

# Nyare In Situ metoder för bedömning av lagerföljd och egenskaper i jord

Rolf Larsson  
Göran Sällfors

## FÖRORD

Ett av huvudsyftena med geotekniska undersökningar är att få underlag för bedömning av stabilitet, bärighet, sättningar och andra deformationer.

I denna skrift beskrivs ett antal nyare metoder som används för att bestämma jords lagerföljd och egenskaper i dess naturliga tillstånd i fält, s k in situ metoder. Metodernas användbarhet i olika jordar och för bestämning av olika parametrar bedöms också.

De studerade metoderna är främst avsedda för lösa och medelfasta jordar med kornstorlekar upp till grusfraktionen.

Skriften riktar sig till geotekniker, beställare av geotekniska undersökningar, tillverkare av geoteknisk utrustning och övriga som önskar information om vad de nyare undersökningsmetoderna kan användas till och vilka krav som bör ställas på utrustningarna och deras handhavande.

Syftet med denna skrift är:

- att beskriva metoderna samt att visa hur försöksresultaten kan bearbetas och utvärderas.
- att belysa förtjänster och brister i metoderna och tolkningen av resultaten.
- att utvärdera användbarheten av metoderna och utrustningarna för skilda syften och i olika jordar.
- att bedöma utrustningarnas användbarhet för speciellt svenska förhållanden och vilka som bör bli föremål för vidare forskning och utveckling i Sverige.
- att jämföra nya och gamla fältmetoder samt provtagning och laboratorieförsök. Jämförelsen avser användningsområde, svårighetsgrad och kostnader.

Skriften baseras på egna erfarenheter från SGI och CTH, litteraturstudier, kontakter med tillverkare och användare av de aktuella utrustningarna samt erfarenheter från andra institutioner som bedriver forskning och utveckling inom detta område.

Projektet har bekostats genom anslag från Statens råd för byggnadsforskning och interna medel från SGI och CTH.

Ett stort tack riktas till alla de kollegor och institutioner som ställt sina erfarenheter och sitt kunnande till vårt förfogande.

Linköping i december 1987

Rolf Larsson

Göran Sällfors

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid
1 BAKGRUND	3
2 NYARE IN SITU METODER	6
3 SONDERINGSMETODER	8
3.1 SPETSTRYCKSONDERING	8
3.2 PORTRYCKSONDERING	8
3.3 KOMBINERAD SPETSTRYCK- OCH PORTRYCKSONDERING	9
3.3.1 SPECIELLA MÄTPROBLEM	11
Filter, vätska och mättning	
Temperatureffekter	
Höjdkorrelering av mätvärdena	
Sondens vertikalitet	
Filtrets placering	
3.3.2 UTVÄRDERING	14
Stratigrafi	
Jordartsklassificering	
Odränerad skjuvhållfasthet	
Förkonsolideringstryck	
Lagringstäthet	
Friktionsvinkel	
Moduler och kompressibilitet i friktionsmaterial	
Effektiva hållfasthetsparametrar i finkomiga jordar	
Moduler i lera	
Konsolideringskoefficient	
Permeabilitet	
3.3.3 SPECIELLA MÄTMETODER	22
Akustisk sondering	
Resistivitetsmätning	
Bestämning av skjuvmodul med accelerometer	
 Kombinerad spetstryck- portrycksondering och nedpressad "full- displacement" pressometer	
3.3.4 SAMMANFATTNING	23

4	DILATOMETER	24
4.1	UTVÄRDERING	25
	Jordartsklassificering	
	Deformationsegenskaper	
	Jordtryckskoefficient	
	Överkonsolideringsgrad	
	Odränerad skjuvhållfasthet	
	Friktionsvinkel	
4.2	DILATOMETERFÖRSÖK MED MÄTNING AV NEDDRIVNINGSKRAFT ELLER SAMKÖRDA MED SPETSTRYCK-PORTRYCKSONDERING	28
4.3	SAMMANFATTNING	29
5	PRESSOMETER	30
5.1	MENARD-PRESSOMETERN	30
5.2	SJÄLVBORRANDE PRESSOMETER	34
5.3	"PUSH-IN" PRESSOMETER	36
5.4	"FULL-DISPLACEMENT" PRESSOMETER	36
6	PLATTFÖRSÖK	37
6.1	SKRUVPLATTFÖRSÖK	38
6.2	SAMMANFATTNING	43
7	PERMEABILITETSMÄTNING	44
7.1	MÄTNING AV PERMEABILITET MED NEDDRIVNA FILTERSPETSAR OCH SJÄLVBORRANDE PERMEAMETRAR	44
7.2	SAMMANFATTNING	50
8	METODER FÖR HORIZONTALTRYCKSMÄTNING	50
8.1	HYDRAULISK SPRÄCKNING	50
8.2	JORDTRYCKSDOSOR	51
8.3	IOWA STEPPED BLADE	52
9	SKJUVFÖRSÖK I BORRHÅL	52
10	ANVÄNDBARHET FÖR DE NYARE IN SITU METODERNA	54
11	PRIMÄRT FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGSBEHOV I SVERIGE	56

## 1. BAKGRUND

Geotekniska undersökningar har som syfte att klarlägga lagerföljden i jorden samt de tekniska egenskaperna i dessa lager.

Lagerföljden bedöms som regel ur resultaten från någon form av sondering. För lösa och medelfasta jordar görs detta i Sverige traditionellt genom viktsondering. Den manuella viktsonden utvecklades omkring 1915 och är enkel men förhållandevis arbetskrävande. Möjligheten att erhålla en detaljerad bild av jordlagerförhållandena är begränsad. Viktsonden har sedan moderniserats såtillvida att maskinella utrustningar numera ofta används. Detta har ökat produktionskapaciteten men i viss mån försämrat kvaliteten på resultaten. Fig.1.

En viss förbättring erhöles under 60-talet då mekanisk totaltryckssondering introducerades i Sverige, speciellt sedan den utrustats med en glappkoppling vid spetsen så att stångfriktion och spetsmotstånd kunde separeras. Totaltryckssondering är ofta snabbare än viktsondering och kan dessutom ge en mer detaljerad bild av jordlagerföljden. Tunna skikt kan dock ej uttolkas ur resultaten. Någon standard för metoden finns inte trots att den, speciellt på Västkusten, varit i allmänt bruk i mer än 25 år. Vid totaltryckssondering mäts och registreras kraft och neddrivning som regel mekaniskt. Detta ställer ökade krav på handhavande, underhåll och kalibrering för att inte den eftersträvade kvalitetsförbättringen relativt den manuella viktsonden skall förloras eller i värsta fall medföra en försämring. Fig.2.

Spetsstryckssondering har under senare år kommit till allt större användning även i Sverige. Vid spetsstryckssondering mäts spetsmotståndet direkt med kraftgivare monterade i själva spetsen. Ofta mäts också den lokala mantelfrik-

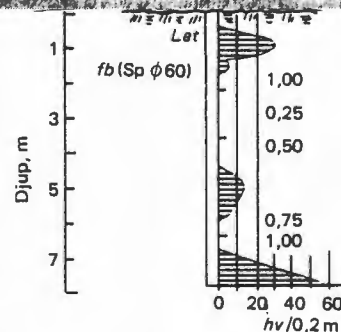


Fig. 1. Manuell viktsond med princip för resultatredovisning, [1].

tionen mot en hylsa placerad alldeles ovanför spetsen. Av de olika metoderna att mäta neddrivningsmotståndet vid sondering är det denna metod som har de bästa förutsättningarna för en noggrann bestämning av jordlagerföljden. Fig.3.

Sondspetsarna är dock relativt dyra. För att kunna användas i alla typer av jord och för att kunna tåla stora krafter utan att överbelastas har de som regel gjorts mycket robusta. Noggrann-

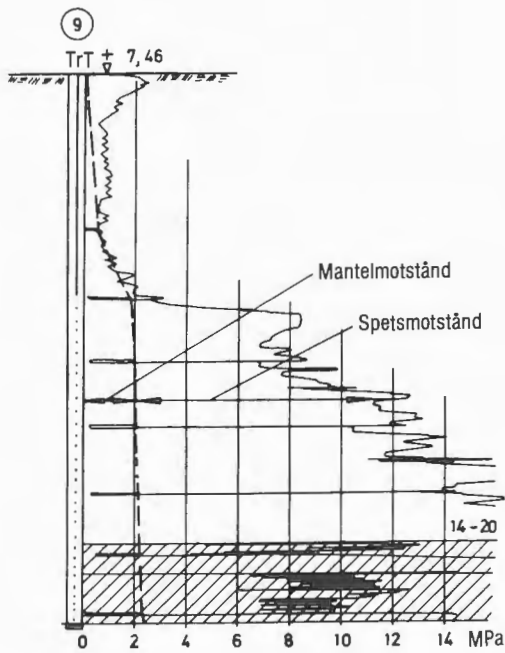


Fig. 2. Exempel på resultat av totaltrycksöndring. Den skrafferade ytan indikerar att sonden roterats under samtidig belastning, [1].

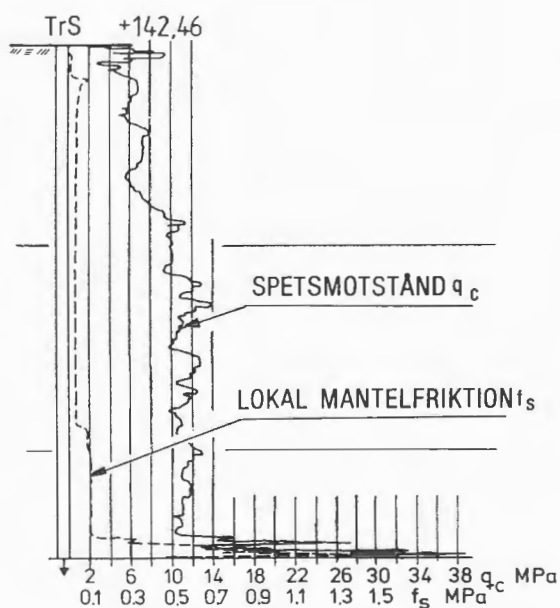


Fig. 3. Exempel på resultat av spetstrycksöndring med mätning av lokal mantelfriktion, [1].

heten i en elektrisk kraftgivare är dock beroende av mätområdet. En kraftgivare som t ex tål 10-tonns last och har en relativt god noggrannhet på 0,5% av mätområdet har således en variation i mätvärden som motsvarar 500 kPa i spetsstryck på en spets med tvärsnittsytan 10 cm<sup>2</sup>. Dessutom tillkommer att elektroniska mätinstrument ofta är temperaturkänsliga och även i detta fall är mätfelet beroende av det totala mätområdet. För lös och medelfast jord har detta i praktiken inneburit att resultaten i lös jord varit av ringa värde medan noggrannheten i medelfast jord varit diskutabel. Detta gäller i huvudsak äldre utrustning för spetsstrycksöndring. Först under den allra senaste tiden och i Sverige först i samband med detta projekt har utrustning med god upplösning också för lös jord börjat tillverkas.

Ett annat sätt att registrera variationer i jordlagerföljden är att utföra portrycksöndring. Metoden har funnits sedan mitten av 70-talet och går ut på att mäta det porvattentryck som genereras då en sond drivs genom jorden med en konstant hastighet. Därvid kan i huvudsak variationer i jordens permeabilitet registreras. På detta vis kan relativt tunna lerskikt i friktionsmaterial liksom tunna silt och sandskikt i lera ofta observeras. Fig.4.

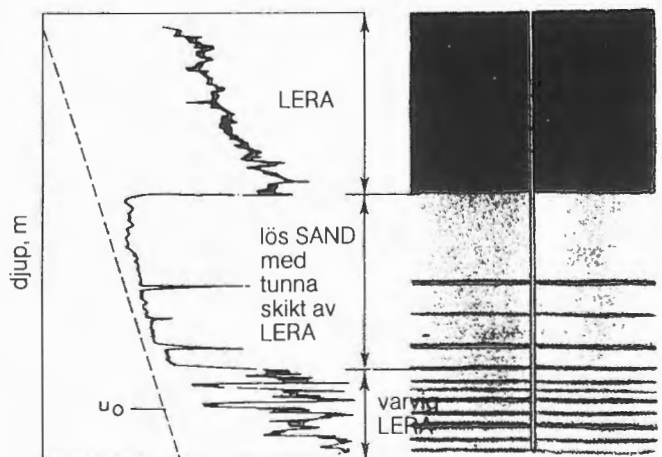


Fig. 4. Exempel på resultat från portrycksöndring, [2].

Portryckssondering kombineras ofta med någon typ av sondering med mätning av neddrivningsmotståndet. Tillsammans ger dessa resultat en avsevärt förbättrad bild av jordlagerföljden.

Under senare år har spetstryckssondering och portryckssondering kombinerats i samma spets sk TrSP- eller CPTU-sondering. Här uppstår dock ytterligare problem. Förutom nämnda problem med upplösning av spetstrycksmätningen interfererar dessutom portryck och spetstryck. Detta problem har först på senare tid uppmärksamats och då främst utomlands. I Sverige har detta i stor utsträckning förbisetts, och många sonderingsresultat är omöjliga att korrigera i efterhand eftersom kalibreringsdata saknas.

För att de nya sonderingsmetoderna skall ge resultat som innebär en förbättring jämfört med den gamla manuella viktsonderingen krävs därför noggrann kalibrering, hantering av utrustning och utvärdering av resultat, mer så än vad som idag normalt förekommer i landet.

Andra nyare former av sondering för att bedöma lagerföljd är t ex akustisk sondering där man med en mikrofon i spetsen registrerar de ljud som uppstår då sonden drivs ned. Metoden kan jämföras med ett moment vid den gamla manuella viktsonderingen, där man genom att lyssna på ljudet i stängerna vid vridning skulle kunna bedöma vad det var för typ av jord vid spetsen.

En annan typ av undersökning som ger en god bild av jordprofilen är dilatometerförsök. Dessa är dock ej kontinuerliga utan ger endast ett värde varje 0,2 m.

Den mest exakta metoden att bestämma jordlagerföljd är att ta kontinuerliga prover men detta låter sig normalt inte göras på grund av kostnadsskäl.

Av olika skäl önskar man ofta bestämma jordens tekniska egenskaper på plats. Det är ofta mest praktiskt och ekonomiskt fördelaktigt. All form av provtagning skapar dessutom förändringar i jordens spänningstillstånd och många av dess egenskaper. Faktorer som komdensitet, kornfördelning, organisk halt och konsistensgränser ändras inte vid störning eller ens omrörning. Andra faktorer som struktur, hållfasthets- och deformationsegenskaper förändras redan vid måttlig störning.

Möjligheten att undersöka en naturlig jords egenskaper i laboratorium är således avhängig av om egenskapen i fråga är känslig för störning och om man i så fall kan ta tillräckligt ostörda prover för att egenskaperna skall behållas eller kunna återskapas. Tillräckligt ostörda prover kan med rimlig arbetsinsats normalt endast tas i mycket finkorniga jordar och i organiska jordar. I dessa jordar undersöks också främst kompressionsegenskaper med fördel i laboratorium. Den låga permeabiliteten gör att erforderlig provningstid blir lång även för små prover.

Laboratorieförsök erfordras också ofta för att utröna allmänna samband, till exempel samband mellan spänningsnivå, struktur och hållfasthet, eller för att studera hur jordens egenskaper förändras vid konsolidering. De kan också med fördel användas för att i förväg bestämma förväntade egenskaper hos icke naturliga jordmaterial som olika typer av fyllningar.

Möjligheten att bestämma jords egenskaper in situ är också begränsade. Fullskaleförsök är kostsamma och utförs endast i undantagsfall. För att testa en begränsad jordvolym på plats fordras att en provningsutrustning installeras. Detta kan inte göras in i jorden utan att någon form av störning sker. Vid provningen är det som regel dessutom svårt att efterlikna verkliga belastningsfall. Försöksresultaten är ofta

beroende av hur stor jordvolym som provats, randvillkoren är ofta svårbestämda och tolkningen är osäker.

Önskemålet att prova jorden i ostört naturligt tillstånd är därför svårt att uppfylla.

Utvecklingen av in situ metoder har tagit fart de senaste decennierna genom introduktion av såväl nya metoder som hydraulik, pneumatik och elektronik i fält.

Metoderna kan indelas i tre grupper;

- Sonderingsmetoder där jordens egenskaper utvärderas genom mätning av olika storheter vid den kontinuerliga neddrivningen av sonden, främst kombinerad spetstryck- portrycksondering.
- Provningsmetoder där utrustningen pressas ned och försöken sedan utförs i den störda jorden, t ex dilatometer, full-displacement pressometer, portrycksutjämnning efter nedpressning och permeabilitetsförsök i filterspetsar.
- Provningsmetoder där man försöker installera utrustningen med så liten störning av jorden som möjligt varpå försöket utförs, t ex pressometerförsök i förborrade hål, självborrande pressometrar, skruvplatteförsök och självborrande permeometrar.

Också i den sistnämnda försökstypen sker en viss störning. Teorierna för utvärdering och kännedomen om randvillkoren är dessutom begränsade varför all utvärdering är antingen rent empirisk eller halvempirisk.

Det empiriska underlaget för många av de nya metoderna är bristfälligt och teori och utvärdering har fått revideras allteftersom förståelsen för vad man i verkligheten mäter har ökat.

Ett speciellt problem i sammanhanget är att såväl uppfinnare, tillverkare som användare ofta vill få en speciell utrustning, som kan vara utmärkt i vissa sammanhang, till att vara ett universalinstrument för alla typer av jord varmed alla jordens egenskaper kan mätas. Empiriska samband utnyttjas ofta till absurditet.

Något universalinstrument finns inte och lär inte heller komma.

## 2. NYARE IN SITU METODER

Med nyare metoder avses här metoder som antingen är helt nya eller där en påtaglig utveckling fortfarande pågår. En del av dessa är väl kända och har funnits i många år. Spetstryckssondering har till exempel använts sedan 1940-talet och såväl pressometern som skruvplattan har använts sedan slutet av 1950-talet. Andra metoder som t ex "the Iowa stepped blade" har fått mycket begränsad spridning och är därför tämligen obeprövade.

För bedömning av de nyare metoderna bör dessa relateras till äldre beprövade metoder.

De metoder som behandlas i denna skrift är följande:

- Spetstrycksondering TrS (CPT)
- Portrycksondering TrP (PPP)
- Kombinerad spetstrycks- och portrycksondering TrSP (CPTU)
- Mätning av portrycksutjämnning i samband med sondering
- Resistivitetsmätning
- Akustisk sondering
- Skjuvvågmätning vid sondering
- Dilatometerförsök (DMF)
- Pressometerförsök enligt Menard (PMT)
- Självborrande pressometerförsök (SBP)
- Push-in pressometerförsök (PIP)
- Full-displacement pressometerförsök (FDP)



- o Plattförsök
- o Skruvplatteförsök
- o Permeabilitetsförsök i filterspetsar
- o Permeabilitetsförsök med självborrande permeametrar
- o Hydraulisk spräckning
- o Horisontaltrycksmätning med jordtrycksdosor
- o Horisontaltrycksmätning med Iowa stepped blade
- o Skjuvförsök i borrhål

De olika metoderna kan grupperas efter olika kriterier. De kan indelas efter mätmetodik enligt följande:

- 1 Metoder för mätning av jordparametrar under pågående sondering med konstant neddrivningshastighet. Mätningen sker således under det att jorden befinner sig i ett kontinuerligt brottstillstånd.
  - o Spetstrycksondering
  - o Portrycksondering
  - o Akustisk sondering

Denna grupp av försök utförs i huvudsak för att bedöma jordarter och jordlagerföljd. Det är den arbetsmässigt mest rationella typen av försök och omfattande försök görs att via empiri också utvärdera jordens egenskaper.

- 2 Metoder där försöksutrustningen pressas ned och försöken sedan utförs i den störda jorden.
  - o Dilatometerförsök
  - o Full-displacement pressometerförsök
  - o Mätning av portrycksutjämnning då portrycksondering stoppas
  - o Permeabilitetsförsök i nedpressade-filterspetsar
  - o Mätning av horisontaltryck med Iowa stepped blade

Denna försökstyp är arbetsmässigt relativt rationell. En omfattande empiri håller på att byggas upp främst vad avser dilatometerförsök för att kunna

utvärdera jordens egenskaper. I alla försök av denna typ inverkar störningen och värdet av resultaten är beroende av om den uppmätta parametern är känslig för störning och om den i så fall kan korrigeras med hjälp av empiri.

Till denna försökstyp kan också räknas:

- o Bestämning av skjuvmodul med accelerometer vid sondering
- o Bestämning av horisontaltryck med hydraulisk spräckning

I dessa försök testas dock en så stor jordvolym att den lokala störningen invid sonden inte menligt bör påverka resultatet.

- 3 Provningsmetoder där man försöker installera utrustningen i så ostörd jord som möjligt varpå försöket utförs.
  - o Pressometerförsök i förborrade hål (Menard-pressometer)
  - o Pressometerförsök med självborrande pressometrar
  - o Skruvplatteförsök
  - o Plattförsök i förborrade hål
  - o Permeabilitetsförsök med självborrande permeametrar
  - o Horisontaltrycksmätning med spadformiga jordtrycksdosor
  - o Skjuvförsök i borrhål

Också i denna typ av försök sker en viss störning och empiriska korrekitioner får tillgripas för flera av försökstyperna. Bortsett från mätning med jordtrycksdosor är de som regel betydligt besvärligare och kostsammare att utföra än de andra försökstyperna. Avsikten med försöken är dock att direkt bestämma jordens egenskaper så noga och i så ostört tillstånd som möjligt.

De olika metoderna kan också grupperas efter vad de i huvudsak används för att bestämma. De kan sålunda indelas i:

1. Metoder för bedömning av jordart och jordlagerföljd.

Hit hör främst de olika sonderingsmetoderna. I någon mån kan också dilatometern räknas hit beroende på vilken typ av jordprofil som undersöks.

2. Metoder för bestämning av hållfasthets- och deformationsegenskaper.

Till dessa hör de olika pressometerförsöken, platt- och skruvplatteförsöken, dilatometerförsöket, skjuvstångsmätning och skjuvförsök i borrhål.

3. Metoder för bestämning av permeabilitet.

Permeabilitetsbestämning utförs genom försök i filterspetsar eller i självborrande permeametrar.

4. Metoder för bestämning av naturligt spänningstillstånd.

Till denna grupp hör jordtrycksdosor, hydraulisk spräckning och Iowa stepped blade. Till gruppen bör också självborrande pressometrar räknas. Även om det inte var det ursprungliga huvudsyftet med dessa utrustningar är mätning av horisontal-spänningar in situ ett område där de visat sig särskilt användbara.

### 3. SONDERINGSMETODER

#### 3.1 SPETSTRYCKSONDERING TrS (CPT)

Spetstrycksonden kan jämföras med viktsonden och trycksonden. I och med att spetstrycket mäts separat och oberoende av mantelfriktionen mot stängerna erhålls en bättre bild av jordlagerfölj-

der och de enskilda lagrens egenskaper än med äldre metoder. Spetstrycksondering utfördes till en början med mekaniska spetstrycksmätare, men de första sonderarna med elektrisk mätning av spetsmotståndet kom i bruk redan 1948 i Holland.

Spetstrycksmätning för bestämning av jordlagerföljd och friktionsjordars egenskaper in situ har sedan använts i allt större omfattning, främst i Holland, men allteftersom också i andra länder. Med tiden har spetstrycksmätarna kompletterats med en friktionshylsa för mätning av den lokala friktionen mot sonden strax ovan spetsen. Speciellt i Holland har sonderarna också utrustats med inklinometrar för kontroll av sondens riktning och läge vid de ofta mycket djupa sonderingar som utförs där.

Koner och friktionshylsor har haft mycket skiftande utseende och dimensioner men med tiden har en europeisk standard skapats [3]. Standarden föreskriver  $60^\circ$  spetsvinkel, en tvärsnittsarea av  $10 \text{ cm}^2$  och en friktionshylsa med arean  $150 \text{ cm}^2$  placerad strax ovan spetsen. I standarden finns också regler om toleranser, om att friktionshylsans diameter skall vara något större än eller lika med spetsens och att sondens diameter skall vara konstant den första metern från spetsen räknat. Neddrivningshastigheten skall vara  $0,02 \text{ m/s}$ . Denna standard används numera i Sverige [4] och de flesta andra länder, men andra spetsstyper är i bruk såväl i Europa som annorstädes.

#### 3.2 PORTRYCKSONDERING TrP (PPP)

Portrycksonderingen utvecklades samtidigt men separat av Torstensson [2] och Wissa et al [5] 1975. Vid portrycksondering mäts det portryck som genereras vid neddrivning av en sond i jorden. Neddrivningen sker med en konstant hastighet av  $0,02 \text{ m/s}$ . Liksom spetstryck-

sondering kan portrycksondering användas för att bedöma jordens lagerföljd. I finkorniga jordar kan detta göras med betydligt större noggrannhet då även tunna skikt av friktionsjord i lera respektive lera i friktionsjord kan registreras. I lös lera genereras normalt ett porvattenövertryck i storleken 5 a' 10 ggr jordens odränerade skjuvhållfasthet. Det portryck som genereras och mäts beror bl a på var på sonden mätningen sker. Det högsta portrycket genereras på spetsens konade del. Det avtar markant vid övergången till konstant diameter, då spetsen passerat. Ytterligare portrycksförändringar sker sedan utefter sonden alltefter som avståndet till spetsen ökar.

I sand och silt genereras inga eller endast små porövertryck. På grund av att det relativt ömtåliga filtret har en mera skyddad placering på en del med konstant diameter utförts portrycksmätningen i de flesta fall strax ovanför den konade delen (Jfr SGF:s rekommendationer [6]). Denna placering medför tolkningsvårigheter i överkonsoliderade jordar där portrycksfallet vid övergång från kon till konstant diameter är stort och portrycken också i lera kan bli låga eller till och med negativa. Nya och tungt vägande skäl för placering av filtret ovan den konade delen har dock tillkommit i samband med kombinerandet av spetstryck- och portrycksondering.

Vid portrycksondering ställs höga krav på vätskemättnad i filter och mätkanaler. Sondering i icke vattenmättade jordar eller jordar där negativa portryck utbildas medför stora problem. Metoden används normalt endast under grundvattenytan och förborming bör ske genom torrskorpan.

### 3.3 KOMBINERAD SPETSTRYCK- OCH PORTRYCKSONDERING TrSP (CPTU)

Då portrycksondering ger en bättre upplösning vid bedömning av jordlagerföljd för finkorniga och skiktade jordar samtidigt som spetstrycksondering ger en bättre bild av egenskaperna hos de grövre jordlagren användes de båda typerna till en början ofta parallellt. Genom att kombinera de tre uppmätta storheterna spetstryck, portryck och lokal mantelfriktion kunde man skapa sig en bättre bild av jordarterna och deras egenskaper. Som en logisk följd av detta började de första kombinerade spetstryck-portrycksonderna användas under sjuttioalet. De flesta av dessa följer den europeiska standarden för spetstrycksondering och de flesta har filtret för portrycksmätning placerat ovanför den konade delen mellan spetsen och friktionshylsan. Filterplaceringen är ej standardiserad men en rekommendation finns.

På grund av sondspetsarnas konstruktion inverkar de genererade portrycken på såväl uppmätt spetstryck som uppmätt mantelfriktion. Ett vattentryck vid sondspetsen resulterar inte bara i ett upptryck på spetsens tvärsnittsarea utan också i ett motriktat tryck på den area bakom spetsen som exponeras för vattentryck. Motsvarande gäller friktionshylsorna som påverkas av vattentryck i såväl över- som underkant.

