at de paa regnede Glidelegemer ikke griber ind i hinanden. Ligger Forankringspladerne tæt (Fig. 111), maa der foretages en til Formindskelsen af det effektive Glidelegemes Volumen svarende Reduktion af det passive Jordtryk.

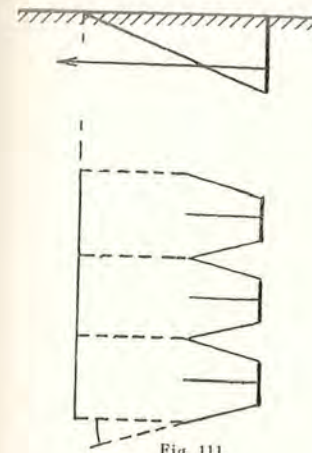


Fig. 111.

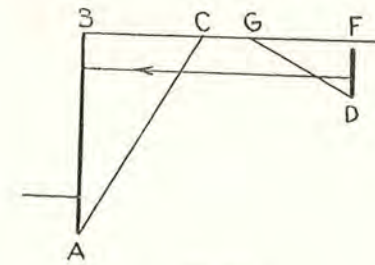


Fig. 112.

**153. Forankringspladens Afstand fra Væggen.** For at der skal kunne paaregnes fuldt passivt Jordtryk paa en Forankringsplade  $DF$  (Fig. 112), maa denne ligge saa langt fra den Væg  $AB$ , der skal fastholdes ved Hjælp af Pladen, at de to Glideplaner,  $AC$  for det aktive Jordtryk paa Væggen  $AB$ , og  $DG$  for det passive Jordtryk paa Pladen  $DF$ , ikke skærer hinanden under Jordoverfladen.

Ligger Pladen nærmere ved Væggen  $AB$ , maa det passive Jordtryk paa Pladen paaregnes at kunne blive væsentlig formindsket. Ved Be-

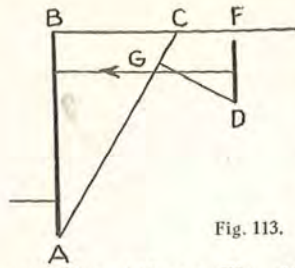


Fig. 113.

regningen af det passive Jordtryk maa man i saa Tilfælde betragte  $AGCF$  (Fig. 113) som Jordoverflade og da foretage Jordtryksbestemelsen f. Eks. saaledes, som omtalt i § 119. Herved maa det erindres, at Glideplansretningen  $DG$  afhænger af Jordoverfladens Form og derfor ikke er den samme som den, der gælder for plan Jordoverflade. I de to, i henholdsvis Fig. 112 og Fig. 113 viste Tilfælde er Glideplanernes Hældningsvinkler derfor indbyrdes forskellige.

## IV. JORDBUNDENS FORHOLD UNDER BELASTNING.

154. Belastningen fra et Bygværk overføres til Byggegrunden gennem Bygværkets Fundament. Med Hensyn til de fra Belastningen hidrørende Paavirkninger paa Byggegrunden og til Jordbundens Evne til at optage disse Paavirkninger maa der skelnes mellem de Tilfælde, hvor Fundamentet hviler direkte paa Jordbunden (*Fladebelastning*), og de Tilfælde, hvor Overførelsen af Belastningen sker gennem Pæle, der er ført ned i Jordbunden (*Pælebelastning* paa Jordbunden).

### A. Fladebelastning.

#### 1. Arbejdslinie. Tryk og Nedsynkning.

155. Jordbundens Arbejdslinie. Ved Belastning af en paa Jordbunden liggende stiv Plade, trykkes denne noget ned i Jorden <sup>1)</sup>. En Kurve, Arbejdslinien, der angiver sammenhørende Værdier af Belastning  $q$  (pr. Arealenhed) og Pladens Nedsynkning  $s$ , faaar, i store Træk, det i Fig. 114 viste Forløb <sup>2)</sup>. Ved smaa Belastninger er  $s$  ret nær proportional med  $q$ , saaledes at man kan sætte

$$s = \frac{q}{c}, \quad (133)$$

hvor  $c$  (Nedsynkningstallet) er en Materialkonstant, svarende til Elasticitetstallet ved faste elastiske Legemer. Den Belastning  $q_p$ , indtil hvilken Arbejdslinien med passende Tilnærmelse kan regnes at være en ret Linie, kaldes her, ligesom det gøres ved faste elastiske Legemer, *Proportionalitetsgrænsen*.

Ved Belastninger, der er større end Proportionalitetsgrænsen, vokser Nedsynkningerne stærkere end Belastningen. Den Belastning  $q_g$ , ved hvilken Tilvæksten i Nedsynkning begynder at vokse meget stærkt med

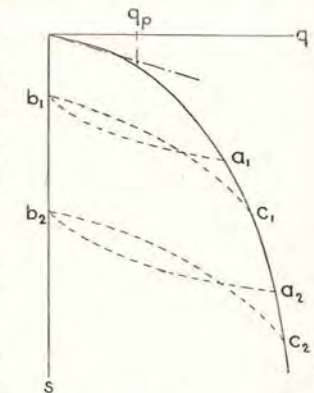


Fig. 114.

<sup>1)</sup> Det nærmere angaaende Jordens Kompression ved Trykpaavirkninger er omtalt i Afsnit II.

<sup>2)</sup> Se §§ 40 og 65, om Tryk-Poretalsdiagrammer.

Belastningsforøgelsen (hvor Arbejdsliniens Tangent nærmer sig til at blive lodret), betegnes sædvanlig som Jordbundens *Brudgrænse*. Da der ved Belastning paa Jordbund ikke opstaar noget egentlig Brud — paa samme Maade, som det sker ved faste Legemer — anvendes ogsaa andre Betegnelser, som f. Eks. Glidegrænse, Grænse-Bæreevne o. a.

Ved Aflastning af Pladen hæver denne sig, idet den ved Belastningstrykket komprimerede Del af Jordbunden ekspanderer (kvælder ud). Ved fuldstændig Aflastning hæves Jordbundens Overflade dog ikke op til samme Stilling, som den havde før Anbringelsen af Belastningen paa Pladen. Kurvestykkerne  $a_1b_1$  og  $a_2b_2$  angiver Løftningerne ved Aflastning,  $b_1c_1$  og  $b_2c_2$  Nedsynkningerne ved fornyet Belastning efter Aflastning.

Jordbundens Bæreevne forringes i Almindelighed ikke, ved at den paavirkes med Belastning lig med eller større end Brudgrænsen. Efter Aflastning haves ved fornyet Belastning omtrent samme Forhold mellem Nedsynkning og Belastning som før Paavirkningen til Brudgrænsen.

156. Tilladelig Belastning. Ved Hjælp af Arbejdslinien for en i givet Tilfælde foreliggende Jordbund<sup>1)</sup> kan man bestemme Størrelsen af den for det paagældende Bygværk tilladelige Belastning paa Byggegrunden.

Ved Fastsættelsen af den tilladelige Belastning paa Byggegrunden, maa der med Hensyn til de Kræfter, der skal overføres til denne, skelnes mellem den Del af Paavirkningen paa Byggegrunden, der er konstant — den Del, der hidrører fra Egenvægten af Bygværket og fra hvilende Nyttelast — og den Del af Paavirkningen, der varierer — den fra den tilfældige Nyttelast hidrørende Del. I Almindelighed er den konstante Belastning den langt overvejende Del af hele Belastningen.

Som nævnt fremkommer der for hver Gang, Belastningen paa Jordbunden forøges og derefter formindskes, en vis blivende Nedsynkning. Et Bygværk vil derfor ved en stadig gentagen Variation af Belastningen vedblivende sætte sig noget. Disse blivende Nedsynkninger aftager imidlertid i Størrelse og nærmer sig, med voksende Antal af Belastningsvariationer, saaledes mod Nul, at Summen af de blivende Nedsynkninger for stadig gentagne Belastningsvariationer bliver en endelig Størrelse, d. v. s. at Sætningerne af Bygværket efterhaanden hører op.

Jo nærmere Maksimalbelastningen ligger ved Brudgrænsen for Jord-

<sup>1)</sup> Arbejdsliniens Forløb afhænger foruden af Jordbundens Beskaffenhed ogsaa af Trykfladens Størrelse og Form. Se herom: §§ 167—168.

bunden, desto større er Tilvæksterne i blivende Nedsynkning ved Belastningsvariationerne. Hvis derfor den i Tidens Løb som Følge af Belastningsvariationerne fremkomne Sætning af et Bygværk ikke skal blive for stor, maa det til Total-Paavirkningen svarende Tryk kun være en Brøkdel af Jordbundens Brudgrænse. Den tilladelige Belastning paa

Jordbunden sættes til  $\frac{1}{n}q_g$ , hvor  $n$  er en Sikkerhedsfaktor. Denne bør efter det anførte vælges forholdsvis større, jo større den paa Bygværket kommende varierende Nyttelast er i Forhold til Summen af Bygværkets Egenvægt og den konstante Nyttelast. Ret almindeligt bruges Værdier af  $n$  liggende mellem 3 og 5.

En Betingelse for, at man saaledes kan fastsætte den tilladelige Belastning til  $\frac{1}{n}$  af Brudgrænsen, er det imidlertid, at det paagældende

Bygværk kan taale den med en saadan Paavirkning paa Jordbunden følgende Sætning. Om dette er Tilfældet, afhænger af selve Bygværkets Konstruktion, dets Karakter eller af andre lignende Forhold. Hvis der for det paagældende Bygværk er fastsat en vis Grænse  $s$ , for den tilladelige Nedsynkning af Fundamentet — f. Eks. paa Grund af, at de af Understøtningernes Eftergiven foraarsagede Ekstraspændinger i Bygværkets Konstruktionsdele skal holdes under en vis Grænse, eller af, at der ikke maa fremkomme skadelige Revner i Bygværket — bestemmes den tilladelige Belastning for Jordbunden ikke af Brudgrænsen for denne, men som den til Nedsynkningen  $s_1$  svarende Belastning  $q_1$ .

Der er ved det her anførte tænkt, at det i Fundamentsfladen til Jordbunden overførte Tryk er ensformig fordelt over Fladen. Hvis den fra Fundamentet til Byggegrunden overførte ydre Kraft virker ekscentrisk, bliver Trykket paa Jordbunden alene af denne Aarsag uensformig fordelt<sup>1)</sup>. Ved Beregning af de af en ekscentrisk virkende Kraft fremkaldte Tryk paa Jordbunden gaar man i Almindelighed ud fra Forudsætning om retlinet Spændingsfordeling, ligesom det gøres ved Spændingsberegninger for Snit i faste Legemer. Da denne Beregningsmaades Berettigelse er betinget af, at der er Proportionalitet mellem Spænding og Nedsynkning, bør der derfor til det ovenfor anførte om Fastsættelse af tilladelig Belastning for Jordbund føjes den Regel, at ved ekscentrisk paavirket Fundamentsflade kan den tilladelige Belastning i Almindelighed højst sættes lig med Proportionalitetsgrænsen.

<sup>1)</sup> Om Trykfordelingen ved Fladebelastning, se § 164.

157. Jordbundens Forhold under Fladebelastning afhænger først og fremmest af Jordbundens Beskaffenhed, men stiller sig i visse Henseender desuden noget forskelligt, efter som Jorden tæt under den belastede Flade er hindret i at vige ud til Siden, saaledes som Tilfældet f. Eks. er, naar Fundamentet er omsluttet af en ned i Jordbunden ført Spunsvæg, eller saadan Sidebevægelse af Jorden ikke er hindret. Med Hensyn til Jordbundens Beskaffenhed kan der skelnes mellem de to Grupper af Jordbundsarter: *Friktionsjord*, d. v. s. Jordbund bestaaende af relativt store Korn, fortrinsvis af sammentrængt Form (f. Eks. Grus og Sand), og *kohæsiv Jord*, d. v. s. Jordbund bestaaende af fine Korn med større eller mindre Indhold af skælformede Korn (Ler og Blandinger af Ler og Sand).

158. Tryk og Nedsynkning ved Friktionsjord. Det ved en lodret Belastning af en paa Jordbunden liggende Plade fremkaldte Tryk paa Jordbunden forplanter sig saavel lodret ned i Jorden som skraat ud til Siderne i Jorden under Trykfladens Plan og bevirker, at et nedadtil voksende Volumen af Jorden under Trykfladen komprimeres. Trykspændingerne og dermed Fortætningsgraden i dette Jordvolumen er størst umiddelbart under Belastningspladen og aftager med voksende Dybde under Pladen. Som Følge af Kompressionen sker der en vis Nedsynkning af Pladen, og denne Nedsynkning er, saaledes som tidligere nævnt, afhængig dels af Trykkets Størrelse, dels af Jordbundens Lejringsstæthed og er i Almindelighed proportional med Trykkets Størrelse. Nedsynkningen indtræder og naar sin fulde Størrelse straks ved Belastningens Anbringelse, eller ganske kort Tid derefter.

Naar Belastningen er vokset til en vis Størrelse, sker den af yderligere Belastningsforøgelse foraarsagede Nedsynkning ved, at en Del af Jordmassen under Belastningspladen fortrænges ud til Siden, og samtidig hermed finder der en Hævning af Jordbunden Sted omkring Pladen (Fig. 115). Den Belastning, ved hvilken Jorden under Pladen begynder at vige ud til Siden, er at betragte som Brudgrænsen for den paa gældende Jordbund.

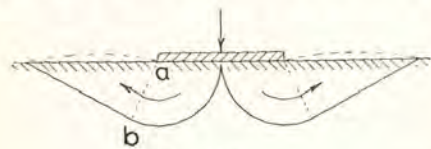


Fig. 115.

De Nedsynkninger, der finder Sted, naar Belastningen overstiger Brudgrænsen, tiltager ikke jævnt med voksende Tryk, saaledes som Tilfældet er med de Nedsynkninger, der skyldes Jordbundens Kompression, men indtræder rykvis og er desuden, for samme Tryktilvækster, meget store i Forhold til Kompressions-Nedsynkningerne.

De Forskydninger i Jorden, der sker, naar Jorden under Belastningspladen begynder at vige ud til Siden, og Jorden omkring Pladen hæves, er af samme Art som de Forskydningsbevægelser, der fremkommer i en mod en Væg støttende Jordmasse, naar Væggen trykkes ind mod Jorden med saa stor Kraft, at det passive Jordtryk overvindes. Den som Følge af Belastningen paa Pladen komprimerede Jord vil være i en vis Spændingstilstand og derfor udøve Tryk i alle Retninger paa den omgivende Jord. Naar Trykket paa denne — f. Eks. i en Snitflade *ab*, Fig. 115 — er blevet lige saa stort som det passive Jordtryk fra den omgivende Jord, dannes der Glideflader i denne og sker Forskydninger i Jorden langs disse Glideflader, saaledes at der bliver Plads for den videre Nedsynkning af Pladen.

Hvis Belastningspladen ligger i stor Dybde under Jordbundens Overflade (dybt liggende Fundament), er Brudgrænsen — defineret som den Belastning  $q_g$ , ved hvilken Tilvæksterne i Nedsynkning begynder at vokse stærkt med Belastningsforøgelserne (§ 155) — sædvanlig en Del mindre end den Belastning, ved hvilken der sker Hævning af Jordbundens Overflade (svarende til, at Glidefladerne naar helt op til Overfladen) og sker rykvis Nedsynkninger af Belastningspladen, saaledes som ovenfor nævnt. I dette Tilfælde er det passive Jordtryk, som skal overvindes, for at den omgivende Jord helt op til Overfladen skal kunne forskydes opad, meget stort, og en Del af den under Belastningspladen værende Jord kan da godt vige ud til Siden, uden at der sker den med Overvindelse af hele det passive Jordtryk følgende Løftning af den omgivende Jord, nemlig ved, at den over Belastningspladens Plan liggende Jord, eller en Del deraf, komprimeres, saaledes at der bliver Plads for den Del af Jorden under Pladen, der fortrænges til Siden ved Pladens Nedsynkning. De Nedsynkninger af Belastningspladen, som finder Sted, naar Jorden under Pladen fortrænges, uden at der derved sker Dannelse af Glideflader op til Jordbundens Overflade og Hævning af denne, foregaar nogenlunde jævnt og ikke rykvis, saaledes som Tilfældet er, naar det passive Jordtryk i hele Jordhøjden overvindes, og Jordbunden omkring Pladen løftes, men Tilvæksterne i Nedsynkning er sædvanlig dog saa store i Forhold til Belastningsforøgelserne, at Brudgrænsen maa regnes at være den Belastning, ved hvilken Jorddelene begynder at vige ud til Siden under Trykfladen, saaledes som nævnt. Ved Forøgelse af Belastningen ud over den saaledes fastlagte Brudgrænse komprimeres den omgivende Jord mere og mere, og ved en vis Kompressionsgrad indtræder da lignende Forhold som de, der haves ved en paa Jordbundens Overflade liggende Belastningsplade, nemlig Overvindelse af det passive

Jordtryk i hele Jordhøjden, Dannelse af Glideflader og Løftning af den omgivende Jordbund <sup>1)</sup>).

Hvis Jorden under Belastningspladen er hindret i at vige ud til Siden paa Grund af, at Fundamentet er omsluttet af en Spunsvæg, er Nedsynkningerne indtil Brudgrænsen noget mindre, end Tilfældet er, hvis Sideudvidelsen ikke er hindret. Dette skyldes, at det Jordvolumen, som komprimeres, her i Hovedsagen er begrænset til det inden for Spunsvæggen værende mindre Jordlegeme. Nedsynkningerne holder sig nogenlunde proportionale med Belastningerne omtrent helt til Brudgrænsen. Med Hensyn til Brudgrænsen haves lignende Forhold som ved dybt liggende Trykflade, idet den vandrette Snitflade ved Væggens nedre Kant her er at betragte som Trykflade. Naar Belastningen har naaet en vis Størrelse, begynder hele det af Væggen omsluttede Jordlegeme at synke, idet den Jord, der ligger neden for Væggens Kant, trykkes til Siden. Ved at Kompressionen, som, indtil denne Bevægelse indtræder, hovedsagelig er begrænset til Jorden inden for Væggen, derved udstrækkes til et betydelig større Jordvolumen, nemlig til den omgivende Jord uden for Væggen, (saavel under som over dennes Kant), bliver Tilvæksterne i Nedsynkning saa meget større end forud, at den til denne Situation svarende Belastning er at betragte som Brudgrænse.

Dersom den Væg, der omslutter Fundamentsfladen, kun rækker lidt ned under denne, kan Brudgrænsen være bestemt af Indtræden af rykvisse Nedsynkninger med samtidig Løftning af den omgivende Jord, saaledes som omtalt ovenfor <sup>2)</sup>).

159. Ved kohæsiv Jord er der i Reglen større Forskel mellem Proportionalitetsgrænse og Brudgrænse, end der er ved Friktionsjord, og Overgangen fra de ganske smaa Nedsynkningstilvækster ved Belastninger under Proportionalitetsgrænsen til de store Nedsynkningstilvæk-

<sup>1)</sup> Tænker vi os Belastningsplader anbragt i indbyrdes forskellige Dybder under Jordbundens Overflade, vil der for de Pladers Vedkommende, der ligger højere end i en vis Afstand fra Jordbundens Overflade, ved Brudgrænsen ske rykvisse Nedsynkninger af Pladen og Løftning af den omgivende Jordbunds Overflade, medens der for de dybere liggende Pladers Vedkommende blot sker Kompression af den omliggende Jord ved Belastning lig med Brudgrænsen. For den største af de Dybder, ved hvilke der finder Løftning af Jordbunden Sted og sker rykvisse Nedsynkninger af Pladen, har *Terzaghi* indført en særlig Betegnelse: *Den kritiske Funderingsdybde*. Størrelsen af den kritiske Funderingsdybde er afhængig af Jordbundens Lejringsforhold og af Trykfladens Størrelse og Form. Jo løsere Jordens Lejrning er, desto mindre er den kritiske Dybde.

<sup>2)</sup> Dette vil være Tilfældet, hvis Kanten af den omsluttende Væg ligger i en Dybde, der er mindre end den kritiske Funderingsdybde.

ster i Nærheden af Brudgrænsen er her tillige mere jævn end den tilsvarende Overgang ved Friktionsjord.

Hvis Jordens Porer er vandfyldte — hvad der sædvanlig er Tilfældet ved de mere udprægede af de under denne Gruppe hørende Slags Jordbund (Ler og stærkt lerede Jordarter) — afhænger Forholdet mellem Nedsynkning og Tryk (Arbejdslinien) i høj Grad af, om Belastningsforøgelserne følger hurtig efter hinanden, eller der hengaar lang Tid mellem hver Forøgelse af Belastningen. Straks efter Anbringelse af en Belastning faas en vis lille Nedsynkning, men Belastningspladens Bevægelse fortsættes derefter, for uforandret Belastning, i lang Tid (Fig. 116). En stiliseret Arbejdslinie <sup>1)</sup>, svarende til uendelig Vårighed af de enkelte Belastningstrin, faar den i Figuren med punkteret Linie viste Form.

Aarsagen til, at Nedsynkningerne tager lang Tid, er det i § 65 omtalte Forhold, at den for Jordbundens Kompression fornødne Fortrængning af Porevand foregaar meget langsomt paa Grund af den store Modstand mod Vandets Bevægelse gennem Jordmassens meget fine Porer.

