



**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**

**SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**

**No. 58**

**SÄRTRYCK OCH PRELIMINÄRA RAPPORTER**

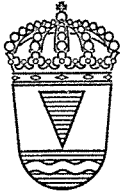
**REPRINTS AND PRELIMINARY REPORTS**

**Supplement to the "Proceedings" and "Meddelanden" of the Institute**

## **Trycksonderingsdag 1973**

**Symposium anordnat av Svenska Geotekniska  
Föreningen den 5 februari 1973**





**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**

**SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**

**No. 58**

**SÄRTRYCK OCH PRELIMINÄRA RAPPORTER**

**REPRINTS AND PRELIMINARY REPORTS**

Supplement to the "Proceedings" and "Meddelanden" of the Institute

## **Trycksonderingsdag 1973**

**Symposium anordnat av Svenska Geotekniska  
Föreningen den 5 februari 1973**



## FÖRORD

Från tillkomsten av geotekniska institutet (1944) upptog sondering en stor del av dess FoU-verksamhet och i en redogörelse för verksamheten 1944-1948 behandlas två metoder, den s k snabbsonderingsapparaten (föregångare till SGI trycksond) och insitumaskinen (iskymetern).

Under det senaste decenniet har sonderingstekniken internationellt påtagligt utvecklats, främst i Europa, särskilt vad gäller trycksondering. För att få en allmän överblick av existerande hithörande metoder och deras lämplighet för svenska förhållanden anordnade Svenska geotekniska föreningen en trycksonderingsdag den 5 februari 1975. Fem huvudföredrag hölls jämte tre redogörelser för pågående utvecklingsarbete inom svenska firmor. Diskussionsavsnittet kom att bli tämligen omfattande med såväl förberedda som spontana inlägg. Enligt överenskommelse skulle bidragen tryckas i SGI:s serie.

Ambitionen i samband med redigeringsarbetet har varit att få med ett så komplett material som möjligt samt att göra detta dagsaktuellt. Författarna har därför beretts tillfälle att komplettera sina manus. Sålunda har i några fall helt färskt material kunnat inkluderas.

Under mellantiden har det europeiska sonderingssymposiet ESOPT hållits i Stockholm (5-7 juni 1974) behandlande även andra typer av sondering. I volym 1 ingår ett antal "State-of-the-Art"-rapporter, 19 från Europa och 7 från länder utanför Europa. I en senare volym (två delar) skall generalrapporter, diskussionsinlägg, standardiseringsfrågor etc samt ett 70-tal uppsatser ingå.

Föreliggande publikation är genom sin svenska inriktning att betrakta som ett värdefullt komplement i sammanhanget.

Institutet ber att få framföra sitt tack till författarna för deras bidrag.

Redigeringsarbetet har utförts av Olle Holmquist och Nils Flodin.

Stockholm i mars 1975

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT



## INNEHÅLL

	Sid
Förord	
<b>FÖREDRAG</b>	
Svenska och utländska trycksonderingsmetoder Rune Dahlberg	1
Tolkning av trycksonderingsresultat Bengt B. Broms	29
Trycksondering i friktionsmaterial - resultat av laboratorieförsök Ulf Bergdahl	67
Användning av trycksonderingsutrustning typ Nilcon vid grund- undersökning Sven Hansbo	85
Erfarenheter från trycksondering Torsten Kallstenius	99
<b>PÅGÅENDE UTVECKLINGSARBETE AV SONDERINGSUTRUSTNING I SVERIGE</b>	
Utveckling av Borros trycksonderingsutrustning samt dataregistrering av resultat från fält- och laboratorieundersökningar Arnold Hägby	113
Nilcons nya geotekniska fältutrustning Sven Nilsson	127
Geotechs akustiska penetrometer Per Jonell	137
<b>DISKUSSIONER</b>	
Feltkompressometer og trykksondering for bestemmelse av styrke- parametre N. Janbu & K. Senneset (förberett diskussionsinlägg av K. Senneset)	143
Övriga diskussionsinlägg	151





# SVENSKA OCH UTLÄNDSKA TRYCKSONDERINGSMETODER

Civilingenjör Rune Dahlberg, KTH

## Inledning

Vid genomgång av tillgänglig litteratur om trycksondering finner man att denna typ av sondering är betydligt vanligare utomlands än i Sverige, även om intresset här hemma har ökat väsentligt på senare tid. Variationsmöjligheterna är många både när det gäller spetsens geometriska utformning och sondens funktionssätt i stort. Här skall kort beskrivas de vanligaste svenska trycksonderingsmetoderna samt några utländska metoder vilka kan uppfattas som karakteristiska för vissa typer av trycksondering. En utförlig beskrivning lämnas av den holländska trycksonden, vilken haft stor betydelse för utvecklingen av övriga metoder.

Trycksonderingsmetoderna kan sägas vara antingen av mekanisk eller av elektronisk typ.

De mekaniska metoderna kan indelas i 1) sådana med rörlig spets, dvs metoder där spetsmotståndet kan särskiljas från mantelmotståndet genom att spetsen är rörlig i förhållande till ytterröret (jfr holländsk sond) och 2) sådana med fast spets, dvs metoder där endast totalmotståndet kan mätas. Lasten kan påföras antingen direkt ovanför spetsen eller (vilket är vanligast) via förlängningsstänger. Erforderlig nedtryckningskraft kan mätas uppe vid markytan med manometer eller kalibrerad mätning.

De elektroniska metoderna är i allmänhet avsedda för direkt mätning av spetsmotståndet antingen med hjälp av trådtöjningsgivare fastklistrade i spetsen (t ex typ Borro och typ Fugro) eller enligt svängande sträng-principen. Mätimpulserna från spetsen överförs vanligtvis genom en mätkabel till något mätinstrument vid markytan. Utveckling av en "akustisk" sond för "trådlös" mätning av spetsmotståndet pågår vid Geotech AB. Denna sond beskrivs i en särskild artikel i denna publikation av P. Jonell.

Vissa trycksonder mäter även s k lokal mantelfriktion. Denna mätning görs på en viss (lokal) del av stångens mantelyta, vanligen omedelbart ovanför spetskonen, på mekanisk eller elektronisk väg. Kvoten mellan lokal mantelfriktion och spetsmotstånd har visat sig vara jordartsberoende, vilket ger möjlighet till en grov jordartsbedömning. Denna tilläggsinformation är av stort värde och har starkt bidragit till det växande intresset för trycksondering.

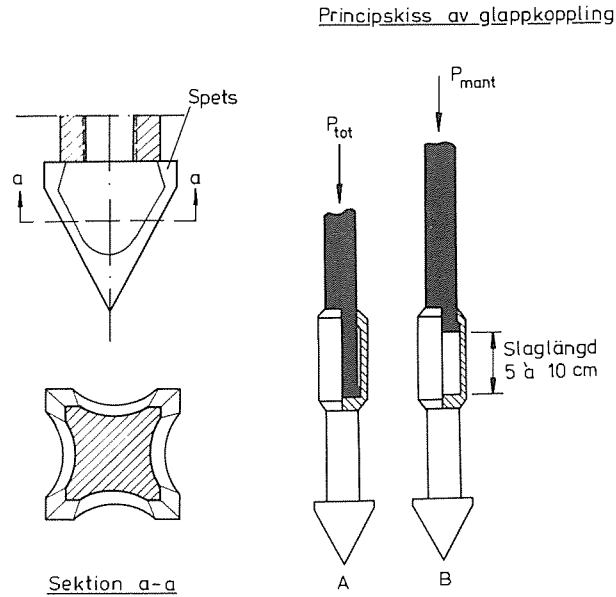
## Svenska trycksonderingsmetoder

### Mekaniska metoder

#### Trycksond, typ Nilcon

Den i Sverige hittills vanligaste trycksonderingsutrustningen har utvecklats av Ingenjörfirma Nilcon AB. Kännetecknande för denna metod är att spetsen med tillhörande skaft (fig. 1) genom en glappkoppling är rörlig i förhållande till sondstången i övergången mellan denna och spetsen. Själva spetsen har formen av en urgröpt fyrkantig pyramid med maximalt  $10 \text{ cm}^2$  tvärsnittsytta. Glappet uppgår till 5 à 10 cm och utnyttjas för att på vissa nivåer, vanligtvis var eller varannan meter, bestämma mantelmotståndets andel i totalmotståndet. Denna mätning tillgår så, att sondstången dras upp så mycket som glappet medger, varefter den åter trycks ner under mätning av erforderlig kraft. På diagrammappen (fig. 2), som automatiskt matas fram med  $1/100$  av sondens neddrivningshastighet, kommer denna upp- och nedåtgående rörelse av sondstången att ge två horisontella linjer, av vilka den undre ritas när sonden avlastas och den övre när denna åter belastas. När vertikalkraften i detta läge överstiger mantelmotståndet, trycks sondstången till kontakt med spetsen vilket ger mantelmotståndet. När kraften ökas ytterligare för övervinnande av spetsmotståndet, sammanfaller de båda linjerna. En s k "O-linje" konstrueras genom att mantelmotstånden på de olika mätnivåerna sammanbinds. Avståndet från denna linje till kurvan utgör spetsmotståndet.

När sonderingsmotståndet överstiger största tillgängliga nedtryckningskraft (10-20 kN) kan ytterligare nedträngning erhållas genom att spetsen roteras vid reducerad tryckkraft (3 à 5 kN). Om det är möjligt övergår man på nytt till vanlig trycksondering.



**Fig. 1** Nederdel av trycksond, typ Nilcon, med glappkoppling och spets i form av "urgröpt" fyrkantig pyramid. Principfigur  
 Lower part of the static penetrometer, type Nilcon, supplied with an axial play above the pyramidal, square-shaped point. In principle

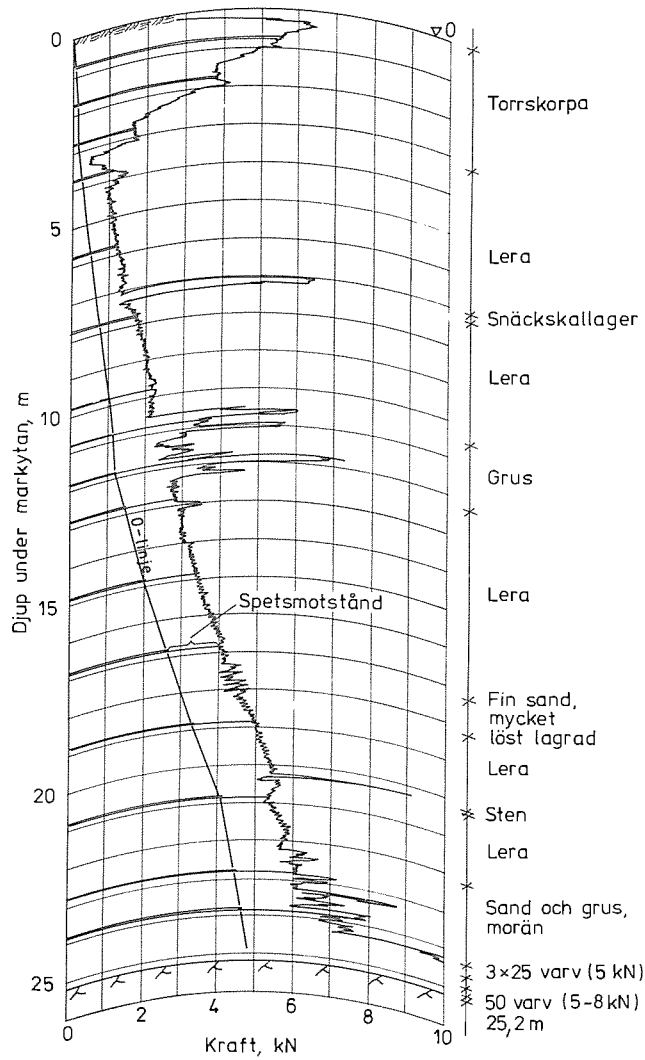


Fig. 2 Exempel på automatiskt uppritat diagram från trycksond, typ Nilcon

Diagram automatically recorded by the Nilcon device

Utrustningen kan antingen förankras i jorden med jordskruvar, varvid neddrivningen åstadkommes manuellt, eller monteras på traktor, varvid traktorns hydraulik utnyttjas för neddrivningen och dess tyngd tjänar som mothåll.

#### Trycksond, typ SGI

Omkring 1950 utvecklades vid Statens geotekniska institut (SGI) en hydraulisk trycksond (fig. 3). Funktionssättet för sonden framgår schematiskt av fig. 4. Sondstången drivs ner under samtidig nedpressning och rotation. Maximalt vridmoment uppgår till 250 Nm och maximal tryckkraft till 10 kN (= fordonets tyngd). Neddrivningshastigheten är ca 3 m/min. Spetsen, rörlig i förhållande till sondstången, är konisk med en basdiameter av 25 respektive 40 mm, motsvarande en tvärsnittsarea av ca 5 respektive ca 12,5 cm<sup>2</sup>. Förhållandet mellan nedpressningshastighet och rotationshastighet motsvarar en stigning av 1:5. Försöksresultat har visat att samma förhållande gäller för kvoten mellan neddrivningsmotstånd och vridningsmotstånd i mantelytan under sonderingen. Vridningsmotståndet erhålls ur uppmätt vridmoment. Eftersom även det totala sonderingsmotståndet mäts, kan spetsmotståndet erhållas som skillnaden mellan totalmotståndet och neddrivningsmotståndet i mantelytan (jfr fig. 5). Denna "utvärdering" av spetsmotståndet görs direkt av maskinen och uppritas som funktion av djupet under markytan.

#### Elektroniska metoder

##### Trycksond, typ Borro

Ingenjör-firma Borros AB har utvecklat en elektronisk trycksond för direkt mätning av spetsmotståndet. Spetsen finns i olika utföranden, samtliga med 10 cm<sup>2</sup> area. Den är utrustad med trådtöjningsgivare, vilka genom en kabel står i förbindelse med ett registrerande mätinstrument vid markytan (jfr fig. 1-3 i artikel av A. Hägby i denna publikation). Maximal nedtryckningskraft uppgår normalt till 40 kN. För speciella förhållanden finns möjligheter att använda kraftigare spetsar. Nedtryckningskraften är emellertid även beroende av förankringsmöjligheterna (t ex jordskruvar). För neddrivningen används vanligtvis vevdomkraft, varvid en nedpressningshastighet av ca 0,8 m/min erhålls.



Fig. 3 Trycksond, typ SGI, monterad på en Mercedes Unimog  
Static penetrometer, type SGI, mounted on a Mercedes  
Unimog jeep

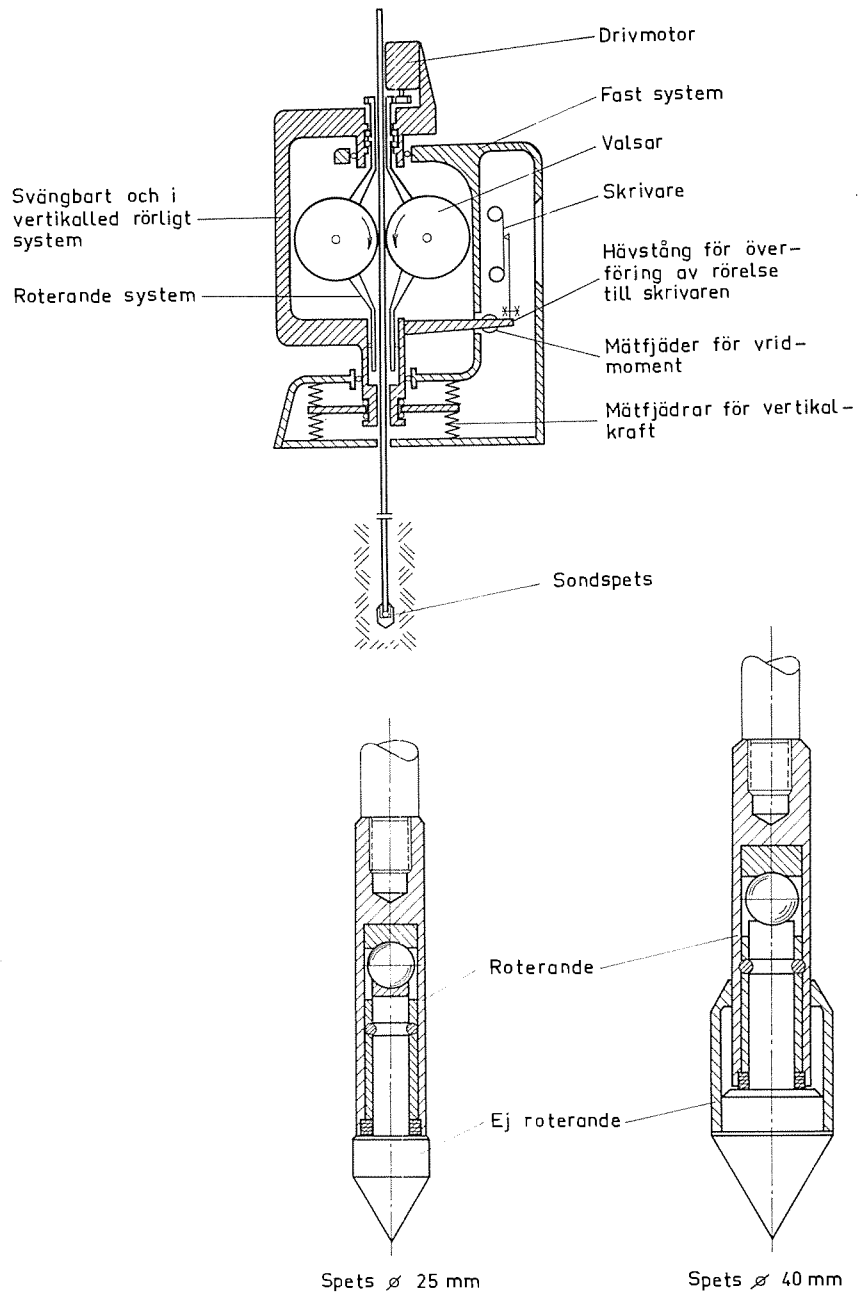


Fig. 4 Principfigur av trycksond, typ SGI, med tillhörande spetsar  
 General arrangement of the SGI penetrometer. In principle

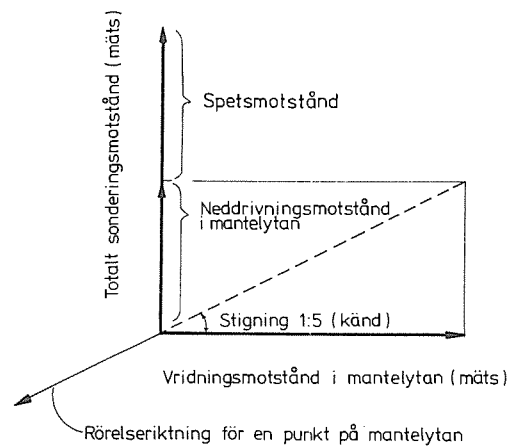


Fig. 5 Princip för särskiljande av spetsmotstånd och mantelmotstånd vid trycksondering typ SGI

Principle of separating skin friction from cone resistance at the SGI penetrometer

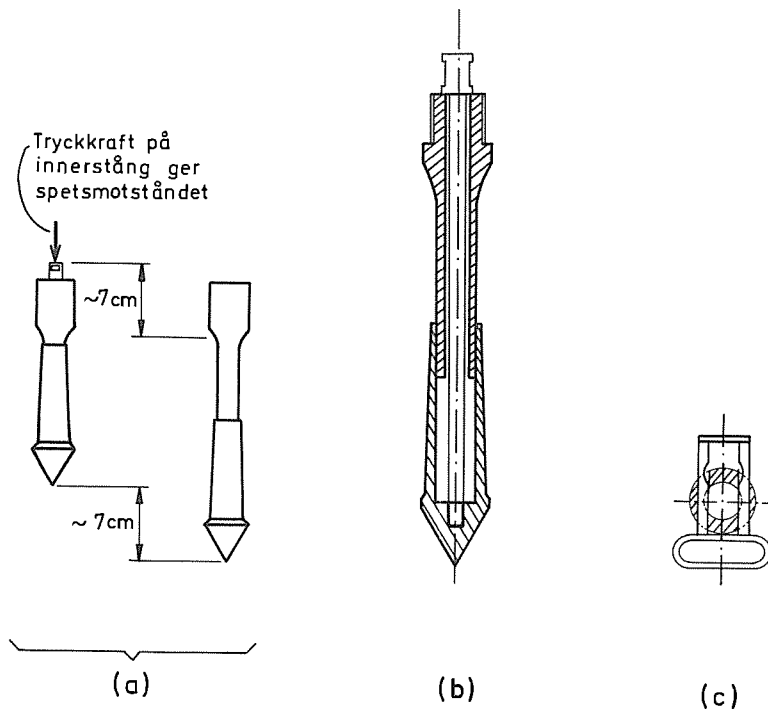


Fig. 6 Spets till holländsk sond (a-b) samt handtag (c) för manövrering av tryckkraften till stång och ytterrör (efter Sanglerat, 1972)

Point of the Dutch Static Penetrometer (a-b) and handle (c) for the change of load application from inner rod to tube (after Sanglerat, 1972)



Trådtöjningsgivarna består av fyra aktiva och fyra passiva givare, de senare för temperaturkorrigering. Genom seriekoppling av de fyra givarna uppnås fördelen att eventuella böjspänningar utbalanseras och endast vertikala krafter registreras. Vid ökat eller minskat tryck mot spetsen längdändras denna i axiell led, vilket ger en motståndsändring i trådtöjningsgivarna och samtidigt en obalans i mätinstrumentet vid markytan. Denna obalans motsvarar trycket mot spetsens tvärsnittsarea ( $10 \text{ cm}^2$ ). Skrivaren gör då utslag motsvarande obalansen, varvid spetsmotståndet automatiskt erhålls som funktion av djupet under markytan.

### Utländska trycksonderingsmetoder

#### Mekaniska metoder

#### Holländsk trycksond

En översikt över utländska trycksonderingsmetoder inleds naturligen med en beskrivning av den holländska trycksonden, som är den äldsta och har varit förebild för senare utvecklade metoder. Den har vunnit spridning över så gott som hela världen (ca 1000 exemplar lär finnas av denna sond). Den tillverkas av Goudsche Machinefabriek, Gouda.

Spetsen, som är patenterad av Geotekniska laboratoriet i Delft, är konisk (fig. 6) och har  $60^\circ$  spetsvinkel och  $10 \text{ cm}^2$  tvärsnittsarea. Mellan spetsen och dess förlängning utbildas en släppning, som påverkar brottutvecklingen i jorden vid spetsen (minskar spetsmotståndet). Spetsens skaft är som framgår av figuren svagt koniskt med uppåt avtagande diameter.

Neddrivningskraften överförs till spetsen via ett inre stångsystem, där de 1 m långa stängerna ( $\emptyset 15 \text{ mm}$ ) "staplas" på varandra utan hopgångning. Detta möjliggörs genom att ytterrörets innerdiameter är endast 1 mm större (16 mm) än stångdiametern. Rörens ytterdiameter är 36 mm och längden är 1 m, dvs samma längd som innerstängerna.

Vid sonderingen mäts spetsmotståndet i 20 cm intervaller genom att först enbart spetsen trycks ner ca 7 cm. Därefter trycks ytterröret ner lika långt, vilket ger mantelmotståndet (jfr fig. 6 a-b). Vid fortsatt tryckning på ytterröret följer även

spetsen med (ca 13 cm) till nästa mätningsnivå, varvid det totala neddrivningsmotståndet erhålls.

Den holländska trycksonden förekommer i flera versioner, en lättare sond för tryckkrafter upp till 20 à 25 kN och andra tyngre varianter, vanligtvis med kapaciteten 100 kN respektive 200 kN. Tryckkraften kan för den lättare sonden snabbt överföras från innerstänger till ytterrör eller vice versa genom att handtaget dras ut eller skjuts in (jfr fig. 6 c och fig. 7 b). För övriga versioner sker denna operation på ett något annorlunda sätt (jfr nedan).

Den lättare sonden är handdriven (fig. 7 a) och används huvudsakligen för sondering i lösare jordar, vanligtvis till högst 10 m djup. För att reducera mantelmotståndet och därigenom öka sondens aktionsdjup används ofta till denna version ytterrör, vars diameter är lika med spetsdiametern endast vid rörändarna men på 90% av rörlängden har mindre diameter (jfr fig. 12 b). I samma syfte förses ibland det nedersta röret istället med en lokal förtjockning ett stycke ovanför spetsen. I båda fallen kan endast spetsmotståndet mätas.

De tyngre holländska trycksonderna är mekaniserade. Fig. 8 a visar 100 kN-versionen. För avläsning finns två oljemanometrar (fig. 8 b), den ena avsedd för mätning av spetsmotstånd, den andra för mantelmotstånd och totalmotstånd. Neddrivningsanordningen har utrustats med ett hjulpar för att underlätta förflyttningen. Den kan således dragas för hand eller med traktor mellan borrhöjningarna. Utrustningen kan också monteras på fordon, såsom visas i fig. 9 a, varvid vid sonderingen fordonet måste förankras (fig. 9 b) om dess tyngd inte ger erforderligt mothåll. Fordonet i figuren är utrustat med kran. För att skydda fordonets fjädring vid lyftning av tyngre föremål kan stödben erfordras (fig. 9 b). För neddrivning av jordskruvarna används vridenheten till den visade kranen, vilket innebär en avsevärd tidsbesparing.

På initiativ av Begemann utvecklades under 1960-talet för den holländska trycksonden en helt ny spets, friktionsmantelspetsen, med vilken även lokal mantelfriktion kan mätas. Skillnaden jämfört med vanliga spetsar består huvudsakligen i att den nya spetsen har fått ytterligare en komponent, en friktionsmantel med mantelytan  $150 \text{ cm}^2$  placerad ca 20 cm ovanför spetskonen (jfr fig. 10). Vid tryckning på innerstängerna kommer i detta fall spetsen först att tryckas ned ca 4 cm (sträckan a i fig. 11), varefter även friktionsmanteln följer med en

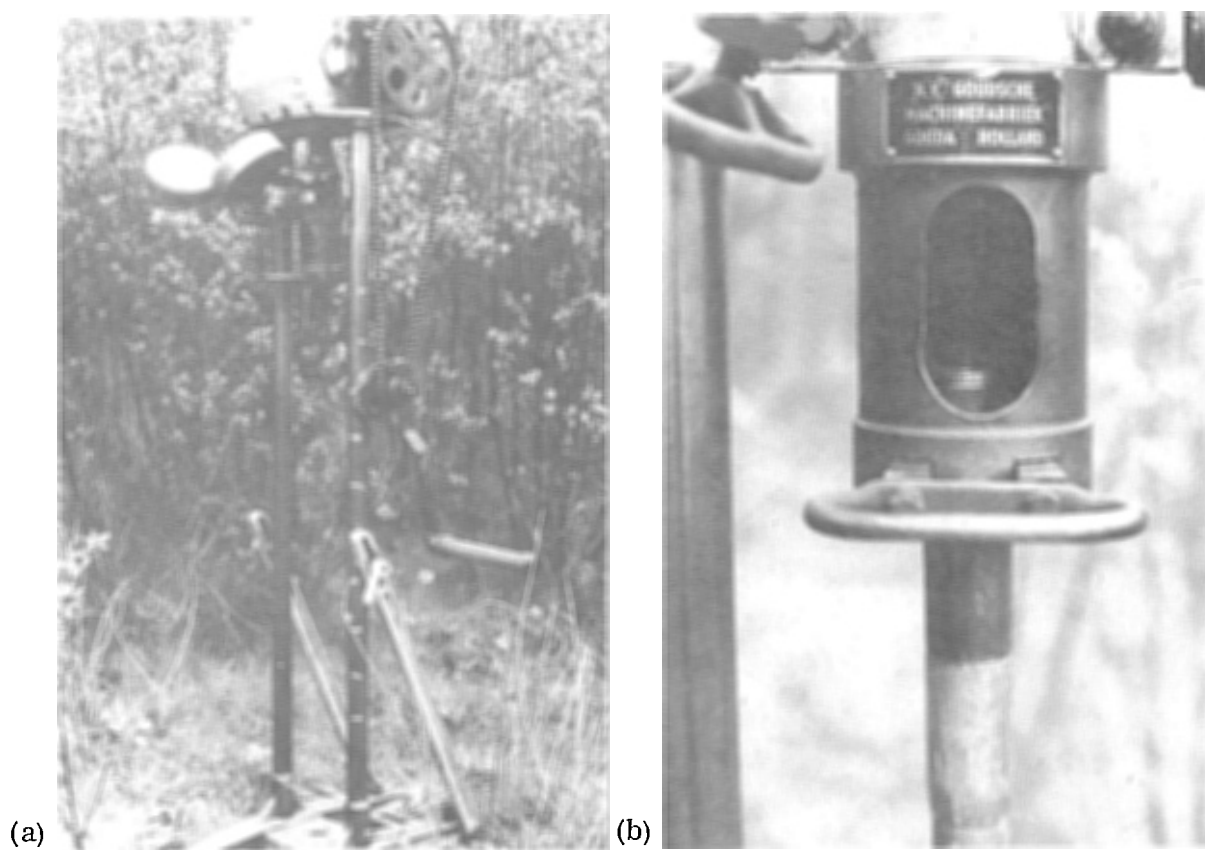


Fig. 7 Lättare holländsk sond (25 kN) (a) med närbild av manöverorgan för kraftöverföring (b)

Light Dutch Static Penetrometer (25 kN) (a) and a close-up of the handle for the change of load application (b)

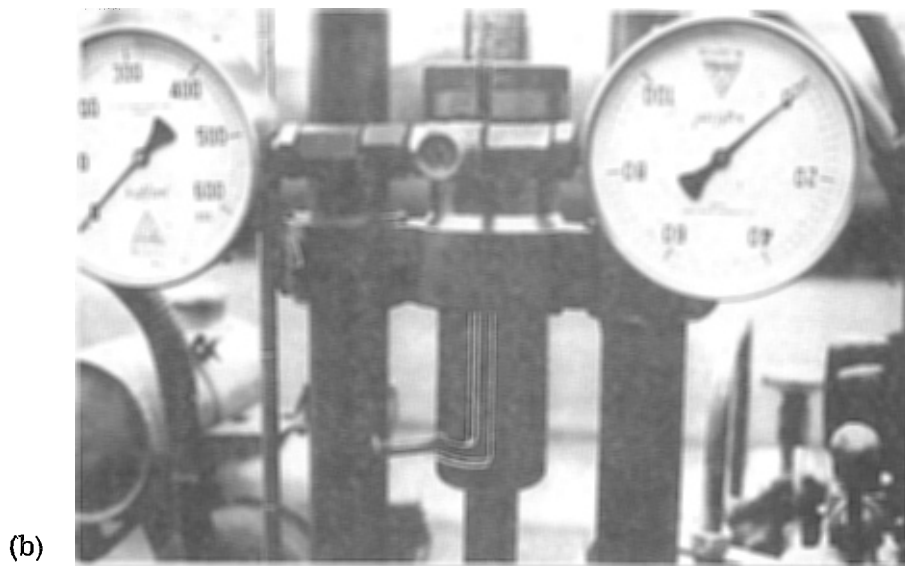


Fig. 8 Holländsk trycksond (100 kN) (a) med detalj av registreringsanordning (b)

Dutch Static Penetrometer (100 kN) (a) with a close-up of the recording part (b)

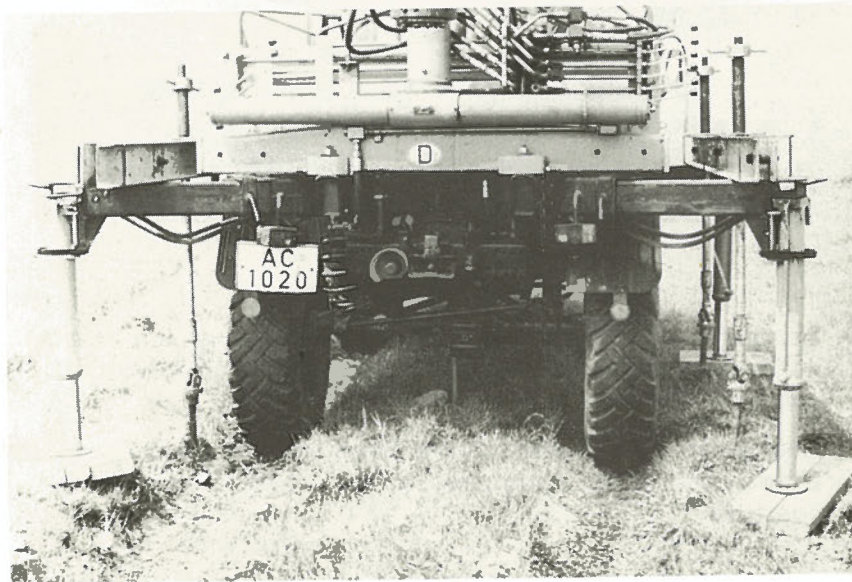
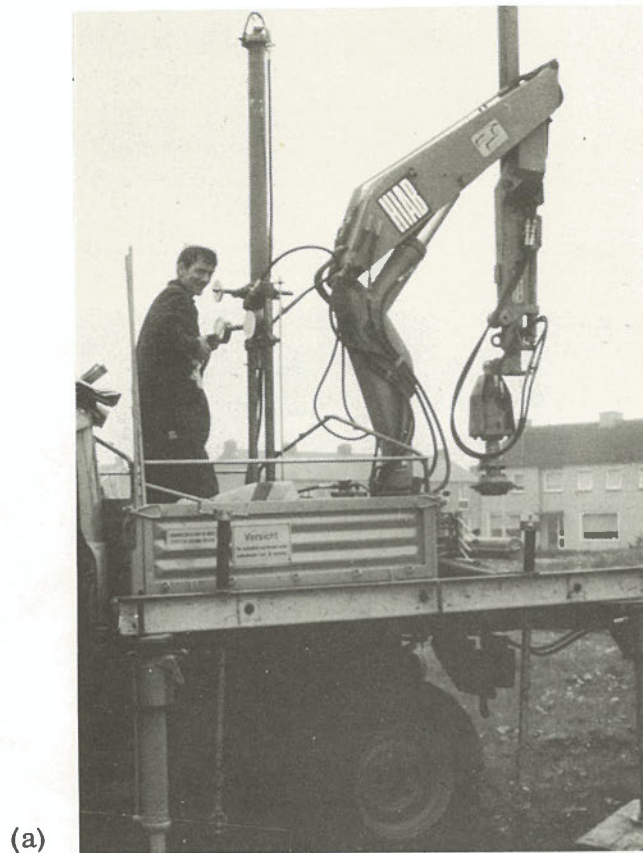


Fig. 9 Holländsk trycksond (100 kN) monterad på förankrat fordon. Förankringsskruvarna drivs med hjälp av den visade kranen (a-b)  
 Dutch Static Penetrometer (100 kN) mounted on an anchored vehicle. The screw anchors are driven by the crane shown (a-b)

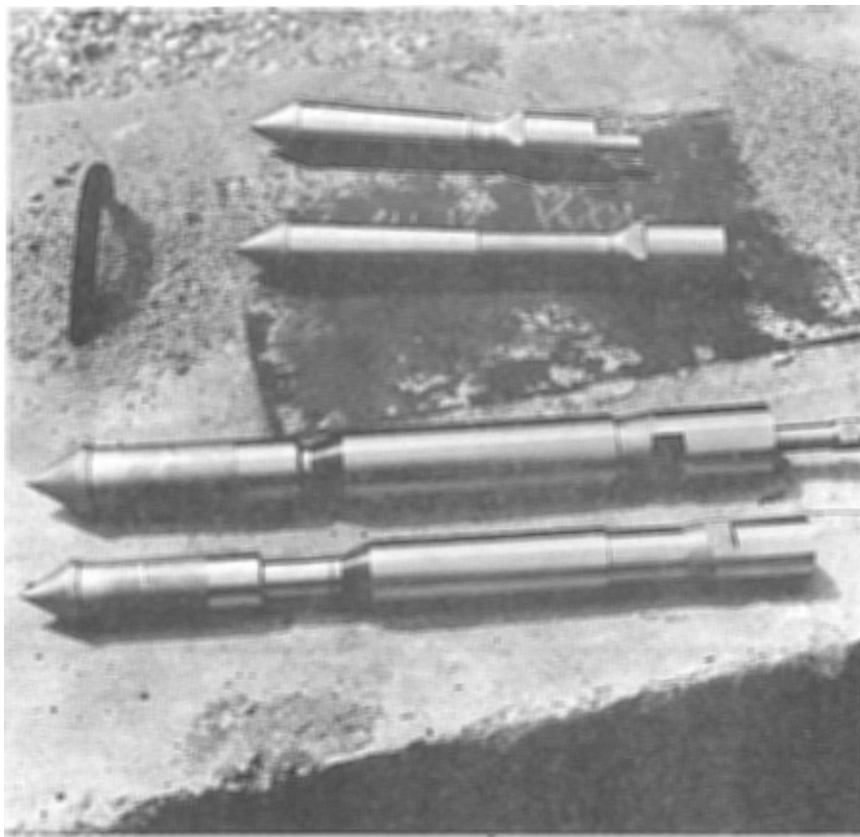


Fig. 10 Begemanns friktionsmantelspets och den vanliga (korta) holländska trycksondspetsen i hoptryckt och maximalt utdraget läge

Begemann's Adhesion Jacket Cone and the common (short) Dutch cone in the compressed and the max. extended position

sträcka av ca 4 cm (sträckan b) samtidigt som spetsen trycks ned lika långt (totalt sträckan a+b). Den lokala mantelfriktionen sätts lika med tryckkraftens ökning från första till andra avläsningstillfället ( $P_3 - P_2$ ) dividerad med friktionsmantelns yta ( $150 \text{ cm}^2$ ). Tryckkraften överförs nu från innerstängerna till ytterrören, varvid de olika delarna teleskopiskt går in i varandra. Under denna nedtrycknings första 4 cm erhålls mantelmotståndet längs ytterrören, vilket under följande 4 cm ökar med det lokala mantelmotståndet längs friktionsmanteln. Tryckningen på ytterrören fortsätts därefter tills sondspetsen når nästa mät-nivå, vilket ger det totala sonderingsmotståndet ( $P_1$  i fig. 11).

En jämförelse mellan Begemanns friktionsmantel och jämntjocka friktionsmantlar utgörande en del av ytterröret (jfr t ex Fugros sond i fig. 16) har visat att den nedre avfasade delen av Begemanns friktionsmantel ger en form av spetsmotstånd, som i sand och grus kan utgöra upp till 50% av det uppmätta friktionsmantelmotståndet.

I vissa fall kan kombinationen stort spetsmotstånd - stort sonderingsdjup medföra att den elastiska sammantryckningen av innerstängerna blir så stor att den tillgängliga "slaglängden" inte är tillräcklig för att röra spetsen (mer än 8 cm sammantryckning) eller friktionsmanteln (mer än 4 cm sammantryckning). Den elastiska sammantryckningen utgör ca 1 cm per 360 enheter av produkten kraft (kN) x djup (m).

Vid mycket små spetsmotstånd kan korrektion erfordras för innerstängernas vikt, 1,38 kg/m. För att hålla friktionen mellan innerstänger och ytterrör så låg som möjligt är det tillrådligt att använda smörjmedel. Friktionen medför nämligen att det uppmätta spetsmotståndet blir för stort.

Begemanns friktionsmantelspets kan användas till samtliga versioner av holländsk trycksond.

#### Holländsk trycksond i Belgien

Även i Belgien är holländsk trycksond mycket vanlig. Av tradition använder man dock den spetstyp som visas i fig. 12 a-b. Spetsen, som ansluter direkt till innerstängerna saknar helt mantel och består endast av en kon, som tillsammans med innerstängerna är rörlig i förhållande till ytterröret. Den bästa överensstäm-

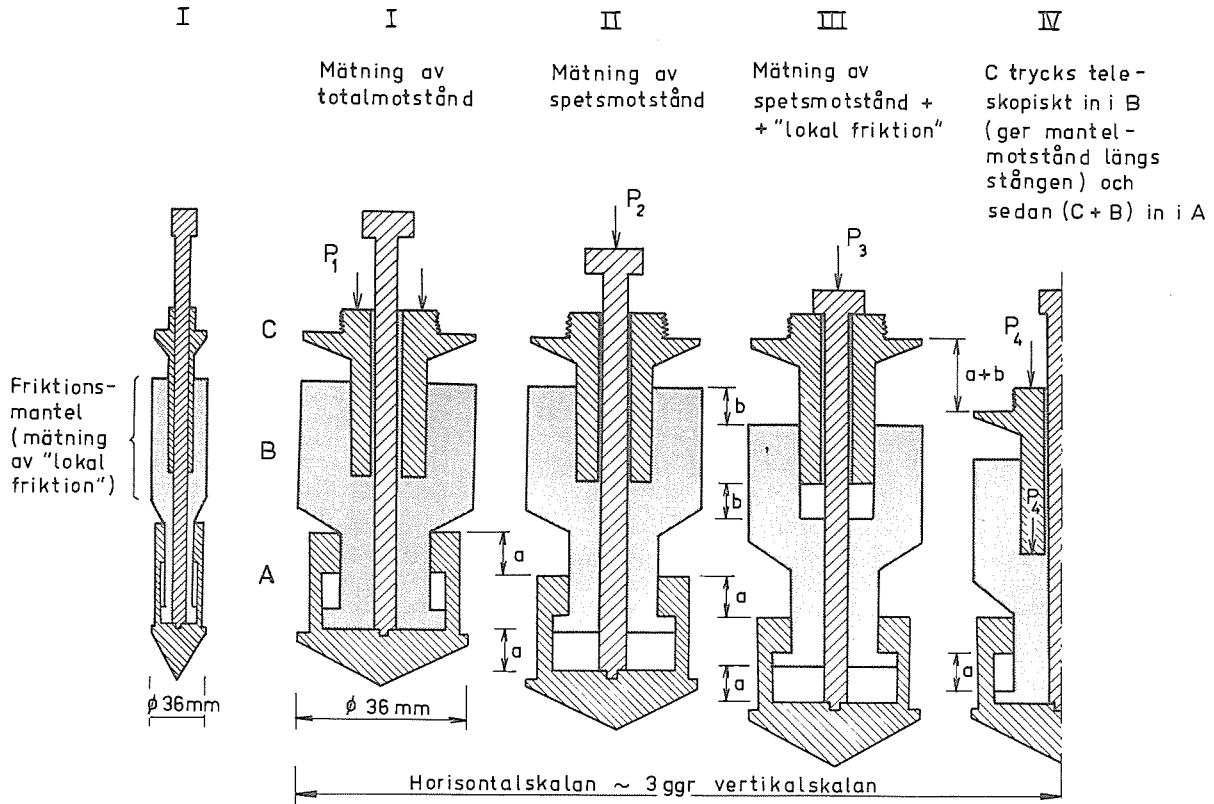


Fig. 11 Princip för särskiljande av spetsmotstånd, lokal mantelfriktion och totalt mantelmotstånd vid sondering med Begemann-spetsen

Principle of separating cone resistance, local friction and total skin friction in connection with the Begemann cone



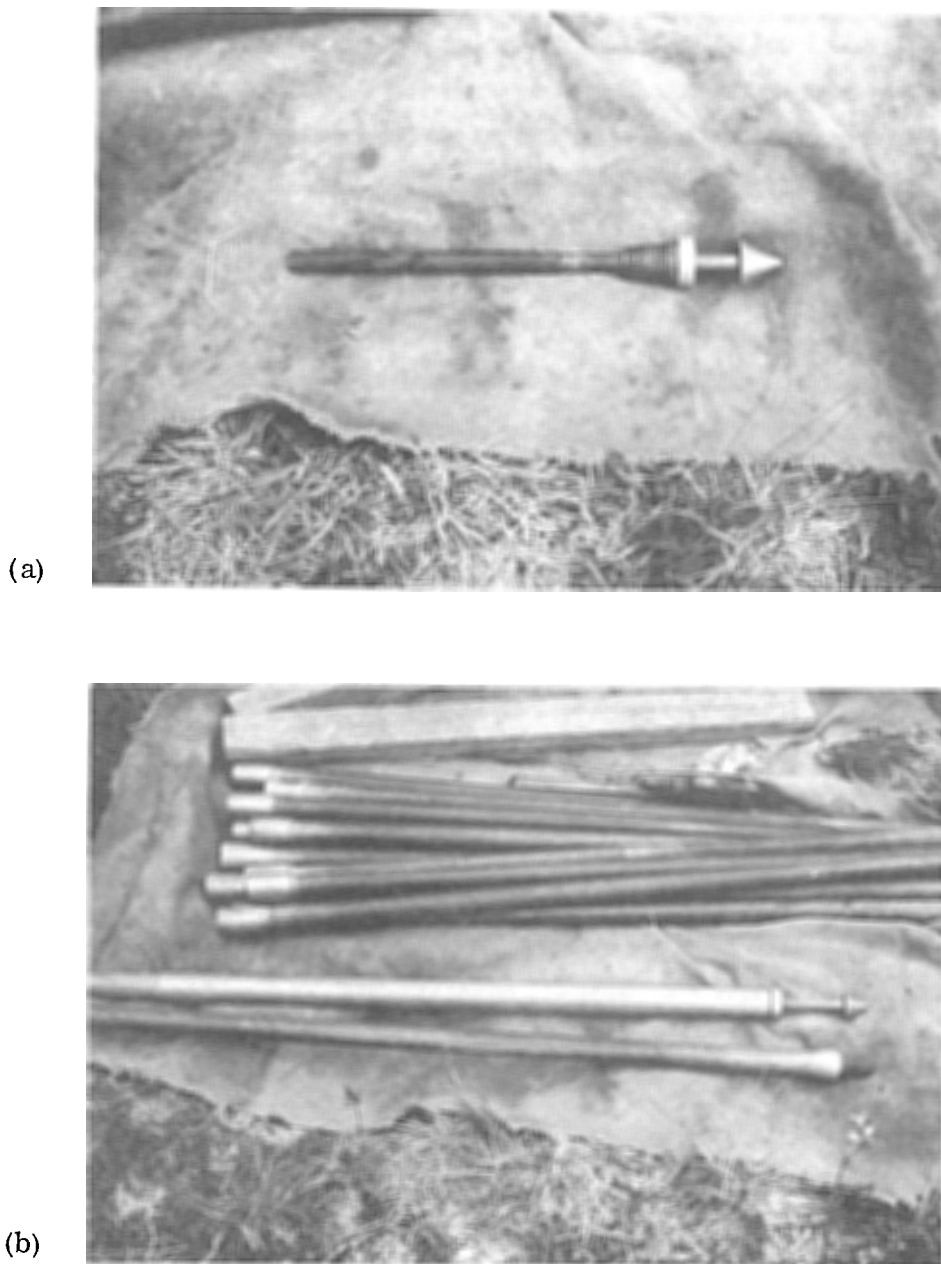


Fig. 12 Sondspets till holländsk trycksond enligt belgisk praxis

a) Spets med innerstång

b) Spets och ytterrör

Point of the Dutch Static Penetrometer according to  
Belgian practice

a) Point with inner rod

b) Point and tubes

melsen mellan uppmätt och verkligt spetsmotstånd erhålls med denna spets om mätningen sker just i det ögonblick spetsen börjar röra sig. Det är också detta värde som anges som spetsmotstånd vid sondering med denna spets. Vid fortsatt nedtryckning av spetsen kommer den av spetsen undanträngda jorden successivt att fylla ut det tomrum som bildas genom glappet mellan spets och ytterrör. Denna möjlighet för jorden att röra sig "runt" spetsen ger ett för lågt spetsmotstånd, ofta endast 50% av initialvärdet enligt ovan.

Försök har visat att de nedåtriktade friktionskrafter som uppträder mellan sondstängens respektive spetsens mantelyta och jorden under neddrivningen ger ett extra överlagringstryck på spetsnivån. En spets utan släppning med viss mantellängd ger därför större spetsmotstånd (ca 10%) än en spets utan mantel. Detta är en av orsakerna varför man i Belgien föredrar den ovan beskrivna spetsen utan mantel.

#### Trycksond, typ Haefeli-Fehlmann

En av Haefeli-Fehlmann konstruerad trycksond (fig. 13) är försedd med glappkoppling nere vid spetsen. Spetsens manteldel har samma diameter som spetsen och en mantelyta av  $160 \text{ cm}^2$ . Med denna metod särskiljs spets- och mantelmotstånd på ett mera indirekt sätt än vid "vanligt" förfarande enligt ovan. Totalt sonderingsmotstånd erhålls vid samtidig nedtryckning av spets och stänger. Mantelmotståndet mot stängen bestäms genom att sondstängens vid tillfälligt avbrott i sonderingen dras upp sträckan  $a$  (fig. 13). Vid ytterligare uppdragning följer även spetsen med, varvid uppdragningsmotståndet ökar med det delmantelmotstånd, som uppträder mot spetsens mantelyta ( $160 \text{ cm}^2$ ). Eftersom sålunda mantelmotståndet mäts under en uppåtgående rörelse av stängen under det att totalmotståndet mäts under nedtryckningsskedet, blir det härvid erhållna mantelmotståndet vanligen mindre än det som ingår i totalmotståndet. Skillnaden mellan totalmotstånd och mantelmotstånd, dvs spetsmotståndet, blir därför i detta fall för stort.