Vid sondering i friktionsjord är normalt spetstrycket stort och påverkan av vattentrycket relativt liten. På stora vattendjup blir dock inverkan av vattentrycket på uppmätt spetstryck påtaglig i alla jordar.

Vid sondering i lös lera utvecklas höga portryck som ofta är nästan lika stora som totaltrycket. Tas inte hänsyn till detta kan stora fel uppstå i utvärderat spetsmotstånd och friktion. Utvärderingen kompliceras ytterligare av att de portryck som verkar ovan spetsen i

starkt överkonsoliderade finkorniga jordar ofta är mycket låga och ibland till och med negativa. Det har således visat sig att om man skall kunna mäta spetsmotståndet i finkorniga jordar måste man samtidigt mäta portrycket i mätskarven strax ovan spetsen och korrigera för detta. För att slippa korrigera den mätta mantelfriktionen konstrueras friktionshylsan som regel så att de ytor som påverkas av vattentrycket är lika i över- och underkant. Antagandet att vattentrycken är lika i dessa ytor kan dock vara grovt i lera. En typisk konstruktion och de storheter som mäts visas i Figur 5.

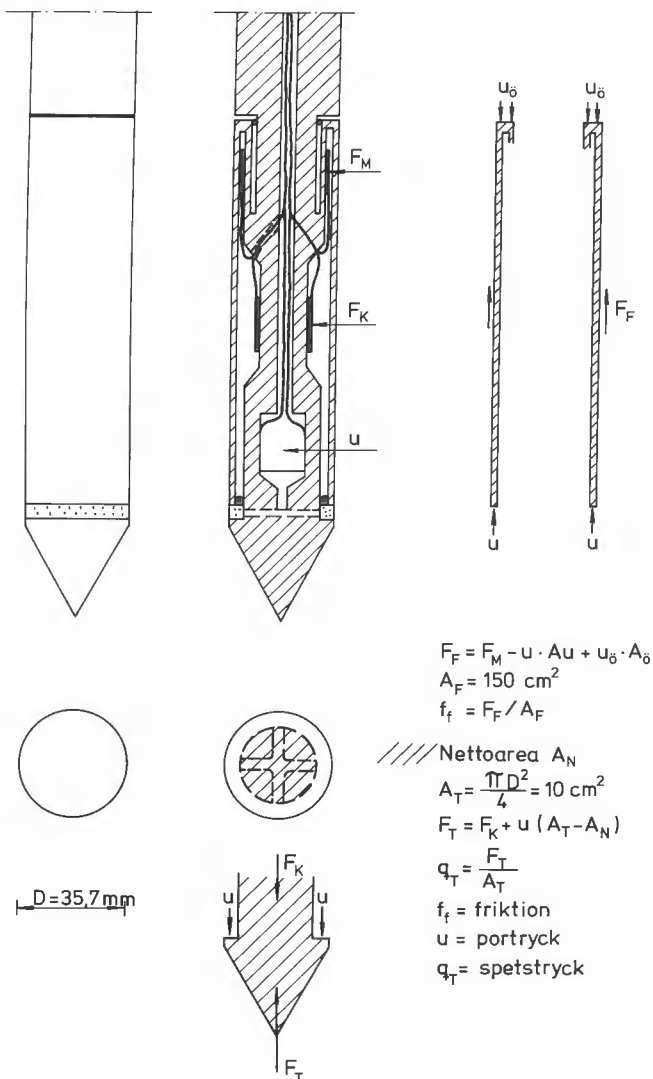


Fig. 5. Exempel på konstruktion av sonda för kombinerad spetsstryck-portrycksondering med uppmätta storheter och beräkning av spetsstryck  $q_T$  och mantelfriktion  $f_f$ . (I specialfallet att  $u=0$  eller är försumbart blir  $q_T \approx F_K / A_T (\approx q_C)$ )

Inverkan av vattentrycket på övriga mätvärden bör kalibreras i speciella kalibreringskammare där sonden samtidigt kan utsättas för spetslast, friktionskraft och vattentryck. Också andra typer av interferens mellan mätvärdena, som t ex att spetslast och spetsstryckvariationer påverkar det uppmätta portrycket, kan förekomma och detta kan kontrolleras härvid. Alla spetsar bör kalibreras individuellt.

Mätresultaten påverkas dessutom av temperaturen. Vid sondering i speciellt torr sand kan höga temperaturer utvecklas. Temperaturvariationerna vid sondering i lösa vattenmättade jordar är inte så stora men variationerna mellan markytan där nollpunkterna avläses och jorden längre ned kan vara relativt stora samtidigt som låga spetsstryck och friktionskrafter skall mätas. Höga krav måste därför ställas på att mätsystemen inte påverkas av temperaturändringar. Denna aspekt har inte tillräckligt beaktats förrän på allra sista tiden och ännu inte observerats överallt.

Nollvärdena bör också kontrolleras vid marktemperatur såväl före sonderingens start som direkt efter sonderingens avslutning.

Sonderingen skall ske med konstant nedpressningshastighet, 0,02 m/s och samma krav på vätskemättnad av filter och kanaler gäller som för portryckssondering.

Mätsystemen har utformats antingen så att

- 1 signaler till markytan sänds via kabel inuti stängerna
- 2 akustiska signaler till markytan sänds via stängerna
- 3 mätvärdesinsamling och lagring sker i spetsen

De båda senare varianterna har konstruerats för att förenkla utrustningen och slippa hantering av kabeln. Nackdelarna i fall 2 är att avläsningsfrekvensen begränsas även om endast tre mätvärden skall registreras. Tunnare skikt kan missas eftersom registreringen inte är kontinuerlig. Sonderingen får också avbrytas varje gång en ny stång skall skruvas på. I fall 3 har man ingen kontroll över vad som sker under sonderingen. Huvuddelen av all spetstryck-portrycksondering sker med kabel invändigt i stängerna. I forskningssammanhang är detta ett klart önskemål.

Förutom jordlagerföljd har man ur resultatet från spetstryck-portrycksondering med varierande framgång försökt utvärdera faktorer som, friktionsvinkel, relativ lagringstäthet, odränerad skjuvhållfasthet, elasticitetsmodul, skjuvmodul, överkonsolideringsgrad, konsolideringskoefficient, permeabilitet, effektiva hållfasthetsparametrar i lera och  $t$  o m kompressionsmoduler i lera. Goda lokala korrelationer kan ofta erhållas för de flesta parametrar men någon generell utvärdering finns inte för någon av dem. Man måste betänka att det endast är tre storheter som uppmäts varav en inte är standardiserad.

I teorierna för utvärdering tas normalt inte hänsyn till sådana faktorer som  $t$  ex sprödhet, sensitivitet och överkonsolideringsgrad vilka i hög grad påverkar mätresultaten. Å andra sidan finns ett antal rent empiriska relationer för beräkning av bärighet och sättningar för plattor och pålar som är mycket användbara i de jordar som empirin avses gälla för.

För att erhålla ytterligare information från spetstryck-portrycksondering har ett antal forskningssonder konstruerats där ytterligare faktorer mäts. Av dessa kan speciellt nämnas:

- o Sonder med mätning av portryck i flera punkter längs sonden.
- o Sonder med inbyggd accelerometer för mätning av skjuvmodul enligt down-hole metoden.
- o Sonder med inbyggd mikrofon för registrering av skrapljud för jordartsklassificering
- o Sonder med expanderbart membran för utförande av s k full-displacement pressometerförsök. Dessa används för bestämning av elasticitetsmodul vid återbelastning.

Sonder utrustade med inklinometer och utrustning för resistivitetsmätning har funnits sedan tidigare.

Även sonder med temperaturmätning, horisontaltrycksmätning, radioaktiv densitetsmätning och andra mätningar har konstruerats.

### 3.3.1 SPECIELLA MÄTPROBLEM

#### Filter, vätska och mätning

För att kunna mäta de portrycksförändringar som uppträder under sondering måste portrycksmätningssystemet ha en mycket kort responstid. Lager med en tjocklek av 10 mm eller mindre passeras på en halv sekund eller snabbare. För att kunna registrera de genererade portrycken i så tunna lager måste mätsystemet reagera fullt ut på bråkdelen av en sekund.

Vätskemättnaden är mycket kritisk. Minsta luftbubbla förlänger responstiden påtagligt. Det finns många sätt att vätskemätta filter och spetsar. Behandlingen av filtren varierar från vanlig kokning i vatten i några minuter till högvakuumbehandling i närmare ett dygn. Vätskemättnaden i kanalsystemet åstadskoms enklast genom spolning med injektionsspruta och fullständigast genom

motsvarande högvakuumbehandling som filtren. Medan de enklare förfarandena medger montering och filterbyte på spetsarna i fält, fordrar de senare metoderna att spetsarna iordningställs i laboratoriet och transporteras vätskemättade ut i fält. Ett flertal system för det senare förfarandet har konstruerats.

De senare metoderna kräver dock att sonden tas in till laboratoriet efter varje sondering vilket i sin tur medför att man skall ha tillgång till ett stort antal sonder eller att sonderingen blir mycket tidskrävande. Dessa metoder används främst inom offshore verksamhet.

Vätskemättnaden går normalt att åstadkomma på enklare sätt. Förutsatt att spetsen är konstruerad med tanke på dessa problem är det inte något större problem att vätskemätta kanalerna och hålrummen i själva spetsen genom spolning. De finporiga filtren måste dock vätskemättas i laboratoriet.

All vätskemättnad skall ske med i förväg avluftade vätskor. Vätskorna kan vara vatten, glycerin eller silikonolja. Vatten är ofta tillfyllest då sonderingen görs i lösa, vattenmättade leror där torrskorpan förborrats. I icke vattenmättad jord, i mycket fast jord där negativa portryck kan uppstå och i de fall torrskorpan ej kan förborras ökar kraven på absolut vätskemättnad och avluftning markant. I dessa fall använder man sig oftast av glycerin eller silikonolja som avluftats med högvakuum i laboratorium. Problem kan uppstå trots detta.

Filtren skall vara finporiga, inkompressibla och ha god förmåga att klara nötning. Många typer och material kan användas i olika typer av jord. För generellt bruk rekommenderas filter av rostfritt stål med en porstorlek av 2-20  $\mu\text{m}$ . Dessa skall helst vara härdade. På grund av nötning och igensätt-

ning skall filtren endast användas för engångsbruk och bytas efter varje sondering.

Portryckssystemets responstid bör kontrolleras vid de återkommande kalibreringarna. Dessutom bör kontrolleras att mätningarna är opåverkade av åtdragningsmomentet vid filterbyte.

### Temperatureffekter

Temperaturförändringar vid sondering påverkar resultaten, främst genom att noll-värdena för givarna förskjuts. Höga krav på temperaturstabilitet för givarna måste därför ställas. Även om spetsen är väl temperaturkompenserad bör nollvärdena före sonderingsstart avläsas vid en temperatur som motsvarar jordtemperaturen. Att värdena förblivit stabila under sonderingen kontrolleras sedan direkt efter att sonden dragits upp till strax under markytan men är kvar i borrhålet. Kontrollen utförs innan temperaturen hunnit ändras.

### Höjtkorrelering av mätvärdena

Eftersom mätning av spetstryck, portryck och mantelfriktion sker på olika ställen längs sonden kommer mätvärden som är relevanta för samma nivå att registreras vid olika tidpunkter. Vid kontinuerlig sondering med standardhastighet, med en sond med filtret placerat ovan den konade delen, betyder detta att för en viss nivå registreras först ett värde på spetstryck, ca 0,7 sekunder senare registreras portrycket och efter ytterligare ca 3,4 sekunder registreras hithörande mantelfriktion. Spetstrycket skall korrigeras för det vattentryck som rådde i skarven samtidigt som spetstrycksmätningen gjordes och mantelfriktionen med det vattentryck som rådde samtidigt som mantelfriktionsvärdet avlästes. Vid mycket skiktad jord ställer detta krav på kontinuerlig registrering. Beaktas inte dessa faktorer kan också felaktigheter uppstå i samband med omtag med neddriv-

ningsutrustningen och tillfälliga stopp för skarvning av stänger.

### Sondens vertikalitet

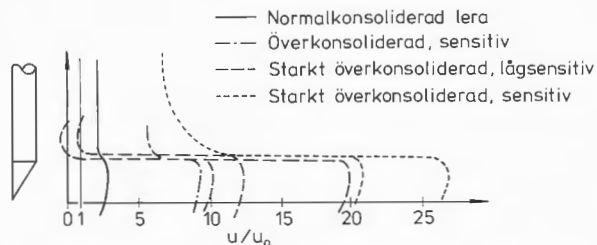
Att sonder vid neddrivning ibland går något snett är ett välkänt faktum. För att förbättra vertikaliteten bör man se till att sonderingen startas lodrätt, att stängerna är raka och att skarvarna dras åt ordentligt. Under homogena förhållanden kan sonderingen då normalt utföras till 15 à 20 m djup utan problem med utböjning [7]. I inhomogena jordar eller invid schakter och byggnader är motsvarande djup mindre än 10 m. Många sondspetsar är därför utrustade med inklinometrar så att sondens vertikalitet kan kontrolleras.

### Filtrets placering

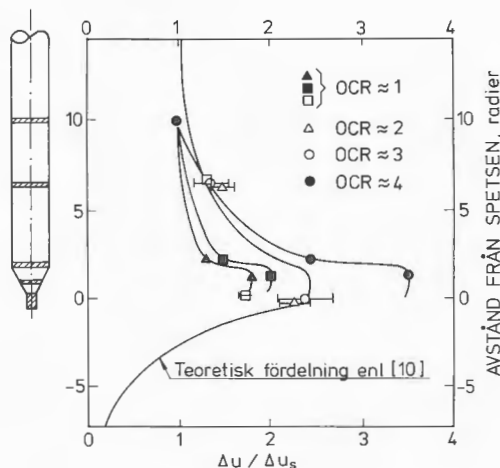
Det porövertryck ( $\Delta u = u - u_0$ ) som genereras vid sondering är störst och någorlunda konstant utefter spetsens konade del. Det maximala värdet uppmäts på ett avstånd av två tredjedelar av konlängden från spetsen. Vid övergången till konstant diameter sjunker portrycket mycket snabbt under en kort sträcka. Också längre upp varierar portrycket längs sonden, Fig.6.

På spetsens konade del genereras alltid porövertryck men i fasta och överkonsoliderade jordar kan de genererade tryckförändringarna ovan konen bli negativa.

I grövre jordar hinner varierande grader av konsolidering och portrycksutjämning ske under tiden för sondens neddrivning och den genererade portrycksförändringen ovan konen minskar med ökande avstånd till spetsen. I täta normalkonsoliderade leror blir portrycket utmed sondens raka del någorlunda konstanta först cirka 5 diametrar ( $\approx 0,2$  m) ovanför den konade delen. Detta betyder att kompensationen för vattentryck genom lika ändytor på frik-



Portrycksvariation längs sondspetsen i olika leror med varierande överkonsolideringsgrad och sensitivitet



Uppmätta porövertryck  $\Delta u$  i normalkonsoliderade och överkonsoliderade leror normaliserade mot porövertrycket längs sonden på stort avstånd från spetsen,  $\Delta u_s$ .

Fig. 6. Variation av genererade porövertryck längs en sond, [8,9,10].

tionshylsan som regel endast fungerar delvis. Det betyder också att det portryck som registreras är mycket känsligt för filtrets höjd och placering.

Nu föreslagna svensk standard för portryckssondering [6] med två typer av sondspetsar (TrPA och TrPB) gör att helt olika resultat kan erhållas vid portryckssondering. Till och med toleranserna för förslitning och variation i filterhöjd är så vida att mycket olika resultat kan erhållas med samma typ av utrustning. Någon generell utvärdering av sonderingsresultaten på basis av genererade porövertryck kan därför inte göras i dagsläget.

Mätning av portrycket i mätskarven ovan konen är nödvändig för att spetsstrycket skall kunna utvärderas. För registrering av alla typer av skikt och för att kunna relatera det uppmätta portrycket

till jordens egenskaper fordras att portrycket mäts även på spetsens konade del. Någon kommersiell sond som mäter båda dessa tryck finns ej. Under homogena förhållanden kan parallella sonderingar utföras med spetsar med olika filterplacering vilket avsevärt ökar möjligheten till tolkning och utvärdering av resultaten.

### 3.3.2 UTVÄRDERING

#### Stratigrafi

Spetstryckets storlek är ett mått på jordens fasthet och fasthetens variationer. Spetstryckskurvans regelbundenhet inom ett skikt är också ett mått på kornstorleken i jorden. Upplösningen är relativt god för finkornigare jordar ända upp till grusfraktionen där kurvorna blir så oregelbundna att de är svåra att utvärdera. Vid mycket skiktad jord är möjligheten att bestämma fastheten i de olika lagren begränsad. Spetstrycket påverkas av egenskaperna hos såväl ovanliggande som underliggande lager på ett avstånd av 5-20 spetsdiametrar. Ett fastare lager inbäddat i lösare jord bör vara minst 0,7 m tjockt för att dess egenskaper skall registreras fullt ut. Lösa skikt i fastare jord bör motsvarande vara minst 0,3 m tjocka för att ett korrekt värde på spetstrycket skall registreras, [11][12].

Portrycken som registreras är representativa för trycket vid själva mätpunkten och även mycket tunna skikt kan ofta registreras. Tolkningsproblem uppstår i icke vattenmättad jord och, på grund av filtrets placering, ofta i överkonsoliderad jord. Tolkningsproblem kan också uppstå vid förekomst av stenar eller snäckskal i lera. Begränsningar i upplösning kan också finnas på grund av filterstorlek, mätsystemets responstid och avläsningsfrekvensen. Vid kontinuerlig avläsning kan dränerande skikt i lös lera tunnare än 10 mm registreras.

#### Jordartsklassificering

Vid sonderingen mäts normalt spetsmotstånd, portryck och mantelfriktion. Då ett stort antal faktorer påverkar resultaten kan ingen helt entydig jordartsklassificering erhållas enbart ur dessa parametrar utan ytterligare data behövs antingen i form av kompletterande undersökningar och provtagning eller fler mätta parametrar. Jordens egenskaper påverkar t ex mätresultaten på följande vis:

- o ju grövre material desto högre spetsmotstånd
- o ju grövre material desto lägre friktionskvot
- o ju fastare lagrat material desto högre spetsmotstånd
- o ju fastare lagrat material desto lägre friktionskvot
- o ju högre överkonsolideringsgrad desto högre spetsmotstånd
- o ju högre överkonsolideringsgrad desto högre friktionskvot
- o ju fastare lagrat material desto lägre portryck (gäller främst för filterplacering ovanför spetsens konade del)
- o ju högre överkonsolideringsgrad desto lägre portryck (gäller främst för filterplacering ovanför spetsens konade del)
- o ju högre sensitivitet desto högre portryck (gäller främst för filterplacering ovanför spetsens konade del)
- o ju högre sensitivitet desto lägre friktionskvot



De första klassificeringssystemen från den tid då endast spetsstryck och mantelfriktion mättes baserades på spetsstryckets storlek och friktionskvoten. I nyare klassificeringsförslag används ofta spetsstryckets storlek och portryckskvoten. En sådan klassificering har t ex föreslagits av Senneset och Janbu [13], Fig.7.

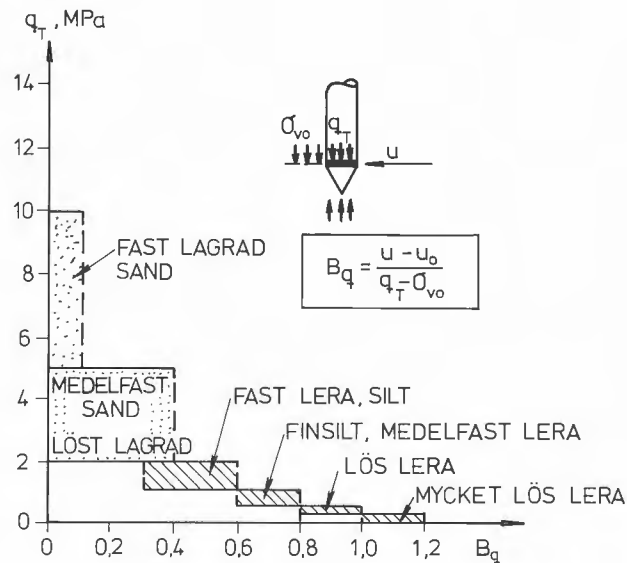
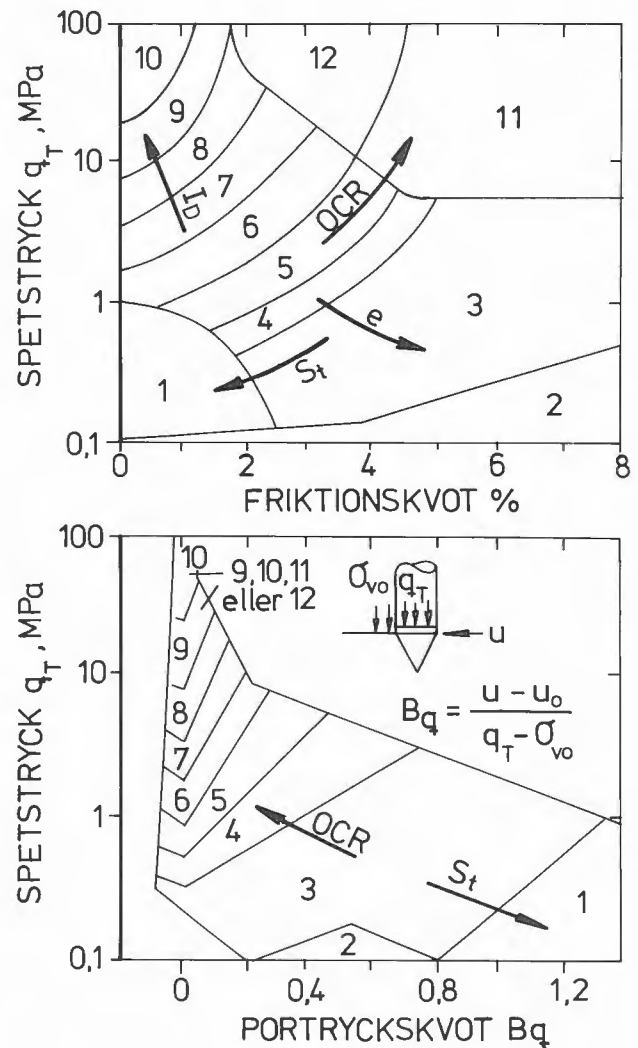


Fig. 7. Jordartsklassificering från resultat ur spetsstryck-portrycksondering enligt Senneset och Janbu, [13].

Friktionskvoten  $R_f$  beräknas som mantelfriktion per ytenhet / spetsstryck ( $R_f = f/q_T$ ) och portryckskvoten  $B_q$  som genererat poröverttryck / spetsstrycket minus rådande totala överlagringsstrycket

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_T - \sigma_{vo}}$$

Utvärderingen efter dessa system är långt ifrån entydig och portryckskvoten  $B_q$  kan dessutom variera med filtrets placering. Med tanke på dessa osäkerheter har ett nytt system för klassificering av jord med ledning av resultaten från spetsstryck-portrycksondering, föreslagits av Robertson et al [8]. I detta system används båda de äldre systemen parallellt, Fig.8.



ZON	TYPISKA VÄRDEN FÖR
1	FINKORNICIG HÖGSENSITIV JORD
2	ORGANISK JORD
3	LERA
4	SILTIG LERA - LERA
5	LERIG SILT - SILTIG LERA
6	SANDIG SILT - LERIG SILT
7	SILTIG SAND - SANDIG SILT
8	SAND - SILTIG SAND
9	SAND
10	GRUSIG SAND - SAND
11	ÖVERKONSOLIDERAD ELLER CEMENTERAD MYCKET FAST FINKORNICIG JORD
12	ÖVERKONSOLIDERAD ELLER CEMENTERAD SAND - LERIG SAND

Fig. 8. Jordartsklassificering från resultat ur spetsstryck-portrycksondering enligt Robertson et al, [8].

Man anger också att det inte är en absolut klassificering som görs utan att de erhållna mätvärdena är typiska för en viss typ av jord. Denna preliminära klassificering kan dock behöva modifieras eftersom faktorer som lagringstäthet, överkonsolideringsgrad och sensi-

tivitet inte beaktats. Vidare kan indelningarna i diagrammen behöva justeras något då det äldre empiriska underlaget till stor del består av värden som inte korrigerats för interferens mellan portryck, spetstryck och friktion. Diagrammen följer inte heller de i Sverige använda klassificeringsreglerna.

### Odränerad skjuvhållfasthet

Försök har gjorts att utvärdera den odränerade skjuvhållfastheten ur såväl genererade porövertryck som spetsmotståndet vid sondering.

Utvärdering av skjuvhållfasthet ur genererade portryck kan teoretiskt göras enligt teorier för expansion av sfäriska respektive cylindriska kaviteter beroende på om portrycket mäts på eller ovan den konade delen. Härvid fordras dock kännedom om jordens styvhet (förhållandet mellan skjuvmodul och odränerad skjuvhållfasthet). Teorierna tar normalt inte hänsyn till vare sig sensitivitet eller överkonsolideringsgrad. Båda dessa faktorer påverkar det genererade portrycket.

Dessutom har det visat sig att det genererade portrycket inte bara skiljer mellan sondens konade del och delen med konstant diameter, utan det varierar kraftigt utefter hela sondspetsens längd. Ovan spetsens konade del är det endast i normalkonsoliderade och lätt överkonsoliderade jordar som de genererade porövertrycken på något sätt kan relateras till den odränerade skjuvhållfastheten. Dessa restriktioner gör att några praktiskt användbara skjuvhållfastheter inte kan utvärderas med någon generell metod ur portrycksmätningen. För normalkonsoliderade jordar har rapporterats portryckskoefficienter ( $N_u = \Delta u / \tau_{fu}$ ) varierande mellan 3 och 12.

I lösa jordar kan de genererade portrycken dock användas som komplement till vingsondering om de kalibreras mot de korrigerade vingsondvärdena. En sådan kalibrering gäller dock endast lokalt för en och samma undersökningsplats och för den kalibrerade sonden.

Utvärdering av skjuvhållfasthet ur spetstrycket bedömdes förr som mera osäker men sedan spetstrycken börjat korrigeras för interferens från portrycken har sambanden förbättrats. Skjuvhållfastheten brukar relateras till spetstrycket med faktorn  $N_k$ .

$$N_k = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{\tau_{fu}}$$

Vid jämförelser mellan korrigerat spetstryck och medelskjuvhållfasthet från laboratorieförsök alternativt korrigerade vingsondvärden har  $N_k$  befunnits vara i storleken  $17 \pm 4$  för skandinaviska leror, [14]. Motsvarande faktor vid jämförelse med aktiva triaxialförsök är i storleken  $11 \pm 3$ . Det empiriska underlaget är ännu för litet för att bedöma om faktorerna varierar med egenskaper som t ex plasticitet eller sensitivitet, Fig.9.

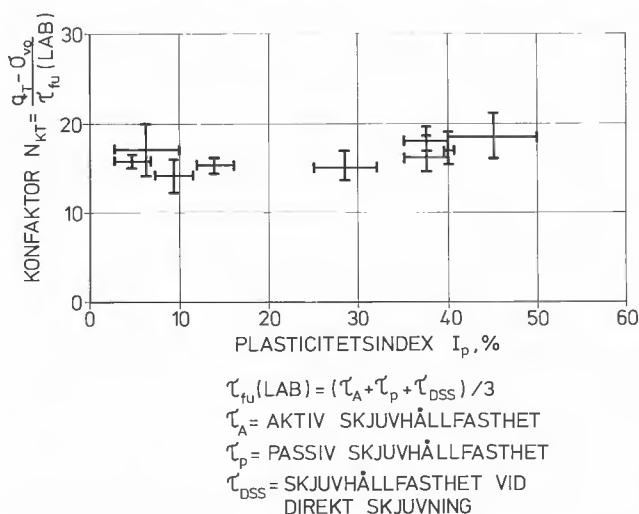


Fig. 9. Konfaktor  $N_{KT}$  för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet ur uppmätt spetstryck enligt resultat i norska leror, [14].