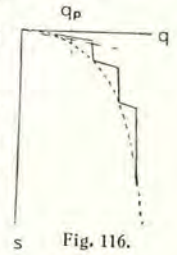


Fig. 116.

Udkvældning af Jorden ved Aflastning og den dermed følgende Løftning af Belastningspladen sker ligeledes meget langsomt, idet der, for at Udkvældningen skal kunne finde Sted, maa foregaa Indsugning af Vand i Porerne.

Hvis der i Løbet af relativ kort Tid anbringes en større Belastning paa saadan Jordbund med vandfyldte Porer, kommer Porevandet under en til Modstanden mod Vandets Bevægelse i Porerne svarende hydrodynamisk Spænding, og Jordbunden vil til at begynde med forholde sig omtrent som en træg Vædske eller usammentrykkelig plastisk Masse, og Nedsynkningerne for Belastninger, der er mindre end Brudgrænsen, er her forholdsvis smaa. Naar Belastningen overstiger Brudgrænsen — den Belastning, ved hvilken Jorden under Belastningspladen begynder at vige ud til Siden — sker der Løftning af Jorden omkring Pladen, men i dette Tilfælde (hurtig voksende Belastning) hæver Jordbundens Overflade sig i større Udstrækning omkring Pladen, end det sker ved Friktionsjord.

Dersom man lader Belastningen stige ganske langsomt fra Nul, saaledes at Porevandet faar Tid til at flyde ud, efterhaanden som Belastningen vokser, komprimeres Jorden under Belastningspladen, og dennes Nedsynkning for Belastninger, der er mindre end Brudgrænsen, bliver derfor her større end i Tilfælde af hurtig Belastningsstigning. Forholdene

<sup>1)</sup> § 66.

ved Belastning omkring Brudgrænsen vil her antagelig være nogenlunde de samme, som de er ved Friktionsjord, nemlig Fortrængning til Siden af den under Pladen liggende Jord, Overvindelse af det passive Jordtryk fra den omgivende Jord, Dannelse af Glideflader og Løftning kun af den nærmest Pladen værende Del af den omgivende Jord.

## 2. Statisk Bestemmelse af Jordbunds Bæreevne.

160. Forudsættes det, at der ved Brudgrænsen er en saadan Spændingstilstand til Stede i Jordmassen, at det aktive Jordtryk paa den ene Side af en eller anden Snitflade i Jordmassen, som f. Eks. *ab* i Fig. 115, er paa Nippet til at overvinde det passive Jordtryk paa den modsatte Side af samme Snitflade, kan der opstilles forskellige Beregningsmaader til Bestemmelse af Jordbundens Brudgrænse, idet man herved benytter sig af de af Jordtryksteorien udledede Regler vedrørende aktivt og passivt Jordtryk<sup>1)</sup>. Den Usikkerhed, hvormed Behandlingen af Jordtryksproblemerne i det hele taget er behæftet (saaledes f. Eks. med Hensyn til Glidefladernes Form) i Forbindelse med, at man ved Anvendelsen af Jordtryksteorien til Bestemmelse af Jordbunds Brudgrænse maa gøre ret vilkaarlige Forudsætninger, bl. a. angaaende Retning og Dybde af den Snitflade, paa hvilken der optræder de for Brudgrænsestadiet bestemmende aktive og passive Jordtryk, bevirker imidlertid, at den Bestemmelse af Jordbunds Bæreevne, der faas ved Benyttelse af saadanne Formler, som de i det følgende (§§ 161 og 162) angivne, eller som faas ved Benyttelse af de i § 163 beskrevne Fremgangsmaader, kun kan betragtes som en temmelig raat tilnærmende og ret usikker Bestemmelse.

161. **Brudgrænse-Formler; Friktionsjord.** Naar Jordbunden bestaar af Sand eller Jord af lignende Beskaffenhed, sættes for cirkulær Trykflade med Radius  $r$ :

$$q_{g_0} = \frac{2 \gamma r}{\operatorname{tg}^4 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}, \quad (134)$$

hvor  $q_{g_0}$  er Brudgrænsen for Belastning i Jordoverfladen,  $\gamma$  Jordens Rumvægt<sup>2)</sup> og  $\varphi$  Jordens Friktionsvinkel.

<sup>1)</sup> Krey: Erddruck, Erdwiderstand, 1932. Franzius: Der Grundbau, 1927. Terzaghi: Erdbaumechanik, 1925. Fellenius: Jordstatiska Beräkningar, 1926.

<sup>2)</sup> For Jord under Vand skal der i Stedet for  $\gamma$  indsættes  $\gamma'_e$ . (Se § 18).

Denne Formel til Bestemmelse af Brudgrænsen  $q_{g_0}$  kommer man til ved at gøre følgende Betragtning gældende. Ved Belastningsforsøg<sup>1)</sup> er det iagttaget, at det er den i nogen Dybde under Belastningspladen liggende Del af Jordmassen, der fortrænges ud til Siden ved de rykvisse Nedsynkninger af Belastningspladen, der finder Sted, naar Trykket har naaet Brudgrænsen, medens de nærmest Pladen liggende Jorddele følger Pladens Bevægelse nedad uden Forskydning til Siden. Der gøres nu den Antagelse, at den Dybde, i hvilken Jorddelenes Bevægelse til Siden først finder Sted, kan regnes at være lig  $2r$ , og at Brudgrænsen er bestemt ved, at det aktive Jordtryk  $e_a$  (pr. Arealenhed) indvendig i den lodrette Cylinderflade gennem Belastningspladens Kant, i nævnte Dybde  $2r$  er lig med det udvendig paa samme Cylinderflade virkende passive Jordtryk  $e_p$  (Fig. 117).

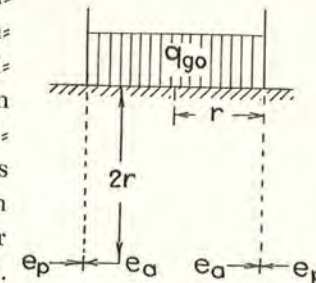


Fig. 117.

Idet Jordtrykkene forudsættes at være vandrette, og idet Jorden under Belastningspladen regnes at være paavirket af en ensformig fordelt Belastning  $q_{g_0}$ , haves:

$$e_a = (2 \gamma r + q_{g_0}) \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

og

$$e_p = 2 \gamma r \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right).$$

$e_a = e_p$  giver:

$$q_{g_0} = \frac{2 \gamma r}{\operatorname{tg}^4 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} \left[ 1 - \operatorname{tg}^4 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right].$$

Idet  $\operatorname{tg}^4 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$  for Friktionsjord kan regnes at være lille i Forhold til 1, faas heraf:

$$q_{g_0} = \frac{2 \gamma r}{\operatorname{tg}^4 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}. \quad (134)$$

For lang rektangulær Trykflade af Bredde  $b$  faas paa tilsvarende Maade:

<sup>1)</sup> Forsøg, ved hvilke man har udøvet Tryk paa en uden for en Glasvæg anbragt Sandmasse og ved fotografisk Optagelse med lang Eksponeringstid konstateret, hvorledes Sandkornene bevæger sig under Pladens Nedsynkning.



$$q_{g_0} = \frac{\gamma b}{\operatorname{tg}^4\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}. \quad (135)$$

For Friktionsvinklen  $\varphi$  angiver *Terzaghi*, at der her kan sættes:

$$\begin{aligned} \text{ved løst lejret Sand: } \varphi &= 33\frac{1}{3}^\circ, \\ \text{ved fast lejret Sand: } \varphi &= 54^\circ. \end{aligned}$$

Som det vil ses af (134) og (135), vokser *Brudgrænsen med Trykfladens Størrelse*.

Hvis Belastningspladen ligger i Dybden  $t$  under Jordbundens Overflade, sættes *Brudgrænsen*  $q_{g_t}$  til:

$$\text{for cirkulær Trykflade: } q_{g_t} = q_{g_0} \left[ 1 + \frac{t}{r} + a \left( \frac{t}{r} \right)^2 \right]. \quad (136)$$

$$\text{og for rektangulær Trykflade: } q_{g_t} = q_{g_0} \left[ 1 + \frac{t}{b} + a \left( \frac{t}{b} \right)^2 \right]. \quad (137)$$

Den heri indgaaende Størrelse  $a$  er en Materialkonstant, der navnlig er afhængig af Jordbundens Lejringsstæthed.  $a$  er desto mindre, jo løsere Lejringen er, og kan antagelig regnes at ligge mellem 0,07 og 0,25.

Proportionalitetsgrænsen  $q_p$  kan efter *Terzaghi* sættes til:

$$\begin{aligned} \text{ved løst lejret Sand: } q_p &= 0,25 q_g \\ \text{og ved fast lejret Sand: } q_p &= 0,5 q_g. \end{aligned}$$

**162. Brudgrænse-Formler; kohæsiv Jord.** Ved kohæsiv Jord er Forholdene, bl. a. paa Grund af, at Jordens større eller mindre Vandindhold her spiller en væsentlig Rolle, i det hele taget meget mere komplicerede, end Tilfældet er ved Friktionsjord. Det nedenfor anførte Udtryk<sup>1)</sup> til Bestemmelse af *Brudgrænsen* maa nærmest betragtes som en empirisk Formel, og denne og lignende Formlers Anvendelse er betinget af, at de i Formlerne indgaaende Materialkonstanter bestemmes ved Laboratorieforsøg med Prøver af den paagældende Jordbund.

Ved kohæsiv Jord menes det, at Belastningspladens Dybde under Jordbundens Overflade kun har ringe Indflydelse paa Størrelsen af *Brudgrænsen*.

<sup>1)</sup> Angaaende den i det følgende ganske kortfattet beskrevne Fremgangsmaade til Bestemmelse af *Brudgrænsen* henvises til: *Terzaghi: Erdbaumechanik*, 1925, og til *Bygningsstatistiske Meddelelser* 1930, Nr. 3: *A. E. Bretting: Tilladelig Belastning af Byggegrund, specielt Ler*.

Til Bestemmelse af *Brudgrænsen*  $q_g$  har *Terzaghi* angivet følgende Formel:

$$q_g = \frac{p_k}{\operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \left[ 1,5 + \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}\right) - \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) - \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}\right) \right] = C p_k, \quad (138)$$

hvor  $p_k$  er Kapillartrykket<sup>1)</sup> i Jordmassen,  $\varphi$  Friktionsvinklen for Bevægelse mellem Jorddelene og  $\varphi_0$  Friktionsvinklen mellem Jorddelene, naar Jordmassen er i Hvile. Bestemmelse af  $p_k$  maa ske ved Hjælp af Tryk-Poretalsdiagrammet<sup>2)</sup> for den paagældende Jordart. Mellem  $p_k$  og  $p_\varepsilon$ , hvor  $p_\varepsilon$  er det til Poretallet  $\varepsilon$  (i Tryk-Poretalsdiagrammet) svarende Tryk  $p$  (Lign. (20), § 65), bestaar efter *Terzaghi* Relationen:

$$p_k = \frac{1 + 2 \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}\right)}{3} p_\varepsilon. \quad (139)$$

Kender man Poretallet  $\varepsilon$  for den paagældende Jordart i naturlig Aflejring — dette, ligesom ogsaa Friktionsvinklerne  $\varphi$  og  $\varphi_0$ , maa findes ved Laboratorieundersøgelser af Jordprøver — faas det tilhørende  $p_\varepsilon$  af Tryk-Poretalsdiagrammet og derefter  $p_k$  af (139) og videre  $q_g$  af (138).

Idet de Grænser, inden for hvilke Størrelserne  $\operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$  og  $\operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}\right)$  varierer (efter Jordbundens Beskaffenhed), er ret snævre, vil den i (138) indgaaende Størrelse

$$C = \frac{1,5 + \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}\right) - \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) - \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}\right)}{\operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}$$

i Almindelighed ligge mellem 2 og 3.

Kapillartrykket varierer mere end Størrelsen  $C$  med Jordbundens Beskaffenhed og afhænger tillige, for samme Jordbundsart, i høj Grad af Jordmassens Konsistens. For to Slags Lerbund, I og II, hvis Sammensætning efter Kornstørrelse<sup>3)</sup> var:

	Sand og Mo	Groft Melsand	Fint Melsand	Lersubstans
I	47,5 0/0	19,3 0/0	4,9 0/0	28,3 0/0
II	11,5 0/0	18,4 0/0	28,5 0/0	41,6 0/0

<sup>1)</sup> § 46 o. flg.

<sup>2)</sup> § 65.

<sup>3)</sup> § 29.

fandt Terzaghi:

Konsistens:	I			II		
	$\varepsilon$	$p_k$ kg/cm <sup>2</sup>	$q_g$ kg/cm <sup>2</sup>	$\varepsilon$	$p_k$ kg/cm <sup>2</sup>	$q_g$ kg/cm <sup>2</sup>
Nogenlunde fast	0,49	110	332	0,4	200	406
Udrulningsgrænse	0,71	7,30	22,1	0,75	4,60	9,4
Stiv plastisk	0,96	0,80	2,42	0,98	1,08	2,2
Blød plastisk	1,21	0,35	1,06	1,22	0,47	0,96

163. Bestemmelse af Brudgrænsen ved Jordtryksberegning. Anvendelse af de af Coulomb's Jordtryksteori udledede simple Jordtryksberegninger til Bestemmelse af Brudgrænsen er betinget af, at der kan gøres den Forudsætning, at de ved Forskydningerne i Jordbunden opstaaende Glideflader er plane.

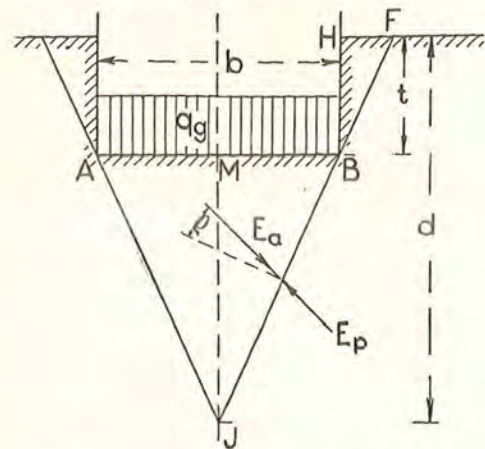


Fig. 118.

Jordtryk forudsættes at virke under en Vinkel lig med Jordens Skræntvinkel  $\varrho$  med Snitfladens Normal. Naar der i Trykfladen  $AB$  overføres en Belastning  $q_g$  til Jorden, er den lodrette Komponent af det aktive Jordtryk lig med Summen af de lodrette Kræfter:  $q_g \frac{b}{2}$  og Vægtene,  $G_1$  og  $G_2$  af de to Jordlegemer  $IMB$  og  $BHF$ . Det aktive Jordtryks Størrelse er saaledes en Funktion dels af  $q_g$  og Trykfladens Dybde  $t$  under Jordbundens Overflade, dels af Afstanden  $d$  fra  $I$  til Jordbundens Overflade, d. v. s. af Retningen for den valgte Snitflade.

Paa Snitfladens anden Side (i Figuren den højre Side) forudsættes at virke et passivt Jordtryk. Da Jordlegemet til venstre for Snitfladen bevæger sig nedad, hvis der sker Forskydning langs Snitfladen, antages ogsaa det passive Jordtryk at danne Vinklen  $\varrho$  med Snitnormalen, saaledes som angivet i Figuren.

Ved Benyttelse af denne Forudsætning kan Brudgrænsen findes paa følgende Maade.

I Fig. 118 er  $AB$  den Flade, i hvilken Trykket fra Belastningen overføres til Jorden. Trykfladens Længde er her forudsat at være stor i Forhold til Bredden  $b$ . Paa en, foreløbig vilkaarlig valgt, Snitflade  $IF$  i Jorden (og paa den med  $IF$  om Midtplanen  $IM$  symmetriske Snitflade) tænkes der at virke aktivt Jordtryk  $E_a$ , og dette

Bestemmer man nu paa den efter Coulomb's Jordtryksteori sædvanlige Maade Størrelsen af det til den valgte Snitflade svarende passive Jordtryk  $E_p$ , og sættes  $E_a = E_p$ , findes heraf den til den valgte Snitfladeretning svarende Værdi af  $q_g$  ved:

$$E_p^{(t)} = q_g \frac{b}{2} + G_1 + G_2.$$

Ved at man prøver sig frem med forskellige Stillinger af Snitfladen  $IF$ , findes den Snitfladeretning, som giver den mindste Værdi af  $q_g$ . Denne er da den søgte Brudgrænse.

Ved den her beskrevne Fremgangsmaade til Bestemmelse af Brudgrænsen er der imidlertid den uheldige Omstændighed, at man paa Grund af Snitfladen  $IF$ 's Hældning og paa Grund af, at det passive Jordtryks Retningslinie ligger neden for Snitfladens Normal, er inde paa

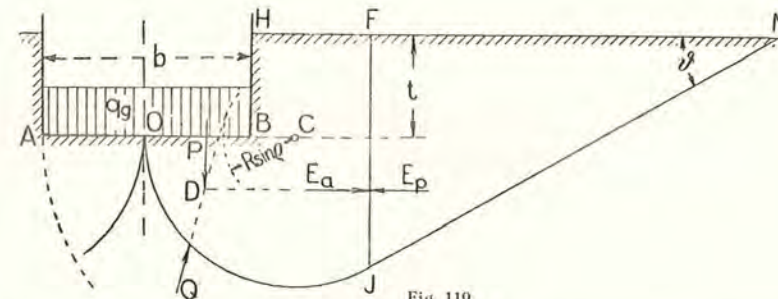


Fig. 119.

det Omraade af Jordtryksberegninger, hvor Anvendelse af Forudsætningen om plan Glideflade fører til fejlagtige og til for store Værdier for passivt Jordtryk<sup>1)</sup>. Bestemmelse af Brudgrænsen paa den her angivne Maade giver derfor i Reglen meget lidt paalidelige og i mange Tilfælde ganske misvisende Resultater.

Noget bedre Resultater opnaas ved, at man, saaledes som foreslaet af Krey, til Bestemmelse af Brudgrænsen benytter de til Forudsætningen om cirkulærcylindriske Glideflader svarende Jordtryksregler. Brudgrænse-Bestemmelsen foretages da paa følgende Maade.

Den til det aktive Jordtryk hørende Glideflade er i Fig. 119 fremstillet ved Cirklen med Centrum  $C$  i Højde med Trykfladen  $AB$  og med Radius  $R = OC$ . Idet den Snitflade  $IF$ , paa hvis to Sider der tænkes at virke henholdsvis aktivt Jordtryk og passivt Jordtryk, forudsættes at være lodret, og idet Jordtrykkene antages at virke vandret, kan der her for det passive Jordtryks Vedkommende regnes med plan

<sup>1)</sup> §§ 133 og 137.

Glideflade. Naar Jordoverfladen er vandret, saaledes som her forudsat, vil denne Glideplans Hældningsvinkel være:  $\vartheta = 45^\circ - \frac{\rho}{2}$ . Snitfladen  $IF$  er da bestemt ved Tangenten  $IN$  med Hældningsvinkel  $\vartheta$ .  $OI$  er den til det aktive Jordtryk hørende Glideflade,  $IN$  den til det passive Jordtryk hørende Glideplan. Trykcentret for det passive Jordtryk  $E_p$  i Snitfladen  $IF$  regnes at ligge i Højden  $\frac{1}{3} \overline{IF}$  over  $I$ , og i samme Punkt forudsættes det aktive Jordtryk  $E_a$  at angribe.  $E_a$  er Resultanten af de lodrette Kræfter  $q_g \frac{b}{2}$  og Vægten  $G$  af Jordlegemet  $OIFHB$  samt Reaktionen  $Q$  i Glidefladen. Retning og Angrebspunkt for  $Q$  bestemmes da, idet  $Q$  regnes at danne Vinklen  $\rho$  med Glidefladenormalen i Angrebspunktet <sup>1)</sup>, ved Tangenten gennem  $D$  til Cirklen med Centrum  $C$  og Radius  $R \sin \rho$ , idet  $D$  er Skæringspunktet mellem Kraftlinien for  $E_p$  og Kraftlinien for Resultanten  $P$  af  $G$  og  $q_g \frac{b}{2}$ . Man kan nu bestemme  $E_a$  ved en Krafttrekant  $P-Q-E_a$ .  $E_a$  ses at være Funktion saavel af  $q_g$  som af  $G$ , d. v. s. Funktion, foruden af  $q_g$ , tillige af den valgte Radius  $R$  og af Afstanden  $t$  fra Trykfladen til Jordbundens Overflade.

For  $E_p$  haves:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma \overline{IF}^2 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\rho}{2} \right),$$

og af  $E_a = E_p$  findes den til den valgte Beliggenhed af Centret  $C$  svarende Værdi for  $q_g$ . Ved Prøvedregninger med forskellig Beliggenhed af Centret  $C$  kan man bestemme den Beliggenhed af  $C$ , der giver den mindste Værdi for  $q_g$ , og denne er da den søgte Brudgrænse. Det er her forudsat, at Jorden under Trykfladen, naar Brudgrænsen overskrides, viger ud til begge Sider, symmetrisk i Forhold til den lodrette Plan gennem Trykfladens Midte. Dette behøver imidlertid ikke at være Tilfældet. Bestemmelse af Brudgrænsen paa tilsvarende Maade som beskrevet kan ske ogsaa under Forudsætning af Bevægelse af Jorden alene til den ene Side. Man skal da blot lade de cirkulærcylindriske Glideflader, der prøves med, gaa gennem Trykfladens Kant, f. Eks. saaledes som antydet i Figuren ved den punkteret viste Cirkel gennem  $A$ .