#### Elektroniska metoder

##### Trycksond, typ Maihak

Omkring år 1950 utvecklades vid Degebo (Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik) en elektronisk trycksondutrustning, som numera tillverkas av

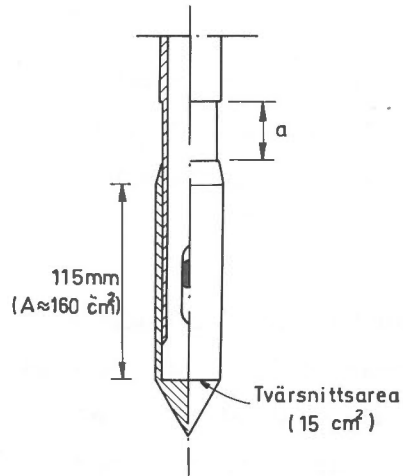


Fig. 13 Nederdel av trycksond, typ Haefeli-Fehlmann  
Lower part of static penetrometer, type Haefeli-Fehlmann

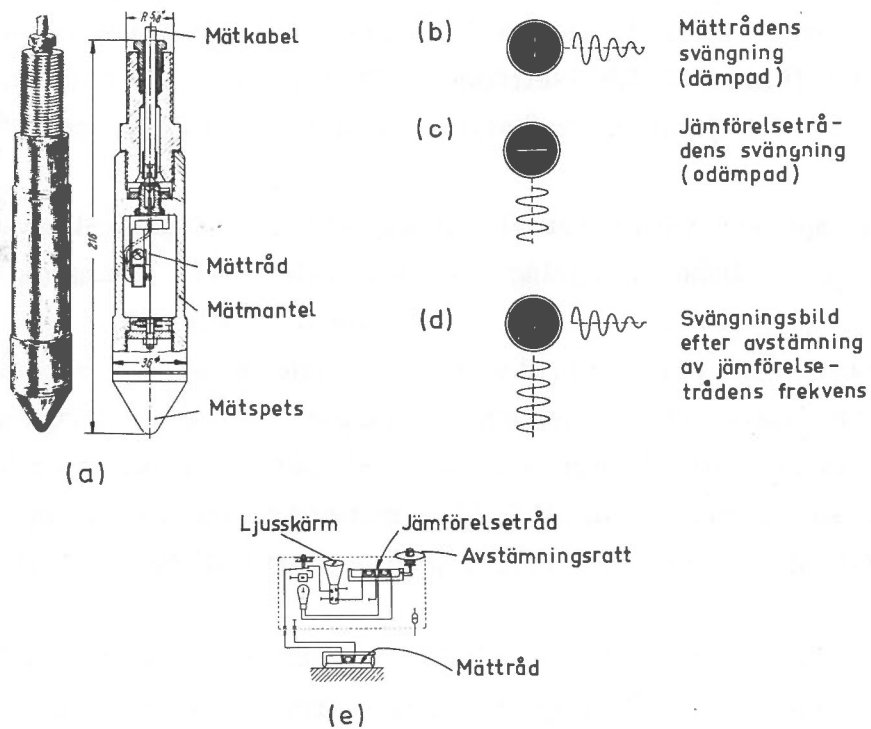


Fig. 14 Nederdel av trycksond, typ Maihak (a) samt princip för elektronisk mätning av spetsmotstånd (b-e)  
Lower part of static penetrometer, type Maihak (a) and principle for electronic recording of the cone resistance (b-e)

Maihak AG i Hamburg. Spetsen är konisk med spetsvinkeln  $60^{\circ}$  och diametern 35,7 mm (jfr DIN 4094). Spetsmotståndet mäts elektroniskt under det att mantelmotståndet mäts hydrauliskt med oljemanometer. Största tillåtna spetskraft är 50 kN och maximal totalkraft 75 kN.

Trycket som uppstår mot spetsen under sondens nedträngning medför elastiska sammantryckningar av en tunnväggig cylindrisk mantel placerad omedelbart ovanför spetsen (fig. 14 a). Dessa elastiska sammantryckningar utnyttjas för mätning av spetsmotståndet enligt följande. Tryckvariationerna får påverka en förspänd ståltråd, som har fästs centralt i axiell led i mätmanteln. Vid belastning minskas förspänningen och därmed egenfrekvensen i tråden. Dessa variationer i egenfrekvens överförs till elektriska svängningar av en elektromagnet och förs upp genom stängerna via en mätkabel till en mottagare vid markytan.

Fig. 15 visar mottagarenheten, som kan anslutas antingen till 220 V eller till 110 V växelström (50 Hz). När strömbrytaren (10) slås till, visar sig på ljusskärmen (2) en horisontell ljuslinje (fig. 14 c). Denna linje motsvarar den i mottagaren befintliga jämförelsetrådets svängning, som är odämpad. Ljusbildens skärpa och ljusstyrka kan ställas in med rattarna (12) och (13) i fig. 15.

Mättråden i spetsen svänger endast när den erhåller svängningsimpuls från mottagarenheten. Denna svängning blir dämpad (fig. 14 b). Svängningsimpulsen kan regleras (15) antingen manuellt eller automatiskt (fig. 15). Intervallerna mellan impulserna kan ställas in med vred (14). Varje impuls orsakar en vertikal avlänkning av ljusbilden på skärmen. När jämförelsetrådets svängningsfrekvens har avstämts så att den överensstämmer med mättrådens, kommer ljusbilden att visa en sluten kurva, som till följd av mättrådens dämpade svängning långsamt sluter sig och, om impulserna upphör, återgår till ett horisontellt streck.

Under den tid som står till förfogande innan mättrådens svängning helt har dämpats måste jämförelsetrådets och mättrådens frekvens avstämmas. Detta tillgår så att man med hjälp av dubbelvredet (4) ändrar jämförelsetrådets frekvens tills den överensstämmer med mättrådens (jfr principskissen i fig. 14 e). Frekvenslikheten avgörs med ledning av ljusbildens utseende på ljusskärmen. När de båda svängningsrörelserna tillsammans genererar en sluten kurva i form av en ellips eller en cirkel (fig. 14 d), som utan "gungningar" långsamt sluter sig, är frekvenserna lika. Grovinställning av frekvensen görs med den undre och fin-

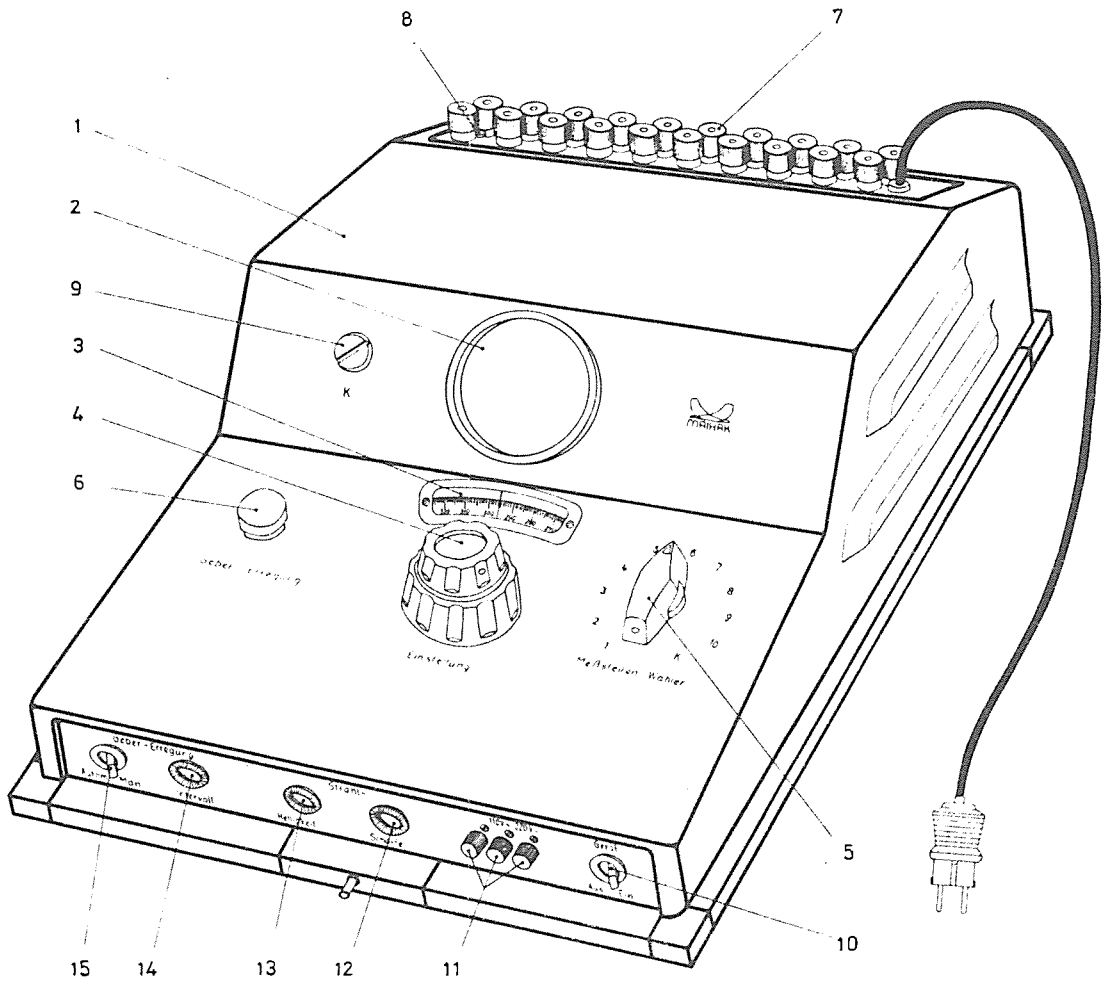


Fig. 15 Mätinstrument till Maihak-sonden  
Recording unit for the Maihak Static Penetrometer

inställning med den övre av dubbelvredets båda rattar. Vanligtvis görs en bestämning av spetsmotståndet per 10 cm neddrivning. Neddrivningshastigheten uppgår till ca 0,2 m/min.

#### Trycksond, typ Fugro

Firma Fugro i Holland har i samarbete med Philips Company konstruerat en elektronisk trycksond för direkt mätning och registrering av spetsmotståndet. En senare version av sonden mäter både spetsmotstånd och lokal mantelfriktion (De Ruiter, 1971). Spetsen skiljer sig i det senare fallet i flera avseenden från Begemanns spets men har liksom denna tvärsnittsarean  $10 \text{ cm}^2$  och spetsvinkeln  $60^\circ$ . Den saknar däremot släppning och är cylindrisk i hela sin längd (jfr fig. 16). Friktionsmanteln har ytan  $150 \text{ cm}^2$ . För mätning av spetsmotstånd och lokal mantelfriktion finns i spetsen ett antal trådtöjningsgivare, vilka har placerats och kopplats på sådant sätt att endast vertikala krafter mäts. De spänningsvariationer som orsakas av motståndsändringarna i trådtöjningsgivarna registreras av mätinstrument via en Wheatstone-brygga för spetsmotståndet och en för mantelfriktionen. Resultatet erhålls automatiskt som en kontinuerlig kurva visande spetsmotstånd respektive lokal mantelfriktion som funktion av djupet. Signalerna från spetsen förs upp till mätinstrumentet vid markytan via en mätkabel, som är träd genom de ihåliga stängerna. På senare tid har Fugro utvecklat ett datasystem vilket gör det möjligt att överföra fältresultatet på telex till kontoret för uppritning och utvärdering, varefter resultatet återsänds till försöksplatsen på telex.

Tre spetsar finns vilka kan användas upp till en största kraft av 10 kN, 50 kN (normalspets) respektive 100 kN. För att komma ifrån förankringsproblemet har utrustningen monterats på ett tungt specialfordon, vilket enbart genom sin tyngd ger ett mothåll av 120 - 130 kN.

Möjlighet finns vidare att utrusta Fugro-sonderna med en inklinometer, vilken kan vara av värde för bedömning av sondens krokighet vid sondering till stora djup (25 - 30 m).

Fugro har genomfört en serie försök där friktionsmanteln placerades på olika avstånd från spetsen. Enligt nuvarande praxis ansluter den ca 14 cm långa friktionsmanteln direkt till spetskonen, dvs dess tyngdpunkt är belägen 7 cm ovanför konen. Vid försöksserien placerades manteln även på avstånden 25,

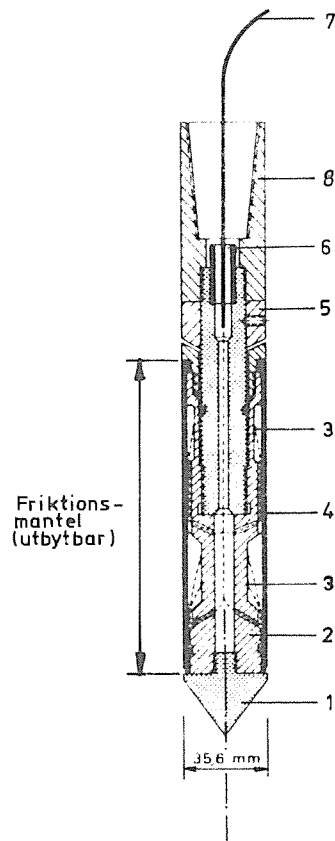


Fig. 16 Spets till elektronisk trycksond, typ Fugro  
 (1) Konisk spets ( $10 \text{ cm}^2$ ), (2) lastcell, (3) trådtöjningsgivare,  
 (4) friktionsmantel, (5) justeringsring, (6) vattentät bussning,  
 (7) kabel och (8) anslutning till stänger  
 (ur De Ruiter, 1971)

Point of the electric static penetrometer, type Fugro  
 (1) Conical point ( $10 \text{ cm}^2$ ), (2) load cell, (3) strain gauges,  
 (4) friction sleeve, (5) adjustment ring, (6) water-proof  
 bushing, (7) cable and (8) connection with rods  
 (from De Ruiter, 1971)

35, 65 och 85 cm från konen. Härvid framkom, att mantelfriktionen är störst omedelbart ovanför spetsen och att den minskar påtagligt när avståndet blir större än ca 20 cm (jfr placeringen av Begemanns friktionsmantel). På ca 70 cm avstånd från konen var mantelfriktionen endast 20 - 40% av värdet omedelbart ovanför konen. När avståndet ökades ytterligare, kunde en tendens till ökad mantelfriktion märkas. Indikationen var dock mycket svag, eftersom den baserades på endast en mätpunkt. En annan viktig slutsats vid Fugros försök var att de nedåtriktade friktionskrafternas tillskott till det vertikala överlagringstrycket blev alltmer bestämmande för mantelfriktionens storlek och variation ju längre bort från konen manteln placerades. För att erhålla bästa möjliga underlag för tolkning av jordlagerföljd bedömdes det vara lämpligast att placera friktionsmanteln så nära spetsen som det rent praktiskt är möjligt, dvs motsvarande nuvarande praxis.

#### Trycksond, typ HBM

Vid Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) i Hamburg pågår f n utvecklingen av en elektronisk trycksond i samarbete med Byggnadsnämndens geotekniska avdelning i Amsterdam, Holland (ingenjör L. Kok). Denna trycksond är enligt uppgift utrustad för mätning av spetsmotstånd, lokal mantelfriktion (på en yta av  $400 \text{ cm}^2$ ), stånglutning samt porvattentryck på spetsnivån. Konens spetsvinkel är  $60^\circ$  och dess basdiameter 35,6 mm. Spetsmotstånd, porvattentryck och stånglutning mäts induktivt under det att mantelfriktionen mäts medelst trådtöjningsgivare. Övre gränsvärdet för spetsmotståndet uppges vara 50 kN, för mantelfriktionen 125 kPa (motsvarande en kraft av 5 kN) och för porvattentrycket 500 kPa. Vidare kan stånglutningar av upp till  $25^\circ$  avvikelse från lodlinjen mätas i två mot varandra vinkelräta plan.

#### Statisk-dynamiska metoder

Jordlagerförhållandena i Mellaneuropa skiljer sig ganska avsevärt från vad som är normalt i Sverige. Ofta kan t ex mycket lösa jordlager överlagras av mycket fasta lager. För att förbättra trycksondens nedträngningsförmåga har därför metoder utvecklats, som medger omväxlande statisk och dynamisk sondering, s k statisk-dynamiska sonderingsmetoder.



### Andina-sonden

Den förmodligen mest avancerade metoden i detta sammanhang är av mekanisk typ och har lanserats och patenterats av Andina i Schweiz. Den förekommer sedan 1967 även i Frankrike genom Sopecaf Company i Lyons. Utrustningen är monterad på ett specialfordon, som enbart genom sin tyngd ger ett mothåll av 150 kN. Enligt ett förfarande som beskrivs närmare nedan utförs sonderingen (lastpåföringen) så långsamt att den kan jämföras med ett regelrätt belastningsförsök. Enligt ett andra förfarande tillämpas en konstant neddrivningshastighet av 2 cm/s.

Spetsen, som är konisk (fig. 17), har diametern 80 mm, dvs tvärsnittsytan  $50 \text{ cm}^2$ , spetsvinkeln  $90^\circ$  samt en speciell manteldel för mätning av lokal mantelfriktion (yta  $628 \text{ cm}^2$ ). Den egentliga spetsen utgörs av två spetsar, en central spets med diametern  $\varnothing 39 \text{ mm}$  ( $12 \text{ cm}^2$ ), som är fast förbunden med innerstängerna ( $\varnothing 35 \text{ mm}$ ), och en yttre koncentrisk spetsdel, som förstör den centrala spetsen utan att förändra dess form. Vid tryckning endast på innerstängerna, vilket blir aktuellt när 80 mm-spetsen inte kan drivas djupare, kommer den centrala 39 mm-spetsen att "lösgöras" från den större spetsen och sonderingen kan fortsättas tills motståndet blir för stort även för denna mindre spets. I detta läge kan man övergå till dynamisk sondering, varvid slagningen utförs med en 750 kg hejare, som får falla från 16 cm höjd. Nedträngningen per slag registreras automatiskt.

Med Andina-sonden kan spetsmotståndet mätas dels medan lasten långsamt påförs intill dess spetsen börjar röra sig (första skedet), dels under det skede när spetsen övergår från rörelse till vila (andra skedet). Dessa båda spetsmotstånd har visat sig vara i stort sett lika vid sondering i sand- eller grusavlagringar, under det att spetsmotståndet i leriga och siltiga jordar alltid är högre i första än i andra skedet.

Vid den statiska sonderingen med Andina-sonden kan mantelfriktionen längs friktionsmanteln bestämmas på mekanisk väg. För avläsning av sonderingsmotståndet finns en dynamometer avsedd för mätning av spetsmotstånd respektive totalmotstånd samt två dynamometrar för mätning av lokalt mantelmotstånd respektive totalt mantelmotstånd. En form av dubbelkontroll existerar genom möjligheten att läsa av de manometrar, som är anslutna till det hydrauliska systemet för domkrafterna använda för nedpressningen.

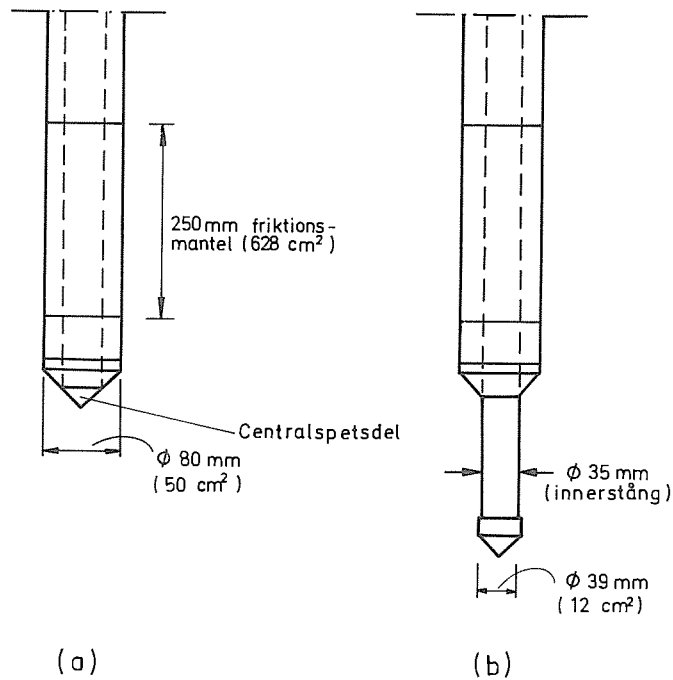


Fig. 17 Princip för användning av statisk-dynamisk sond, typ Andina  
 a) Vid normalt spetsmotstånd  
 b) Vid stort spetsmotstånd (spetsen kan även hejas ned)

Mode of using the static-dynamic penetrometer, type Andina

a) At normal cone resistance

b) At large cone resistance (the cone can also be hammered down)

### Summary

The article describes the most important static penetration methods used at present both in Sweden and abroad. The old Dutch cone penetration method, commonly regarded as the prototype for the further developments of penetrometers, is described more in detail.

The basic research in Sweden started in the beginning of 1940 but the main contributions have been made during the last two decades. Today three lines of concepts are followed by the manufacturers. The most common static penetrometer in Sweden is a mechanical device, type Nilcon, which is supplied with an axial play just above the point. This play makes it possible to separate the skin friction from the cone resistance at desired levels. Another Swedish mechanical penetrometer evaluating the point resistance was developed by the Swedish Geotechnical Institute. A characteristic feature of this method is that the rod is rotated during the penetration, while the ratio between the rotational and penetrating velocity is held constant. An electric penetrometer developed by Borros AB measures the point resistance by means of a number of strain gauges located in the point. The strain gauges are connected to an amplifier and a recording unit at the ground surface. More recently a so-called acoustical penetration method has been developed by Geotech AB. Signals from the point are here, after amplification, transmitted wirelessly to the receiver unit at the ground surface. This latter method is described in a separate article (by P. Jonell).

The foreign penetrometers described herein are: (1) The Dutch penetrometer including the Begemann friction jacket cone and the special point used in Belgium for the Dutch penetrometers; (2) the Haefeli-Fehlmann penetrometer; (3) the Maihak (Degebo) electric penetrometer (vibrating strings); (4) the Fugro electric penetrometer, which measures both point resistance and "local friction" by means of strain gauges; and (5) an electric penetrometer under development by Hottinger Baldwin Messtechnik in Hamburg. Furthermore (6) the static-dynamic penetrometer, type Andina, is described.

Referenser

DE RUITER, J. , 1971. Electric penetrometer for site investigations.

J. Soil Mech. a. Found. Div. Proc. ASCE, Vol. 97, No. SM2, p. 457-472.

DIN 4094, 1964. Baugrund. Ramm- und Drucksondiergeräte. Abmessungen und Arbeitsweise der Geräte. Bl. 1, Mai 1964.

SANGLERAT, G. , 1972. The penetrometer and soil exploration. Interpretation of penetration diagrams - theory and practice. Elsevier Publ. Co. Amsterdam, p. 1-91.

## TOLKNING AV TRYCKSONDERINGSRESULTAT

Överdirektör Bengt B. Broms, Statens Geotekniska Institut

### Inledning

Trycksondering, som är en statisk sonderingsmetod liksom viktsondering, används i relativt stor utsträckning i Sverige, främst vid översiktliga undersökningar för att uppskatta jordlagerföljd, de olika lagrens utsträckning och homogenitet samt för att få en uppfattning om jordens fasthet. Undersökningarna kompletteras som regel med provtagning för att fastställa jordlagrens sammansättning, hållfasthet och deformationsegenskaper. En stor fördel med trycksondering i jämförelse med många andra sonderingsmetoder är att man erhåller en automatisk kontinuerlig registrering av sondmotståndet. Om mantelfriktionsmätning utförs samtidigt, så att spetsmotståndet kan särskiljas, vilket behandlas i det följande, ökas möjligheten att avgöra jordlagrens sammansättning. I Mellaneuropa brukas trycksondering framförallt vid detaljundersökningar i främst friktionsjord. Sonderingsresultaten används där i huvudsak vid beräkning av plattors och pålars brottslast och sättning.

En översikt av olika sonderingsmetoder och tolkningen av försöksresultaten ges i "The Penetrometer and Soil Exploration" av Sanglerat (1972) och i "Dynamic and Static Sounding of Soils in Engineering Geology" av Bondarik (1967). I den senare boken summeras främst rysk erfarenhet. Svenska erfarenheter med trycksondering har sammanfattats bl a av Kallstenius (1969) och Bergdahl (1969) och norska erfarenheter av Andresen (1969). Föreliggande uppsats, som delvis bygger på studier av ovanstående två böcker och annan litteratur, ger en översikt av trycksonderingens användning vid bedömning av plattors och pålars bärförmåga jämte utvärdering av sättningar.

### Trycksondering i friktionsjord

Vid trycksondering i friktionsmaterial med konstant relativ lagringstäthet ökar det specifika spetsmotståndet med djupet under markytan ned till ett visst kritiskt

djup såsom påvisats bl a av Kerisel (1961) och Vesič (1964). Försök har visat att det kritiska djupet bl a ökar med ökad relativ lagringstäthet. Det kritiska djupet torde emellertid även påverkas av friktionsjordens gradering och kornstorlek. Dessutom inverkar spetsdiametern hos sonden.

Under det kritiska djupet är spetsmotståndet i stort sett konstant och oberoende av djupet och av spetsdiametern såsom visas i fig. 1. Spetsmotståndet påverkas där av förutom jordens relativa lagringstäthet även av överlagringstrycket, jordens deformationsegenskaper, det ursprungliga spänningstillståndet och de enskilda jordpartiklarnas hållfasthet. (När spetsmotståndet i sand överstiger ca 10 à 20 MN/m<sup>2</sup>, börjar sandpartiklarna att krossas vid sondspetsen.) Schultze & Melzer (1965) rapporterar att överlagringstrycket har en relativt stor inverkan på sondmotståndet. Försök har vidare visat att det ej råder något enkelt samband mellan relativ lagringstäthet och sondmotstånd såsom påpekats exempelvis av Muhs (1966). Kahl et al. (1968) rapporterar att vid samma relativa lagringstäthet är sondmotståndet högre för ensgraderad (sorterad) än för välgraderad (osorterad) friktionsjord utom när den relativa lagringstätheten är hög ( $D_r > 0,75$ ).

Vid sondens nedträngning under det kritiska djupet packas jorden kring sonden, varvid jordens volym minskar. Jorden intill sondspetsen rör sig därvid i huvudsak nedåt och i sidled. Volymminskningen svarar mot sondspetsens och sondstängens totala volym under markytan. Över det kritiska djupet rör sig jorden däremot även uppåt mot markytan. Därigenom får jordens deformationsegenskaper större inverkan på sonderingsmotståndet under det kritiska djupet än över detta.

Den ryske forskaren Durante (Bondarik, 1967) har i sand undersökt inverkan av överlagringstrycket på det kritiska djupet och på sonderingsmotståndet. Sondring med en dynamisk sonderingsmetod utfördes efter det att sanden schaktats bort till 10 m djup. Detta resultat jämfördes med sonderingsmotståndet före avschaktningen. Durante fann att sonderingsmotståndet efter avschaktning minskade kraftigt närmast den avschaktade ytan ned till ca 40 cm djup. Därunder svarade sondmotståndet mot det som uppmättes före avschaktningen på samma nivå. Samma effekt torde föreligga vid trycksondering. Liknande resultat har för viktsondering rapporterats av Dahlberg (1972).

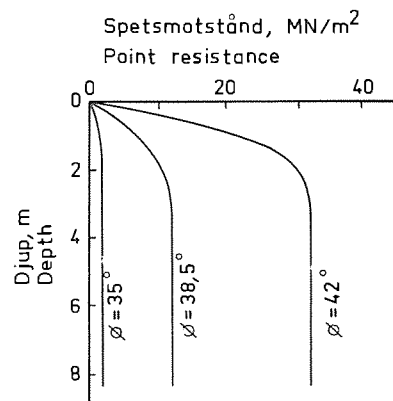


Fig. 1 Spetsmotståndet vid sondering i sand vid olika relativ lagringstäthet (efter Kerisel, 1957)

Penetration resistance in sand at different relative density (after Kerisel, 1957)

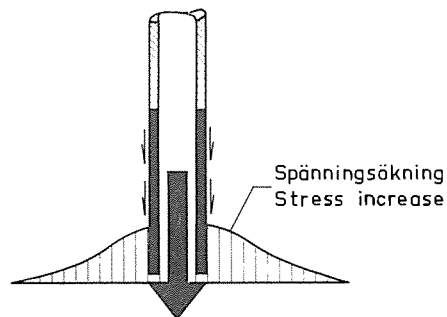


Fig. 2 Spänningsökning från friktionshylsa vid sondspetsens nivå (efter Raedschelders, 1961)

Stress increase caused by friction sleeve located at the level of the sounding cone (after Raedschelders, 1961)

Grundvattenytans läge påverkar sonderingsmotståndet såsom påpekats av Schultze & Melzer (1965). När grundvattennivån passerades, observerade de att sonderingsmotståndet minskade. Liknande observationer har även gjorts av Weiss (1964). Skillnaden i sondmotstånd mellan fuktig och vattenmättad sand minskade med ökat överlagringstryck och ökad relativ lagringstäthet.

Geuze (1953) har undersökt penetrationshastighetens inflytande på sondmotståndet i sand. Maximalt uppskattades denna inverkan till ca 7% vid en tiofaldig ökning av penetrationshastigheten. Kerisel (1961) och Jezequel (1969) rapporterar att penetrationshastigheten ej hade någon inverkan i sand över grundvattenytan. Under grundvattenytan sjönk däremot sondmotståndet med ca 20% när nedtryckningshastigheten ökade tio gånger. Vad som kan ha orsakat denna minskning av sonderingsmotståndet är ej angivet. Det är möjligt att de höga porvattenövertryck som erhålls när lagringstätheten är låg kan ha inverkat.

Enligt Eide (1956) kan lagringstätheten för sand uppskattas ur resultaten från trycksondering enligt följande tabell.

Tabell 1. Samband mellan lagringstäthet och spetsmotstånd (efter Eide, 1956)

Lagringstäthet	Spetsmotstånd MN/m <sup>2</sup>	(kp/cm <sup>2</sup> )
Mycket löst lagrad	< 2,5	(< 25)
Löst lagrad	2,5- 5,0	(25- 50)
Medelfast lagrad	5,0-10,0	(50-100)
Fast lagrad	10,0-20,0	(100-200)
Mycket fast lagrad	>20,0	(>200)

Meyerhof (1956) har för sand angivit följande samband mellan lagringstäthet ( $D_r$ ), sondmotstånd vid resp. SPT-försök ("Standard Penetration Test"), N-tal, trycksondering (holländsk sond) och materialets inre friktionsvinkel ( $\phi$ ).



Tabell 2. Samband mellan lagringstäthet, sondmotstånd och inre friktionsvinkel (efter Meyerhof, 1956)

Lagring	Relativ lagringstäthet $D_r$	Sonderingsmotstånd vid SPT-försök, slag/30,5 cm (12")	Spetsmotstånd vid trycksondering $q_2$ MN/m <sup>2</sup> (kp/cm <sup>2</sup> )	Inre friktionsvinkel, $\phi$ , grader	
Mycket lös	<0,2	<4	<2,0	(<20)	<30
Lös	0,2-0,4	4-10	2,0-4,0	(20-40)	30-35
Normal	0,4-0,6	10-30	4,0-12,0	(40-120)	35-40
Fast	0,6-0,8	30-50	12,0-20,0	(120-200)	40-45
Mycket fast	>0,8	>50	>20,0	(>200)	>45

För siltig sand bör den inre friktionsvinkeln enligt Meyerhof minskas med 5 grader medan den för sandigt grus bör ökas med 5 grader. Senare undersökningar har emellertid visat att spetsmotståndet ej enbart påverkas av jordens relativa lagringstäthet och inre friktionsvinkel. Försiktighet bör således iakttagas när de av Meyerhof föreslagna sambanden används vid beräkning av exempelvis plattors och pålars bärförmåga. En indelning som liknar dem som diskuteras av Eide och Meyerhof enligt ovan har föreslagits av Kahl & Muhs (1952).

En viktig faktor som inverkar på utvärderingen av relativ lagringstäthet är det höga horisontaltryck som erhålls i jorden vid packning och vid förbelastning. Detta medför att sondmotståndet i ett sådant material vid samma relativa lagringstäthet blir högre än i naturligt lagrad och ej förbelastad jord. Denna skillnad är av stor betydelse bl a vid packningskontroll i fält.

#### Trycksondering i kohesionsjord

Trycksondering är ej särskild väl lämpad till att bestämma kohesionsjords skjuvhållfasthet. Som regel kan endast en grov uppskattning göras. Det registrerade sondmotståndet blir ofta alltför lågt, vilket gör bestämningen osäker om ej en spets med stor area används. Dessutom har försök visat att sådana faktorer som nedtryckningshastighet, spetsens form och lerans sensitivitet påverkar sonderingsmotståndet.

Jezequel (1969) har i lera undersökt bl a nedtryckningshastighetens inverkan på

sondmotståndet (spetsmotståndet). Detta motstånd ökade i lös lera med upp till 35 à 45% när nedtryckningshastigheten ökade tio gånger från 0,6 m/min till 6 m/min. För fast lera var ändringen obetydlig. Thomas (1965) fann dock att penetrationsmotståndet för den fasta s k Londonleran ökade något med ökad penetrationshastighet. Vid försök utförda av Ladanyi & Eden (1969) i lös lera med hög sensitivitet erhöles en genomsnittlig ökning av 7,5% vid en tiofaldig ökning av nedtryckningshastigheten.

Sanglerat (1972) anger att spetsvinkeln hos sondspetsen har betydelse endast när spetsmotståndet är mindre än  $2 \text{ MN/m}^2$ . Thomas (1965) har funnit att spetsens diameter i förhållande till stångdiametern har relativt stor inverkan på sondmotståndet. Han har rapporterat att det specifika spetsmotståndet i relativt fast lera blir lägre om spetsdiametern är större än stångdiametern än om den är lika med stångdiametern. Kallstenius (1969) påpekar att det uppmätta spetsmotståndet för lös lera till och med kan bli negativt om tung borrhväska används vid sondering och spetsdiametern är större än stångdiametern.

För kohesionsjord visar försök att spetsmotståndet  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$  normalt varierar mellan  $10 c_u$  och  $20 c_u$ , där  $c_u$  är lerans skjuvhållfasthet under odränerade förhållanden (extremvärden  $5 c_u$  resp.  $25 c_u$ ). Ett genomsnittsvärde representerar sambandet  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}} = 15 c_u$  (Sanglerat, 1972). För Londonlera fann Thomas (1965) att  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}} = 18 c_u$ . Meigh & Corbett (1970) erhöles värdet 16 på kvoten  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}}/c_u$ , när sonderingsresultaten jämfördes med resultaten från vingborrförsök.

Kerisel & Adam (1969) rapporterar ett spetsmotstånd som för halvfast lera och silt var  $12 c_u$  till  $15 c_u$ , medan motståndet för mycket fast lera var  $35 c_u$ . Kallstenius (1969) fann att spetsmotståndet i lös lera i genomsnitt motsvarade  $15 c_u$  och att bärfaktorn  $N_c$  (kvoten  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}}/c_u$ ) sjönk med ökad spetsdiameter och med ökad mantellängd. Vid Kallstenius undersökningar bestämdes skjuvhållfastheten genom konförsök. Vid lera med hög sensitivitet kan sondmotståndet emellertid vara betydligt mindre än de ovan angivna värdena (Ladanyi & Eden, 1969). Värdet på bärfaktorn  $N_c$  varierade vid dessa försök mellan 5,5 och 8.

Försöksresultaten, rapporterade exempelvis av Kerisel & Adam (1969), visar att kvoten  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}}/c_u$  tenderar att öka med ökad skjuvhållfasthet. Denna ökning är troligen främst beroende av svårigheter att bestämma den odränerade skjuvhållfastheten  $c_u$ . Den skjuvhållfasthet som erhåles exempelvis ur enaxliga tryckförsök på laboratoriet blir ofta alltför låg vid hög skjuvhållfasthet beroende på att leran innehåller sprickor. Vid enaxliga tryckförsök följer brottytan sådana

sprickor i provet. Sprickornas orientering och antal har därvid stor inverkan. Vid trycksondering sker brottet längs en påtvingad brottyta vars läge ej i någon större utsträckning påverkas av förekomsten av sprickor. Därvid blir det ospruckna lermaterialets hållfasthet avgörande för sondmotståndet.

Det teoretiska värdet på bärfaktorn  $N_c$  baserad på plasticitetsteorin och således på kvoten  $q_{spets}^{stat}/c_u$  är 9,0. Det relativt höga värdet som erhålls från sonderingsförsök ( $q_{spets}^{stat} = 15 c_u$ ) kan delvis förklaras av att deformationshastigheten vid sondering är ca 100 gånger högre än den som gäller normalt vid vingborrförsök (Meigh & Corbett, 1970). Dessa författare påpekar dessutom det faktum att adhesionen längs sondens mantelyta mellan sondspetsen och den punkt där spetsmotståndet mäts, eller längs den "krage" som finns på vissa sondspetsar, påverkar det beräknade nominella spetsmotståndet. Denna effekt är speciellt stor vid holländsk trycksond.

#### Samband mellan spetsmotstånd och mantelmotstånd

Olika metoder finns för att särskilja spetsmotstånd från mantelfriktion i friktionsjord eller från mantelkohesion i kohesionsjord. Ett intensivt utvecklingsarbete pågår i Sverige i denna fråga. Mantelmotståndet kan mätas antingen längs hela sondstången eller lokalt intill sondspetsen. Mätningen kan ske i en speciell mätdel (friktionshylsa).

Vid trycksond typ Nilcon, som är försedd med glappkoppling intill spetsen, bestäms mantelmotståndet som utvecklas längs hela sondstången genom att man på provningsdjupet först drar upp sondstången en viss sträcka och sedan mäter den kraft som fordras för att återigen trycka ned stången till föregående nivå. I de flesta fall torde uppdragningen förorsaka en minskning av mantelmotståndet på grund av den ökade omrörningen i kohesionsjord och det ökade hålrummet runt sondstången på grund av packningen i friktionsjord. I en del fall kan dock mantelmotståndet öka på grund av den temporära uppdragningen, eftersom man i vissa fall efter avdrag för mantelmotstånd kan erhålla ett negativt spetsmotstånd. Vanligtvis används dock ej mantelmotståndet vid utvärderingen av trycksonderingsresultaten.

Vid trycksond typ SGI roteras sondstången samtidigt som den trycks ned. Genom att mäta det vridande moment som erfordras för att rotera sondstången

är det möjligt att utvärdera mantelfriktionen. Spetsmotståndet registreras automatiskt med hjälp av en mekanisk skrivare som en funktion av djupet. Maximal neddrivningskraft är 10 kN.

Mantelmotståndet intill sondspetsen kan vid holländsk trycksond bestämmas med hjälp av en särskild friktionshylsa, som är placerad ovanför spetsens kragformade del. Mantelfriktionen bestäms genom att först trycka ned spetsen varvid spetsmotståndet mäts. Därefter trycks spetsen och friktionshylsan ned samtidigt och summan av mantelmotstånd och spetsmotstånd mäts. Mantelmotståndet antas motsvara skillnaden mellan de två mätningarna. Detta förfarande påverkar emellertid det beräknade mantelmotståndet.

Trycks hylsa och spets ner samtidigt, blir nämligen spetsmotståndet som regel högre än om de trycks ner var för sig. Mantelfriktionen längs hylsan ökar nämligen överlagringstrycket vid spetsens nivå och därmed spetsmotståndet såsom illustreras i fig. 2 (Raedschelders, 1961). Sanglerat (1972) har uppskattat ökningen av spetsmotståndet till 8 à 10% när friktionshylsa och spets trycks ner samtidigt. Dessa resultat pekar på att mantelmotståndet överskattas med det förfarande som tillämpas i Holland.

Under senare år har utvecklats trycksonder där spetsmotståndet och mantelmotståndet mäts separat intill sondspetsen med hjälp av trådtöjningsgivare. Ett exempel på en sådan trycksond är den som har utvecklats av Borro AB.

Förutom de ovannämnda sonderna finns en holländsk (Fugro) och en fransk (Andina) trycksond där mantelmotståndet mäts separat. Vid den senare sonden mäts mantelmotståndet med hjälp av en separat belastningsring (Sanglerat, 1972).

Mätningar visar att mantelmotståndet i sand är som regel störst alldeles ovanför sondspetsen. Det specifika mantelmotståndet minskar i de flesta fall allteftersom sonden tränger ned i jorden. Denna minskning kan bero på att sondhålet förstoras något under nedtryckningen genom att sondstången ofta är något krokig. I extremfall kan även det totala mantelmotståndet minska med ökat djup beroende på att exempelvis en sten framför sondspetsen följer med vid sonderingen och förstorar sondhålet. Ett sätt att minska stångfriktionen och att öka nedträngningen av sonden samt att underlätta mätningen av mantelmotståndet närmast sondspetsen är att på jämna avstånd punktvis öka stångdiametern så att borrhålet förstoras.

Mäthylsans placering i förhållande till spetsen påverkar mantelfriktionen intill ett avstånd som är beroende bl a av jordens inre friktionsvinkel. För att få jämförbara värden på mantelfriktionen bör denna mätas alldeles intill sondspetsen. På detta sätt skulle erfarenhet som tidigare erhållits med bl a holländsk sond kunna utnyttjas vid utvärdering av försöksresultaten.

I fig. 3 visas hur mantelfriktionen vid holländsk sond varierar vid olika jordmaterial och spetsmotstånd (Begemann, 1965 a). Man kan se att mantelfriktionen minskar i förhållande till spetsmotståndet ju grövre jordmaterialet är. Genom att samtidigt mäta spetsmotstånd och mantelfriktion är det således möjligt att bedöma sammansättningen av jordmaterialet intill sondspetsen. De av Begemann angivna sambanden kan emellertid endast användas för naturligt avlagrade jordar under grundvattenytan.

Jämförelser av Sanglerat (1972) med belastningsförsök har dessutom visat att de samband som angivits av Begemann (1965 a) för sand och grus är ca 50% för höga för att direkt kunna användas för att beräkna pålars bärförmåga.

Enligt Sanglerat (1972) gäller följande samband mellan jordart, sondmotstånd och kvoten mellan mantelmotstånd och spetsmotstånd.

Tabell 3. Samband mellan spetsmotstånd, mantelfriktion och jordmaterialets sammansättning (efter Sanglerat, 1972)

Spetsmotstånd, $q_{spets}^{stat}$ (MN/m <sup>2</sup> )	$q_{spets}^{stat}$ (kp/cm <sup>2</sup> )	Mantelmotstånd/ spetsmotstånd $f_{mantel}^{stat}/q_{spets}^{stat}$	Jordart
< 3,0	< 30	< 0,001	Löst lagrat grus
> 3,0	> 30	> 0,006	Sand med snäckskal
> 3,0	> 30	0,006-0,02	Sand och grus
> 3,0	> 30	0,02 -0,04	Siltig sand, sandig silt, lerig sand och silt
> 3,0	> 30	0,04 -0,08	Lera
< 0,6	< 6	> 0,06	Organisk lera, torv, gyttja och dy

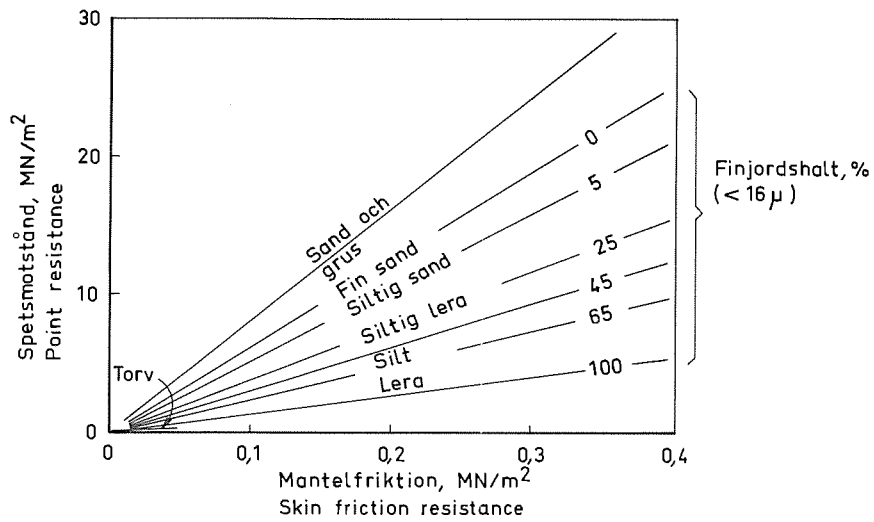


Fig. 3 Samband mellan spetsmotstånd och mantelfriktion vid holländsk sond vid olika jordmaterial (efter Begemann, 1965)

Relationship between point resistance and skin friction resistance for the Dutch cone penetrometer (after Begemann, 1965)

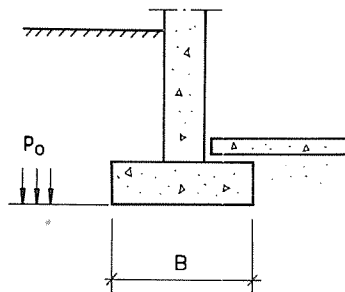


Fig. 4 Definition av överlagringstryck och plattbredd  
Definition of overburden pressure and slab width

Man kan se ur denna tabell att kvoten  $f_{\text{mantel}}^{\text{stat}}/q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$  ökar med minskad kornstorlek. Ovanstående indelning kan emellertid ej användas vid lera eller silt när dessa jordars sensitivitet är hög.

Vesič (1967) rapporterar att kvoten  $f_{\text{mantel}}^{\text{stat}}/q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$  varierar för sand mellan 0,006 och 0,0165. Schmertmann (1970) erhöi för sand värden mellan 0,005 och 0,020. Schmertmann (1970) har föreslagit följande utvärdering.

Tabell 4. Variation av  $f_{\text{mantel}}^{\text{stat}}/q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$  vid olika relativ lagringstäthet (efter Schmertmann, 1970)

Sand	Lös	Normal	Fast
Relativ lagringstäthet ( $D_r$ )	0,3	0,6	0,9
Jordtryckskoefficient (K)	1	2	4
Sondmotstånd, MN/m <sup>2</sup> ( $q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$ )	2	8	22
Mantelfriktion, MN/m <sup>2</sup> ( $f_{\text{mantel}}^{\text{stat}}$ )	0,033	0,067	0,075
$f_{\text{mantel}}^{\text{stat}}/q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$	1/60	1/120	1/165

Emellertid påverkar friktionshylsans utformning förhållandet mellan mantelfriktion och spetsmotstånd såsom framhållits tidigare.

#### Dimensionering av plattor med hjälp av trycksonderingsresultat

Trycksondering används i Mellaneuropa i stor utsträckning vid dimensionering av plattor och pålgrundläggningar. Det är rimligt att trycksondering borde kunna användas även i Sverige för att uppskatta sättningar av plattor och pålgrupper grundlagda på friktionsjord.

Vid dimensionering av plattor liksom av pålgrupper skall grundkonstruktionen dels uppfylla kravet att säkerheten mot brott (kollaps) är tillräckligt hög och att sättningarna vid normala belastningsfall ej blir så stora att den ovanliggande

konstruktionen skadas. Normalt väljs en säkerhetsfaktor lika med 3,0 med avseende på grundkonstruktionens brottsäkerhet. Vid grundläggning på plattor blir dock som regel de sättningar som kan tillåtas vid normala belastningsfall utslagsgivande vid dimensioneringen när plattbredden är större än ca 1 m.

Vid beräkning av tillåten grundpåkänning (tillåtet grundtryck) för plattor på sand tillämpas i Kanada i vissa fall den grova tumregeln

$$q_{\text{till}} = \frac{1}{16} \cdot q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$$

Enligt Sanglerat (1972) kan man vid dimensionering av plattor på sand tillåta ett betydligt högre grundtryck än det ovan angivna värdet. Sanglerat rekommenderar ett tillåtet grundtryck som är en tiondel av spetsmotståndet vid statisk sondering, dvs

$$q_{\text{till}} = \frac{1}{10} q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$$

Ovanstående samband kan enligt Sanglerat även användas för fast lera och sandig lera.

Sanglerat anger även den tumregeln att sättningar ej utgör något problem när spetsmotståndet  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}} > 1,2 \text{ MN/m}^2$ . Man bör emellertid vara försiktig när man använder dessa grova tumregler utanför geografiska områden för vilka de har utvecklats, innan man fått tillräcklig erfarenhet om resp. metoders tillämpbarhet. Sanglerats tumregler torde emellertid ge en alltför hög tillåten påkänning såsom nämns i det följande.

#### Plattors brottlast

Plattors brottlast beräknas som regel ur den generella ekvationen (bl a Terzaghi, 1943; Meyerhof, 1951)

$$q_{\text{brott}} = K_c c N_c + K_\gamma \gamma B N_\gamma + K_q p_o N_q$$

där  $K_c$ ,  $K_\gamma$  och  $K_q$  är faktorer som är beroende av fundamentets form.  $N_c$ ,  $N_\gamma$  och  $N_q$  är bärfaktorer som är beroende av jordens inre friktionsvinkel  $\phi$ ,  $B$  är fundamentets bredd och  $p_o$  är överlagringstrycket vid grundläggningsnivån enligt fig. 4. Vid beräkning av tillåten grundpåkänning väljs vanligtvis en säkerhetsfaktor med avseende på brottlasten som är lika med 3,0.



För friktionsjord ( $c=0$ ) förenklas ovanstående ekvation till

$$q_{\text{brott}} = K_{\gamma} \gamma B N_{\gamma} + K_q p_o N_q$$

Muhs & Weiss (1971) rapporterar för finsand, mellansand och grusig sand följande samband mellan bärfaktorerna  $N_{\gamma}$  och  $N_q$  och sondmotståndet  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$  ( $\text{MN/m}^2$ )

$$N_{\gamma} = 6,3 q_{\text{spets}}^{\text{stat} -5} \quad \text{och}$$

$$N_q = 5,9 q_{\text{spets}}^{\text{stat} -1}$$

Spridningen i försöksresultaten var relativt liten troligen främst beroende på att endast några få jordmaterial har undersökts. De av Muhs och Weiss angivna sambanden bör därför användas med försiktighet och endast för grova överslagsberäkningar om de tillämpas på andra jordmaterial än de som undersökts.

De Beer (1963) har framhållit den minskning av jordens inre friktionsvinkel och av brottlasten som sker när belastningen överstiger ca  $10 \text{ MN/m}^2$  och jordpartiklarna börjar krossas. Denna minskning är av betydelse vid utvärdering av bärfaktorerna  $N_{\gamma}$  och  $N_q$ .