Den teori som bäst motsvarar de empiriska värdena har presenterats av Baligh [15] och baseras på summan av det arbete som åtgår för att pressa ned konen och att expandera en cylindrisk kavitet. Enligt denna teori skulle  $N_k$  vara i storleken  $16 \pm 2$  och närmast motsvara en medelskjuvhållfasthet.

I inhomogena och sprickiga leror måste volymbberoendet beaktas. Värdet på  $N_k$  mellan 20 och 30 har uppmätts i fasta men sprickiga leror [16].

Det har också föreslagits att den odränerade skjuvhållfastheten skulle beräknas ur det effektiva spetstrycket. I lösa leror är detta värde dock litet och det beräknas under vissa antaganden vilket medför en ökad osäkerhet.

Liksom vid korrelation mellan skjuvhållfasthet och genererat portryck är den bästa metoden för närvarande att kalibrera spetstrycket mot korrigerade vingsondvärden och använda denna korrelation lokalt.

#### Förkonsolideringstryck

Den odränerade skjuvhållfastheten är en funktion av förkonsolideringstrycket. På samma sätt som skjuvhållfastheten borde således förkonsolideringstrycket kunna kopplas till spetstryck och genererat portryck.

Enligt Mayne [17] kan porövertrycket på sondens konade del direkt relateras till förkonsolideringstrycket så att

$$\sigma'_c \approx \Delta u/2$$

Relationen är preliminär och spridningen är inte känd. Att försöka koppla förkonsolideringstrycket till ett porövertryck, mätt ovanför spetsens konade del, är utsiktslöst. Möjligen skulle man kunna utvärdera överkonsolideringsgraden ur relationen mellan portrycken vid och ovanför spetsens konade del [18][19]. Båda dessa tryck mäts dock

normalt inte och dessutom skulle en striktare standard för filterplacering erfordras, Fig.10.

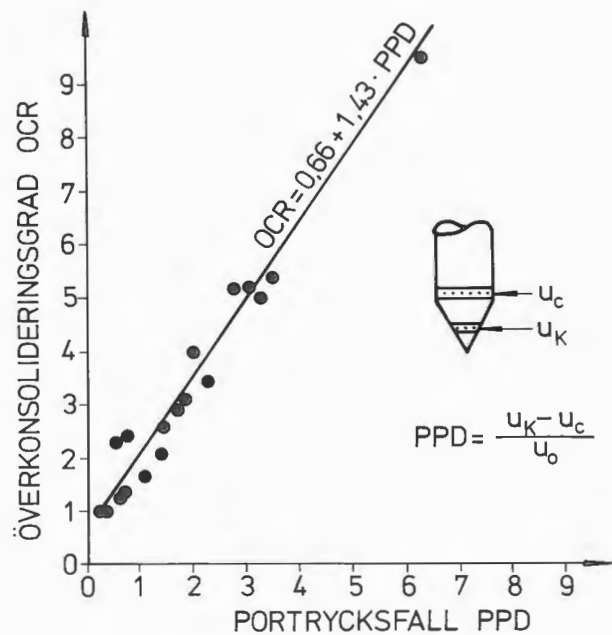


Fig. 10. Samband mellan överkonsolideringsgrad och portrycksfall vid övergången till konstant diameter på sondspetsen, [19].

Att ett samband finns mellan spetstryck och förkonsolideringstryck har visats av Tavenas och Leroueil [20]. Analogt med utvärderingen av odränerad skjuvhållfasthet skulle förkonsolideringstrycket kunna uppskattas ur

$$\sigma'_c \approx \frac{q_T - \sigma_{vo}}{4}$$

Detta samband är dock mycket provisoriskt eftersom underlaget är litet och spridningen okänd.

Det kan förefalla mer logiskt att relatera förkonsolideringstrycket till det effektiva spetstrycket, t ex Battaglio et al [21]. Det effektiva spetstrycket är dock mycket lågt och ett antagande om portrycksfördelningen utefter spetsen måste dessutom göras för att uppskatta det effektiva spetstrycket. En direkt jämförelse av spetstrycket med förkonsolideringstrycket kan inte göras utan att beakta hastighetsaspekter. Enligt Konrad och Law [22] bör också hän-

syn tas till friktionskrafterna mot kornen. Detta kan inte göras utan ytterligare antaganden.

I dagsläget kan användbara värden på förkonsolideringstrycket erhållas ur spetstryck-portrycksondering endast genom lokal kalibrering av spetstrycket mot förkonsolideringstryck utvärderade ur ödometerförsök.

### Lagringstäthet

Spetstrycket i friktionsjord beror främst på lagringstäthet, rådande spänningstillstånd, friktionsvinkel och kompressibilitet.

Förhållandet mellan lagringstäthet och spetsmotstånd är en komplex funktion av jordens avsättning och spänningshistoria samt dess mineralsammansättning, kornform, kornfördelning och sprödhet. Lagringstätheten kan därför inte generellt utvärderas ur spetstrycket även om det normalt för ett och samma material är den parameter som har störst inverkan.

Ett antal diagram har föreslagits för bestämning av den relativa lagringstätheten ur spetstryck och rådande vertikalktryck, t ex Schmertmann [11] och Lunne och Christoffersen [23], Fig.11.

Dessa diagram gäller dock endast normalkonsoliderad ensgraderad finsand av kvarts. Utvärderad lagringstäthet bör minskas med 10-15 % för grövre material [23]. Inverkan av graderingstal och andra mineral är ej undersökta.

En annan begränsning för dessa diagram är att de i huvudsak är framtagna ur storskaliga laboratorieförsök i kalibreringskammare och i vad mån man verkligen lyckats efterlikna naturliga förhållanden är svårt att bedöma.

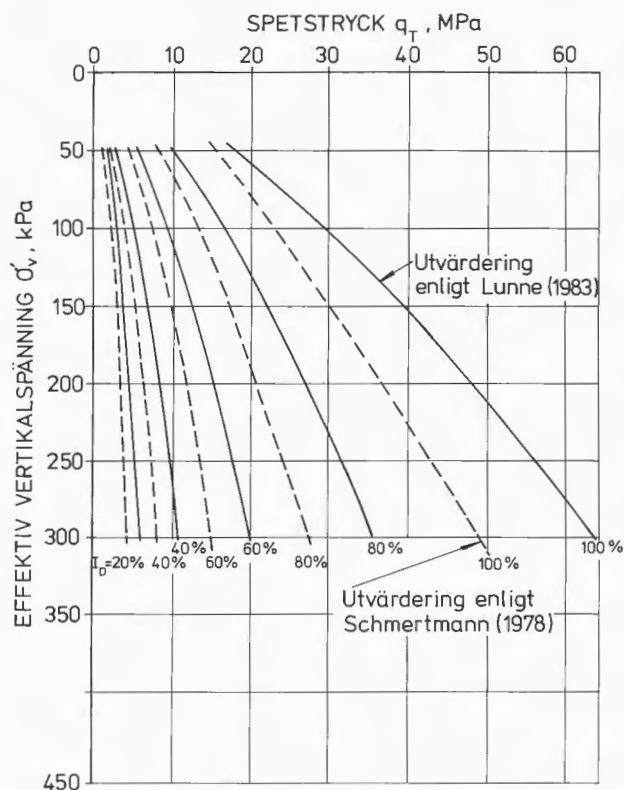


Fig. 11. Diagram för utvärdering av den relativa lagringstätheten i normalkonsoliderad sand ur spetstryck och rådande vertikalktryck, [23].

I överkonsoliderad sand ökar horisontalktrycken och därmed sonderingsmotståndet. Används sambandet för normalkonsoliderad sand överskattas lagringstätheten. Felet ökar med ökande överkonsolideringsgrad och minskande lagringstäthet [24], Fig.12.

Ett generellt samband mellan lagringstäthet, spetsmotstånd och spänningnivå har föreslagits av Baldi et al [24]

$$I_D = \frac{1}{C_2} \ln \frac{q_T}{C_0 P_a \left( \frac{\sigma'_{OKT}}{P_a} \right)^{C_1}}$$

Faktorena  $C_0$ ,  $C_1$  och  $C_2$  har visat sig någorlunda konstanta för ett par typer av sand vilka dock båda var ensgraderad kvartssand med  $d_{50} = 0,5$  à  $0,6$  mm. Inverkan av faktorer som kornstorlek och graderingstal är fortfarande okända.

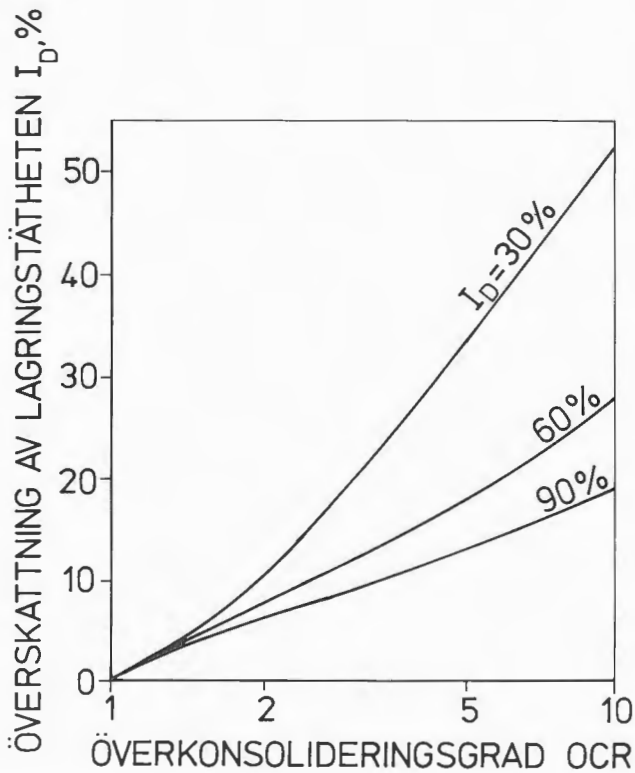


Fig. 12. Fel i uppskattad relativ lagringstäthet i överkonsoliderad sand, [24].

För användning av det generella sambandet fordras också kännedom om det rådande horisontaltrycket i jorden. För detta erfordras kompletterande försök.

Skulle överkonsolideringsgraden vara känd kan man enligt Schmertmann [11] räkna om det mätta spetstrycket till ett ekvivalent spetstryck  $q_{T_{ekv}}$  och sedan utvärdera lagringstätheten ur sambanden för normalt konsoliderad sand. Övriga förbehåll för sambandens relevans kvarstår dock

$$q_{T_{ekv}} = q_T / [1 + 0,75(OCR^{0,42} - 1)]$$

### Friktionsvinkel

Friktionsvinkeln i sand kan teoretiskt beräknas med bärighetsteori, t ex Janbu och Senneset [25], Durgunoglu och Mitchell [26]. De beräknade sambanden mellan spetstryck, överlagringstryck och friktionsvinkel har i kalibreringskam-

mare visat sig ge god överensstämmelse med försök på normalt konsoliderad sand, Fig.13. Referensvärdena är bestämda med triaxialförsök.

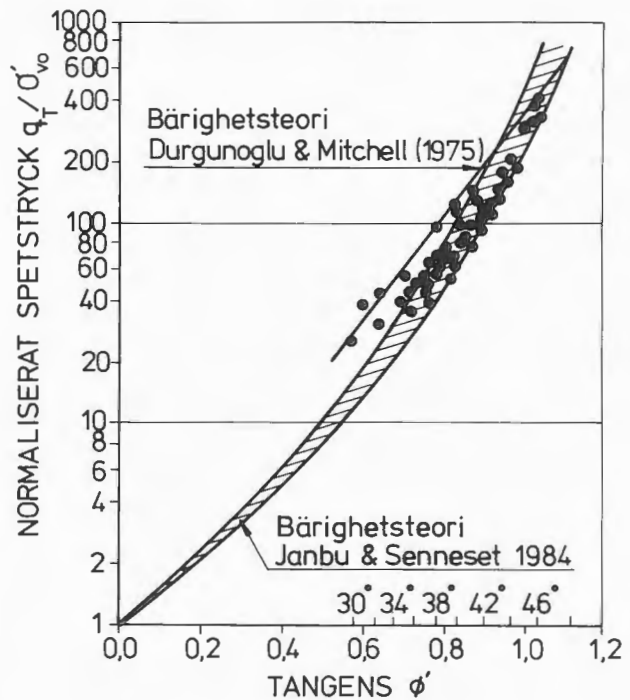


Fig. 13. Samband mellan spetstryck och friktionsvinkel enligt försök i stora kalibreringskammare, [27].

På grund av att spänningsnivån vid sondspetsen är cirka 10 gånger högre än överlagringstrycket blir den utvärderade friktionsvinkeln i normalt konsoliderad sand ofta ett par grader för låg. I starkt överkonsoliderade jordar kan den utvärderade friktionsvinkeln bli ett par grader för hög på grund av horisontalspänningens inverkan.

Sambanden mellan spetstryck, överlagringstryck och friktionsvinkel är dock endast fastlagda för ensgraderad sand. I avvaktan på ytterligare erfarenhetsunderlag har Schmertmann [11] föreslagit att friktionsvinkeln för andra friktionsmaterial utvärderas empiriskt på basis av kornstorlek, graderingstal och en från sonderingen grovt utvärderad lagringstäthet. I detta fall borde en empirisk relation som också tar hänsyn till spänningsnivån användas.

Utvärderingen i starkt skiktade jordar blir mycket osäker då en viss tjocklek av skikten erfordras för att representativa spetsstryck skall mätas.

### Moduler och kompressibilitet i friktionsmaterial

Vid beräkning av sättningar i sand, baserade på resultat från spetsstryckssondering, används normalt inte moduler utvärderade ur spetsstrycket tillsammans med gängse beräkningsmodeller. I stället använder man sig i de flesta fall av någon utvärderingsmetod med tillhörande beräkningsgång som utarbetats speciellt för denna typ av sondering, t ex De Beer [28], Meyerhof [29], Schmertmann [30][11].

En jords deformationsegenskaper är i högsta grad beroende av dess spänningshistoria. Utvärdering av spetsstryckportryckssondering i friktionsmaterial kan endast ske på basis av spetsstrycket och friktionskvoten. Spetsstrycket har visat sig vara relativt okänsligt för spänningshistoria och överkonsolidering i friktionsjord och inte heller friktionskvoten ger någon användbar information om spänningshistorien.

De empiriska samband mellan spetsmotstånd och kompressionsegenskaper som finns gäller endast normalkonsoliderad sand och medför normalt en överskattning av kompressibiliteten i överkonsoliderade eller packade jordar. Dessa samband gäller också endast kvartssand. I mera lättkrossat material blir modulerna lägre. De empiriska modulerna uttrycks ofta som konstanter, men noggrannare studier har visat att moduler i friktionsmaterial bäst uttrycks enligt tangentmodul teori

$$M = m \sigma'_j \left( \frac{\sigma'_j}{\sigma'_T} \right)^\beta$$

Undersökningar av Baldi et al [24] visar att kompressionsmodulen  $M_0$  generellt kan uttryckas som

$$M_0 = q_T \cdot C_0 \cdot \sigma'_j \left( \frac{\sigma'_{OKT}}{\sigma'_j} \right)^{C_1} \cdot OCR^{C_2} \cdot e^{C_3 \cdot I_D}$$

där  $M_0$  är tangentmodulen.

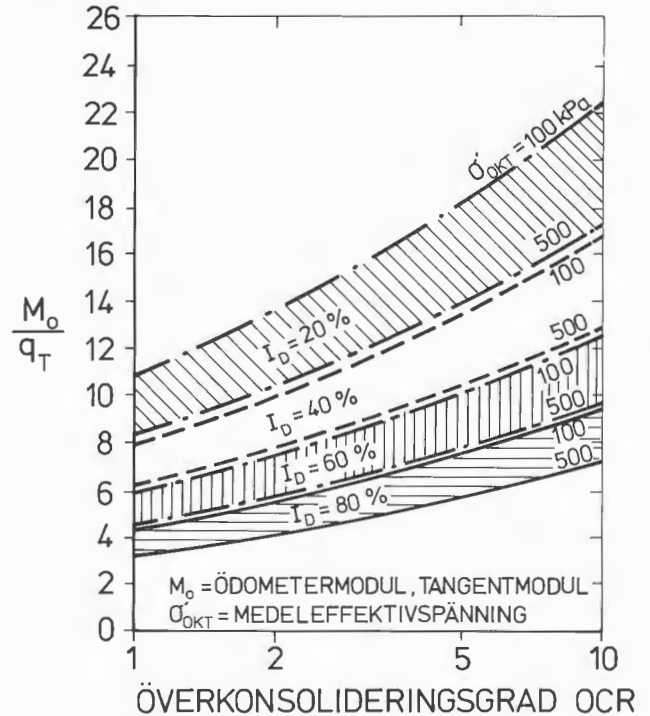


Fig. 14. Samband mellan kompressionsmodul och spetsstryck i sand enligt försök i stora kalibreringskammare, [24].

Även om ett empiriskt underlag för faktorerna  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  och  $C_3$  skulle kunna skapas fördras kompletterande bestämmningar av horisontaltryck och överkonsolideringsgrad för att resultaten från spetsstryckssondering skulle kunna användas.

På motsvarande sätt påverkas elasticitetsmodulen i sand i mycket hög grad av jordens spänning- och deformationshistoria medan dessa faktorer i mycket liten mån påverkar spetsstrycket vid sondering. De empiriska samband som finns gäller därför enbart normalkonsoliderad kvartssand, Fig.15.

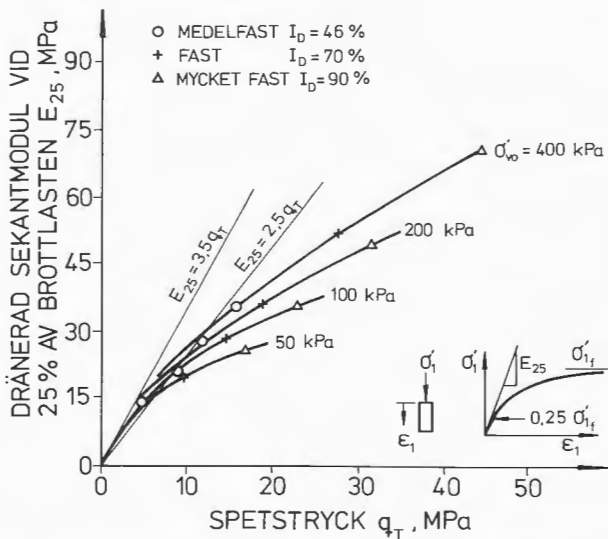


Fig. 15. Samband mellan elasticitetsmodul och spetsstryck i normalkonsoliderad sand enligt försök i stora kalibreringskammare, [31]. Empiriska relationer föreslagna av Schmertmann [11,30] är inlagda i figuren.

Någon metod för att uppskatta elasticitetsmoduler hos friktionsmaterial med en annan spännings- eller deformationshistoria, ur spetsstryck-portrycksöndring har inte presenterats.

Den enda modul som visat sig relativt okänslig för spänningshistoria är skjuvmodulen. Denna kan enligt Baldi et al [24] uttryckas som

$$G_0 = q_T \cdot C_0 \cdot (\sigma'_{OKT})^{C_1} \cdot \exp(C_2 \cdot I_D)$$

Skjuvmodulen beror förutom av jordtyp således endast av spänningsnivå och lagringstäthet, Fig.16.

$G_0$  är den initiella dynamiska skjuvmodulen som minskar med ökande skjuvspänning och deformation. Denna dynamiska skjuvmodul är cirka 5 ggr högre än vad som kan påräknas under statiska förhållanden, [32].

Med ett empiriskt underlag för parametrarna  $C_0$ ,  $C_1$  och  $C_2$  vore det således möjligt att uppskatta skjuvmodulen ur spetsstryck-portrycksöndring.

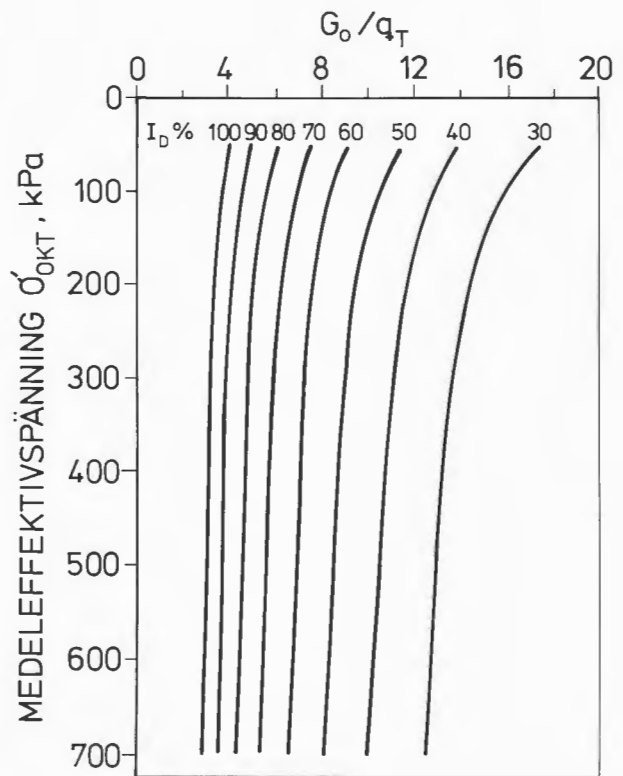


Fig. 16. Samband mellan initiell dynamisk skjuvmodul och spetsstryck i sand enligt försök i kalibreringskammare, [24].

För bedömning av spänningsnivån i jorden behövs en kompletterande bestämning av horisontaltrycket.

Utvärdering av skjuvmodulen görs dock bättre med seismiska metoder och spetsstryck-portrycksönder med inbyggda accelerometrar är kommersiellt tillgängliga.

### Effektiva hållfasthetsparametrar i finkorniga jordar

Senneset et al [33] har föreslagit metoder att bestämma de effektiva hållfasthetsparametrarna  $c'$  och  $\phi'$  i lera och silt ur CPTU-sonderingar. Metoden tycks ge rimliga värden men kan endast användas för tämligen mäktiga och homogena lager med konstant överkonsolideringsgrad.

En omfattande korrelation med laboratoriebestämda parametrar i olika typer av jord erfordras för att användbarheten av metoden skall kunna bedömas.

## Moduler i lera

Spetsstryck-portryckssondering i finkorniga jordar sker under närmast fullständigt odränerade förhållanden. Att direkt utvärdera några kompressionsegenskaper från denna sondering är således ogörligt. Empiriska samband mellan kompressionsmodul och övriga egenskaper i jorden har visat sig ha en sådan spridning att de inte har något praktiskt värde.

Skjuvmodulen i lera kan mätas med god noggrannhet, om sonden utrustas med accelerometer. Härur kan också den odränerade elasticitetsmodulen uppskattas.

## Konsolideringskoefficient

Omfattande försök har gjorts att utvärdera den horisontella konsolideringskoefficienten  $c_h$ , genom att studera utjämningen av det genererade poröverttrycket då sonderingen stoppas. Den mest använda utvärderingsmetoden presenterades av Torstensson 1977 [34]. Med tiden har det klarlagts att portrycksutjämningsförloppet i hög grad influeras av spänningsrelaxation runt sonden och utjämning av de varierande portrycken längs sonden. Stora brister finns också i de antaganden som beräkningsmodellerna bygger på (se t ex Tavenas et al [35]).

Redan Torstensson angav att de utvärderade värdena blev ett par gånger för höga, även om konservativa antaganden gjordes om jordens styvhet. Undersökningar vid SGI [36] visade också att  $c_h$ -värden utvärderade med normala antaganden om elasticitetsmodulen blir mycket höga. De visade också att utjämnings teorin inte stämmer, då mycket olika  $c_h$ -värden erhålls beroende på vilken utjämningsgrad som studeras. Liknande resultat har sedan erhållits av andra forskare och många anser nu att det snarast är konsolideringskoefficienten inom det överkonsoliderade

spänningsområdet som utvärderas ( t ex Campanella et al [37] ). Skillnaden i  $c_h$  för spänningar över och under förkonsolideringstrycket kan i lösa svenska leror uppgå till ett par 10-potenser. En bestämning av  $c_h$  från portrycksutjämnings från sondering är därför en mycket grov uppskattning.

Att studera portrycksutjämningsförloppet vid stopp i sonderingen är dock av intresse ur andra synpunkter. Det kan vara till god hjälp vid jordartsklassificeringen och för bedömning av om skikt kan betraktas som dränerande [38]. Att stoppa sonderingen och studera portrycksutjämnings i vissa dränerande skikt erfordras också för att den ursprungliga portryckssituationen i jorden skall kunna klarläggas, såvida detta inte gjorts med vanliga portrycksmätare.

## Permeabilitet

Utvärdering av permeabilitet genom att koppla de från sonderingen utvärderade konsolideringskoefficienterna och kompressionsmodulerna har föreslagits. Med hänsyn till vad som ovan sagts om utvärderingen av dessa båda parametrar inses att en sådan utvärdering inte har något praktiskt värde.

### 3.3.3 SPECIELLA MÄTMETODER

#### Akustisk sondering

De skrap- och krossljud som uppstår vid sondering kan relateras till jordarten. Akustisk sondering (sondering med mikrofon) har därför utvecklats [39]. Den skulle kunna användas som komplement till spetsstryck-portryckssondering för jordartsbestämning. Att bygga in mikrofoner i kombinerade spetsstryck-portryckssonder är dock svårt då mikrofonen måste isoleras och dessutom är de elektriska mätsystemen helt olika.



## Resistivitetmätning

I vissa fall är det av betydelse att noggrant bestämma lagringstätheten i friktionsmaterial in situ. För detta ändamål har resistivitetssonder utvecklats. En resistivitetssond har fyra inbördes isolerade ringformiga elektroder längs mantelytan. Vid mätning alstras en strömstyrka mellan de yttre elektroderna och spänningen mäts mellan de inre. Härur beräknas resistiviteten. Denna beror främst av porositeten och porvattnets resistivitet. Med kännedom om vattnets resistivitet kan således porositeten beräknas.

För att bestämma lagringstätheten fordras jämförande laboratorieförsök, vilka kan utföras på störda prover. Vattnets resistivitet bestäms på upptagna vattenprover, eller med mer avancerade resistivitetssonder på varje provnivå parallellt med resistivitetmätningen i jorden.

Metoden är främst utvecklad av Laboratorium voor Grondmechanica i Delft, Holland.

## Bestämning av skjuvmodul med accelerometrar

Skjuvmodulen tillhör de parametrar i jord som helst skall mätas under naturliga förhållanden i fält.

Många spetstryck-portryckspetsar har därför utrustats med accelerometrar och mätutrustningen har utökats med ett minnesoscilloskop och en vibrationskälla. Som vibrationskälla används ofta en stålbalk som trycks mot markytan av neddrivningsutrustningen och vibrationen åstadkommes genom ett slag mot balken med en handslägga. Mätningarna utförs vid tillfälliga stopp i sonderingen, vanligen då nya sondstänger skarvas på. Erfarenheterna från denna typ av mätning är genomgående goda [40] [18].