Den her angivne Fremgangsmaade lader sig ogsaa let anvende i de Tilfælde, hvor man har at gøre med kohæsiv Jord, og hvor man i Udregningen vil indføre Kohæsionens Indflydelse paa Størrelsen af Brudgrænsen. For det Tilfælde, at Friktionens Indflydelse er ganske ringe i Forhold til Kohæsionens, angiver *Krey* som omtrentlig Værdi for Brudgrænsen:

<sup>1)</sup> § 137.

$$q_g = 6,6 \left( 1 + \frac{t}{b} \right) c, \quad (140)$$

hvor  $c$  er Kohæsionen pr. Arealenhed, og  $b$  og  $t$  henholdsvis Trykfladens Bredde og dens Dybde under Jordbundens Overflade.

### 3. Det til Jordbunden overførte Tryks Fordeling.

**164. Trykkets Fordeling langs Belastningsfladen.** Ved Dimensionering af Fundamenter gaar man med Hensyn til Bestemmelsen af de paa Jordbunden virkende Tryk i Almindelighed ud fra, at Anlægsfladen mellem Fundamentet og Jordbunden kan betragtes som Snitflade i et Legeme, for hvilket *Hooke's Lov* gælder. En paa en fuldstændig stiv Plade centralt virkende Kraft, ligesom ogsaa en over Pladen ensformig fordelt Belastning, regnes herefter at frembringe lige store Tryk i alle Punkter af Anlægsfladen mellem Jordbunden og Pladen, og for en ekscentrisk virkende Kraft bestemmes de i Jordbundens Overflade optrædende Tryk paa sædvanlig Maade efter de ved Spændingsberegning for faste Legemer anvendte Regler, idet der regnes med retlinet Spændingsfordeling.

Ved den nævnte Forudsætning opnaas det, at Spændingsberegningerne bliver ganske simple. De Spændinger, der findes ved en saadan simpel Beregningsmaade, afviger imidlertid i mange Tilfælde betydeligt fra de virkelig optrædende Tryk.

Nogle i de senere Aar fremkomne Oplysninger om Trykfordelingen, for saa vidt angaar *Sandbund*, skyldes *F. Kögler* og *A. Scheidig* <sup>1)</sup>, der har foretaget en Række i Laboratorium udførte Forsøg vedrørende dette Spørgsmaal. Forsøgene omfattede Maalinger af Tryk paa forskellige Steder tæt under en belastet stiv Plade. Til Maalingerne anvendtes nogle smaa cylindriske Metaldaaser, der var forsynet med Membranlukke og fyldt med Vædske. Daaserne anbragtes i Jordbunden (Sand) tæt under Pladen, og idet der fra hver Daase var ført et vædskefyldt Rør ud til en med Manometer forsynet Pumpe, kunde man maale det Tryk, der var fornødent for at hindre Sandet i at presse Membranen indad, og saaledes maale Trykkene paa de forskellige Steder under den belastede Plade.

Trykfordelingen for en paa en cirkulær Plade med Areal  $F$  centralt virkende Kraft  $P$  ( $p_0 = \frac{P}{F}$ ), er fremstillet i Fig. 120. Ved ikke alt for stor Belastning fandtes Trykfordelingen langs Trykfladens Diameter at være omtrent parabolisk, ved forholdsvis stor Belastning var Trykforde-

<sup>1)</sup> Die Bautechnik, 1929.

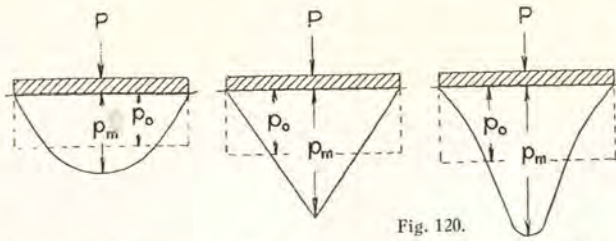


Fig. 120.

lingsfiguren en Tre-  
kant, og ved Belast-  
ning op mod Brud-  
grænsen en »klokke-  
formet« Figur som  
vist. Foren Plade med  
Diameter  $d = 30$  cm

fandtes det største Tryk  $p_m$  i Midten, svarende til de nævnte 3 Grader af Trykpaavirkning, at være  $(p_o = \frac{P}{F})$ :

- $p_m = 2 p_o$  (Omdrejningsparaboloide),
- $p_m = 3 p_o$  (Kegleflade),
- $p_m > 3 p_o$  (»Klokke«).

For en lang rektangulær Plade fandtes for de nævnte Belastnings-  
grader:

$$p_m = 1,5 p_o, \quad p_m = 2 p_o \quad \text{og} \quad p_m > 2 p_o.$$

Til Oplysning om Trykfordelingens Afhængighed af Trykarealets Størrelse udførtes Forsøg med Plader paa indtil 100 cm Diameter. Af Resultaterne udedes den i Fig. 121 viste Afhængighed mellem  $p_m$  (angivet i % af  $p_o$ ) og Fladens Størrelse, dennesidsteangivet, for cirkulær Trykflade (I), ved dennes Diameter  $d$ , og for lang rektangulær Trykflade (II) ved Bredden  $b$ .

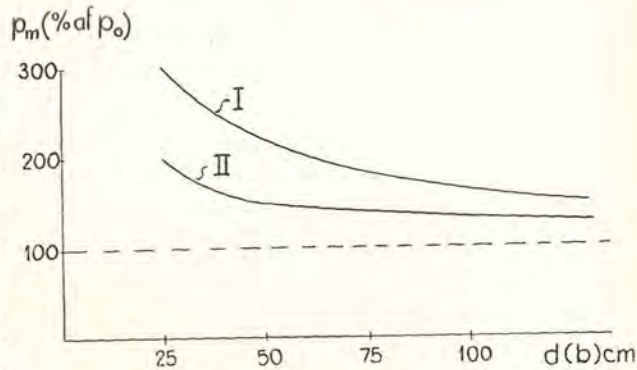


Fig. 121.

Som det vil ses af Figuren, aftager  $\frac{p_m}{p_o}$  med voksende  $d$  eller  $b$ . Ved store Fundamentsflader er den Fejl, der begaas, ved at man regner med ensformig fordelt Tryk paa Byggegrunden, derfor mindre betydende.

Ved en ekscentrisk belastet rektangulær Plade af Brede  $b$ , hvor den ydre Kraft  $P$  virker i Afstanden  $\frac{1}{3} b$  fra Fladens Kant, kommer man ved Anvendelse af den almindelige Spændingsberegning (Hooke's Lov) til en Spændingsfordeling som vist i Fig. 122, nemlig med største Tryk ved den nærmest den ydre Kraft værende Kant ( $\sigma_{maks} = 2 p_o = \frac{2 P}{b}$ ). Efter de udførte Maalinger maa Trykfordelingen imidlertid antages at

være omtrent saaledes, som angivet i Fig. 123, den krumme Linie gældende for mindre Tryk, Trekantsfordelingen gældende for store Tryk.

Dersom den ydre Krafts Angrebepunkt ligger nær ved Fundamentsfladens Forkant, er det Areal af Fundamentsfladen, gennem hvilket Trykket overføres til Grunden, lille. I Fig. 124 er angivet den Trykfordeling, der svarer til den almindelig anvendte Spændingsberegning ( $\sigma_{maks} = \frac{2 P}{3 \xi}$ ).

Trykket ved Fundamentsfladens Kant er imidlertid i Virkeligheden Nul, og da, som ovenfor nævnt, Maksimaltrykket kan blive væsentlig større end Gennemsnittrykket, naar Trykfladen er lille, kan det godt indtræffe, at det største Tryk i Virkeligheden bliver noget større end det beregnede  $\sigma_{maks} = \frac{2 P}{3 \xi}$ .

I Almindelighed vil der ved Dimensionering af et Fundament være flere forskellige Belastningstilfælde at tage i Betragtning<sup>1)</sup>. Af det anførte fremgaar, at der kan være Anledning til at regne med en mindre Værdi for tilladeligt Tryk paa Byggegrunden for de Belastningstilfælde, ved hvilke Trykcentret falder forholdsvis nær ved Fundamentsfladens Kant, end for de Belastningstilfælde, hvor Resultanten af Kræfterne virker centralt eller omtrent centralt paa Fundamentsfladen.

Om Trykfordelingen ved *kohæsive Jordarter* havs ikke tilsvarende, ved Belastningsforsøg som de ovenfor omtalte, erhvervet Kendskab. Det antages, at Trykfordelingen ved Ler er omtrent saaledes som vist i Fig. 125, *a* gældende for stærkt kohæsivt Ler, f. Eks. Ler med vandfyldte Porer og stort Kapillartryk (stor uægte Kohæsion), eller Ler med stor ægte Kohæsion, *b* gældende for Ler med ringe Kohæsion, f. Eks. Ler under Vand (Kapillartrykket udlignet), og med ringe ægte Kohæsion. Ved Klippebund antages Trykfordelingen at være saaledes som vist i Fig. 125 *c*.

**165. Spændingsfordelingen i Jordbunden.** En meget simpel, men ogsaa ganske raat tilnærmende Fremstilling af Spændingsfordelingen i

<sup>1)</sup> Afsnit V. § 182.

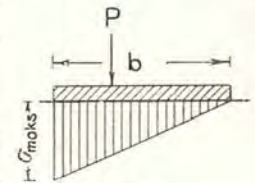


Fig. 122.

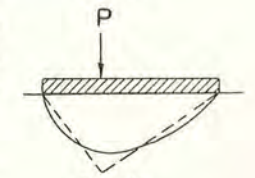


Fig. 123.

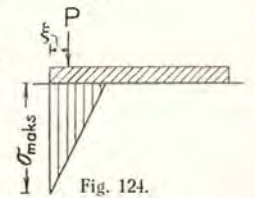


Fig. 124.

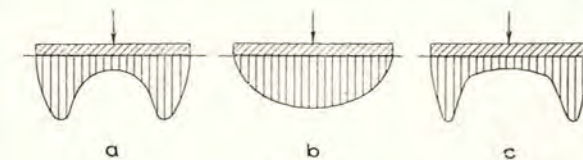


Fig. 125.

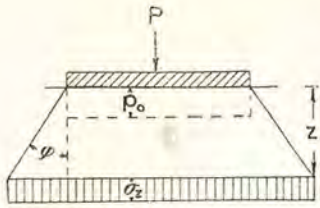


Fig. 126.

Jordbunden kommer man til ved at antage, at en paa en Plade (Fig. 126) centralt virkende Kraft frembringer et over hele Trykfladen ensformig fordelt Tryk  $p_0$ , og at Trykket herfra spreder sig over et Jordlegeme, der begrænses af en Flade med retlinede Frembringere gennem Trykfladens

Kontur og under en Vinkel  $\varphi$  med den ydre Kraft  $P$ 's Retning, idet man da regner, at Spændingen  $\sigma_z$  i enhver Snitplan, vinkelret paa Kraftretningen og i Afstanden  $z$  fra Trykfladen er lige stor overalt i hele den paagældende Snitplan. Idet  $\sigma_z$  saaledes, naar Kraften er lodret og Trykfladen vandret, aftager med voksende Dybde  $z$  under Trykfladen, faas for et cirkulært Trykareal:

$$\sigma_z = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(d + 2z \operatorname{tg} \varphi)^2} = \frac{p_0}{\left(1 + 2\frac{z}{d} \operatorname{tg} \varphi\right)^2} \quad (141)$$

Vinklen  $\varphi$  sættes ofte lig  $45^\circ$ . Ret almindeligt er det ogsaa, at sætte  $\varphi$  lig med Jordfriktionsvinklen eller lidt mindre end Jordfriktionsvinklen.

Den her nævnte Beregningsmaade er, eller har i det mindste hidtil været, almindelig anvendt i Praksis. Spændingsforholdene i Jorden under en belastet Flade er imidlertid i Virkeligheden langt mere komplicerede, end hvad der svarer til det ovenfor anførte. Navnlig gælder dette Spændingsfordelingen i de vandrette Snitplaner i Jordbunden, idet Spændingsfordelingen i disse afviger meget fra at være ensformig.

Af nyere Undersøgelser vedrørende Spændingsfordelingen i Jordbunden skal nævnes de af Kögler og Scheidig udførte <sup>1)</sup>. Til Maaling af de af en Belastning paa en Sandmasses Overflade fremkaldte Spændinger forskellige Steder i Sandmassen anvendtes ved disse Undersøgelser de i § 164 omtalte MaaleDaaser.

De ved nogle af Trykmaalingerne fundne Spændingsfordelinger er fremstillet i Fig. 127. Trykfladen var her cirkulær, med Diameter 45 cm.

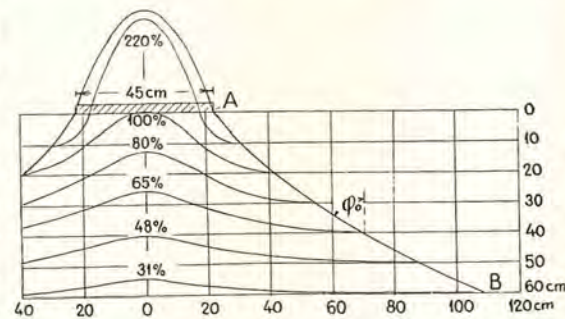


Fig. 127.

<sup>1)</sup> Die Bautechnik, 1929. Tidligere Undersøgelser af: Boussinisq, Kick, Steiner (Den tekniske Højskole i Prag, 1879), Strohschneider (Graz, 1911), Goldbeck, Enger (U. S. A., 1914—17).

Ordinaterne til de viste Kurver, regnet fra den paagældende Snitplan, angiver Størrelserne af de lodrette Spændinger i de forskellige Punkter af Skæringslinierne mellem en Diametralplan og de vandrette Snitplaner, (udtrykt i Procent af Trykket  $p_0$ , hvor  $p_0 = \frac{P}{F}$ ). De paaskrevne Tal angiver Størrelsen af Spændingerne under Trykfladens Centrum.

En anden Fremstillingsmaade af Spændingsfordelingen er vist i Fig. 128. Hver af de her viste Kurver gaar gennem Punkter med samme lodrette Tryk. Den oven over Jordoverfladen tegnede Kurve gælder Trykkene langs Belastningsfladen.

Som det ses af Figuren, er den Del af Jordbunden, hvori Spændingerne er nogenlunde store, og i hvilken Jordens Sammentrykning derfor hovedsagelig finder Sted, begrænset til et ret lille Omraade. Det inden for dette Omraade liggende Jordlegeme kan betegnes som: *Kompressionsomraadet*. Den oven over Linien  $AB$  ( $0\% =$  Linien, *Nul-Tryk-Fladen*) liggende Del af Jorden er upaavirket af Belastningen.

For en cirkulær Trykflade fandtes følgende Værdier for Vinklen  $\varphi_0$  mellem Vertikalen og Tangenten til Nul-Tryk-Fladens Diametralsnit, (Fig. 127):

$z =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	cm
$\varphi_0 =$		$35^\circ$	$40^\circ$	$45^\circ$	$50^\circ$	$55^\circ$	$60^\circ$	$65^\circ$	$70^\circ$	$75^\circ$	$80^\circ$	$82^\circ$	$85^\circ$

Nul-Tryk-Fladen breder sig i en vis Dybde (1,0 til 1,2 m) meget stærkt og nærmer sig her asymptotisk til den vandrette Plan.

Paa Grundlag af de foretagne Undersøgelser har Kögler og Scheidig angivet den i det følgende anførte Fremgangsmaade til Beregning af de af en lodret Belastning fremkaldte Spændinger i Jordbunden.

Ved Beregning af Spændingerne i Jordbunden maa der skelnes mellem de Tilfælde, hvor Spændingerne hidrører fra en paa et ganske lille Areal af Jordoverfladen koncentreret Belastning, og herunder mellem »Punkt«-Belastning og »Linie«-Belastning, og de Tilfælde, hvor Spændingerne hidrører fra en over et nogenlunde stort Areal fordelt Belastning (Fladebelastning), og herunder atter mellem de Tilfælde, hvor Tryk-

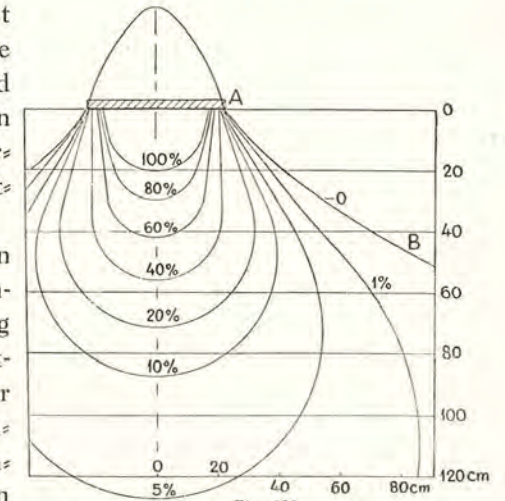
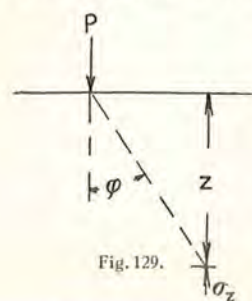


Fig. 128.

arealet er cirkulært eller af sammentrængt Form (lille Perimeter i Forhold til Arealet), og de Tilfælde, hvor Trykfladen er langagtig (rektangulær, stor Perimeter i Forhold til Arealet).

Spørgsmaalet om, hvorvidt man i givet Tilfælde har at gøre med Punktbelastning (Liniebelastning), eller med Fladebelastning, maa afgøres under Hensyntagen til, i hvilken Dybde  $z$  under Jordoverfladen det Punkt ligger, hvori Spændingen skal bestemmes. Efter Kögler og Scheidig's Forslag kan man regne med Punktbelastning (Liniebelastning), naar  $z > d$ , hvor  $d$  er Trykfladens Diameter (ved cirkulær Trykflade) eller Trykfladens Bredde (ved langagtig Trykflade).



For en Punktbelastning (Fig. 129) haves den af Boussinesq udledede Formel, gældende for en vægtløs, homogen kornet Masse:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \cos^5 \varphi, \quad (142)$$

hvor  $\sigma_z$  er den lodrette Komponent af Spændingen i det betragtede Punkt af Massen. Den ved (142) bestemte Kurve ( $\sigma_z$  og  $\varphi$  variable) har en lignende Form, som de i Fig. 127 viste Kurver.

For Liniebelastning haves (Melan) med tilsvarende Betegnelser:

$$\sigma_z = \frac{2P}{\pi z} \cos^4 \varphi. \quad (143)$$

Formlerne (142) og (143) forudsætter imidlertid, at Massen er homogen, og for den under Nul-Tryk-Fladen værende Jordmasses Vedkommende kan der ikke gøres denne Forudsætning, fordi den af Belastningen forårsagede Kompression er ulige fordelt i dette Jordlegeme. For Spændingerne i denne Del af Jordmassen har Strohschneider opstillet følgende Formler:

$$\text{for Punktbelastning: } \sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \frac{(\cos \varphi - \cotg \varphi_0 \sin \varphi) \cos^4 \varphi}{1 - \cos \varphi_0} \quad (144)$$

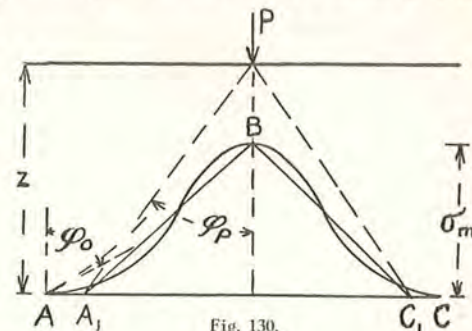
$$\text{for Liniebelastning: } \sigma_z = \frac{P}{z \varphi_0} (\cos \varphi - \cotg \varphi_0 \sin \varphi) \cos^3 \varphi, \quad (145)$$

hvori Vinklen  $\varphi_0$  (i Nævneren i (145) indgaaende som rent Tal) er Vinklen mellem Vertikalen og Tangenten til den Kurve, der faas som Skæring mellem Nul-Tryk-Fladen og en Plan gennem  $P$  (for Liniebelastning: vinkelret paa Belastnings-Linien) i det i Dybden  $z$  liggende Punkt af nævnte Kurve.

Der indføres nu den Simplifikation ved Bestemmelsen af Spændingerne i en vandret Plan, at man i Stedet for at regne med den ved (144) eller (145) bestemte Spændingsfordeling (den til en Kurve som

$ABC$  i Fig. 130 svarende Fordeling) regner med en Trekantsfordeling  $A_1BC_1$  med samme maksimale Spænding i Punktet lodret under Belastningen som den, der faas af (144) eller (145). Vinklen  $\varphi_p$ , der for den paagældende vandrette Plan giver Grænsen for det Areal  $f$ , over hvilket Trykket med Tilnærmelse regnes fordelt, faas af:

$$\int \sigma_z df = P.$$



Grænsevinklen  $\varphi_0$  er efter de af Kögler og Scheidig udførte Forsøg umiddelbart ved Jordoverfladen ca.  $35^\circ$ – $40^\circ$  og naar i en Dybde af 1,0–1,2 m sin største Værdi:  $90^\circ$ .