För kohesionsjord ( $\phi = 0$ ) erhålls följande samband eftersom  $N_{\gamma} = 0$ ,  $N_q = 1,0$  och  $K_q = 1,0$

$$q_{\text{brott}} = K_c c_u N_c + p_o$$

För en kvadratisk platta ( $K_c = 1,3$ ) och en säkerhetsfaktor lika med 3,0 förenklas ovanstående ekvation till

$$q_{\text{till}} = 2,3 c_u + p_o$$

och för en långsträckt platta ( $K_c = 1,0$ ) till

$$q_{\text{till}} = 1,9 c_u + p_o$$

Jordens odränerade skjuvhållfasthet  $c_u$  erhålls ur sambandet

$$c_u = \frac{1}{15} q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$$

där  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$  är det genomsnittliga sondmotståndet mellan grundläggningsnivån och ett djup under denna nivå som motsvarar  $2B$ , där  $B$  är plattbredden. Eftersom

sambandet mellan sondmotstånd och skjuvhållfasthet är osäkert blir även beräkningen av brottlasten osäker när det ovannämnda sambandet används.

### Plattors sättningar

En plattas sättning beräknas som regel genom att man delar in jorden under plattan i snitt. Därefter uppskattas sättningen för varje snitt från den beräknade spänningsökningen i jorden enligt Boussinesqs spänningsekvation och från jordens kompressionsmodul. Kompressionsmodulen erhålls ur resultaten från trycksondering, kompressometerförsök enligt SGI, pressiometerförsök eller ödometerförsök. Vanligtvis bestäms kompressionsmodulen med flera olika metoder. Den bästa uppskattning av sättningarnas storlek i kohesionsjord erhålls som regel från ödometer- och pressiometerförsök. Resultaten från kompressometer- och pressiometerförsök blir osäkra för sand och grus under grundvattenytan. Denna osäkerhet förorsakas främst av svårigheter att erhålla ostörda prover för kompressometerförsöken och att foderrör eller borrhälska (bentonit) erfordras för att hålla borrhålet öppet, vilket kan påverka pressiometerresultaten. För sand och grus under grundvattenytan torde en sättningsberäkning baserad på resultat från trycksondering ge en bättre överensstämmelse med uppmätta sättningar än kompressometer- eller pressiometerförsök.

Det existerar för närvarande tre olika metoder för att beräkna sättningar i sand ur resultaten från sonderingsförsök, nämligen Meyerhofs metod, Buisman-De Beers metod och Schmertmanns metod.

Meyerhofs metod. Denna metod (Meyerhof, 1965) för beräkning av sättningar i friktionsjord baseras på det samband mellan grundtryck, sättning och resultat från Standard Penetration Test (SPT-försök) som föreslagits av Terzaghi & Peck (1948). Meyerhof utgår ifrån att  $q_{spets}^{stat} = 0,4 N$ , där  $q_{spets}^{stat}$  är spetsmotståndet ( $MN/m^2$ ) vid statisk sondering och  $N$  (antal slag/30,5 cm sjunkning) är sondmotståndet vid SPT-försök. Meyerhof föreslår följande ekvationer för beräkning av det tillåtna grundtryck som motsvarar en uppskattad största total-sättning av 2,5 cm och en uppskattad största sättningsskillnad av 1,8 cm:

$$q_{till} = \frac{q_{spets}^{stat}}{30} \text{ för } B \leq 1,2 \text{ m och}$$

$$q_{till} = \frac{q_{spets}^{stat} \left(1 + \frac{0,3}{B}\right)^2}{50} \text{ för } B > 1,2 \text{ m}$$

eller

$$q_{\text{till}} = \frac{q_{\text{spets}}^{\text{stat}}}{40} \quad \text{för plattor med normal bredd}$$

där  $B$  är plattbredden (m) och  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$  är det genomsnittliga spetsmotståndet från grundläggningsnivån ned till ett djup som motsvarar plattbredden  $B$ . Tillåtet grundtryck reduceras med 50% om grundvattennivån är belägen vid eller över grundläggningsnivån. Om grundvattennivån är belägen mellan grundläggningsnivån och ett djup  $1,5 B$  under grundläggningsnivån reduceras det tillåtna grundtrycket rätlinjigt.

Det är av intresse att jämföra de uttryck som föreslagits av Meyerhof med Sanglerats ovannämnda tumregel. Man kan se att den sistnämnda ger en tillåten grundpåkänning som är tre till fyra gånger större än den som erhålls enligt Meyerhofs mera noggranna beräkningsmetod. Det bör dock påpekas att Terzaghi och Pecks beräkningsmetod, som Meyerhofs metod grundar sig på, i genomsnitt ger en sättning som är ca 30% till 50% av den uppskattade maximala totalsättningen (2,5 cm). Jämförelser av Schmertmann (1970) mellan beräknade och uppmätta sättningar visar att sättningarna främst för små plattor överskattas enligt Meyerhofs beräkningsmetod, medan sättningarna för stora plattor kan underskattas. Sanglerats tumregel torde därför ge en alltför hög tillåten påkänning.

Buisman-De Beers metod. Vid beräkningar av sättningar i friktionsjord främst för löst lagrad sand utgår man i Holland och Belgien från den konventionella ekvationen

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_c}{1 + e_o} \log \left( \frac{\sigma'_o + \Delta \sigma'}{\sigma'_o} \right)$$

där  $(\Delta h/h)$  är jordens relativa hoptryckning,  $C_c$  och  $e_o$  är jordens kompressionsindex resp. portal,  $\sigma'_o$  och  $\Delta \sigma'$  är effektivtrycket före belastning resp. effektiva spänningsökningen. Denna ekvation kan omskrivas till

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{2,3}{C} \log \left( \frac{\sigma'_o + \Delta \sigma'}{\sigma'_o} \right)$$

där  $C$  är en koefficient som är lika med  $2,3 (1 + e_o)/C_c$ . När spänningsökningen  $\Delta \sigma'$  är liten i förhållande till  $\sigma'_o$ , kan ovanstående ekvation förenklas till

$$\frac{\Delta h}{h} = \Delta \sigma' / C \quad \sigma'_o = \Delta \sigma' / M$$

där  $M$  är den s k kompressionsmodulen. Ovanstående ekvation angavs först av Buisman (De Beer, 1967).

Vid sättningsberäkningar enligt Buisman-De Beers metod antas att spänningsfördelningen under en belastad platta är jämn. För en stel platta motsvarar medelsättningen den som beräknas för en böjlig platta med konstant kontaktryck i den karakteristiska punkten. Vidare bortses från de deformationer som erhålls under den nivå där spänningsökningen i jorden är mindre än 10% av det ursprungliga överlagringstrycket.

Buisman (De Beer, 1967) har föreslagit följande samband mellan kompressionsmodulen  $M$  och spetsmotståndet som är baserat på elasticitetsteorin

$$C \sigma'_o = M = 1,5 q_{spets}^{stat}$$

Även Verheyden (1955), De Beer & Martens (1957) och Webb (1970) har diskuterat det av Buisman föreslagna sambandet. Jämförelser av Meyerhof (1964) och Schmertmann (1970) visar att Buisman-De Beers metod överskattar sättningsstorlek med ca 100%. (Buisman-De Beers metod ger således resultat som ligger på den säkra sidan.) Det skulle vara möjligt enligt Meyerhof (1964) att öka det antagna värdet på kompressionsmodulen  $M$  från  $1,5 q_{spets}^{stat}$  till  $1,9 q_{spets}^{stat}$  utan att den maximala sättningen blir större än 2,5 cm.

Enligt Bachelier & Parez (1965), Gielly et al. (1970) och Sanglerat (1972) kan ovanstående ekvation för kompressionsmodulen omskrivas till

$$C \sigma'_o = M = \alpha q_{spets}^{stat}$$

där  $\alpha$  är en koefficient som är beroende av den omgivande jordens egenskaper.

Sanglerat har påpekat att koefficienten  $\alpha$  för  $q_{spets}^{stat} > 2 \text{ MN/m}^2$  i stort sett är oberoende av jordmaterialet. Sanglerat anger följande värden på koefficienten  $\alpha$  vid beräkning av plattors sättning vid en spänningsökning i jorden av ca  $100 \text{ kN/m}^2$ .

Tabell 5. Koefficienten  $\alpha$  vid olika jordmaterial (efter Sanglerat, 1972)

Jord	Sondmotstånd, $q_{spets}^{stat}$ MN/m <sup>2</sup>	Koefficienten $\alpha$
Lågplastisk lera	< 0,7	3 à 8
	0,7 à 2,0	2 à 5
	> 2,0	1 à 2,5
Lågplastisk silt	> 2,0	3 à 6
	< 2,0	1 à 2
Högplastisk lera och silt	> 2,0	2 à 6
	< 2,0	1 à 2
Sand	< 5,0	2
	> 10,0	1,5
Krita	2,0 à 3,0	2 à 4
	> 3,0	1,5 à 3

Försöksresultat publicerade av Bachelier & Parez (1965) och av Meigh & Corbett (1970) pekar på att de av Sanglerat angivna värdena på  $\alpha$  är av rätt storleksordning och att dessa kan användas för grova överslagsberäkningar. Stor försiktighet bör iaktas speciellt när dessa samband används vid lös lera eller silt särskilt om dessa jordar innehåller organiskt material.

Vesič (1970 a) har för friktionsjord föreslagit följande uttryck för kompressionsmodulen  $M$  som tar hänsyn till friktionsjordens relativa lagringstäthet och spetsmotståndet:

$$M = 2 (1 + D_r^2) q_{spets}^{stat}$$

Enligt detta uttryck varierar koefficienten  $\alpha$  från 2 för löst lagrad sand till 4 för fast lagrad sand.

Även Thomas (1968) har bl a funnit att det för torr sand finns ett klart samband mellan kompressionsmodul och sondmotstånd som är oberoende av överlagringstryck, partikelform och gradering. Försök utförda av Schultze & Melzer (1965) visar däremot att kompressionsmodulen förutom sondmotståndet även varierar med överlagringstrycket.

Muhs & Weiss (1971) anger följande samband mellan kompressionsmodulen  $M$  ( $\text{MN}/\text{m}^2$ ) och sondmotståndet  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$  ( $\text{MN}/\text{m}^2$ ) vid  $q_{\text{spets}}^{\text{stat}} > 3,0 \text{ MN}/\text{m}^2$ :

$$M = 26,5 + 28 q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$$

Van Wambeke (1962) har jämfört resultat från sonderingsförsök och pressiometerförsök. Kvoten kompressometermodul och sondmotstånd ( $E_p/q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$ ) var ca 2,3 för silt och 1,1 för sand. Jezequel & Goulet (1965) erhöll för sand ett värde på denna kvot som var 2,0.

Schmertmanns beräkningsmetod. Teoretiska beräkningar och försök har visat att deformationen i friktionsjord ej är störst omedelbart under en belastad platta såsom antas vid Buismans metod. Vid försök utförda exempelvis av Eggestad (1963) erhölls den största vertikala deformationen på ett avstånd under en belastad platta som motsvarade 75% av plattbredden. Försöken visade dessutom att deformationen för sand mer var beroende av skjuvspänningsökningen i jorden än av ökningen av det vertikala överlagringstrycket.

Sättningen  $\delta$  för en belastad platta kan enligt Schmertmann (1970) beräknas ur ekvationen

$$\delta = \int_0^{\infty} \epsilon_z dz \approx \Delta p \int_0^{2B} \frac{I_z}{M} dz \approx C_1 C_2 \Delta p \sum_0^{2B} \frac{I_z}{M} \Delta z$$

där  $I_z$  är en influensfaktor,  $\Delta p$  är belastningsökningen vid grundläggningsnivån samt  $C_1$  och  $C_2$  är koefficienter som tar hänsyn till överlagringstrycket vid grundläggningsnivån resp. krypning i jorden. Dessa två koefficienter erhålls ur ekvationerna

$$C_1 = 1 - 0,5 \frac{p'_0}{p}$$

där  $p'_0$  är det effektiva överlagringstrycket vid grundläggningsnivån före belastning och

$$C_2 = 1 + 0,2 \log \left( \frac{t}{0,1} \right)$$

där  $t$  är tiden efter belastning i år.

Schmertmann föreslår på grundval av belastningsförsök sambandet

$$M = 2 q_{spets}^{stat}$$

där  $q_{spets}^{stat}$  är det genomsnittliga sondmotståndet bestämt med holländsk sond från grundläggningsnivån ned till ett djup  $2 B$  under denna. Varierar sondmotståndet, indelas jorden under en platta först i olika snitt, varefter sättningen mellan två snitt uppskattas med hjälp av influensvärdet i fig. 5. Enligt Schmertmann (1970) behövs ingen korrektion göras för den belastade ytans form vid beräkning av sättningarna. Försöksresultat pekar nämligen på att plattformen ej har någon större inverkan på sättningarnas storlek i friktionsjord. Schmertmanns beräkningsmetod ger dock för stora sättningar vid förbelastad sand.

Schmertmanns metod liknar Buisman-De Beers metod genom att jordens kompressibilitet antas vara proportionell mot sondmotståndet. Den sättning som erhålls enligt Schmertmanns beräkningsmetod blir emellertid lägre än Buisman-De Beers metod eftersom ett högre värde används på kompressionsmodulen  $M$  och jordens deformation närmast den belastade plattan antas vara liten.

#### Dimensionering av pålar och pålgrupper med hjälp av trycksonderingsresultat

Trycksondering vid dimensionering av pålar har sedan 1940-talet använts i Holland (Huizinga, 1948 och 1951) och i Belgien (Verdeyen, 1953). Även i Sydafrika har metoden fått användning (Kantey, 1951) liksom i Turkiet (Artikoglu, 1961) och Jugoslavien (Bogdanović, 1961). Användning av statisk sondering i USSR för dimensionering av pålar har diskuterats av Shashkov (1965). En sammanfattning av beräkningsmetoder för pålar har gjorts av Broms (1965).

Statisk sondering används även vid bestämning av erforderlig pällängd i Holland, Belgien och Frankrike. I Holland har sondering också utnyttjats för att uppskatta motståndet under själva slagningen (van Weele, 1961). Nivå för pålstopp uppskattas i vissa fall där det totala sondmotståndet vid holländsk sond är ca 45 à 50 kN. Emellertid torde denna tumregel ge osäkra resultat när pällängden överstiger 12 à 15 m och mantelfriktionen svarar för en relativt stor andel av en påles bär-förmåga.

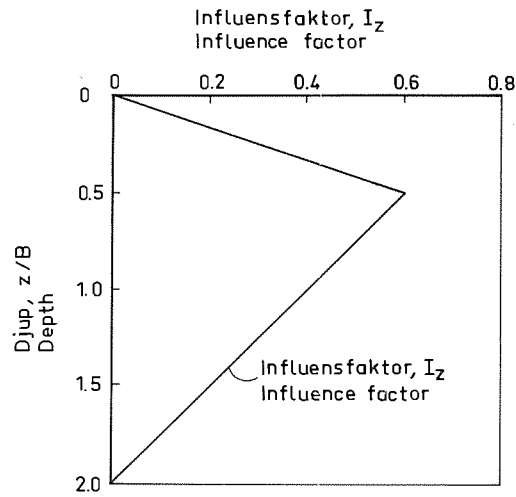


Fig. 5 Antagen influensfaktor (efter Schmertmann, 1970)  
Assumed influence factor (after Schmertmann, 1970)

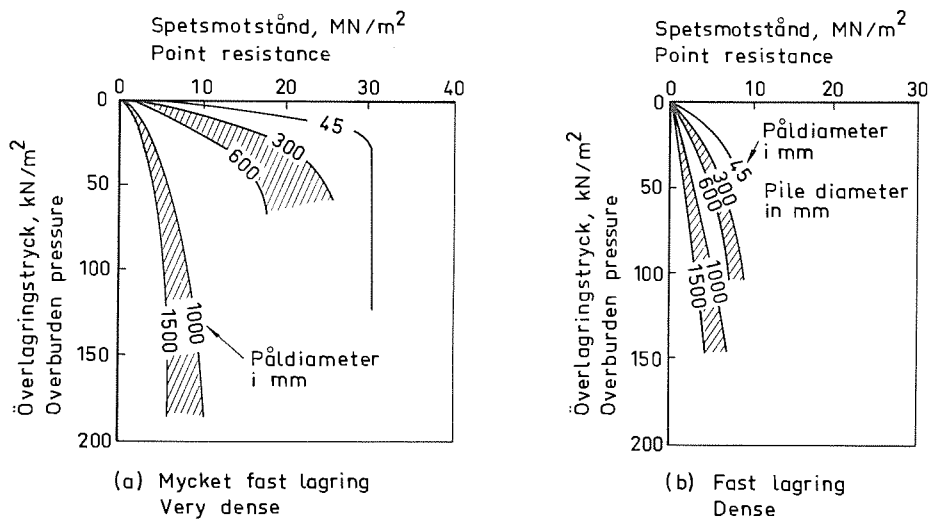


Fig. 6 Penetrationsmotstånd vid olika diameter och relativ lagringstäthet (efter Kerisel, 1957)  
Penetration resistance at different pile diameter and relative density (after Kerisel, 1957)



Det bör även observeras vid tillämpning av ovanstående grova tumregel att prefabricerade betongpålar i Sverige drivs i regel betydligt djupare och hårdare än vad som är vanligt på kontinenten. Pålarna drivs ned till sådana lager som normalt ej kan nås med trycksondering. Detta medför att statisk sondering vanligtvis ej används i Sverige till att uppskatta erforderlig pållängd.

### Pålars brottlast

Detaljerade undersökningar angående pålars bärförmåga har utförts av Kerisel (1957, 1961 och 1964), Kerisel & Adam (1969) och av Vesič (1963, 1964, 1970 a och 1970 b). Kerisel har undersökt bärförmågan hos pålar och sonder med olika diameter (35, 45, 110, 216 och 320 mm) medan Vesičs försök i huvudsak varit begränsade till pålar med 100 mm diameter. Vid både Kerisels och Vesičs försök mättes mantel- och spetsmotstånd separat.

I fig. 6, 7 och 8 visas spetsmotståndets variation vid sondering och pålning i friktionsjord vid varierande relativ lagringstäthet. Under ett visst kritiskt djup (ca 2 à 4 m för det visade fallet i fig. 8a) var spetsmotståndet konstant och oberoende av djupet under markytan. Vid fast lagrad sand uppnådde exempelvis Kerisel maximalt penetrationsmotstånd på 1,5 m djup ( $\phi = 45$  mm), medan det maximala spetsmotståndet för en påle med 300 mm diameter uppnåddes först på 15 m djup (fig. 6). Det kritiska djupet motsvarade ca 10 påldiametrar när sanden var löst lagrad och ca 20 påldiametrar när den var fast lagrad. En betydligt större inträngningslängd erfordras således för att uppnå ett gränsvärde om sanden är fast lagrad än om lagringstätheten är låg.

Hävning och sprickbildning erhålls vid belastning runt en påle när inträngningsdjupet är mindre än det kritiska. När det kritiska djupet överskrids, uppträder inga ytterligare förändringar vid ytan.

I fig. 9 visas brottzonens utsträckning längs en belastad påle när brott antas ske längs en spiralformad brottyta. Man kan se att brottzonens längd längs pålen ökar med ökad inre friktionsvinkel för den omgivande jorden. Vid  $\phi = 25^\circ$  motsvarar brottzonens utsträckning ca sex påldiametrar och vid  $40^\circ$  ca 21 påldiametrar. Brottzonens form och utsträckning har diskuterats bl a av l'Herminier (1953) och De Beer (1961).

Vid beräkning av spetsmotståndet för pålar i sand används i Holland det genom-

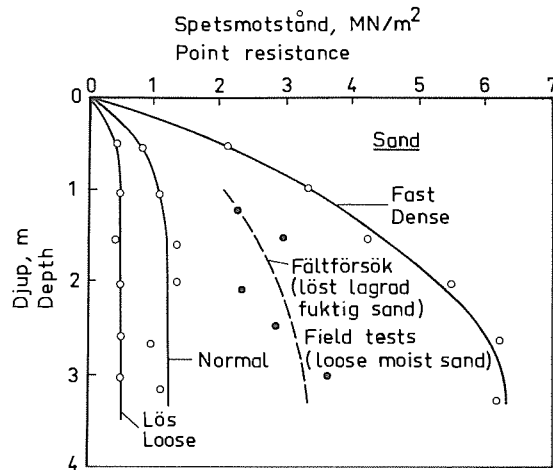


Fig. 7 Variation av spetsmotståndet vid varierande djup (efter Vesič, 1964)

Variation of point resistance of pile at different depths (efter Vesič, 1964)

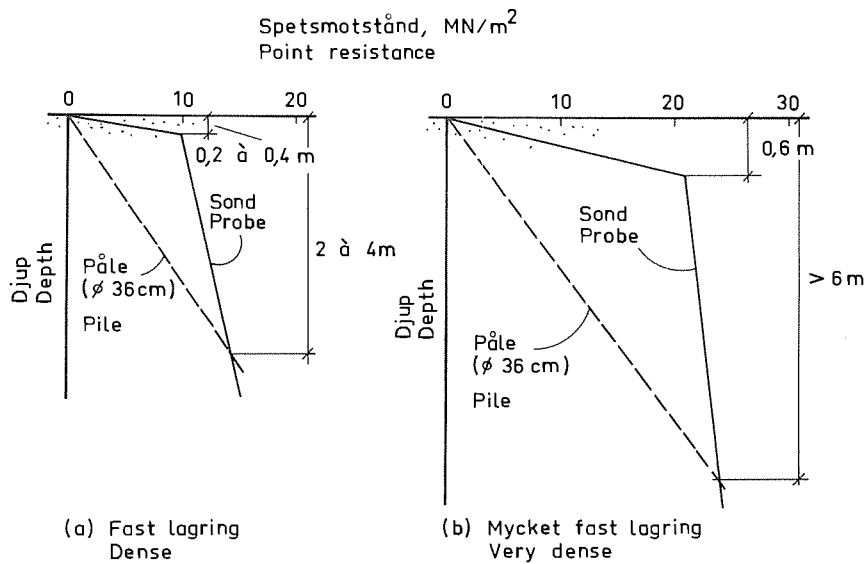


Fig. 8 Jämförelse mellan spetsmotstånd för påle och sondmotstånd (efter De Beer, 1961)

Comparison between the point resistance of a pile and penetration resistance (after De Beer, 1961)

snittliga sondmotståndet inom ett område som sträcker sig en påldiameter under pålspetsen och 3,75 påldiametrar över pålspetsens nivå (van der Veen & Boersma, 1957). En ytterligare faktor att beakta vid dimensionering av slagna pålar är den packning som sker under nedslagningen. Plantema & Nolet (1957) fann från försök med betongpålar i sand att slagningen hade förorsakat en packning ned till ca 1 m djup under pålspetsen. Motståndet vid sondering och spetsmotståndet för en påle visas i fig. 10 för ett skiktat material. Sondmotståndet ökar redan innan sonden tränger ned i det underliggande fastare materialet beroende på att brottytan i jorden sträcker sig ca 1,5 påldiametrar under pålspetsen. Weiss (1964) rapporterar en inverkan redan på 0,5 m avstånd över ett lösare skikt för en trycksond med 36 mm diameter.

På samma sätt påverkar ett ovanliggande lösare lager spetsmotståndet när sonden eller pålen har trängt ned i ett underliggande fastare lager beroende på att brottytorna når även ovanför pålspetsen. Denna effekt ökar med ökad sond- eller påldiameter. Variationer i lagringstäthet ger således upphov till större variationer i spetsmotstånd för en sond än för en påle beroende på skillnader i diameter.

Dimensionering av pålar slagna i friktionsjord sker i Holland som regel med hjälp av trycksondsresultat. Spetsmotståndet hos en påle antas därvid motsvara sondmotståndet. Vid beräkning av bärförmågan (brottlasten) bortser man som regel från mantelfriktionen. Val av säkerhetsfaktor har diskuterats bl a av van der Veen (1953). Normalt används en säkerhetsfaktor  $F = 2,0$  à  $2,5$  (Verheyden, 1955; van der Veen & Boersma, 1957).

Vid belastningsförsök med 25 pålar erhöll Huizinga (1948) en brottlast som varierade mellan 100% och 150% av sondmotståndet. Van der Veen & Boersma erhöll vid 15 belastningsförsök med pålar en brottlast varierande mellan 50 och 150%. Genomsnittsvärdet motsvarade det uppmätta sondmotståndet.

Skillnaden mellan pålars spetsmotstånd och sondmotståndet ökar med ökat sondmotstånd. Vid ett sondmotstånd lägre än  $7,5 \text{ MN/m}^2$  har Franx (1948) och Plantema (1948) rapporterat god överensstämmelse mellan sondmotstånd och pålars spetsmotstånd, medan en skillnad erhöles när sondmotståndet översteg detta värde. Kerisels undersökningar (Kerisel, 1961) visar att spetsmotståndet per ytenhet minskar med ökad spetsdiameter. Liknande resultat har rapporterats av van der Veen (1953).

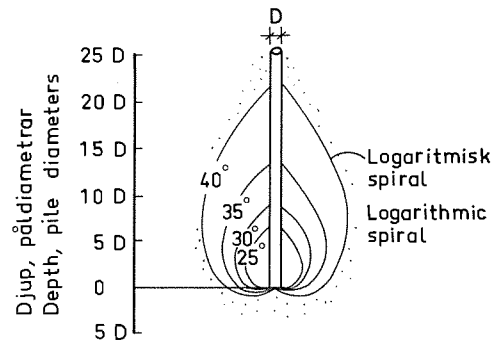


Fig. 9 Utsträckning av brottzon längs en belastad påle  
Extent of failure surface for a loaded pile

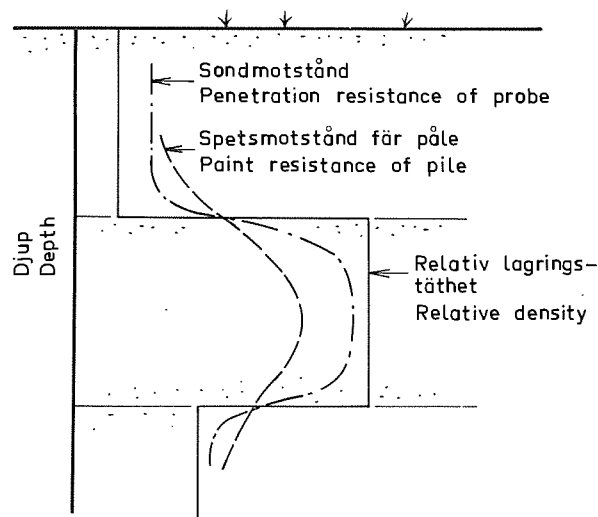


Fig. 10 Sondmotstånd och spetsmotstånd för påle vid skiktad jord  
Penetration resistance and point resistance of pile for stratified soil

Erfarenheterna från trycksondering i Tyskland för dimensionering av pålar är också gynnsamma. Petermann (1961) rapporterar god överensstämmelse mellan pålars bärförmåga och uppmätt sondmotstånd. Menzenbach (1961) har analyserat resultaten från 88 belastningsförsök med pålar och jämfört dessa med uppmätt sondmotstånd. De slagna pålarna befanns ha en något högre bärförmåga än platsgjutna pålar beroende på den packning som erhålls under nedslagningen av en påle. God överensstämmelse mellan resultat från sonderingsförsök och pålbärighet erhöles när sondmotståndet och pålarean var mindre än  $10 \text{ MN/m}^2$  resp.  $2\,000 \text{ cm}^2$ . Muhs (1961) rapporterar att spetsmotståndet för en påle vid fast och mycket fast lagrad sand ( $q_{\text{spets}}^{\text{stat}} > 18 \text{ MN/m}^2$ ) kan vara betydligt lägre än sondmotståndet.

Pellegrino (1961) rapporterar att resultaten från belastningsförsök på pålar slagna i jord av vulkaniskt ursprung (vulkanisk aska o dyl) och resultat från sonderingsförsök stämde väl överens främst över grundvattenytan. Också Jezequel & Goulet (1965) har funnit god överensstämmelse mellan pålbärighet och sonderingsmotstånd. Avvikelsen mellan uppmätt och beräknad brottlast var vid dessa försök 15 till 20%. Även Artikoglu (1961) rapporterar positiva erfarenheter mellan sondmotståndet bestämd med holländsk sond och pålars bärförmåga. Pålarna hade vid dessa försök slagits genom ett lerlager ned till ett underliggande sand- och gruslager. Goda erfarenheter med holländsk sond rapporteras även från Jugoslavien (Bogdanović, 1961).

Jämförelser av Meyerhof (1965) mellan mantelmotståndet hos en påle ( $f_{\text{mantel}}^{\text{påle}}$ ) och en sond ( $f_{\text{mantel}}^{\text{stat}}$ ) visar att kvoten varierar mellan omkring 1,25 och 3,0. Ett genomsnittsvärde representerar sambandet

$$f_{\text{mantel}}^{\text{påle}} = 2 f_{\text{mantel}}^{\text{stat}}$$

Begemann (1965 b) påpekar dock att mantelfriktionen för en påle i ren sand endast är 50% av den som uppmäts med friktionshylsan till den holländska trycksonden. Denna effekt är troligtvis förorsakad av friktionshylsans utformning och av hur mantelfriktionen beräknas, såsom påpekats i det föregående.

Belastningsförsök med pålar (Meyerhof, 1956) visar att

$$f_{\text{mantel}}^{\text{påle}} = 0,005 q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$$

där  $q_{spets}^{stat}$  är det genomsnittliga sondmotståndet från markytan ned till pålspetsens nivå. Spridningen i försöksresultat är stor varför det av Meyerhof föreslagna sambandet måste användas med försiktighet. Mohan et al. (1963) har emellertid funnit att mantelfriktionen för platsgjutna pålar kan vara så stor som ca 2% av det uppmätta spetsmotståndet vid trycksondering.

För platsgjutna Frankipålar, som allmänt används bl a i Brasilien, tillåts vanligtvis enligt Costa Nunes (1961) ett grundtryck  $q_{till} = q_{spets}^{stat}/6$  för sand och  $q_{till} = q_{spets}^{stat}/8$  för lera.

För kohesionsjord kan spetsmotståndet för en påle generellt beräknas ur ekvationen

$$q_{spets}^{påle} = cN_c + p_o$$

Normalt antas att  $N_c = 9$ . Försöksresultat visar emellertid att bärfaktorn  $N_c$  minskar något med ökad påldiameter.

Mantelkohesionen  $f_{mantel}^{påle}$  kan beräknas ur ekvationen

$$f_{mantel}^{påle} = \xi c_u$$

Koefficienten  $\xi$  är beroende av pålmaterialet, påltypen (slagen eller platsgjuten påle) och av pålformen (rak eller konisk) såsom diskuterats av bl a Broms (1965) och  $\xi$  minskar med ökad skjuvhållfasthet  $c_u$ .

### Pålars sättning

Pålars sättning i sand kan enligt Vesič (1967 och 1970 a) och Jezequel & Goulet (1965) uppskattas på liknande sätt som sättningen för plattor. Jorden under en påle indelas därvid i snitt och spänningsfördelningen beräknas ur Boussinesqs spänningsekvation. Kompressionsmodulen  $M$  erhålls enligt Vesič ur uttrycket

$$M = \beta q_o$$

där  $q_o$  är pålens spetsmotstånd. Koefficienten  $\beta$  varierar mellan 6 och 9 för platsgjutna pålar och mellan 25 och 50 för slagna eller nedpressade pålar.

Emellertid kan  $\beta$  påverkas av påldiametern såsom påpekats av Vesič. För slag-na pålar har följande samband föreslagits

$$M = 25 q_0 (1 + D_r^2)$$

och för platsgjutna pålar

$$M = 5,5 q_0 (1 + D_r^2)$$

Skillnaden i koefficienten  $\beta$  mellan platsgjutna pålar och slagna pålar pekar på den stora inverkan som slagningen har på lagringstätheten hos den omgivande friktionsjorden. Plantema & Nolet (1957) observerade från sonderingsförsök att jorden efter slagning av betongpålar hade erhållit en ökad lagringstäthet ned till 2,5 m under pålspetsen. Runt de slagna pålarna observerades en packning upp till 1,0 m från pålarnas yta.

För pålar slagna i lera beräknas sättningarna på samma sätt som för plattor. Jorden under pålgruppen delas in i snitt. Sättningen för varje snitt beräknas. Vid beräkningarna antas lasten från pålgruppen överföras till den omgivande jorden vid pålgruppens nedre tredjedelspunkt.

#### Kontroll av jordpackning medelst trycksondering

Under senare år har statisk sondering använts i allt större utsträckning vid kontroll av packade fyllningar av främst friktionsmaterial. Vid upprättandet av en packningsspecifikation måste hänsyn tas till ökningen av sondmotståndet med djupet närmast markytan.

Holländsk sond användes t ex vid kontroll av fyllningen för landningsbanorna vid den nya flygplatsen i Leopoldville (Verheyden, 1955).

Sanglerat (1972) anger flera exempel på packade grusfyllningar avsedda som undergrund för byggnader som kontrollerats genom sondering. I Sydafrika har statisk sondering använts för packningskontroll vid vibroflotation (Webb & Hall, 1969). I fig. 11 visas ett exempel på den ändring av sondmotståndet som erhöles vid packning med vibroflotation i en siltig finsand. Avståndet mellan vibroflota-tionspunkterna var 1,8 m.

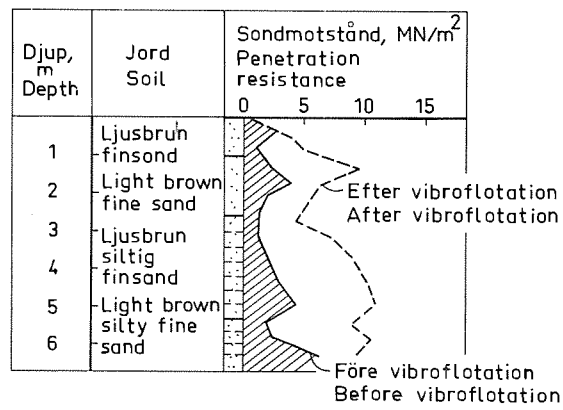


Fig. 11 Packningskontroll med holländsk sond vid vibroflotation (efter Webb & Hall, 1969)

Compaction control with Dutch cone penetrometer at vibroflotation (after Webb & Hall, 1969)



Costa Nunes & Porto (1965) anger ett fall där holländsk sond användes för att kontrollera packningen vid Frankis sandpelarmetod. Därvid packas lös sand genom att man först slår ned ett stålrör i jorden. Röret fylls sedan med sand allteftersom det dras upp.

### Sammanfattning

Trycksondering används i stor utsträckning i Holland, Belgien och Frankrike och även i andra delar av världen vid dimensionering av plattor och pålar grundlagda på friktionsmaterial. I Sverige har trycksondering ej använts i någon större utsträckning vid beräkning av plattors eller pålars bärförmåga eller sättning. Ur sonderingsresultaten är det möjligt att bestämma jordlagerföljden och jordlagrens relativa lagringstäthet. Jordlagrens sammansättning kan ofta uppskattas om spetsmotstånd och mantelfriktion mäts samtidigt eftersom kvoten  $f_{\text{mantel}}^{\text{stat}}/q_{\text{spets}}^{\text{stat}}$  som regel ökar med ökad finjordshalt. Det är dessutom möjligt att grovt uppskatta kohesionsjords skjuvhållfasthet ur sondmotståndet. Emellertid påverkas sondmotståndet av lerans sensitivitet vilket försvårar utvärderingen.

Främst plattors sättning i friktionsjord kan beräknas ur resultaten från trycksondering enligt principer som föreslagits av Meyerhof (1965), De Beer (1945) och Schmertmann (1970). Försöksresultat visar god överensstämmelse med Schmertmanns beräkningsmetod medan Buisman-De Beers metod överskattar sättningarnas storlek. Trycksondering kan som regel ej användas vid beräkning av plattors sättning i kohesionsjord.

Vid beräkning av pålars bärförmåga antas att spetsmotståndet motsvarar sondmotståndet när detta är mindre än ca  $10 \text{ MN/m}^2$  och påldiametern är mindre än ca 50 cm. Trycksondering kan dessutom användas vid packningskontroll av fyllningar och naturligt lagrad jord.

### Summary

Static sounding methods are used extensively in Holland, Belgium and France and also in other parts of the world to estimate the bearing capacity and settlement of slabs and piles on cohesionless soils. In Sweden static soundings are not commonly used to calculate the bearing capacity and the settlements of slabs and

of piles. It is possible to estimate from penetration tests the layer sequence and the relative density. If the skin friction resistance is measured at the same time as the point resistance it is often possible to estimate the composition of the soil. Measurements indicate that the ratio  $f_{\text{mantel}}^{\text{static}}/q_{\text{point}}^{\text{static}}$  increases with increasing percentage of fines in the soil. It is in addition possible to estimate the shear strength of cohesive soils from the measured penetration resistance. However the penetration resistance is affected by the sensitivity of the soil which complicates the evaluation of the test results.

The settlement of slabs in cohesionless soils can be estimated from the static penetration resistance by the methods proposed by Meyerhof (1965), De Beer (1945) and Schmertmann (1970). Comparisons with test data indicate that the Schmertmann method gives the best agreement with available test data and that the Buisman-De Beer method overestimates the settlements. Static soundings can as a rule not be used at calculations of settlements for slabs on cohesive soils.

At the calculation of the bearing capacity of piles it is generally assumed that the point resistance is approximately equal to the penetration resistance when this is less than  $10 \text{ MN/m}^2$  and the pile diameter is less than 50 cm. Static sounding method can also be used to check the compaction of fills and of naturally deposited soils.

### Referenser

- ANDRESEN, A., 1969. Trykksondering i Norge. Nordiskt sonderingsmöte i Stockholm den 5 - 6 oktober 1967. Stat.geot.inst. Särtr.o.Prel. Rapp. No. 31 p. 91-98. Stockholm.
- ARTIKOGLU, N.O., 1961. Determining ultimate bearing capacity of precast reinforced concrete piles from deep sounding tests in Alsancak Harbour. Proc. 5. Inst. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng Vol. 2 p. 3-9. Paris.
- BACHELIER, M. & PAREZ, L., 1965. Contribution to the study of soil compressibility by means of a cone penetrometer. Proc. 6. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng Vol. 2 p. 3-7. Montreal.

- DE BEER, E.E., 1945. Etudé des fondations sur pilotis et des fondations directes. Chap. II. L'appareil de pénétration en profondeur. Ann. Trav. Publ. Belgique 1945:3 p. 361-388.
- DE BEER, E.E., 1961. Discussion on: Piled foundations. Proc. 5. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng Vol. 3 p. 250-253. Paris.
- DE BEER, E.E., 1963. The scale effect in the transposition of the results of deep-sounding tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundations. Géotechnique 13(1963):1 p. 39-75.
- DE BEER, E.E., 1967. Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand. Proc. Symp. Bearing Capacity a. Settlement of Foundations. Duke Univ. April 1965. p. 15-33. Durham, N. Carolina.
- DE BEER, E.E. & MARTENS, A., 1957. Method of computation of an upper limit for the influence of the heterogeneity of sand layers on the settlement of bridges. Proc. 4. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng Vol. 1 p. 275-282. London.
- BEGEMANN, H.K.S.Ph., 1965 a. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. Proc. 6. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng Vol. 1 p. 17-20. Montreal.
- BEGEMANN, H.K.S.Ph., 1965 b. The maximum pulling force on a single tension pile calculated on the basis of results of the adhesion jacket cone. Proc. 6. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng Vol. 2 p. 229-233. Montreal.
- BERGDAHL, U., 1969. Diskussion. Sekt. III. Statisk sondering. Nordiskt sonderingsmöte i Stockholm den 5 - 6 oktober 1967. Stat. geot. inst. Särtr. o. Prel. Rapp. No. 31 p. 120-122. Stockholm.
- BOGDANOVIĆ, L., 1961. The use of penetration tests for determining the bearing capacity of piles. Proc. 5. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng Vol. 2 p. 17-22. Paris.
- BONDARIK, G.K., 1967. Dynamic and static sounding of soils in engineering geology. Trans. All-Union Sci. Res. Inst. for Hydrogeol. a. Engng Geol. New Series No. 8. Israel Program for Sci. Transl. 137 p. Jerusalem.

- BROMS, B., 1965. Beräkning av pålar vid olika belastningsförhållanden. Beräkning av vertikala pålars bärförmåga. Stat.geot.inst. Särtr.o.Prel. Rapp. No. 9. 26 p. Stockholm.
- BUISSON, M., 1953. Appareils français de pénétration enseignements tirés des essais de pénétration. Ann.Inst. Techn.Bat. Trav. Publ. 6(1953):63-64 p. 299-304. Sols et Fond. No. 13.
- COSTA NUNES, A.J. da, 1961. Discussion on: Piled foundations. Proc.5.Int. Conf. Soil Mech.a.Foundation. Engng Vol. 3 p. 257-258. Paris.
- COSTA NUNES, A.J. da & PORTO, M.J.C., 1965. Fondations de réservoirs en sol compacte par le fonçage de pieux de sable. Proc.6.Int.Conf.Soil Mech.a.Foundation. Engng Vol. 2 p. 32-35. Montreal.
- DAHLBERG, R., 1972. Sonderingsmotståndets beroende av överlagringstrycket - resultat från laboratorie- och fältförsök. Väg- o. Vattenb. 18(1972):5 p. 240-243.
- EGGESTAD, A., 1963. Deformation measurements below a model footing on the surface of dry sand. Proc. European Conf. Soil Mech.a.Foundation. Engng Vol. 1 p. 233-239. Wiesbaden.
- EIDE, O., 1956. Baereevne av peler i sand. Norges Geot.Inst.Publ. No. 18. 15 p. Oslo.
- FRANX, C., 1948. The bearing capacity of piles as derived from deep soundings, loading tests and formulae. Proc. 2. Int.Conf.Soil Mech.a.Foundation. Engng Vol. 4 p. 118-121. Rotterdam.
- GEUZE, E.C.W.A., 1953. Résultats d'essais de pénétration en profondeur et de mise en charge de pieux-modèle. Ann.Inst. Techn.Bat.Trav. Publ. 6(1953):63-64 p. 315-319. Sols et Fond. No. 13.
- GIELLY, J., LAREAL, P. & SANGLERAT, G., 1970. Correlations between in situ penetrometer tests and the compressibility characteristics of soils. Proc.Conf. In Situ Investigations in Soils a. Rocks. British Geot.Soc. p. 167-172. London.

- L'HERMINIER, R. , 1953. Remarques sur le poinçonnement continu des sables et graviers. Ann.Inst.Techn.Bat.Trav.Publ. 6(1953):63-64 p. 377-385. Sols et Fond. No. 13.
- HUIZINGA, T.K. , 1948. Some pile driving problems. Proc.2.Int.Conf. Soil Mech.a.Foundation.Engng Vol. 2 p. 185-191. Rotterdam.
- HUIZINGA, T.K. , 1951. Application of results of deep penetration tests to foundation piles. Build.Res.Congr.Div. 1 P.3 p. 173-179. London.
- JEZEQUEL, J. , 1969. Les pénétromètres statiques. Influence du mode d'emploi sur la résistance de pointe. Bull.Lias.Lab.Rout. Ponts et Chauss. No. 36 p. 151-160.
- JEZEQUEL, J. & GOULET, G. , 1965. Essais in situ et fondations sur pieux. Bull.Lias.Lab.Rout. Ponts et Chauss. No. 12 p. 3.1-3.16.
- KAHL, H. & MUHS, H. , 1952. Über die Untersuchung des Baugrundes mit einer Spitzendrucksonde. Bautechnik 29(1952):4 p. 81-88.
- KAHL, H. , MUHS, H. & MEYER, W. , 1968. Ermittlung der Grösse und des Verlaufs des Spitzendrucks bei Drucksondierungen in ungleichförmigem Sand, in Sand-Kies-Gemischen und in Kies. Mitt. Deutsch. Forsch. ges. Bodenmech. (Degebo) Techn.Univ. Berlin H. 21 p. 1-36.
- KALLSTENIUS, T. , 1969. Trycksondering i Sverige. Nordiskt sonderingsmöte i Stockholm den 5 - 6 oktober, 1967. Stat.geot.inst. Särtr.o.Prel.Rapp. No. 31 p. 99-114. Stockholm.
- KANTEY, B.A. , 1951. Significant developments in sub-surface explorations for piled foundations. Trans.South African Inst.Civ.Engrs 1(1951):6 p. 159-185.
- KERISEL, J. , 1957. Contribution à la détermination expérimentale des réactions d'un milieu pulvérulent sur une fondation profonde. Proc.4.Int.Conf.Soil Mech.a.Foundation.Engng Vol. 1 p. 328-334. London.
- KERISEL, J. , 1961. Fondations profondes en milieux sableux: variation de la force portante limite en fonction de la densité de la profondeur du diamètre et de la vitesse d'enfoncement. Proc.5.Int.Conf.Soil Mech.a.Foundation.Engng Vol. 2 p. 73-83. Paris.

- KERISEL, J. , 1964. Deep foundations basic experimental facts. Proc.North American Conf.Deep Found. Vol. 1 p. 5-44. Mexico.
- KERISEL, J. & ADAM, M. , 1969. Charges limites d'un pieu en milieux argileux et limoneux. Proc.7.Int.Conf.Soil Mech.a.Found. Engng Vol. 2 p. 131-139. Mexico City.
- KERISEL, J. , l'HERMINIER, R. & TCHENG, Y. , 1965. Résistance de pointe en milieux pulvérulents de serrages divers. Proc.6.Int.Conf. Soil Mech.a. Found. Engng Vol.2 p. 265-269. Montreal.
- LADANYI, B. & EDEN, W. J. , 1969. Use of the deep penetration test in sensitive clays. Proc.7.Int.Conf.Soil Mech.a.Found. Engng Vol. 1 p. 225-230. Mexico City.
- MEIGH, A.C. & CORBETT, B.O. , 1970. A comparison of in situ measurements in a soft clay with laboratory tests and the settlement of oil tanks. Proc. Conf. In Situ Investigations in Soils a. Rocks. British Geot.Soc. p. 173-179. London.
- MENZENBACH, E. , 1961. The determination of permissible point loads of piles by means of static penetration tests. Proc.5.Int.Conf.Soil Mech.a.Found. Engng Vol. 2 p. 99-104. Paris.
- MEYERHOF, G.G. , 1951. The ultimate bearing capacity of foundations. Géotechnique 2(1951):4 p. 301-332.
- MEYERHOF, G.G. , 1956. Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. J.Soil Mech.a.Found.Div.Proc. ASCE 82(1956):SM1 19 p.
- MEYERHOF, G.G. , 1964. Theoretical analysis on bearing capacity and horizontal and vertical movements of deep foundations in comparison with field experience. General report. Proc. North American Conf. Deep Found. Vol. 2 p. 415-420. Mexico.
- MEYERHOF, G.G. , 1965. Shallow foundations. J. Soil Mech.a.Found.Div. Proc. ASCE 91(1965):SM2 p. 21-31.
- MOHAN, D. , JAIN, G.S. & KUMAR, V. , 1963. Load bearing capacity of piles. Géotechnique 13(1963):1 p. 76-86.

- MUHS, H. , 1961. Discussion on: Piled foundations. Proc.5.Int.Conf.Soil Mech. a.Found. Engng Vol. 3 p. 272-273. Paris.
- MUHS, H. , 1966. On the point-resistance of soundings in ununiform cohesionless soils. Proc.6.Int.Conf.Soil Mech.a.Found.Engng Vol. 3 p. 504-506. Montreal.
- MUHS, H. & WEISS, K. , 1971. Untersuchung von Grenztragfähigkeit und Setzungsverhalten flackgegründeter Einzelfundamente in ungleichförmigen nicht-bindigen Boden. Mitt. Deutsch. Forsch. ges. Bodenmech. (Degebo) Techn. Univ. Berlin H. 26 39 p.
- PELLEGRINO, A. , 1961. Discussion on: Piled foundations. Proc.5.Int.Conf. Soil Mech.a.Found.Engng Vol.3 p.273-275. Paris.
- PETERMANN, A. , 1961. Discussion on: Piled foundations. Proc.5.Int.Conf. Soil Mech.a.Found.Engng Vol.3 p.248-250. Paris.
- PLANTEMA, G. , 1948. Results of a special loading-test on a reinforced concrete pile, a so-called pile sounding; interpretation of the results of deep-soundings, permissible pile loads and extended settlement observations. Proc.2. Int.Conf.Soil Mech.a.Found.Engng Vol.4 p. 112-118. Rotterdam.
- PLANTEMA, G. & NOLET, C.A. , 1957. Influence of pile driving on the sounding resistance in a deep sand layer. Proc.4.Int.Conf.Soil Mech.a.Found. Engng Vol. 2 p. 52-55. London.
- RAEDSCHELDERS, H.M. , 1961. Discussion. Proc.5.Int.Conf.Soil Mech.a. Found. Engng Vol. 3 p. 275-277. Paris.
- SANGLERAT, G. , 1972. The penetrometer and soil exploration. Elsevier Publ. Co. Amsterdam. 464 p.
- SCHMERTMANN, J.H. , 1970. Static cone to compute static settlement for sand. J.Soil Mech.a.Found.Div. Proc. ASCE 96(1970):SM3 p. 1011-1043.
- SCHULTZE, E. & MELZER, K. , 1965. The determination of the density and the modulus of compressibility of non-cohesive soils by soundings. Proc.6. Int.Conf.Soil Mech.a.Found.Engng Vol. 1 p. 354-358. Montreal.