## Kombinerad spetstryck-portrycksondering och nedpressad "full-displacement" pressometer

Spetstryck-portrycksonden har i några fall försetts med ett expanderbart gummimembran placerat ovanför friktionshylsan. I princip liknar denna pressometer en dilatometer. Motsvarande korrelationer med andra jordparametrar och spänningstillstånd som för dilatometern borde kunna utvecklas. Med hänsyn till utrustningens komplexitet är ett parallellt användande av spetstryck-portrycksondering och dilatometerförsök troligen ett mera praktiskt alternativ.

### 3.3.4 SAMMANFATTNING

Den kombinerade spetstryck-portrycksonderingen, TrSP eller CPTU, är den mest noggranna in-situmetoden för kontinuerlig registrering av jordlagerföljder som i dag står till buds. Den kan med god upplösning användas i finkornig jord och i grovkornig jord upp till fingrus. Det är den bästa av de statistiska sonderingsmetoderna också för att bedöma egenskaperna hos de penetrerade jordlagren i sand och finkornigare jordar. I grovgrus och grövre jordar, i steniga och blockiga jordar och i moräner är hejarsondering dock att föredra.

Spetstryck-portrycksondering är arbetsmässigt en rationell metod. Sonden drivs med en konstant neddrivningshastighet av 0.02 m/sekund och även om en viss tid för vätskemätning och filterbyte åtgår före varje sondering är produktionsstakten relativt hög. Även om teorierna och det empiriska underlaget för utvärdering av en del jordparametrar är bristfälliga kan sonden användas som komplement för utvärdering av dessa genom en lokal kalibrering mot bättre beprövade metoder. Fördelen med spetstryck-portrycksonden är härvid den höga produktionsstakten, upplösningen vid bestämning av stratigrafi och möjligheten att uppskatta de olika lagrens

dräneringsegenskaper. Spetstryck-  
 porttrycksonderingen kan med fördel kom-  
 pletteras med dilatometerförsök, sonde-  
 ring med spetsar med alternativ filter-  
 placering eller sonder med speciella  
 mätmetoder. Härvid förbättras möjlig-  
 heten till tolkning och utvärdering av  
 resultaten väsentligt.

För beräkning av bärighet och sätt-  
 ningar i sand på basis av resultat från  
 spetstrycksondering finns speciella ut-  
 värderings- och beräkningsmetoder.  
 Dessa har en viss begränsning eftersom  
 inverkan av överkonsolidering och för-  
 belastning inte kan beaktas. I övrigt  
 är erfarenheterna från dessa metoder  
 relativt goda, t ex Bergdahl et al [41]  
 [42].

#### 4. DILATOMETER

Dilatometerförsöket är ett av de senas-  
 te tillskotten bland metoder för fält-  
 undersökningar. Idén till dilatometern  
 presenterades första gången 1975 av  
 Marchetti [43]. Fem år senare var ut-  
 rustningen testad i ett antal jordar i  
 Italien. Erfarenheterna från dessa för-  
 sök medförde att Marchetti [44] presen-  
 terade preliminära empiriska samband,  
 varur jorden kunde klassificeras och  
 ett antal geotekniska parametrar kunde  
 utvärderas. Sedan dess har empirin suc-  
 cessivt utvidgats och förbättrats och  
 ett stort antal forskningsinstitut har  
 bidragit till utvecklingen. Även kom-  
 mersiellt används den i allt fler län-  
 der och i USA har ASTM (American Socie-  
 ty for Testing of Materials) utarbetat  
 en standard för försöket.

Dilatometern består av en 14 mm tjock  
 stålplatta som är 95 mm bred och 220 mm  
 lång, Fig.17.

Nederdelen är konad med en svag rund-  
 ning och har en 95 mm bred egg. Mitt på  
 plattans ena sida finns ett cirkulärt  
 stålmembran, med diametern 60 mm. I in-

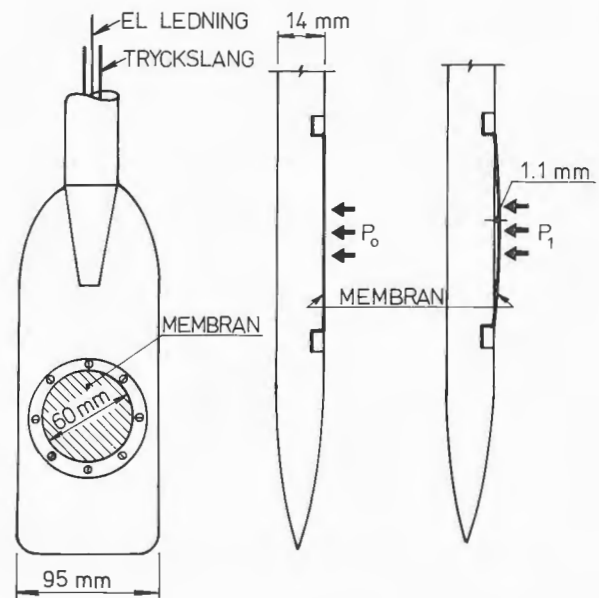


Fig. 17. Marchettis dilatometer.

tryckt läge är detta membran i liv med  
 plattan. Bakom membranet finns en kam-  
 mare, där en distansmätare är monterad.

Dilatometern monteras på hålade stäng-  
 er. Via en plastslang som löper in-  
 vändigt i stängerna står sedan kammaren  
 i förbindelse med ett trycksystem på  
 markytan. Tryckslangen innehåller också  
 en elledning som ansluter distansmäta-  
 ren till en batteridrivna elkrets på  
 markytan.

Dilatometern drivs ned i jorden med  
 konstant hastighet, 20 mm/s. Försök ut-  
 förs normalt varje 0,2 m i djupled.  
 Försöken påbörjas direkt efter att ned-

drivningen stoppats och sker genom att trycket i kammaren bakom membranet ökas kontinuerligt. Distansmätaren fungerar så att elkretsen är sluten tills membranet tryckts ut 0,05 mm. Här bryts kretsen och den förblir bruten tills membranets centrum tryckts ut 1,10 mm, varvid kretsen åter sluts. Trycket bakom membranet då strömkretsen bryts och sluts, avläses på en manometer. Membranet skall vara fullt expanderat inom 15-30 sekunder efter att neddrivningen stoppats. Därefter ventileras kammaren, membranet återgår till sitt ursprungsläge och dilatometern trycks ned till nästa försöksnivå.

Kringutrustningen till en dilatometer består endast av en vanlig neddrivningsutrustning, en gasbehållare, reduceringsventil, manometer och en batteridrivna signal. De tre sista delarna är inbyggda i en fältmässig låda. Den enda förslitningsdetaljen är membranet vilket enkelt kan bytas och kalibreras i fält.

Den enda kalibrering som behövs är att membranet expanderas obelastat i luft, varvid nollvärdena vid de båda bryttillfällena erhålls.

Dilatometerförsöket är närmast att likna vid ett förenklat "full displacement" pressometerförsök, där man i stället för att få en tryck-deformationskurva endast får två punkter på denna kruva. Spänningsutvecklingen vid installation av dilatometern är snarlik den som utvecklas vid spetsstryckporttrycksondering. Spänningarna i jorden ökar således mycket kraftigt när spetsen trycker samman och pressar isär jorden, men spänningsnivån sjunker sedan spetsen passerat och tvärsnittet blivit konstant.

Denna spänningshistoria medför att expansionen av membranet alltid innebär en form av återbelastning av en jord som varit utsatt för högre spänningar än de som råder vid expansionens start.

Om hela expansionen upp till 1,1 mm sker som återbelastning beror på typ av jord och överkonsolideringsgrad.

Då dilatometerförsöket är ett mycket snabbt försök, där hela sekvensen med neddrivning och provning utförs under cirka en halv minut, är det i lera ett i det närmaste fullständigt odränerat försök. Dräneringsgraden ökar sedan med ökande kornstorlek och i ren sand är det ett i det närmaste fullständigt dränerat försök.

#### 4.1 UTVÄRDERING

Dilatometerförsöket utvärderas med hjälp av tre parametrar som är empiriskt korrelerade med jordens egenskaper. De tre parametrarna är materialindex  $I_D$ , horisontellt spänningsindex  $K_D$  och dilatometermodulen  $E_D$ . Dessa beräknas enligt Marchetti [44] som:

$$\text{Materialindex } I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$$

$$\text{Horisontellt spänningsindex } K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{vo}$$

$$\text{Dilatometermodul } E_D = 34,7 (p_1 - p_0)$$

- där  $p_0$  = kontaktryck vid 0,05 mm utböjning  
 $p_1$  = expansionsstryck vid 1,10 mm utböjning  
 $u_0$  = ursprungligt porvattentryck i jorden  
 $\sigma'_{vo}$  = effektivt överlagringstryck

Faktorn 34,7 är en formfaktor som gäller för ett membran med diametern 60 mm och utböjningen 1,10 mm.

Utvärderingen av dilatometerförsöket fordrar kännedom om de naturliga grundvattenförhållandena. En uppfattning om den fria grundvattentytans nivå kan ofta erhållas vid dilatometerförsökens utförande. Felaktigheter i utvärderingen kan dock uppstå om den naturliga por-

## Överkonsolideringsgrad

Också för överkonsolideringsgrad OCR gav Marchetti [44] preliminära förslag för utvärdering. Även i detta fall är underlaget bristfälligt liksom referensvärdena. Enligt detta preliminära förslag skulle OCR kunna utvärderas ur

$$\text{OCR} = (0,5 K_D)^{1,56}$$

om jorden är finkornigare än sandig silt ( $I_D \leq 1,2$ ). För siltig sand och grövre ( $I_D \geq 2,0$ ) skulle OCR beräknas ur

$$\text{OCR} = (0,67 K_D)^{1,91}$$

För  $I_D$  mellan 1,2 och 2,0 interpoleras konstanter och exponenter.

Sambanden behöver troligen modifieras och uppskattningen av OCR är grov.

## Odränerad skjuvhållfasthet

Marchetti [44] föreslog att den odränerade skjuvhållfastheten skulle kunna utvärderas ur

$$\tau_{fu} \approx 0,22 \cdot \sigma'_V \cdot (0,5 K_D)^{1,25}$$

Detta är dock en kombination av tre empiriska samband vilka var för sig har en betydande spridning. Dilatometervärdena kan därför endast användas som komplement till andra undersökningsmetoder och betraktas som relativt osäkra.

## Friktionsvinkel

Enligt Marchetti och Crapps [55] kan friktionsvinkeln i sandig silt och grövre jord beräknas ur dilatometerre-

sultaten. Denna utvärdering anges dock som mycket grov.

## 4.2 DILATOMETERFÖRSÖK MED MÄTNING AV NEDDRIVNINGSKRAFT ELLER SAMKÖRDA MED SPETSTRYCK-PORTRYCKSONDERING

För att förbättra utvärderingen av horisontaltryck, överkonsolideringsgrad och friktionsvinkel och därmed också indirekt deformationsegenskaperna föreslog Schmertmann [56] att också neddrivningskraften vid dilatometerns installation skulle mätas. Jordtryckskoefficienten  $K_0$  och friktionsvinkeln  $\phi'$  beräknas sedan med en iterativ process, med antagande om friktion mellan jord och dilatometern. Detta förfarande förbättrade avsevärt utvärderingen av såväl  $K_0$  som  $\phi'$  och också indirekt överkonsolideringsgraden. Det har sedan utvecklats ytterligare av Jamiolkowski [57]. Förfarandet innebär dock att mycket av enkelheten i dilatometerförsöket går förlorad. Att installera en kraftmätare i själva dilatometern är dessutom komplicerat och kraften mäts i de flesta fall i neddrivningsutrustningen på marken, varvid stångfriktionen försummas.

Marchetti [58] föreslog att resultaten från dilatometerförsöket istället skulle kombineras med spetstrycket från spetstryck-portrycksondering. På detta vis behålls enkelheten i dilatometern samtidigt som ett bättre värde på neddrivningskraft erhålls ur en befintlig och beprövad utrustning. Möjligheten att tolka och utvärdera resultaten från spetstryck-portrycksondering ökar också på detta sätt. I starkt inhomogen jord kan förfarandet dock bli problematiskt.

Enligt Baldi et al [52] kan  $K_0$  i sand enkelt beräknas ur resultaten från spetstryck-portrycksondering och dilatometerförsök som

$$K_0 = 0,376 + 0,095 K_D - 0,00461 q_T / \sigma'_{V0}$$

Denna relation baserar sig på försök i kalibreringskammare. Marchetti [58] jämförde resultaten från kalibreringskammare och värden som mätts i fält i Po-flodens delta. Liknande trender som för försöken i kalibreringskammare erhöles, men resultaten antyder att försöken i kalibreringskammarna inte helt motsvarat fältförhållandena och en viss modifiering av sambanden kan behövas, Fig.19.

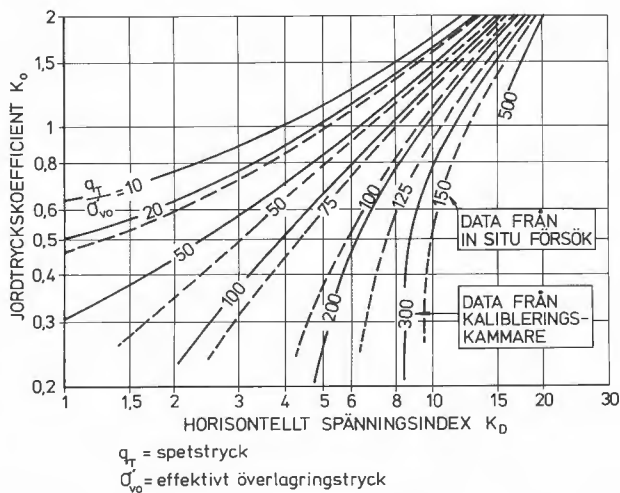


Fig. 19. Utvärderingsdiagram för jordtryckskoefficienten  $K_0$  från dilatometerförsök och spetstrycksondering, [58].

Med ett ungefärligt värde på  $K_0$  kan sedan en bättre uppskattning av friktionsvinkeln göras ur spetstrycket från spetstryckssonderingen. Denna utvärdering baseras på bärighetsteori enligt Durgonoglu och Mitchell [26], Fig.20.

Överkonsolideringsgraden kan sedan uppskattas ur  $K_0$  och  $\phi'$ .

#### 4.3 SAMMANFATTNING

Dilatometern är robust och enkel att använda. Den kan drivas ned med vanligen förekommande borrhjuggar och kringutrustningen är enkel. Resultaten har visat sig mycket repeterbara och i stort sett oberoende av operatör. Utrustningen kan användas i alla jordar

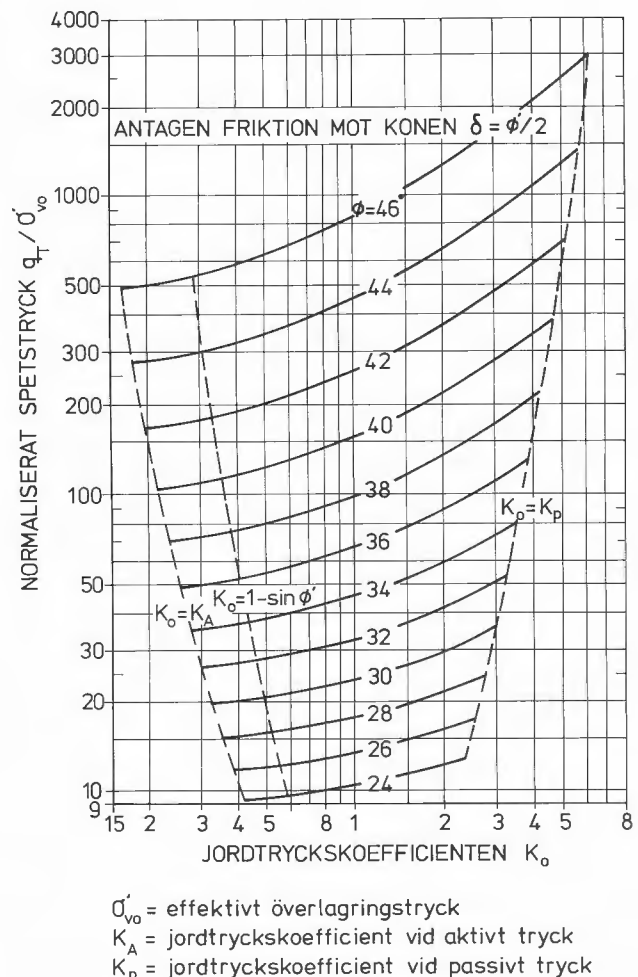


Fig. 20. Utvärderingsdiagram för friktionsvinkeln  $\phi'$  från dilatometerförsök och spetstrycksondering, [58].

som inte är steniga, inte är alltför fasta eller innehåller alltför mycket skarpkantat grus. Provingen är i det närmaste kontinuerlig då försök utförs varje 0,2 m. Metoden är dessutom relativt snabb. I finkorniga jordar måste försöken kompletteras med en bestämning av portrycksprofilen.

Utvärdering och tolkning av resultaten är empirisk. Den utförs normalt med dator och åtföljs av automatisk uppritning. Tillförlitligheten i utvärderade parametrar är beroende av typ av jord och vilka parametrar som avses. Benämningen blir i de flesta fall riktig och därmed erhålls en god bild av jordlagerföljden. Också den uppskattade densiteten har normalt rätt storleksordning. Sambanden kan behöva utökas och modifieras något för svenska jor-

dar. Användbara moduler har erhållits i silt och sandjordar. I lerig jord är den möjliga användbarheten begränsad till överkonsoliderad jord. Jämförande fullskaleförsök i överkonsoliderad lera saknas dock i stort sett.

Metoden kan ej användas för utvärdering av kompressionsegenskaper i normalkonsoliderade leriga jordar.

De empiriska samband som föreslagits mellan dilatometerparametrar och odränerad skjuvhållfasthet, jordtryckskoefficient, överkonsolideringsgrad och friktionsvinkel är alla osäkra och utvärderingen blir grov.

Tillförlitligheten i de senare parametrarna ökar avsevärt om dilatometerförsöket kompletteras med spetstryck - porttryckssondering. Dilatometerparametrarna ökar också möjligheten till tolkning av sonderingsresultaten.

## 5. PRESSOMETER

### 5.1 MENARD-PRESSOMETERN

Pressometerförsöket är inget direkt nyare in situ försök. Det har i stor omfattning använts för att bestämma hållfasthets- och deformationsegenskaper i främst mycket fast överkonsoliderad lera samt i silt och sand. Utrustningen kan också användas i sedimentärt berg, morän och grus. Den vanligaste typen av pressometer, Menard-pressometern, har använts sedan 50-talet. Metoden används i mycket stor omfattning i Frankrike och är allmänt spridd runt om i världen. Den är också etablerad i Sverige. Andra former av pressometerförsök har utvecklats på senare tid, men den stora erfarenheten av pressometerförsök är uppbyggd på Menard-pressometern. Den är också den typ av pressometer som används kommersiellt i Sverige.

Menard-pressometern, liksom dess handhavande, utvärdering och användning av resultaten samt en del andra pressometrar utvecklade i Frankrike, är i detalj beskrivna i boken "The Pressuremeter and Foundation Engineering" av Baguelin, Jezequel och Shields [59].

Menard-pressometern består av en cirkulär cylindrisk provkropp som installeras på provningsnivån i jorden, Fig.21.

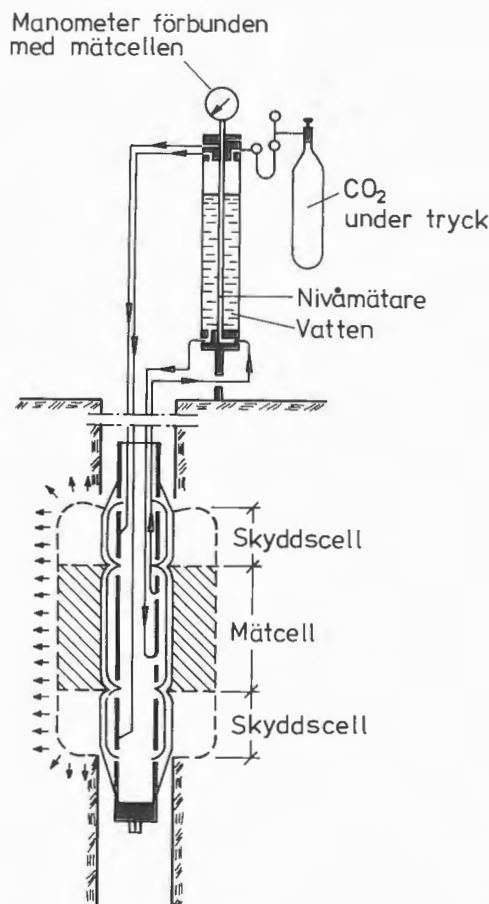


Fig. 21. Pressometer typ Menard och dess mätprincip.

Mitt på provkroppen finns en mätcell med ett gummimembran som kan expanderas cylindriskt. Över och under mätcellen finns skyddsceller som expanderas samtidigt så att ett plant töjningstillstånd erhålls för mätcellen. Mät- och skyddscellerna står via slangar i förbindelse med mät- och reglerutrustningen på markytan. Cellerna expanderas genom att det invändiga trycket ökas stegvis. Detta åstadkoms med komprimerad gas och reduceringsventiler. Trycket mäts med manometrar och mätcellens expansion mäts genom att denna expanderas med vatten varvid inpressad vattenvolym avläses i ett vattenståndsrör.

Vid användning i finkorniga jordar används ett gummimembran som skydd för cellerna. I grövre jord fästs stålfolieband utanpå provkroppen. I grusig jord och morän används skyddsrör med längsgående slitsar. Innan pressometern installeras måste den kalibreras för egenmotståndet mot expansion så att en tryck-expansionskurva för hela deformationsområdet erhålls. Vid användande av slitsrör måste också detta kalibreras.

Menard-pessometern installeras som regel i förborrade hål. Idén med försöket är att man skall testa en ostörd jord under naturliga förhållanden. Resultaten är helt avhängiga av hålets kvalitet och hur pass ostörd jorden är. De förborrade hålen görs med diametrar som är något större än den icke expanderade provkroppens. Hålen utförs med speciell håltagningsteknik så att hålväggarna blir så släta som möjligt och erhåller minsta möjliga deformation. Pressometerförsök i t.ex. kolvborrhål är således helt förkastliga. Ofta används stabilisering av hålväggarna med tjock borrhätska (betonit) som pumpas ned under håltagningen. I finkorniga jordar och sand kan håltagning på detta vis ske försiktigt ned till 20-30 m djup.

Goda resultat har erhållits av SGI vid håltagning med skruvprovtagare med betonit spolning. I mycket fast jord som morän drivs slitsrör ned med tung bergborrustrustning varvid borrhönan arbetar före foderröret. Andra metoder kan användas beroende på jordens beskaffenhet. I värsta fall hejas slitsrören direkt ned i jorden.

Hålens kvalitet är så viktig att Baguelin et al [59] ger följande rekommendationer:

- o att håltagning och försök aldrig får överlåtas på fältpersonalen utan den för projektet ansvarige ingenjören måste övervaka fältarbetet för att kunna bedöma resultatet
- o att håltagningen alltid skall göras för hand utom när det visar sig helt omöjligt. (Rekommendation för vad som alternativt kan användas i olika jordtyper ges)
- o att försökskvalitet och inte antalet försök per dag måste vara det mål som eftersträvas och varpå fältarbetet bedöms
- o att slitsrör endast skall tillgripas om alla andra metoder misslyckats. Detta gäller speciellt om slitsröret hejas, trycks eller vibreras ned direkt i jorden
- o att håltagning med tung bergborrustrustning undviks eftersom det ger ojämna hål och jordens egenskaper avsevärt underskattas

Försöken utförs så att provkroppen sänks ned i det förborrade hålet till provtagningsnivån. Trycket i cellerna ökas sedan stegvis tills gränstrycket där jorden plasticeras alternativt maximal expansion av mätcellen nås. Laststegen väljs så att cirka 10 lika stora steg erhålls under försöket.

Varje last hålls konstant under 60 sekunder. Mätcellens expansion avläses i vattenståndsröret efter 15, 30 och 60 sekunder.

Försöksresultaten korrigeras sedan med hänsyn till hydrostatiska tryck beroende på nivåskillnaden mellan instrument och mätcell och med hänsyn till kalibreringskurvan. Volymändringen uppritas sedan som funktion av det korrigerade trycket. I samma diagram ritas sedan krypkurvan, som är skillnaden mellan avläsningarna vid 30 respektive 60 sekunder (alternativt 15 och 30 sekunder), mot det korrigerade trycket, Fig.22.

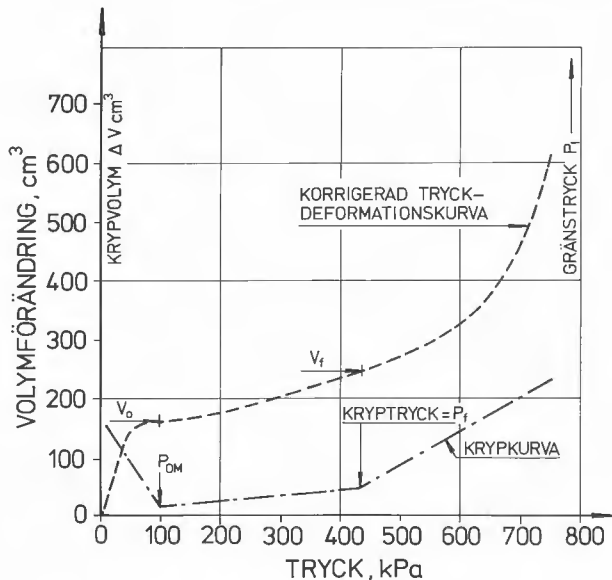


Fig. 22. Exempel på utvärdering av pressometerförsök.

I diagrammet utvärderas nolltrycket  $P_{OM}$  och flyttrycket  $P_f$  ur krypkruvan.  $P_{OM}$  är ett mått på när fullständig anliggning nåtts mellan den expanderande mätcellen och hålväggen.  $V_0$  är motsvarande volym där den egentliga provningen av jorden startar.  $P_f$ , flyttrycket, är det gränstryck där jorden upphör att vara "elastisk" och där stora plastiska krypdeformationer startar. Motsvarande volym kallas  $V_f$ .

Ur dessa parametrar utvärderas med tillpassad teori skjuvmodulen

$$G = V \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

Ur skjuvmodulen beräknas en elasticitetsmodul E

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Schablonmässigt antas  $\nu = 0,33$  (dränerad jord) och pressometermodulen  $E_M$  enligt Menard beräknas ur

$$E_M = 2,66 \left( V_C + \frac{V_f + V_0}{2} \right) \cdot \frac{P_f - P_{OM}}{V_f - V_0}$$

$$\left( = 2.66 V_M \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V} \right)$$

där  $V_C$  = mätcellens icke expanderade ursprungsvolym.

Ur diagrammet utvärderas också gränstrycket  $P_1$  vilket definieras som det tryck där man får en obegränsad volymökning. Ofta kan man inte expandera mätcellen så mycket att detta tryck nås, varför  $P_1$  vanligen definieras som det tryck där volymen  $(V_C + V_0)$  fördubblats. Ibland nås ej heller detta tryck på grund av brister i håltagningen och  $P_1$  får då konstrueras med antagande om pressometerkurvans form. Netto gränstrycket  $P_1^*$  beräknas sedan som

$$P_1^* = P_1 - P_0$$

där  $P_0$  är det totala horisontella vilojordtrycket i jorden. Kan detta inte uppskattas bättre på annat sätt antas  $P_0 = P_{OM}$ .