For Punktbelastning faas efter det foran anførte den største Spænding  $\sigma_m$  i Dybden  $z$  (for  $\varphi = 0$ ):

$$\sigma_m = \frac{3P}{2\pi z^2 (1 - \cos \varphi_0)}.$$

Endvidere haves:  $\int \sigma_z df = P$ , d. v. s., at Rumfanget af Keglen med Højden  $\sigma_m$  og Grundfladen  $A_1C_1$  skal være lig  $P$ :

$$P = \sigma_m \frac{\pi}{3} z^2 \tg^2 \varphi_p = \frac{3P}{2\pi z^2 (1 - \cos \varphi_0)} \frac{\pi}{3} z^2 \tg^2 \varphi_p,$$

$$\tg^2 \varphi_p = 2(1 - \cos \varphi_0).$$

Heraf faas følgende sammenhørende Værdier:

Virkelig Grænsevinkel:	$\varphi_0 = 40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$
Erstatnings-Grænsevinkel:	$\varphi_p = 35^\circ$	$40^\circ$	$45^\circ$	$50^\circ$	$55^\circ$
Største Spænding:	$\sigma_m = 2,04$	1,34	0,96	0,65	$0,478 \frac{P}{z^2}$

Værdien  $0,478 \frac{P}{z^2}$ , der efter det ovenfor anførte gælder for Sandbund og under Forudsætning af, at  $z > \text{ca. } 1,2 \text{ m}$ , angives ogsaa at gælde for fastlejret kohæsiv Jordbund og Klippebund, og da for alle Værdier af  $z$ .

For Liniebelastning faas paa tilsvarende Maade af (145) for  $\varphi = 0$ :

$$\sigma_m = \frac{P}{\varphi_0 z},$$

og, idet  $P$  er Belastningen pr. Længdeenhed af Linien, giver  $\int \sigma_z df = P$ :

$$P = \frac{1}{2} \sigma_m 2z \tg \varphi_p = \frac{P}{\varphi_0 z} z \tg \varphi_p, \quad \tg \varphi_p = \varphi_0.$$

Heraf faas følgende sammenhørende Værdier:

Virkelig Grænsevinkel:	$\varphi_o = 40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$
Erstatnings-Grænsevinkel:	$\varphi_p = 35^\circ$	$40^\circ$	$46^\circ$	$52^\circ$	$57,5^\circ$
Største Spænding:	$\sigma_m = 1,43$	$1,15$	$0,96$	$0,76$	$0,64 \frac{P}{z}$

Værdien  $0,64 \frac{P}{z}$  angives at gælde almindeligt for Klippebund og fast kohæsiv Jordbund, samt for Sandbund, naar  $z > \text{ca. } 1,2 \text{ m}$ .

I Tilfælde af, at der haves *Fladebelastning*, kan tilsvarende Formler udledes, ved at man behandler den paa hvert Element af Trykfladen faldende Del af  $P$  som Punktbelastning i Forhold til den paagældende vandrette Snitplan i Dybden  $z$ , og summerer de fra alle Elementbelastningerne hidrørende Bidrag til Spændingerne  $\sigma_z$  i Snitplanen. Størrelserne af Elementbelastningerne afhænger imidlertid af, hvorledes Trykket umiddelbart under Trykfladen er fordelt (§ 164).

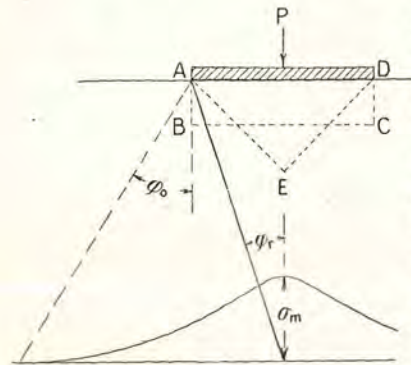


Fig. 131

For *cirkulær Trykflade* og under Forudsætning af, at Trykket umiddelbart under Trykfladen regnes ensformigt fordelt (Fig. 131:  $A B C D$ ), faas paa denne Maade for Spændingen  $\sigma_m$  lodret under Trykfladens Centrum:

$$\sigma_m = \frac{p_o}{1 - \cos \varphi_o} (1 - \cos^3 \varphi_r - \cotg \varphi_o \sin^3 \varphi_r), \quad (146 a)$$

hvor, idet  $F$  er Trykfladens Areal,  $p_o = \frac{P}{F}$ , og  $\varphi_r$  er Vinklen mellem Vertikalen og Linien fra det paagældende Punkt i Snitfladen til Randen af Trykfladen.

Forudsættes Trykket umiddelbart under Trykfladen trekantsfordelt (Fig. 131:  $A E D$ ), faas:

$$\sigma_m = \frac{3 p_o}{1 - \cos \varphi_o} (1 - \cos \varphi_r) (1 - \cotg \varphi_o \tg \frac{\varphi_r}{2}). \quad (147 a)$$

Formlerne (146 a) og (147 a) gælder for Sandbund.

For fast kohæsiv Jordbund angives, svarende til henholdsvis (146 a) og (147 a):

$$\sigma_m = p_o (1 - \cos^3 \varphi_r), \quad (146 b)$$

$$\text{og} \quad \sigma_m = 3 p_o (1 - \cos \varphi_r). \quad (147 b)$$

For *rektangulær Trykflade* og under Forudsætning af, at Trykket umiddelbart under Trykfladen er ensformigt fordelt, haves:

$$\sigma_m = \frac{p_o}{2 \varphi_o} [\sin 2 \varphi_r + 2 \varphi_r - \cotg \varphi_o (1 - \cos 2 \varphi_r)], \quad (148 a)$$

og med Trekantsfordeling af Trykket umiddelbart under Trykfladen:

$$\sigma_m = \frac{2 p_o}{\varphi_o} [\varphi_r - \cotg \varphi_o (1 - \varphi_r \cotg \varphi_r)], \quad (149 a)$$

begge Formler gældende for Sandbund.

De tilsvarende Udtryk for fast kohæsiv Jordbund er:

$$\sigma_m = \frac{p_o}{\pi} (2 \varphi_r + \sin 2 \varphi_r), \quad (148 b)$$

$$\text{og} \quad \sigma_m = \frac{4 \varphi_r}{\pi} p_o. \quad (149 b)$$

#### 4. Bestemmelse af Jordbunds Bæreevne ved Prøvebelastning.

166. I de Tilfælde, hvor det, f. Eks. af Hensyn til det paagældende Bygværks særlige Konstruktion, er nødvendigt at have Kendskab til, hvor meget Jordbunden vil give efter for de fra Bygværket til Byggegrunden overførte Tryk, maa der foretages Prøvebelastning paa Byggegrunden. Prøvebelastning er ogsaa nødvendig i de Tilfælde, hvor man f. Eks. paa Grund af, at Jordbundens Beskaffenhed som Byggegrund er mindre god, ønsker at gaa saa nær til Grænsen for Jordbundens Bæreevne som mulig, og hvor det tilladelige Tryk paa Byggegrunden derfor ikke kan bestemmes ud fra saadanne — ellers i almindelig Byggepraksis anvendte — omtrentlige Værdier for tilladelig Belastning, som de i § 89 anførte.

Ved Belastning af en paa Jordbunden anbragt Plade og Maaling af Pladens Nedsynkninger, efterhaanden som Trykket forøges, faas de Data, der er fornødne til Optegning af en Arbejdslinie for Jordbunden. Af denne Arbejdslinie findes Jordbundens Brudgrænse og dens Proportionalitetsgrænse samt Størrelsen  $c$  i det til Formel (133)<sup>1)</sup> svarende Udtryk:

$$s = \frac{P}{c F}, \quad (150)$$

<sup>1)</sup> Side 151.

hvor  $s$  er Nedsynkningen,  $P$  Belastningen paa Trykfladen,  $F$  dennes Areal og  $c$  en Koefficient (Nedsynkningstallet).

Af Bekostningshensyn er man nødsaget til ved Prøvebelastning at anvende et i Forhold til Bygværkets Fundamentsflade ret lille Trykareal. Nedsynkningens Størrelse, for samme Tryk pr. Arealenhed, er imidlertid i nogen Grad afhængig af Trykarealets Størrelse og Form, og ved fin-kornet Jord med vandfyldte Porer tillige af Belastningens Varighed. Endvidere har Trykfordelingen umiddelbart under Trykfladen og Trykfordelingen i Jordbunden under Trykfladen ogsaa nogen Indflydelse paa Nedsynkningens Størrelse. Man kan derfor ikke, uden at der derved begaas en vis Fejl, sætte den tilladelige Belastning paa Byggegrunden lig med den Belastning, ved hvilken der ved Prøvebelastningen faas en Nedsynkning af samme Størrelse, som den for det paagældende Bygværk som tilladelig fastsatte Nedsynkning.

**167. Nedsynkningens Afhængighed af Trykfladens Størrelse.** Hvis Trykfordelingen forudsættes at være ensformig fordelt saavel umiddelbart under den Plade, gennem hvilken Trykket overføres til Jordbunden, som i de vandrette Snit i Jordbunden, saaledes som omtalt Side 168, og der endvidere gøres den samme Sted omtalte Forudsætning med Hensyn til Trykkets Spredning i Jordmassen, kan der anstilles følgende Betragtning vedrørende Afhængigheden mellem Nedsynkning og Trykfladens Størrelse, for saa vidt angaar Tryk indtil Proportionalitetsgrænsen. For Simpelt Skyld regnes her med, at Trykfladen er kvadratisk. Er Trykfladens Sidelinie  $b$ , og Belastningen  $p_o b^2$ , vil efter de ovenfor anførte Forudsætninger Spændingen i Dybden  $h$  være (Fig. 132):

$$\sigma_h = \frac{p_o b^2}{(b + 2 h \operatorname{tg} \varphi)^2}.$$

Dybden  $h$  antages at være den, i hvilken Spændingen som Følge af Spredningen over den større Flade er reduceret til en saadan Størrelse, at Trykket her netop ikke frembringer nogen Sammentrykning af Jorden under den i Dybden  $h$  liggende Plan.

I Dybden  $y$  er Spændingen:

$$\sigma_y = \frac{p_o b^2}{(b + 2 y \operatorname{tg} \varphi)^2},$$

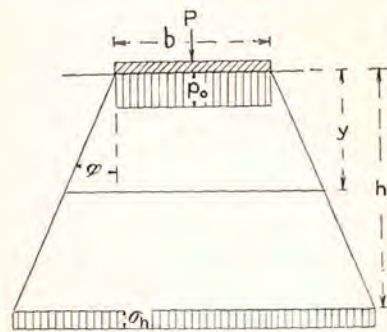


Fig. 132.

d. v. s. at Nedsynkningerne af de to Belastningsplader, for samme Tryk pr. Arealenhed, forholder sig som Trykarealernes Sidelinier. For cirkulær Trykflade findes paa tilsvarende Maadé, at Nedsynkning er proportional med Trykfladens Diameter.

og idet det yderligere antages, at Hooke's Lov kan regnes at gælde for det af Trykket paavirkede Jordlegeme, faas for Sammentrykningen  $ds$  af det i Dybden  $y$  liggende Jordlag af Tykkelse  $dy$ :

$$ds = \frac{\sigma_y dy}{E}.$$

hvor  $E$  er et af Jordbundens Beskaffenhed afhængigt Elasticitetstal, og heraf Belastningspladens Nedsynkning:

$$s_1 = \int_0^h \frac{\sigma_y dy}{E} = \int_0^h \frac{p_o b^2 dy}{E (b + 2 y \operatorname{tg} \varphi)^2} = \frac{p_o b h}{E (b + 2 h \operatorname{tg} \varphi)}.$$

For en Trykflade med Sidelinie  $B$  ( $> b$ ) og med samme Tryk  $p_o$  pr. Arealenhed, altsaa en total Belastning  $p_o B^2$ , er den Dybde  $H$ , i hvilken Trykket er saa vidt reduceret i Størrelse, at der ikke sker Sammentrykning af den under Planen i Dybden  $H$  liggende Del af Jordbunden, større end den til den lille Trykflade svarende Grænsedybde  $h$ . Dybden  $H$  bestemmes af:

$$\begin{aligned} \sigma_h &= \sigma_H, \\ \frac{p_o b^2}{(b + 2 h \operatorname{tg} \varphi)^2} &= \frac{p_o B^2}{(B + 2 H \operatorname{tg} \varphi)^2}, \\ H &= \frac{B}{b} h. \end{aligned}$$

Nedsynkning  $s_2$  af den større Belastningsplade findes ved en lignende Udregning som ovenfor:

$$s_2 = \int_0^{\frac{B}{b} h} \frac{p_o B^2 dy}{E (B + 2 y \operatorname{tg} \varphi)^2} = \frac{p_o B h}{E (b + 2 h \operatorname{tg} \varphi)}.$$

Man faar heraf:

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{B}{b}, \quad (151)$$

Som det fremgaar af §§ 164—165, kan de virkelige Forhold med Hensyn til Trykfordelingen umiddelbart under Belastningspladen og i



Jordbunden imidlertid ikke antages at være saa simple, som forudsat ved Udledelsen af (151), og den ved denne Relation udtrykte Afhængighed mellem Trykfladens Dimension og Nedsynkningen kan derfor heller ikke ventes at være overensstemmende med de virkelige Forhold.

Om forsøgmæssige Undersøgelser vedrørende Nedsynkningens Afhængighed af Trykfladens Størrelse foreligger der fra forskellige Sider en Del Beretninger. Resultaterne af de deri omtalte Undersøgelser er imidlertid saa forskellige indbyrdes, at det maa siges, at der endnu mangler en Del i, at Problemet om Nedsynkningernes Afhængighed af

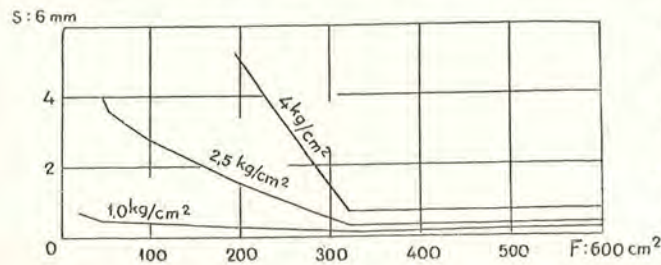


Fig. 133.

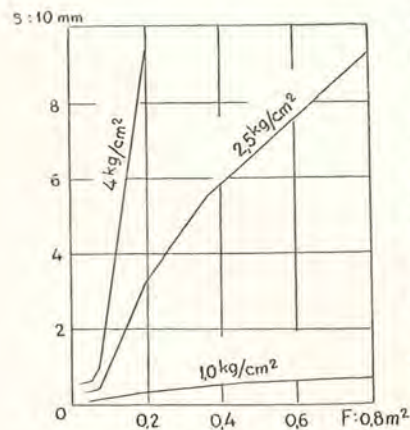


Fig. 134.

Trykfladens Størrelse er løst paa en saadan Maade, at der kan opstilles Regler til Anvendelse i Praxis ved Forudberegning af et Bygværks Nedsynkning paa Grundlag af Kendskab til Nedsynkningsforholdene ved en Probebelastning paa en lille Trykflade.

For Jordbund bestaaende af fedt Ler regnes — men kun som raa Tilnærmelse — med, at Nedsynkningen for cirkulært Trykareal er proportional med Trykarealets Diameter, og for langt rektangulært Trykareal proportional med Trykarealets Bredde<sup>1)</sup>.

Med Hensyn til Forholdene ved Sandbund angives det en Del Steder, i Litteraturen, at Trykfladens Størrelse ingen Indflydelse har paa Nedsynkningernes Størrelse. Dette synes dog,

efter Resultaterne af de nedenfor omtalte, af H. Press og F. Køgler udførte Forsøg at dømme, ikke at være rigtigt. At nogle Undersøgelser har givet til Resultat, at Trykfladens Størrelse ingen Indflydelse har paa Nedsynkningerne, kan maaske tilskrives den Omstændighed, at de paa gældende Forsøg er blevet udført med temmelig smaa Belastningsplader.

I Fig. 133 og 134 er fremstillet Resultater af nogle af H. Press<sup>2)</sup> og

<sup>1)</sup> Betong, 1932, Hefte 2, Stockholm.

<sup>2)</sup> Die Bautechnik, 1930.

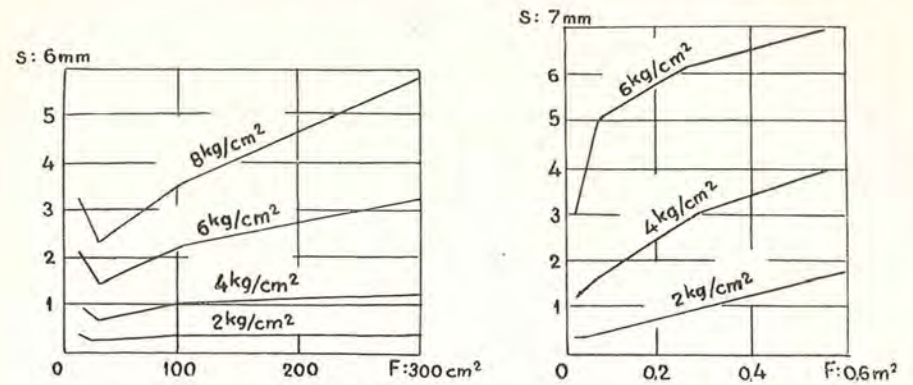


Fig. 135.

F. Køgler<sup>1)</sup> udførte Belastningsforsøg. Jordbunden var her naturlig aflejret Sand (Rumvægt: 1,52 t/m<sup>3</sup>, Poretal:  $\epsilon = 0,75$ ), Trykfladen kvadratisk. Af disse Forsøg fandtes, at Nedsynkningerne (s) aftager med voksende Trykareal (F), naar Trykarealet er mindre end ca. 300 cm<sup>2</sup>, og derefter er konstante indtil en Trykfladestørrelse paa ca. 800 cm<sup>2</sup> (Fig. 133), men at Nedsynkningerne vokser med Trykfladens Areal ved større Trykflader (Fig. 134).

Det ses af Figureerne, at Nedsynkningerne vokser langt stærkere end Trykarealet, naar Trykket pr. Arealenhed er stort, end Tilfældet er, naar Trykket pr. Arealenhed er lille.

I Fig. 135 er fremstillet Resultaterne af tilsvarende Forsøg paa Jordbund bestaaende af fugtigt sandblandet Ler med 46 % Sand.

Eksempel paa Nedsynkningernes Afhængighed af Enhedstrykket  $p_0$  for forskellige Størrelser af Trykflade haves i de i Fig. 136 fremstillede Forsøgsresultater (Sandbund). De viste Kurver a og b gælder for cirkulær Belastningsplade, henholdsvis 660 cm<sup>2</sup> og 10000 cm<sup>2</sup>.

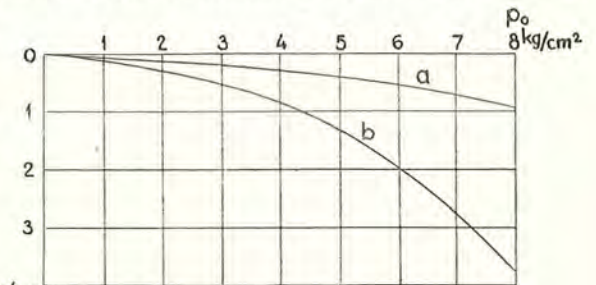


Fig. 136.

168. Angaaende Nedsynkningens Afhængighed af Trykfladens Form foreligger der forholdsvis faa Forsøgsresultater. I Fig. 137 er vist nogle af H. Press fundne Arbejdslinier for rektangulære Trykflader, alle 25 cm brede, men af indbyrdes forskellig Længde. Kurven a gælder for kvadratisk Trykflade. Forsøgene udførtes paa Sandbund. Efter det i Figuren

<sup>1)</sup> Die Bautechnik, 1931.

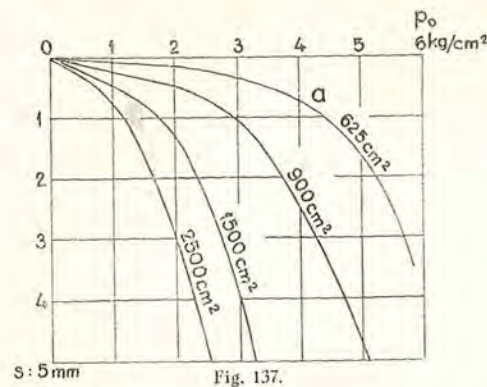


Fig. 137.

derimod lang Tid efter Belastningens Anbringelse, før Nedsynkningen har naaet sin endelige Størrelse. Aarsagen hertil er, som allerede tidligere omtalt<sup>2)</sup>, at den for Jordens Fortætning fornødne Udpresning af Porevandet tager lang Tid, idet Modstanden mod Vandets Bevægelse gennem Jordmassens fine Porer er meget stor. En nøjere Bestemmelse af Belastningstidens Indflydelse kræver Kendskab til den paagældende Jordbunds Permeabilitet.