- SHASHKOV, S.A., 1965. Investigation of pile resistance by combined sounding. Proc.6.Int.Conf.Soil Mech.a.Found.Engng Vol. 2 p. 314-318. Montreal.
- TERZAGHI, K., 1943. Theoretical soil mechanics. John Wiley & Sons, Inc., New York. 510 p.
- TERZAGHI, K. & PECK, R.B., 1948. Soil mechanics and engineering practice. John Wiley & Sons, Inc., New York. 423 p.
- THOMAS, D., 1965. Static penetration tests in London Clay. Géotechnique 15 (1965):2 p. 174-179.
- THOMAS, D., 1968. Deep sounding test results and the settlement of spread footing on normally consolidated sand. Géotechnique 18(1968):4 p. 472-488.
- WAMBEKE, A. van, 1962. Méthodes d'investigation des sols en place. Etude d'une campagne d'essais comparatifs. Sols-Soils 1(1962):2 p. 9-16.
- WEBB, D.L., 1970. Settlement of structures on deep alluvial sandy sediments in Durban, South Africa. Proc. Conf. In Situ Investigations in Soils a. Rocks. British Geot.Soc. p. 181-220. London.
- WEBB, D.L. & HALL, R.I., 1969. Effects of vibroflotation on clayey sands. J.Soil Mech.a.Found.Div.Proc. ASCE 95(1969):SM6 p. 1365-1378.
- WEELE, A.F. van, 1961. Deep sounding tests in relation to the driving resistance of piles. Proc.5.Int.Conf.Soil Mech.a.Found.Engng Vol.2 p. 165-169. Paris.
- VEEN, C. van der, 1953. The bearing capacity of a pile. Proc.3.Int.Conf.Soil Mech.a.Found.Engng Vol. 2 p. 84-90. Zürich.
- VEEN, C. van der & BOERSMA, L., 1957. The bearing capacity of a pile predetermined by a cone penetration test. Proc.5.Int.Conf.Soil Mech.a. Found.Engng Vol. 2 p. 72-75. Paris.
- WEISS, K., 1964. Neuere Erkenntnisse mit Spitzendrucksonde. Vorträge der Baugrundtagung 1964 in Berlin. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau H. 20 p. 227-277.



- VERDEYEN, J. , 1953. Détermination de la charge portante de pieux en béton armé au port pétrolier d'Anvers. Ann.Inst.Techn.Bat.Trav.Publ. 6 (1953):63-64 p. 291-296. Sols et Fond. No. 13.
- VERHEYDEN, A. , 1955. Dutch penetrometer tests in the Belgian Congo. Proc.1. South Afric. Reg. Conf. Soil Mech.a.Found.Engng Vol. 1 p. 308-314.
- VESIČ, A.S. , 1963. Bearing capacity of deep foundations in sand. Highw. Res. Rec. No. 39 p. 112-153.
- VESIČ, A.S. , 1964. Investigations of bearing capacity of piles in sand. Proc. North American Conf.Deep Foundations Vol. 1 p. 197-224. Mexico City.
- VESIČ, A.S. , 1967. Ultimate loads and settlements of deep foundations in sand. Proc. Symp. Bearing Capacity a. Settlement of Foundations. Duke Univ. April 1965. p. 53-68. Durham N. Carolina.
- VESIČ, A.S. , 1970 a. Load transfer in pile-soil systems. Ur: Design and Installation of Pile Foundations and Cellular Structures. Ed. H.Y. Fang och T.D. Dismuke. p. 47-73.
- VESIČ, A.S. , 1970 b. Tests on instrumented piles, Ogeechee River Site. J. Soil Mech.a.Found. Div.Proc. ASCE 96(1970):SM2 p. 561-584.



## TRYCKSONDERING I FRIKTIONSMATERIAL - RESULTAT AV LABORATORIEFÖRSÖK

Civilingenjör Ulf Bergdahl, Orrje & Co - Scandiaconsult \*)

Nedan skall i korthet redogöras för resultaten från vissa sonderingsundersökningar, som utförts vid Tekniska Högskolan i Stockholm med bidrag från Statens Råd för Byggnadsforskning. Syftet med undersökningen har varit att klargöra hur olika egenskaper hos friktionsmaterial påverkar sonderingsmotståndet för några olika sonderingsutrustningar, varav dock endast försöken med trycksond redovisas här nedan. Med hänsyn till det stora antal provningar som var önskvärt beslöts att utföra försöken på laboratorium i liten skala. Resultaten kan därför ej direkt översättas till fältförhållanden, men redovisade relationer bör gälla även vid ordinära fältundersökningar.

### Sandmaterial

För undersökningen har använts tre sandtyper som benämns G 12-sand, Husby-sand och Baskarpsand. I fig. 1 visas kornfördelningen för de olika sandmaterialen, som i korthet kan beskrivas på följande sätt:

G 12-sanden är en havssand som huvudsakligen består av rundade kvartskorn med en diameter mellan 0,1 och 0,5 mm.

Husbysanden kommer från ett sandtag utanför Stockholm och består huvudsakligen av kantiga kvarts- och fältspatkorn, också de med en diameter på mellan 0,1 och 0,5 mm. Graderingskoefficienten är dock något högre för Husbysanden än för G 12-sanden.

Baskarpsanden kommer från den s k Baskarpformationen vid Vättern och består huvudsakligen av rundade kvarts- och fältspatkorn med en diameter på mellan

---

\*) Fr o m 1974 Statens geotekniska institut.

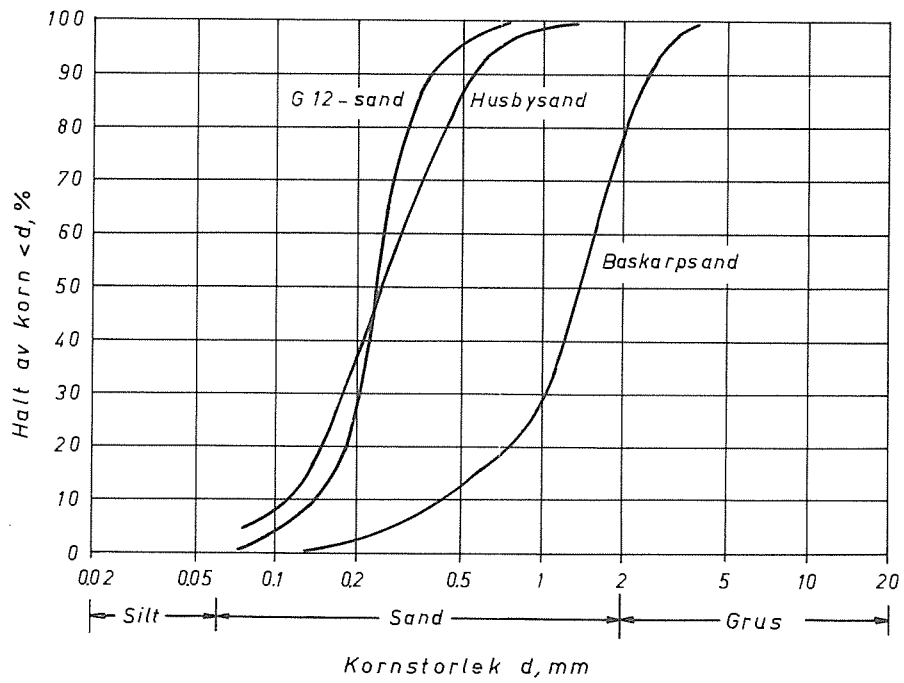


Fig. 1 Kornfördelning för de undersökta sandmaterialen  
Grain size distribution curves for the tested materials

0,25 och 2,0 mm. Materialet är således något grövre än både G 12- och Husby-sanden medan graderingskoefficienten för detta material var högre än såväl Husby- som G 12-sandens.

Högsta och lägsta skrymdensitet och motsvarande portal sammanfattas i nedanstående tabell.

Sandtyp	$\gamma_d$ max	$e_{\min}$	$\gamma_d$ min	$e_{\max}$
G 12-sand	1,66	0,59	1,44	0,84
Husbysand	1,75	0,54	1,38	0,94
Baskarpsand	1,80	0,47	1,62	0,64

### Fyllning och packning

Sanden packades vid flertalet försök skiktvis i oljefat med 0,6 m diameter och 0,9 m höjd. Packningen utfördes med en 10 kg stamp som släpptes från viss höjd. Genom att variera skiktjocklek, fallhöjd och antal stampningar per skikt kunde man erhålla densiteter från den lösaste till den fastaste (fig. 2).

Efter fullbordad packning av materialet i behållaren utfördes endast en sondering i behållarens mitt varefter densitetsbestämning utfördes. Genom att upprepa packning och sondering har på detta sätt erhållits ett stort antal sonderingsdiagram och nedan lämnade redogörelse utgör en bearbetning av resultaten från alla dessa diagram.

Densiteten kunde i varje försök bestämmas med cylindervolymeter och genom vägning och volymsbestämning av hela provbehållaren.

Huvuddelen av försöken har utförts på torr sand men för att studera effekten av vatten i sanden har försök utförts även med fuktig och vattenmättad sand. Vid försöken med vattenmättad sand packades först den torra sanden varefter vatten fick fylla porerna i materialet genom påfyllning underifrån.

### Sondering

För att ge möjlighet till jämförelse mellan olika sonderingsmetoder och även få klarhet i huruvida någon av de nu använda metoderna är överlägsen andra vad gäller utvärdering av friktionsmaterials egenskaper har i dessa undersökningar använts tre olika metoder, nämligen trycksondering enligt Jonell & Nilsson AB (Nilcon AB), manuell viktsondering enligt svensk geoteknisk standard och lätt hejarsondering enligt tysk standard DIN 4094. I denna artikel behandlas dock enbart resultaten från trycksonderingsförsöken som ovan nämnts.

Vid trycksonderingen användes en pyramidformad spets ( $10 \text{ cm}^2$  tvärsnittsarea) fästad på en 20 mm stång vilken drevs ned i försöksmaterialet med en manuell driven kedjedomkraft varvid det totala neddrivningsmotståndet registrerades. Vid dessa försök har mantelfriktionen bedömts vara så liten att den kunde försummas.

### Resultat av trycksonderingsförsök i torrt material

Sonderingsmotståndet har mätts som totalmotstånd i kp och från varje försök har erhållits ett motståndsdiagram av den typ som visas i fig. 3 där man kan se att motståndet närmast sandytan var så lågt att det ej kunde registreras. Från ca 10 cm djup ökar sonderingsmotståndet nära linjärt till ca 50 cm djup, från vilket djup ökningen är mindre. Detta kan delvis bero på inverkan av mantelfriktion mot provbehållarens väggar.

För att kunna jämföra sonderingsmotståndet vid olika lagringstätheter i olika material har valts att från sonderingsdiagrammen ta ut sonderingsmotståndet på 45 cm djup där upphängningseffekten ej har observerats.

Genom att i ett diagram (fig. 3) ange det sålunda erhållna sonderingsmotståndet som funktion av portalet vid respektive försök finner man att det inte existerar något entydigt samband mellan sonderingsmotstånd och portal för de provade materialen. Det framgår t ex att man vid portalet 0,60 i G 12-sand uppmätt ett trycksonderingsmotstånd på 150 kp, medan Husbysanden gav ca 700 kp för samma portal. Denna stora skillnad är anmärkningsvärd bl a därför att dessa båda sandsorter är tämligen lika med avseende på kornstorleksfördelning. Delvis kan olikheten förklaras av den något högre graderingskoefficienten och den större kantigheten hos Husbysanden.

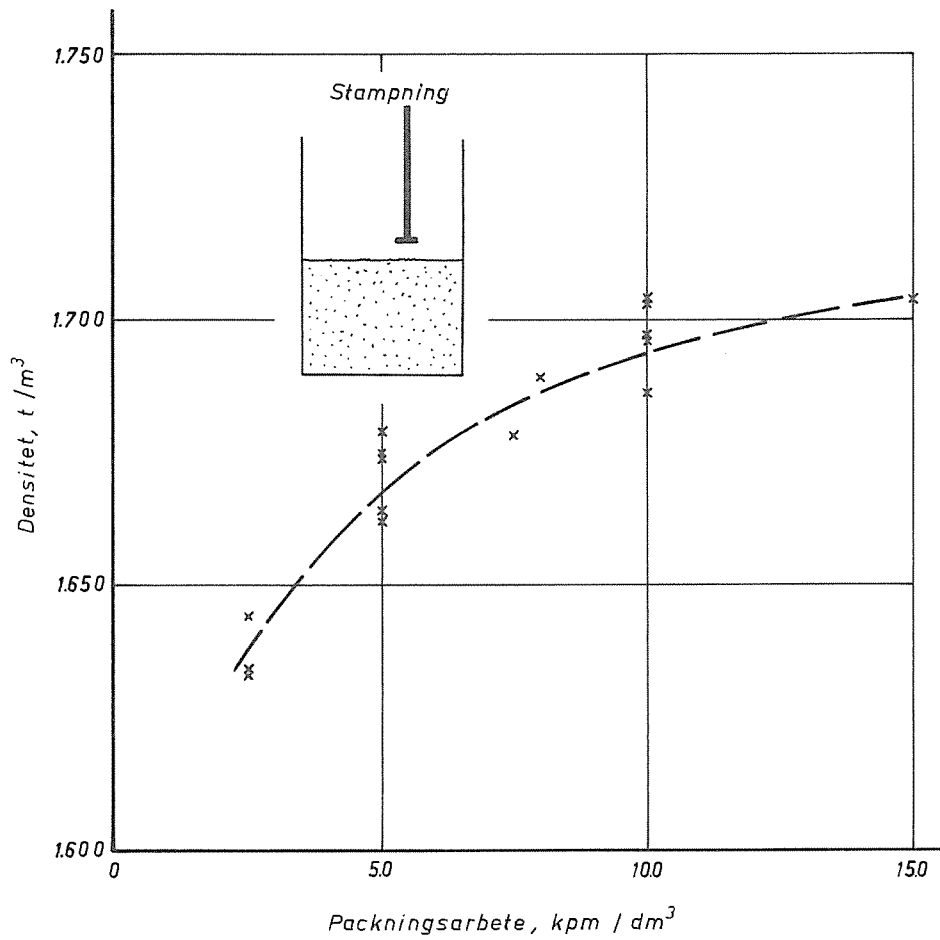


Fig. 2 Samband mellan packningsarbete och densitet för G 12-sand

Density of the tamped G 12 sand as a function of the compaction effort

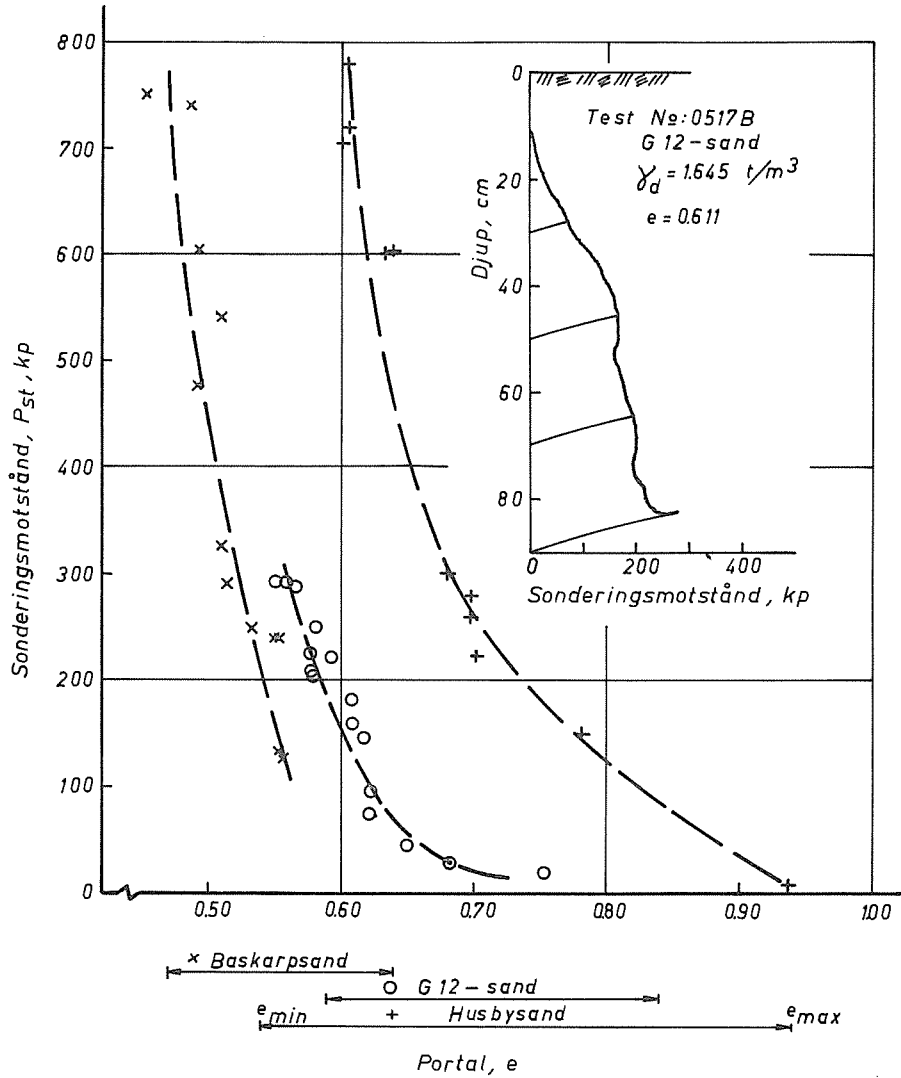


Fig. 3 Sonderingsmotstånd,  $P_{st}$ , för trycksonderingsmetod Jonell & Nilsson AB som funktion av portalet. Sambanden gäller sonderingsmotståndet på 45 cm djup för de tre materialen

The penetration resistance  $P_{st}$  for the static penetrometer at 45 cm depth below sand surface as a function of the void ratio for the tested materials



De i diagrammet redovisade sambanden mellan portal och trycksonderingsmotstånd kan anges med följande uttryck

$$\log P_{st} = a + b \frac{1}{e} \quad (1)$$

där  $P_{st}$  = trycksonderingsmotståndet i kp

$e$  = portalet

$a, b$  = materialkonstanter, som får anses bero på bl a jordens inre friktionsvinkel och kompressibilitet.

Vanligen anses det föreligga ett samband mellan relativa lagringstätheten ( $D_r$ ) och sonderingsmotståndet antingen mätt med trycksond eller med dynamisk sondering. I fig. 4 har därför gjorts en sammanställning av sonderingsmotstånden från 45 cm djup med den beräknade relativa lagringstätheten. I figuren har också inritats ett av Schultze & Melzer (1965) publicerat samband mellan trycksonderingsmotstånd och relativ lagringstäthet.

Även i denna sammanställning finner man att det ej existerar något samband som är generellt giltigt för alla tre sandsorterna eller lika med det av Schultze & Melzer presenterade. Så t ex motsvaras ett spetsmotstånd på 200 kp i G 12-sand av ett på 700 kp i Husbysand vid 100 % relativ lagringstäthet. Det är också intressant att notera att det vid försöken erhållits över 100 % relativ lagringstäthet, vilket troligen sammanhänger med metoden att bestämma lösaste och fastaste lagring.

Av försöken har således framkommit att det ej finns något entydigt samband mellan trycksonderingsmotstånd på 45 cm djup och relativ lagringstäthet i torr packad sand. Det ligger nära till hands att tro att det ej heller i övrigt skulle finnas något entydigt samband mellan trycksonderingsmotstånd och relativ lagringstäthet i olika friktionsmaterial. Man kan däremot konstatera att det för en och samma sandtyp finns en viss bestämd relation mellan sonderingsmotstånd på ett visst djup och relativ lagringstäthet eller portal. Detta förhållande skulle således göra det möjligt att använda trycksondering för kontroll av t ex packningsgraden i fyllningar. En kalibrering med hänsyn till materialet blir dock nödvändig.

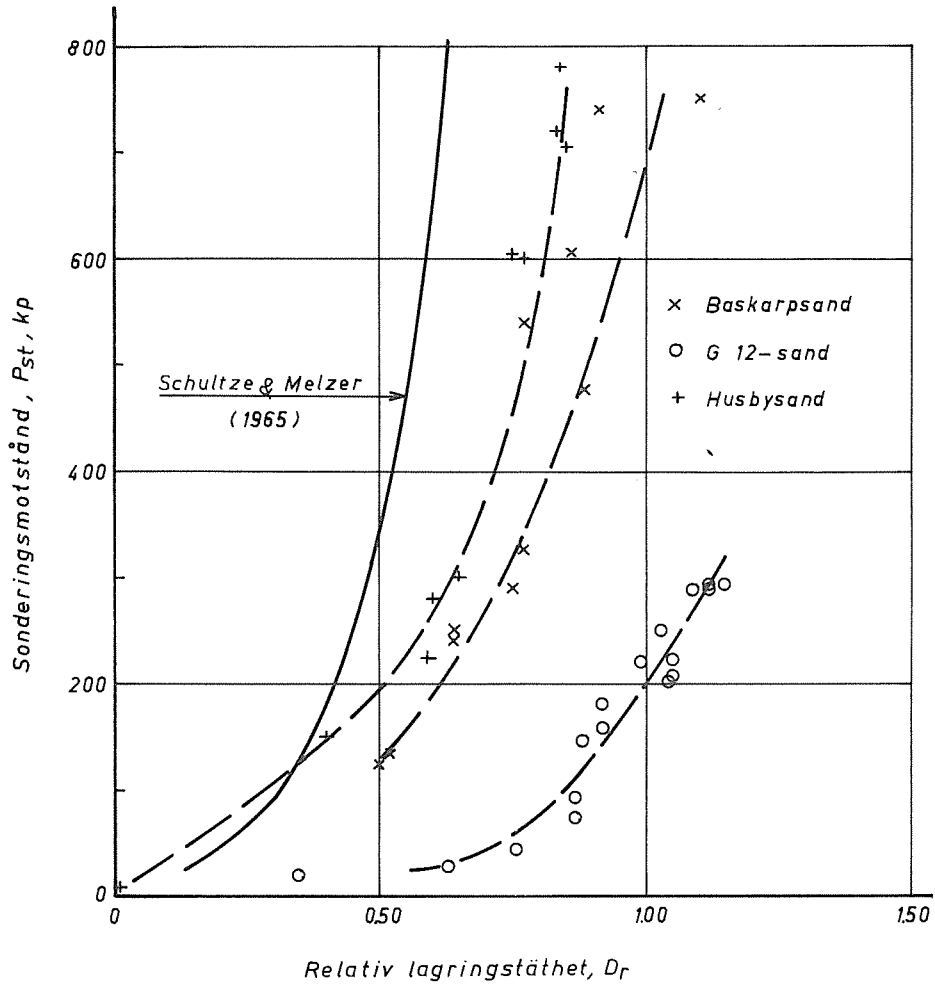


Fig. 4 Trycksonderingsmotståndet,  $P_{st}$ , som funktion av relativa lagringstätheten,  $D_r$   
Correlation between the penetration resistance  $P_{st}$  for the static penetrometer and the relative density  $D_r$  for the tested materials

### Inverkan av vatten i sanden

De ovan redovisade resultaten härrör från försök i torrt material vilket ju normalt ej påträffas i naturen. Därför utfördes också vissa försök dels i vattenmättat material, dels i fuktigt material som ovan nämnts.

Försöken i vattenmättad sand visade samma sonderingsresultat som försöken med sondering i torr sand med motsvarande portal.

Eftersom effektivtrycket i jorden är mindre i vattenmättat material än i torrt material och friktionen mellan sondspets och sand blir lägre kan man förvänta att sonderingsmotståndet blir lägre i det vattenmättade materialet. Sannolikt är detta fallet men skillnaderna är så små att de ej har framkommit vid dessa försök där endast sonderingsresultatet ned till 45 cm djup använts.

I fig. 5 redovisas resultatet av trycksonderingar i fuktig sand (vattenhalt 3 - 12 %) tillsammans med motsvarande kurvor från försöken i torr sand. Man finner att sonderingsmotståndet till följd av kapillärkrafterna i sanden ökat betydligt. Så t ex ökade sonderingsmotståndet i Husbysand vid portalet  $e = 0,80$  från ca 120 kp till ca 240 kp, dvs med 100 %. Detta förhållande beaktas vederligtvis ej vid bestämning av grundläggningsnivå eller tillåtet grundtryck. Många har dock noterat hur sonderingsmotståndet minskar kraftigt vid eller något över grundvattenytan.

### Samband mellan inre friktionsvinkel och sonderingsmotstånd

Eftersom det ej var möjligt att påvisa något direkt samband mellan sonderingsmotstånd och sandmaterialens relativa eller faktiska lagringstäthet som var gemensamt för alla de undersökta sandmaterialen, fortsattes försöken med bestämning av sandmaterialens inre friktionsvinkel och kompressibilitet.

Inre friktionsvinkeln bestämdes med hjälp av treaxliga tryckförsök på torr sand vid olika lagringstäthet hos resp. material. I fig. 6 visas förhållandet mellan inre friktionsvinkeln,  $\varphi_d$  och porositeten efter konsolidering,  $n_c$ . Inom de undersökta porositetsområdena för de tre sandtyperna är sambanden mellan  $\varphi_d$  och  $n_c$  rätlinjiga. Friktionsvinkeln var högst för Husbysanden ( $41 - 47^\circ$ ) och lägst för G 12-sanden ( $31 - 36^\circ$ ).

Genom att kombinera den ovan redovisade formeln (1) med ekvationen för det rät-

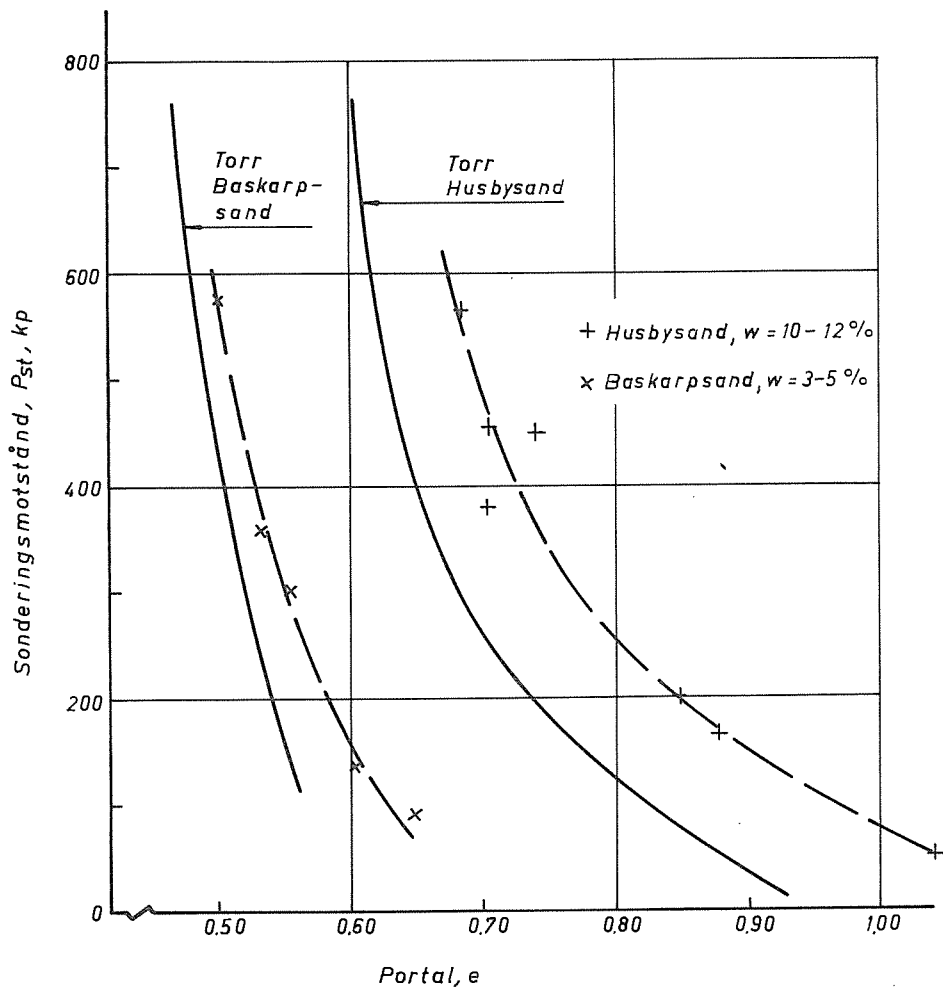


Fig. 5 Vattenhaltens inverkan på trycksonderingsmotståndet i Baskarp- och Husbysand

Comparison between the results from the static cone penetrometer tests in dry and moist sand

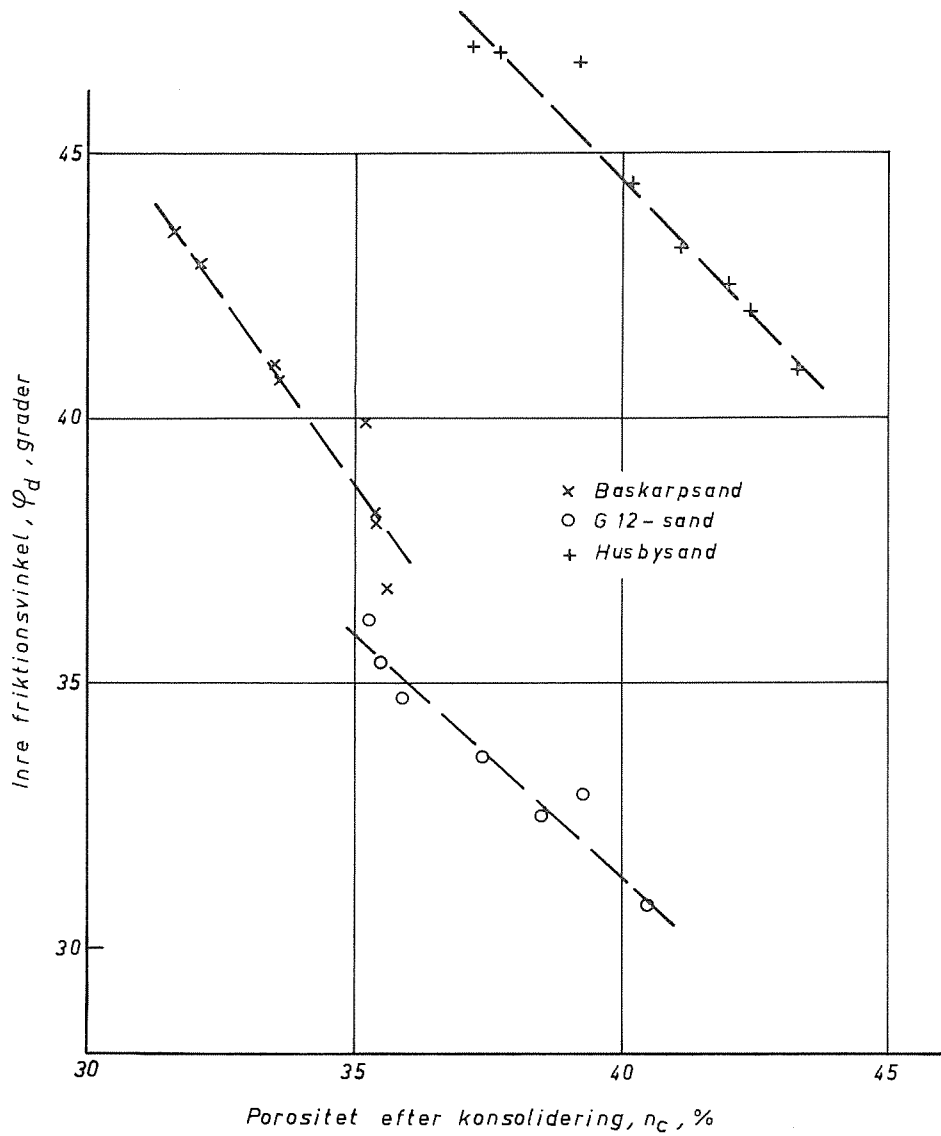


Fig. 6 Samband mellan inre friktionsvinkeln,  $\varphi_d$ , och porositeten  $n_c$ . Inre friktionsvinkeln har bestämts genom triaxialförsök på torrt material

Angle of internal friction  $\varphi_d$  for the three tested materials at different densities. Results from triaxial tests

linjiga sambandet mellan inre friktionsvinkel och porositet fås nedanstående samband mellan sonderingsmotstånd och inre friktionsvinkel

$$\log P = C_1 + \frac{C_2}{\varphi_d + C_3} \quad (2)$$

där  $P$  = sonderingsmotståndet

$C_1, 2, 3$  = konstanter

$\varphi_d$  = inre friktionsvinkeln

Exempel på sådana samband anges i fig. 7 där de beräknade sambanden redovisas tillsammans med erhållna försöksresultat. Som framgår av figuren finns det ej heller något entydigt samband mellan sonderingsmotstånd och inre friktionsvinkel i de här tre undersökta sandmaterialen utan friktionsvinkeln kan ändras utan att sonderingsmotståndet ökar. Sålunda erhöles på 45 cm djup ett spetsmotstånd av 200 kp vid en friktionsvinkel av ca  $34^\circ$  i G 12-sand,  $39^\circ$  i Baskarpsand och  $42^\circ$  i Husbysand.

#### Inverkan av jordens kompressibilitet

Till följd av de erhållna olikheterna bedömdes det nödvändigt att i betraktelsen ta med även materialens kompressibilitet. Under en sista fas i undersökningarna bestämdes också sandmaterialens kompressibilitet  $m_v$  i  $\text{cm}^2/\text{kp}$  vid olika lagringstätheter i den sk jättekompresometern där sanden kunde fyllas och packas på samma sätt som i oljefaten i vilka sonderingarna utfördes. Kompressibiliteten har här bestämts på grundval av den uppmätta sammantryckningen mellan laststegen 0,67 och 4,15  $\text{kp}/\text{cm}^2$ . Som framgår av fig. 8 framkom vid dessa försök rätlinjiga samband mellan materialens kompressibilitet och portalet i sanden. Sambanden är dock olika för de tre sandsorterna. Det visade sig att kompressibiliteten var störst i Husbysanden ( $1,5$  å  $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kp}$ ) och lägst i G 12-sanden ( $0,6$  å  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kp}$ ). Eftersom man kan förvänta att en hög kompressibilitet skulle ge ett lågt sonderingsmotstånd, finner man här förklaringen till att det inte finns ett entydigt samband mellan sonderingsmotstånd och inre friktionsvinkel.

Sedan det visat sig att sonderingsmotståndet ej heller var direkt och entydigt beroende av kompressibiliteten, har flera försök gjorts att erhålla ett samband

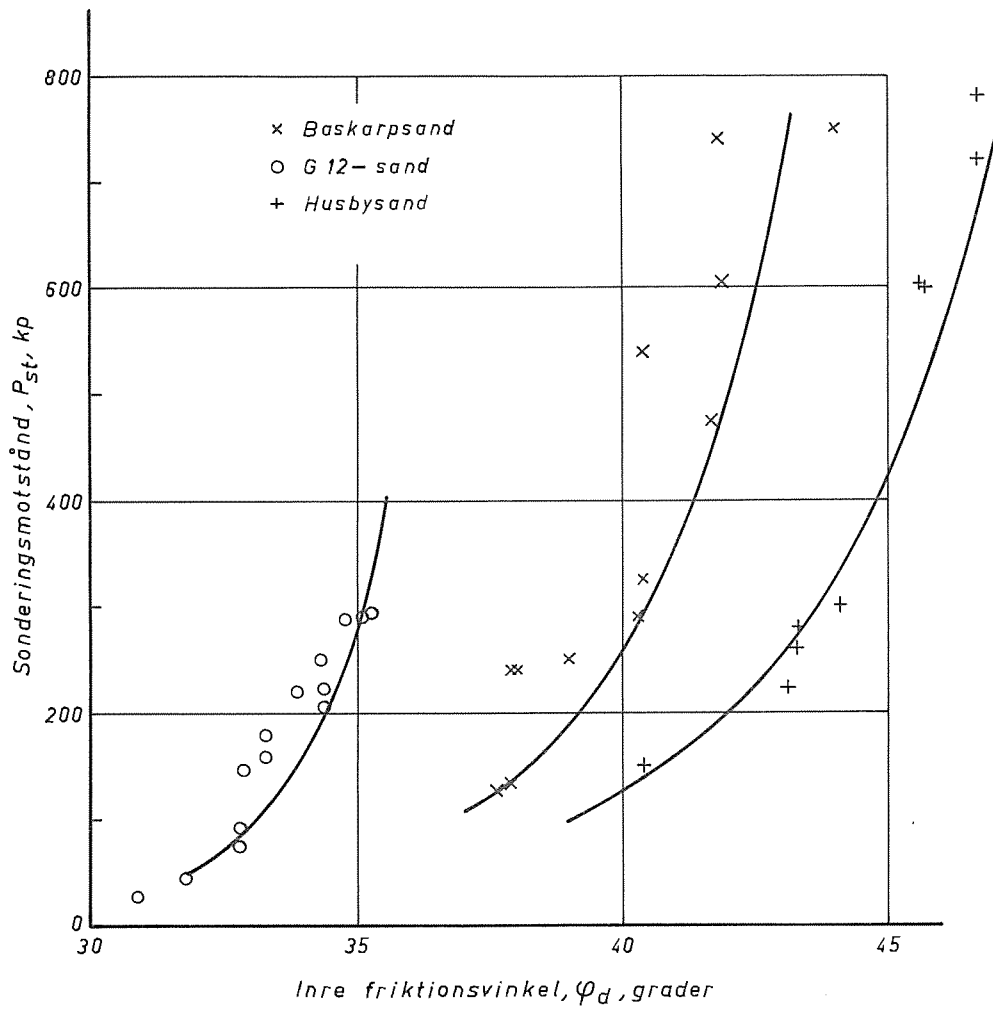


Fig. 7 Samband mellan inre friktionsvinkel och trycksonderingsmotståndet på 45 cm djup för de undersökta materialen

Correlation between the static penetration resistance  $P_{st}$  and the angle of internal friction

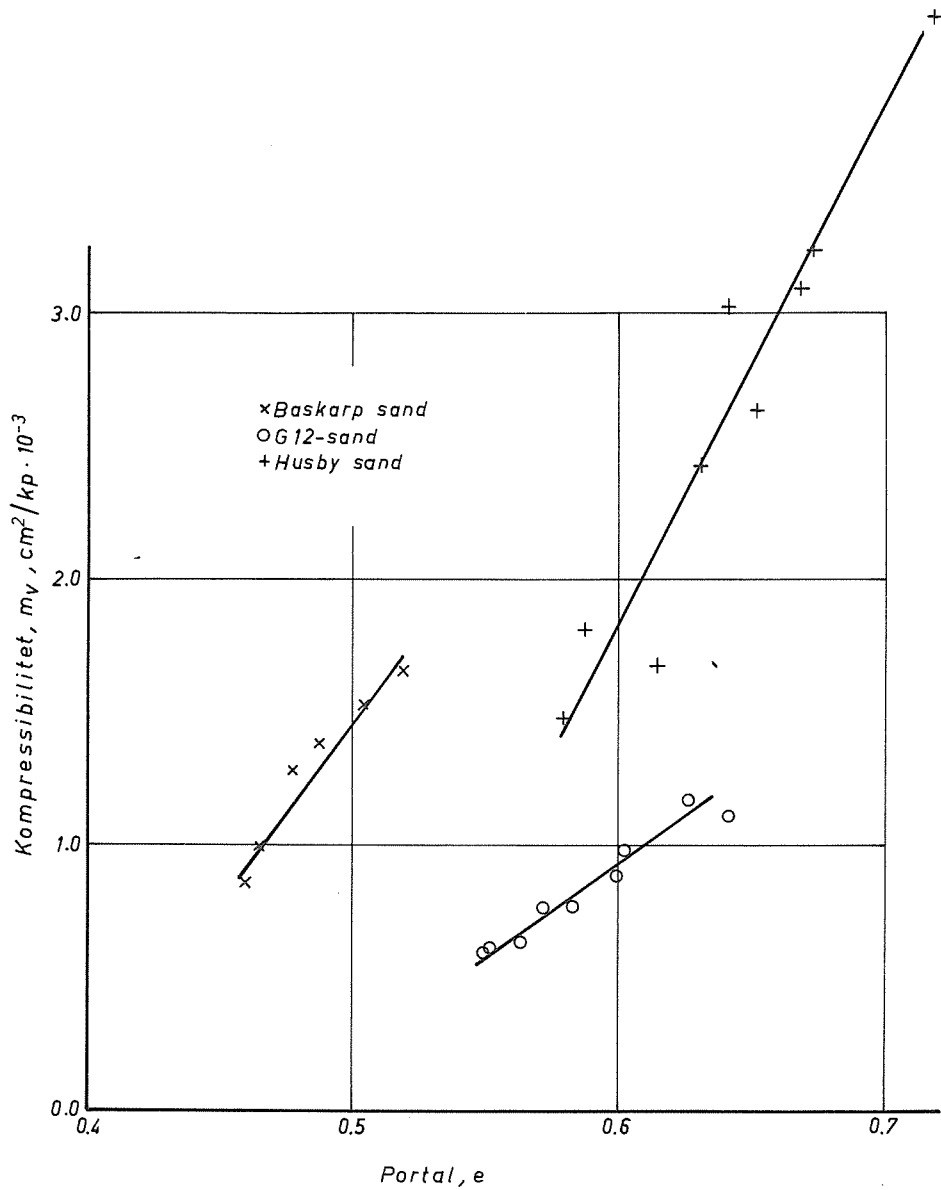


Fig. 8 Samband mellan kompressibiliteten  $m_v$  och portalet  $e$   
 Relations between void ratios ( $e$ ) and compressibility ( $m_v$ )  
 in  $\text{cm}^2/\text{kp}$  for the three tested materials



mellan å ena sidan sonderingsmotståndet och å den andra någon funktion av jordens kompressibilitet och inre friktionsvinkel. Ett sådant samband visas i fig. 9 och kan skrivas

$$P_{st} = \frac{1}{0,23 m_v} \left[ \frac{\text{tg } 2/3 \varphi_0}{\text{tg } 2/3 \varphi} \cdot e^{2 \text{tg } \varphi} - 4,6 \right] \quad (3)$$

Sambandet gäller för sonderingsmotståndet på 45 cm djup i torr sand. Som framgår av (3) är det inte nog att enbart studera effekten av kompressibiliteten och bärigheten på sonderingsspetsen, utan skillnaden i friktion mellan jord och spets har även fått beaktas. Denna har uttryckts som förhållandet mellan en medelfriktionsvinkel ( $\varphi_0$ ) för de tre sandtyperna vid olika lagringstätheter och den uppmätta friktionsvinkeln vid aktuell täthet. Friktionen mellan stål och sand har antagits vara 2/3 av aktuell friktionsvinkel i sanden.

### Summary

This paper describes some results from a laboratory investigation of penetration resistance in cohesionless soils. The investigation has been carried out in the Soil Mechanics Division at the Royal Institute of Technology, Stockholm, and has been supported by the Swedish Council of Building Research.

The investigation included static penetration tests in three types of sand (Fig. 1) which were compacted to different densities in a cylindrical container. The penetrometer, which is the most common type in Sweden, is manufactured by Nilcon AB and has a pyramidal point with a maximum cross-sectional area of 10 cm<sup>2</sup>.

The test results show (Fig. 3) that there is no unique relationship between the penetration resistance, at a certain depth, and the void ratio in the sands. As shown in Fig. 4 the normally assumed relationship between the penetration resistance and the relative density  $D_r$  does not exist either.

As shown in Fig. 5, the penetration resistance in moist sand was found to be about twice the resistance in dry sand. Other tests in saturated sand show that there is no significant difference in the penetrometer resistance between dry and saturated sand.

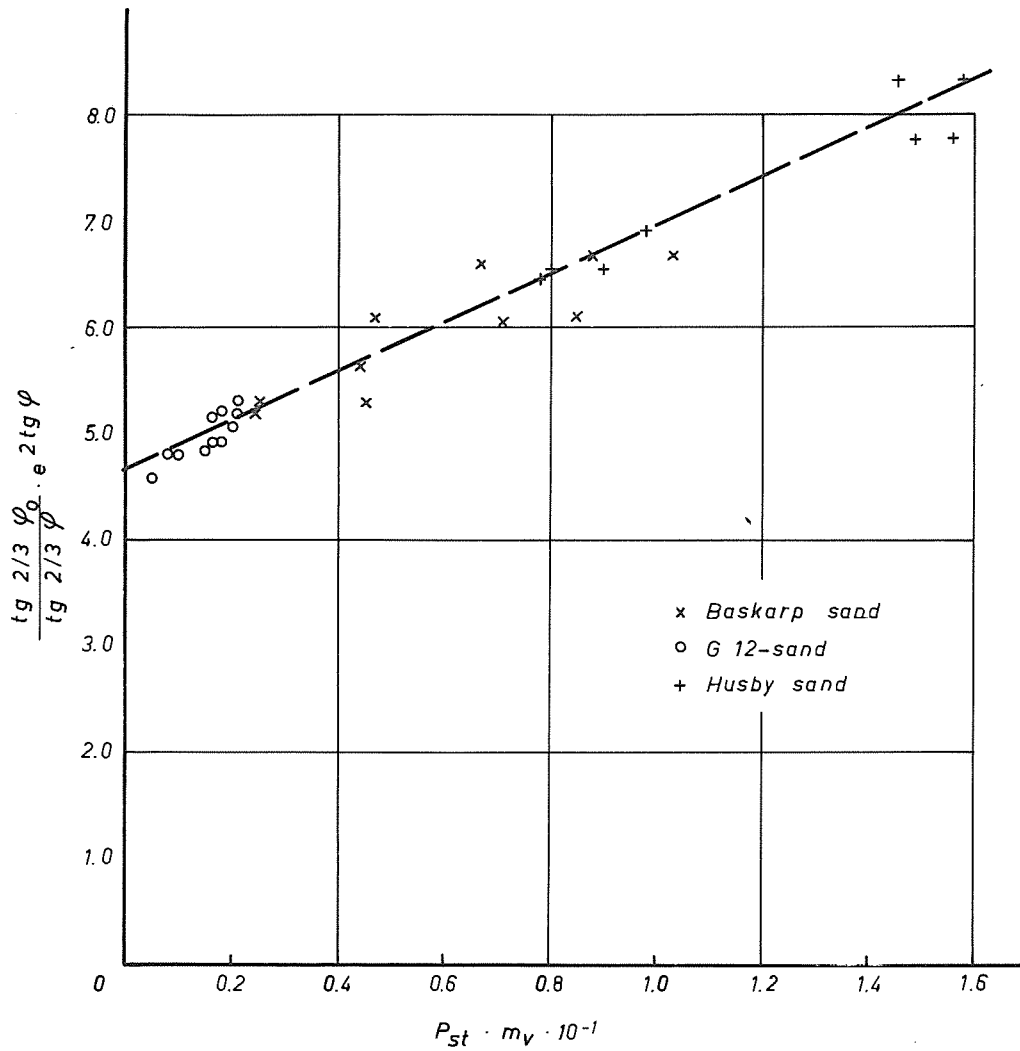


Fig. 9 Samband mellan trycksonderingsmotstånd  $P_{st}$ , kompressibiliteten  $m_v$  och inre friktionsvinkeln  $\varphi_d$   
 Correlation between static cone penetration resistance  $P_{st}$ , the compressibility  $m_v$  and the angle of internal friction  $\varphi_d$

To study the effect of the internal friction and the compressibility of the sands some additional tests were performed. The angle of internal friction  $\varphi_d$  was taken from triaxial tests on dry sand and the compressibility  $m_v$  was taken from compressometer tests. The results of these tests are shown in Fig. 6 and 8.

Since no unique relationships was found between the penetration resistance and the angle of internal friction  $\varphi_d$ , Fig. 7, an attempt was made to find a correlation between a combined function of  $\varphi_d$ ,  $m_v$  and the penetration resistance. Such a function is shown in Fig. 9 and Equation (3).

#### Referenser

SCHULTZE, E. & MELZER, K., 1965. The determination of the density and the modulus of compressibility of non-cohesive soils by soundings. Proc. 6. Int. Conf. Soil Mech. a. Found. Engng Vol.1 p. 354-358. Montreal.



## ANVÄNDNING AV TRYCKSONDERINGSUTRUSTNING TYP NILCON VID GRUNDUNDERSÖKNING

Professor Sven Hansbo, Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH

### Inledning

J&W (AB Jacobson & Widmark) har sedan 1960 i sin konsultverksamhet använt trycksondering överallt där denna ansetts ekonomiskt konkurrenskraftig i förhållande till alternativet viktsondering. Firmans ställningstagande till förmån för trycksonden har baserats på att friktionen (eller kohesionen) mot sondstängerna har försvårat och ibland resulterat i en felaktig tolkning av utförda viktsonderingar, jfr fig. 1 a - b. Det är inte bara stångfriktionens motstånd mot nedpressning och vridning av sonden som därvidlag har betydelse utan också det ljud som uppstår längs stängerna. Detta ljud kan lätt tolkas som ett ljud från själva sondspetsen och därmed vilseleda borrhingsledaren i hans bedömning av jordart på sondspetsnivån.

Man kan konstatera att det rått en tämligen utbredd misstro mot trycksond av typ Nilcon (f d Jonell & Nilsson). En av anledningarna har varit att man med denna trycksond ibland uppmätt så stor mantelfriktion mot sondstängerna att spetsmotståndet blivit negativt, ett förhållande som lätt kan uppstå när totala mantelfriktionen inte mäts kontinuerligt utan endast punktvis (t ex på varje eller varannan meters djup). Dessutom är det ofta svårt för borrhingsledaren, eller för den som tolkar sonderingsdiagrammet, att överhuvudtaget avgöra mantelfriktionens storlek. En ytterligare anledning till nämnda misstro är att känsligheten hos sonden inte är tillräcklig vid de lösaste jordavlagringarna. Okets massa (15, alt. 30 kg) verkar nämligen som en extra belastning på sonden och måste vid en noggrann analys - liksom massan av påskavade sondstänger - adderas till det registrerade sonderingsmotståndet.