Pressometermodulen  $E_M$  används för beräkning av sättningar av främst stela fundament (grundplattor, pålar och plintar). Härvid används speciella beräkningsmetoder som utarbetats för pressometern. Dessa metoder är halvempiriska. De innefattar empiriska korrektionsfaktorer som på basis av jordtyp och förhållandet mellan  $E_M$  och  $P_1^*$  bland annat korrigerar för normal hållkvalitet. Pressometermodulen  $E_M$  kan dock inte direkt användas som en elasticitetsmodul i elasticitetsteoretiska beräkningar.

På motsvarande sätt kan bärförmågan utvärderas ur nettogränstrycket  $P_1^*$  med hjälp av empiriska korrelationer som är beroende av typ av jord.

Ur pressometerförsöken har man också försökt att utvärdera parametrar som vilojordtryck, odränerad skjuvhållfasthet och friktionsvinkel.

I praktiken har det visat sig mycket svårt och oftast omöjligt att utvärdera vilojordtrycket från denna typ av pressometerförsök. Det görs endast i mycket starkt överkonsoliderad jord och i berg där det är svårt att få en bättre uppskattning.

Den odränerade skjuvhållfastheten i lera ( $\tau_{fu}$ ) utvärderas ofta från nettogränstrycket

$$P_1^* = \tau_{fu} (1 + \ln \frac{E}{2\tau_{fu}(1+v)})$$

För  $v=0,5$  och normala värden på  $E/\tau_{fu}$  (150-500) kan detta skrivas

$$\tau_{fu} \approx P_1^* / 5,5$$

Pressometerförsöket medför emellertid en relativt snabb pålastning och den odränerade skjuvhållfastheten i lera (liksom  $P_1^*$ ) är tidsberoende. Vid för-

sök på svenska leror (t ex [61]) har det visat sig att en utvärdering av en användbar skjuvhållfasthet snarare bör baseras på flyttrycket  $P_f$

$$\tau_{fu} \approx \frac{P_f - P_0}{5,5}$$

Ett antal empiriska relationer mellan friktionsvinkeln  $\phi'$  och nettogränstrycket  $P_1^*$  har föreslagits. Efter utvärdering av de föreslagna relationerna ansluter sig Baguelin et al [59] till Schmertmanns kommentar [62] att "varje ingenjör med någon erfarenhet kan gissa värdet bättre än det kan utvärderas med dessa metoder".

Sammanfattningsvis är Menardpressometern en mycket väl beprövad metod för bestämning av sättningar och bärighet i mycket fasta leror och i friktionsmaterial. Metoden kan också användas i sedimentärt berg. Det är ingen enkel metod. För goda resultat erfordras en avancerad håltagningsteknik och erfaren fältpersonal med god kunskap om pressometern. Av Baguelin et al rekommenderas också att den för projektet ansvarige ingenjören övervakar fältarbetet för att kunna göra riktiga bedömningar. Utrustningen består av ett komplicerat trycksystem med åtföljande risker för läckage. Risken för skador på celler och skyddsfolier är dessutom relativt stor. Byte av skadade delar sker helst i verkstad med specialverktyg varför ett antal sonder brukar medföras ut i fält. Vid eventuellt byte av sond får omkalibrering ske. Provkroppen bör även omkalibreras efter ca var 20:e försök då kalibreringsvärdena ändras med antalet expansioner.

I jordar där det är svårt att åstadkomma bra hål för pressometerförsök och där risken för skador på provkroppens membran är stor kan metoden vara mycket kostnadskrävande.

I lösare leror erhålls endast ett värde på skjuvhållfastheten vars tillförlitlighet inte är helt utredd. Vilojordtrycket och friktionsvinkeln i jorden kan inte bestämmas med någon större noggrannhet.

Pressometern kan användas vid kontroll av djuppackning. I dessa fall kan grövre installationsformer som nedslagning eller nedspolning användas om det endast är den relativa packningseffekten som skall undersökas.

## 5.2 SJÄLVBORRANDE PRESSOMETER (SBP)

För att eliminera störningen vid håltagningen har självborrande pressometrar utvecklats i Frankrike (typ PAFSOR, [63]) och i England (typ Camkometer, [64]), Fig.23.

Dessa pressometrar är ihåliga. Nederdelen är utformad som en egg med skäret på utsidan så att jorden på pressometers utsida ej skall deformeras vid installationen. Inne i eggen finns ett roterande skärverktyg som skär sönder och rör om den jord som kommer in i eg-

gen. Den omrörda jorden spolas sedan upp till markytan med betonitpolning. På detta vis försöker man eliminera alla stanseffekter då pressometern sakta trycks ned. Utrustningarna kan installeras med långt mindre störning än Menardpressometern men användningen är begränsad till lera, silt och sand. Cellerne är instrumenterade så att såväl horisontaltryck, horisontal deformation och portryck kan mätas. Att utföra självborrande pressometerförsök fordrar högt kvalificerad personal då såväl installationsteknik som försöksprocedurer är komplicerade.

Försöken är tidskrävande, dels på grund av att installationstekniken är komplicerad dels på grund av att det speciellt i lera krävs en avsevärd väntetid för spänningsstabilisering efter installationen innan försöket kan startas.

Försöken har genomgående givit en mycket god bestämning av vilojordtrycken i lös och medelfast lera. Osäkerheten ökar i starkt överkonsoliderad lera, silt och sand. Det finns dock för närvarande ingen bättre metod att bestämma denna parameter.

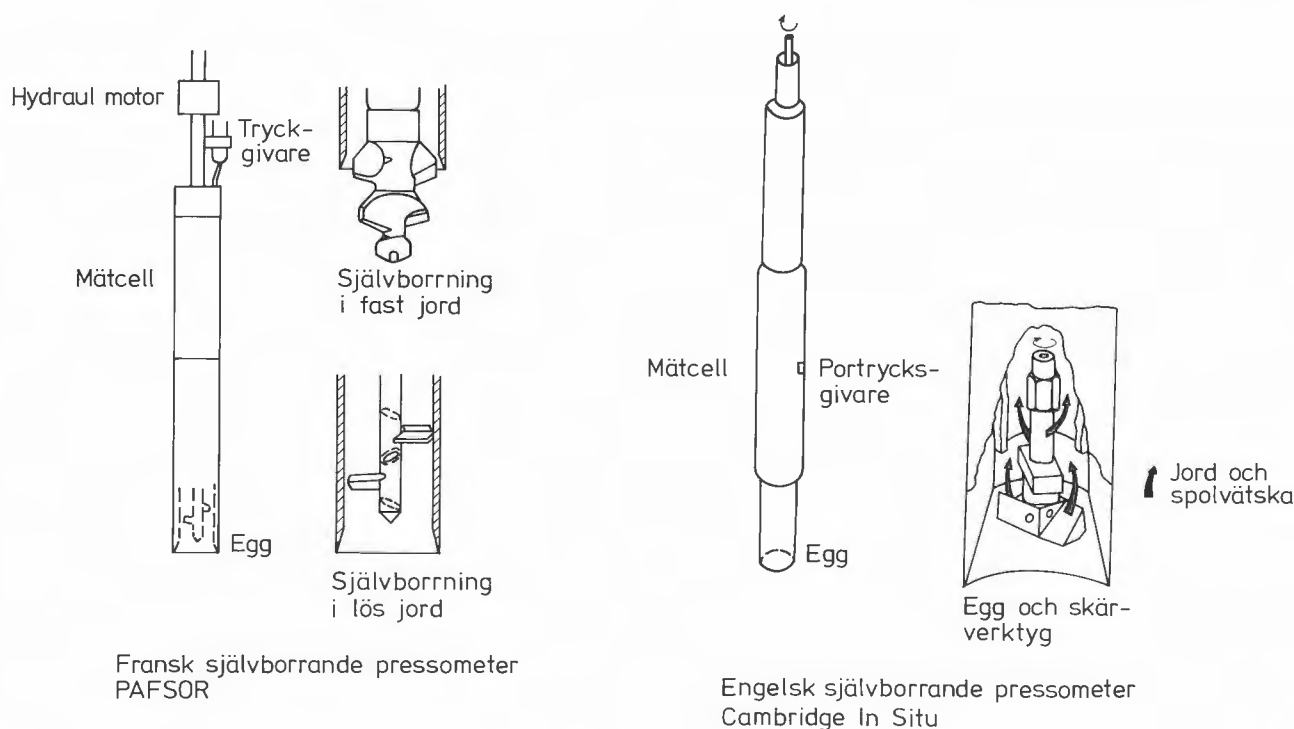


Fig. 23. Självborrande pressometer.

Deformationsegenskaperna skulle enligt tanken med den självborrande pressometern kunna bestämmas mycket noga. Det är i praktiken dock endast i lös och medelfast lera som installationen kan ske nästan ostört. I dessa jordar är det odränerade pressometerförsöket inte relevant för de flesta av deformationsproblemen. I alla jordar får man räkna med en viss störning och nuvarande rekommendationer (t ex Jamiolkowski et al [65]) är att bestämma skjuvmodulen vid en på- och avlastningscykel ( $G_{ur}$  alternativt  $G_{ru}$ ) under expansionsfasen eller vid den efterföljande avlastningen, Fig.24.

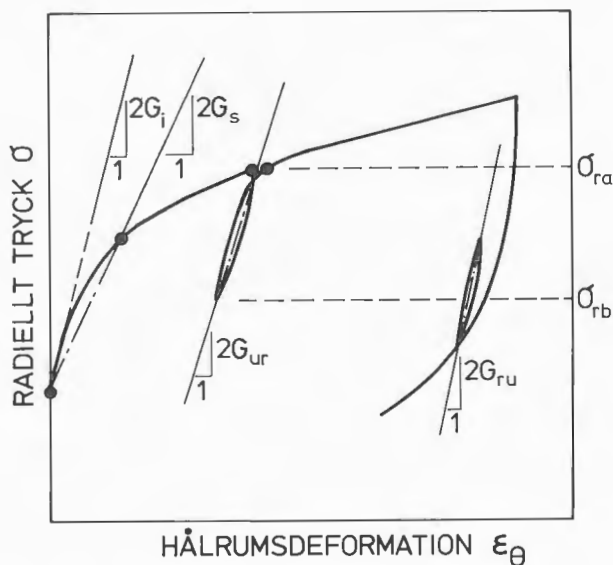


Fig. 24. Utvärdering av skjuvmodul ur pressometerförsök, [65].

Denna modul är dock endast användbar inom det överkonsoliderade spänningsområdet och kan således endast användas för deformationsberäkning i starkt överkonsoliderade jordar. Avlastnings-återbelastningsmodulen kan dessutom i princip bestämmas med alla typer av pressometrar och fordrar ingen självborring. I friktionsjord bör modulen modifieras för spänningsnivå. För deformationsegenskaperna bestämda direkt ur spännings-deformationskurvan från självborrande pressometrar har ingen direkt användning funnits. Baguelin et al [59] anger empiriska utvärderingsmetoder för den självborrande pressome-

tern, så att resultaten kan sättas in i de beprövade beräkningsmetoderna för Menardpressometern. Dessa parametrar kan dock erhållas enklare med den senare typen av pressometer.

Gränstrycket  $P_1$  skall definitionsmässigt bli detsamma oavsett installationsmetod, såvida störningseffekterna inte sträcker sig mycket långt ut i jorden. Jämförelser mellan självborrande pressometrar, "push-in" pressometrar, full-displacement pressometrar och Menardpressometrar visar att så ofta är fallet. Stora skillnader har dock uppmätts i sprickiga jordar.

För utvärdering av den odränerade skjuvhållfastheten ur spännings-deformationskurvan från självborrande pressometerförsök har ett antal metoder föreslagits. De ger alla mycket höga och praktiskt oanvändbara skjuvhållfastheter.

För utvärdering av friktionsvinkeln har nya och förbättrade metoder som kan appliceras på resultaten från självborrande pressometrar föreslagits. De resultat som erhålls har dock fortfarande en betydande spridning.

Sammanfattningsvis är den självborrande pressometern den för närvarande bästa metoden att bestämma horisontaltrycket i jorden. I övrigt har den inte på något vis motsvarat de höga förväntningar som ställdes på den vid introduktionen på 70-talet. Ghionna et al [66] och Aas et al [14] drar efter ingående studier slutsatsen att utrustningen måste avsevärt förbättras om några framsteg skall kunna göras. Metoden är mycket dyrbar och motsvarande resultat kan, bortsett från horisontaltrycket, som regel erhållas betydligt enklare och billigare.

### 5.3 "PUSH-IN" PRESSOMETER (PIP)

Push-in pressometern är liksom den självborrande pressometern ihålig och har en egg i nederdelen så utformad att jorden pressas in i och igenom provkroppen när denna pressas ned. Denna pressometer har ingen utrustning för omrörning eller uppspolning av den inpressade jorden, men det invändiga hålrummet har gjorts så stort som möjligt. Det har dessutom en släppning strax ovan eggen för att minska friktionen. Provkroppen sänks ned till botten av förborrade hål och trycks sedan vidare cirka en och en halv meter ned i jorden. För att underlätta nedpressningen kan eventuellt ett mindre hål förborras.

Jämförelser med den självborrande pressometern har visat att horisontaltrycken mot provkroppen efter installationen som regel blir betydligt högre för "push-in" pressometern. Gränstryck och avlastnings- återbelastningsmoduler blir som regel likvärdiga. Någon skjuvhållfasthet eller friktionsvinkel kan ej utvärderas ur spännings- deformationskurvorna. Metoden har främst utvecklats för off-shore verksamhet där det är mycket svårt såväl att installera självborrande pressometrar som att förborra bra hål för Menardpressometern.

En hybrid av Menardpressometern, den självborrande pressometern och push-in pressometern existerar också. Den består av en ihålig pressometer som är försedd med samma typ av egg som push-in pressometern. Ovanför eggen finns munstycken som riktas snett uppåt inne i hålrummet. Under neddrivningen spolas vatten under mycket högt tryck genom dessa munstycken. Den intryckta jorden slås då sönder och spolas upp. Metoden är speciellt användbar i silt och sand och används bland annat i off-shore undersökningar till måttliga djup.

### 5.4 "FULL-DISPLACEMENT" PRESSOMETER (FDP)

Då vare sig avlastnings-/återbelastningsmodulen eller gränstrycket är särskilt känsliga för störning vid installation har steget tagits fullt ut med den så kallade full-displacement pressometern (FDP). Denna har en konisk spets och pressas (eller slås) helt enkelt ned i jorden utan föregående förborring. Jämförelser har visat att avlastnings- och återbelastningsmoduler som är fullt jämförbara med resultaten från självborrande pressometer kan erhållas [67]. Jämförelser mellan gränstrycken har dock ej rapporterats.

I en forskningsutrustning har en kombinerad spetstryck- porttryckssond kompletterats med en full-displacement pressometer placerad ovanför friktionshylsan [18]. Denna typ av pressometer kan till sin funktion liknas vid dilatometerförsöket. Det skulle eventuellt vara möjligt att bygga upp motsvarande empiri som för dilatometerförsöket och få motsvarande eller t o m bättre resultat än kombinationen spetstryck- porttrycksondering och dilatometer. Forskningsspetsen och kringutrustningen är dock mycket komplicerade varför den troligen inte kommer att bli något praktiskt/ekonomiskt alternativ.

Den nedpressade pressometern har med framgång använts för att modellera slanka pålar och mäta relevanta parametrar för beräkning av horisontalförskjutningar av dessa [68].

## 6. PLATTFÖRSÖK

Plattförsök är kanske den äldsta formen av in situ försök. Det används för bestämning av deformationsegenskaper och för bestämning av hållfasthet och bärrighet. Plattförsök är speciellt användbara för packad jord, starkt överkonsoliderad sprickig jord, moränlera, fyllningar och annan heterogen jord samt löst berg. En stor fördel med plattförsök är den relativt stora jordvolym som involveras i försöket, varvid makrostrukturens inverkan beaktas.

Plattförsök utförs på en väl avjämnad yta direkt på marken, på schaktbotten eller på botten av förborrade hål med stor diameter. Vilken plattstorlek som väljs är beroende av vad som är syftet med undersökningen och hur stora motståndskrafter som kan mobiliseras. Vanligen använda plattstorlekar varierar mellan 0,05 och 1,0 m<sup>2</sup>. Felkällorna ökar markant ju mindre plattarea som används.

Om huvudsyftet med undersökningen är att bestämma jordens bärrighet eller hållfasthet görs först en grov uppskattning av förväntad brottlast. Upplastning görs sedan stegvis så att brott inträffar efter cirka 10 laststeg. Laststegens varaktighet kan varieras beroende av vilken typ av brott man vill studera. I grövre friktionsjord får laststegen ofta verka i 8 minuter och deformationerna avläses efter 1, 2, 4 och 8 minuter. På detta vis kan initialdeformationer och efterföljande krypdeformationer utvärderas. Önskas dränerade parametrar i finkornigare jord studeras tids-sättnings sambanden i varje laststeg och detta får verka tills erforderlig konsolideringsgrad erhållits, (jfr skruvplattförsök). I lera kan man också utföra snabbare försök varvid de odränerade egenskaperna bestäms.

Sättningen mäts lämpligen i tre punkter på plattan, med samma radiella avstånd från plattans centrum. Mätningen sker relativt ett referenssystem som är opåverkat av jordens deformationer. Vid höga laster är det inte ovanligt med tendenser till snedsättning hos plattan. Det är därför en fördel om belastningsanordningen är så utformad att plattan styrs rakt ned.

Vid utvärdering redovisas plattans sättning som funktion av pålagd last. Dessutom redovisas i förekommande fall krypsättningen mellan 1 och 8 minuter (alternativt 2 och 8 minuter) som funktion av pålagd last. Ur detta kan såväl plattans brottlast som kryplasten utvärderas. Ur brottlasten kan sedan jordens friktionsvinkel alternativt dess odränerade skjuvhållfasthet beräknas med bärrighetsteori.

Är huvudsyftet med plattförsöket att bestämma deformationsegenskaper behöver belastningsanordningen endast dimensioneras för laster 1,5 ggr tillåten last. Lämpligt är att även i detta fall använda cirka 10 laststeg med motsvarande varaktighet som brottförsöken. I de fall långtidsdeformationer efterfrågas kan det vara lämpligt att genomföra ett antal av- och pålastningscykler.

Vid utvärdering av deformationsegenskaperna ur plattförsök används ofta elasticitetsteori och ett slags skjuvmodul (sekantmodul) utvärderas

$$G = \frac{\Delta q}{\Delta s} \cdot \frac{\pi}{8} \cdot (1-\nu) \cdot f(z) \cdot B$$

där  $\Delta q$  = lastökning för vilken  $G$  skall beräknas

$\Delta s$  = sättning för lastökningen  $\Delta q$

$f$  = korrektionsfaktor för inbäddning som varierar från 1,0 på markytan till 0,85 på botten av borrhål [69]

$B$  = plattans diameter

Om inte lastökningen är förutbestämd utvärderas ofta skjuvmodulen  $G$  för halva tillskottslasten vid brott i lera respektive en fjärdedel av tillskottslasten vid brott i sand.

Ett annat sätt att använda resultaten från plattförsök i sand, vid beräkningar av sättningar av fundament med andra dimensioner, är att använda de halvempiriska diagram som utarbetats vid NGI [70], Fig.25.

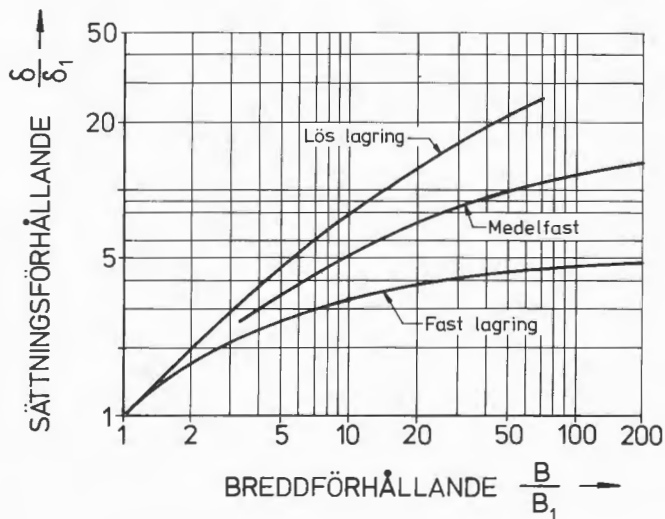
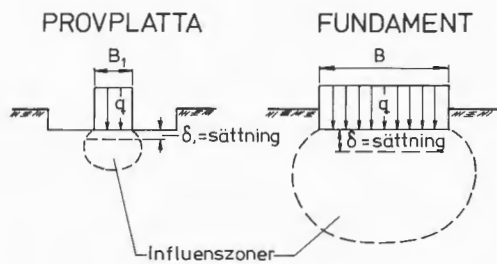


Fig. 25. Diagram för beräkning av sättningar på basis av plattförsök, [70].

Plattförsök är tämligen kostsamma. Ofta måste man genomföra flera försök på olika nivåer för att kunna ta hänsyn till varierande sättnings- och bärighetssegenskaper i djupled. Detta medför tidskrävande och dyr schaktning till varje nivå. Man måste dessutom ta hänsyn till jordens variationer i sidled och ofta utföra försök i flera punkter. Efter försöken bör jorden under plattan ofta grävas upp för kontroll av att den provade jordvolymen är representativ

för den aktuella jorden. Plattförsöken är dock ofta nödvändiga i heterogen jord och kan också i andra fall vara lönsamma i samband med större byggnadsprojekt för att t ex höja tillåtna grundtryck.

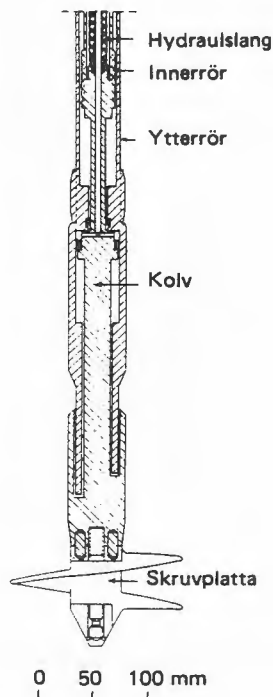
### 6.1 SKRUVPLATTEFÖRSÖK

Skruvplatteförsöket är en metod för att utföra plattbelastning på djupet. Metoden används främst för att bestämma kompressionsegenskaperna i silt och sand. Den kan också användas för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet och odränerad elasticitetsmodul i leriga jordar, speciellt om man önskar att en större "ostörd" jordvolym skall provas.

Vanliga plattförsök under markytan har framgångsrikt utförts i fasta leror där förborrade hål står öppna till stora djup. De förborrade hålen måste göras så stora att en manuell avjämning av hålbotten kan göras. Denna metod är mycket dyrbar och inte praktiskt användbar i andra jordar. Med skruvplattan försöker man eliminera problemen med håltagning och anliggning. Denna platta utformas så att den med minsta möjliga störning kan skruvas ned till provningsnivån utan föregående håltagning.

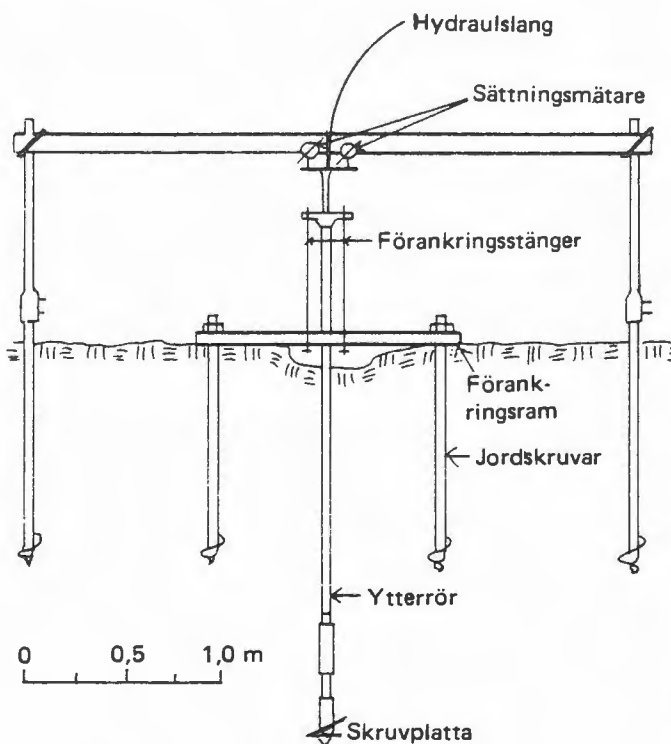
Metoden lanserades av NGI 1956 och vidareutvecklades sedan vid NTH, (Kummenje 1956 [71], Janbu och Senneset 1973) [72]. På senare tid har ytterligare utveckling skett, främst i USA, Canada och Australien, [73,74,75].

Den utrustning som främst använts i Skandinavien består av en skruvplatta, ett hydraulsystem, ytterrör, förlängningsrör samt ett mothålls och mätsystem, Fig.26.



I denna utrustning har plattan en diameter av 162 mm, vilket motsvarar en area av  $0,02 \text{ m}^2$ . Den är utformad som ett varv av en skruv med stigningen 45 mm. Plattans centrum är i sin nedre del utformad som en konisk spets som pressas ned framför plattan. Spetsen fungerar som styrning då plattan skruvas ned. I sin övre del är plattans centrum försedd med ett gängat hål och hål för styrtappar för överföring av vridmoment. Plattan är av kostnadsskäl gjord av gjutjärn så att den efter försöken kan lämnas kvar i jorden.

Plattan fästs vid en hydraulcylinder. Denna hydraulcylinder åtföljer skruvplattan ned i jorden och dubbla rörsystem skarvas successivt på. Det yttre rörsystemet används för neddrivning och mothåll vid provning. Det inre rörsystemet är fäst vid hydraulcylinderns kolv och används för deformationsmätning vid provning. Inuti det inre rörsystemet löper hydraulslangen som överför trycket till hydraulcylindern.



Plattan skruvas ned till provningsnivån. Detta kan ske manuellt eller med hjälp av någon maskinellt roterande neddrivningsutrustning. I fast lagrade material måste man ofta förborra till strax ovan provningsnivån. Därefter skruvas plattan ned ytterligare cirka en halv meter under det förborrade hålet.

Som mothåll kan användas en tyngre eller förankrad borrhutrustning, alternativt en mothållsram som förankras med jordskruvar. Deformationsmätningen görs normalt mot en fixerad mätbalk vars upplag befinner sig utanför influensområdet för mothållets förankringar.

Fig. 26. Skruvplatta och försöksuppställning enligt Janbu och Senneset, [72].

Trycket i hydraulsystemet åstadkoms med komprimerad kvävgas, som via en tryckregulator och en övergångscylinde verkar på oljan i hydraulsystemet. Trycket i systemet avläses på en manometer som är kalibrerad så att pålagd last kan utvärderas.

Nackdelarna med denna typ av utrustning är att gjutjärnsplattan och ytterrören ofta vrids sönder. Förboring är dyrbar, speciellt om foderrör med en diameter av cirka 200 mm måste installeras. Gjutjärnsplattan har visat sig ha en tendens att vandra och inte gå rakt ned och friktionsproblem kan uppstå i hydraulkolven.