Ved Udførelse af Prøvebelastning paa finporet vandholdig Jordbund maa Belastningstidens Længde afpasses efter Belastningspladens Størrelse. Har man f. Eks. to cirkulære Plader, af hvilke den enes Areal er  $n^2$  Gange ( $n > 1$ ) saa stort som den andens Areal, og er Pladerne belastede saaledes, at Trykket pr. Arealenhed er lige stort paa begge Pladerne, maa man regne med, at der kræves omtrent  $n$  Gange saa lang Belastningstid for den store Plade som for den lille Plade, hvis begge Pladerne skal synke lige meget. Hvis Nedsynkningen for hver af de to Pladers Vedkommende skal udgøre samme Brøkdel af den paagældende Plades totale Nedsynkning for uendelig lang Belastningstid (den Nedsynkning, hvis Bestemmelse er Prøvebelastningens Formaal), maa den store Plade holdes belastet  $n^2$  Gange saa lang Tid som den lille Plade<sup>3)</sup>. Jo større Belastningsplade man anvender ved Prøvebelastning paa finporet vandfyldt Jordbund, desto længere Tid maa man derfor lade hengaa mellem hver Gang, der foretages Trykændring. Til Udførelse af Prøvebelastning med stor Trykflade kræves derfor lang Tid.

**170. Trykfladens Størrelse ved Prøvebelastning.** Som nævnt har man ikke nøjere Kendskab til, hvorledes Afhængigheden er mellem

<sup>1)</sup> § 158.

<sup>2)</sup> §§ 65 og 159.

<sup>3)</sup> Det er her forudsat, at den totale Nedsynkning kan regnes at være proportional med Pladens Radius.

angivne er Nedsynkningen desto større, jo større Trykfladens Længde er i Forhold til Bredden.

**169. Belastningstidens Indflydelse paa Nedsynkningen** er ved Sandbund uden praktisk Betydning. Den endelige Nedsynkning indtræder her hurtigt efter Belastningens Anbringelse<sup>1)</sup>. Ved finporet Jord (Ler) med vandfyldte Porer hængaar

Nedsynkningen og Trykfladens Størrelse og Form, og en beregningsmæssig Bestemmelse af, hvor meget et Bygværk kan ventes at ville sætte sig, foretaget paa Grundlag af en ved en Prøvebelastning med lille Trykflade bestemt Arbejdslinie, maa derfor blive behæftet med megen Usikkerhed. For at denne Usikkerhed skal være saa lille som mulig, bør man ved Prøvebelastning anvende saa stor Trykflade som mulig. Bekostningshensyn og den Tid, der haves til Disposition for Udførelsen af Prøvebelastning, er i de fleste Tilfælde bestemmende for, hvor stor Trykflade der kan anvendes. I Almindelighed maa Trykfladen ikke gøres mindre end  $0,25 \text{ m}^2$ .

Usikkerheden ved Forudberegning af et Bygværks Sætning kan maa ske i nogen Grad elimineres ved, at man, som foreslaaet af Køgler<sup>1)</sup>, foretager Prøvebelastning paa to Plader af forskellig Størrelse og af de derved fundne to Serier Nedsynkningsværdier bestemmer den til Fundamentsfladens Størrelse svarende Nedsynkning ved Ekstrapolation.

Ved Prøvebelastning med Anvendelse af stor Belastningsplade bruges det ofte — af Bekostningshensyn — kun at gennemføre Prøvebelastningen saavidt, at Trykket naar op til 1,5 til 2 Gange det Tryk, der svarer til den for det paagældende Bygværk forudsatte tilladelige Belastning paa Byggegrunden. Ved en saadan kun delvis gennemført Prøvebelastning er der den Mangel, at der af Prøvebelastningen ikke faas Oplysning om, hvor stor Sikkerhedsgraden er i Forhold til Jordbundens Proportionalitetsgrænse og Brudgrænse.

**171. Prøvebelastningens Udførelse.** Prøvebelastning kan foretages simpelthen ved Belastning af en paa Byggegrunden anbragt Betonklods. I denne kan der være indstøbt en med Inddelinger forsynet Stang, saaledes at man ved Hjælp af et i nogen Afstand fra Prøvestedet opstillet Nivellerinstrument kan aflæse Betonklodsens Nedsynkninger, efterhaanden som Trykket forøges. Det maa ved Anbringelsen af de fornødne Vægte paa Betonklodsens passes, at Belastningen kommer til at virke centralt paa Trykfladen. Der kan paa Maalestangen være ophængt et Lod, ved Hjælp af hvilket eventuelle Uregelmæssigheder i Nedsynkningen som Følge af ekscentrisk Belastning kan observeres, eller man kan til det samme Formaal have fire Maalestænger, en over hvert Hjørne af Trykfladen.

Mellem hver Gang, Belastningen forøges, maa man lade hengaa tilstrækkelig lang Tid til, at den af Belastningsforøgelsen foraarsagede Nedsynkning kan naa sin fulde Størrelse, eller til, at man ved gentagne Aflæsninger af Nedsynkningen for samme Belastningstrin kan bestemme

<sup>1)</sup> Die Bautechnik, 1931.

Størrelsen af den til vedvarende Belastning svarende endelige Nedsynkning. Ved Sandbund er det i Reglen tilstrækkeligt at lade hengaa nogle Minutter — ved Belastninger i Nærheden af Brudgrænsen dog længere Tid, op til nogle Timer. Ved Lerbund tager Nedsynkningerne som nævnt lang Tid. Man maa her ofte bruge flere Dage for hvert Belastningstrin.

Som allerede nævnt maa der helst anvendes stor Trykflade (0,25 til 1,0 m<sup>2</sup> eller mere), hvis der af Prøvebelastningens Resultater skal kunne drages nogenlunde paalidelige Slutninger med Hensyn til Størrelsen af Nedsynkningen for det paagældende Bygværk. Af Bekostningshensyn nøjes man i mange Tilfælde med at prøvebelaste forholdsvis smaa Flader, men maa da finde sig i den deraf følgende Usikkerhed ved Resultaternes Anvendelse til Forudberegning af Bygværkets Nedsynkning.

Af Apparater til Prøvebelastning med Anvendelse af smaa Trykflader haves flere forskellige Konstruktioner.

Ved *R. Mayer's* Prøvebelastningsapparat<sup>1)</sup>, der bl. a. egner sig til Prøvebelastning i Bunden af et Borehul, anvendes Trykflader paa 5 til 20 cm<sup>2</sup>. Trykfladen dannes af Enden af et lille Stempel, der fastskrues paa en Stang. Denne føres ned i Borehullet og belastes ved den øverste Ende med Vægte, eller der udøves Tryk ved Hjælp af en Vægtstangs-

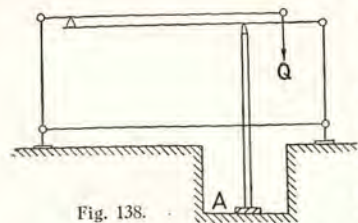


Fig. 138.

anordning, idet Trykket maales ved en i Vægtstangsforbindelsen indskudt Fjeder.

Ved *Buchheim & Heister's* Apparat<sup>2)</sup> anvendes Trykflader paa 250 til 1500 cm<sup>2</sup> og til Udøvelse af Trykket en Vægtstangs-

anordning, saaledes som vist i Fig. 138. *A* er Trykfladen og *Q* en paa den ene af Vægtstængerne virkende Vægtbelastning.

En særlig Konstruktion af Apparat til Prøvebelastning er det af *O. Stern* angivne<sup>3)</sup>, Fig. 139. Ved dette Apparat er den Flade, gennem hvilken Trykket udøves paa Jordbunden, en Kegleflade. *C* er en ca. 8 cm tyk Rundjernsstang (Tværsnitsareal 50 cm<sup>2</sup>), der forneden er forsynet med en 20 cm lang kegleformet Spids. Ved Anbringelse af Vægte *Q* paa en i den ene Ende af Vægtstangen *AB* ophængt Skaal udøves der Tryk paa Stangen. Trykket overføres gennem den kegle-

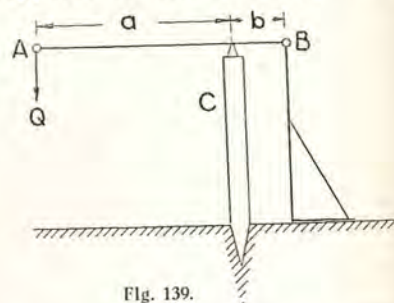


Fig. 139.

formede Spids til Jordbunden. Vægtstangens Armlængder er:  $a = 80$  cm,  $b = 20$  cm. Fremgangsmaaden ved Prøvebelastningens Udførelse og Reglerne med Hensyn til Bestemmelsen af tilladelig Belastning paa Byggegrunden er, efter *Stern's* Angivelser, følgende: Stangen *C* drives først saa langt ned i Jordbunden, at hele dens kegleformede Del ligger nede i Jorden, og derefter belastes Stangen. Belastningens Varighed for hvert Belastningstrin maa afpasses efter Jordbundens Beskaffenhed. I Nærheden af Slutbelastningen forøges Trykket paa Stangen, ved leret Jordbund med 2,5 kg, ved sandet Jordbund med 5 kg hvert 5. Minut. Stangen skal, efter at Slutbelastningen er naaet, henstaa belastet i 12 til 24 Timer — efter som Jordbunden er sandet eller leret — og i hele denne Tid skal Jordbunden omkring Prøvestedet holdes gennemvaad. Hvis Fundamentets Nedsynkning ikke maa overstige 30 mm, kan den tilladelige Belastning paa Byggegrunden sættes til Halvdelen af det Tryk (kg/cm<sup>2</sup>), ved hvilket Stangens Nedsynkning er 6 mm, og hvis Fundamentets Nedsynkning skal holdes under 10 mm, til Halvdelen af det Tryk, ved hvilket Stangens Nedsynkning er 4 mm. Hvis Tykkelsen  $t$  af det bærende Jordlag er mindre end  $20\sqrt{b}$ , hvor  $b$  er Fundamentets Bredde ( $t$  og  $b$  i cm), skal den ved en Prøvebelastning, som den her beskrevne, fundne Værdi for tilladelig Belastning reduceres i Forholdet  $t : 20\sqrt{b}$ .

De her angivne Regler for Bestemmelse af tilladelig Belastning ved Hjælp af det omtalte *Stern's* Apparat er empiriske. Indtil der foreligger nogenlunde omfattende Erfaringsmateriale — Bæreevne-Bestemmelse for samme Jordbund baade med *Stern's* Apparat og ved almindelig Prøvebelastning, og Sammenligning af de saaledes fundne Værdier for tilladelig Belastning for en hel Del forskellige Slags Jordbund — maa de Resultater, der faas ved Anvendelse af det nævnte Apparat og de anførte Regler, naturligvis benyttes med nogen Forsigtighed til Bestemmelse af tilladelig Belastning paa Byggegrund. *Stern's* Apparat maa, idet man med dette egentlig kun er i Stand til at skaffe sig Oplysning om en foreliggende Jordbunds relative Fasthed (dens Fasthed i Forhold til Fastheden af en anden Jordbund, hvis Bæreevne man kender), nærmest sidestilles med det i § 11 omtalte Sondebør (Spidsbør).

172. Nedsynkningstal *c*. Udførelse af en Prøvebelastning, der er tilstrækkelig omfattende til, at der af den kan faas Holdepunkter for en nogenlunde sikker Forudberegning af et Bygværks Sætning, er sædvanlig ret bekostelig og kræver, som nævnt, ved finkornet Jord med vandfyldte Porer temmelig lang Tid. I de Tilfælde, hvor det drejer sig om

<sup>1)</sup> Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereins, 1897.

<sup>2)</sup> Brennecke-Lohmeyer: Der Grundbau, 1927.

<sup>3)</sup> Österreichischer Normenausschuss für Industrie und Gewerbe. Wien, 1927.

mindre Bygværker, eller om saadanne Bygværker, ved hvilke det ingen væsentlig Betydning har, at Bygværkets enkelte Dele sætter sig ulige meget, og i det hele taget i Tilfælde af, at Bygværket opføres paa god, fast Byggegrund, nøjes man med den Bestemmelse af Nedsynkningen  $s$ , der kan faas ved Anvendelse af Formel (150):

$$s = \frac{1}{c} \cdot \frac{P}{F} = \frac{p_0}{c}.$$

For at kunne bestemme  $s$  af denne Formel, maa man kende Nedsynkningstallet  $c$ . Naar der ikke havs Resultater fra Prøvebelastning paa den paagældende Jordbund, er man henvist til at anslaa Talværdien for  $c$  skønsmæssigt efter Angivelser andet Steds fra. De Talværdier for Nedsynkningstallet  $c$ , der kan faas fra Oplysninger desangaaende i Litteraturen (Beretninger fra forskellige Steder om Bygværkers Nedsynkninger), er ret forskellige indbyrdes, og er det ogsaa i flere saadanne Tilfælde, hvor det, at dømme efter de angivne Resultater af Jordbundsundersøgelser de paagældende Steder, drejer sig om Bygværker paa Jordbund af meget nær ens Beskaffenhed. En Beregning af  $s$  paa denne Maade maa alene paa Grund af det her anførte betragtes som en ganske raat tilnærmende Beregning, af hvilken der egentlig kun kan faas Oplysning om Nedsynkningens Størrelsesorden. I denne Forbindelse maa det endvidere erindres, at Størrelsen  $c$  i Virkeligheden, foruden af Jordbundens Beskaffenhed, afhænger af Fundamentfladens Størrelse og Form samt af Belastningsintensiteten  $p_0$ , og at disse sidstnævnte Afhængighedsforhold ikke tages med i Regning ved Benyttelsen af Udtrykket  $s = \frac{p_0}{c}$ .

Af Talværdier for Størrelsen  $c$  skal her som Eksempler paa Angivelser i den paagældende Litteratur nævnes:

- For meget fast Bund i Almindelighed:  $c = 20$  til  $40 \text{ kg/cm}^3$ .
- For fast lejret Grus eller groft Sand:  $c = 10$  til  $15 \text{ kg/cm}^3$ .
- For mer eller mindre løst lejret Sand:  $c = 2$  til  $10 \text{ kg/cm}^3$ .

For de forskellige Slags Lerbund er Værdierne for  $c$  meget forskellige. For en Lerbund med sammensætning efter Kornstørrelse (Terzaghi)<sup>1)</sup>: ca. 10 % Mo, ca. 50 % »Schluff« (Støv) og ca. 40 % Mikroler angives (for cirkulær Fundamentsflade, 1 m i Diameter) ved Konsistensform »Nogenlunde fast« (Udrulningsgrænse)<sup>2)</sup>:  $c = 0,55 \text{ kg/cm}^3$ , ved Konsistensform »Sejg og klæbende« (Øvre Plasticitetsgrænse):  $c = 0,11 \text{ kg/cm}^3$ .

<sup>1)</sup> § 29.  
<sup>2)</sup> § 59.

173. Bestemmelse af Nedsynkning uden Prøvebelastning. Den i det følgende beskrevne Fremgangsmaade til Beregning af et Bygværks Nedsynkning som Følge af Jordbundens Sammentrykning er angivet af Terzaghi<sup>1)</sup>. Det er en Forudsætning for Anvendelsen af denne Fremgangsmaade, at Tryk-Poretalsdiagrammet for den paagældende Jordbund kendes. Dette Diagram maa bestemmes ved dertil passende laboratiormæssige Undersøgelser af Prøver af Jordbunden som de i Afsnit I omtalte.

I et Jordlegeme med Poretal  $\varepsilon$  vil der, naar Jordlegemet paavirkes af et Tryk  $p$  (pr. Arealenhed), ske en Formindskelse af Porevolumenet. Den hertil svarende Ændring  $\Delta \varepsilon$  af Poretallet sættes til:

$$\Delta \varepsilon = a p = - \frac{d \varepsilon}{d p} p,$$

hvor  $a = - \frac{d \varepsilon}{d p}$  findes af den til Tryk-Poretalsdiagrammet svarende Ligning (20)<sup>2)</sup>.

Er  $h$  og  $h_1$  Jordlegemets Højde henholdsvis før og efter, at Trykket  $p$  kommer til Virkning, og er  $M$  det betragtede Jordlegemes faste Masse, havs:

$$h = M (1 + \varepsilon)$$

$$h_1 = M (1 + \varepsilon - \Delta \varepsilon) = M (1 + \varepsilon - a p).$$

Jordlegemets Sammentrykning i Trykkets Retning er:

$$s = h - h_1 = M a p$$

eller, idet:  $h = M (1 + \varepsilon)$ ,  $M = \frac{h}{1 + \varepsilon}$ ,

$$s = h \frac{a p}{1 + \varepsilon}.$$

For det under Trykfladen  $AB$  liggende Jordlegeme (Fig. 140) — cirkulær Trykflade, Radius  $r$  — regnes paa tilsvarende Maade, at Sammentrykningen  $ds$  af Elementet af Højde  $dy$  i Dybden  $y$  under  $AB$ , naar Spændingen i denne Dybde er  $\sigma_y$ , er:

$$ds = \frac{a \sigma_y}{1 + \varepsilon} dy.$$

Er Jordlagets Tykkelse  $y_0$ , faas hele Sammentrykningen  $s_0$ , d. v. s. Belastningspladens Nedsynkning, af:

$$s_0 = \int_0^{y_0} \frac{a \sigma_y}{1 + \varepsilon} dy.$$

For Afhængigheden mellem Spændingen  $\sigma_y$  og Dybden  $y$  forudsættes her Relationen (146 b)<sup>3)</sup> at gælde for alle Punkter lodret under Trykfladen, saaledes at der kan sættes:

$$\sigma_y = p_0 (1 - \cos^3 \varphi_r),$$

<sup>1)</sup> Terzaghi: Erdbaumechanik, 1925.

<sup>2)</sup> § 65.

<sup>3)</sup> § 165.

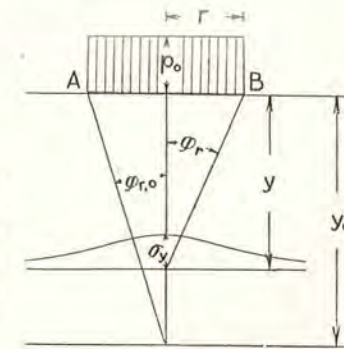


Fig. 140.

hvor  $\varphi_r$  er bestemt ved

$$\operatorname{tg} \varphi_r = \frac{r}{y}.$$

Man faar da, naar Belastningsfladens Tryk paa Jordoverfladen er  $p_o$ :

$$s_o = \frac{a}{1 + \varepsilon} \int_0^{y_o} \sigma_y dy = \frac{a p_o}{1 + \varepsilon} \int_0^{y_o} (1 - \cos^3 \varphi_r) dy,$$

$$s_o = -\frac{a r p_o}{1 + \varepsilon} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\varphi_{r,o}} \frac{1 - \cos^3 \varphi_r}{\sin^2 \varphi_r} d\varphi_r = \frac{a r p_o}{1 + \varepsilon} \left( 2 - \operatorname{tg} \frac{\varphi_{r,o}}{2} - \sin \varphi_{r,o} \right).$$

For  $y_o = \infty$  faas:  $s_\infty = \frac{2 a r p_o}{1 + \varepsilon},$  (152)

og heraf:  $s_o = \frac{1}{2} \left( 2 - \operatorname{tg} \frac{\varphi_{r,o}}{2} - \sin \varphi_{r,o} \right) s_\infty = k s_\infty.$  (153)

For  $k$  haves følgende Værdier:

$\frac{y_o}{r}$	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k$	0,24	0,44	0,66	0,76	0,82	0,85	0,88	0,89	0,91	0,92	0,93

## B. Pælebelastning.

174. Det paa en Fundamentspæl virkende Tryk overføres til Jordbunden dels ved Pælens Spids til den under Pælspidsen liggende Jordbund, dels langs Pælens Sideflader ved Friktion mellem disse og Jordbunden omkring Pælen.

Man skelner mellem »Pæle til fast Bund« og »Friktionspæle«.

Ved Pæle til fast Bund hidrører Pælens Bæreevne alene eller for den langt overvejende Dels Vedkommende fra Jordens Modtryk ved Pælspidsen: *Spidsmodstanden*. Ved Friktionspæle hidrører Bæreevnen helt eller hovedsagelig fra Friktionen mellem Pælens Sideflader og den omgivende Jord.

Typiske Pæle til fast Bund har man i de Tilfælde, hvor Pælene er ført ned gennem bløde Jordlag og staar med Spidsen paa Klippebund. Det er dog kun undtagelsesvis, at man i Praksis har at gøre med saadanne Pæle, der staar med Spidsen paa fuldstændig fast Bund. Det almindelige er, at Pælen naar et i Forhold til hele Pælelængden lille Stykke ned i relativ fast Jordbund, medens den øvrige Del af Pælen staar i blød eller løst lejret Jordbund. En saadan Pæls Bæreevne skyldes saavel Spidsmodstand som Friktionsmodstand, denne sidste hidrørende fra Friktionen langs den Del af Pælen, som staar i den faste Jordbund.

Pæle, som i hele Længden staar i nogenlunde ens bæredygtig Bund, er i Reglen Friktionspæle. Ved denne Slags Pæle haves ligeledes saavel Spidsmodstand som Friktionsmodstand. Hvis Jordbunden er blød, er

Spidsmodstandens Bidrag til Pælens Bæreevne af underordnet Betydning i Forhold til Friktionsmodstanden. Ved Friktionspæle i fastere Bund, som f. Eks. Sand, kan Spidsmodstandens Bidrag til Pælens Bæreevne være ret betydelig i Forhold til den Del af Bæreevnen, der hidrører fra Friktionsmodstanden.