När en ny utrustning introduceras är det tämligen självklart att man snart upptäcker vissa barnsjukdomar. Sådana har också förekommit på Nilcons trycksond. Bland dessa barnsjukdomar kan nämnas ofullkomligheter i kraftöverföring till skrivare (vissa glapp, nollinjeförskjutning), i djupregistrering (exempelvis

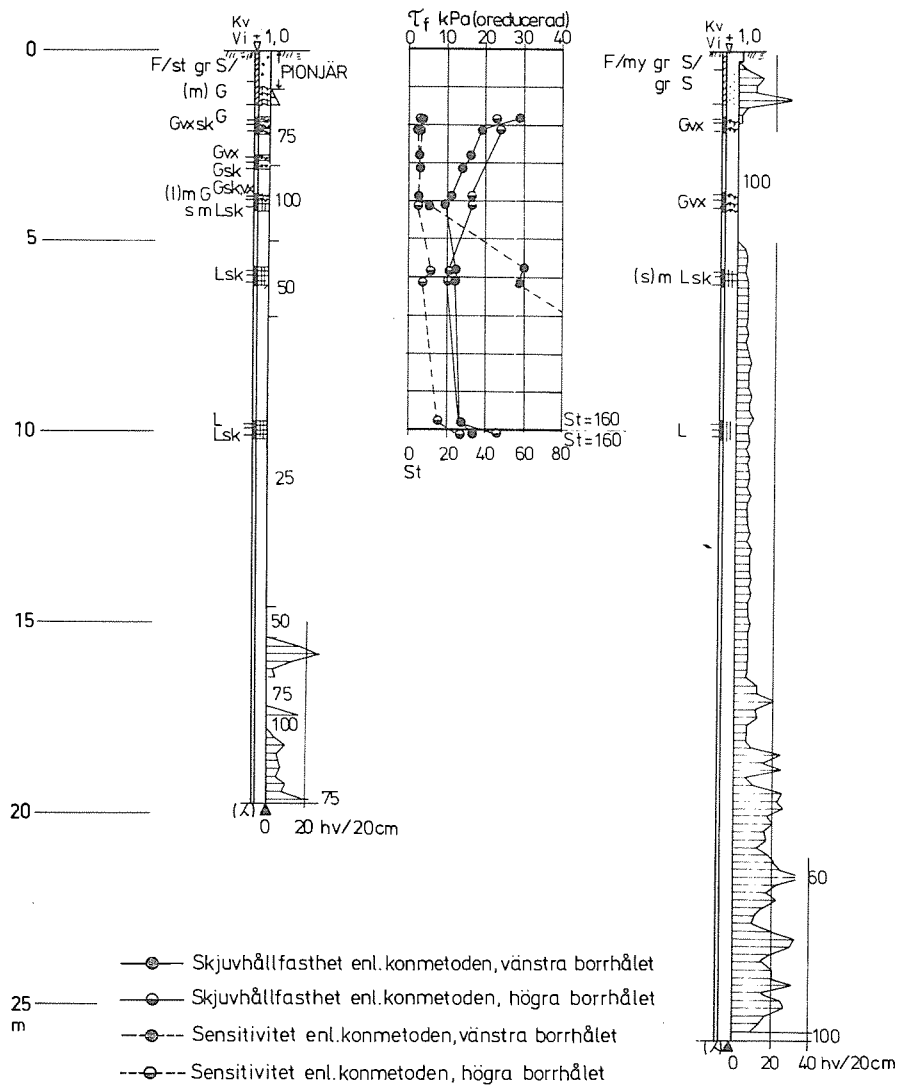


Fig. 1 a Jämförelse mellan viktsonderingar i kvicklera (t.v.) och normalsensitiv lera med ungefär samma odränerade skjuvhållfasthet. Avstånd mellan sondhålen = 20 m. Sonderingsmotståndet i kvickleran är som framgår väsentligt lägre än i den normalsensitiva leran

Comparison between weight-soundings in quick clay (left) and in clay with "normal" sensitivity. The shear strengt in both cases approximately equal. Distance between bore-holes = 20 m. As can be seen, the resistance to penetration in the quick clay is much lower than in the clay with normal sensitivity

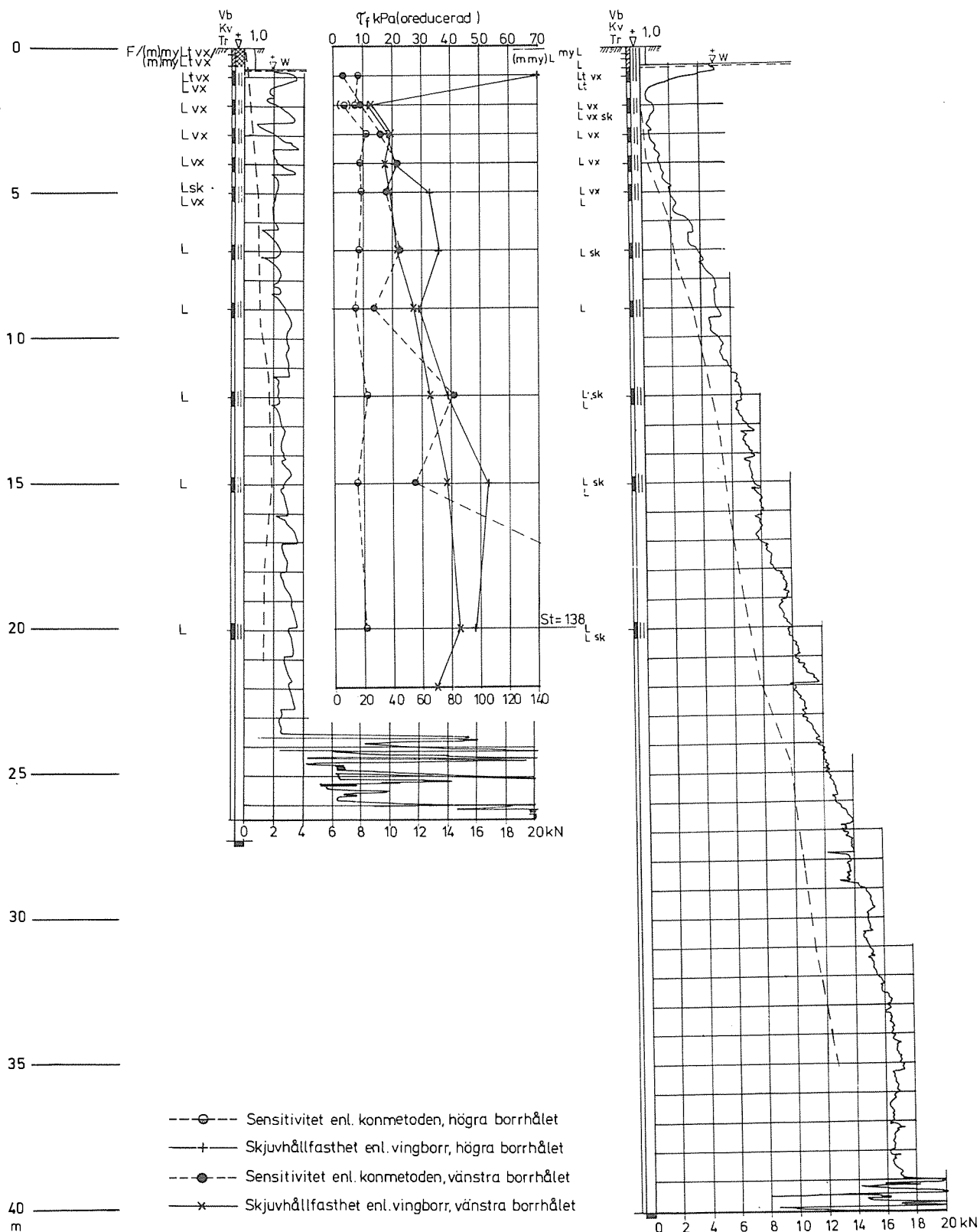


Fig. 1 b Jämförelse mellan trycksonderingar i kvicklera (t.v.) och normal-sensitiv lera med ungefär samma odränerade skjuvhållfasthet. Avstånd mellan sondhålen = 65 m. Spetsmotstånden är som framgår i stort sett lika medan totala sonderingsmotstånden är helt olika.

Comparison between static penetrometer tests in quick clay (left) and in clay with "normal" sensitivity. Distance between boreholes = 65 m. The shear strength in both cases approximately equal. As can be seen, the point resistance is about the same whereas the total resistance differs considerably.

slirning mellan mättrissa och stång) och i själva glappkopplingen till spetsen (alltför kort slaglängd och vakuumeffekter). Misstagen har emellertid underhand rättats till och utrustningen fungerar nu i stort sett tillfredsställande. Likväl skulle man önska sig en praktiskt användbar och ekonomiskt konkurrenskraftig trycksond där man kunde mäta dels motståndet mot sondspetsen direkt, dels friktionsmotståndet mot mantelytan på en viss given längd av sondstången, på viss given höjd över spetsen. Kunde man dessutom vid spetsen bygga in ytterligare registreranordningar, t ex porttrycksmätare och gammaneutronsond, och få hela resultatet utskrivet på remsstans skulle man utan tvekan få ett utomordentligt fint instrument för kartläggning av undergrundens tekniska egenskaper.

#### Trycksondering ur konsultens synvinkel

Nilcons trycksond har, trots de inledningsvis påtalade bristerna, visat sig vara mycket användbar i praktisk verksamhet - framför allt genom att den registrerar sondmotståndet kontinuerligt. Fördelarna med metoden har blivit än mer påtagliga genom en mekanisering som eliminerat behovet av förankringsanordningar, möjliggjort större nedpressningskraft och medfört en kraftig rationalisering i form av minskad undersökningstid och reducerade kostnader. Mekaniseringen har också medfört att inverkan av den personliga faktorn mer eller mindre eliminerats.

Vi kan alltså konstatera att trycksonden praktiskt-ekonomiskt i många fall är överlägsen viktsonden som är den närmast jämförbara sonderingsutrustningen. Hur ser man då i dag på möjligheterna till en korrekt tolkning och är dessa överlägsna jämfört med möjligheterna vid andra sonderingsmetoder? Som jag nämnde inledningsvis råder en viss skepsis gentemot trycksond av typ Nilcon, vilket bl a yttrat sig i att man i SGF:s sonderingskommittés anvisningar - i de fall trycksondering görs - rekommenderat jämförande viktsondering i ett bestämt antal borrhöjder. Denna övertro på viktsonden är för mig gåtfull och botten utan tvekan i en konservatism som trots påstående om motsatsen starkt präglar även ingenjörsfacket. Det finns också en annan skola för vilken trycksonden är nästan allena saliggörande. Av en nyutkommen bok av Sanglerat (1972) framgår att man på olika håll i världen bedriver en omfattande forskning för att kunna översätta trycksonderingsresultaten till bärighets- och deformationsegenskaper. Det förefaller nästan som om man vill göra trycksonden till ett universalinstrument med vilket man kan lösa alla geotekniska problem. För



mig är denna övertro på trycksonden lika oberättigad som den tidigare påtalade misstron. Trycksonden kan enligt min uppfattning aldrig bli annat än ett hjälpmedel - ett korrelationsinstrument - som gör det möjligt att kartlägga variationer i jordlagerföljd och materialegenskaper inom en region med likartade geologiska förhållanden. De mera preciserade geotekniska egenskaperna, liksom den detaljerade jordlagerföljden, måste emellertid fastställas med mera sofistikerade metoder. Trycksondering bör därför alltid kombineras med andra, mera avancerade undersökningsmetoder. En direkt tolkning i stil med den som anges av forskare, och i läroböcker, kan endast göras i sådana fall där de geologiska förhållandena är ensartade och välkända och där egenskaperna hos ingående jordarter redan är kända i förhållande till trycksonderingsresultaten.

#### Kartläggning av jordlagerföljd

En av metodens främsta fördelar är att den - jämfört med andra sonderingsmetoder - starkt förbättrar möjligheterna till kartläggning av jordlagerföljden. Detta skall här illustreras med fyra exempel.

Det första exemplet är hämtat från en forskning utförd vid Chalmers tekniska högskola (jfr Hansbo S & Torstensson B-A, 1968). I samband härmed gjordes - vid sidan av trycksondering - en noggrann analys av jordlagerföljden och de geotekniska egenskaperna hos ingående jordarter i en deltaavlagring i Karlstad, fig. 2. Som framgår kan man av sondmotståndet klart särskilja gränsen mellan det övre lagret av organisk friktionsjord (häftiga kastningar i sondmotstånd) och det undre lagret av mjäla (finsilt) - lera (ett lugnt förlopp hos sondmotståndet). Övergången lera/sandig mo närmast över fast botten är också klart markerad. Den mjuka sonderingskurvan från ca 15 till 30 m djup visar att jordlagren av silt och lera är homogena. Mantelfriktionen är som framgår högre i den dyiga leran än i den rena mineralleran (ca 3 - 5 kPa mot ca 1 kPa). Det framgår också att jorden ner till 15 m djup är grovkornig (starkt varierande motstånd) och mycket löst lagrad (lågt medelmotstånd). De höga portal som uppmätts på vissa nivåer i mon (finsanden) avspeglas klart i sondmotståndet. Hade sonderingen utförts med viktsond skulle det - eftersom totala sonderingsmotståndet är förhållandevis lika genom hela jordprofilen - utan tvivel ha varit omöjligt att avgöra de förhållanden som så klart avspeglas i trycksonddiagrammet.

Det andra exemplet är hämtat från riksväg 15 mellan Karlshamn och Ronneby,

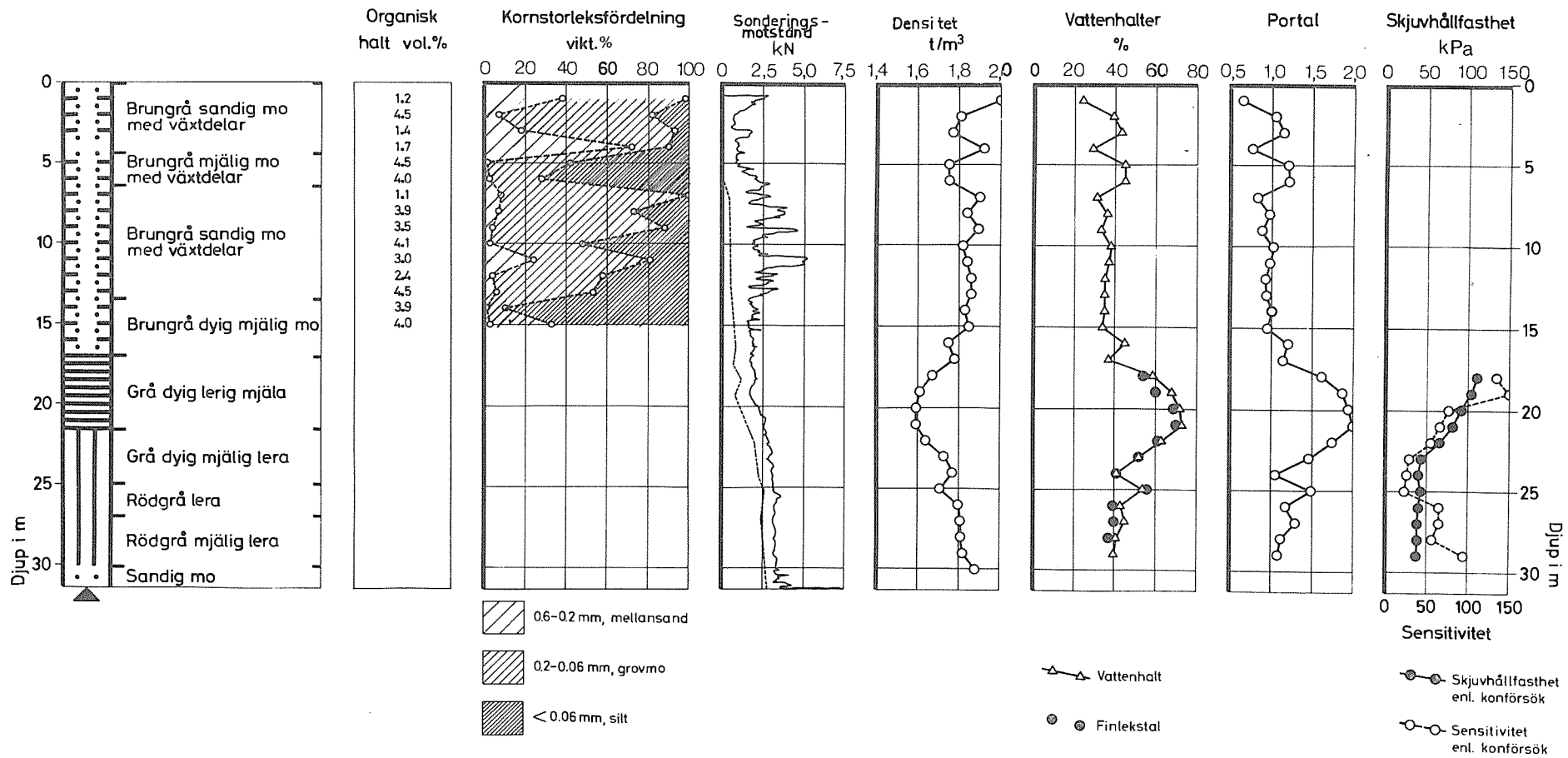


Fig. 2 Trycksondering utförd i en deltaavlagring. Variationerna i spetsmotståndet liksom storleken ger en god bild av jordlagerföljden liksom av den överlagrade sandens porositet.

Static penetrometer test in a deltaic deposit. The variation and magnitude of point resistance give a good picture of the soil profile as well as of the porosity of the top layer of sand.

fig. 3. Jordlagerföljden karakteriseras här, liksom i övrigt i Blekinge, av oregelbundna växlingar mellan organiskt och oorganiskt samt mellan grövre och finare material, ofta med flera torrskorpebildningar orsakade av havets upprepade transgression och regression. Svårigheterna att tolka trycksonderingsdiagrammet är större i detta fall än i föregående, men kompletteras trycksonderingen med provtagning på vissa nivåer - även om detta sker i mindre utsträckning än som visas i figuren - får man som framgår en mycket klar bild. De växelvis förekommande skikten av lera och mjäla/mo framträder bl a tydligt. Likaså kan man klart urskilja att jorden mellan ca 5,5 och 8 m djup är mera homogen än i övrigt vilket också framgår av provtagningen. Den jämförande viktsonderingen ger däremot små möjligheter till en detaljerad tolkning.

Det tredje exemplet - också det hämtat från Blekinge, närmare bestämt kv. Gävle i Karlshamn - visar att man i de fall friktionen mot sondstången kan försummas får god korrelation mellan motståndet vid trycksondering och antalet vridna halvvarv vid viktsondering, fig. 4. Exemplet illustrerar också två icke ovanliga fel vid trycksonderingen. Det ena felet består i att man efter varje skarvning av sondstången och lyftning av oket får ett tillfälligt ökat sondmotstånd. Denna ökning kan bero på portrycksförändringar i jorden under vilopausen vid skarvningen och är då i och för sig inte något fel, men den kan också bero på att sondstången, när oket står i sitt övre läge, klämmer mot sidan av det förborrade hålet. Motsatsen, "julgransform", kan uppstå om sondstången klämmer mot sidan av hålet när oket står i sitt nedre läge. Dessa klämkrifter kan undvikas genom att man använder raka sondstänger och ser till att sondstången hela tiden löper lodrätt utan att stöta mot hålets väggar. Det andra felet består i en nollinjeförskjutning, vilket framgår av att skrivararmen vid skarvningarna (representerad i diagrammet av de på varje meter återkommande horisontella linjerna) inte gått helt tillbaka.

Det fjärde och sista exemplet på hur man med trycksondering kan bedöma jordlagerföljden är hämtat från Gävle lasarett, beläget på en grusås med svårforcerat ytlager av sand och grus. Med hjälp av trycksondering har det här varit möjligt att lokalisera ett antal lerlinser eller lerlager under grundläggningsnivån, fig. 5 a - b. Fig. 5 a visar en jämförelse mellan trycksondering och sondering med slagborrmaskin, typ Pionjär. Fig. 5 b visar ett trycksondhål, kombinerat med provtagning, 10 m från sondhålen i fig. 5 a. De stora och snabba variationerna samt storleken på sondmotståndet visar att jorden innehåller

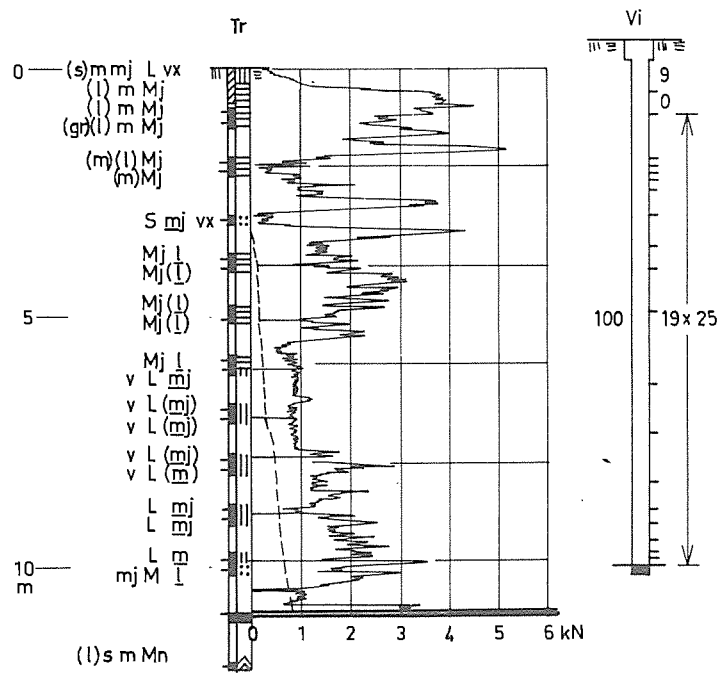


Fig. 3 Jämförelse mellan tryck- och viktsonderingsresultat i en finkornig skiktad jord. Tolkningsmöjligheterna med avseende på jordlagerföljden är som framgår väsentligt bättre vid trycksondering än vid viktsondering.

Comparison between static penetrometer test and weight sounding resistance in a fine-grained layered soil. The possibility of interpretation with reference to the soil profile is obviously much better when using a static penetrometer than when using a weight sounding equipment.

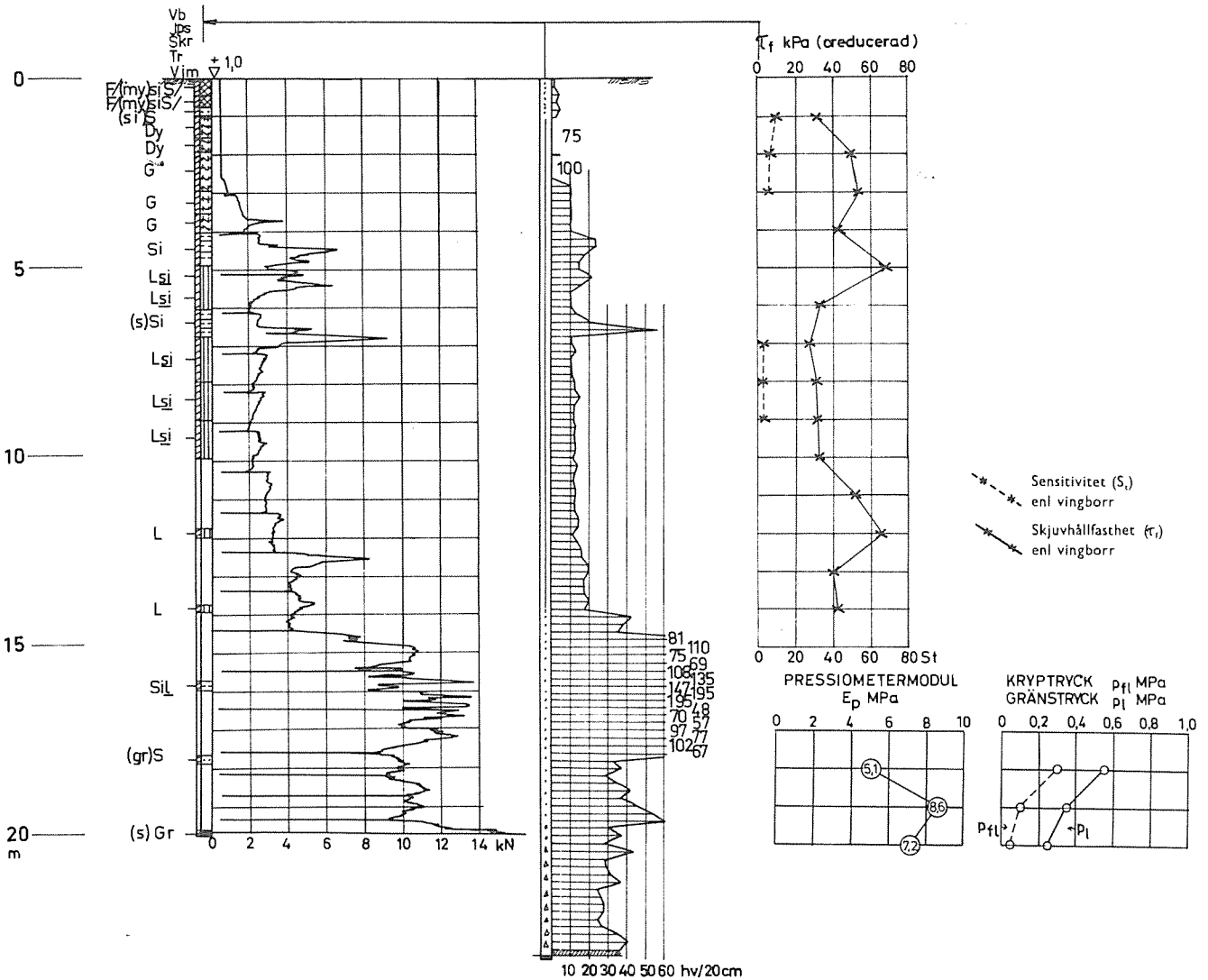


Fig. 4 Exempel på god korrelation mellan sondmotstånd vid trycksondering och antal vridna halvvarv vid viktsondering. Den goda korrelationen sannolikt beroende på att stångfriktionen är noll.

Example of good correlation between penetration resistance and number of half-turns per unit penetration by weight sounding. The good correlation probably due to the fact that the side friction is negligible.

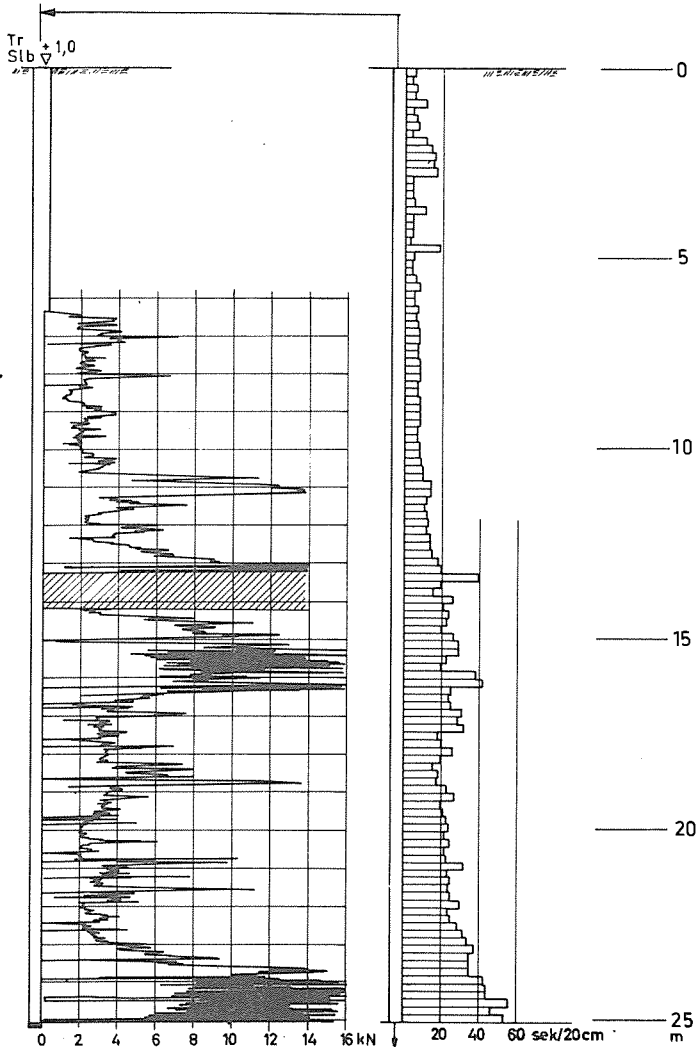


fig a)

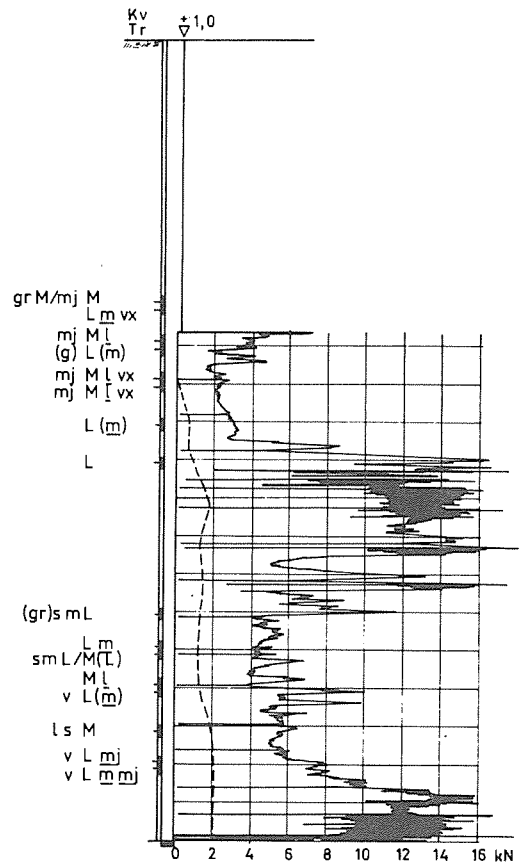


fig b)

Fig. 5 Jämförelse mellan trycksondering och sondering med slagbormaskin, typ Pionjär, i en oregelbunden åsavlaging. Trycksonderingen möjliggör i detta fall lokalisering av lerlinser (lersskikt) i sand- och grus-avlagringarna. Sondhålet i fig. b) beläget 10 m från sondhålet i fig. a).

Comparison between static penetrometer tests and dynamic sounding, type Pionjär, in an erratic esker. The static penetrometer tests make it possible to locate clay lenses (layers) in the sand and gravel deposits. The bore-hole in fig. b) is situated 10 m from the bore-hole in fig. a).

växelvis grovkorniga och finkorniga skikt. Vi ser också hur man i b) fått väsentligt större totalt sondmotstånd än i a) men att spetsmotståndet i stort sett är lika. Trycksonddiagrammen visar mycket klart läget hos de sökta lerlinserna/lerlagren.

### Kartläggning av jordarters geotekniska egenskaper

Som jag redan tidigare framhållit bör en trycksondering, om man vill närmare kartlägga jordarternas geotekniska egenskaper, kombineras med mera sofistikerade undersökningsmetoder. Det torde nämligen vara orealistiskt att för praktiskt bruk bygga in i själva trycksonden alla de mätanordningar som skulle behövas för en korrekt analys. Frågan är om det överhuvudtaget är möjligt att ta hänsyn till alla de faktorer som påverkar sonderingsresultatet. Man behöver bara peka på sådana faktorer som inverkan av neddrivningshastighet, sensitivitet i lera, portrycksförändringar i silt och finsand, stenar i sand och grus, tätliggande grovkornigare skikt i lera, organiskt innehåll etc för att förstå hur komplex tolkningen måste bli. Kombinerad med provtagning och direkt bestämning av de geotekniska egenskaperna i fält och i laboratorium utgör den emellertid i praktiken ett utmärkt och nödvändigt komplement. En mycket omfattande sammanställning av forskning och erfarenheter beträffande översättning av spetsmotståndet för olika trycksondtyper till skjuvhållfasthet, friktionsvinkel etc har som nämnts gjorts av Sanglerat (1972). Den tolkning till skjuvhållfasthet som redovisas för Nilcons trycksond måste emellertid tas med stor reservation och kan endast betraktas som överslagsmässigt korrekt för lera av Göteborgstyp. Helt andra värden har ibland erhållits för lera inom andra regioner i Sverige. Man kan alltså konstatera att korrelationsfaktorn måste bestämmas från fall till fall. Känner man korrelationsfaktorn har man däremot stora möjligheter att göra en direkt översättning.

Som exempel på dessa möjligheter vill jag bl a hänvisa till fig. 2, där den odränerade skjuvhållfastheten uppenbarligen kan uttryckas som ca  $1/20$  av spetsstrycket (överensstämmande med den av Nilcon angivna övre gränsen) och fig. 4 där samma skjuvhållfasthet är ca  $1/70$  av spetsstrycket (spetsstrycket i MPa = spetskraften i kN).

En ännu bättre illustration till nämnda möjligheter ges i fig. 6. Trycksonderingen, som i detta fall gjorts i en moränlera i Lund, har sedermera komplette-

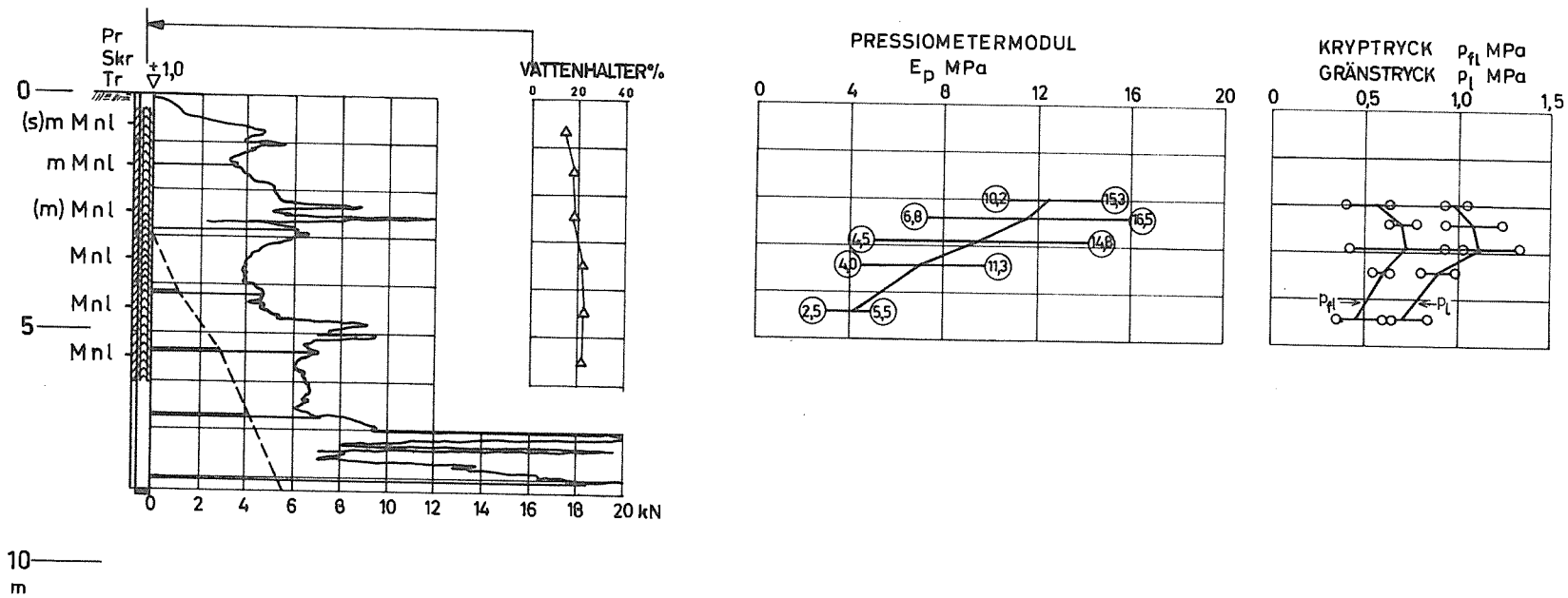


Fig. 6 Jämförelse mellan resultat av trycksondering och pressiometerförsök i moränlera i Lund. Spetsmotståndet avspeglar i stort pressiometermoduler och gränstryck.

Comparison between results of static penetrometer and pressure meter tests in boulder clay in Lund. The point resistance has good correlation with the pressure meter modulus and the critical pressures  $p_l$  and  $p_{fl}$ .



rats med pressiometerförsök och med belastningsförsök. Man ser att pressiometervärdena i stort sett avspeglar spetsmotståndet vid trycksondering. Överensstämmelsen är mycket påtaglig vad beträffar gränstrycken  $p_{fl}$  och  $p_1$ . En analys visar att pressiometermodulen är ca 2 (mera exakt  $1,8 \pm 0,7$ ) ggr spetstrycket, att gränstrycken  $p_1$  är  $0,2$  ( $0,20 \pm 0,05$ ) och  $p_{fl}$  ca  $0,15$  ( $0,14 \pm 0,06$ ) ggr spetstrycket. Skjuvhållfastheten, bedömd ur gränstrycket  $p_1$  och genom provbelastning av plattor med diametern  $1,0$  m, blir i detta fall ca  $1/30$  av spetstrycket (överensstämmande med den av Nilcon angivna undre gränsen). Helt andra relationer mellan spetstryck och pressiometervärden erhålls emellertid i andra fall, jfr fig. 4.

### Sammanfattning

Trycksonden av typ Nilcon är, kanske främst genom sin kontinuerliga registrering av sonderingsmotståndet, ett utomordentligt gott hjälpmedel för kartläggning av lagerföljden i en jordprofil. För bestämning av jordens geotekniska egenskaper bör den emellertid alltid kombineras med andra mera sofistikerade metoder: upptagning av ostörda prover, pressiometerförsök, fältvingborring etc. Av spetstryckets och mantelfriktionens storlek kan man därvid få en god uppfattning om de geotekniska egenskaperna hos den jord som är belägen mellan provtagningsnivåer och provtagningshål. Metoden är i sin nuvarande mekaniserade form rationell, snabb och ekonomisk. Direkt mätning av spetstrycket och mantelfriktionen skulle starkt förbättra metoden. Det skulle också på längre sikt vara önskvärt att även kunna registrera portrycksförändringarna vid neddrivningen och att resultaten skrevs ut på remsstans.

### Summary

Experiences concerning the practical use of the Nilcon (previously Jonell & Nilsson) static penetrometer are presented. It is shown that this penetrometer is an extremely usable aid in locating various soil layers in a soil profile. An advantage in this respect of the Nilcon method is that the resistance to penetration is continuously registered on a penetration diagram. It is felt, however, that it should not be used - unless combined with other more sophisticated investigations - to classify the soils with respect to geotechnical data, such as shear strength and compressibility. Such classification, based only upon the results of penetrometer

tests, can only be successful in regions with similar geological background where, furthermore, the geotechnical data are known from previous experience. A proper combination of penetrometer tests and laboratory investigations and also more advanced field investigations, e.g. pressuremeter tests and field vane tests, is no doubt the easiest and best way - both from technical and from economical aspects - to obtain the knowledge of the subsoil required in modern foundation engineering.

The use of the Nilcon penetrometer is, with its present mechanized form, rational, quick and economic. A direct registration of the point resistance and of the side friction would strongly improve the method. In a longer time perspective it would be desirable to be able to register also the pore pressure changes during penetration and have the results printed on a tape recorder.

#### Referenser

HANSBO, S. & TORSTENSSON, B-A., 1968. Sättningar under oljecisterner i Karlstad. Väg- och vattenbyggaren No. 8 p. 112-120.

SANGLERAT, G., 1972. The penetrometer and soil exploration. Interpretation of penetration diagrams - theory and practice. New York.

## ERFARENHETER FRÅN TRYCKSONDERING

Teknologie doktor Torsten Kallstenius, K-Konsult

### Kalibrering

En svensk specialitet är och har redan från början varit självregistrerande sonder.

De diagram över spetsmotstånd - djup man får fram på det viset blir mera detaljrika än diagram, som ritas upp i efterhand efter borrhingsprotokoll. Denna detaljrikedom har paradoxalt nog verkat försvårande för trycksonderingens snabba utbredning, då i början många geotekniker inte kände sig hemma med den speciella typ av diagramtolkning man måste lära sig.

När vi i början på 1950-talet började trycksondera med SGI:s sonderingsmaskin var första intrycket att kontrasten i diagrammen mellan kohesionsjord och friktionsjord var mycket tydlig och säkrare än vid viktsondering, åtminstone i Stockholmsområdet (fig. 1) och Götaälvdalen. Vid utvärdering av spetsmotståndet hade man vissa problem med att spetsmotståndet vid små spetsdiametrar blev mycket litet jämfört med mätnoggrannheten. Försökte man arbeta med större spetsdiametrar till samma stångdiameter uppkom problemet med nollinjeförskjutning. Det kunde konstateras att en spets med stor diameter blev mycket känslig för det statiska tryck som förelåg i hålrummet ovanför spetsen. Detta tryck kunde variera mellan vakuum och höga övertryck.

Vid användning av tung borrhätska ovanför spetsen var det möjligt att få sjunkning utan registrering av spetsmotstånd. Trycktillståndet kan verka såväl sänkande som höjande på spetsmotståndet vid stora spetsar, om spetsmotståndet mäts på hela spetsen (fig. 2).

Förhållandena kring spetsen påverkar spetsmotståndet också på andra sätt. Friktionen mot stång eller mantel ger en nedåtriktad kraft, som kan öka totaltrycket i jorden vid spetsen och då också ökar spetsmotståndet. Porvattenströmmarna kring spetsen kan påverka såväl spetsmotståndet som mantelmotståndet i närheten av spetsen.

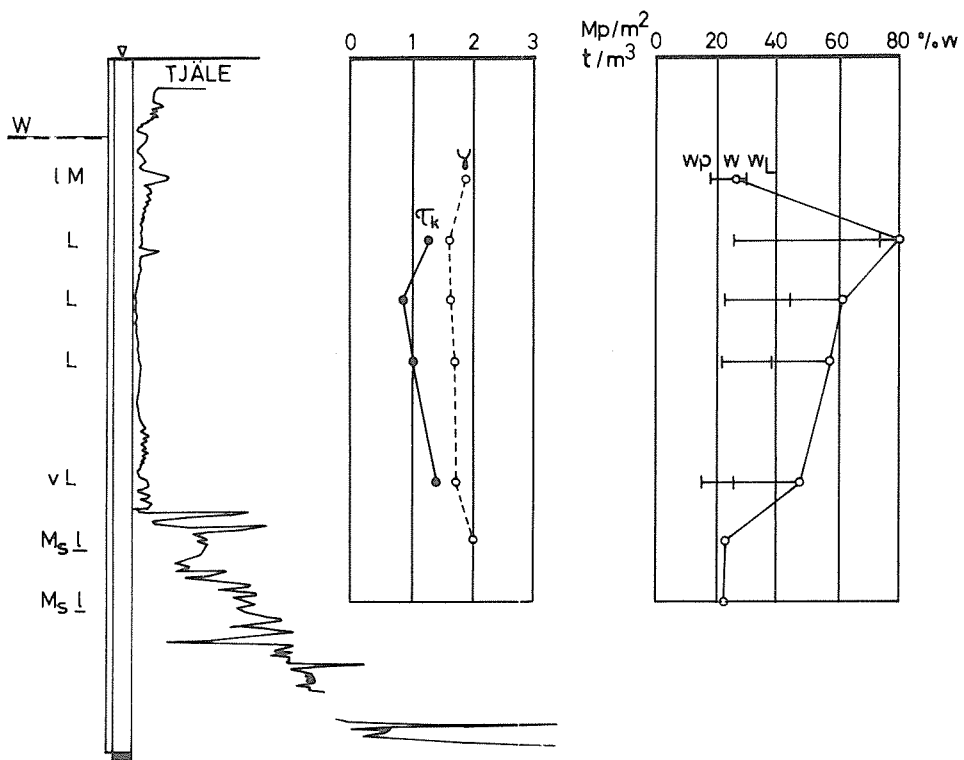
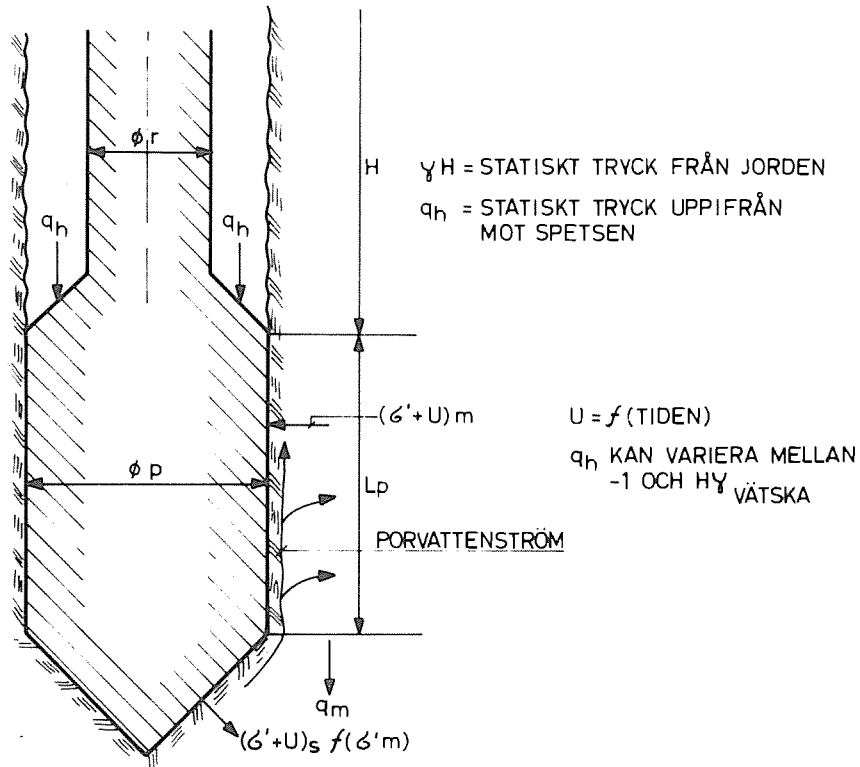


Fig. 1 SGI maskinsonderingsdiagram, Sollentuna  
Spets  $\varnothing$  25 mm, mantel 25 mm

Diagram of the SGI Sounding Machine, Sollentuna  
Point diameter 25 mm, sleeve 25 mm



UPPÅTRIKTAD MANTELKRAFT =  $M_u$     UPPÅTRIKTAD SPETSKRAFT =  $S_u$

$$P_s = \pi \cdot \phi_p \cdot L_p \cdot f(\sigma'_m) + \frac{\pi \phi_p^2}{4} (\sigma'_m + U)_s \cdot f(\sigma'_m) - q_h \frac{\pi}{4} (\phi_p^2 - \phi_r^2)$$

NEDÅTRIKTAD SPETSKRAFT =  $S_n$

$$P_s = S_u + M_u - S_n$$

Fig. 2 Faktorer som påverkar spetsmotståndet vid trycksondering

Factors influencing point resistance at penetration testing

Så löseggsbildning kan påverka sonderingsmotståndet. Löseggsbildning innebär att jord häftar vid spets eller mantel och därvid ökar dess verksamma tvärsnittsytta.

Vid olika tillfällen har trycksonderingsdiagram kunnat tolkas och jämföras med skjuvhållfasthetsbestämningar. Fig. 3 visar några exempel på kalibreringar.

Av mättekniska skäl är spridningen störst vid små spetsmotstånd. Varierande portryck är en trolig huvudorsak till spridningen. Portrycket har i lera konstaterats överstiga 1 bar ( $\approx 10 \text{ Mp/m}^2$ ) vid nedpressning av en stång (jfr Kallstenius & Wallgren, 1956, fig. 8a-b), men kan också vara avsevärt lägre, beroende på dilatans och permeabilitet hos jorden. Specifika trycket på spetsen har i allmänhet varit högre än vad som skulle kunna kalkyleras utan hänsyn till de makrogeotekniska förhållandena. När spetsdiametern ökar relativt stångdiametern minskar det specifika trycket. Ökad mantellängd ökar det specifika trycket. Roterande stång minskar spetsmotståndet.

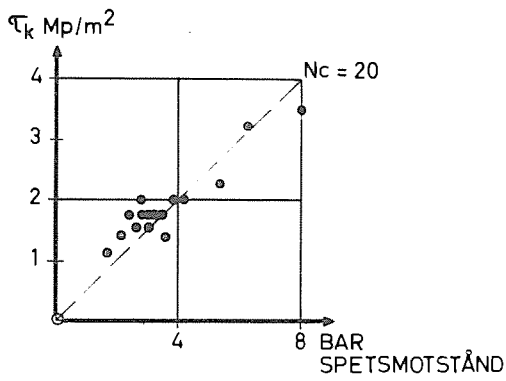
### Diagramtolkning

En faktor, som verkat fördröjande på utnyttjandet av trycksonderingstekniken i Sverige har varit bristen på vägledning när det gäller att tolka diagrammen. Här behövs kunskap om de maskinella och drifttekniska faktorerna, erfarenhet av diagram i olika lagerföljder och viss tolkningsskicklighet. Tolkning av trycksonderingsdiagram får en viss likhet med tolkning av flygbilder. Man kan ta hänsyn till många olika faktorer (fig. 4).

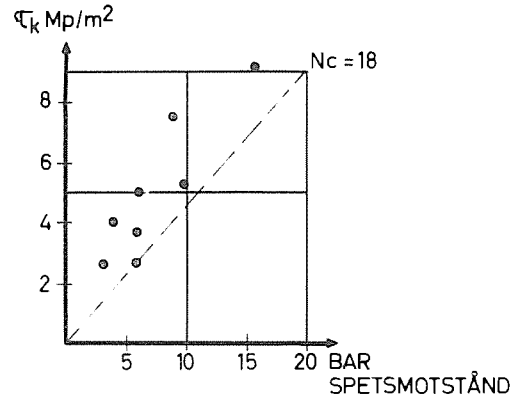
Regelbundna hack i kurvorna med t ex samma intervall som skarvstängernas längd tyder på, att skarvningförfarandet, portrycket eller den fria stångvikten har påverkat resultaten.