Andra varianter av skruvplattoutrustningar har därför utvecklats. En utrustning har utvecklats i Kanada med en platta av smidesstål [74]. Denna har samma area som gjutjärnsplattan. För att förhindra att den vandrar iväg i sidled under nedskruvningen, är plattan tvådelad och utformad som en dubbelspiral med diametralt placerade skär. Den är monterad på kraftiga sondstänger som kopplas ihop med splines och stoppskruvar. Dessa kan överföra stora vridmoment åt båda håll samt stora trycklast. Lasten läggs på via stängerna från markytan och stångfriktionen försummas. En annan utrustning har utvecklats i Australien [75]. I denna utgör skruvplattan det nedersta varvet av en kraftig jordskruv fäst på grova ihåliga rör. Jordskruven dras ned till en halv meter ovan provningsnivån. Därpå frigörs skruvplattan och denna skruvas vidare den sista halvmeteren med hjälp av ett invändigt stångsystem. Lasten påförs via detta inre stångsystem som skyddas mot jordfriktion och knäckningsrisk av de utanpåliggande rören. Många andra system med större och mindre plattor förekommer också.

Efter att plattan skruvats ned till provningsnivån påläggs lasten stegvis. Som första laststeg väljs det uppskattade rådande effektiva vertikalktrycket,  $\sigma'_0$ . På grund av valvbildning kan man inte räkna med att något tryck utöver vattentrycket verkar på plattans översida, utan detta första laststeg kompenserar endast för motsvarande avlastning.

De åtföljande laststegen väljs med hänsyn till att det intressanta lastområdet skall täckas in, att kraft - deformationskurvans initiella lutning skall kunna utvärderas, att ett eventuellt förkonsolideringstryck inom aktuellt spänningsområde skall kunna upptäckas och att i så fall också modulen efter detta skall kunna utvärderas.

Lasten begränsas i lösa jordar av plattans bärighet och i fasta jordar av utrustningens kapacitet, vilken normalt är ca 1000 kPa för en 0,02 m<sup>2</sup> platta. Vid bestämning av kompressionsegenskaper hålls lasten i varje laststeg konstant och sättningarnas utveckling med tiden studeras. Sättningen plottas i diagram mot kvadratroten ur tiden och lasten får verka tills minst 90% av konsolideringssättningen enligt Taylors utvärdering erhållits, Fig.27.

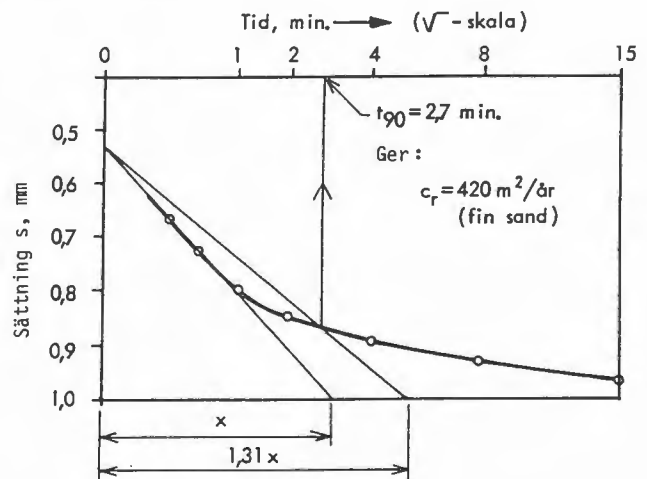


Fig. 27. Exempel på sättningskurva med utvärdering av tid för 90% konsolidering ( $t_{90}$ ) och konsolideringskoefficienten  $c_r$



Diagrammet används för utvärdering av konsolideringskoefficienten för radiell strömning  $c_r$  enligt

$$c_r = T_{90} \frac{R^2}{t_{90}} = 0,335 \frac{R^2}{t_{90}}$$

där  $R$  = halva plattdiametern  
 $t_{90}$  = tiden för 90% konsolidering  
 $T_{90}$  = tidsfaktor för 90% konsolidering

Erforderlig tid för konsolidering begränsar i praktiken skruvplattans användbarhet för att bestämma dränerade parametrar till sand och silt samt starkt överkonsoliderade leror. 100% sättning för de olika laststegen utvärderas och plottas mot pålagd last. Eventuellt förkonsolideringstryck utvärderas enligt Dahlberg [76].

Modulen före förkonsolideringstrycket  $M_0$  utvärderas ur kurvans räta del före förkonsolideringstrycket som

$$M_0 = 0,72 B \Delta\sigma' / \Delta s$$

där  $B$  är plattans diameter och  $\Delta\sigma' / \Delta s$  det rätlinjiga förhållandet mellan spänningsökning och sättningstillskott.

För spänningar över förkonsolideringstrycket utvärderas kompressionsmodultalet  $m$  från lastsättningskurvans initiella lutning efter förkonsolideringstrycket. Kurvan kröker som regel av nedåt vid högre laster men detta beror på att lasten närmar sig brottlasten och avspeglar inte kompressibiliteten.

Kompressionsmodultalet  $m$  utvärderas ur

$$m = S \frac{\Delta\sigma' \cdot B}{\sigma'_a \cdot \Delta s}$$

där  $S$  är ett dimensionslöst sättningstal som beror på jordart och spänningstillstånd.  $\sigma'_a$  är ett referenstryck som sätts till 100 kPa, Fig.28.

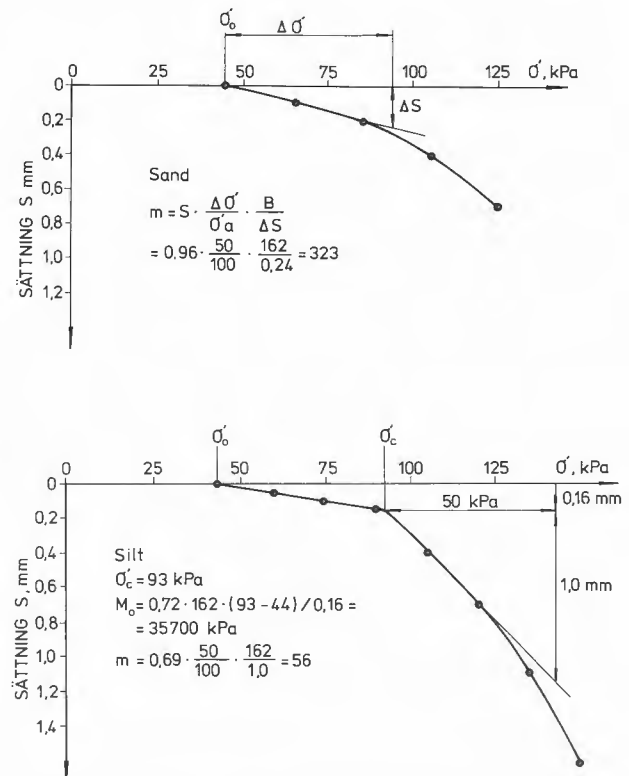


Fig. 28. Exempel på last-sättningskurvor med utvärdering av kompressionsparametrar.

Sättningstalet  $S$  väljs med hänsyn till spänningstillståndet enligt Fig. 29.

I överkonsoliderad jord är kompressionsmodulen konstant och sättningstalet blir också konstant ( $S \approx 0,72$ ) utom möjligen vid mycket låga vertikalltryck på mycket små djup.

I normalkonsoliderad grovsilt och sand uttrycks modulen  $M$  som

$$M = m \sqrt{\sigma' \cdot \sigma'_a}$$

där  $\sigma'$  är aktuell effektivspänning i jorden. Sättningstalet  $S$  varierar med spänningsnivån där lutningen  $\Delta\sigma' / \Delta s$  utvärderats och med storleken av spänningsintervallet  $\Delta\sigma'$ . Det varierar

## 7. PERMEABILITETSMÄTNING

### 7.1 MÄTNING AV PERMEABILITET MED NED-DRIVNA FILTERSPETSAR OCH SJÄLVBOR-RANDE PERMEAMETRAR

Permeabilitetsmätningar i fält har bli- vit allt vanligare, dels i samband med sättningsberäkningar och dels i samband med avfallsdeponering. I homogen lera kan goda värden på permeabiliteten ofta erhållas betydligt enklare i laborato- riet, men permeabiliteten i varvig och skiktad jord får ofta bestämmas i fält. Detta gäller också för friktionsjordar där prov sällan kan tas med bibehållen struktur och lagringstäthet. I grövre jordar mäts permeabiliteten i fält som regel genom propumpning. Alternativt kan ett s k "slug-test" användas. I detta försök skapas en plötslig föränd- ring av vattennivån i ett observations- rör, varpå tidsförloppet för vattenni- vån återställning mäts. I finare silt och lera installeras ett filter i jor- den och vatten infiltreras genom detta. Alternativt kan man låta vatten strömma in genom filtret. Försöken kan utföras som "variable head" försök där en tryckgradient skapas mellan porvattnet i jorden och mätsystemet på andra sidan filtret och gradienten får sedan jämnas ut allteftersom vatten strömmar genom filtret. Permeabiliteten i jorden er- hålls genom att studera den genomström- mande vattenmängden och gradientens förändring med tiden. Försöken kan också utföras som "constant head" för- sök. I dessa försök hålls gradienten konstant och vattenflödet genom filtret studeras mot tiden.

Mycket noggranna bestämningar kan teo- retiskt utföras med självborrande per- meameter medan mera ordinära permeabi- litetsförsök utförs i filterspetsar som trycks ned i jorden. De senare är av samma typ som de filterspetsar som nor- malt används vid portrycksmätning, Fig.30.

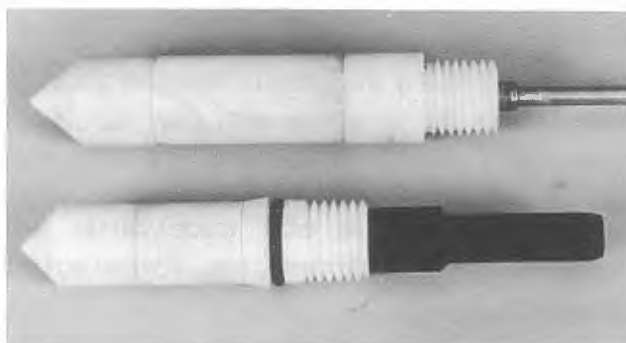
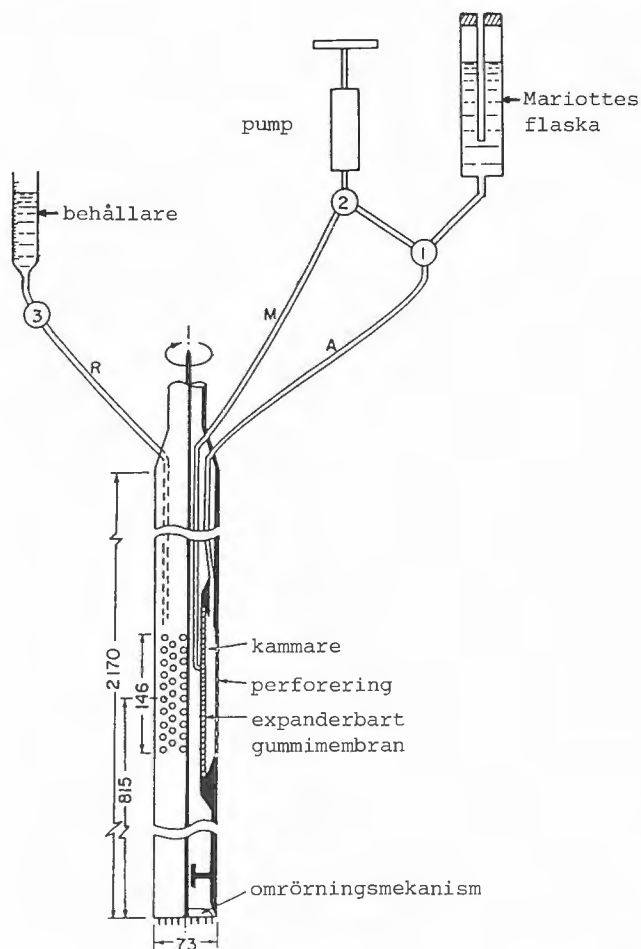


Fig. 30. Självborrande permeameter för- beredd för "constant head" för- sök [81] och exempel på filter- spetsar:  
Keramiskt filter (överst)  
BAT (underst)

Den självborrande permeameter, PERMAC [81], är utvecklad ur den franska självborrande pressometern PAFSOR. I stället för ett utanpåliggande membran, som på pressometern, har ett stort antal hål borrats i mantelytan. Under neddrivning är dessa tätade genom att ett invändigt membran pressas ut mot hålen. Före provningen suges membranet försiktigt tillbaka samtidigt som vatten fylls på i spalten mellan ytterrör och membran. När hålen är frilagda kan vatten strömma ut i jorden. Något filter som kan sättas igen finns inte.

Vid nedpressning av en filterspets uppstår alltid en viss omrörning av jorden närmast filtret och jorden pressas åt sidan. Vid rekonsolideringen efter neddrivningen blir jorden normalt tätare närmast filtret. En viss igensättning av filtret kan också ske vid neddrivningen. Dessa faktorer gör att man får räkna med att permeabilitetsvärden som uppmätts i nedpressade filter ofta är något lägre än de verkliga värdena.

Omrörningseffekterna är allvarligast i jord med tunna varv och skikt och jord med tunna spricksystem samt jord som även i mikroskala har en uttalad strukturanisotropi. I dessa jordar kan en zon runt filtret skapas med en påtagligt lägre permeabilitet än den ostörda jorden. I mera homogena jordar tyder jämförande försök, med drivna filterspetsar och laboratorieprovning såväl som självborrande permeametrar, på att förändringarna i permeabiliteten på grund av installationen är mycket måttliga [82,83,84]. Igensättningen av filtren är mera osäker och beror troligen i viss mån på filtrets utformning, material och porstorlek. Filtermaterial som kan reagera kemiskt med jord och porvatten skall undvikas.

I skiktade jordar kan ett mått på permeabiliteten erhållas med neddrivna filterspetsar också i relativt tunna lager, om spetsens och filtrets storlek

avpassas därefter och man förmår att placera filtret mitt i detta lager.

I jord med strukturanisotropi, tunna spricksystem eller tunna varv med en permeabilitet som starkt avviker från övrig jord, måste självborrande permeametrar användas för att få en uppfattning om jordens horisontella permeabilitet i ostört tillstånd. Detta värde är väsentligt för vattenströmningsproblemet genom den ostörda jorden. För bedömning av konsolideringsegenskaper i sprickig jord kan värden från neddrivna spetsar ofta vara väl så relevanta eftersom eventuella sprickor ofta pressas samman i ett tidigt skede av konsolideringen. Vilka resultat som skall användas blir en bedömningsfråga beroende på problemställningen.

En vanlig felkälla vid permeabilitetsmätning i fält är förekomst av gas i jordens porer. Detta påverkar resultaten från alla typer av permeabilitetsförsök. En annan felkälla är att spänningarna i jorden ändras då portryckgradienten skapas och utjämnas. De enklare utvärderingsmetoder som används förutsätter att såväl jorden som porvätskan är inkompressibla. Nya teorier som tar hänsyn till jordens kompressibilitet har presenterats (t ex Mieusens och Ducasse [85]), men de har inte visat sig vara praktiskt användbara. Problemet kan till stor del kringgås genom att hålla tryckgradienten låg. Används en negativ gradient, så att vatten strömmar från jorden och in i filtret, ökar de effektiva spänningarna i jorden och stora fel kan uppstå om förkonsolideringstrycket överskrids. Används en positiv gradient bör gradienten hållas så låg att svällningstendenserna i jorden på grund av minskade effektivtryck begränsas. Dessutom måste hänsyn tas till risken för "hydraulisk spräckning".

Försöken utvärderas som regel enligt Hvorslev [86] ur

$$q = F \cdot k \cdot h$$

där  $q$  = vattenflödet

$k$  = permeabiliteten

$h$  = tryckskillnaden

$F$  = flödesfaktorn

Flödesfaktorn  $F$  beror på filtrets geometri och vad man antar om flödesförhållandena i jorden utanför filtret.

Ett antal flödesfaktorer har föreslagits, med förenklade antaganden om flödet från filtret ut i jorden, t ex Hvorslev [86], Kallstenius et al [87] och Wilkinsson [88]. Undersökningar har dock visat att ingen av de tidigare föreslagna flödesfaktorerna på ett riktigt sätt kunnat ta hänsyn till filterdimensionen och flödessituationen i jorden. Senare studier med finita elementanalyser har givit formfaktorer som givit mer samstämmiga försöksresultat, oberoende av filterdimensionerna, (t ex Tavenas et al [89], Fig. 31).

Försök med "constant head" utförs som regel med hjälp av en så kallad "Mariottes flaska". Denna flaska kopplas via en plastslang till filtret, alternativt permeameter. Filtret är som regel en vanlig portrycksmätare för öppet system, där trycket efter neddrivningen först får stabiliseras och portrycket sedan avläses via vattenytan i plastslangen. Plastslangen vattenfylls sedan och ansluts till flaskan och vattenflödet mot tiden studeras. Permeabiliteten utvärderas sedan flödet stabiliserats direkt ur

$$k = \frac{q}{F \cdot h}$$

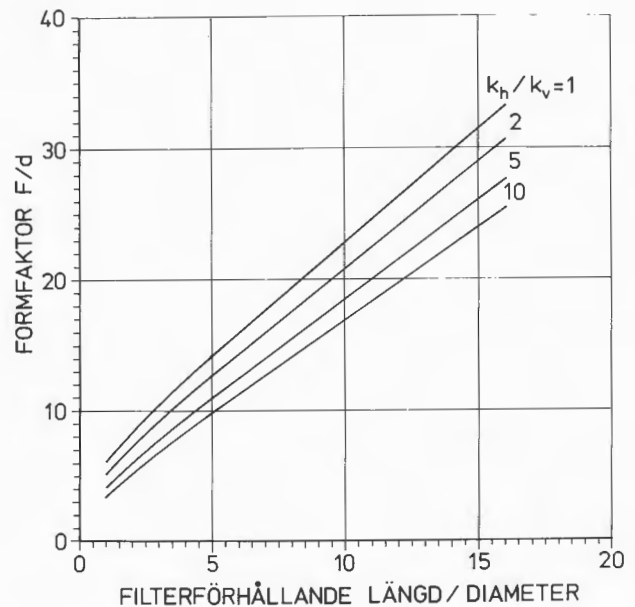


Fig. 31. Flödesfaktorer enligt FEM-analys.

$k_h/k_v$  = horisontell permeabilitet/vertikal permeabilitet

Från M. Diene, Université Laval, Quebec. Personlig komm.

De teorier som utvecklats för att ta hänsyn till jordens kompressibilitet antyder att det konstanta flödet efter oändlig tid skulle kunna utvärderas genom att redovisa flödet som funktion av  $1/\sqrt{t}$ . Med tanke på den osäkerhet som råder om alla teorier är det ofta bättre att minska tendensen till volymändring genom att hålla gradienten låg och invänta att det stabila flödet erhålls.

Försök med "variable head" kan också utföras i permeametrar och filterspetsar för portrycksmätning med öppet system. Efter neddrivning och efter det att vattenytan i plastslangen stabiliserats skapas en tryckskillnad genom att vattenytan i slangen höjs eller sänks. Vattenytans förändring mot tiden studeras sedan. Permeabiliteten utvärderas sedan ur

$$k = \frac{A}{F} \cdot \frac{\ln(h_1/h_2)}{(t_2 - t_1)}$$

där  $A$  = plastslangens tvärsnittsarea

$h_1$  = tryckhöjd vid tiden  $t_1$

$h_2$  = tryckhöjd vid tiden  $t_2$

I detta fall är tryckvariationerna i jorden betydligt mer komplicerade och det är ännu mer väsentligt att begränsa tryckskillnaderna.

Vid båda typerna av mätning uppstår problem om det finns gas i jorden och systemet. Teorierna förutsätter att jord och vätska är inkompressibla, vilket inte är fallet om det finns gas i porerna. Gasbubblor i filter och slangar påverkar nollmätningen av initieellt portryck, liksom mätningen av vattenflödet.

Ett nytt mätsystem för mätning av portryck och permeabilitet samt provtagning av porvatten har utvecklats av BAT [90]. I detta system drivs en vattenmättad filterspets ned i jorden. Vattentrycket i spetsen verkar mot ett tättslutande gummimembran, Fig.32.

Detta gummimembran kan penetreras med en injektionsnål och försluter åter tätt om nålen dras ut. Trycket kan mätas genom att en tryckmätare ansluten till en injektionsnål sänks ned till spetsen. Då nålen penetrerar gummimembranet uppstår kontakt mellan porvattenet och tryckmätaren. Då båda systemen är vattenmättade och volymändringen på grund av nålens inträngning är mycket liten blir utjämnningstiden innan trycket kan mätas kort. Tryckmätaren kan sedan dras upp och anslutas till en behållare som är försedd med motsvarande gummimembran som filterspetsen. Trycket i behållaren avpassas så att en mindre tryckskillnad i förhållande till uppmätt porvattentryck erhålls. Vid försök med vatteninströmning innehåller behållaren endast luft eller annan gas, medan den är delvis vattenfylld vid ut-

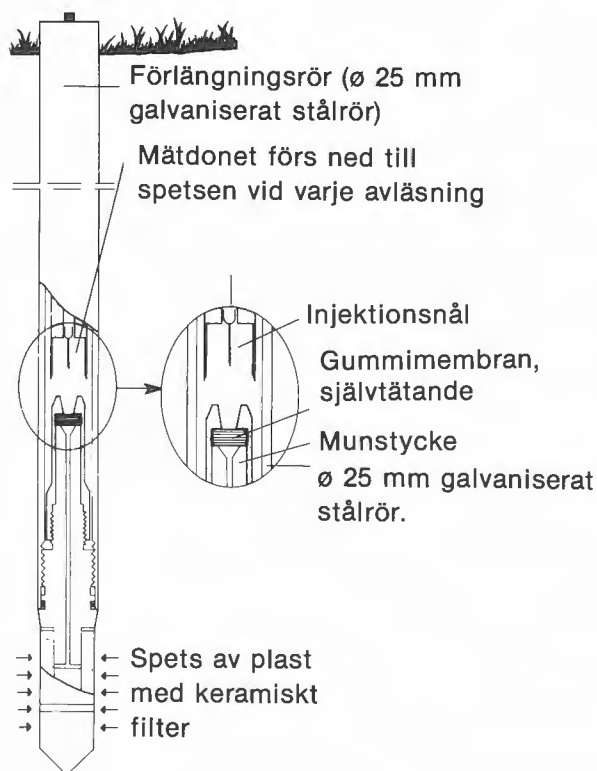


Fig. 32. Principskiss för BAT-systemet, [90].

strömningsförsök. Tryckmätare och behållare sänks ned till en nivå strax ovan filterspetsen, där temperaturen i systemet får utjämnas till jordtemperaturen på nivån. Detta kontrolleras genom att studera tryckutjämnningen. Därefter sänks systemet ned så att det kommer i kontakt med filterspetsen, Figur 4. När en dubbelsidig injektionsnål penetrerar membranet i såväl filterspetsen som behållaren startar ett permeabilitetsförsök enligt "variable head", och tryckets variation med tiden avläses. Genom att kombinera Hvorslevs flödesekvation med allmänna gaslagen erhålls permeabiliteten  $k$  ur

$$k = \frac{P_0 \cdot V_0}{F \cdot t} \left[ \frac{1}{P_1 \cdot P_0} - \frac{1}{P_1 \cdot P_t} + \frac{1}{P_1^2} \ln \left( \frac{P_0 - P_1}{P_0} \cdot \frac{P_t}{P_t - P_1} \right) \right]$$

där  $P_1$  = initieellt porvattentryck

$P_0$  = initieellt gastryck i behållaren

$V_0$  = initieell gasvolym i behållaren

$P$  = avläst tryck i behållaren vid tiden  $t$

Alla tryck är absoluta tryck uttryckta i enheten meter vattenpelare. Temperaturen förutsätts vara konstant.

Till BAT-systemets fördelar hör att tiden för portrycksutjämning efter installation är relativt kort, då inget vatten behöver strömma in i eller ut ur spetsen för att mätsystemet skall komma i balans. Under neddrivningen kan dessutom portrycksmätaren vara inkopplad varvid spetsen fungerar som en portryckssond. Genom att studera de genererade portrycken kan man då kontrollera att filtret placeras i det skikt man avsett. Tryckavläsningen är enkel och risken för att gasbubblor i systemet påverkar tryckavläsningen är eliminerade. Problemet med eventuell gas i jordens porer kvarstår dock. Förekomsten av gas i porerna kan kontrolleras vid inströmningsförsök. Efter försöket tas behållaren upp och man kontrollerar att den vätskemängd som strömmat in i behållaren motsvarar den ur tryckmätningen teoretiskt beräknade. Systemet kan också användas för ren provtagning på porvattnet. I detta fall används som regel förpreparerade behållare som evakuerats till vakuum för att få en stor provmängd som förblir kemiskt opåverkad, Fig.33.

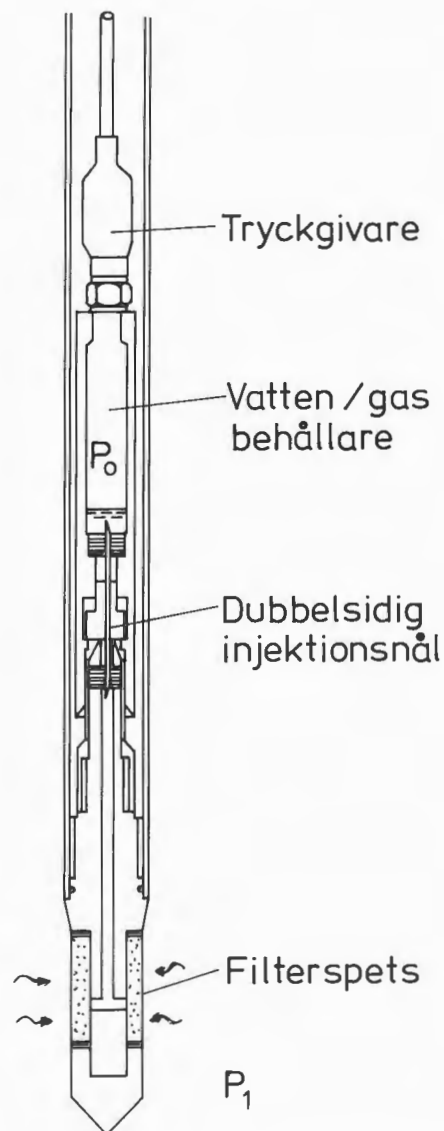


Fig. 33. Permeabilitetsmätning med BAT-systemet, [90].

BAT-systemet kan också användas som ett öppet system. I detta fall sänks en vattenfylld plastslang som är försedd med en injektionsnål i nederänden ned till filterspetsen efter installation och tryckutjämning. BAT-systemets fördelar vid installation och nollavläsning kan då utnyttjas och risken för gasbubblor i mätsystemet kan elimineras.

Jämförande undersökningar mellan de olika mätsystemen, mellan spetsar med olika utformning, mellan drivna spetsar och självborrande permeametrar och mellan fält- och laboratorievärden har

rapporterats av Carlsten och Eskilsson [83], Tavenas et al [82,89] och Tremblay och Eriksson [84].

Tavenas et al [82] visade att omröringseffekter vid nedpressning av spetsar i sprickig och varvig jord kan nedsätta den mätta permeabiliteten avsevärt. Man tyckte sig också finna stora igensättningseffekter i filtren på drivna spetsar. Motsvarande effekter har inte funnits vid försök i Sverige [83,84]. Mycket av dessa effekter har också visat sig bero på felaktiga flödesfaktorer (Tavenas et al [89]).

Tremblay och Eriksson [84] jämförde inströmnings- och utströmningsförsök och fann att inom de tryckskillnader som användes (+15 kPa till -15 kPa) hade flödesriktningen ingen inverkan på resultaten.