Ved Friktionspæle overføres Pæletrykket, bortset fra den større eller mindre Del deraf, der optages af Spidsmodstanden, langs hele Pælens Overflade (Fig. 141). Det Jordlegeme, der paavirkes af Pæletrykket, det bærende Jordlegeme, strækker sig derfor her helt fra Jordoverfladen til et Stykke neden for Pælspidsen. Ved Pæle til fast Bund vil der ligeledes for hver Pæl være et vist begrænset Jordlegeme, der kan betragtes som det bærende Jordlegeme. Dette dannes her alene af den omkring Pælspidsen liggende Del af Jordbunden.

For at en Gruppe bestaaende af et vist Antal,  $n$ , Pæle skal have  $n$  Gange saa stor Bæreevne som en enkelt isoleret Pæl, er det en Betingelse, at de til Pælegruppens Pæle hørende bærende Jordlegemer ikke griber ind i hverandre. Hvor stor Afstand der i det mindste skal være mellem Pælene i en Pælegruppe, for at hver Pæls Bæreevne skal komme til fuld Nytte ved Optagelse af den paa Pælegruppen virkende Belastning, har man intet sikkert Kendskab til. Minimumsafstandens Størrelse afhænger af Jordbundens Beskaffenhed. Den vokser antagelig med Pæletrykkelsen samt, for Friktionspælens Vedkommende, tillige med Pælelængden.

Ad teoretisk Vej lader det sig næppe gøre at udlede Regler for Bestemmelse af Minimumsafstanden mellem Pæle, paa Grund af, at hele Forholdet vedrørende Kraftoverførelsen mellem Pæl og Jord er meget kompliceret.

Ved Pæle til fast Bund anslaaes Minimumsafstanden ofte til 1,5 Gange Pæletrykkelsen. I Reglen vil dog Vanskelighederne ved at ramme Pælene med saa lille indbyrdes Afstand bevirke, at Pælene ikke anbringes saa tæt ved hverandre.

Ved Friktionspæle har Spørgsmaalet om Minimumsafstanden mellem en Pælegruppes Pæle større praktisk Betydning end ved Pæle til fast Bund. Af de forholdsvis faa Forsøg, der er udført til Oplysning om Pæleleafstandens Indflydelse paa Pælens Bæreevne, skal her anføres følgende:

Ved en af den svenske *Geotekniske Kommission*<sup>1)</sup> foretagen Undersøgelse angaaende Friktionspælens Bæreevne prøvebelastedes dels en isoleret staaende Pæl, dels to Pælegrupper, hver bestaaende af 7 Pæle. Ved den ene af Pælegrupperne var Pælene anbragt saaledes, at de seks Pæle

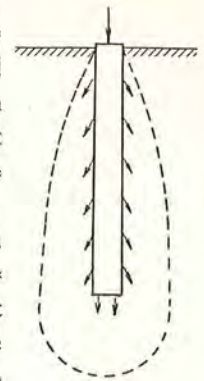


Fig. 141.

<sup>1)</sup> Der Bauingenieur. 1930.

stod i Vinkelspidserne af en Sekskant med Sidelinie 1,2 m og den syvende Pæl midt i Sekskanten. Ved den anden af Pælegrupperne var Pælene placeret paa samme Maade, de seks Pæle i Kredsen om en Pæl i Midten af Kredsen, men med 0,7 m indbyrdes Afstand mellem Pælene. Ved Prøvebelastningen fandtes for Proportionalitetsgrænsen:

- Den isoleret staaende Pæl: 19,2 t.
- Pælegruppen med Pæleafstand 1,2 m: 18,5 t.
- Pælegruppen med Pæleafstand 0,7 m: 12,0 t.

Ved Aalborg udførtes i 1924 Undersøgelser, omfattende Prøvebelastning paa en isoleret staaende Pæl og paa en Pælegruppe af 4 Pæle, disse placerede i Vinkelspidserne af et Kvadrat med 0,8 m Sidelinie. Pælene, der var af 28 cm Rundtømmer, var 15 m lange. Bunden, i hvilken Pælene var rammet ned, var ret blød. Der fandtes følgende sammenhørende Størrelser af Belastning og Nedsynkning:

Isoleret staaende Pæl:				
Belastning .....	10 t	20 t	30 t	40 t
Nedsynkning .....	1,6 mm	5,6 mm	9,6 mm	16 mm
Pælegruppe:				
Belastning pr. Pæl .....	10 t	20 t	30 t	40 t
Nedsynkning .....	2,0 mm	7,0 mm	13 mm	25 mm

**1. Bestemmelse af Pæles Bæreevne ved Prøvebelastning.**

175. Belastes en Pæl, vil Pælehovedet synke et vist Stykke. Ved grafisk Fremstilling af sammenhørende Værdier af Tryk og Nedsynkning paa sædvanlig Maade faas Arbejdslinien for den paagældende Pæl. Arbejdslinien har i Almindelighed Form omtrent som den i Fig. 142 viste.

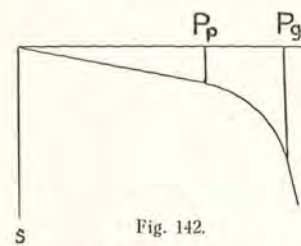


Fig. 142.

For de til den første Del af Arbejdslinien svarende Tryk er Pælehovedets Nedsynkninger elastiske. Den elastiske Nedsynkning hidrører dels fra selve Pæles Sammentrykning, dels fra elastisk Eftergiven af det bærende Jordlegeme under og omkring Pælen.

Ved Forøgelse af Trykket ud over denne første Del af Belastningen fremkommer der blivende Nedsynkninger af Pælehovedet. Disse hidrører fra Kompression af Pæles bærende Jordlegeme og følger op til en vis Grænse  $P_p$ , Proportionalitetsgrænsen, nogenlunde proportionalt med

Belastningsforøgelserne. Ved Belastning ud over  $P_p$  vokser Nedsynkningerne stærkere end Belastningen, og naar Pæletrykket har naaet en vis Størrelse  $P_g$ , begynder Nedsynkningerne at blive meget store for ganske smaa Belastningsforøgelser.

Nedsynkningerne for Belastninger, der er større end  $P_g$ , fremkommer ved, at Pælen forskydes ned gennem det bærende Jordlegeme. Ved Friktionspæle sker dette ved, at Friktionen mellem Pælen og den omgivende Jord overvindes. Ved Pæle til fast Bund er det Pæletrykkets Overskridelse af den tilstedeværende Spidsmodstand, der er Aarsag til, at Nedsynkningen begynder at vokse stærkt. Ved Spidsmodstandens Overvindelse fortrænges Jorden under Pælespidsen ud til Siden paa tilsvarende Maade, som det sker ved Fladebelastning, naar Brudgrænsen overskrides.

Belastningen  $P_g$  er Grænsen for Pæles Bæreevne, eller kort: Pæles Bæreevne. Man bruger ogsaa at betegne denne Belastning som Pæles »Brudgrænse«. En Pæls Bæreevne forringes ikke, ved at Pælen belastes ud over Brudgrænsen, (jfr. Fladebelastning, Side 152). Efter Aflastning havest ved fornyet Belastning samme Forhold mellem Nedsynkning og Belastning som før Paavirkningen ud over Brudgrænsen<sup>1)</sup>.

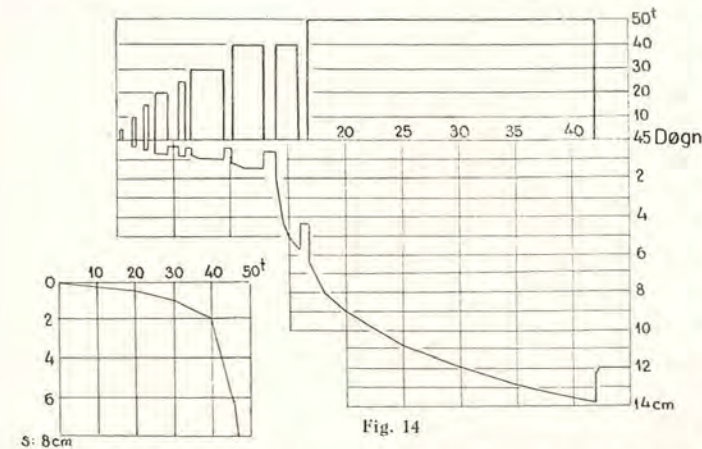


Fig. 14

I Fig. 143 er fremstillet nogle Resultater. Abscisserne angiver Belastningens Varighed, Ordinateerne foroven Pæletrykkenes Størrelser, Ordinateerne forneden Pælehovedets Bevægelser som Følge af Belastningernes Variation. Endvidere er forneden vist Pæles Arbejdslinie (uden Hensyntagen til Belastningernes og Aflastningernes Varighed). Elasticitetsgrænsen for den paagældende Pæl ses at være ca. 15 t, Proportionalitetsgrænsen er ca. 35 t og Bæreevnen (Brudgrænsen) ca. 40 t.

I Fig. 144 er paa lignende Maade fremstillet Resultater fra en anden Nedramning af en Pæl paavirket Pælen ud over Brudgrænsen ved hvert Ramslag.

<sup>1)</sup> Ved Nedramning af en Pæl paavirket Pælen ud over Brudgrænsen ved hvert Ramslag.

Prøvebelastning <sup>1)</sup>. Elasticitetsgrænsen for den paagældende Pæl er ca. 30 t, Proportionalitetsgrænsen ca. 80 t og Bæreevnen ca. 100 t. Pælen var af 38,5 cm Rundtømmer, 10 m lang (fra Jordoverfladen til Pæle-

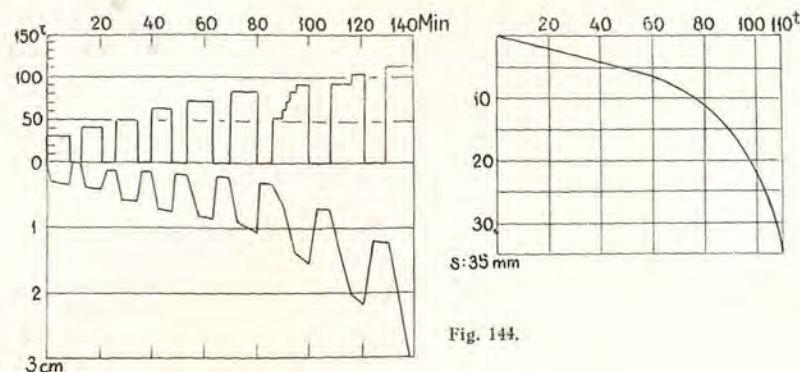


Fig. 144.

spids). Jordbunden bestod øverst, indtil omtrent midt paa Pælen, af Klæg, derunder af Sand, der indtil ca. 1 m over Pælespidsen var middelfint Sand og iøvrigt Sand med Indhold af Grus og Kalk.

Ved Fastsættelse af den tilladelige Belastning  $P$  for en Pæl behøver man i Almindelighed ikke at lade Elasticitetsgrænsen for den paagældende Pæl være bestemmende for Størrelsen af den tilladelige Belastning. Dette ligger i, at et Bygværks Egenvægt og den øvrige konstante Del af Belastningen paa Fundamentet, som tidligere nævnt, i Reglen er stor i Forhold til den varierende Del af Belastningen, samt i, at Tilvæksten  $\Delta s$  af Pælehovedets Nedsynkning for en i Forhold til  $P$  lille Belastningsforøgelse  $\Delta P$  er en elastisk Nedsynkning, selv om den til hele Belastningen  $P + \Delta P$  svarende totale Nedsynkning for den væsentligste Dels Vedkommende er en blivende Nedsynkning, saaledes at en stadig gentagen Variation af Belastningen mellem  $P$  og  $P + \Delta P$  derfor ikke frembringer Forøgelse af den blivende Nedsynkning.

For Fastsættelse af den tilladelige Belastning kan i visse Tilfælde <sup>2)</sup> den Omstændighed være bestemmende, at den i det højeste tilladelige Eftergiven  $s_{\text{maks}}$  af Pælehovedet er en paa Forhaand givne Størrelse, afhængig f. Eks. af det paagældende Bygværks Konstruktion eller særlige Egenskaber. I saadant Tilfælde er det nødvendigt at kende Arbejdslinien for Pælen. Af Arbejdslinien finder man da den til  $s_{\text{maks}}$  svarende Belastning  $P_{\text{maks}}$  og sætter den tilladelige Belastning  $P = \frac{1}{n} P_{\text{maks}}$ , hvor  $n$  er en efter Forholdene i det givne Tilfælde afpasset Sikkerhedsfaktor.

<sup>1)</sup> Die Bautechnik, Heft 7. 1933.

<sup>2)</sup> Jfr. § 156.

I Almindelighed er det dog ikke Nedsynkningens Størrelse, der er bestemmende for Fastsættelse af tilladelig Pælebelastning, fordi Nedsynkningerne ved Pælefundamenter i det hele taget er forholdsvis smaa, i det mindste i Sammenligning med de Nedsynkninger, der forekommer ved Fundamenter, der hviler direkte paa Byggegrunden.

Man bruger ret almindeligt at sætte den tilladelige Pælebelastning til:

$$P = \frac{1}{2} P_p \quad (154)$$

eller

$$P = \frac{1}{2,5} P_g \quad (155)$$

idet man da i Reglen for  $P$  bruger den mindste af de herved bestemte Størrelser.

Anvendelsen af de her anførte Regler for Fastsættelse af tilladelig Pælebelastning, ved hvilke der, som det vil ses af (155), benyttes en saa lav Sikkerhedsfaktor i Forhold til Pædens maksimale Bæreevne  $P_g$  som 2,5, er betinget af, at Grundlaget for Bestemmelsen af Bæreevnen er en (eller flere) paa det paagældende Sted foretagen Prøvebelastning.

176. Udførelse af Prøvebelastning paa Pæle maa ske med Pæle af samme Dimensioner som de Pæle, der skal indgaa i det paagældende Bygværks Fundament. Der haves nemlig for lidt Kendskab til, hvorledes Forholdene er med Hensyn til Pæletrykkets Overførelse til det bærende Jordlegeme, og til det bærende Jordlegemes Størrelse og Form, og haves for faa Resultater fra sammenhørende Forsøg angaaende Forholdet mellem smaa og store Pæles Bæreevne i de forskellige Slags Jordbund, til at man, svarende til den ved Fladebelastning benyttede Fremgangsmaade, kan foretage Prøvebelastning paa smaa Pæle og ud fra saadan Prøvebelastnings Resultater beregne de større Pæles Bæreevne. Prøvebelastning af Pæle er derfor en meget mere bekostelig Foranstaltning end tilsvarende Undersøgelser ved Fladebelastning.

Ved Maaling af Pælehovedets Nedsynkning er det nødvendigt at gaa mere nøjagtig til Værks, end det sædvanlig sker ved almindelige Undersøgelser vedrørende Fladebelastning, fordi Pæle-Nedsynkningerne i Reglen er meget mindre end Nedsynkningerne ved Fladebelastning. Maaling ved Hjælp af Nivellerinstrument giver for det meste ikke tilstrækkelig nøjagtige Resultater. En Anordning, ved hvilken Pælehovedets Bevægelser aflæses ved Hjælp af en Nedbøjningsmaaler (Zeissur), bør foretrakkes.

Med Hensyn til Spørgsmaalet om, hvor lang Tid der skal hengaa mellem hver Belastningsforøgelse, gælder her tilsvarende Regler som ved Fladebelastningsforsøg. I Sandbund indtræder Nedsynkningen ret hurtigt efter Anbringelse af Belastningen. Ved Lerbund maa man lade hengaa lang Tid mellem hver Gang, Pæletrykket ændres.

Trykket paa Pælen kan simpelthen tilvejebringes ved, at man anbringer Belastning paa Pælehovedet. Der maa anvendes særlig Omhu ved Opstablingen af de i Reglen meget store Vægte, der skal anbringes paa Pælehovedet, saaledes at man kan være sikker paa, at Trykket virker nøjagtigt i Pælens Akse, og Pælen maa ved passende Afstivninger sikres mod at komme ud af den lodrette Stilling, hvis Belastningen kommer til at virke skævt.

En anden Maade at tilvejebringe Pæetrykket paa, end ved Anbringelse af tunge Genstande (Jernbaneskiner, vandfyldte Beholdere) paa Pælehovedet, er at udøve Tryk paa Pælehovedet med en hydraulisk Donkraft, idet denne indsættes mellem Pælehovedet og en oven over dette anbragt Bjælke, som er forankret til to eller til fire tæt ved Prøvepælen nedrammede Pæle. Med en saadan Ordning kan der være forbundet den Mangel, at Jordbunden omkring Prøvepælen komprimeres ved Nedramningen af Forankringspælene, saaledes at de Forhold, der er bestemmende for Pælens Bæreevne, da ikke er de samme, som de er ved en i Jordbunden isoleret staaende Pæl.

Da Prøvebelastninger er omstændelige og kostbare, anvendes de kun sjældent til Bestemmelse af Pæles Bæreevne.

## 2. Bestemmelse af Pæles Bæreevne ved Ramning.

177. Den i Praksis almindelig anvendte Metode til Bestemmelse af Pæles Bæreevne bestaar i, at man under Pælens Nedramning maaler de Nedsynkninger, der fremkommer som Følge af Ramslagets Virkning, og paa Grundlag af de maalte Nedsynkninger og ved Anvendelse af dertil afpassede Formler udregner Modstanden mod Pælens Nedtrykning.

Bestemmelse af Pæles Bæreevne paa den her nævnte Maade er dog, saaledes som det vil fremgaa af det følgende, ret usikker, og hertil kommer, at man af Nedsynkningsforholdene under Ramningen ikke faar noget at vide om Pælens Elasticitetsgrænse, eller om dens Proportionalitetsgrænse eller i det hele taget om de for Pælens Arbejdslinie bestemmende Størrelser, saaledes som Tilfældet er, naar der foretages Prøvebelastning. Naar ikke desto mindre Bestemmelse af Pæles Bæreevne i Praksis sædvanlig sker paa Grundlag af Ramningsresultater, er Aarsagen hertil, at det er en nem og billig Maade, og at man let kan foretage de fornødne Nedsynkningsmaalinger, og dermed Bestemmelse af Bæreevne, for alle de i et Pælefundament indgaaende Pæle.

Naar en tung Ramklods falder ned paa en Pæl og bringer denne til at synke et Stykke, overvindes derved en til den dynamiske Paavirkning

svarende Modstand  $P_d$ . Hvis Pælen, ved at den paavirkes af et Tryk lig Pælens Bæreevne  $P_g$ , synker et lige saa stort Stykke, overvindes herved Modstanden  $P_g$ , men denne Modstand svarer til et roligt virkende Tryk og er en statisk Modstand. Om hvor stort Forholdet  $P_d : P_g$  er, vides ikke noget sikkert. *F. Krapf* angiver, at  $P_d : P_g$  kan regnes at ligge mellem 1,12 og 2,28. *Terzaghi* hævder, at Talværdierne for den nævnte Proportion varierer inden for langt videre Grænser, og at  $P_d : P_g$  er i høj Grad afhængig af Jordbundens Beskaffenhed og Pælens Dimensioner.

Ved Beregning af en Pæls Bæreevne paa Grundlag af Nedsynkningsforholdene under Ramningen sætter man dog  $P_g = P_d$ . Til den Fejl, der herved begaas, ligesom til en Del andre, i det følgende nærmere omtalte Usikkerhedsmomenter ved Bestemmelse af Pæles Bæreevne paa den her omhandlede Maade, maa der da tages Hensyn ved Fastsættelse af den Sikkerhedsfaktor  $n$ , der indføres, idet man for den tilladelige Pælebelastning  $P$  sætter:

$$P = \frac{1}{n} P_g.$$

178. Ramningsformler til Bestemmelse af Pæles Bæreevne. Til Bestemmelse af Pæles Bæreevne paa Grundlag af Nedsynkningsforholdene under Pælens Ramning haves mange forskellige Formler. I det følgende skal der gøres nærmere Rede for nogle af disse.

En Del af den Energi, der indeholdes i en paa en Pæl faldende Ramklods, overføres ved Ramklodsens Stød mod Pælen til denne, og der udføres ved Forbrug af den tilførte Energi et vist Arbejde. Dette Arbejde omfatter: elastisk Sammentrykning af Pælen, elastisk og uelastisk Sammentrykning af Jorden i en vis Udstrækning omkring Pælen, samt Overvindelse af Pælemodstanden  $P_d$  paa en Vejlængde lig med det Stykke, som Pælen synker som Følge af Ramslagets Virkning.

Som ovenfor nævnt sættes  $P_d = P_g =$  Pælens Bæreevne.

Ved Udledelsen af de efternævnte Formler til Bestemmelse af Pæles Bæreevne er her anvendt følgende Betegnelser:

$Q$  : Ramklodsens Vægt.

$q$  : Pælens Vægt.

$h$  : Ramklodsens Faldhøjde.

$l$  : Pælens Længde.

$f$  : Pælens Tværsnitsareal.

$s$  : Pælens blivende Nedsynkning for et Ramslag.

$E$  : Pælematerialets Elasticitetstal.

$v$  : Ramklodsens Hastighed før Stødet.

$u_Q$  : Ramklodsens Hastighed efter Stødet.



$u_q$ : Pælens Hastighed efter Stødet.

$\lambda$ : Pælens elastiske Sammentrykning.