Spetsmotståndets storlek kan antyda fasthet, om det är mycket högt, och löshet, om det är mycket lågt, men man kan inte utan vidare påstå, att det gäller en viss jordart. Fig. 4 antyder vissa tolkningselement, som man kan ha nytta av. Man måste lägga märke till att alternativa tolkningar är möjliga, såsom figuren antyder.

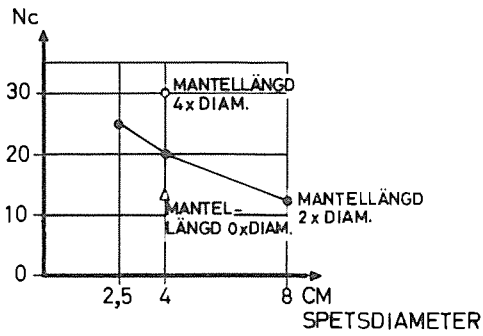
Fig. 5 visar två mycket lika trycksonderingskurvor i moränlera, där man i det ena fallet har ett gyttjeskikt, som endast kan urskiljas genom en något jämnare kurvdel.



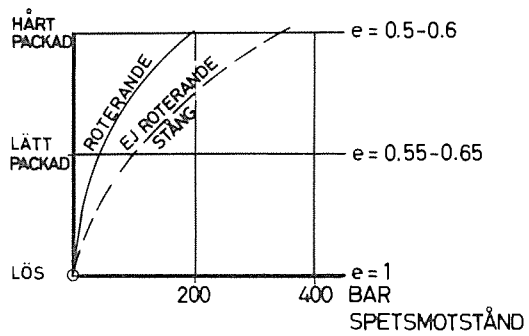
SGI SONDERMASKIN I LERA, BÅLSTA  
SPETS  $\phi$  40MM MANTEL 40MM



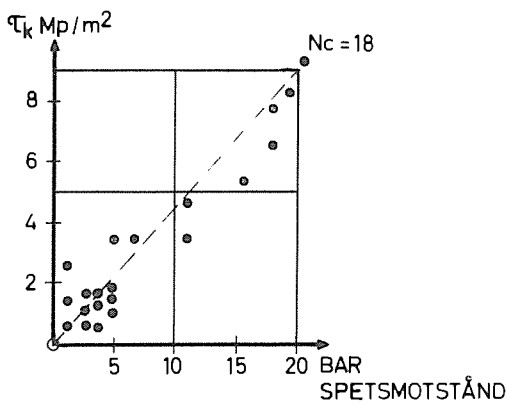
SGI SONDERMASKIN I LERA, JÄRVA  
SPETS  $\phi$  25MM MANTEL 25MM



SGI SONDERMASKIN I LERA, AGNESBERG  
INVERKAN AV OLIKA SPETSAR VID SAMMA STÅNG

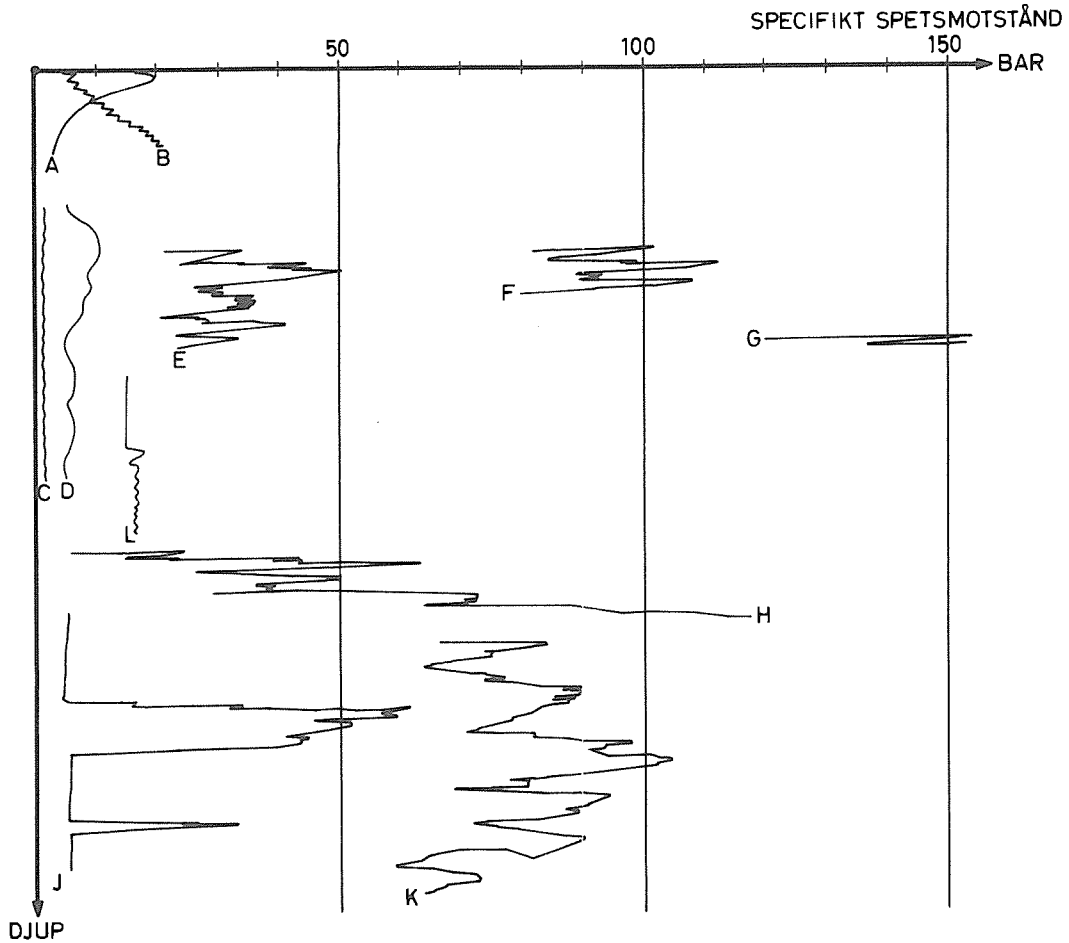


SGI SONDERMASKIN, KALIBRERING I SAND  
SPETS  $\phi$  25MM MANTEL 25MM

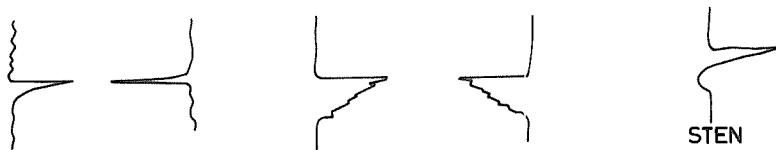


NILCON TRYCKSOND I LERA, JÄRVA  
10 CM<sup>2</sup> SPETS

Fig. 3 Några kalibreringar av svenska trycksonder  
A few calibration tests of Swedish penetrometers



- A = TORRSKORPA I LERA
- B = MARKYTA MED FRIKTIONSJORD
- C = LERA, GYTTJA ELLER LÖST LAGRAD SAND
- D = Fyllning av sand eller gyttja
- E = MEDELFAST LAGRAD SILT, SAND, GRUS ELLER TORV (KOMPRIMERAD)
- F = FAST LAGRAD SILT, SAND ELLER GRUS
- G = FAST LAGRAD GRUS ELLER MORÄN
- H = FÖRSTADIUM TILL MORÄN
- J = KONTRASTRIK LÄTTOLKAD KURVA
- K = KONTRASTFATTIG SVÅRTOLKAD KURVA
- L = ÖVERGÅNG POSTGLACIAL - GLACIAL LERA



STÅNGSKARVNING VID OLIKA MASKINER OCH OLIKA SILTJORD.

Fig. 4 Exempel på tolkningselement vid trycksondering  
Examples of interpretation elements in penetration testing



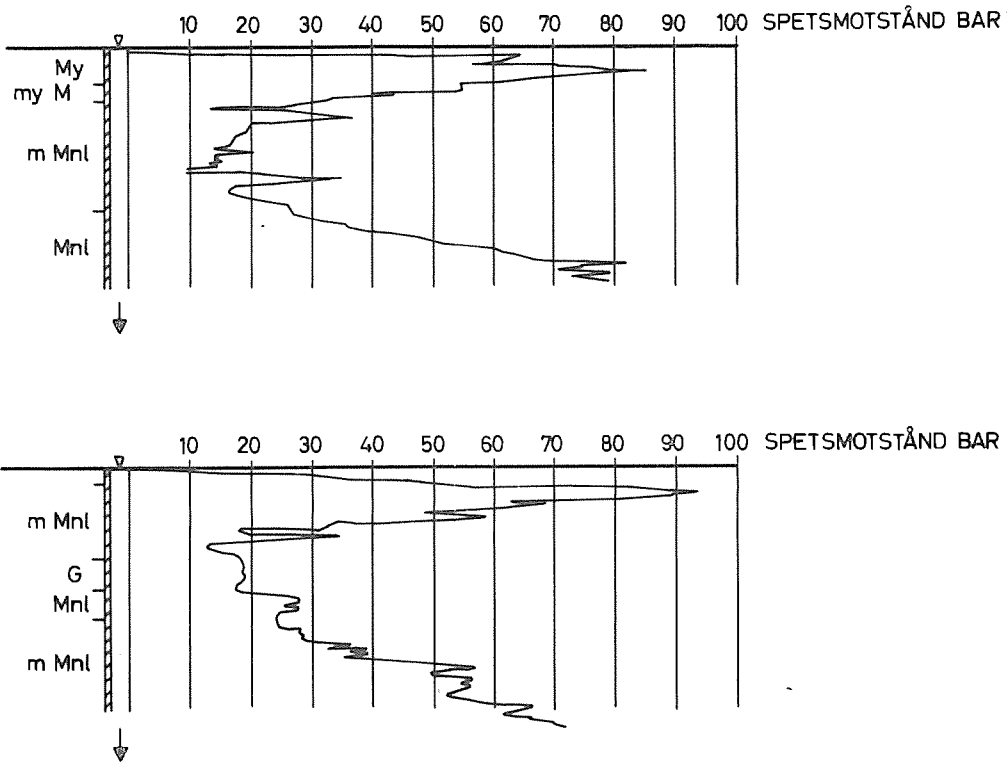


Fig. 5 Trycksonderingsdiagram från Malmö  
 10 cm<sup>2</sup> spets, typ Nilcon  
 Penetration-test diagrams from Malmö (Southern Sweden)  
 10 cm<sup>2</sup> point, type Nilcon

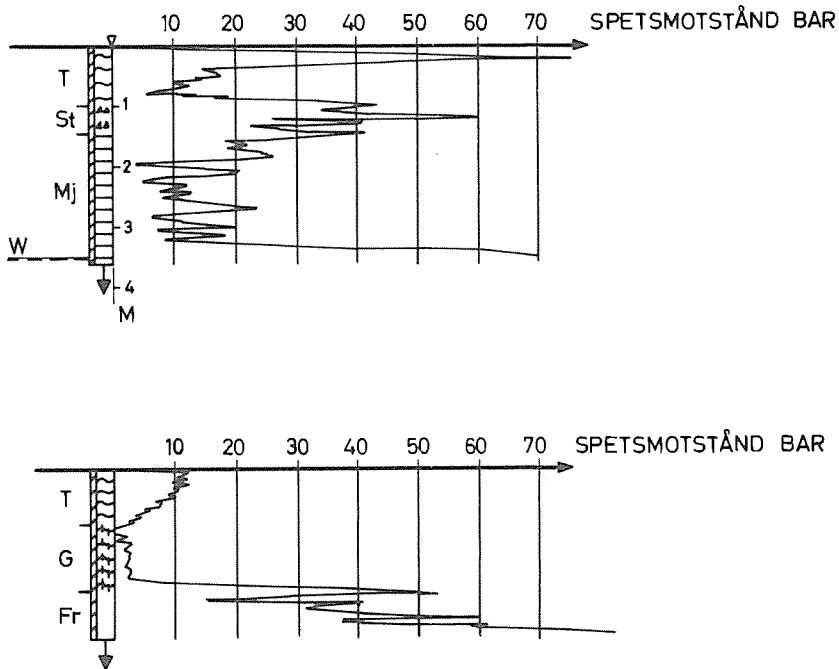


Fig. 6 Trycksonderingsdiagram från Skutskär  
 10 cm<sup>2</sup> spets, typ Nilcon  
 Penetration-test diagrams from Skutskär (Middle Sweden)  
 10 cm<sup>2</sup> point, type Nilcon

Fig. 6 visar ett liknande fall, där gyttjan givit lägre och jämnare spetsmotstånd. Torven kunde lika gärna ha tolkats som friktionsjord eller torrskorpelera.

I många fall är det lämpligt att frångå den tolkningsteknik man är van vid från viktsonderingen. Man kan inte utan vidare skriva Ko (oorganisk kohesionsjord) eller Fr (friktionsjord). Oftast kan man göra jämförande studier av olika diagram tagna på ett visst område och därvid urskilja vissa typiska diagramdelar. Fig. 7 visar exempel på en sådan tolkning där man har fått hjälp av intilliggande diagram och av gles provtagning för uttolkningen, som annars varit mycket svår att göra. Observera att mantelmotståndets (M) genomsnittsvärden delvis överstiger uppmätta totalmotstånd. Man har här bl a försummat stångviktens inflytande.

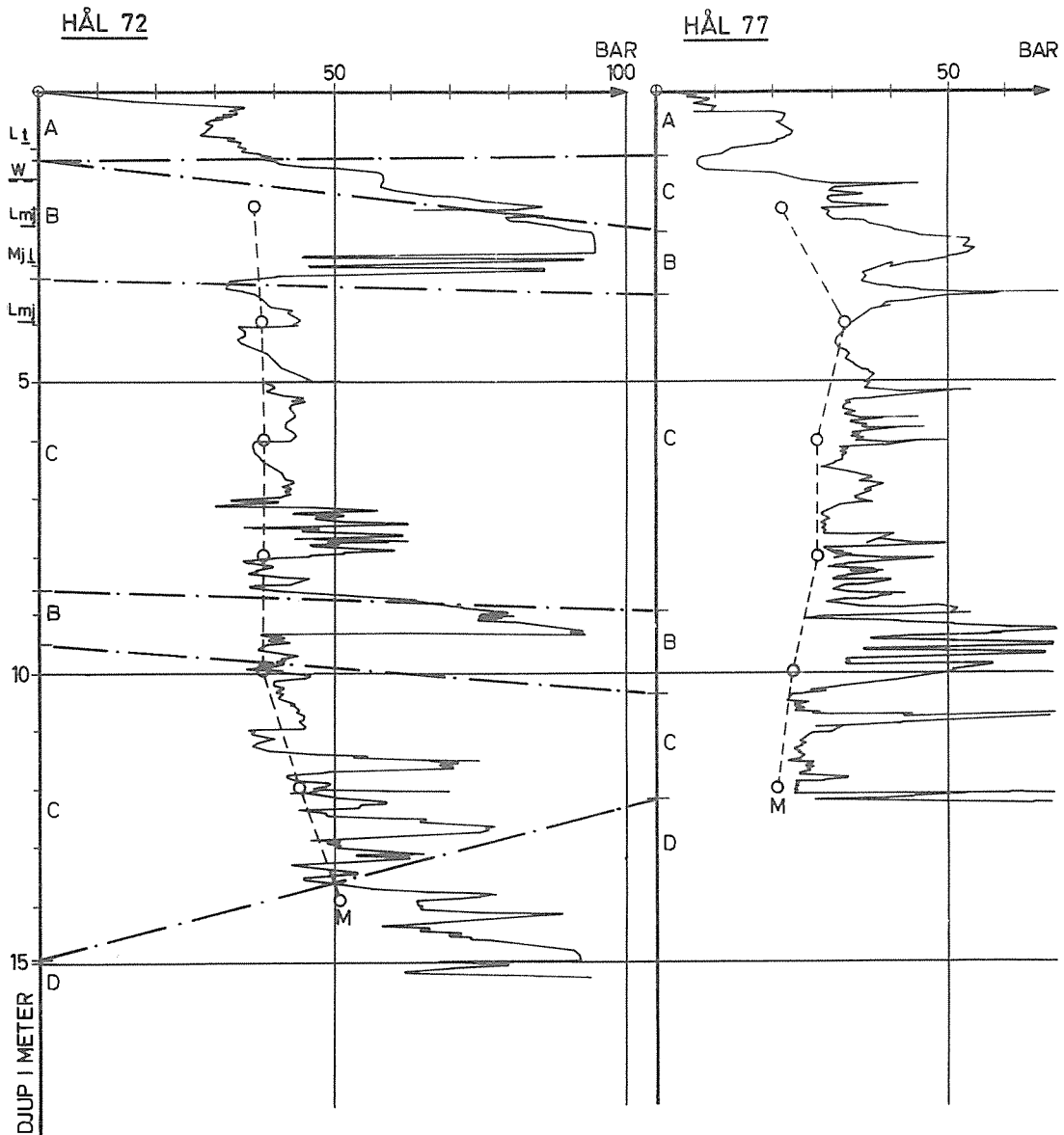
En viss kännedom om geologiska tolkningselement, som t ex torrskorpa av lera, övergång mellan postglacial och glacial lera och svallade skikt ovanför bottenmorän underlättar tolkningen. Man har också stor nytta av att i tabellform, som ansluter sig till ett områdes koordinater i plan, ange trycksonderingsresultaten för att få bättre överblick.

Tolkning av trycksonderingsdiagram skulle kunna underlättas om man beaktar kompletterande iakttagelser. En sådan iakttagelse är mantelmotståndets tillväxt med djupet. Antingen observerar man det totala motståndet mot sondstången eller också inför man en särskild mätmantel, där delmotståndet bestäms (jfr andra artiklar i denna publikation). Relationen spetsmotstånd - mantelmotstånd har i Västeuropa använts som tolkningshjälp.

En annan god hjälp är att avläsa portryckets, permeabilitetens eller spetsmotståndets ändring med tiden. Variationer antyder finkornig jord. Man skulle slutligen kunna jämföra resultaten vid statisk mätning i form av belastnings- och avlastningsförsök med kinetisk mätning.

#### Behov av forskning

Fig. 8 visar vissa faktorer vid trycksonderingsspetsar som behöver utredas, typiseras och standardiseras. Man skulle i en framtid ha nytta av att sortera upp möjligheterna mera komplett. Omedelbart bör man söka åstadkomma en provisorisk standardisering och typisering enligt följande:



- A = FASTA YTLAGER AV TORRSKORPELERA  
 B = FAST LAGRADE SKIKT AV LERA, MJÅLA ELLER MO  
 C = NÅGOT LÖSARE SKIKT AV LERA, MJÅLA OCH MO  
 D = FAST LAGRADE BOTTENSKIKT, SANNOLIKT FRIKTIONSJORD

Fig. 7 Trycksonderingsdiagram från Mjölby  
 10 cm<sup>2</sup> spets, typ Nilcon  
 Penetration-test diagrams from Mjölby (Middle Sweden)  
 10 cm<sup>2</sup> point, type Nilcon

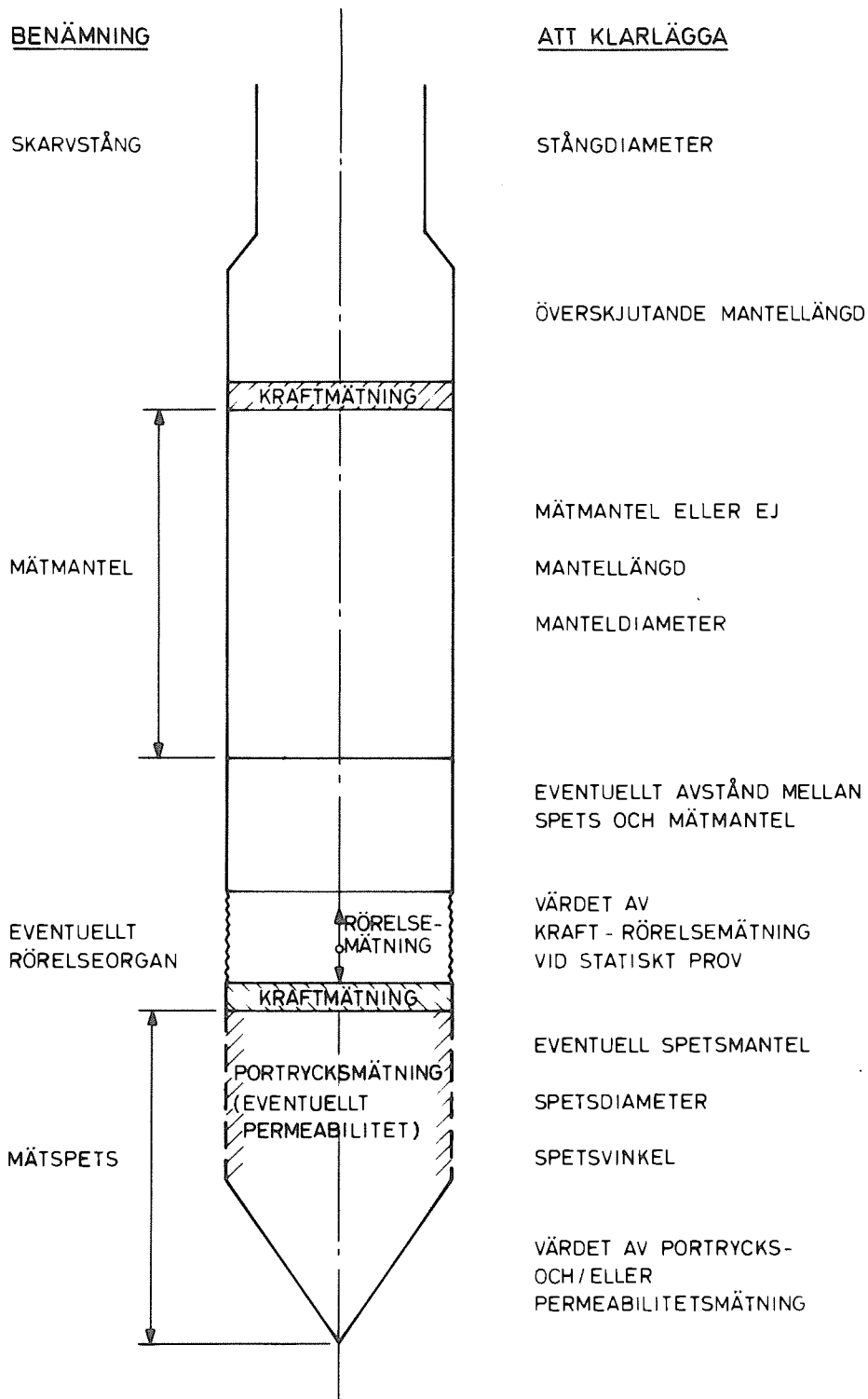


Fig. 8 Spetsen som forskningsobjekt  
Need of research concerning the penetrometer point

Uppdelning i typklasser  
 Spetsformen  
 Mätmantelformen och mantelns läge  
 Stångdiametern  
 Arbetshastigheten

För detta behövs vissa utredningar och vägledande försök.

Forskning för diagramtolkning bör syfta till att bygga upp en bank av tolknings-element för jordarter och geologiska profiler, där man beaktar enbart spetsmotstånd, enbart mantelmotstånd, enbart E-modul eller enbart permeabilitet, men också beaktar relationer mellan dessa variabler. Man bygger lämpligen ut systemet gradvis och börjar med spets- och mantelmotstånden. Arbetet bör på lång sikt syfta till en handbok i diagramtolkning.

Man vill helst kunna omsätta trycksonderingsresultat till praktiskt användbara geotekniska upplysningar. Då bör man kalibrera och statistiskt utvärdera trycksonderingens korrelationer till skjuvhållfasthet, kompressibilitet, E-modul, påbärighet och plattbärighet. Sannolikt kan man här få användbara närmevärden i varje fall för översiktliga bedömningar. För ändamålet behövs ett stort antal "case records".

Trycksondering förekommer i stor utsträckning, framför allt i Centraleuropa och Västeuropa. Behovet av forskning kan inte skäligen helt klaras av ett så litet land som Sverige. Mycket borde kunna utvinnas av ett organiserat internationellt samarbete, och där bör man satsa forskningsmedel. Vår geologi är dock i vissa fall speciell och fordrar insatser också av oss själva.

### Slutkommentar

Avslutningsvis kan den uppfattningen framföras, att trycksonderingen har stora möjligheter att ge god och billig information om geotekniska förhållanden. Den är väl värd att satsa forskningsmedel på. Det kan antas att utvecklingen här i landet kommer att leda till tre olika slag av trycksondering:

1. Den stora mängden av sonderingar kommer lämpligen att klaras med snabbt och billigt arbetande spetsmotståndsmätande sonder, som ger diagram ungefär av den typ, som maskinsonderingen nu ger.

2. Som rutinsondering i våra vanligaste lösa till medelfasta jordlagerföljder kommer man också att använda elektroniska sonder med möjlighet att bestämma spetsmotstånd och motstånd mot en särskild mätmantel. Troli- gen kommer kompletterande bestämningar att förekomma i en del sonder, då man har goda möjligheter att åstadkomma detta elektroniskt vid en och samma neddrivning.
3. I fastare lagring kommer man kanske att ha behov också av någon utländsk metod, som utvecklats för användning i förborrade hål.

### Summary

Self-recording penetration tests are a Swedish speciality since the end of the 1940's.

The diagrams contain much information, but one must learn how to interpret them. Diagrams from calibration tests with the SGI Sounding Machine and the Nilcon Penetrometer are shown. Most specific point resistances are higher than calculated theoretically. Skin friction and speed of penetration must influence. Values scatter much in soft clays. Variable pore-water pressure and low apparatus-sensitivity for great penetration force also affect the results. Penetrometer points must not have diameters much larger than that of the extension rods.

Some diagrams difficult to interpret are shown.

Future research and further studies in Sweden should concentrate on:

1. Standardization of a few principles of penetration testing.
2. Preparation of a handbook for evaluation of penetrometer diagrams.
3. Testing out correlations between point resistance - skin friction, in the first hand, and possibly also pore pressure and stress-strain relationships.
4. International collaboration.
5. Direct correlation of test values to practical engineering data.

### Referenser

KALLSTENIUS, T. & WALLGREN, A., 1956. Pore water pressure measurement in field investigations. R. Swed. Geot. Inst. Proc. No. 13.

PÅGÅENDE UTVECKLINGSARBETE AV SONDERINGS-  
UTRUSTNING I SVERIGE





## UTVECKLING AV BORROS TRYCKSONDERINGSUTRUSTNING SAMT DATA-REGISTRERING AV RESULTAT FRÅN FÄLT- OCH LABORATORIEUNDER-SÖKNINGAR

Direktör Arnold Hågby, Borros AB

Nedan ges en beskrivning av hur Borros AB som konstruktör, tillverkare och försäljare av geoteknisk utrustning ser på trycksonderingen som en framtidsmetod vid geotekniska undersökningar. Eftersom Borros själv ej utför geotekniska undersökningar, måste bedömningarna ske helt efter det intresse som våra kunder visat för vårt utvecklingsprogram. Givetvis begränsas också bedömningen till de möjligheter Borros har att kunna uppfylla de önskingar som framställs.

För ca 10 år sedan skaffade Borros en holländsk trycksond med mekanisk kraftöverföring från spetsen upp till markytan där man kunde avläsa trycket mot spetsen på en mätklocka. Under loppet av 4-5 år gjordes sedan sporadiska borrhningar med denna utrustning i de svenska jordarna, i samarbete med våra kunder, för att ge en uppfattning om vilka resultat denna metod kunde ge. Vi fann under denna tid att metoden säkerligen kunde ha stort geotekniskt värde. Vi fann dock att mätapparaten ej var tillräckligt noggrann för sitt ändamål, och att den inte var tillräckligt rationell att arbeta med. Borrhningarna blev med andra ord för dyra. För att råda bot på detta konstruerade vi en helt annorlunda mätutrustning som här skall beskrivas.

Fig. 1 visar själva mätinstrumentet som har fyra mätområden med vars hjälp man kan registrera krafter som påverkar mätspetsen. Den känsligaste skalan kan registrera en kraft av  $0,1 \text{ kg/cm}^2$  för en nålrörelse av 1 mm och den grövsta skalan en kraft av  $4 \text{ kg/cm}^2$  för en nålrörelse av 1 mm. Eftersom nålen kan röra sig 100 mm, så blir mätområdet i det första fallet  $0,1 - 10 \text{ kg/cm}^2$  och i det senare fallet  $4 - 400 \text{ kg/cm}^2$ , räknat på den mätspets som vi idag har i lager. Själva instrumentet är ej bundet till dessa mätområden utan kan användas för mätning av snart sagt alla storlekar av tryck.

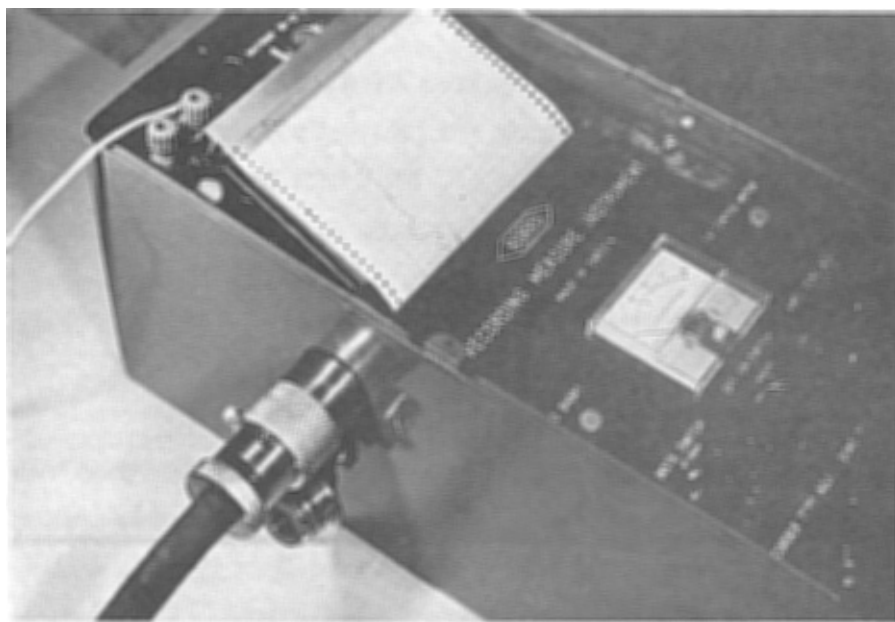


Fig. 1 Registrerande mätinstrument, typ Borro  
Recording unit, type Borro

Det som här beskrivits gäller endast den mätspets som idag finns i lager. Önskas en mätspets för t ex max 10 ton, blir mätområdet  $1,25 - 1000 \text{ kg/cm}^2$  över de fyra olika skalorna. Kostnaderna härför är desamma, men känsligheten blir betydligt mindre än för den förra spetsen. Skulle intresset däremot vara att mäta t ex max 1 ton, blir mätområdet  $0,025 - 100 \text{ kg/cm}^2$ . I detta senare fall blir givetvis känsligheten större än för normalspetsen.

Mätspetsen (fig. 2) har ett cirkulärt tvärsnitt av  $10 \text{ cm}^2$  och en spetsvinkel av  $60^\circ$ . Den är helt sluten och är tät mot såväl vatten som jord. Den har ej några rörliga delar och den mäter enbart jordens tryck mot den koniska spetsen.

Fig. 3 visar det enklaste sättet att driva ner mätspetsen i jorden, nämligen med hjälp av en vevdomkraft som kan ge ett tryck av 4 ton. Trycket mot spetsen registreras på instrumentets mm-rutade papper (torrnålsmetoden) genom att nålen rör sig i rak linje från vänster till höger. Spetsens läge i djup markeras genom papperets rörelse som kan varieras med 1:10 eller 1:100, dvs 1 m rörelse av spetsen kan antingen ge 10 cm eller 1 cm rörelse av papperet. Man kan under borrhningens gång göra anteckningar på papperet med vilken penna som helst. När borrhningen är klar, kan protokollet kopieras i önskat antal på t ex en Xerox-apparat. Den dyrbara uppritningen kan således undvikas. Några "försköningar" av protokollet som ibland sker vid uppritningen blir således omöjliga att göra.

Vill man ha större nedpressningskraft än 4 ton, finns det motordrivna hydrauliska domkrafter med en kapacitet av upp till 30 ton i lager.

Vid ett besök av professor De Beer från Belgien sommaren 1972 diskuterades sondutrustning ingående och flera synpunkter erhöles. Bl a har besöket mynnat ut i nykonstruktion av en spets som här skall beskrivas mera i detalj.

Spetsen har, liksom tidigare, en konvinkel av  $60^\circ$ , men tvärsnittsarean är  $10 \text{ cm}^2$  på en längd av 1 m oberoende av om friktionsmätning skall ske eller ej. Skall friktionsmätning ske, bör mätkroppen för denna mätning vara placerad 0,5 m ovanför spetsen och den bör vara mellan 100 och  $300 \text{ cm}^2$ . Den stora differensen torde bero på olika önskemål. Eftersom mätkroppen har ett tvärsnitt av  $10 \text{ cm}^2$ , blir mätkroppens omkrets ca 11,2 cm och dess längd ca 9-27 cm.

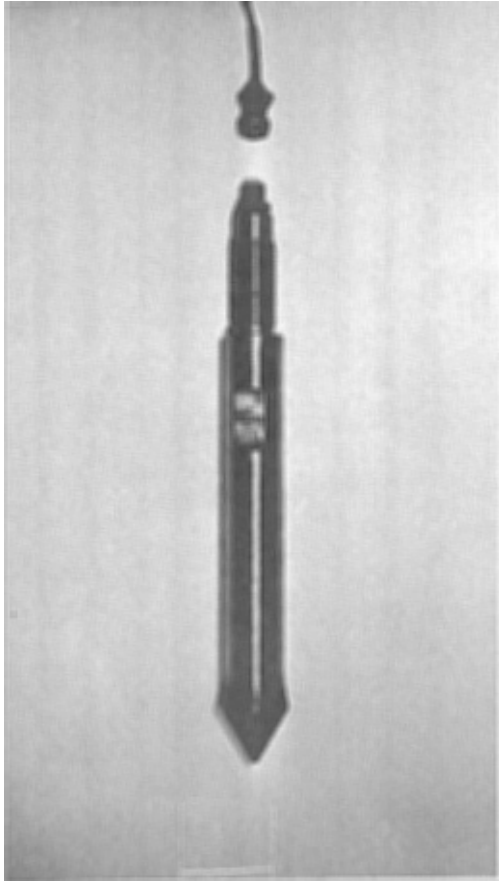


Fig. 2 Mätspets  
Penetrometer point

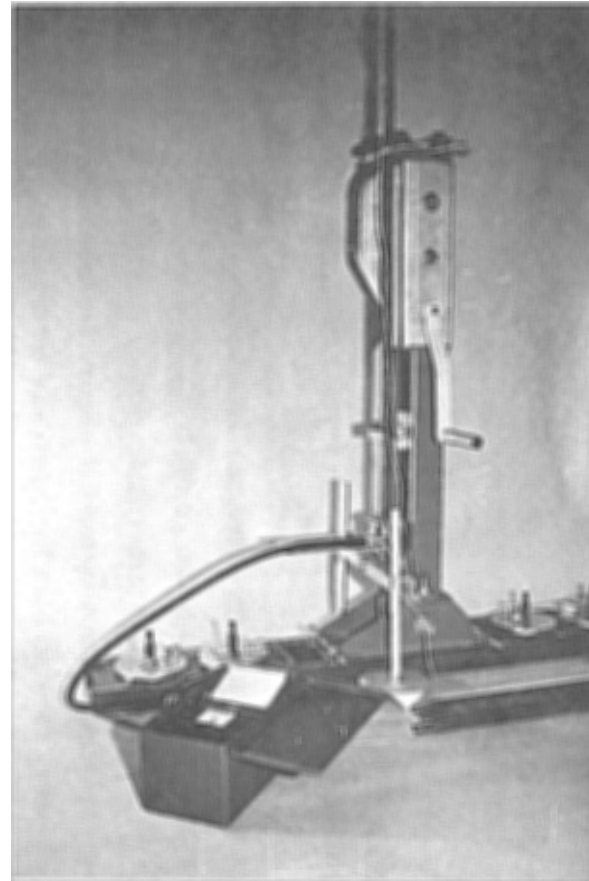


Fig. 3 Handdriven trycksonderings-  
utrustning  
Hand-operated penetrometer  
equipment

Om man väljer den kortare mätkroppen, får man en "orolig" mätkurva som registrerar tunna skikt av jordarter med annan friktion. Vid den långa mätkroppen får man en "lugnare" kurva, som ej så starkt markerar de tunna jordlagren.

Det är även bekant att neddrivningshastigheten är av stor betydelse. En neddrivningshastighet av 1 m per min har visat sig lämplig. Det kan kanske anses att denna relativt långsamma neddrivningshastighet skulle ställa sig dyrbar, men så är icke fallet. Under förutsättning att undersökningen skall ske med kontinuerlig neddrivning och s k flygande skarvning av borrhörningarna, så tar neddrivningen av ett normalt borrhål icke mer än 10-20 min.

Ytterligare en omständighet som kanske inte påverkar själva borrhörningen men väl dess bedömning är skrivarnålens hastighet över papperet. En alltför snabb skrivarnål gör långa hastiga "utflykter" över papperet och registrerar onödigt små hinder för provspetsen. En alltför långsam skrivarnål hinner icke med att registrera väsentliga hinder såsom tunna lager av sand eller lera. Vi har funnit att en hastighet på skrivarnålen av 5 cm per sek är lämplig för att ge en lätt läsbar registrering av förloppet.

Som synes är det angeläget att snarast standardisera ovannämnda mått och företeelser när det gäller själva mätspetsen och förfarandet vid sonderingen. Om detta ej sker, kan utvecklingen inom geotekniken komma in på felaktigt spår som är till skada för verksamheten. Någon standardisering av sättet att mäta själva trycket eller friktionen önskas ej, ej heller sättet att föra upp dessa mätvärden till registreringsapparaten. Naturligtvis bör kraven på själva mätnoggrannheten anges i en standard, lämpligen då i form av en viss %-sats av det totala trycket mot mätkropparna.

Eftersom trycksondering i den här noggranna formen knappast utförs i Sverige idag, är det möjligt att mätutrustningen är en smula dyr och komplicerad för att användas endast till detta ändamål. Det kan emellertid antas att databehandling av erhållna resultat från såväl fält som laboratorier inte ligger så särskilt långt framför oss. Av denna anledningen har firman konstruerat ett instrument som kallas GEODATAPLOTTER, fig. 4. Med detta instrument kan ett visuellt protokoll i A4-format upprättas med hjälp av en specialkonstruerad multi-skrivare med sifferkodifiering av samtliga standarduppgifter i protokollets huvud och 2-siffrig kod för alla iakttagelser under sonderingen. Samtidigt som detta

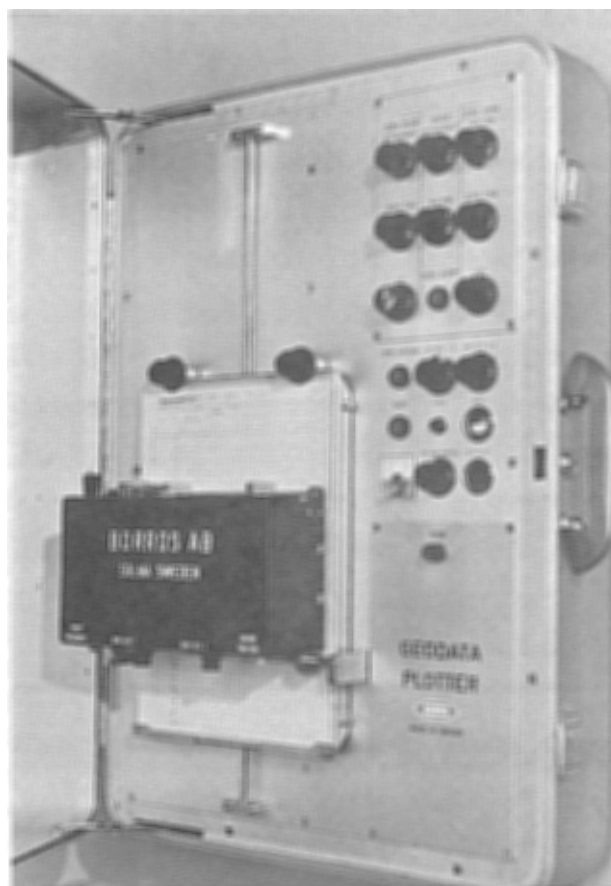


Fig. 4 Geodataplotter. Instrument för registrering av geotekniska fältdata

Geodata plotter. Instrument for recording geotechnical field data

sker, kan via en kabel ansluten till instrumentet alla dessa uppgifter antingen överföras till en 8-håls remsstans i fält eller direkt till en datacentral via MODEM-utrustning ansluten till telefonlinje. För att ett sådant instrument skall vara ekonomiskt försvarbart har det konstruerats så, att praktiskt taget all slags sondering kan registreras på det sätt som här nämnts.

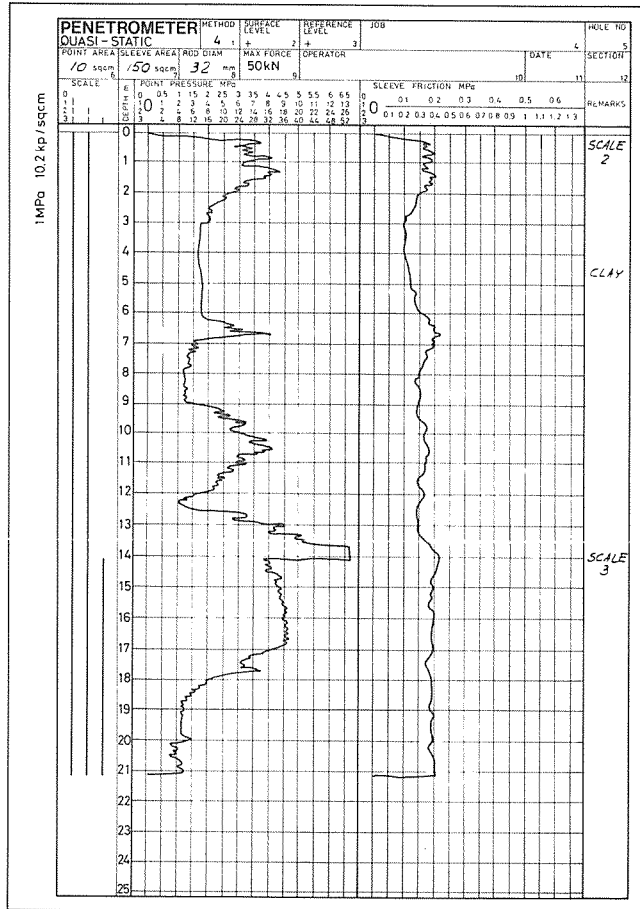
Fig. 5 a-f visar sex protokoll över några av de vanligaste undersökningsmetoderna som i första hand kommer att kunna registreras med detta instrument

- a. trycksondering
- b. viktsondering
- c. hejarsondering
- d. jord-bergsondering
- e. vingborrning
- f. inklinometermätning

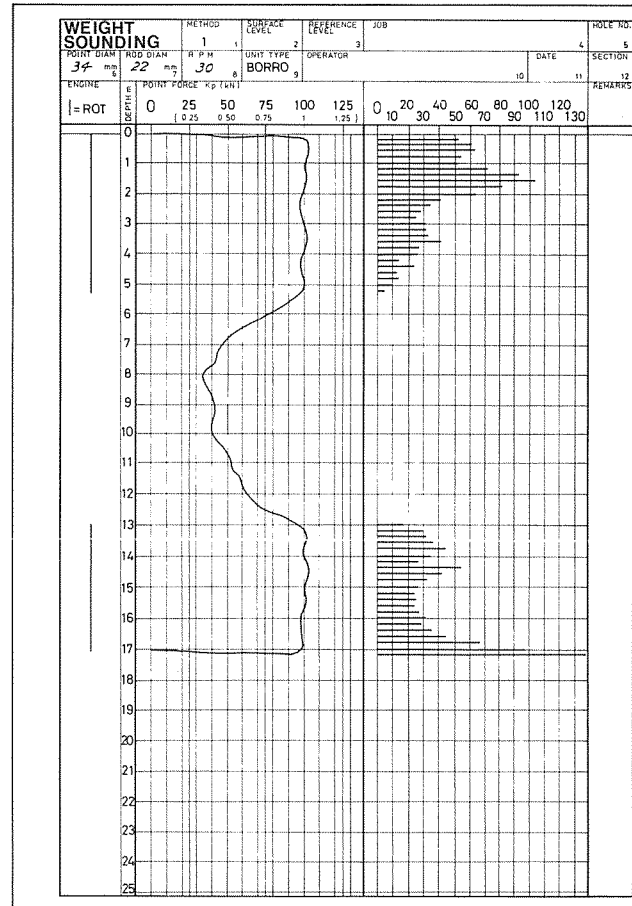
#### Hur kan denna nya metod för trycksondering göras ekonomiskt användbar?

I dagens läge frågas från flera håll efter utrustningar som kan hanteras endast av en man. För närvarande finns, såvitt bekant, inga bestämmelser som hindrar att en man arbetar med motorsåg eller kör traktor. Därför tror jag inte att det är förbjudet att sända endast en man i fält för att göra en borrning. I varje fall är detta riskfritt så länge det finns annan arbetande personal inom hör- och synhåll. Man kan därför konstruera en rad enmansmanövrerade utrustningar varav här skall beskrivas detaljer som hör till en sådan utrustning med vars hjälp en trycksond av den typ som här beskrivits skall kunna manövreras av en man.