Jämförelser mellan "constant head"- och "variable head" försök har utförts av Tavenas et al [82,89] samt Tremblay och Eriksson [84]. I den senare undersökningen fann man att "constant head" försöken statistiskt gav en permeabilitet som var ca 20% högre än vid försöken med "variable head".

Motsvarande förhållanden kan återfinnas i Tavenas et al [89].

Detta förhållande kan endast förklaras genom att de antaganden om vattenflödet i jorden som ligger till grund för utvärderingen ej är helt korrekta. Den jordvolym som involveras för tryckutjämning vid de två typerna av försök är helt olika och stämmer inte flödesantagandena helt kan sådana här skillnader uppstå, Fig.34.

Andra avvikelser mellan teoretiskt beräknat vattenflöde och uppmätta effekter har uppmätts av Carlsten och Eskilsson [83] i samband med förstärkta "heavy duty" filter där filtret inneslutits i en metallhylsa som perforer-

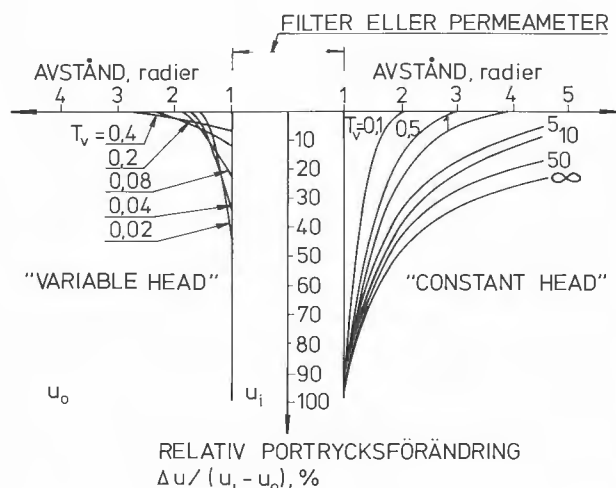


Fig. 34. Variation av portrycksfördelningen med tiden i försök med "variable head" respektive "constant head", [85].

rats med ett stort antal jämnt fördelade genomborrade hål. Teoretiskt skulle hålens distribution och storlek ha en mycket liten inverkan på resultaten men man fann att arean på perforeringshålen måste räknas om till en fiktiv filterlängd för att överensstämmelse i mätningarna skulle erhållas. Resultaten från denna typ av spetsar avviker också från resultaten från vanliga filterspetsar vid högre permeabiliteter i silt [84].

Den övre gränsen för permeabilitet som praktiskt kan mätas med vanliga filterspetsar har befunnits vara i storleken  $10^{-7}$  m/s [84].

Jämförelser mellan permeabilitetsförsök i fält och laboratoriebestämda permeabilitetsvärden har visat en relativt god överensstämmelse i homogena jordar. Spridningen i de jämförande resultaten är dock för stor för att man skall kunna göra en värdering av huruvida "constant head"- eller "variable head" försöken är mest rättvisande. Skillnaden mellan resultaten i de senare försökstyperna är endast cirka 20%.

## 7.2 SAMMANFATTNING

Permeabilitetsförsök i fält kan utföras med relativt god noggrannhet. Stora framsteg har gjorts under senare år vid bestämning av permeabiliteten i finkorniga jordar i fält. Detta gäller såväl utrustningar som den teoretiska utvärderingen. Utvärderingen har dock fortfarande vissa brister. Försök med konstant gradient och varierande gradient kan ge något olika resultat och ett antagande måste göras om förhållandet mellan vertikal och horisontell permeabilitet. Empiriskt har det visat sig att rimliga värden ofta erhålls i vanliga nedpressade filterspetsar. Dessa bör dock vara utan perforerad skyddshylsa. Den pålagda gradienten bör vara låg och tryckskillnaden skall helst inte vara större än  $\pm 15$  kPa. Detta kan vara svårt att uppfylla med konstant gradient om grundvattenytan är låg.

Inverkan av gradienten varierar mellan olika jordar men större tryckskillnader bör undvikas utom i mycket tät och fast jord. Den övre gränsen för permeabilitet som praktiskt kan bestämmas med vanliga drivna filterspetsar är i storleksordningen  $10^{-7}$  m/s, vilket ungefär motsvarar gränsen mellan sedimenten grovsilt och mellansilt.

## 8. METODER FÖR HORISONTALTRYCKSMÄTNING

Förutom de metoder där horisontaltrycket är en av de parametrar som utvärderas (pressometer och dilatometer) har ett antal specialmetoder utvecklats enkom för mätning av detta tryck.

### 8.1 HYDRAULISK SPRÄCKNING

Metoden går ut på att pumpa in en vätska i jorden så hastigt att ingen större dränering hinner ske och under så högt

tryck att jorden spräcks upp. För mätning av horisontaltrycket är metoden således begränsad till relativt täta jordar där horisontaltrycket är den minsta huvudspänningen. Den har främst använts i berg och lera.

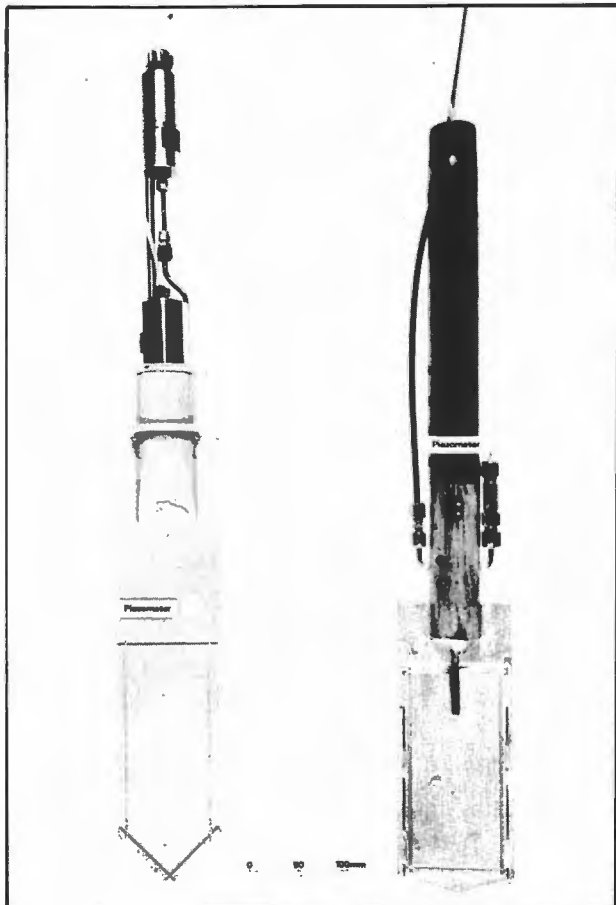
I lera tillgår försöket så att en filterspets för portrycksmätning med öppet system installeras och trycken får därefter stabiliseras. Plastslangen från filtret kopplas sedan till en vattenreservoar varifrån vattnet kontrollerat pressas ut genom filtret varvid vattentrycket avläses på en kvicksilvermanometer. Då en spricka öppnas i jorden förblir trycket oförändrat vid vidare vatteninpressning. Efter att en större spricka öppnats stoppas vatteninpressningen och kvicksilvermanometern studeras. Så länge sprickan står öppen är vattenflödet ut ur filtret relativt snabbt och trycket sjunker hastigt. Då vattentrycket i sprickan blir lägre än horisontaltrycket i jorden slutar sprickan och vattenflödet minskar markant. Horisontaltrycket utvärderas ur den uppritade tryck-flödeskurvan.

I början av 70-talet rapporterades mycket goda resultat med metoden i lös lera i Norge [91]. De närmaste åren undersöktes den ingående i Sverige [92] och Kanada [93] men med mindre lyckade resultat. Spridningen i försöksresultat var avsevärd och de svenska försöken med hydraulisk spräckning gav betydligt högre värden på horisontaltrycket än övriga metoder. De uppmätta värdena motsvarade i många fall snarare rådande överlagringstryck än förväntade värden på horisontaltrycket. Samtidigt testades mätning av horisontaltrycket med jordtrycksdosor, vilka såväl i Kanada som Sverige gav betydligt bättre resultat. Efter 1975 har metoden att mäta horisontaltryck i lera genom hydraulisk spräckning veterligt inte använts i Sverige.



## 8.2 JORDTRYCKSDOSOR

Sedan slutet av sextiotalet har jordtrycksdosor använts för att mäta horisontaltrycket i jord. Jordtrycksdosorna består som regel av två parallella och i kanterna ihopsvetsade tunna plåtar. Mellanrummet mellan plåtarna är fyllt med olja. Oljan i cellen står i kontakt med ena sidan av ett membran som sluter en mottrycksledning, Fig.35.

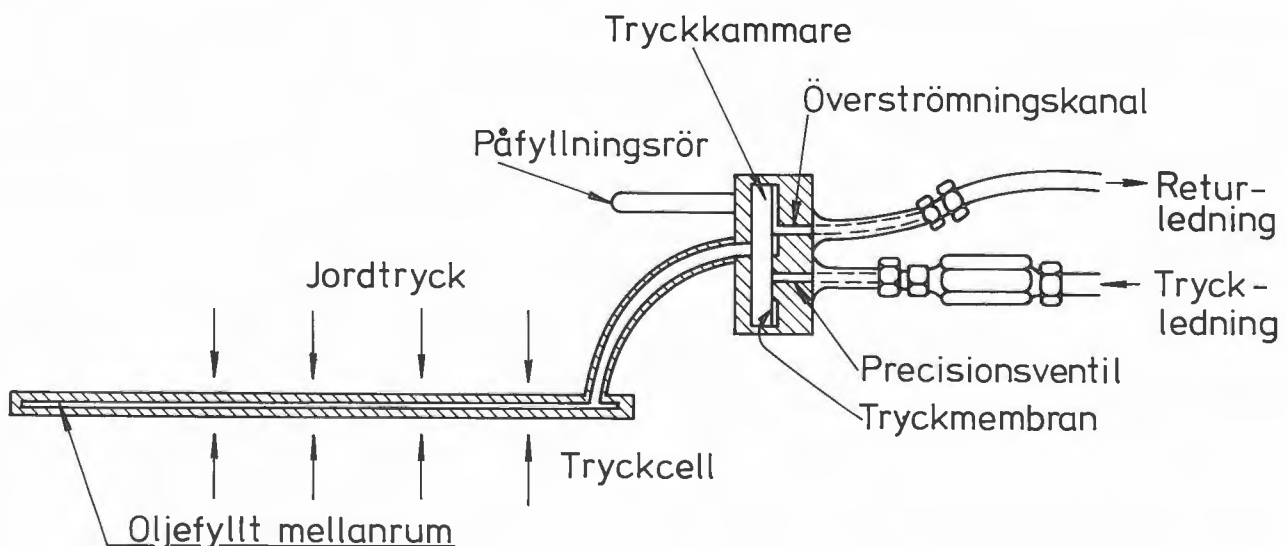


Jordtrycksdosorna utformas så att tjockleken är liten i förhållande till höjd och bredd. Specialmodeller för mätning i naturlig jord utformas ofta så att de liknar en spade. Dosorna trycks ned i jorden och lämnas sedan under tillräckligt lång tid för att spänningsändringarna vid installationen skall utjämnas. Tryckmätningen sker genom att trycket i mottrycksledningen ökas. När detta tryck blir större än trycket i dosan lyfter membranet och tryckmediet kan strömma igenom till returledningen.

Kravet på att jordtrycksdosan skall vara tunn gör att den samtidigt är vek varför användningen begränsas till fin-korniga och inte alltför fasta jordar. Även om dosorna görs tunna kvarstår en viss risk för inspänningseffekter också efter spänningsrelaxation.

Metoden har provats bland annat i Frankrike [94], England [95], Kanada [93] och Sverige [92]. I lösa leror har värdena visat sig repeterbara och i förväntad storleksordning. En jämförelse mellan horisontaltryck mätta med självborrande pressometer och jordtrycksdosor i Göteborgslera gav i stort sett identiska resultat [96]. Senare

Fig. 35. Jordtrycksdosor och mätprincip för Glötzldosa.



undersökningar i slänter har som resultat givit mycket rimliga horisontaltrycksfördelningar i slänternas olika delar [97].

På senare tid har man utomlands försökt använda metoden också i mycket fasta leror [95]. Erfarenheten har visat att i fasta leror med en odränerad skjuvhållfasthet av mer än 30 kPa blir det uppmätta värdet blir något för högt. Med jordtrycksdosor av normala dimensioner (längd 200 mm, bredd 100 mm och tjocklek 5 mm) kan man grovt räkna med att horisontaltrycket överskattas med halva skjuvhållfastheten

$$\sigma_H = \sigma_{H_{DOSA}} - \tau_{fu}/2 \quad \text{då } \tau_{fu} \geq 30 \text{ kPa}$$

Mätning med jordtrycksdosor tar relativt lång tid. Spänningsrelaxationen innan man kan mäta ett stabilt värde tar normalt mellan 1 vecka och 1 månad. Dessutom måste porvattentrycket mätas på den aktuella nivån. Jordtrycksdosorna är som regel temperaturkänsliga och det obelastade inspänningstrycket måste bestämmas vid jordtemperaturen.

### 8.3 IOWA STEPPED BLADE

Detta instrument består av fyra totaltrycksdosor med stegvis ökande tjocklek monterade ovanför varandra, Fig.36.

Instrumentet fungerar i princip som jordtrycksdosan, men tanken är att man skall slippa de långa väntetiderna för spänningsrelaxation. Man antar att horisontaltryckssökningen efter neddrivningen står i proportion till tjockleken på dosan. De mätta horisontaltrycken plottas i logskala mot tjockleken på det stegade bladet vid motsvarande mätpunkt. Sambandet mellan tryck och tjocklek extrapoleras sedan till tjockleken noll och motsvarande tryck utvärderas. I praktiken har det visat sig att man sällan får fyra punkter på en rät linje. Bland annat överskrids

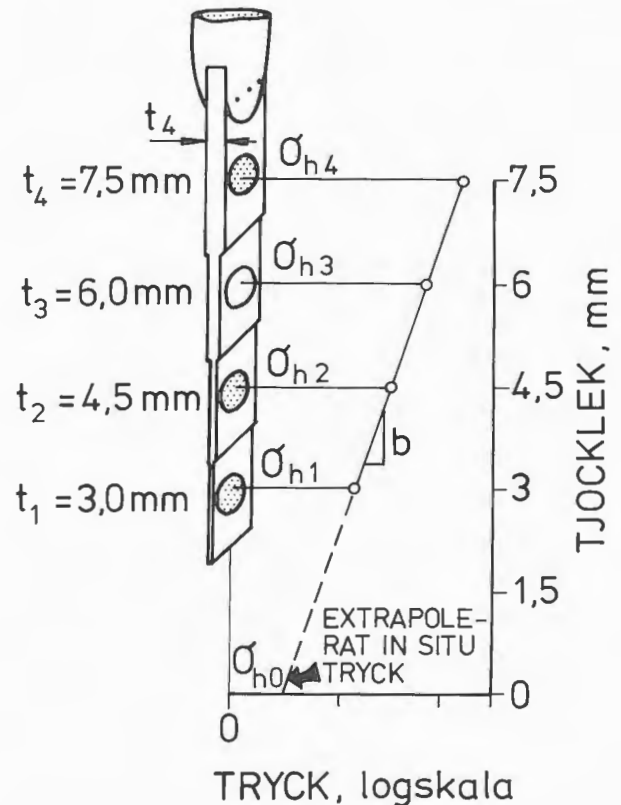


Fig. 36. Mätprincip för "Iowa Stepped Blade".

gränstrycket för plasticering redan vid en måttlig tjocklek av tryckdosan. Tolkningen kan därför bli mycket subjektiv. Det är också tveksamt om det tryck som extrapolerats fram vid tjockleken noll motsvarar horisontaltrycket i jorden. Andra störningseffekter än den horisontella förskjutningen av jorden kan inverka och det är osäkert hur pass tillämpligt det teoretiska underlaget är.

Ett antal artiklar om metoden har presenterats från Iowa State University [98], men metoden har hittills inte fått någon större spridning eller acceptans på annat håll.

### 9. SKJUVFÖRSÖK I BORRHÅL

En utrustning för mätning av hållfasthetsparametrarna  $c'$  och  $\phi'$  i förborrade hål, "the borehole shear device", introducerades av Handy och Fox 1967 [99]. Utrustningen består av ett ex-

panderbart skjuvhuvud, tryckutrustning för expansion och uppdragningsutrustning för skjuvning, Fig.37.

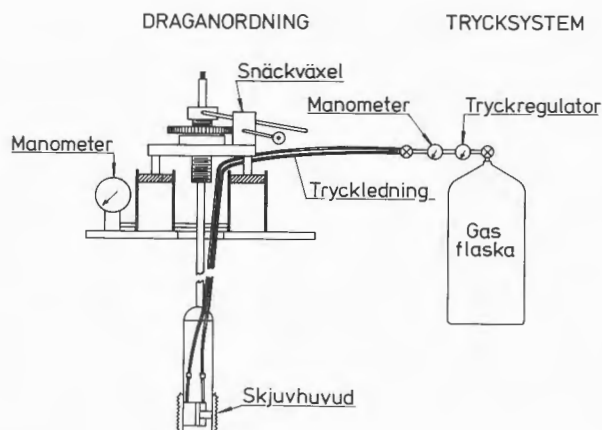


Fig. 37. Utrustning för skjuvförsök i borrhål, [97].

Skjuvhuvudet består av två böjda skjuvplattor monterade på var sin sida av en gasdriven tryckkolv. Skjuvplattorna är försedda med horisontella kammar eller eggar som trycks in i jorden för att säkerställa full vidhäftning mellan skjuvhuvud och jord. Skjuvplattorna är försedda med en gemensam dragbygel som i sin tur monteras på dragstängerna.

Vid provningen sänks skjuvhuvudet ned till provningsnivån i förborrade hål. Skjuvplattorna pressas ut mot hålsidorna genom att ett gastryck appliceras i kolven. Efter en kortare väntetid, cirka 10 minuter, sker sedan skjuvningen genom att skjuvhuvudet dras upp med en konstant hastighet av 0,05 mm/s. Dragkraften registreras kontinuerligt. När brott inträffat stoppas uppdragningen och gastrycket ökas. Efter en ny väntetid av cirka 5 minuter utförs en ny skjuvning till brott. Försöket pågår normalt på detta vis, med stegvis ökning av trycket och nya skjuvförsök, tills erforderligt antal punkter erhållits för att definiera sambandet mellan normalspänning och skjuvkraft inom aktuellt spänningsområde.

Utrustningen för själva skjuvförsöket är mycket enkel. Den opereras manuellt, ryms i en låda 0,9x0,4x0,2 m och är bärbar. Håltagningen är mera komplicerad. För håltagning används i princip samma utrustning som vid håltagning för Menard-pessometern. Utrustningen är i standardversionen avpassad för borrhål med diametern 75 mm. De pålagda normaltrycken är normalt i storleken 25-125 kPa.

Utrustningen uppges vara användbar i alla material från lera till sand. Det torde dock bara vara i sand och silt utan lerinnehåll, där försöken med säkerhet är fullt dränerade, som en meningsfull tolkning av resultaten kan göras.

Då mätningen sker i en zon nära hålväggen påverkar hålkvaliteten resultaten. I fast lagrad jord underskattas hållfastheten. Dilatans- och cementerings-effekter går åtminstone delvis förloerade vid håltagningen. Efter det första skjuvförsöket är de uttraderade och efterföljande stegvisa försök med högre tryck sker i en jord som redan skjuvats till brott. I lösa och medelfasta jordar är motsvarande effekter mindre. Pressas tryckplattorna för långt in i hålväggarna kan fel i mätningarna uppstå på grund av ökad bärighet i plattornas överkanter.

Försöket är, med sina brister den enda metoden varmed man kan uppskatta parametrarna  $c'$  och  $\phi'$  in situ. Det är inget vanligt försök men har fått en viss spridning främst inom USA. Försöket och utrustningen är tämligen enkla. Provning på en nivå kan normalt utföras på mindre än en timma. Metoden kräver dock förborring av ett hål med mycket god kvalitet på borrhålsväggarna.

## 10. ANVÄNDBARHET FÖR DE NYARE IN SITU METODERNA

De flesta in situ metoderna har utvecklats för ett, eller ibland flera, bestämda syften. Ofta har man också med olika empiriska samband försökt utvidga användbarheten för de olika utrustningarna till bestämning av parametrar som de inte primärt varit avsedda för. Av olika anledningar har detta lyckats mer eller mindre väl.

Vidstående diagram är avsett som en guide för användbarheten av de här beskrivna utrustningarna. Guiden gäller för nuvarande kunskaper, normala utrustningar och då kostnaderna hålls på en rimlig nivå. För att komplettera bilden har också den beprövade vingsonden och alternativet med provtagning och laboratorieprovning medtagits. Också i det senare fallet gäller att det är någorlunda normala förfaranden som avses. Man kan till exempel ta kontinuerliga prover med folieprovtagare eller parallella överlappande kolvborrhål för bestämning av jordlagerföljd. Detta är dock mycket dyrt och används nästan utestutande i forskningssyfte.

Av guiden framgår att det inte finns någon in situ metod som kan användas för bestämning av kompressionsegenskaperna i lös lera och därmed ersätta provtagning och ödometerförsök. Inte heller finns det någon in situ metod som idag ger säkrare värden på den odränerade skjuvhållfastheten i lös lera än vingsonering eller laboratorieförsök.

Å andra sidan finns det en rad parametrar som i olika jordar med olika metoder kan bestämmas översiktligt och som komplement till laboratorieförsök. I många fall är in situ metoderna klart bättre än provtagning och laboratorieförsök.

Någon generell metod att bedöma lagerföljd och egenskaper i jorden finns

inte. Den metod som kommer närmast detta, och som allt fler förespråkar, är kombinationen av spetstryck- portrycksondering och dilatometerförsök. Båda dessa metoder är relativt enkla och snabba och nära nog kontinuerliga. Tillsammans ger de en mycket detaljerad bild av jordens lagerföljd och en god klassificering av jorden i de olika lagren kan dessutom göras. Man får en grov uppskattning av jordens skjuvhållfasthet och överkonsolideringsgrad liksom lagringstäthet och horisontaltryck. Deformationsegenskaperna i sand och fast lera kan uppskattas och en god bestämning av friktionsvinkeln i sand kan göras. Dessutom kan de speciella beräkningsmetoder för sättning och bärighet i normalkonsoliderad sand som utvecklats för resultat från spetstrycksondering utnyttjas.

Den enskilda metod som är bäst för bedömning av jordlagerföljd är kombinerad spetstrycks- portryckssondering medan dilatometerförsöket verkar ge en något bättre klassificering av jorden.

För många enskilda parametrar och för beräkning av sättningar och bärighet finns dock betydligt bättre eller mera beprövade metoder än spetstryck- portryckssondering och dilatometerförsök. Dessa är dock generellt mera kostnadskrävande.

Bestämning av odränerad skjuvhållfasthet i fasta och eventuellt sprickiga leror utförs på grund av skaleffekter bäst med olika typer av plattförsök. Dessa är också de enda försök med vilka man i vissa fall kan mäta förkonsolideringstryck i friktionsjord direkt i fält.

För att uppskatta de effektiva hållfasthetsparameterna  $c'$  och  $\phi'$  i fält erfordras skjuvförsök i borrhål.

METOD	PARAMETER																			
	JORDARTSKLASSIFICERING	JORDLAGERFÖLJD	ODRÄNERAD SKJUVHÅLLFASTHET FAST LERA	ODRÄNERAD SKJUVHÅLLFASTHET LÖS LERA	FÖRKONSOLIDERINGSTRYCK OCH ÖVERKONSOLIDERINGSGRAD, LERA	FÖRKONSOLIDERINGSTRYCK OCH ÖVERKONSOLIDERINGSGRAD, SAND	FRIKTIONSVINKEL I SAND	HÅLLFASTHETSPARAMETRARNA C OCH $\phi$ , SILT SAND O FAST LERA	LAGRINGSTÄTHET	HORIZONTALTRYCK	PERMEABILITET	"KONSOLIDERINGSKOEFFICIENT"	ELASTICITETSMODUL I SAND	ODRÄNERAD ELASTICITETS-MODUL I LERA	SKJUVMODUL	KOMPRESSIBILITET I SAND	KOMPRESSIBILITET I FAST LERA	KOMPRESSIBILITET I LÖS LERA	PARAMETRAR FÖR SÄTTNINGSBERÄKNING MED SPECIALMETOD	PARAMETRAR FÖR BÄRIGHETSBERÄKNING MED SPECIALMETOD
SPETSTRYCKSONDERING	+	●	+	+	-	-	●	-	●	-	-	-	+	-	+	-	-	-	●	●
PORTRYCKSONDERING	+	●	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
KOMBINERAD SPETSTRYCK-PORTRYCKSONDERING	●	●	●	●	+	-	●	-	●	-	-	+	+	-	+	-	-	-	●	●
AKUSTISK SONDERING	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SKJUVVÄGSMÄTNING VID SONDERING	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	●	-	-	-	-	-
DILATOMETERFÖRSÖK	●	●	+	+	●	●	+	-	-	●	-	-	●	●	-	●	●	-	-	-
KOMBINERAD SPETSTRYCK-PORTRYCKSONDERING OCH DILATOMETERFÖRSÖK	●	●	●	●	●	●	●	-	●	●	-	+	+	●	+	+	+	-	●	●
PRESSOMETERFÖRSÖK ENLIGT MENARD	-	-	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	●	●
SJÄLVBORRANDE PRESSOMETERFÖRSÖK	-	-	-	-	-	-	●	-	-	●	-	-	+	+	+	+	+	-	●	●
PUSH-IN PRESSOMETER	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	●
FULL-DISPLACEMENT PRESSOMETER	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	●
PLATTFÖRSÖK	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	+	●	+	●	+	●	●	-	●	-
SKRUVPLATTEFÖRSÖK	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	+	●	+	●	+	●	●	-	●	-
PERMEABILITETSFÖRSÖK I FILTERSPETSAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SJÄLVBORRANDE PERMEAMETER	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RESISTIVITETSSOND	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SKJUVFÖRSÖK I BORRHÅL	-	-	-	-	-	-	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HYDRAULISK SPRÄCKNING	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
JORDTRYCKSDOSOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IOWA STEPPED BLADE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VINGSONDERING	-	-	●	●	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PROVTAGNING OCH LABORATORIEFÖRSÖK	●	●	●	●	●	-	●	●	●	+	●	●	●	●	●	●	●	●	●	-

+

➔ Speciell beräkningsmetod finns

- En grov uppskattning kan göras, alternativt god men med stor begränsning av användningsområdet
- En uppskattning kan göras, alternativt god men med begränsning av användningsområdet
- En god uppskattning kan göras, men med en viss begränsning av användningsområdet
- En god uppskattning kan göras

För en noggrann bestämning av lagringstätheten i sand erfordras resistivitetssondering. (Olika nukleära metoder har uteslutits ur denna studie bland annat på grund av arbetarskydds- och miljöskäl men också på grund av begränsade erfarenheter i naturliga jordar).

För horisontaltrycksmätning finns två väl fungerande metoder. Dels finns den relativt enkla och billiga jordtrycksdosan vars användning dock är begränsad till mycket finkorniga jordar. Dels finns den avsevärt mycket dyrare självborrande pressometern. Denna kan användas i alla jordar upp till och med sandfraktionen. Resultaten är mycket pålitliga i leror. I grövre jordar minskar noggrannheten men metoden är relativt sett helt överlägsen andra metoder.