$\eta$ : Stødelasticitetskoefficienten.

$T_r$ : Den i Ramklodsen før Stødøjeblikket indeholdte Energi.

$T_s$ : Den ved Stødet tabte Energi.

$T_p$ : Den til Pælens Sammentrykning medgaaede Arbejdsmængde.

$T_j$ : Den til Jordens Sammentrykning medgaaede Arbejdsmængde.

$T_n$ : Den til Pælens Nedtrykning Stykket  $s$  medgaaede Arbejdsmængde.

Man har:

$$T_r = Q h = T_s + T_p + T_j + T_n. \quad (156)$$

og

$$T_n = (P_g - Q - q) s,$$

hvilken sidste Ligning med tilstrækkelig Tilnærmelse kan erstattes med:

$$T_n = P_g s, \quad (157)$$

idet  $Q$  og  $q$  sædvanlig er Størrelser, der er smaa i Forhold til Pælens Bæreevne  $P_g$ .

Antages det, at Stødet mellem Ramklodsen og Pælen er »delvis elastisk Stød«, haves:

$$\frac{Q}{g} v = \frac{Q}{g} u_Q + \frac{q}{g} u_q. \quad (158)$$

og

$$u_q - u_Q = \eta v. \quad (159)$$

Den ved Stødet for Omsætning til Udførelse af de nævnte Arbejder undtagne Energimængde (den ved Stødet tabte Energi) er udtrykt ved:

$$T_s = \frac{1}{2} \frac{Q}{g} v^2 - \left( \frac{1}{2} \frac{Q}{g} u_Q^2 + \frac{1}{2} \frac{q}{g} u_q^2 \right),$$

som med Benyttelse af (158) og (159), og idet  $v = \sqrt{2gh}$ , giver:

$$T_s = Q h \frac{q(1-\eta^2)}{Q+q}. \quad (160)$$

Forudsættes Stødet at være fuldstændig uelastisk, haves, idet i saa Fald  $\eta = 0$ ,

$$T_s^{(U)} = Q h \frac{q}{Q+q}. \quad (161)$$

Regnes med, at Stødet er et fuldkommen elastisk Stød, er  $\eta = 1$ , og man faar:  $T_s = 0$ .

Med Hensyn til Arbejdsmængden  $T_p$  haves følgende:

Tænktes Pælens Bæreevne alene at hidrøre fra Spidsmodstand (Pæle

til fast Bund), vil Pælen, forinden den synker, paavirkes i hele Længden af Kraften  $P_g$  og herved sammentrykkes et Stykke  $\lambda$ , hvor

$$\lambda = \frac{P_g l}{E f}.$$

Idet der regnes, at Kraften vokser jævnt fra 0 til  $P_g$ , haves:

$$T_p = \frac{1}{2} P_g \lambda = \frac{1}{2} P_g^2 \frac{l}{E f}. \quad (162)$$

Ved Friktionspæle bliver Pælens Sammentrykning mindre. Antages det her, at Friktionsmodstanden er ensformig fordelt over hele Pælens Længde, faas for dette Tilfælde en Sammentrykning:

$$\lambda' = \frac{1}{2} \frac{P_g l}{E f},$$

og svarende hertil:

$$T_p' = \frac{1}{4} P_g^2 \frac{l}{E f}. \quad (163)$$

For den til Kompression af Jorden omkring Pælen medgaaende Arbejdsmængde  $T_j$ , i hvilken ogsaa maa indbefattes den Arbejdsmængde, der medgaar til at frembringe blivende eller lidt efter lidt forsvindende Spændinger i Jordmassen, kan der ikke opstilles noget Udtryk svarende til de øvrige Størrelser  $T$ , idet man ikke ved noget om, hvor stort det Jordvolumen er, der komprimeres, eller om Kompressionsgraden.

Ved de fleste Formler til Beregning af Pælens Bæreevne ses der helt bort fra Størrelsen  $T_j$ . Idet  $T_j$  da sættes lig Nul, ændres (156) til:

$$Q h = T_r = T_s + T_p + T_n. \quad (164)$$

Undladelse af at medtage  $T_j$  i Beregningen medfører for disse Formlers Vedkommende en Fejl, der sikkert i mange Tilfælde kan blive ret betydelig, og denne Fejl gaar i den Retning, at Bæreevnen findes for stor.

Hver af de forskellige Formler til Beregning af Pælens Bæreevne betegnes sædvanlig ved Navnet paa Vedkommende, der har fremsat den paagældende Formel.

Stern's Formel faas ved Indsættelse af Udtrykkene (157), (160) og (162) for henholdsvis  $T_n$ ,  $T_s$  og  $T_p$  i (164):

$$Q h = Q h \frac{q(1-\eta^2)}{Q+q} + \frac{1}{2} P_g^2 \frac{l}{E f} + P_g s, \quad (165)$$

hvoraf findes:

$$P_g = -\frac{E f s}{l} + \sqrt{2 Q h \frac{E f (Q + \eta^2 q)}{l(Q+q)} + \left(\frac{E f s}{l}\right)^2} \quad (166)$$

Dette Udtryk gælder for Pæle til fast Bund.

For Friktionspæle skal der i (164), i Stedet for  $T_p$ , indsættes  $T_p'$  (Udtrykket (163)), hvorved faas:

$$P_g = -\frac{2 E f s}{l} + \sqrt{4 Q h \frac{E f (Q + \eta^2 q)}{l(Q + q)} + \left(\frac{2 E f s}{l}\right)^2} \quad (167)$$

Regnes der i Stedet for med delvis elastisk Stød mellem Ramklods og Pæl med fuldkommen uelastisk Stød, d. v. s.  $\eta = 0$ , faas herved af (166) *Redtenbacher's* Formel (der gælder for Pæle til fast Bund):

$$P_g = -\frac{E f s}{l} + \sqrt{2 \frac{Q^2 h E f}{(Q + q) l} + \left(\frac{E f s}{l}\right)^2} \quad (168)$$

Forudsættes fuldkommen elastisk Stød, faas af (166), idet der da sættes  $\eta = 1$ , *Weiszbach's* Formel (Pæle til fast Bund):

$$P_g = -\frac{E f s}{l} + \sqrt{2 Q h \frac{E f}{l} + \left(\frac{E f s}{l}\right)^2}. \quad (169)$$

For Friktionspæle faas, naar Friktionsmodstanden forudsættes ensformig fordelt over hele Pælelængden, og naar der regnes med fuldkommen elastisk Stød, ved at man i (167) sætter  $\eta = 1$ : *Rankine's* Formel:

$$P_g = -\frac{2 E f s}{l} + \sqrt{4 Q h \frac{E f}{l} + \left(\frac{2 E f s}{l}\right)^2}. \quad (170)$$

Et simplere Udtryk end de her anførte Formler faas, naar man af de ovenfor nævnte Kilder til Energital kun tager Hensyn til Stødtabet  $T_s$ . Ligningen (156) bliver da:

$$Q h = T_s + T_n.$$

Regnes her med uelastisk Stød, d. v. s. (161):  $T_s^{(U)} = Q h \frac{q}{Q + q}$ , faas herved *Eytelwein's* (*Ritter's*) Formel:

$$Q h = Q h \frac{q}{Q + q} + P_g s, \\ P_g = \frac{Q^2 h}{(Q + q) s}. \quad (171)$$

Ved Udledelsen af *Brix's* Formel bortses, ligesom det sker ved Udledelsen af *Eytelwein's* Formel, fra alle andre Energital end netop det fra Stødvirkningen hidrørende, men dette Energital regnes da til Genæld ekstra stort, idet Stødtabet her forøges med den Energimængde,

som Ramklods indeholder efter Stødet. Paa denne Maade regnes der altsaa med, at kun den ved Stødet til Pælen overførte Energi nyttiggøres til Overvindelse af Modstanden mod Pælens Nedtrykning gennem Vejslængden  $s$ . Idet der desuden forudsættes uelastisk Stød, er denne Beregningsmaade i Virkeligheden urigtig; thi hvis Stødet er uelastisk, maa ogsaa den i Ramklods efter Stødet indeholdte Energimængde bidrage til Pælemodstandens Overvindelse, medens Pælen synker. Formlen giver derfor mindre Værdier for  $P_g$ , end de andre Formler, og i Almindelighed mindre Værdier end Pælens virkelige Bæreevne. Dette tages der, som senere nævnt, Hensyn til ved Fastsættelsen af Sikkerhedsfaktoren.

*Brix's* Formel faas herefter saaledes:

$$T_r = Q h = T_s^{(U)} + \frac{1}{2} \frac{Q}{g} u_Q^2 + T_n,$$

$$Q h = Q h \frac{q}{Q + q} + \frac{1}{2} \frac{Q}{g} u_Q^2 + P_g s. \quad (172)$$

Idet  $\eta = 0$  og altsaa (159):  $u_q = u_Q$ , giver (158):

$$Q v = u_Q (Q + q),$$

hvoraf:

$$u_Q = \frac{Q}{Q + q} v = \frac{Q}{Q + q} \sqrt{2 g h},$$

som indsat i (172) fører til:

$$Q h = Q h \frac{q}{Q + q} + Q h \frac{Q^2}{(Q + q)^2} + P_g s$$

og heraf *Brix's* Formel:

$$P_g = \frac{Q^2 q h}{(Q + q)^2 s}. \quad (173)$$

Af Formler af mere empirisk Karakter skal nævnes:

*Wellington's* Formel (ogsaa kaldet: *Engineering News's* Formel<sup>1)</sup>):

$$P_g = \frac{Q h}{s + 2,5} \quad (174)$$

og *Goodrich's* Formel<sup>2)</sup>:

$$P_g = \frac{0,276 Q h}{s}. \quad (175)$$

Maalingen af den i ovenstaaende Formler indgaaende Størrelse  $s$  (Pælens Nedsynkning) kan ske ved Nivellering af Pælehovedets Højde,

<sup>1)</sup> Fremsat og diskuteret i *Engineering News*, 1888.

<sup>2)</sup> Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1902.

eller lettere, og i Reglen tilstrækkelig nøjagtigt, ved at man paa en paa Rambukkens Mægler afsat Maalestok aflæser Stillingen af Ramklodsen, naar denne hviler paa Pælen, før og efter en passende lang Serie (f. Eks. 10) Ramslag, og deraf udregner den for en saadan Serie Ramslag gennemsnitlige Nedsynkning  $s$  pr. Ramslag.

For den i Stern's Formel indgaaende Stødelasticitetskoefficient  $\eta$  maa man nøjes med at indsætte en skønmæssig anslaaet Værdi, liggende mellem 0 og 1. For Støbejerns-Ramklods og Pæle af Træ regnes sædvanlig med, at Værdien for  $\eta$  ligger mellem 0,25 og 0,5. Ved Pæle af Jernbeton regnes med noget større Værdi for  $\eta$ .

Som nævnt er der ved Udledelsen af Formlerne set bort fra det Arbejde  $T_j$ , der medgaar til Sammentrykning af Jorden omkring Pælen. Under Forudsætning af, at Størrelsen af  $T_j$  kan regnes at være uafhængig af Ramklodsens Vægt og Faldhøjde, kan den fra Manglen paa Kendskab til Størrelsen af  $T_j$  hidrørende Usikkerhed elimineres, ved at man foretager to efter hinanden følgende Serier Ramslag med forskellige Faldhøjder,  $h_1$  og  $h_2$ . Er de tilsvarende Nedsynkninger pr. Ramslag henholdsvis  $s_1$  og  $s_2$ , faas ved Indsættelse i (156), idet Pædens Bæreevne  $P_g$  antages at være den samme ved Begyndelsen af den første af de to Serier Ramslag, som den er ved Slutningen af den sidste Serie Ramslag:

$$Q h_1 = Q h_1 \frac{q(1-\eta^2)}{Q+q} + \frac{1}{2} P_g^2 \frac{l}{E f} + T_j + P_g s_1,$$

og

$$Q h_2 = Q h_2 \frac{q(1-\eta^2)}{Q+q} + \frac{1}{2} P_g^2 \frac{l}{E f} + T_j + P_g s_2,$$

hvoraf ved Subtraktion:

$$P_g = \frac{Q(Q+\eta^2q)}{Q+q} \cdot \frac{h_1-h_2}{s_1-s_2}. \quad (176)$$

Hvis der regnes med uelastisk Stød ( $\eta = 0$ ), faas:

$$P_g = \frac{Q^2}{Q+q} \cdot \frac{h_1-h_2}{s_1-s_2}. \quad (177)$$

Til den Arbejdsmængde, der medgaar til elastisk Sammentrykning af Jorden omkring Pælen, kan der tages Hensyn ved følgende af Kafka angivne Fremgangsmaade.

For det paa Pælen virkende Ramslag maales saavel den blivende Nedtrykning  $s$  som den elastiske Nedtrykning  $e$  af Pælehovedet. Dette kan gøres ved, at der holdes en Blyantspids ind mod Siden af Pælen ved dennes øverste Ende. Idet Ramklodsen støder mod Pælen, trykkes Pælehovedet Stykket  $t = e + s$  ned og hæver sig straks efter Stødet

Stykket  $e$ . Længden af den af Blyantsspidsen paa Pælen tegnede Streg angiver Størrelsen  $t$ . En vis Del  $\lambda$  af hele den elastiske Nedtrykning  $e$  hidrører fra Pædens elastiske Sammentrykning, Resten  $\lambda_1$  fra Jordens elastiske Sammentrykning, saaledes at man har:

$$t = s + \lambda + \lambda_1.$$

Der gøres nu den Antagelse, at den til Nedtrykningen  $\lambda_1$  svarende Arbejdsmængde kan sættes til:

$$T_1 = \frac{1}{3} P_g \lambda_1,$$

saaledes at det til Ligningen (156) svarende Udtryk bliver:

$$Q h = Q h \frac{q(1-\eta^2)}{Q+q} + \frac{1}{2} P_g^2 \frac{l}{E f} + \frac{1}{3} P_g \lambda_1 + P_g s,$$

hvoraf faas:

$$P_g = -\frac{E f}{l} (2s+t) + \sqrt{\frac{6 Q h (Q+\eta^2 q) E f}{Q+q} + \left(\frac{E f}{l} (2s+t)\right)^2} \quad (178)$$

Rausch<sup>1)</sup> har foreslaaet at simplificere Kafka's Formel (178) saaledes, at den til Pædens Sammentrykning og til Jordens elastiske Sammentrykning medgaaende Arbejdsmængde tages under eet og sættes til:

$$T_{(p,j)} = \frac{1}{2} P_g e.$$

Man faar da:

$$Q h = Q h \frac{q(1-\eta^2)}{Q+q} + \frac{1}{2} P_g e + P_g s,$$

hvoraf:

$$P_g = \frac{h}{\frac{1}{2} e + s} \cdot \frac{Q(Q+\eta^2 q)}{Q+q}. \quad (179)$$

Hvis der regnes med uelastisk Stød ( $\eta = 0$ ), faas her:

$$P_g = \frac{h}{\frac{1}{2} e + s} \cdot \frac{Q^2}{Q+q}. \quad (180)$$

179. Anvendelse af Ramningsformlerne. Som nævnt i det foregaaende er der en Del Usikkerhedsmomenter og Fejlkilder ved Bestemmelsen af en Pæls Bæreevne som Funktion af Pædens Nedsynkning ved Ramklodsens Stød. Dette medfører, at den paa Grundlag af Ramningsresultater beregnede Bæreevne kan afvige meget fra den paa gældende Pæls virkelige Bæreevne. Den Omstændighed, at der er opstillet og i Praksis anvendes saa mange forskellige Ramningsformler,

<sup>1)</sup> Der Bauingenieur. 1930.

som Tilfældet er, viser ogsaa, at de paa Grundlag af Ramningsresultater bestemte Værdier for Pæles Bæreevne maa benyttes med passende Kritik.

Anvendelse af Ramningsformlerne er for det første betinget af, at der til Ramningen benyttes passende tung Ramklods, og af, at Ramslagets Faldenergi er saa stor, at der faas nogenlunde stor Nedsynkning af Pælen.

Ramklodsens Vægt bør være saa stor, at kun en forholdsvis ringe Del af Ramslagets Energi medgaar til Overvindelse af den Modstand mod Pælens Bevægelse nedad, der stammer fra Pælens og den med denne følgende Mængde Jords Inerti.

At Størrelsen af Ramslagets Faldenergi maa afpasses efter Modstanden mod Pælens Nedtrængen i Grunden, ses let ved Betragtning af Formlerne (171), (173) og (175). For  $s = 0$  giver Formler som disse:  $P_g = \infty$ . Men dette svarer ikke til det rigtige Forhold mellem Nedsynkning og Bæreevne, idet Nedsynkningen kan blive Nul — uafhængig af, hvor stor Pælens Bæreevne er — hvis den ved Ramslaget tilførte Energimængde ikke er større end, hvad der medgaar til elastisk Sammentrykning af Pælen og den omgivende Jord. For meget smaa Nedsynkninger vil man derfor af disse Formler finde alt for store Værdier af Bæreevnen. For de andre af de i § 178 anførte Formlers Vedkommende gælder vel, at man af disse finder endelig Værdi af  $P_g$  for  $s = 0$ , men ogsaa disse Formler giver dog for store Værdier af  $P_g$ , naar Nedsynkningerne er ganske smaa.

Hvor lille Nedsynkning der kan tillades, og hvor stor Ramklodsens Vægt skal være, for at man skal kunne bestemme Pæles Bæreevne med nogenlunde Sikkerhed af Ramningsresultater, kan der ikke gives bestemte Regler for. I Almindelighed bør Nedsynkningerne ikke være mindre end ca. 1 cm pr. Ramslag, og Ramklodsens Vægt bør helst mindst være 2 Gange Pælens Vægt. Ofte anvendes dog mindre tung Ramklods, f. Eks. med Vægt lig med Pælens Vægt.

Hensynet til, at Pælehovedet ikke maa beskadiges for meget ved Ramklodsens Stød, medfører, at der ikke maa anvendes for stor Faldhøjde ved Ramningen. Ved Pæle af Jernbeton tages Faldhøjden i Reglen ikke større end ca. 1,25 m. Ved Pæle af Træ kan der anvendes betydelig større Faldhøjde. I Reglen bruges dog ikke større Faldhøjde end 3 til 5 m. Fastholdes saadanne Maksimumsstørrelser for Faldhøjden og tillige en vis Minimumsnedsynkning pr. Ramslag (f. Eks. som nævnt 1 cm), er dermed den i det mindste paakrævede Vægt af Ramklods bestemt. I al Almindelighed gælder, at jo tungere Ramklods der anvendes, og jo større Pælens Nedsynkning er, desto bedre Overensstemmelse vil der

være mellem den af Ramningsresultatet beregnede Bæreevne og den paagældende Pæls virkelige Bæreevne.

En anden Forudsætning vedrørende de i § 178 angivne Formler til Bestemmelse af Pæles Bæreevne — dog med Undtagelse af *Goodrich's* Formel (175) — er, at de Ramslag, ved hvilke den i Formlerne indgaaende Størrelse  $s$  maales, sker ved frit Fald af Ramklodsens, og at Ramningen derfor udføres paa den Maade, at Ramklodsens efter at være hejst op til den Højde, hvorfra den skal falde, udløses fra Forbindelsen med Ophejsningstovet. I mange Tilfælde anvendes imidlertid Rambukke, ved hvilke der ikke sker Udløsning af Ramklodsens fra Ophejsningstovet, men hvor Ramklodsens under Faldet trækker Ophejsningstovet med sig <sup>1)</sup>. I saa Fald bliver Faldenergien en Del mindre end  $Qh$ , og der maa derfor i Formlerne indføres en til Formindskelsen af Faldenergien svarende Korrektion.

Hvor meget mindre man skal regne Faldenergien, afhænger af den paagældende Rambuks Konstruktion, og der kan derfor ikke angives nogen bestemt Størrelse for Reduktionsfaktoren. Under almindelige Forhold kan Reduktionsfaktoren sættes til ca. 0,75. (Se iøvrigt § 203).

*Goodrich's* Formel (175) adskiller sig i Henseende til den i Formlen indgaaende Størrelse  $Qh$  fra de øvrige Formler derved, at det ved nævnte Formel er forudsat, at Ramslaget sker uden Udløsning af Forbindelsen mellem Ramklodsens og Ophejsningstovet, idet der ved Bestemmelsen af den i Formlen indgaaende Koefficient (0,276) er taget Hensyn til den omtalte Reduktion af Faldenergien.

For Anvendelsen af Formlerne er det endvidere en Forudsætning, at der hængaar saa lang Tid mellem hvert af de enkelte Ramslag, at Pælen og den omgivende Jord er kommet i Ro efter Ramklodsens Stød paa Pælen.

Ved Ramning med Rambukke, der er specielt indrettede til at give meget hurtigt paa hinanden følgende Ramslag <sup>2)</sup>, er denne Betingelse i Almindelighed ikke opfyldt.

Angivelse af, hvilken Indflydelse det kan antages at have paa Formlens Værdierne for  $P_g$ , at Ramningen sker med hurtigt paa hinanden følgende Ramslag, haves kun for *Engineering News's* Formel (174). Efter *Jacoby and Davis* <sup>3)</sup> kan for Ramning med Dampramme sættes:

$$P_g = \frac{Qh}{s + 0,25} \quad (181)$$

<sup>1)</sup> »Piskning«. Se § 203.