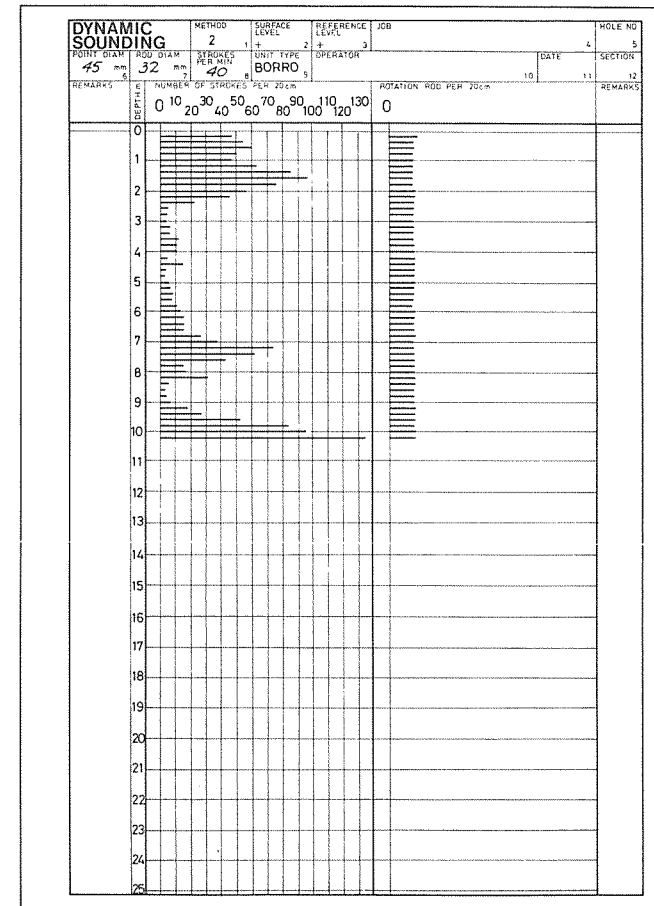
Fig. 6 visar en domkraft med vilken en man, på hydraulisk väg, kan trycka ner en borrhåll i jämn takt till önskat eller möjligt djup. Hydraulmotorn driver samtliga friktionshjul som alla är ställbara och placerade i zick-zack så att en varierande stångdiameter icke kan skada borrhålligen genom onormalt "vals-tryck". Denna domkraft är placerad längst fram på dragstången till en enaxlig släpvagn som kan kopplas till en vanlig jordbruks- eller skogstraktor, försedd med någon form av stөрthytt.



a) Trycksondering  
Static penetrometer sounding



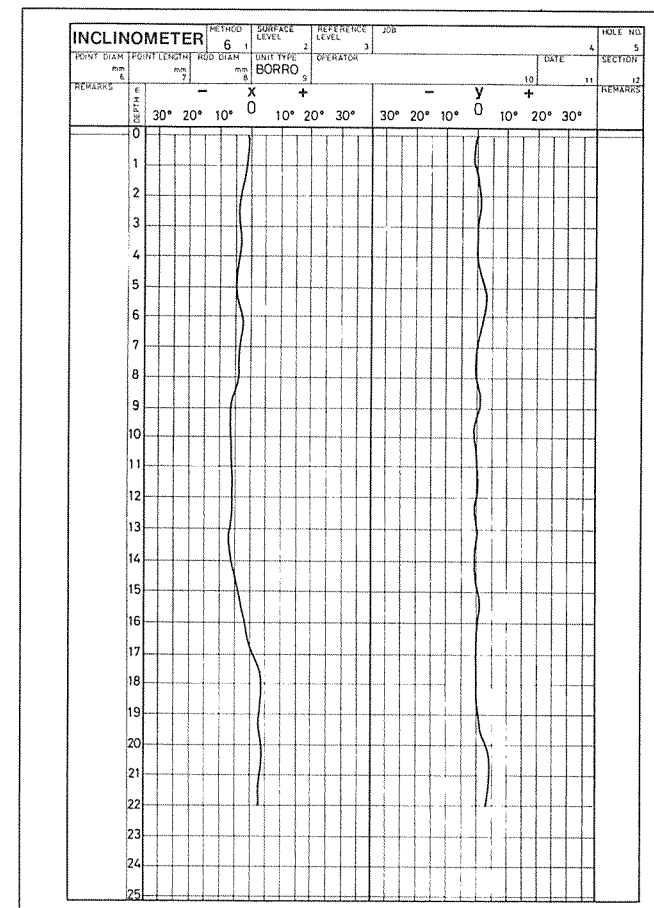
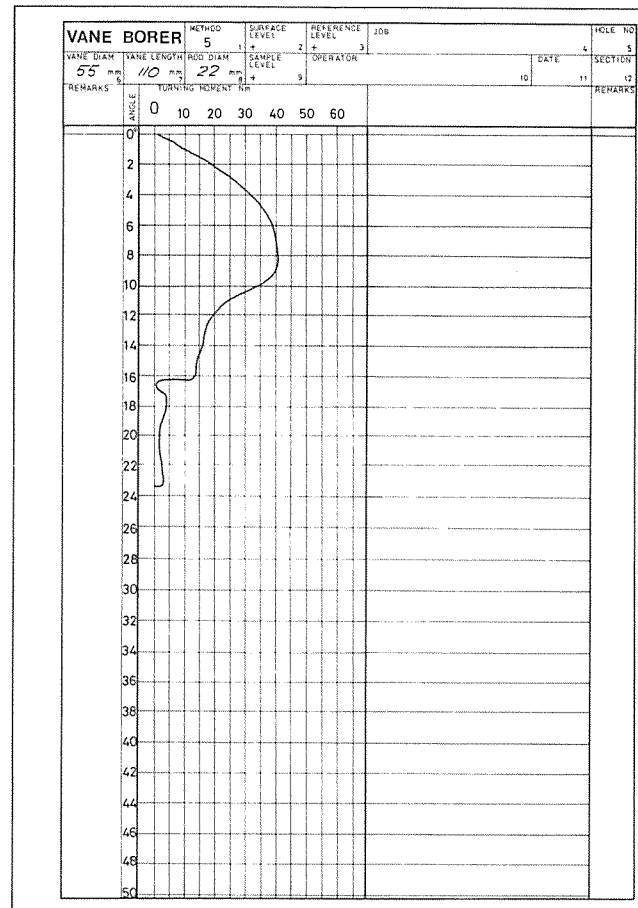
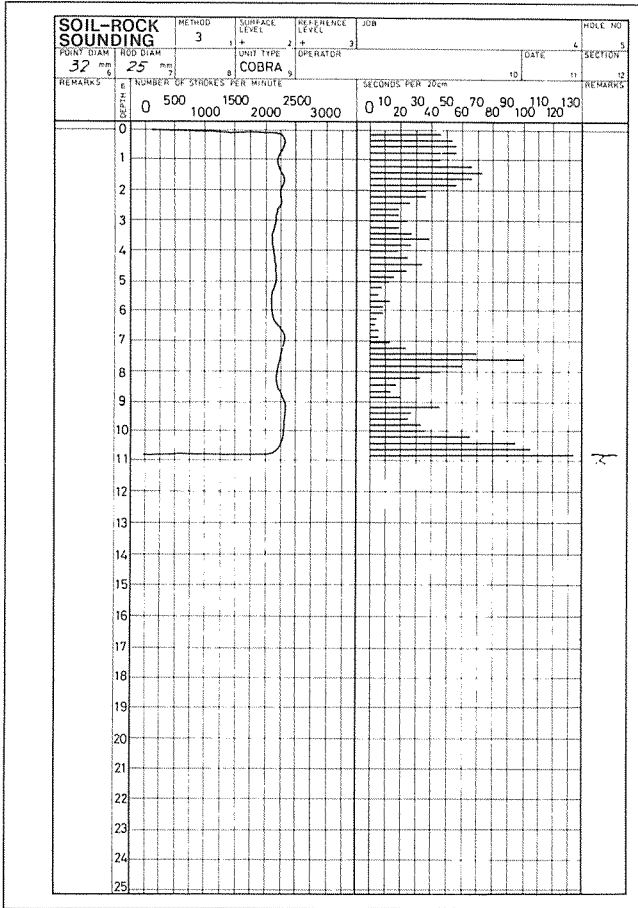
b) Viktsondering  
Weight sounding



c) Hejarsondering  
Dynamic sounding

Fig. 5 a-c Exempel på olika diagram som kommer att kunna upprättas av geodataplottern  
Examples showing different diagrams which will be recorded by the geodata plotter





d) Jord-bergsondering  
Soil- and rock sounding

e) Vingborrning  
Vane boring

f) Inclinometermätning  
Inclinometer measuring

Fig. 5 d-f Exempel på olika diagram som kommer att kunna upprättas av geodataplottern  
Examples showing different diagrams which will be recorded by the geodata plotter

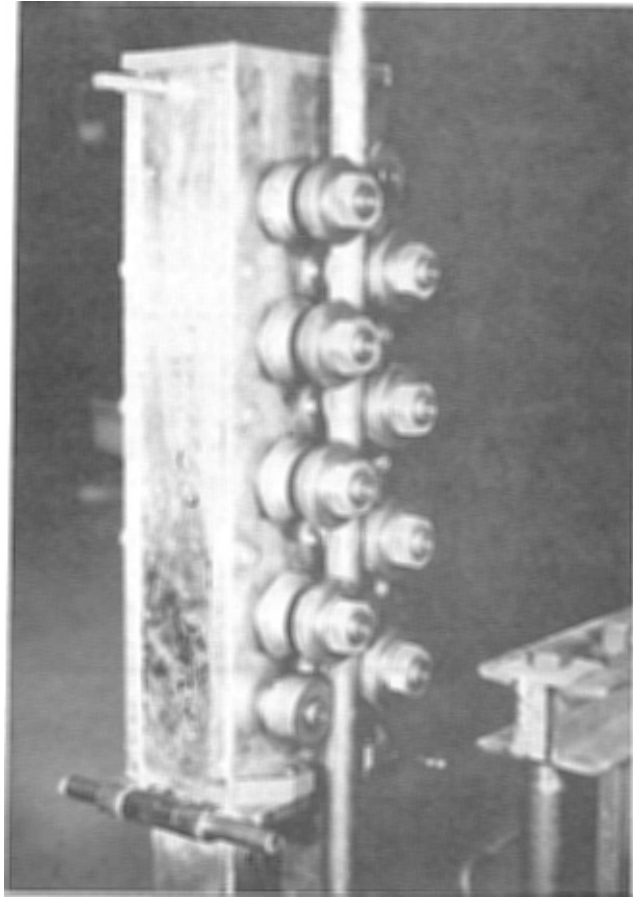


Fig. 6    Hydrauldriven valsdomkraft  
Hydraulic driven rolling jack

En sådan släpvagnsenhet visas i fig. 7 där all utrustning för en trycksondering finns och befinner sig under neddrivning. Gången för ett borrhåls utförande blir då följande:

Operatören kör traktorn så att mätspetsen kommer rakt över den plats där sonderingen skall ske. Han går sedan över till släpvagnen och lyfter med hjälp av markstödens domkrafter släpvagnen så högt att lasten vilar uteslutande på stöden och så att släpvagnens golv är horisontellt. Därefter gör han fast stagkättingarna i traktorns störthytt och driver upp den främre domkraften så att stagkättingarna spänns och att trycket på de bakre stöden blir praktiskt taget noll. Ett stelt system har därvid erhållits som är tillräckligt stumt och tungt för att kunna användas som mothåll vid själva nedtryckningen. Denna sker nu med hjälp av friktionsdomkraften och med "flygande" skarvning. Trycket mot spetsen och friktionen mot spetsens sidor förs som elektriska impulser genom kabeln till instrumentet som ger dels en bild av förloppet på protokollet, dels stansning av en hålremsa med vars hjälp erhållna mätdata kan utvärderas i en för ändamålet programmerad datamaskin. När sonderingen är färdig sker uppdragning genom att rotationsriktningen vänds på hydraulmotorn och avskarvningen sker enligt den flygande principen.

Hela denna släpvagn kan byggas in och förses med lyse och uppvärmning och kan på så sätt bli en praktisk och attraktiv arbetsplats.

Utvecklingsarbete är igång även för den övriga delen av firmans utrustningar så att samtliga svenska borrhätmeter och laboratorieundersökningar kan drivas av en man och resultatet kan registreras i ovan beskrivna instrument för vidare behandling i datamaskin och lagring i databank.

### Summary

BORROS AB is specialist in geotechnical equipment which is for the main part used in the Northern countries of Europe. During about ten years the Company has carried on research and production of the equipment shown in the figures of the article.

This progress has resulted that the Company now can offer a penetrometer equipment where the pressure on the measuring rod is transferred as electric

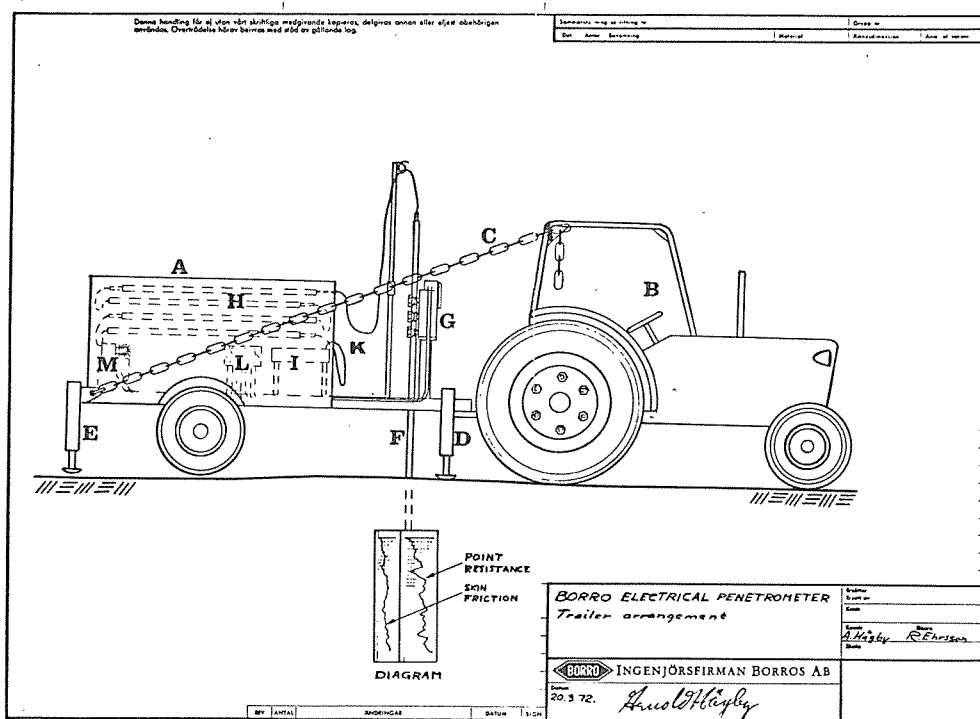


Fig. 7 Borros el-trycksonderingsutrustning monterad på släpvagn  
Borros electrical penetrometer equipment. Trailer arrangements

- A Enaxlig släpvagn, att kopplas till traktor eller jeep. Den elektriska utrustningen för sondering är monterad på släpvagnen. Nedpressningskraft 4 ton utan förankring
- B Traktor eller jeep
- C Justerbar kedja, vilken förenar släpvagn och traktor till ett stelt system under neddrivningen (Kedjan får ej vara ansluten under transport)
- D Domkraft avsedd för att spänna kedjan C
- E Två domkrafter avsedda för fixering av släpvagnen i horisontellt läge
- F El-trycksonden under neddrivning
- G Anordning för kontinuerlig neddrivning och uppdragning av sonden
- H Plats för sondstänger
- I Självregistrerande instrument
- K Kabel mellan sond och instrument
- L Manöverpanel för neddrivning och uppdragning samt för domkrafter
- M Hydraulaggregat för G och domkrafterna

- A Single axle trailer for towing after a tractor or jeep. All equipment for el-penetration test is mounted on the trailer, and penetration can be made up to a pressure force of 4 tons without any anchoring
- B Tractor or jeep
- C Adjustable chain, which links the trailer and tractor to a fixed system of non-bending, when operating with the penetrometer. (The chain must be disconnected during transport)
- D Hydraulic jack to stress the chain C
- E Two hydraulic jacks to fix the trailer in a horizontal position
- F El-penetrometer during operation
- G Push- and pull devices for continuous driving of penetrometer
- H Place for sounding rods
- I Self-recording instrument
- K Cable from probe to instrument
- L Operating panel for push- and pull devices and for hydraulic jacks
- M Hydraulic unit for G and the jacks

impulses through a wire conducted within the drill rod to a specially designed recorder which on a diagram paper can register pressures between  $0.025 - 1000 \text{ kp/cm}^2$ . Borros is also developing a special instrument called "GEODATA-PLOTTER" which besides what is related above can transfer all necessary data from a field work to a 8-holes tape perforator in the field or via MODEM-equipment connected to the telephone net can transfer field work data directly to a data central. This latter equipment can even be used for recording when performing penetration tests with other types of equipment existing in the Nordic countries.



NILCONS NYA GEOTEKNISKA FÄLTUTRUSTNING  
Teknologie licentiat Sven Nilsson, Nilcon AB

Målsättningen för utvecklingen av Nilcons nya geotekniska borrarutrustning har varit, att denna ensam skall kunna klara huvuddelen av erforderliga fältarbeten på ett vetenskapligt riktigt, effektivt och ekonomiskt sätt. Utrustningen har byggts upp kring en trycksonderingsmetod, som gjort det möjligt att även utföra exempelvis provtagning, vingborrning, rördrivning, håltagning och rotationsborrning.

En icke oväsentlig del av utvecklingsarbetet har varit att framtaga ett lämpligt fordon utformat för sitt speciella geotekniska ändamål. Därigenom har man kunnat inte endast rationalisera fältarbetet utan även skapa bättre förutsättningar för noggrannare, tillförlitligare och effektivare provningar. Utvecklingsarbetet har skett i samarbete med ingenjörfirman Jacobson & Widmark.

### Borrfordon

Fordonet har gjorts banddrivet för att erhålla maximal framkomlighet. Denna vagn, eller rättare sagt banddrivna arbetsplattform, är försedd med tre hydrauliska stödben med vilka plattformen snabbt kan inställas horisontellt över borrhålet (fig. 1). På plattformen finns förutom borrarutrustningen allt erforderligt bormaterial samt hjälpmedel såsom el, varmvatten, arbetsbänk, diskho m m. I övrigt gäller följande data för bandvagnen:

Bredd	ca 2,0 m
Längd	ca 3,5 m
Vikt	ca 3.500 kg
Markfrigång	0,35 m
Hastighet	0 - 10 km/h
Vändradie	ca 1 m
Marktryck	ca 0,15 kp/cm <sup>2</sup>

Vagnen är försedd med dragkrok och har en dragkraft på ca 4 ton.



Fig. 1 Banddrivet fordon med plattform för borrhutrustning  
Tracked vehicle with working platform and boring  
equipment



### Trycksonderingsutrustning

Den nya trycksonderingsutrustningen är en vidareutveckling av Nilcons tidigare trycksond med kontinuerlig registrering. Utvecklingen består i huvudsak i att mät- och registreringsmetoden förfinats samt att kapaciteten ökats. Dessutom har sondutrustningen, såsom tidigare nämnts, utformats så, att man på ett effektivt sätt kan utföra andra vanliga fältarbeten.

### Mätning av spetsmotståndet

För mätning av spetsmotståndet har vi valt samma metod som vid SGI:s automatsond (trycksond), dvs stången vrids ner i marken i en bestämd stigning. Därvid mäts både den totala vertikala neddrivningskraften och den horisontella komponenten av mantelfriktionen (fig. 2). I instrumentet har inbyggts en automatik som automatiskt subtraherar mantelfriktionen från den totala neddrivningskraften varvid spetsmotståndet direkt registreras. Till skillnad från SGI:s automatsond har stigningen på mantelns skruvrörelse gjorts mycket mindre, närmare bestämt  $19,7^\circ$  för  $\varnothing 33,5$  mm borrarstång. Fördelen med detta är att man minskar mantelfriktionens vertikala komponent och ökar den horisontella. Därigenom blir den vertikala mantelfriktionens komponent i förhållande till den totala neddrivningskraften mindre. På detta sätt erhålls en avsevärt bättre mät-noggrannhet. Det medför också att en större del av neddrivningskraften går till spetsen.

För att detta mätsystem skall fungera måste man ha en noggrant fixerad skruvrörelse. Detta har kunnat erhållas genom att den vertikala matningen sker medelst 2 kuls kruvar, som mekaniskt har kopplats ihop med rotationen. Matningen med kuls kruvar har också valts för att erhålla en jämn och deformationsstyrd neddrivning. För automatsonden gäller i övrigt följande data:

Maximal upp- och neddrivningskraft	14 ton
Drivhastighet	0 - 6 m/min
Maximalt vridmoment	75 kpm
Rotationshastighet	0 - 200 r/min
Genomgången i växellådan	$\varnothing 105$ mm

Rotationsdelen kan kompletteras så att ett maximalt vridmoment av 175 kpm och en rotationshastighet av upp till 800 r/min erhålls.

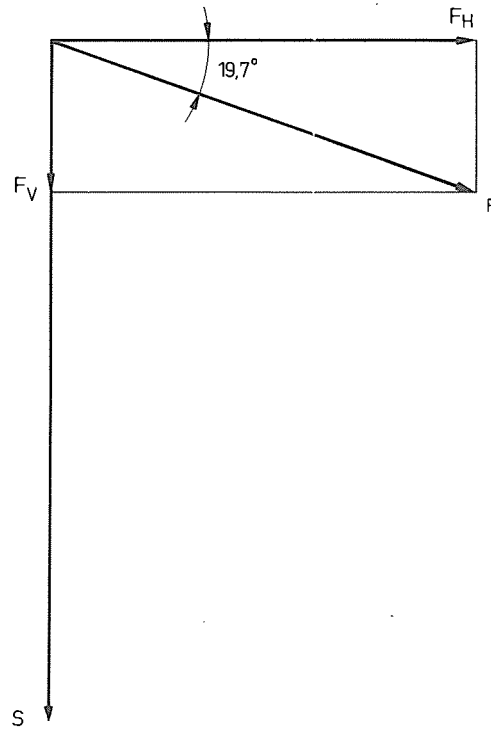


Fig. 2 Principfigur. Sondstängen drivs ner i en låst skruvrörelse med en bestämd stigning av  $19,7^{\circ}$ . Den horisontella komponenten  $F_H$  och den vertikala  $S + F_V$  mäts. På instrumentet registreras automatiskt spetsmotståndet  $S$ . Mantelfriktionen  $F_H$  kan också mätas

Principle diagram. The boring rod is driven down in a locked screw motion with a rise of  $19.7^{\circ}$ . The horizontal component  $F_H$  and the vertical  $S + F_V$  will be measured. On the instrument the point resistance  $S$  is automatically recorded. The skin friction component  $F_H$  can also be measured

Såsom standard används en hålad borrarstång med ytterdiametern  $\varnothing$  33,5 och innerdiametern  $\varnothing$  15 mm. Andra stångdimensioner kan användas, varvid endast en mindre omställning av instrumentet behöver utföras.

Mätsystemet är mekaniskt med en rak fjäder som kraftgivare. Instrumentet registrerar upp till 3.000 kp vertikalkraft och 75 kpm (alt. 175 kpm) vridmoment. Registreringsbredden på papperet är 100 mm och olika känslighet kan inställas från 500 kp till 3.000 kp för fullt utslag.

Denna borrarutrustning kan användas för ett flertal andra fältarbeten såsom:

1. Vingborrning. Utrustningen kan direkt användas för vingborrning, varvid registrering kan ske med trycksondinstrumentet. Man erhåller då en ortogonal registrering. Vridmomentkapaciteten är 75 kpm (alt. 175 kpm) vilket är mycket högre än för Nilcons tidigare manuella vingborr vars vridmomentkapacitet är 12 kpm.
2. Provtagning med St I. Genom att använda hålade stänger kan den vanliga provtagaren St I användas endast med komplettering med ett mellanstycke.
3. Skruvprovtagning och håltagning med skruv upp till 300 mm diameter. Önskad skruvstigning kan inställas hydrauliskt.
4. Upp- och neddrivning av olika borrarstänger upp till 100 mm diameter.
5. Rotationsborrning. Rotations- och drivhastighet kan inställas var för sig och mycket noggrant. Kulskruvmatningen medför en mycket jämn nedmatning som är önskvärd vid exempelvis diamantborrning.
6. Hydraulisk bergborrning. Utrustningen är försedd med två separata hydrauliska pumpar som möjliggör direkt anslutning till en hydraulisk slagmaskin.

#### Trycksondspetsens utformning

Eftersom sondering sker i okända och mycket varierande jordlager och under varierande förhållanden är det naturligt att det uppstår problem att ta fram en utrustning, och i vårt fall en lämplig spets, som kan täcka in huvuddelen av erforderlig sondering i enlighet med den inledningsvis nämnda målsättningen.

I detta syfte har några olika utföranden på spetsar provats. Det enklaste utförandet (fig. 3) är en  $10 \text{ cm}^2$  spets med  $60^\circ$  kon i enlighet med ASTM:s förslag till standard. Spetsen kan antingen rotera med stången eller frikopplas från rotation. Ovanför spetsen har borrhållningen försetts med en  $250 \text{ cm}^2$  mantel, som vid neddrivning följer med borrhållningens rörelse men som kan frigöras för mätning av den lokala mantelfriktionen ovanför spetsen. Denna mätning sker intermittent vid önskat tillfälle.

Ett av problemen med trycksondering i lösa och sensitiva leror är att såväl spetsmotstånd som mantelfriktion blir mycket små. Vid exempelvis en skjuvhållfasthet på  $1 - 2 \text{ Mp/m}^2$  blir det totala spetsmotståndet omkring  $10 - 20 \text{ kp}$ . Detta är väl litet om en tillräcklig noggrannhet skall kunna erhållas för användning av spetsmotståndets värde vid utvärdering av lerornas skjuvhållfasthet. Därför har vi också arbetat med en större spets på  $50 \text{ cm}^2$ , se fig. 4. En så stor spets minskar dock kraftigt sonderingsutrustningens möjlighet att tränga igenom hårdare lager. Vi har därför provat en spetskonstruktion där den stora,  $50 \text{ cm}^2$  spetsen kan frikopplas vid de hårdare lagren, varefter borrhållningen kan fortsättas med  $10 \text{ cm}^2$  spetsen.

En annan svårighet med trycksonderingen är att man för att kunna trycka igenom de hårdaste lagren behöver en mycket hög tryckkraft på upp till ca  $1000 \text{ kp/cm}^2$ . Huvuddelen av de hårda lagren synes man dock kunna trycka igenom redan vid ca  $300 \text{ kp/cm}^2$ . Detta motsvarar den kapacitet som utrustningen har utan att borrhållningen behöver förankras. För lager med ett större spetsmotstånd än  $300 \text{ kp/cm}^2$  är man i första hand intresserad av lagrets tjocklek och kanske inte så mycket av spetsmotståndets exakta storlek. För att i sådana lager kunna fortsätta borrhållningen när trycksondens maximala kapacitet uppnås kan man övergå till rotationsborrning. För detta ändamål har använts en fast spets som är försedd med tre hårdmetallkammor anbringade runt spetsen i samma stigning som skruvrörelsen vid trycksondering (fig. 5). När den erforderliga drivkraften blir högre än ca  $3000 \text{ kp}$ , kan borrhållningen fortsätta genom att rotationshastigheten ökas i förhållande till neddrivningen. Därvid kommer kammorna att ge spetsen en god borreffekt och de hårda lagren kan penetreras. Under denna rotationsborrning registreras spetsmotståndet och sjunkningen som kan vara av värde vid utvärdering av jordlagrens egenskaper. Även den lokala mantelfriktionen ovanför spetsen kan mätas. Efter genomgången av de hårda lagren kan man direkt återgå till ren trycksondering. Vi tror att denna spetsutformning i kom-

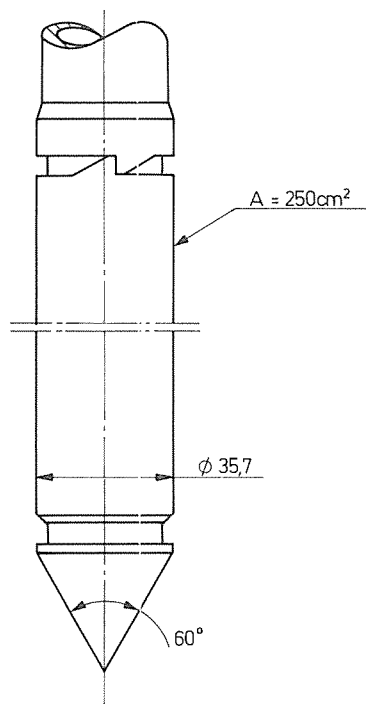


Fig. 3 Standardspets. Spetsarea  $10 \text{ cm}^2$ . Ovanför spetsen försedd med friktionsmantel med  $250 \text{ cm}^2$  area. Mantelfriktionen kan mätas intermittent.

Standard point. Point area  $10 \text{ cm}^2$ . Friction sleeve above the point of  $250 \text{ cm}^2$ . The skin friction can be intermittently measured

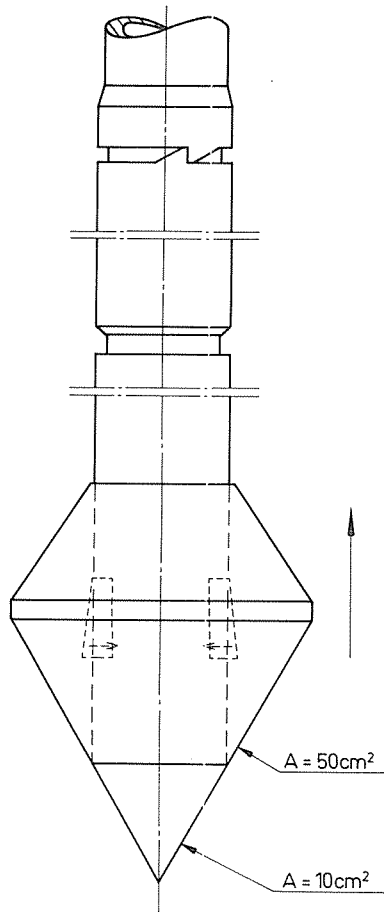


Fig. 4 I mycket lösa lager används en större spets med  $50 \text{ cm}^2$  area. När hårdare lager nås frikopplas den större spetsen och borrhningen kan fullföljas med den mindre spetsen ( $10 \text{ cm}^2$ )

In very loose layers a larger point of  $50 \text{ cm}^2$  can be used. When reaching harder layers, this point can be disengaged and the boring can be continued with a  $10 \text{ cm}^2$  point

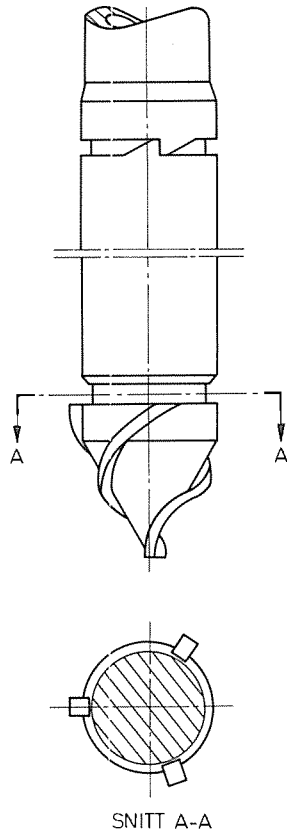


Fig. 5 För att öka nedträngningsförmågan har spetsen försetts med hårdmetallkammor placerade med samma stigning som skruvrörelsen. I hårda lager kan rotationsborrning tillgripas varvid kammarna ger god borreffekt

For increasing the penetration capability the point has been equipped with hard metal ridges located in the screw motion direction. In hard layers one can change over to rotation boring. The ridges then provide a good boring effect

bination med en frikopplingsbar  $50 \text{ cm}^2$  spets är en mycket god lösning. Därmed kan man täcka in ett mycket brett register från de lösaste leror till de hårdaste jordlager utan att i någon större utsträckning göra avkall på de vetenskapliga önskemålen eller från den föreslagna ASTM-standard. Den enda skillnad som erhålls med en fast spets med kammar är att huvuddelen av mantelfriktionen runt spetsen ej kommer med i spetsmotståndet. Man får därigenom ett mer renodlat "spetsmotstånd", vilket måhända kan vara av stort värde.

### Summary

The equipment consists of a tracked vehicle (working platform) on which an automatic prober is mounted (Fig. 1). Vehicle as well as the boring equipment are hydraulically driven.

The vehicle is constructed for driving in very difficult terrain while carrying necessary equipment. The vehicle weights 3500 kg with a ground-pressure of  $0,15 \text{ kp/cm}^2$ . Width = 2 m, length = 3.5 m.

The automatic prober can perform the following:

Penetrometer tests: Mechanical measuring and continuous recording of point resistance and skin friction above the point. The boring rod is rotated downwards with a screwing motion, and the instrument records the point resistance (Figs. 2 - 5). The method is adapted to the proposed ASTM standard. Point resistance up to 3000 kp can be measured at various scale readings.

Vane testing: Recording of undisturbed shear strength and sensitivity. Torque capacity 75 kpm, alt. 175 kpm.

Sampling: Piston sampling with for instance St I. Auger sampling with max. diameter 300 mm.

Rotating probing: Diamond boring.

Max. driving force: 14 ton.

Max. torque: 75 kpm, alt. 175 kpm.

Max. rotation speed: 200 r/m, alt. 800 r/m.



## GEOTECHS AKUSTISKA PENETROMETER

Civilingenjör Per Jonell, Geotech AB

För att förenkla utförandet av trycksondering har en ny typ av trycksond-mätspets konstruerats. Trycksonden mäter spetskraften och friktionen kontinuerligt. Spetsens area är  $10 \text{ cm}^2$  och friktionshylsans yta  $200 \text{ cm}^2$ . Friktionshylsan är placerad omedelbart ovanför mätspetsen, som har en konvinkel på  $60^\circ$ . De uppmätta krafterna från spets och friktionshylsa sänds upp till markytan som akustiska signaler i stålstängerna. För själva kraftmätningen används mätare av typ "svängande sträng". Inga elektriska kablar ned till mätsonden behövs. Detta förenklar i hög grad fältarbetet och gör trycksonderingen mycket snabbare än vid de elektriska trycksonder, där man är tvungen att trä kablar genom rör.

Mätsonden har en diameter av 35,5 mm och en längd av 1.200 mm. (Se fig. 1.) Den laddas med 5 små transistorbatterier. Dessa räcker för ungefär 10 timmars arbete.

Mätsonden trycks ned i marken medelst påskruvade stålstänger, exempelvis med diameter 25 mm. Om man så önskar, kan grövre stänger användas. De akustiska signalerna från mätsonden är så kraftiga att man i det nuvarande utförandet utan svårighet kan trycksondera ned till 50 m djup.

Mätutrustningen har 4 mätområden för spetskraft: 0 - 2000 kp, 0 - 1000 kp, 0 - 500 kp, 0 - 250 kp.

I sitt nuvarande utförande kan trycksonden utföras för en max. spetskraft av 5 ton. Vid friktionsmätningen har man 4 mätområden till förfogande: 0 - 400 kp, 0 - 200 kp, 0 - 100 kp, 0 - 50 kp.

Friktionsarean är som förut nämnts  $200 \text{ cm}^2$ .

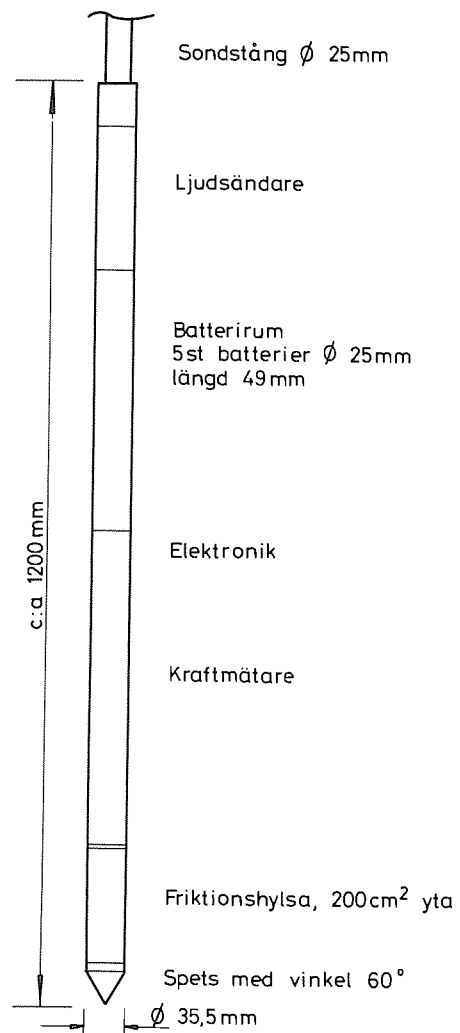


Fig. 1 Mätsond  
Measure probe

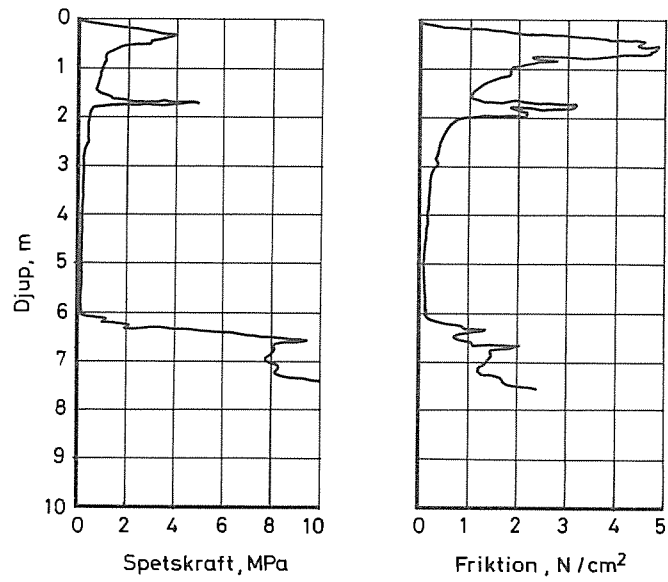


Fig. 2 Diagram uppritade av 2-kanalskrivare  
Diagrams drawn by a 2-canal recorder



Fig. 3 Borrtrusning monterad på en bandvagn  
The boring equipment mounted on a tracked vehicle

De akustiska mätsignalerna från trycksonden, spetskraft och friktion, uppfångas vid markytan av en mikrofon och leds via en elektronikenhet till en 2-kanalig skrivare, där spetskraft och friktion registreras. Skrivarens pappersframmatning styrs av sondens nedtryckning, så att två kontinuerliga kurvor i avseende på djupet erhålls. Vanligen motsvarar 10 mm pappersframmatning en nedtryckning av 1 m. Skrivaren är så utformad att den automatiskt registrerar, vilket mätområde som används för spetskraft- resp. friktionsmätning.

Utrustningen kan användas i samband med olika typer av nedtryckningsanordningar. Den är så enkel att sköta att den kan användas kommersiellt vid trycksonderingar.

Vid en sådan sondering gjordes vid ett tillfälle 130 hål med djup av 3 - 12 m under en tid av 4 dagar.

Fig. 2 visar några kurvor i naturlig skala, uppritade av utrustningens 2-kanalsskrivare.

I fig. 3 visas utrustningen monterad på en bandvagn, typ Geotech.

## DISKUSSIONER



## FELTKOMPRESSOMETER OG TRYKKSONDERING FOR BESTEMMELSE AV STYRKEPARAMETRE

N. Janbu & K. Senneset, Univ. i Trondheim, NTH  
(förberett diskussionsinlägg av K. Senneset)

### Innledning

Ved vårt institutt er det i de siste 5-6 år utviklet og prøvd et utstyr for in situ måling av jordarters setningsegenskaper, feltkompressometeret. Dette er i prinsippet en belastningsplate som gir forholdet last-setning og tid-setning for hvert lasttrinn.

Kompressometeret kan også anvendes til å fremskaffe brudd i jordarten det plasseres i. Dersom man samtidig kan utvikle gode teoretiske løsninger for bruddproblemet, så kan disse løsninger brukes til å bestemme styrkeparametrene. Feltkompressometeret videreutvikles hos oss med dette for øye.

Fra skruplate til trykksonderingsspiss er det et relativt lite sprang i dimensjon. Fordelene ved trykksondering i denne sammenheng er mindre kraftbehov ved bruddbelastning og en enklere nedføring.

Den vesentligste forskjell er at skruplaten blir trinnvis belastet opp mot brudd, mens man ved trykksondering utvikler brudd ved kontinuerlig nedpressing med en valgt hastighet.

Den statiske situasjon er derfor enklere å kontrollere ved skruplaten, men dersom man innbygger statiske prøvebelastninger ved trykksonderingen kan man muligens oppnå det samme.

### Teoretisk bakgrunn

Fig. 1 viser i prinsipp grunnlaget for den teoretiske behandling av problemet.

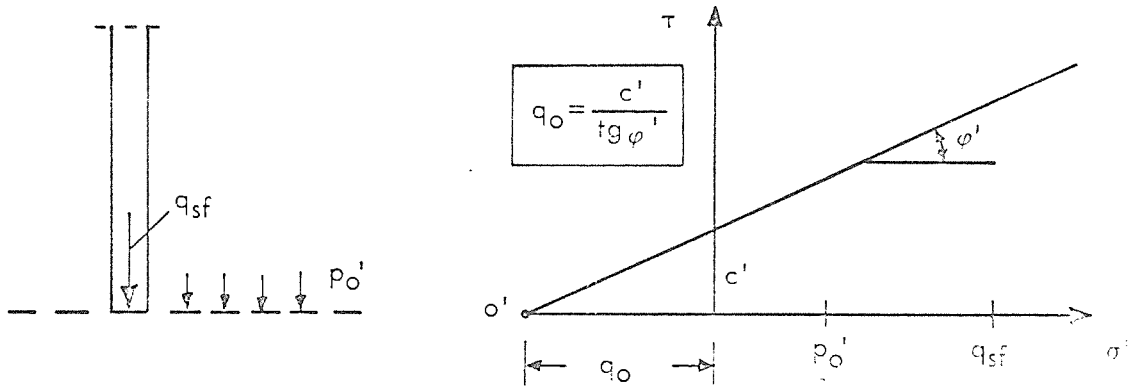


Fig. 1 Prinsippskisser  
Key sketches

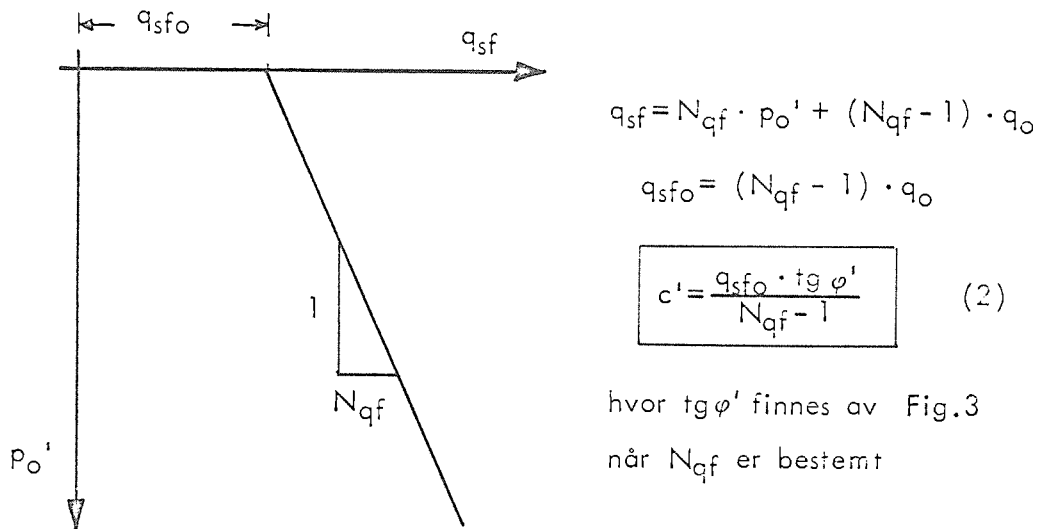


Fig. 2 Løsning av styrkeparametre ut fra bruddbelastningsdiagram  
Determination of strength parameters,  $c'$  and  $\tan \varphi'$ , from  
point resistance  $q_{sf}$  versus effective overburden,  $p_o'$



Skissen til venstre i figuren viser en spiss belastet til bruddspenning  $q_{sf}$ , i et nivå med effektivt overlagingstrykk  $p'_0$ . I spenningsdiagrammet til høyre er disse verdier avmerket.

Av diagrammet kan en, ut fra likedannede trekkanter, utlede følgende relasjon:

$$q_{sf} + q_0 = N_{qf} (p'_0 + q_0) \quad (1)$$

der  $N_{qf}$  = bæreevnefaktor ved brudd.

Fig. 2 viser hvordan forsøksresultatene fremstilles: Spissmotstanden (bruddbelastningen) avbildes i forhold til effektivt overlagingstrykk.

I homogene avsetninger vil en kunne finne et tilnærmet rettlinjet forhold gjennom hele profilet. Er det lagdeling vil en ofte finne karakteristiske helninger på linjene for de forskjellige lag. Disse betraktes følgelig separat for å finne de tilhørende styrkeparametre. Fig. 2 viser at helningen på linjen definerer bæreevnefaktor  $N_{qf}$ . Ut fra avskjæringen  $q_{sfo}$  langs horisontalaksen kan man bestemme  $c'$  som vist i figuren.

Den teoretiske sammenhengen mellom  $N_{qf}$  og  $\text{tg } \varphi'$  er vist i fig. 3, som er resultatet av den senere tids studier av hvordan jorden under spissen plastifiseres ved "løse" og "faste" friksjonsmasser. I denne fremstilling inngår Prandtl's løsning som den heltrukne linje.

Med henvisning til fig. 2 og fig. 3 fåes følgende prosedyre ved bestemmelse av styrkeparametrene:

- (a) Ta ut  $N_{qf}$ . Av diagram fig. 3 finnes  $\text{tg } \varphi'$ . Foreløbig benyttes Prandtl for midlere lagring.
- (b) Avles eventuell nullskjæring  $q_{sfo}$ . Beregn tilhørende  $c'$  av formelen:

$$c' = \frac{q_{sfo} \cdot \text{tg } \varphi'}{N_{qf} - 1} \quad (2)$$

I et friksjonsmateriale som sand vil en vanligvis si at kohesjonsleddet er lik null. Isåfall finnes bruddbelastningen av følgende enkle relasjon:

$$q_{sf} = N_{qf} \cdot p'_0 ; \text{ dvs } q_0 = 0$$

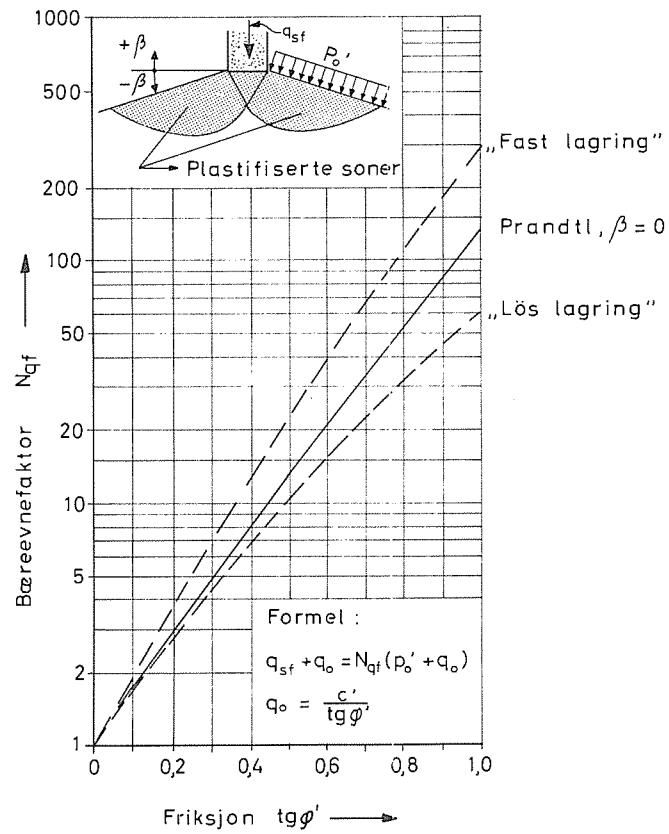


Fig. 3  $N_{qf} - \text{tg} \varphi'$

Bearing capacity factor  $N_{qf}$  versus friction,  $\tan \varphi'$

Ikke desto mindre opptrer det ofte en tilsynelatende kohesjon også i det en er vant til å betrakte som kohesjonsløse materialer. I slike tilfeller betraktes:

$$c' = \text{"oppførselsparameter" (tilsynelatende kohesjon)}$$

I fig. 4 er det vist noen eksempler fra civ.ing. dr. Eresunds forsøk ved Chalmers tekniska högskola, Gøteborg (1972), hvorav det fremgår at selv i sandig grus har en "tilsynelatende kohesjon"  $c' > 0$ .

### Eksempler

Det henvises til fig. 4. Venstre diagram viser Eresunds trykksonderingsresultater. Det kan med god tilnærming legges en rett linje gjennom de avsatte punkter både for fuktig og mett grus.

Den høyre del av fig. 4 viser belastningsforsøk i samme grus med dynamisk og statisk forbelastning, og et forsøk uten forbelastning.

Ved å følge prosedyren gitt i forrige avsnitt får en følgende styrkeparametre:

#### A. Trykksondering

$$(a) \quad N_{qf} = 45 \\ \quad \quad \quad \text{tg } \varphi' = 0,77; \quad \quad \underline{\varphi' = 37,6^\circ} \quad (\text{Prandtl})$$

$$(b) \quad q_{sfo} = 1 \text{ MN/m}^2 \\ \quad \quad \quad \underline{c' = 17,5 \text{ kN/m}^2}$$

#### B0. Belastningsforsøk, 1.gangs belastning

$$(a) \quad N_{qf} = 35 \\ \quad \quad \quad \text{tg } \varphi' = 0,77 \quad (\text{midt i løst område}) \\ \quad \quad \quad \underline{\varphi' = 37,6^\circ}$$

$$(b) \quad q_{sfo} = 2,6 \text{ MN/m}^2 \\ \quad \quad \quad \underline{c' = 59 \text{ kN/m}^2}$$

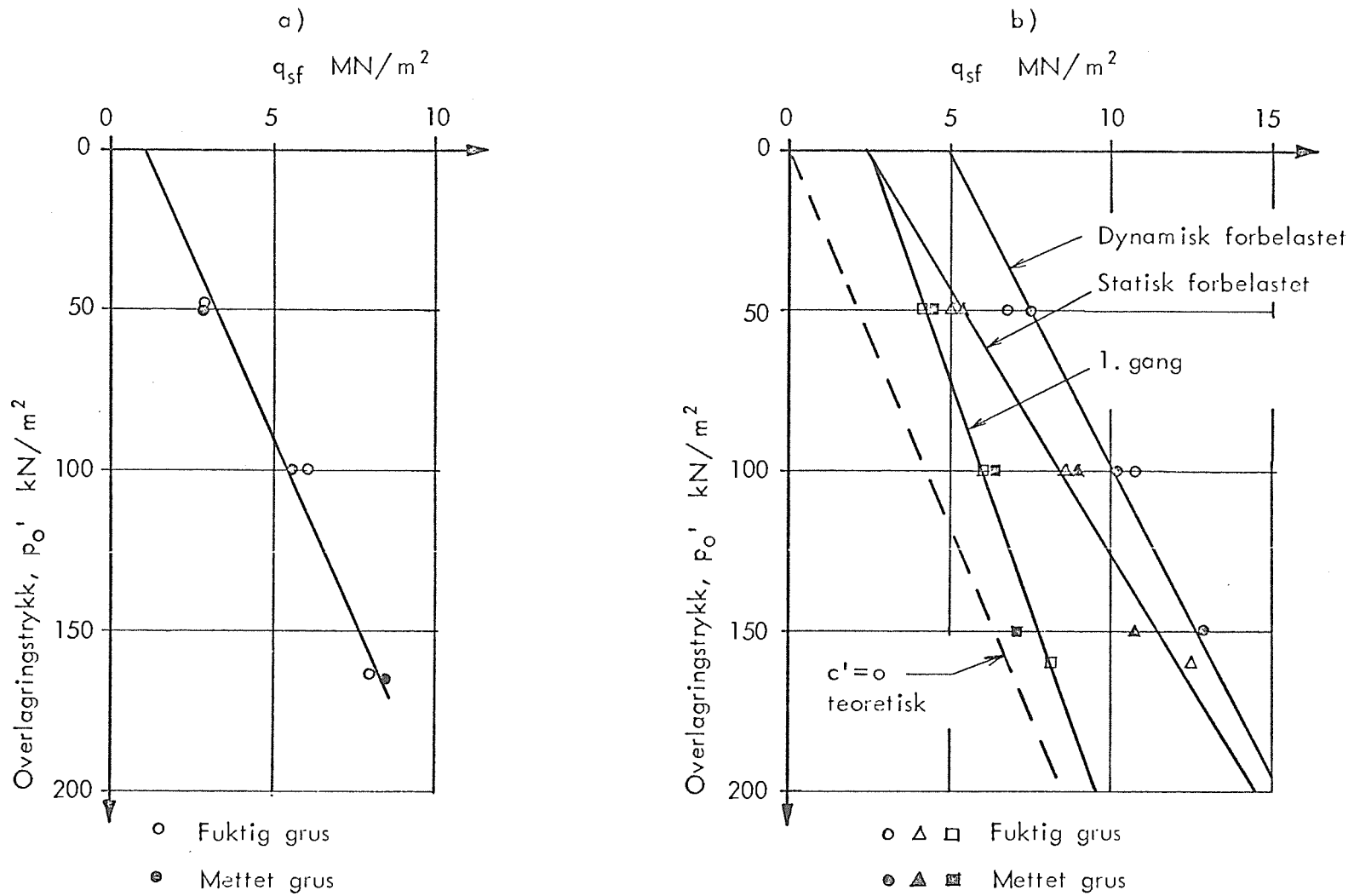


Fig. 4 To eksempler fra Eresund (1972). (a) Trykksondering (b) Belastningsforsøk  
Two examples from Eresund (1972). (a) Penetration tests (b) Plate loading tests

B1. Belastningsforsøk, statisk forbelastning

$$(a) \quad N_{qf} = 60$$

$$\quad \quad \quad \text{tg } \varphi' = 0,83 ; \quad \underline{\varphi' = 39,7^{\circ}} \quad (\text{Prandtl})$$

$$(b) \quad q_{sfo} = 2,3 \text{ MN/m}^2$$

$$\quad \quad \quad \underline{c' = 32 \text{ kN/m}^2}$$

B2. Belastningsforsøk, dynamisk forbelastning

$$(a) \quad N_{qf} = 52$$

$$\quad \quad \quad \text{tg } \varphi' = 0,80 ; \quad \underline{\varphi' = 38,6^{\circ}} \quad (\text{Prandtl})$$

$$(b) \quad q_{sfo} = 5 \text{ MN/m}^2$$

$$\quad \quad \quad \underline{c' = 78,5 \text{ kN/m}^2}$$

Sluttkommentar

Vårt institutt vil fortsette denne forskningen som er innledet. Vi vil utvikle vårt kompressometer med tanke på å verifisere sammenhengen mellom bæreevne (brudd) og styrkeparametre. Vi er også sterkt interessert i å undersøke trykksønderingsresultater med tanke på å finne den samme relasjon.