Permeabilitetsmätning kan i homogena jordar ofta utföras med gott resultat genom försök i nedpressade filterspetsar. Speciellt i mycket varvig, skiktad eller sprickig jord kan försök med självborrande permeameter behöva tillgripas.

Konsolideringskoefficienter med någon verklig användbarhet kan bara uppmätas genom någon typ av plattförsök i silt, sand och överkonsoliderad lera.

Elasticitetsmodulen i sand uppskattas med fördel genom dilatometerförsök, medan motsvarande bestämning i lera kan göras genom någon typ av plattförsök. Speciellt för starkt överkonsoliderade jordar kan motsvarande moduler bestämmas med cyklisk belastning i olika typer av pressometerförsök.

Skjuvmodulen mäts arbetsmässigt rationellt och med relativt god noggrannhet genom skjuvvågsmätning vid sondering. Alternativet är speciella mätningar med cross-hole teknik. De senare behandlas dock inte i denna skrift.

Kompressibiliteten i silt, sand och fast överkonsoliderad lera mäts bäst genom olika typer av plattförsök. Med större erfarenhetsunderlag kan dilatometern bli ett likvärdigt alternativ. Någon metod att mäta kompressibiliteten i lös och normalkonsoliderad lera i fält finns som nämnts inte.

Ett av huvudsyftena med geotekniska undersökningar är att få underlag för bedömning av bärighet, sättningar och andra deformationer. De flesta av in situ metoderna mäter inte några basmoduler eller hållfasthetsparametrar som direkt kan sättas in i gängse beräkningsmetoder. I stället sätts de mätta parametrarna in i empiriska eller halvempiriska beräkningsmodeller som utarbetats för provningsmetoden.


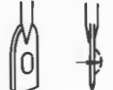


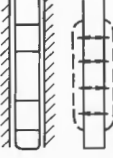
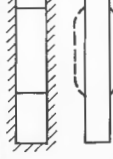
Bedömningen av en methods användbarhet bör därför oftast baseras på med vilken noggrannhet man kan uppskatta deformationer och brottlaster snarare än om enskilda basparametrar kan bestämmas.

De olika in situ metoder som vanligen används för bestämning av brottlaster och deformationer vid statiska laster redovisas speciellt i vidstående diagram. Här görs också en relativ bedömning av metodernas svårighetsgrad, kostnad, den erfarenhet som finns och med vilken noggrannhet beräkningarna enligt dessa erfarenheter kan utföras.

Värderingar av detta slag kan variera något beroende på personliga erfarenheter. Det är sällsynt att enstaka personer eller institutioner har någon större erfarenhet av samtliga dessa metoder.

## 11. PRIMÄRT FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGSBEHOV I SVERIGE

De nya in situ metoderna, kombinerad spetstryck-portrycks-sondering och dilatometerförsök, har visat sig mycket an-

Metod	Princip	Svårighetsgrad	Kostnad	Typ av jord	Huvudsakligt användningsområde	Andra användningsområden	Erfarenhet	Nöjgr
Spetstrycksondering		Enkel	Låg	Sand	Bärighet av plattor och pålar Sättningar i "normal-konsoliderad" sand		Stor Stor	God Varierande
Dilatometer		Enkel	Låg	Överkonsoliderad lera Silt Sand	Sättningar	Beräkning av horisontaldeformationer i pålar	Liten - Begränsad	God
Skruvplatteförsök		Enkel	Medel u. foderrör Hög med foderrör	Lera Silt Sand	Bärighet i finkorniga jordar Sättningar under utbredda laster i överkonsoliderad lera och grövre jord		Stor Stor	God God
Plattförsök (modellskala)		MEDELSVÅR	Högytligt Mycket hög på djup	Alla		Sättningar under grundsulor	Begränsad	Begränsad
Menard pressometer		Komplicerad	Hög	Överkonsoliderad lera Silt Sand Grus Morän	Bärighet av plattor och pålar Sättningar under grundsulor Vertikal och horisontaldeformationer i pålar		Mycket stor	God
Självborrande pressometer		Mycket komplicerad	Mycket Hög	Överkonsoliderad lera Silt Sand			Begränsad	Varierande

*Metoder för bestämning av brottlaster och deformationer vid statiska laster.*

vändbara för bestämning av jordlagerföljd och klassificering. De är också relativt enkla, billiga och snabba. I underlaget för klassificeringssystemen ingår dock inga svenska jordar. För dilatometern behöver klassificeringsdiagrammen utökas för lösa och organiska jordar och för båda metoderna kan de befintliga systemen behöva modifieras.

Möjligheterna till en utökad och förbättrad tolkning av försöksresultaten förefaller goda. Utvärderingen av odränerad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från spetstryck-portrycksondering bör således studeras närmare. Detta gäller också de flesta av de empiriska relationer som föreslagits för dilatometern. Underlaget för dessa relationer behöver breddas generellt och speciellt för svenska jordar. Hittills vunna erfarenheter av sättningsberäkningar i sand och silt på basis av dilatometerförsök är goda men underlaget

är än så länge för litet för en detaljerad utvärdering av metoden.

Det är således mycket angeläget att såväl spetstryck-portryckssondering som dilatometerförsök utprovas i detalj för svenska förhållanden. Det är också angeläget att studera den utökade möjlighet till tolkning och utvärdering som erhålls genom kombination av de två metoderna. Även denna kombination är ett ekonomiskt väl konkurrensmässigt alternativ.

Också skruvplatteförsöket behöver utvecklas. Här är det främst utrustningen som behöver en robustare design. Samtidigt bör den kunna förenklas. I detta fall bör dock eventuella felkällor studeras närmare.

Även metoder för bestämning av egenskaper i fasta och grova jordar behöver utvecklas. De berörs dock ej i denna skrift.

## REFERENSER

- [1] Bergdahl, U. (1984). Geotekniska undersökningar i fält. Statens Geotekniska Institut. Information Nr.2. Linköping.
- [2] Torstensson, B-A. (1975). Pore Pressure Sounding Instrument. Proc. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties. June 1975. Raleigh N.C. ASCE, New York.
- [3] Report of the Sub-Committee on the Penetration Test for Use in Europe (1979). International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- [4] Svenska Geotekniska Föreningen (1979). Rekommenderad standard för sondering.
- [5] Wissa, A.E.Z, Martin, R.T., and Garlanger, J.E. (1975). The Piezometer Probe. Proc. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties. June 1975. Raleigh N.C. ASCE, New York.
- [6] Svenska Geotekniska Föreningen (1984). Rekommenderad standard för porttrycksondering.
- [7] Van de Graaf, H.C. and Jekel, J.W.A. (1982). New Guidelines for the Use of the Inclinator with the Cone Penetration Test. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam. Vol.2.
- [8] Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D. and Grieg, J. (1986). Use of Piezometer Cone Data. Proceedings of In Situ 86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering. Blacksburg, Virginia. ASCE, New York.
- [9] Campanella, R.G. and Robertson, P.K. (1988). Current Status of the Piezocone Test. Draft submitted for publication in Proceedings of First International Symposium on Penetration Testing. Orlando, Florida. March 1988.
- [10] Baligh, M.M. and Levadoux, J.N. (1980). Pore Pressure Dissipation After Cone Penetration. Research Report R. 80-11, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- [11] Schmertmann, J.H. (1978). Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design. Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209, Washington.
- [12] Treadwell, D.D. (1975). The Influence of Gravity, Prestress, Compressibility and Layering on Soil Resistance to Static Penetration. Ph.D.Diss. University of California, Berkeley.
- [13] Senneset, K. and Janbu, N. (1984). Shear Strength Parameters Obtained from Static Cone Penetration Tests. ASTM Special Technical Publication 883.
- [14] Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. and Hoeg, K. (1986). Use of In Situ Tests for Foundation Design on Clay. Proceedings of In Situ 86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering. Blacksburg, Virginia, ASCE, New York.
- [15] Baligh, M.M. (1975). Theory of Deep Site Static Cone Penetration Resistance. Report No R 75-76 Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- [16] Marsland, A. and Quarterman, R.S.T. (1982). Factors Affecting the Measurements and Interpretation of Quasi Static Penetration Tests in Clays. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam. Vol.2.
- [17] Mayne, P.W. (1986). CPT Indexing of In Situ OCR in Clays. Proceedings of In Situ 86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering. Blacksburg, Virginia. ASCE, New York.



- [18] Campanella, R.G., Robertson, P.K., Gillespie, D. and Grieg, J. (1985). Recent Developments in In-Situ Testing of Soils. Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco. Vol.2.
- [19] Sully, J.P. and Murria, J.M. (1987). Piezocone Testing in Lacustrine Soils. Proceedings of the Eighth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cartagena, Colombia. Vol.2.
- [20] Tavenas, F. and Leroueil, S. (1987). Laboratory and In Situ Stress-Strain-Time Behaviour of Clays: A state-of-the-art. Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City.
- [21] Battaglio, M., Bruzzi, D., Jamiolkowski, M. and Lancelotta, R. (1986). Interpretation of CPT's and CPTU's. 1st part: Undrained Penetration in Saturated Clays. Proceedings IV International Geotechnical Seminar. Singapore.
- [22] Konrad, J.M. and Law, K.T. (1987). Preconsolidation Pressure from Piezocone Tests in Marine Clays. Geotechnique, Vol. 37. No.2.
- [23] Lunne, T. and Christoffersen, J.P. (1983). Interpretation of Cone Penetrometer Data for Offshore Sands. Proceedings of the Fifteenth Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas. Okså i NGI Publikasjon Nr 156, Oslo 1985.
- [24] Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, N., Jamiolkowski, M. and Pasqualini, E. (1986). Interpretation of CPT's and CPTU's Second part: Drained Penetration of Sands. Proceedings IV International Geotechnical Seminar. Singapore.
- [25] Janbu, N. and Senneset, K. (1984). Shear Strength Parameters Obtained from Static Cone Penetration Tests. Norges Tekniske Høgskole. Geoteknikk. Meddelelse No.18.
- [26] Durgunoglu, H.T. and Mitchell, J.K. (1975). Static Penetration Resistance in Soils. Proc. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties. June 1975. Raleigh N.C. Vol.1. ASCE, New York.
- [27] Robertson, P.K. and Campanella, R.G. (1984). Guidelines for Use and Interpretation of the Electronic Cone Penetration Test. Soil Mechanics Series No 69. Department of Civil Engineering. University of British Columbia. Vancouver.
- [28] De Beer, E.E. (1967). Bearing Capacity and Settlement of Shallow Foundations on Sand. Proceedings Symposium on Bearing Capacity and Settlements of Foundations. Duke University. Lecture 3.
- [29] Meyerhof, G.G. (1965). Shallow Foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol.91. No.SM2.
- [30] Schmertmann, J.H. (1970). Static Cone to Compute Static Settlement over Sand. Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol.96. No.SM3.
- [31] Robertson, P.K. and Campanella, R.G. (1983). Interpretation of Cone Penetration Tests. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 20. No.4.
- [32] Byrne, P.M. and Eldridge, T.L. (1982). A Three Parameter Dilatant Elastic Stress - Strain Model for Sand. Civil Engineering Department. Soil Mechanics Series, No.57. University of British Columbia.

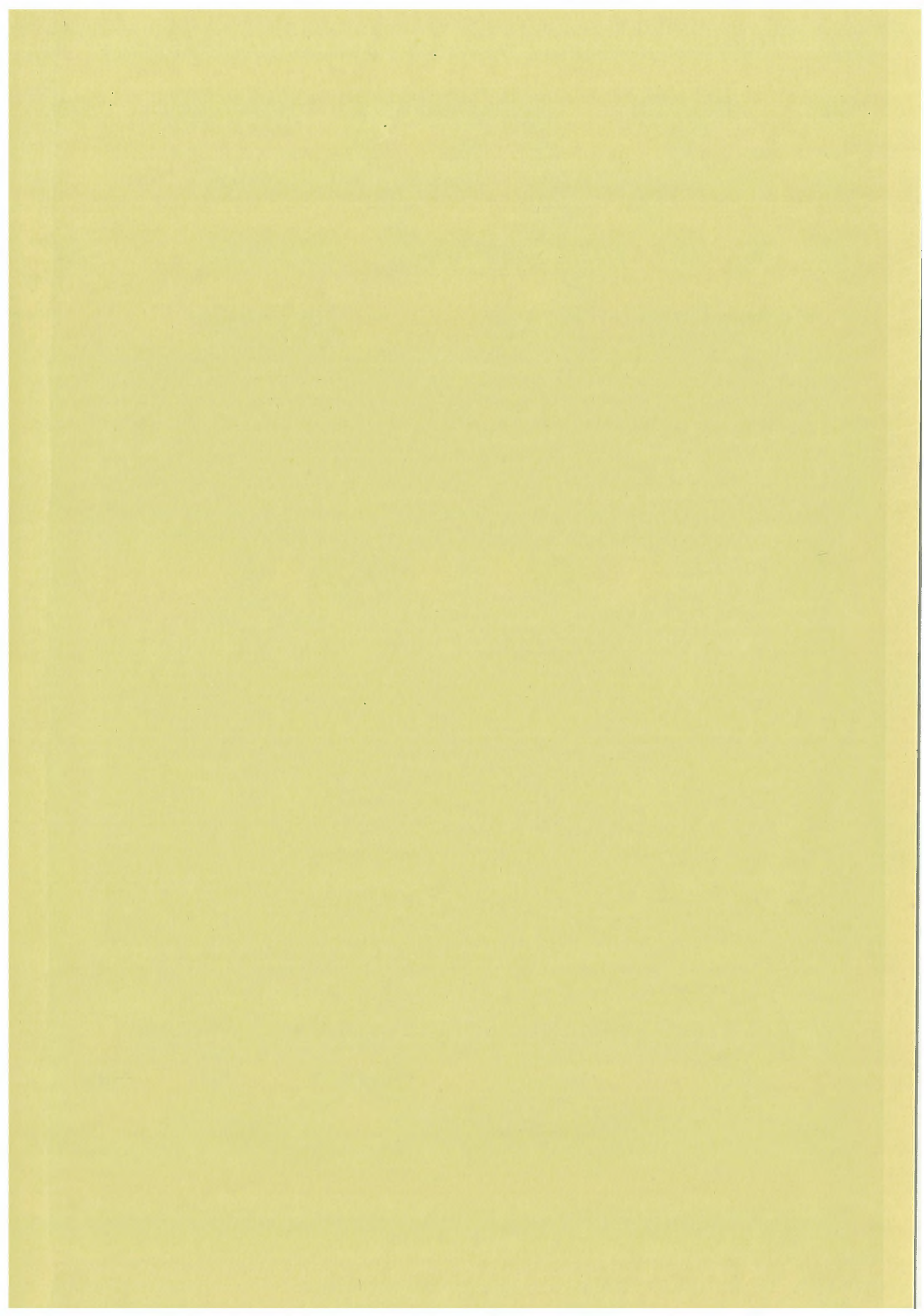
- [33] Senneset, K., Janbu, N. and Svanö, G. (1982). Strength and Deformation Parameters from Cone Penetration Tests. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam. Vol.2.
- [34] Torstensson, B-A. (1977). The Pore Pressure Probe. Foredrag fra Fjellsprengningskonferensen, Bergmekanikkdagen og Geoteknikkdagen, Oslo 1977.
- [35] Tavenas, F., Leroueil, S. and Roy, M. (1982). The Piezocone Test in Clays: Use and Limitations. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam. Vol.2.
- [36] Eskilsson, S. och Andréasson, L. (1979). Fältbestämning av konsolideringskoefficienten med porttrycksmätare. Statens Geotekniska Institut. Varia Nr.9. Linköping.
- [37] Campanella, R.G., Gillespie, D. and Robertson, P.K. (1982). Pore Pressures During Cone Penetration Testing. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam. Vol.2.
- [38] Davidsson, J.L. and Boghrat, A. (1983). Flat Dilatometer Testing in Florida. Proceedings of the International Symposium on Soil and Rock Investigation by In Situ Testing. Paris. Vol.2.
- [39] Tringale, P.T. and Mitchell, J.K. (1982). An Acoustic Cone Penetrometer for Site Investigations. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam. Vol.2.
- [40] Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. and Madshus, C. (1984). In Situ Testing: New Developments. Nordiska Geoteknikermötet i Linköping. Vol.2.
- [41] Bergdahl, U., Hult, G. och Ottosson, E. (1984). Belastningsförsök på plattor grundlagda i friktionsjord för bestämning av jords deformationsegenskaper. Försök vid SGI:s provfält. Kolbyttemon. Linköping. Statens Geotekniska Institut. Varia Nr.138. Linköping.
- [42] Bergdahl, U., Hult, G. och Ottosson, E. (1986). Belastningsförsök på plattor grundlagda i friktionsjord för bestämning av jords deformationsegenskaper. Försök vid Albysjön, Fittja. Statens Geotekniska Institut. Varia Nr. 168. Linköping.
- [43] Marchetti, S. (1975). A New In Situ Test for the Measurement of Horizontal Soil Deformability. Proc. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties. June 1975. Raleigh N.C. Vol.2. ASCE, New York.
- [44] Marchetti, S. (1980). In Situ Tests by Flat Dilatometer. Journal of the Geotechnical Division, ASCE, GT3.
- [45] Schmertmann, J.H. (1985). Dilatometer Digest No.6. July 1985. GPE Inc. Gainesville, Florida, USA.
- [46] Janbu, N. (1970). Grunnlag i geoteknikk. Tapir forlag. Trondheim.
- [47] Schmertmann, J.H. (1986). Dilatometer to Compute Foundation Settlement. Proceedings of In Situ 86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering. Blacksburg. Virginia. ASCE, New York.
- [48] Hayes, J.A. (1983). Case Histories Involving the Flat Dilatometer. Proceedings of the First International Conference on the Flat Dilatometer. Edmonton, Alberta, Canada. Feb. 1983.

- [49] Kaderabek, T.J., Barrerio, D. and Call, M.A. (1986). In Situ Tests on a Florida Peat. Proceedings of In Situ 86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering. Blacksburg, Virginia. ASCE, New York.
- [50] Lacasse, S. and Lunne, T. (1986). Dilatometer Tests in Sand. Proceedings of In Situ 86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, Virginia. ASCE, New York.
- [51] Sällfors, G. (1988). Dilatometerförsök i sand och silt. Rapport B1:1988, Inst. f. Geoteknik med grundläggning. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg.
- [52] Baldi, G., Belotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Marchetti, S. and Pasqualini, E. (1986). Flat Dialtometer Tests in Calibration Chambers. Proceedings of In Situ 86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering. Blacksburg, Virginia. ASCE, New York.
- [53] Campanella, R.G. and Robertson, P.K. (1983). Flat Plate Dilatometer Testing; Research and Development. Proceedings of the First International Conference on the Flat Plate Dilatometer. Edmonton, Alberta, Canada.1983.
- [54] Leonards, G.A. and Frost, J.D. (1987). Settlement of Shallow Foundations on Granular Soils. Paper submitted for publication to the ASCE Geotechnical Journal.
- [55] Marchetti, S. and Crapps, D.K. (1981) Flat Dilatometer Manual. GPE Inc. Gainesville, Florida, USA.
- [56] Schmertmann, J.H. (1983). Revised Procedure for Calculating  $K_0$  and OCR from DMT's with  $I_p^0 > 1.2$  and which Incorporate the Penetration Force Measurements to permit Calculating the Plane Strain Friction Angle. DMT Workshop, March. Gainesville, Florida.
- [57] Jamiolkowski, M. (1986). Oral Presentation. IV International Geotechnical Seminar Singapore.
- [58] Marchetti, S. (1985). On the Field Determination of  $K_0$  in Sand. Panel discussion. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco. Session 2A.
- [59] Baguelin, F., Jézequel, J.F. and Shields, D.H. (1978) The Pressuremeter and Foundation Engineering. Trans. Tech. Publications.
- [60] The Menard Pressuremeter (1975). Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design. Menard General Memorandum D.60. AN Sols Soils No.26-1975.
- [61] Hansbo, S. (1975). Jordmateriallära. AWE/GEBERS. Stockholm.
- [62] Schmertmann, J.H. (1975). Measurement of In Situ Shear Strength. Proc. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties. June 1975. Raleigh N.C. Vol.2. ASCE, New York.
- [63] Baguelin, F., Jézequel, J.F., Le Mee, H. and Le Mehaute, A. (1972). Expansion of Cylindrical Probes in Cohesive Soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. Vol.98, No. SM11.
- [64] Wroth, C.P. and Hughes, J.M.O. (1973). An Instrument for the In Situ Measurement of the Properties of Soft Clays. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow. Vol.1.2.

- [65] Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancelotta, R. (1985). New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils. State of the Art Report. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco. Vol.1.
- [66] Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Lacasse, S., Ladd, C.C., Lancelotta, R. and Lunne, T. (1983). Evaluation of Self-Boring Pressuremeter. International Symposium on Soil and Rock Investigations by In Situ Testing. Paris. Vol.2.
- [67] Hughes, J.M.O. and Robertson, P.K. (1985). Full Displacement Pressuremeter Testing in Sand. Canadian Geotechnical Journal, Vol.22. No.3.
- [68] Robertson, P.K., Hughes, J.M.O., Campanella, R.G. and Sy, A. (1983). Design of Laterally Loaded Piles Using a Pushed-In Pressometer. Symposium on the Design of Lateral Loading of Piles and Pile Groups. ASTM STP 835. Missouri.
- [69] Burland, J.B. (1969). The Load-Deformation Behaviour of Middle Chalk at Mundford, Norfolk. Closure. Proceedings of the Conference on In Situ Investigations in Soils and Rock. Institution of Civil Engineers, London.
- [70] Janbu, N., Bjerrum, L. og Kjærnsli, B. (1956). Veiledning ved løsning av fundamenteringsoppgaver. Norges Geotekniske Institutt. Publikasjon Nr 16. Oslo.
- [71] Kummeneje, O. (1956). Fundamentering av oljetank i Drammen. Norges Geotekniske Institutt. Publikasjon Nr.12. Oslo.
- [72] Janbu, N. og Senneset, K. (1973). Felt - Kompressometeret - prinsipper og praktisk anvendelse. Norske Sivilingeniørere Forening. Setninger i teori og praksis. (Kursdagene) NTH, Trondheim 1973. (Också på engelska i Proc 8th ICSMFE. Moskva Vol.1.1)
- [73] Selvadurai, A.P.S. and Nicholas, T.J. (1979). A Theoretical Assessment of the Screw Plate Test. 3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Aachen, Germany. Vol.3.
- [74] Berzins, W.E. and Campanella, R.G. (1981). Development of the Screw Plate Test for In Situ Determination of Soil Properties. Dept. of Civil Engineering, University of British Columbia. Soil Mechanics Series No 48.
- [75] Smith, D.M.A. (1987). Screw Plate Testing of Soft Alluvial Sediments. Perth, Western Australia. Proceedings of the 8th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cartagena, Columbia. Vol.2.
- [76] Dahlberg, R. (1975). Settlement Characteristics of Preconsolidated, Natural Sands. Statens Råd för Byggnadsforskning. Dokument D1:1975.
- [77] Aas, G. (1981). Setninger av bygg på sand; bestemmelse av jordartsparemetere for bruk ved setningsberegninger. Rapport 52409-8. Norges Geotekniske Institutt. Oslo.
- [78] Campanella, R.G., Robertson, P.K. and Berzins, W.E. (1984). Use, Interpretation and Correlation of Screw Plate Tests. Department of Civil Engineering, University of British Columbia. Soil Mechanics Series No.74. Vancouver, Canada.

- [79] Andréasson, B. (1979). Deformation Characteristics of Soft, High-Plastic Clays under Dynamic Loading Conditions. Institutionen för geoteknik med grundläggning. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg.
- [80] Bodare, A. (1983). Dynamic Screw Plate for Determination of Soil Modulus in Situ. Institute of Technology. Uppsala Universitet. UPTEC 83 79 R.
- [81] Tavenas, F., Tremblay, M., and Leroueil, S. (1983). Mesure in situ de la perméabilité des argiles. Bulletin de L'Association Internationale de Géologie de L'Ingénieur, No. 26-27, Paris.
- [82] Tavenas, F., Tremblay, M., Larouche, G. and Leroueil, S. (1986). In Situ Measurement of Permeability in Soft Clays. Proceedings of In Situ 86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, Virginia. ASCE, New York.
- [83] Carlsten, P. och Eskilsson, S. (1984). In situ bestämning av lerors permeabilitet. Nordiska Geoteknikermötet i Linköping. Vol.2.
- [84] Tremblay, M. and Eriksson, L. (1987). Use of Piezometers for In Situ Measurement of Permeability. Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Dublin, Vol.1.
- [85] Mieussens, C. and Ducasse, P. (1977). Mesure en place des coefficients de perméabilité et des coefficients de consolidation horizontaux et verticaux. Canadian Geotechnical Journal. Vol.14, No.1.
- [86] Hvorslev, M.J. (1951). Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations. U.S. Army Waterways Experiment Station. Vicksburg, Miss. Bulletin No. 36.
- [87] Kallstenius, T. och Wallgren, A. (1956). Pore Pressure Measurements in Field Investigations. Statens Geotekniska Institut. Proceedings No.13. Stockholm.
- [88] Wilkinsson, W.B. (1968). Constant Head In Situ Permeability tests in Clay Strata. Geotechnique. Vol.18. No.2.
- [89] Tavenas, F., Diene, M. and Leroueil, S. (1988). Analysis of the In Situ Constant Head Permeability Test. Paper submitted to Canadian Geotechnical Journal for publication. Also in Proceedings of the 39th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Ontario, August 1986. Preprint Volume.
- [90] BAT Groundwater Monitoring System. BAT Envitech Inc. Long Beach, California.
- [91] Bjerrum, L. and Andersen, K. (1972). In Situ Measurement of Lateral Pressure in Clay. Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Madrid. Vol.1.
- [92] Massarsch, K.R., Holtz, R.D., Holm, B.G. and Fredriksson, A. (1975). Measurement of Horizontal in Situ Stresses. Proc. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties. June 1975. Raleigh N.C. Vol.1. ASCE, New York.
- [93] Tavenas, F., Blanchette, G., Leroueil, S., Roy, M. and La Rochelle, P. (1975) Difficulties in the In Situ Determination of  $K_0$  in Soft Sensitive Clays. Proc. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties. June 1975. Raleigh N.C. Vol.1. ASCE, New York.
- [94] Peighaud, M. (1973). Mesure des contraintes sous remblais et ouvrages d'art. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Supplément No.67. Paris.

- [95] Tedd, R. and Charles, J.A. (1983). Evaluation of Push-In Pressure Cell Results in Stiff Clays. Proceedings International Symposium on Soil and Rock Investigation by In Situ Testing. Paris. Vol.2.
- [96] Larsson, R. (1975). Measurement and Calculation of Horizontal Stresses in Clay and their Importance for Strength- and Deformation Parameters. Institutionen för geoteknik med grundläggning. Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg.
- [97] Larsson, R. (1983). Släntstabilitetsberäkningar i lera. Statens Geotekniska Institut. Rapport No.19. Linköping.
- [98] Handy, R.L., Remmes, B., Moldt, S., Lutenecker, A.J. and Trott, G. (1982). In Situ Stress Determination by Iowa Stepped Blade. Journal of the Geotechnical Division. ASCE. GT 11.
- [99] Handy, R.L. and Fox, N.S. (1967). A Soil Bore-Hole Direct Shear Test Device. Highway Research News. No.27.



**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**

**Besöksadress: Olaus Magnus Väg 35**

**Postadress: 581 01 Linköping**

**Telefon: 013-11 51 00**

**Telex: 50125 (VTISGI S)    Telefax: 013-13 16 96**