<sup>2)</sup> Dampramme. Se § 206.

<sup>3)</sup> *Jacoby and Davis: Foundations of Bridges and Buildings. 1925.*

Ved Ramning af Pæle, hvis Bæreevne i Hovedsagen hidrører fra Friktion mellem Pælens Sideflader og den omgivende Jord, viser det sig i Reglen — men i mere eller mindre udpræget Grad efter Jordbundens Beskaffenhed — at Pælens Nedsynkning for hvert Ramslag i en uafbrudt Serie Ramslag er større end den Nedsynkning, der fremkommer, naar man efter en Pause i Ramningen — f. Eks. paa nogle Timer — giver Pælen et enkelt Ramslag med samme Faldenergi som i den forudgaaende Serie Ramslag. Forskellen i Nedsynkning er større, hvis Ramningen forud for Pausen sker med hurtigt paa hinanden følgende Ramslag (Dampramme, Rammehastighed f. Eks.: 1 Ramslag pr. Sek.), end hvis Ramningen sker med den Slags Rambukke, ved hvilke Ramklodsens Forbindelse med Ophejsningstovet udløses for hvert Ramslag (Rammehastighed f. Eks.: 2 til 3 Ramslag pr. Minut). Hvis man efter en Pause i Ramningen fortsætter denne med samme Rammehastighed som før Pausen, er Nedsynkningen ved det første af Ramslagene forholdsvis lille, men derefter vokser Nedsynkningen pr. Ramslag og kan naa op til samme Størrelse som før Pausen.

Forskellen i Nedsynkning før og efter en Pause i Ramningen kan være meget betydelig. Ved Pæle i Sandbund er den i Reglen meget mindre end ved Pæle i blødt Ler. Ved Ramning af Pæle i blød Lerbund er det ikke ualmindeligt, at Nedsynkningen ved Genoptagelsen af Ramningen efter en Pause paa nogle Dage kan være 5 til 10 Gange saa lille som Nedsynkningen ved Ramningens Afslutning forud for Pausen.

Det antages, at det her nævnte Forhold kan finde sin Forklaring i, at Pælen faar svingende Sideudbøjninger (Vibrationer) som Følge af Ramklodsens Stød mod Pælehovedet. Disse Sideudbøjninger bevirker, at Hullet i Jorden bliver noget større end Pælen paa en Del af Pælelængden, og derved en Formindskelse af den samlede Friktionsmodstand, saaledes at der ikke er saa stor Nedsynkningsmodstand at overvinde ved det næste Ramslag, hvis dette følger hurtigt efter. Naar Pælen har været i Ro i nogen Tid, vil Jorden paa Grund af den ved Ramningen skete Sammentrykning og ved elastisk Eftervirkning i den komprimerede Jord komme til at slutte tæt om Pælen og udøve det fulde til Jordspændingen svarende Tryk mod Pælens Sideflader. I kohæsiv Jord varer det forholdsvis længere Tid, inden Virkningen af Pælens Vibrationer fortager sig, end Tilfældet er ved Sandbund.

*Terzaghi* anfører, at ved vandmættet finporet Jordbund (Ler) hidrører Formindskelsen af Friktionen mellem Jorden og Pælen under dennes Ramning fra Modstanden mod Porevandets Udpresning. Ved Pælens Nedtrængen i Jorden sammentrykkes Jorden i en vis Udstrækning omkring Pælen, men for at den hertil svarende Fortætning af

Jordmassen skal kunne ske, maa en Del af det i Jorden nærmest Pælen værende Porevand fortrænges. Dette kræver i Jordbund, som f. Eks. Ler, hvis Permeabilitet er lille, forholdsvis lang Tid, og der kan derfor, medens Ramningen foregaar, omkring Pælen danne sig et Vandlag, der i større eller mindre Udstrækning hindrer, at Jorden kommer i Berøring med Pælen, og dermed hindrer Friktionen mellem Pælen og Jorden i at komme til at virke. Først i Løbet af nogen Tid forsvinder dette Pælen og Jorden adskillende Vandlag ved, at Vandet presses ud i den omgivende Jords Porer, og først da faar Pælen hele den til Friktionen mellem Pæl og Jord svarende Bæreevne.

For saa vidt angaar Spidsmodstanden, medfører den Omstændighed, at Porevandets Fortrængning tager nogen Tid, at Pælens Bæreevne er større (Nedsynkningen mindre) for et kortvarigt Tryk som det, der fremkommer ved Ramklodsens Stød, end den er for et roligt og langvarigt Tryk af samme Størrelse — dette i Modsætning til, hvad Tilfældet er for Friktionsmodstandens Vedkommende.

*Terzaghi* tillægger det her omtalte Forholds Indflydelse paa Afhængigheden mellem Ramslagets Faldenergi og Pælens Nedsynkning saa stor Betydning, at han anser alle Formler til Bestemmelse af Pælens Bæreevne paa Grundlag af Ramningsresultater for ganske uanvendelige, naar det drejer sig om Pæle i vandfyldt Lerbund eller i Jordbund af lignende Beskaffenhed.

Undertiden kan det forekomme, at det modsatte af det ovenfor omtalte Forhold indtræder, nemlig, at Modstanden mod Pælens Nedramning bliver mindre nogen Tid efter Ramningens Afslutning, end den er under den sidste Del af Ramningen. Dette, antager man, kan hidrøre fra, at den ved Pælens Nedtrængen frembragte Spænding i Jorden omkring Pælen først i Løbet af nogen Tid fordeler sig til hele det bærende Jordlegeme, og at Normaltrykket mellem Pælens Sideflader og den omgivende Jord, og dermed ogsaa Friktionsmodstanden, da aftager noget, efterterhaanden som Spændingerne fordeler sig.

Samtlige de Usikkerhedsmomenter, hvormed Beregning af Pælens Bæreevne paa Grundlag af Ramningsresultater er behæftet, maa man ved Anvendelsen i Praksis af denne Beregningsmaade tage fornødent Hensyn til ved passende Valg af den Sikkerhedsfaktor  $n$ , der indføres, ved at den tilladelige Pælebelastning sættes til:

$$P = \frac{1}{n} P_g.$$

Sikkerhedsfaktoren maa desuden afpasses under Hensyn til de Forsudsætninger, der ligger til Grund for den paagældende Formels Udledning.

I de Tilfælde, hvor Forskellen mellem Pælens Nedsynkning under kontinuerlig Ramning og dens Nedsynkning for et enkelt Ramslag efter en Pause i Ramningen er stor paa Grund af Jordbundens særlige Beskaffenhed, bør man saavidt muligt anvende Prøvebelastning til Bestemmelse af Pælens Bæreevne.

Nogen almindelig anerkendt Regel for, hvilken af de anførte Formler til Bestemmelse af Pælens Bæreevne der bør foretrækkes, og for, hvilken Værdi der under almindelige Forhold skal vælges for  $n$ , haves ikke. I de forskellige Lande bruges forskellige Formler og forskellige Værdier for  $n$ . I mange Tilfælde er det den paagældende Ingeniørs personlige Erfaring paa det specielle Omraade, der er bestemmende for, hvor stor Sikkerhedsfaktor der anvendes i de givne Tilfælde.

Her i Landet er det mest almindeligt at benytte *Eytelwein's* Formel (171) og at sætte  $n = 5$ .

I England og i de amerikanske Stater er *Engineering News's* Formel (174) meget anvendt, med  $n = 6$ .

I Tyskland er det mange Steder i Byggenormer fastsat, at tilladelig Pælebelastning skal beregnes af *Brix's* Formel (173), idet der sættes  $n = 2$ . Ved Anvendelse af *Rausch's* Formel (180) angives, at der kan regnes  $n = 3^1$ .

Iøvrigt anvendes ret forskellige Værdier for  $n$ , fra 2 til 10, efter de lokale Forhold med Hensyn til Jordbundens Beskaffenhed og det paagældende Bygværks Karakter og Konstruktion.

Ved Benyttelsen af de nævnte Formler til Beregning af Pælens Bæreevne er det Sædvane, at Størrelsen af  $s$  (Pælens Nedsynkning) bestemmes som Gennemsnit af Nedsynkning pr. Ramslag for en Serie Ramslag (5 til 20 Ramslag).

### 3. Statisk Beregning af Pælens Bæreevne.

180. Til forskellige Tider er der gjort Forsøg paa at løse Problemet om Beregning af Pælens Bæreevne ved Anvendelse af Jordtryksteoriene, idet man for Spidsmodstandens Vedkommende da har gjort lignende Betragtninger gældende som de, der vedrører Fladebelastning paa dybt liggende Trykflade, og for Friktionsmodstandens Vedkommende enten har sat denne lig med den lodrette Komposant af et paa Pælens Sideflader skraat opad, under Jordfriktionsvinklen ( $\varrho$ ) med Fladenormalen

<sup>1)</sup> Die Bautechnik. 1933.

virkende aktivt Jordtryk <sup>1)</sup> eller, som en anden Løsning, regnet med et paa Pælens (lodrette) Sideflader vandret virkende Jordtryk — aktivt Jordtryk eller passivt Jordtryk eller en Mellemværdi mellem aktivt og passivt Jordtryk — og da sat Friktionsmodstanden lig med dette Jordtryk, multipliceret med en eller anden Friktionskoefficient, f. Eks.  $\text{tg } \varrho$ .

Nogen i Praksis anvendelig, alene paa Jordtryksteorien hvilende Beregningsmaade for Pælens Bæreevne haves ikke. Alene den Omstændighed, at det er usikkert, hvilke Værdier der ved de forskellige Slags Jordbund skal indføres for de forskellige Jordtrykskonstanter (Friktionsvinkel, Skræntvinkel, Kohæsion o. a.) er en væsentlig Hindring for Anvendelsen af en saadan Beregningsmaade, og hertil kommer, at selve Jordtryksteorien som tidligere nævnt i sig indeholder mange Usikkerhedsmomenter, og at disse navnlig gør sig gældende i et Tilfælde som det her foreliggende, hvor den Jordmasse, hvis Tryk mod Pælen er bestemmende for Pælens Bæreevne, for en større eller mindre Dels Vedkommende bestaar af Jord, der ved Pælens Nedramning er blevet komprimeret, og hvis Lejringsforhold ogsaa paa anden Maade kan være blevet forandret ved Pælens Nedramning.

Anvendelsen af den Slags Beregningsformler som de, der her er Tale om, bør være begrænset til de Tilfælde, hvor det drejer sig om ved en foreløbig Projektering af et Bygværk at bestemme Længde, Tværsnit og Antal af Pæle til et Pælefundament, og hvor man ikke har haft Lejlighed til at foretage Ramning af Prøvepæle forinden Projekteringen.

Blandt Formler af den her omtalte Slags skal nævnes den af *H. Dörr* <sup>2)</sup> opstillede Formel:

$$P = \gamma \text{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) l f + \frac{1}{2} \gamma (1 + \text{tg}^2 \varrho) o l^2 \mu, \quad (182)$$

hvor  $P$  er Pælens tilladelige Belastning,  $l$  Pælens Længde,  $f$  og  $o$  henholdsvis Pæletværsnittets Areal og dets Omkreds,  $\gamma$  og  $\varrho$  henholdsvis Jordens Rumvægt og dens Friktionsvinkel (Skræntvinkel) og  $\mu$  en Friktionskoefficient for Glidning mellem Jorden og Pælens Sideflader.

Det første Led i Udtrykket for  $P$  angiver Spidsmodstanden  $P_s$ .

Denne kan skrives:

$$E = \frac{1}{2} \gamma l^2 \cos \varrho,$$

og Jordtrykkets lodrette Komposant bliver:  $E_l = \frac{1}{4} \gamma l^2 \sin 2 \varrho$ .

<sup>2)</sup> *H. Dörr*: Die Tragfähigkeit der Pfähle. 1922.

$$P_s = \gamma \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right) l f = q_l f,$$

hvor  $q_l$  da er at betragte som det i Dybden  $l$  tilladelige Tryk pr. Arealenhed paa Jordbunden.  $q_l$  ses her at være forudsat proportional med  $l$  (og med  $\gamma$ ) og voksende med Jordfriktionsvinklen <sup>1)</sup>).

Det sidste Led i Udtrykket for  $P_f$  angiver Friktionsmodstanden  $P_f$  og ses at have en Form, der svarer til, at Friktionsmodstanden regnes at være: en Friktionskoefficient ( $\mu$ ) Gange et Normaltryk, der pr. m af Pæletværsnittets Omkreds ( $o$ ) er lig  $\frac{1}{2} \gamma (1 + \operatorname{tg}^2 \varrho) l^2$ . Dette sidste Udtryk ligner det, der gælder for Jordtryk paa en Væg af Højde  $l$  <sup>2)</sup>. Der er her blot indført en anden Funktion for Jordtrykkoefficienten ( $\lambda$ ) end den sædvanlig anvendte, nemlig en Funktion, der giver Værdier liggende mellem Værdierne for Jordtrykkoefficienterne henholdsvis for aktivt Jordtryk:  $\operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varrho}{2} \right)$ , og for passivt Jordtryk:  $\operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varrho}{2} \right)$ .

For  $\mu$  angives det, at man kan sætte, naar Pælen er af Beton (for Træpæle noget mindre Værdier):

	$\mu$
Tørvejord o. l. ....	0,1
Vaadt Ler .....	0,2
Vaadt Sand, fugtigt Ler .....	0,3
Fugtigt skarpkornet Sand og Grus .....	0,4
Tørt Ler .....	
Tørt Sand og Grus, eftersom det er mere eller mindre skarpkornet .....	0,7—0,5

I Stedet for, som det gøres ved Dørr's Formel, at regne Friktionsmodstanden  $P_f$  lig  $\frac{1}{2} \gamma (1 + \operatorname{tg}^2 \varrho) o l^2 \mu$ , altsaa Friktionsmodstanden pr. Arealenhed af Pælens Sideflader voksende med Pælelængden, bruger man ogsaa at sætte:

$$P_f = k o l,$$

hvor  $k$  er en Erfaringsværdi for Friktionen mellem Jord og Pæleflade.

For  $k$  kan der efter Terzaghi regnes med følgende Værdier:

<sup>1)</sup> Udtrykket for den tilladelige Belastning  $q_l$  ses at være noget forskelligt fra det i § 161 anførte (136).

<sup>2)</sup> Jfr. f. Eks. (76), § 117.

	$k$
Tørvejord .....	0,7 t/m <sup>2</sup>
Plastisk Ler .....	1,8—2 »
Blødt sandblandet Ler .....	3—4 »
Løst lejret Sand .....	3,5 »
Stift Ler .....	6—9 »
Fast lejret sandblandet Ler, Mergel ...	8 »
Rent Sand .....	9—12 »

De her anførte Værdier for  $k$  svarer til Brudbelastningen. Ved Fastsettelse af tilladelig Belastning maa der derfor indføres en passende Sikkerhedsfaktor.

181. Pæles Modstand mod Optrækning. En Pæls Modstand mod Optrækning, naar den udsættes for langvarigt Træk, hidrører alene fra Friktionen mellem Jorden og Pælens Sideflader. <sup>1)</sup> Ud fra Kendskabet til en Pæls Bæreevne for Tryk kan der ikke drages nogen Slutning om Pælens Modstand over for Trækpaavirkning. Fra Bestemmelsen — ved Prøvebelastning eller paa Grundlag af Ramningsresultater — af en Pæls Bæreevne har man nemlig ikke nogen Viden om, hvor stor den Del af Bæreevnen er, der skyldes Friktionsmodstand, og hvor stor den Del er, der hidrører fra Spidsmodstand.

Paalidelig Oplysning om Størrelsen af Pæles Modstand mod Optrækning kan alene tilvejebringes ved, at der i hvert foreliggende Tilfælde foretages en Optrækningsprøve, svarende til Prøvebelastning til Bestemmelse af Pæles Bæreevne.

Paa Grund af, at saadan Prøveoptrækning er omstændelig og kostbar, maa man for det meste nøjes med en mer eller mindre skønsmæssig Ansættelse af Trækmodstanden.

Hertil kan man f. Eks. benytte en Formel som den i § 180 anførte (Dørr's Formel, (182)), efter hvilken man for den tilladelige Trækpaavirkning faar:

$$P_f = \frac{1}{2} \gamma (1 + \operatorname{tg}^2 \varrho) o l^2 \mu,$$

<sup>1)</sup> Ved en kortvarig Trækpaavirkning paa en Pæl, der staar i vandfyldt fin-kornet Jord (Ler), kan den Sugningsvirkning ved Pælespidsen, der er Følge af, at der er stor Modstand til Stede mod Vandets Bevægelse gennem Jordens Porer, bevirke betydelig Forøgelse af Pælens Modstand mod Optrækning.

nemlig den Del af  $P$ , der alene hidrører fra Friktionsmodstanden, eller man sætter Trækmodstanden til:

$$P_f = k o l,$$

hvori der for  $k$  da benyttes Erfaringsværdier for Friktionsmodstanden pr. Arealenhed, som f. Eks. de i Tabellen Side 205 anførte.

I Henseende til to særlige Forhold er der væsentlig Forskel mellem en Pæls Bæreevne (Trykpaavirkning) og en Pæls Evne til at optage Trækpaavirkning.

Som nævnt <sup>1)</sup> forringes en Pæls Bæreevne ikke, ved at den belastes ud over Brudgrænsen. For Trækpaavirkning er dette derimod ikke Tilfældet. Naar Brudgrænsen først er overskredet, synker Pælens Modstandsevne over for Trækpaavirkning til Nul eller meget nær til Nul.

Med Hensyn til Proportionalitetsgrænsen og Grænsen for det elastiske Omraade er der ligeledes væsentlig Forskel mellem trykpaavirkede og trækpaavirkede Pæle. Proportionalitetsgrænsen, og i Reglen ogsaa Grænsen for det elastiske Omraade, er sædvanlig lavere ved trækpaavirkede end ved trykpaavirkede Pæle. Navnlig er Forskellen stor ved Pæle, hvor Spidsmodstanden udgør en væsentlig Del af Pælens Bæreevne.

De her nævnte Forhold spiller en vigtig Rolle med Hensyn til Konstruktion og Beregning af Pæleværker, i hvilke der indgaar saavel Trykpæle som Trækpæle.

## V. FUNDAMENTER, DER HVILER DIREKTE PAA BYGGEGRUNDEN.

### A. Fundamenter paavirkede alene af lodrette Kræfter.

182. Massive Fundamenter. Vi vil antage, at det paagældende Bygværk, eller Del af et Bygværk, er en Mur, fra hvilken der til Byggegrunden skal overføres en Kraft  $P$  pr. Længdeenhed af Muren. I Kraften  $P$  kan Fundamentets Egenvægt være indbefattet. Som nævnt i § 164 gaar man med Hensyn til Trykfordelingen i Anlægsfladen mellem Fundamentet og Byggegrunden sædvanlig ud fra den simple, men ikke rigtige Forudsætning, at et centralt virkende Tryk  $P$  frembringer en ensformig fordelt Belastning,  $p_0$  pr. Arealenhed, paa Byggegrunden. Den fornødne Bredde  $b$  af Fundamentsfladen faas under denne Forudsætning da simpelthen af:

$$P = p_0 b,$$

naar  $p_0$  sættes lig med den for Byggegrunden (og det paagældende Bygværk) fastsatte tilladelige Belastning.

For at Kraften  $P$  kan overføres fra Murens Anlægsflade mod Fundamentet (Bredde:  $b_1 < b$ ) til Fundamentsfladen (Fig. 145), uden at Spændingerne i selve Fundamentet bliver for store, maa dette have en vis Højde i Forhold til Bredden.

Fundamentet udføres i Reglen af Beton og gives den i Figuren viste aftrappede Form.

Ved Udregningen af de i Fundamentet optrædende Spændinger kan for Simpleheds Skyld de aftrappede Sideflader erstattes med skraa Planer, som vist i Figuren. Fundamentets Højde er da bestemt ved Vinklen  $\alpha$ . Til Bestemmelse af Retningen for de Snit, hvori de ved en vis Værdi af Vinklen  $\alpha$  farligste Spændinger optræder, kan følgende Tilnærmelsesberegning anvendes. <sup>1)</sup>

I Snittet  $x x$  er:

$$\text{Største Trækspænding: } \sigma_1 = p_0 \sin \psi \cos \psi (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \psi) (1 - 3 \operatorname{ctg} \psi \operatorname{tg} \alpha)$$

$$\text{Største Trykspænding: } \sigma_2 = p_0 \sin \psi \cos \psi (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \psi) (1 + 3 \operatorname{ctg} \psi \operatorname{tg} \alpha)$$

$$\text{Forskydningsspænding: } \tau = p_0 \sin \psi \cos \psi (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \psi) \operatorname{ctg} \psi.$$

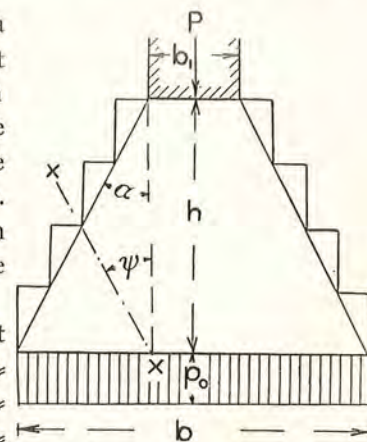


Fig. 145.

<sup>1)</sup> § 175.

<sup>1)</sup> Die Bautechnik. 1932.