Summary

This short paper discusses the possibilities of obtaining shear strength parameters from in situ measurements by field compressometers, and penetration instruments. An important part of the investigations ahead of us will be centred around

- (1) improved interpretation procedures,
- (2) better field testing technique, and
- (3) revised instrumentation to correspond as closely as possible to the basic concepts of the interpretation theory.

Litteratur

- ERESUND, S., 1972. Sättningar hos cirkulära stela fundament på friktionsjord. Inverkan av dynamisk förbelastning. Doktorsavh., CTH, Göteborg.
- JANBU, N., 1972. NGM-72. Kriterier for valg av analytiske redskaper i anvendt geoteknikk".

### Övriga diskussionsinlägg

Erik Sandegren

Jag är helt överens med Hansbo om att trycksondering kan bli en metod, som rätt utvecklad och marknadsförd kan ge mer omfattande och noggrannare information än nu använda metoder. Vad jag anmärker på är att man nu på en del håll använder trycksonden på ett sådant sätt att det skadar metoden. I dagens läge är den icke "kalibrerad" på ett sådant sätt att den kan användas som en universalmetod och få har förmågan att tolka resultaten tillfredsställande, ofta därför att fältarbetet varit undermåligt. I dag är den ett utmärkt alternativ endast och om en fullt kunnig fältgeotekniker använder den och den geotekniska konsulten har stor vana vid tolkning av resultaten.

Det är vidare enligt min mening inte "fair play" att vid en jämförelse mellan olika metoder framhålla att viktsondering icke går att utföra, om man först måste tränga igenom ett mäktigare fast lager. Det visar bara att föredrags-hållaren, ehuru specialist på trycksond, icke är medveten om, vad en viktsond i praktiken rätt skött kan åstadkomma. Det är helt enkelt så att båda dessa metoder måste skötas med stor omsorg på rätt sätt.

Fig. 5 visar ett exempel på en väl utförd viktsondering, som helt vederlägger Hansbos uppgift. Det är även anmärkningsvärt hur bra en enkel sticksondering kan ge värdefulla uppgifter. I dagens läge förutsätts att, när man i allmänhet för närvarande har bättre kännedom om utvärdering av viktsonderingsresultat, trycksonderingen "kalibreras" genom ett rätt avvägt antal viktsonderingar. Detta hade icke varit nödvändigt, om trycksonden marknadsförts på ett konsumentvänligt sätt från början och på ett nöjaktigt sätt kalibrerats. Om trycksonden får utvecklas på rätt sätt, kommer det icke heller att varken bli nödvändigt eller vara riktigt i framtiden.

Sven Hansbo

Det är i princip fel att "kalibrera" trycksondering med viktsondering som ju är en sämre metod.

Erik Sandegren

Det är inte frågan om kalibrering i egentlig bemärkelse utan en jämförelse med en metod som man har personlig erfarenhet av.

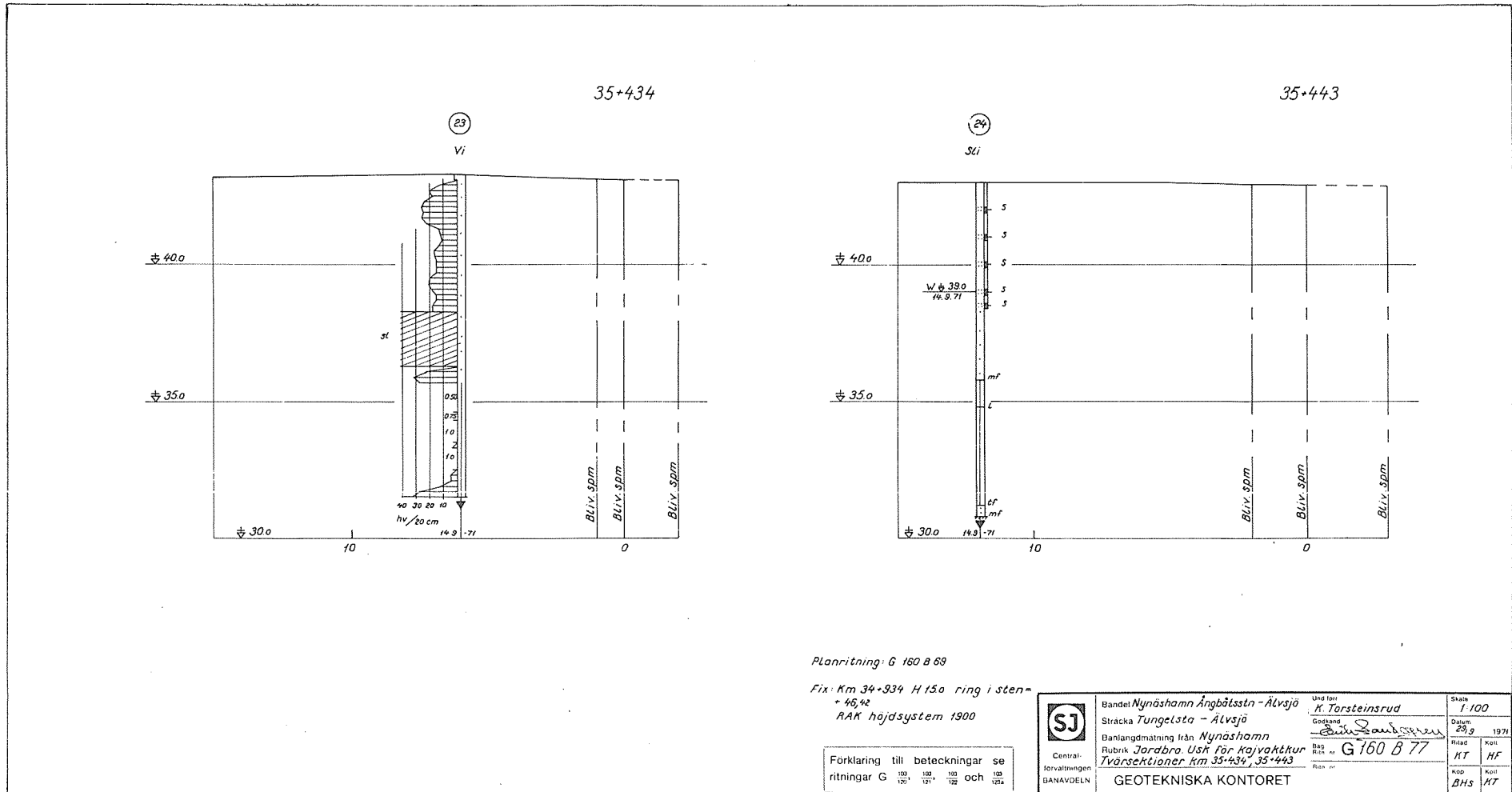


Fig. 5 Resultat från vikt- och sticksondering  
 Results from weight sounding (Vi) and from simple sounding by  
 manual pressing (Sti)



Bengt Broms

Friktionsmantelns placering beror på målsättningen för dess användning. Vid placering nära spetsen erhålls i första hand indikation på jordart och jordlagerföljder. Vid placering på större avstånd från spetsen blir den uppmätta mantelfriktionen mer representativ för mantelfriktionen mellan t ex jord och påle (friktionspåle).

Bernt Jakobson

Vid trycksondering utbildas enligt min uppfattning inga egentliga glidytor runt spetsen, utan jorden pressas undan. I löst lagrad jord komprimeras jorden under spetsen, vilket torde medföra ett lägre sidotryck närmast ovanför spetsen. Motsatsen gäller vid fast lagrad jord. Det är sannolikt, att man kan få information om jordens packningsgrad genom försök med dubbla friktionsmantlar, den ena placerad nära spetsen och den andra på längre avstånd därifrån. Sådana försök borde utföras i forskningssyfte.

Som ordförande i symbol- och beteckningskommittén vädjar jag om synpunkter på sättet att redovisa trycksonderingsresultaten.

## STANDARD FÖR TRYCKSONDERING

Ulf Bergdahl, Orrje & Co - Scandiaconsult  
(förberett diskussionsinlägg)

Under en följd av år har sonderingskommittén arbetat med standardisering av vikt- och hejarsonderingsmetoderna och nu nått fram till en standard för såväl utrustning som utförande som i möjlig mån ger reproducerbara resultat dvs ger resultat som är nära oberoende av vem som utför undersökningen och med vems utrustning den görs. Trots detta måste man dock räkna med vissa variationer i sonderingsmotståndet som beror av t ex förborrningsdjup och vattenförhållandena i jorden. Speciellt i siltiga jordar kan sådana variationer bli av betydelse vid val av grundläggningsmetod.

Vid standardiseringsarbetet för vikt- och hejarsondering har man gjort den erfarenheten att en mängd icke på förhand förutsedda faktorer kan få stor inverkan på resultaten; jfr t ex rotationen av sondstången vid hejarsondering. Man kan då fråga sig om motsvarande svårigheter kommer att uppstå vid standardiseringsarbetet för trycksonden som nu påbörjats.

Till skillnad från viktsonden har man för trycksonden möjlighet att hämta en del erfarenheter från utlandet där det dock förekommer flera olika system för trycksondering med eller utan mätning av lokal mantelfriktion vid spetsen.

De faktorer som kan förväntas ha betydelse för sonderingsresultaten vid trycksondering är;

för spetsen: tvärsnittsarea, tvärsnittsform, spetsvinkel, mantellängd, utformning av spetsens avslutning uppåt och spetsytans råhet,

för friktionsmanteln: placering, längd, diameter och råhet,

för stängerna: diameter, rakhet,

för utförandet: nedpressningshastighet, eventuella avbrott i sonderingen, frågan

om kontinuerlig eller diskontinuerlig drivning, rotation av sonden samt metoden för nedpressning (hydraulisk pressning eller mekanisk skruvmatning).

För att i viss mån belysa behovet av en standardisering även på trycksonderingsområdet visas i fig. 6 en jämförelse mellan resultat erhållna med den vanligen använda Nilconutrustningen samt med Borros utrustning för mätning av enbart spetsmotstånd. Undersökningen har utförts vid ett nytt bostadsområde i Botkyrka-Alby söder om Stockholm där jorden består av varvig lera, mjäla och mo. Jämförelsen har presenterats för sonderingskommittén av Åke Holgersson, Kjessler & Mannerstråle AB.

För att möjliggöra en direkt jämförelse mellan spetsmotstånden har i diagrammet från Borros undersökning inritats spetsmotståndet som mätts med Nilcons utrustning. Man finner att spetsmotståndet mätt med Nilconutrustningen nästan genomgående är lägre än det som mätts med Borros utrustning trots att båda spetsarna har  $10 \text{ cm}^2$  tvärsnittsarea. En orsak till skillnaderna kan vara att man på Nilconutrustningen har större skillnad mellan spetsens tvärmått och sondstångens tvärmått än på Borros utrustning. Detta medför att jorden närmast framför spetsen lättare kan pressas förbi spetsen och spetsmotståndet därigenom blir lägre.

De observerade skillnaderna spelar normalt inte så stor roll när man gör sonderingar för att bestämma jordens lagerföljd och relativa fasthet. Båda diagrammen är ju ur denna synpunkt likvärdiga. Emellertid kommer trycksondering att få allt större betydelse för utvärdering av jordens hållfasthets- och kompressions-egenskaper varför man blir beroende inte bara av relativa värden utan också av spetsmotstånd och mantelfriktion i absoluta tal. Till följd härav är det nödvändigt att vi arbetar för en standardisering av trycksonderingen och härvid beaktar de nordiska och europeiska strävanden som pågår i samma riktning.

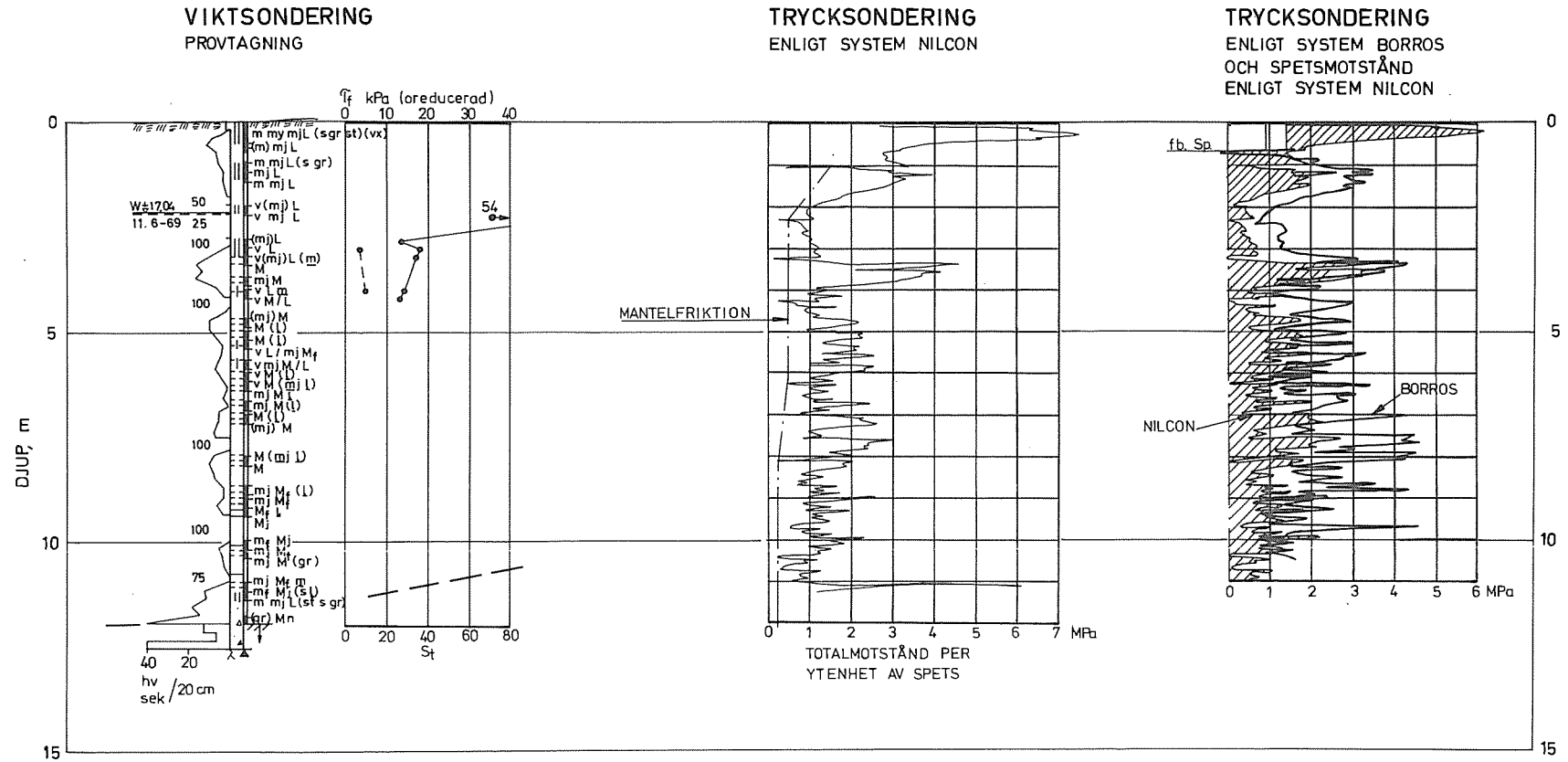


Fig. 6 Jämförelse mellan spetsmotstånden erhållna enligt system Borros och Nilcon  
 Comparison between the point resistances obtained by the Borros and Nilcon systems, respectively

Forts. diskussioner

Torsten Kallstenius

När det gäller lokalisering av spetsmanteln har jag den uppfattningen, att den bör lokaliseras så nära spetsen som möjligt och följa spetsens rörelse. De makrogeotekniska spännings- och tryckförhållandena intill spetsen blir under alla förhållanden så komplicerade, att man måste söka direkta korrelationer mellan mätta krafter och sökta geotekniska egenskaper. Dessa korrelationer kräver standardiserade redskap och förfaringssätt och anpassning till olika geologiska förhållanden.

Som teoretisk ansats tycker jag att glidytekalkyler inte lämpar sig lika bra som plasticitetsteori av den typ, som används vid pressiometerförsök. Självt har jag efter Nadai och Odenstad haft nytta av uttryck av formen:

$$\frac{q_s}{\tau_f} = 4/3 \left[ f(S_t) \ln \frac{E}{3\tau_f} + 1 \right]$$

$$\frac{\rho}{R} = \sqrt[3]{\frac{E}{3\tau_f}}$$

$$\frac{\sigma_r}{\tau_f} = \frac{q_s}{\tau_f} - 4 f(S_t) \ln \frac{r}{R}$$

$$\frac{\sigma_t}{\tau_f} = \frac{\sigma_r}{\tau_f} - 2 f(S_t)$$

Här är

$q_s$       specifika spetsmotståndet

$\tau_f$       jordens skjuvhållfasthet vid spetsen

$E$         jordens E-modul

$\rho$         den plastiska zonens radie

$R$         spetsens radie

$r$         avstånd från centrum

$f(S_t)$    är ett mått på skjuvhållfasthetens reduktion "after peak" och kan sättas till 0,9.

Bengt Broms

Man har erhållit bättre korrelation mellan spetsmotstånd och deformation än mellan spetsmotstånd och jordens inre friktionsvinkel, vilket bekräftas av undersökningar utförda av Buisman.

Erik Sandegren

En större insats borde göras för att förbättra tolkningsmetodiken. Det bör finnas utrymme för detta i det pågående utvecklingsarbetet, särskilt med tanke på de stora kostnader som läggs ned på förbättringar av utrustningen.

Bengt Broms

Bärighetsfaktorn  $N_c \approx 15$  bygger på utländska erfarenheter och gäller för  $\tau_{fu} < 50 \text{ kN/m}^2$  och lågsensitiva leror. Hög sensitivitet ger normalt låga värden på bärighetsfaktorn  $N_c$ . Anledningen till att  $N_c$  vid trycksondering är högre än vad som uppmätts för pålning ( $N_c = 8-10$ ) är troligen att neddrivningshastigheten är större vid trycksondering (ger ca 10% ökning vid en tiofaldig ökning av penetrationshastigheten) och att spetsmotståndet vid trycksondering inkluderar viss mantelfriktion ovanför spetsen.

Rune Dahlberg

Det bör poängteras att enbart sondering sällan ger uppgift om jordens material-egenskaper direkt, härför erfordras oftast kalibrering med någon mer raffinerad metod, t ex med pressometer- eller skruvplatteförsök. Eftersom ett pressometerförsök emellertid är betydligt dyrare att utföra än ett sonderingsförsök bör man använda pressometern endast så mycket att ett lokalt användbart samband erhålls mellan t ex pressometermodul och spetsmotstånd vid trycksondering, säg 2 pressometerhål per 10 st sonderingshål. Härigenom kan sonderingsförsöken ges i det närmaste samma undersökningsvärde som pressometerförsöken.

Jan Wennerstrand

I finkornigt friktionsmaterial torde man kunna erhålla så god korrelation mellan trycksondens spetsmotstånd och jordens kompressionsmodul, bärighetsfaktorer samt pålars spets- och mantelmotstånd att trycksondering med mätspets i de flesta fall helt kan ersätta de dyrare metoderna med pressometer- och skruvplatteförsök.

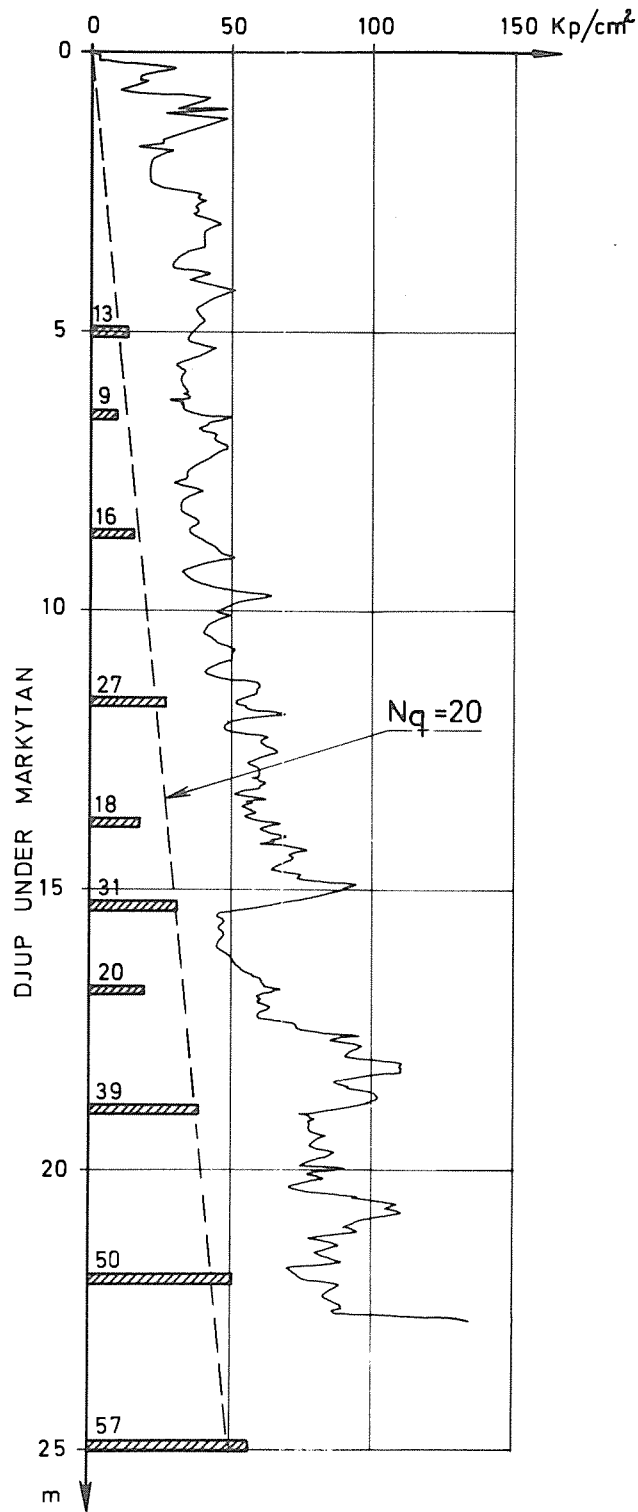


Fig. 7 Trycksondens och pålens spetsmotstånd. Den streckade linjen motsvarar  $N_q = 20$

A comparison between the point resistance of the static penetrometer and the pile. The dotted line corresponds to  $N_q = 20$

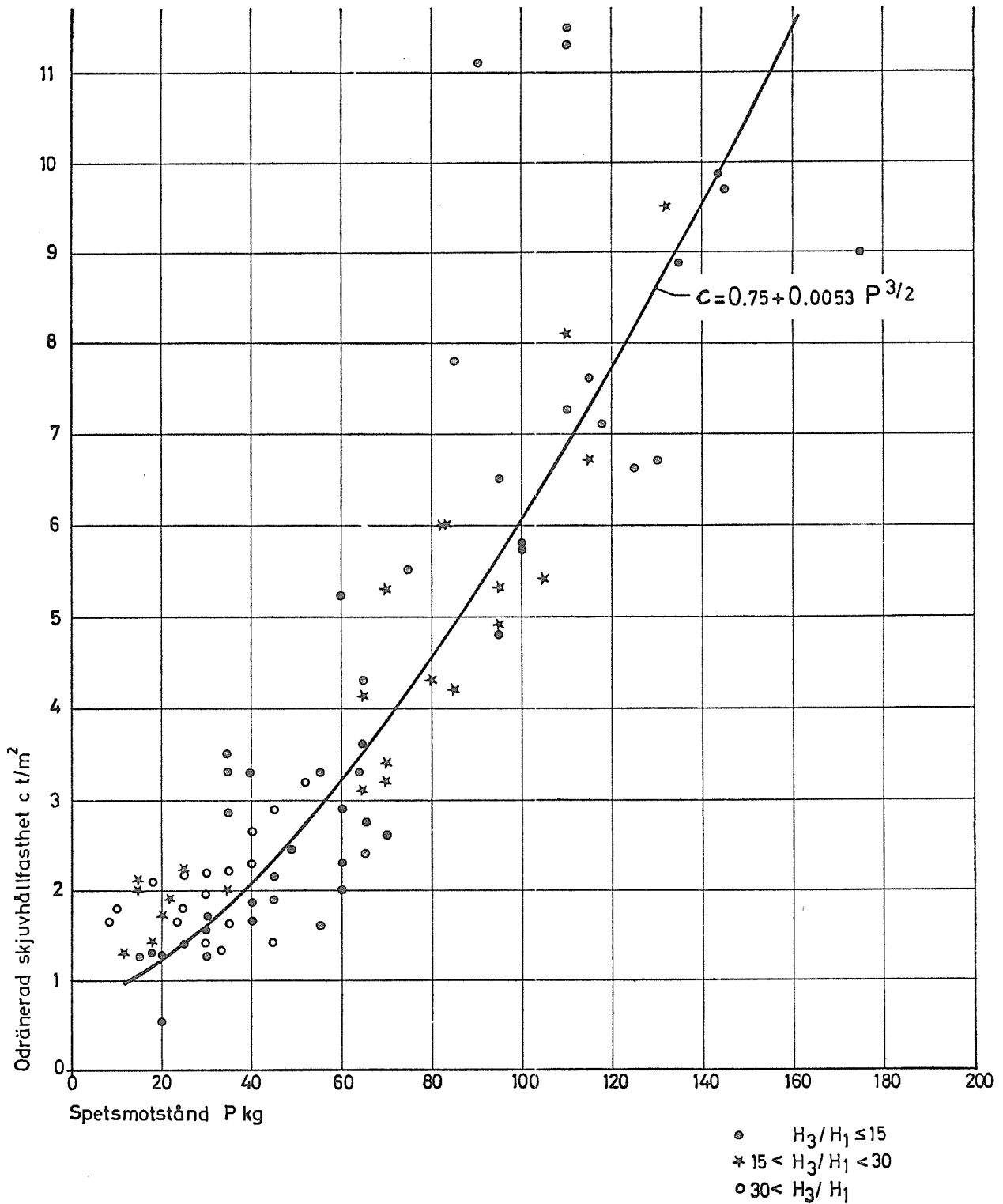


Fig. 8 Sambandet mellan lerans odränerade skjuv hållfasthet, bestämd med vingborr, och trycksondens spetsmotstånd

The correlation between the undrained shear strength of the clay, determined by vane borers, and the point resistance of the static penetrometer



Det specifika mantelmotstånd som mäts med mätmanteln kan ej användas direkt vid beräkning av pålars mantelmotstånd annat än för pålar av stålbalksprofiler. Mantelmotståndet varierar kraftigt med den slagna pålens volym, och mantelmotståndet för en viss påltyp och dimension kan lika gärna korreleras med trycksondens spetsmotstånd. Mantelmätningen är emellertid av värde för att kunna särskilja olika jordarter. För att underlätta tolkningen bör således mätmanteln placeras så nära spetsen som möjligt.

De försök med instrumenterade rörpålar som utförts vid Albysjön av Pålkommisionens friktionspålgrupp visar god korrelation mellan pålarnas spetsbärförmåga och trycksondens spetsmotstånd (se fig. 7). Pålarnas spetsbärförmåga är här drygt hälften av trycksondens spetsmotstånd vilket ej stämmer med de utländska erfarenheter som refererats av Broms här tidigare. I löst lagrat friktionsmaterial, t ex i och intill våra rullstensåsar, vill jag rekommendera att man vid dimensionering sätter pålens spetsbärförmåga till hälften av uppmätt trycksondmotstånd.

Sven Nilsson

Olika trycksonderingsutrustningar ger olika resultat. En korrelation mellan spetsmotstånd enligt Nilcons trycksond och skjuvhållfasthet enligt vingborr har utförts och presenterats i VBB:s publikation "Geoteknik", se fig. 8.

Bengt Broms

Det allt större intresset för trycksondering i Sverige ställer också större krav på regler och anvisningar för sonderingens utförande och redovisning. Det planerade internationella sonderingssymposiet i Stockholm 1974 kommer enligt programmet att behandla standardiseringsfrågan. Vad som presenterats under denna trycksonderingsdag kommer att utgöra ett värdefullt bidrag i detta sammanhang.



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT  
Swedish Geotechnical Institute

**SÄRTRYCK OCH PRELIMINÄRA RAPPORTER**

Reprints and preliminary reports

No.			Pris kr. (Sw. crs.)
1.	Views on the Stability of Clay Slopes. <i>J. Osterman</i>	1960	Out of print
2.	Aspects on Some Problems of Geotechnical Chemistry. <i>R. Söderblom</i>	1960	»
3.	Contributions to the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris 1961. Part I.	1961	»
	1. Research on the Texture of Granular Masses. <i>T. Kallstenius &amp; W. Bergau</i>		
	2. Relationship between Apparent Angle of Friction — with Effective Stresses as Parameters — in Drained and in Consolidated-Undrained Triaxial Tests on Satu- rated Clay. Normally-Consolidated Clay. <i>S. Odenstad</i>		
	3. Development of two Modern Continuous Sounding Me- thods. <i>T. Kallstenius</i>		
	4. In Situ Determination of Horizontal Ground Movements. <i>T. Kallstenius &amp; W. Bergau</i>		
4.	Contributions to the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris 1961. Part II.	1961	»
	Suggested Improvements in the Liquid Limit Test, with Reference to Flow Properties of Remoulded Clays. <i>R. Karlsson</i>		
5.	On Cohesive Soils and Their Flow Properties. <i>R. Karlsson</i>	1963	10:—
6.	Erosion Problems from Different Aspects.	1964	10:—
	1. Unorthodox Thoughts about Filter Criteria. <i>W. Kjellman</i>		
	2. Filters as Protection against Erosion. <i>P. A. Hedar</i>		
	3. Stability of Armour Layer of Uniform Stones in Running Water. <i>S. Andersson</i>		
	4. Some Laboratory Experiments on the Dispersion and Erosion of Clay Materials. <i>R. Söderblom</i>		
7.	Settlement Studies of Clay.	1964	10:—
	1. Influence of Lateral Movement in Clay Upon Settle- ments in Some Test Areas. <i>J. Osterman &amp; G. Lindskog</i>		
	2. Consolidation Tests on Clay Subjected to Freezing and Thawing. <i>J. G. Stuart</i>		
8.	Studies on the Properties and Formation of Quick Clays. <i>J. Osterman</i>	1965	5:—
9.	Beräkning av pålar vid olika belastningsförhållanden. <i>B. Broms</i>	1965	30:—
	1. Beräkningsmetoder för sidobelastade pålar.		
	2. Brottlast för snett belastade pålar.		
	3. Beräkning av vertikala pålars bärförmåga.		
10.	Triaxial Tests on Thin-Walled Tubular Samples.	1965	5:—
	1. Effects of Rotation of the Principal Stress Axes and of the Intermediate Principal Stress on the Shear Strength. <i>B. Broms &amp; A. O. Casbarian</i>		
	2. Analysis of the Triaxial Test—Cohesionless Soils. <i>B. Broms &amp; A. K. Jamal</i>		
11.	Något om svensk geoteknisk forskning. <i>B. Broms</i>	1966	5:—
12.	Bärförmåga hos pålar slagna mot släntberg. <i>B. Broms</i>	1966	15:—
13.	Förankring av ledningar i jord. <i>B. Broms &amp; O. Orrje</i>	1966	Out of print
14.	Ultrasonic Dispersion of Clay Suspensions. <i>R. Pusch</i>	1966	5:—
15.	Investigation of Clay Microstructure by Using Ultra-Thin Sections. <i>R. Pusch</i>	1966	10:—
16.	Stability of Clay at Vertical Openings. <i>B. Broms &amp; H. Bennermark</i>	1967	10:—

No.			Pris kr. (Sw. crs.)
17.	Om påslagning och pålbärighet.	1967	5:—
	1. Dragsprickor i armerade betongpålar. <i>S. Sahlin</i>		
	2. Sprickbildning och utmattning vid slagning av armerade modellpålar av betong. <i>B-G. Hellers</i>		
	3. Bärighet hos släntberg vid statisk belastning av bergspets. Resultat av modellförsök. <i>S-E. Rehnman</i>		
	4. Negativ mantelfriktion. <i>B. H. Fellenius</i>		
	5. Grundläggning på korta pålar. Redogörelse för en försöksserie på NABO-pålar. <i>G. Fjellner</i>		
	6. Krokiga pålars bärförmåga. <i>B. Broms</i>		
18.	Pålgrupperns bärförmåga. <i>B. Broms</i>	1967	10:—
19.	Om stoppslagning av stödpålar. <i>L. Hellman</i>	1967	5:—
20.	Contributions to the First Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon 1966.	1967	5:—
	1. A Note on Strength Properties of Rock. <i>B. Broms</i>		
	2. Tensile Strength of Rock Materials. <i>B. Broms</i>		
21.	Recent Quick-Clay Studies.	1967	10:—
	1. Recent Quick-Clay Studies, an Introduction. <i>R. Pusch</i>		
	2. Chemical Aspects of Quick-Clay Formation. <i>R. Söderblom</i>		
	3. Quick-Clay Microstructure. <i>R. Pusch</i>		
22.	Jordtryck vid friktionsmaterial.	1967	30:—
	1. Resultat från mätning av jordtryck mot brolandfäste. <i>B. Broms &amp; I. Ingelson</i>		
	2. Jordtryck mot oeftergivliga konstruktioner. <i>B. Broms</i>		
	3. Metod för beräkning av sambandet mellan jordtryck och deformation hos främst stödmurar och förankringsplattor i friktionsmaterial. <i>B. Broms</i>		
	4. Beräkning av stolpfundament. <i>B. Broms</i>		
23.	Contributions to the Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks, Oslo 1967.	1968	10:—
	1. Effective Angle of Friction for a Normally Consolidated Clay. <i>R. Brink</i>		
	2. Shear Strength Parameters and Microstructure Characteristics of a Quick Clay of Extremely High Water Content. <i>R. Karlsson &amp; R. Pusch</i>		
	3. Ratio $c/p'$ in Relation to Liquid Limit and Plasticity Index, with Special Reference to Swedish Clays. <i>R. Karlsson &amp; L. Viberg</i>		
24.	A Technique for Investigation of Clay Microstructure. <i>R. Pusch</i>	1968	22:—
25.	A New Settlement Gauge, Pile Driving Effects and Pile Resistance Measurements.	1968	10:—
	1. New Method of Measuring in-situ Settlements. <i>U. Bergdahl &amp; B. Broms</i>		
	2. Effects of Pile Driving on Soil Properties. <i>O. Orrje &amp; B. Broms</i>		
	3. End Bearing and Skin Friction Resistance of Piles. <i>B. Broms &amp; L. Hellman</i>		
26.	Sättningar vid vägbyggnad.	1968	20:—
	Föredrag vid Nordiska Vägtekniska Förbundets konferens i Voksenåsen, Oslo 25–26 mars 1968.		
	1. Geotekniska undersökningar vid bedömning av sättningar. <i>B. Broms</i>		
	2. Teknisk-ekonomisk översikt över anläggningsmetoder för reducering av sättningar i vägar. <i>A. Ekström</i>		
	3. Sättning av verkstadsbyggnad i Stenungsund uppförd på normalkonsoliderad lera. <i>B. Broms &amp; O. Orrje</i>		
27.	Bärförmåga hos släntberg vid statisk belastning av bergspets. Resultat från modellförsök. <i>S-E. Rehnman</i>	1968	15:—

No.			Pris kr. (Sw. crs.)
28.	Bidrag till Nordiska Geoteknikermötet i Göteborg den 5-7 september 1968.	1968	15:—
	1. Nordiskt geotekniskt samarbete och nordiska geoteknikermöten. <i>N. Flodin</i>		
	2. Några resultat av belastningsförsök på lerterräng speciellt med avseende på sekundär konsolidering. <i>G. Lindskog</i>		
	3. Sättningar vid grundläggning med plattor på moränlera i Lund. <i>S. Hansbo, H. Bennermark &amp; U. Kihlblom</i>		
	4. Stabilitetsförbättrande spontkonstruktion för bankfyllningar. <i>O. Wager</i>		
	5. Grundvattenproblem i Stockholms city. <i>G. Lindskog &amp; U. Bergdahl</i>		
	6. Aktuell svensk geoteknisk forskning. <i>B. Broms</i>		
29.	Classification of Soils with Reference to Compaction. <i>B. Broms &amp; L. Forssblad</i>	1968	5:—
30.	Flygbildstolkning som hjälpmedel vid översiktliga grundundersökningar.	1969	10:—
	1. Flygbildstolkning för jordartsbestämning vid samhällsplanering 1-2. <i>U. Kihlblom, L. Viberg &amp; A. Heiner</i>		
	2. Identifiering av berg och bedömning av Jorddjup med hjälp av flygbilder. <i>U. Kihlblom</i>		
31.	Nordiskt sonderingsmöte i Stockholm den 5-6 oktober 1967. Föredrag och diskussioner.	1969	30:—
32.	Contributions to the 3rd Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Budapest 1968.	1969	10:—
	1. Swedish Tie-Back Systems for Sheet Pile Walls. <i>B. Broms</i>		
	2. Stability of Cohesive Soils behind Vertical Openings in Sheet Pile Walls. Analysis of a Recent Failure. <i>B. Broms &amp; H. Bennermark</i>		
33.	Seismikdag 1969. Symposium anordnat av Svenska Geotekniska Föreningen den 22 april 1969.	1970	Out of print
34.	Något om geotekniken i Sverige samt dess roll i planerings- och byggprocessen. Några debattinlägg och allmänna artiklar.	1970	15:—
	<i>T. Kallstenius</i>		
	1. Geoteknikern i det specialiserade samhället. <i>B. Broms</i>		
	2. Diskussionsinlägg vid konferens om geovetenskaperna, 7 mars 1969.		
	3. Geoteknik i Sverige — utveckling och utvecklingstendenser.		
	4. Geotekniska undersökningar och grundläggningsmetoder.		
	5. Grundläggning på plattor — en allmän översikt.		
35.	Piles — a New Force Gauge, and Bearing Capacity Calculations.	1970	10:—
	1. New Pile Force Gauge for Accurate Measurements of Pile Behavior during and Following Driving. <i>B. Fellenius &amp; Th. Haagen</i>		
	2. Methods of Calculating the Ultimate Bearing Capacity of Piles. A Summary. <i>B. Broms</i>		
36.	Påslagning. Materialegenskaper hos berg och betong.	1970	10:—
	1. Bergets bärförmåga vid punktbelastning. <i>S.-E. Rehnman</i>		
	2. Deformationsegenskaper hos slagna betongpålar. <i>B. Fellenius &amp; T. Eriksson</i>		
37.	Jordtryck mot grundmurar.	1970	10:—
	1. Jordtryck mot grundmurar av Lecablock. <i>S.-E. Rehnman &amp; B. Broms</i>		
	2. Beräkning av jordtryck mot källarväggar. <i>B. Broms</i>		
38.	Provtagningsdag 1969. Symposium anordnat av Svenska Geotekniska Föreningen den 28 oktober 1969.	1970	25:—

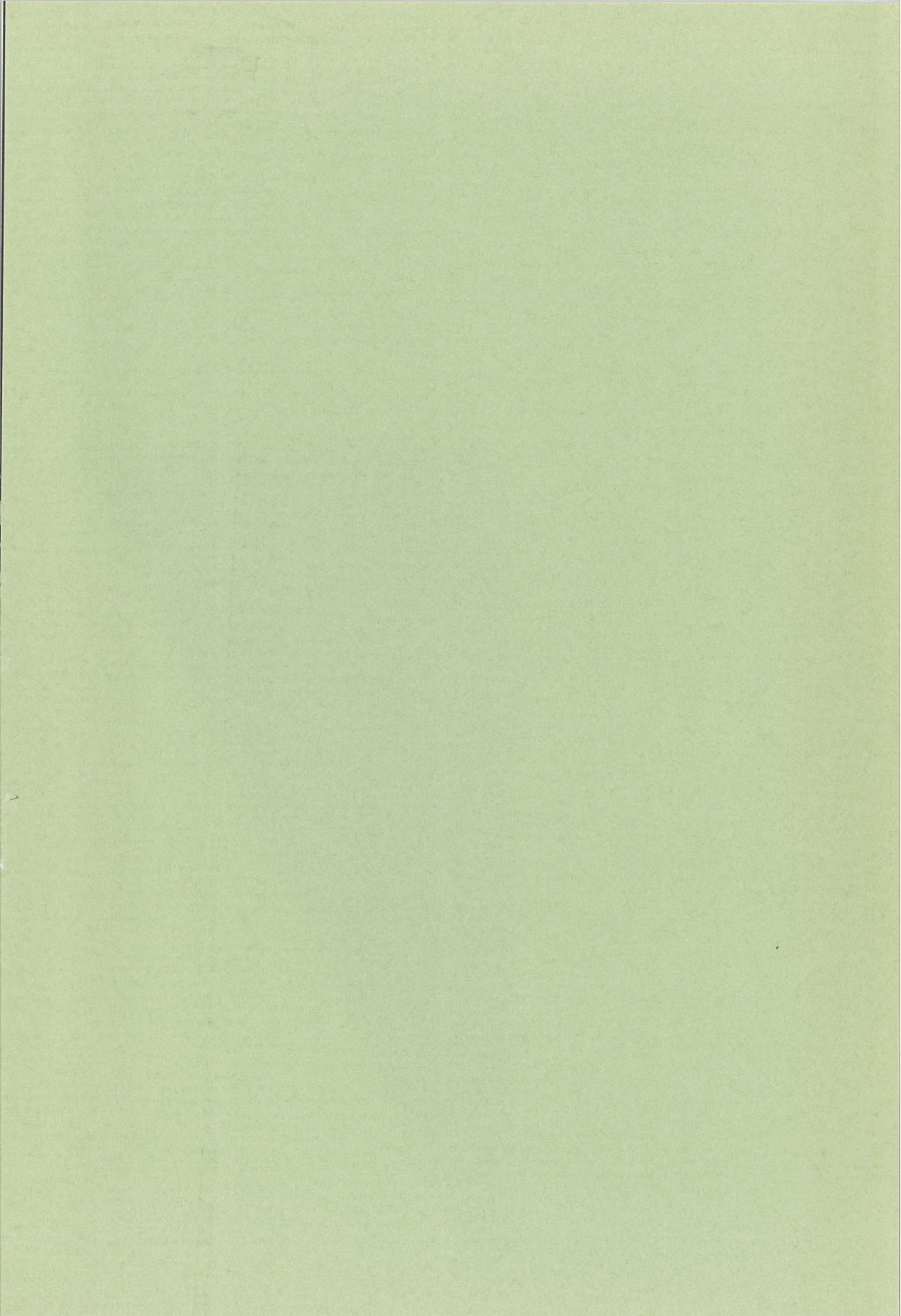
No.		Pris kr. (Sw. crs.)
39.	Morändag 1969. Symposium anordnat av Svenska Geotekniska Föreningen den 3 december 1969.	1970 25:—
40.	Stability and Strengthening of Rock Tunnels in Scandinavia. 1. Correlation of Seismic Refraction Velocities and Rock Support Requirements in Swedish Tunnels. <i>O. S. Cecil</i> 2. Problems with Swelling Clays in Norwegian Underground Constructions in Hard-Rocks. <i>R. Selmer-Olsen</i>	1971 25:—
41.	Stålpålars bärförmåga. Resultat av fältförsök med lätta slagdon. <i>G. Fjellkner</i>	1971 30:—
42.	Contributions to the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico 1969.	1971 15:—
43.	Centrally Loaded Infinite Strip on a Single-Layer Elastic Foundation — Solution in Closed Form According to the Boussinesq Theory. <i>B-G. Hellers &amp; O. Orrje</i>	1972 20:—
44.	On the Bearing Capacity of Driven Piles. 1. Methods Used in Sweden to Evaluate the Bearing Capacity of End-Bearing Precast Concrete Piles. <i>B. Broms &amp; L. Hellman</i> 2. Discussions at the Conference, Behaviour of Piles, London 1970. <i>B. Fellenius, B. Broms &amp; G. Fjellkner</i> 3. Bearing Capacity of Piles Driven into Rock. With Discussion. <i>S-E. Rehnman &amp; B. Broms</i> 4. Bearing Capacity of Cyclically Loaded Piles. <i>B. Broms</i> 5. Bearing Capacity of End-Bearing Piles Driven to Rock. <i>S-E. Rehnman &amp; B. Broms</i>	1972 20:—
45.	Quality in Soil Sampling. 1. Secondary Mechanical Disturbance. Effects in Cohesive Soil Samples. <i>T. Kallstenius</i> 2. Sampling of Sand and Moraine with the Swedish Foil Sampler. <i>B. Broms &amp; A. Hallén</i>	1972 10:—
46.	Geoteknisk flygbildtolkning. En undersökning av metodens tillförlitlighet. <i>L. Viberg</i>	1972 1)
47.	Some Experiments on Hollow Cylinder Clay Specimens. <i>A. K. Jamal</i>	1972 10:—
48.	Geobildtolkning vid vägprojektering. Rapport från försöksverksamhet 1969—71. <i>U. Kihlblom, L. Viberg, A. Heiner &amp; K. Hellman-Lutti</i>	1972 20:—
49.	Lerzoner i berganläggningar. Diskussionsmöte anordnat av IVA den 7 oktober 1970.	1972 30:—
50.	Damping of Stress Waves in Piles during Driving. Results from Field Tests. <i>G. Fjellkner &amp; B. Broms</i>	1972 30:—
51.	Skå-Edeby Test Field — Further Studies on Consolidation of Clay and Effects of Sand Drains. 1. Soil Movements below a Test Embankment. <i>R. Holtz &amp; G. Lindskog</i> 2. Long-Term Loading Tests at Skå-Edeby, Sweden. <i>R. Holtz &amp; B. Broms</i> 3. Excavation and Sampling around Some Sand Drains at Skå-Edeby, Sweden. <i>R. Holtz &amp; G. Holm</i>	1973 20:—
52.	Lateral Earth Pressures on Walls and Measurements under Different Temperature Conditions. 1. Lateral Earth Pressures Due to Compaction of Cohesionless Soils. <i>B. Broms</i> 2. Earth Pressure against the Abutments of a Rigid Frame Bridge. <i>B. Broms &amp; I. Ingelson</i> 3. Lateral Earth Pressure on a Bridge Abutment. <i>B. Broms &amp; I. Ingelson</i> 4. Lateral Pressures on Basement Wall. Results from Full-Scale Tests. <i>S-E. Rehnman &amp; B. Broms</i> 5. Behaviour of Anchored Sheet-Pile Wall Exposed to Frost Action. <i>E. Sandegren, P. O. Sahlström &amp; H. Stille</i> 6. Back-Tied Sheet Pile Wall in Friction Soil. Deformations and Drag Forces Due to Piling and Freezing. <i>G. Sandqvist</i>	1973 25:—

1) Distribution: AB Svensk Byggtjänst

No.		1973	Pris kr. (Sw. crs.)
53.	Piles — General Reports, Basic Theories, Measurements and a Case Record of Buckling.	1973	30: —
	1. Settlements of Pile Groups. <i>B. Broms</i>		
	2. Stability of Flexible Structures (Piles and Pile Groups). <i>B. Broms</i>		
	3. Buckling of Piles Due to Lateral Soil Movements. Discussion. <i>B. Fellenius</i>		
	4. Bending of Piles Determined by Inclinator Measurements. <i>B. Fellenius</i>		
	5. Precast Concrete Piles. State-of-Art Report. <i>B. Fellenius</i>		
	6. Die Anwendung der Ähnlichkeitstheorie in der Geotechnik. (Dimensional Analysis and Similarity Theory in Soil Mechanics.) <i>R. Massarsch</i>		
54.	Moränleredagar 1972. Symposium anordnat av Svenska Geotekniska Föreningen den 2–3 maj 1972.	1973	25: —
55.	New Lines in Quick Clay Research. <i>R. Söderblom</i>	1974	20: —
	1. A New Approach to the Classification of Quick Clays.		
	2. Application of Remote Sensing in the Quick Clay Research.		
	3. Aspects on Some Problems of Geotechnical Chemistry — Part III.		
56.	Skadlig inverkan av vibrationer. Symposium anordnat av Svenska Geotekniska Föreningen den 7 maj 1973.	1974	25: —
57.	Geobildtolkning av mäktighetsförhållanden inom lerområden. <i>L. Viberg</i>	1974	22: —
58.	Trycksonderingsdag 1973. Symposium anordnat av Svenska Geotekniska Föreningen den 5 februari 1973.	1975	30: —







**Pris 30:—**