



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE



CPT-sondering

utrustning – utförande – utvärdering

En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd
och egenskaper i jord

ROLF LARSSON



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Information 15

CPT-sondering

utrustning – utförande – utvärdering

En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd
och egenskaper i jord

ROLF LARSSON

Tredje utgåvan – reviderad

Information	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI, Informationstjänsten Tel: 013-20 18 04 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	0281-7578
ISRN	SGI-INF--07/15--SE
Projektnummer SGI	12691
Dnr SGI	3-0512-0788

Förord

Information 15 beskriver spetsstrycksondering med och utan portrycksmätning, CPT-sondering. Dels ges en kortfattad beskrivning av utrustningen och handledning för försöksutförandet, dels ges rekommendationer för utvärdering av resultaten. Dessa är baserade på svenska och utländska erfarenheter och är anpassade till svenska jordar och klassificeringsregler. För denna försökstyp har i olika sammanhang också använts beteckningarna kombinerad spetsstryck-portrycksondering, CPTU-sondering samt piezocone test. I denna skrift används i enlighet med Svenska Geotekniska Föreningens Fältkommittés rekommenderade standard genomgående begreppet CPT-sondering, oberoende av om sonderingen utförs med portrycksmätning eller inte.

Information 15 redovisar hur CPT-sondering bör utföras och utvärderas enligt de erfarenheter som vunnits vid SGI samt vilken typ av resultat och tillförlitlighet som kan förväntas.

Målgrupper är de som utför eller upphandlar geotekniska undersökningar eller använder sig av resultaten från dessa.

Forskningen rörande CPT-sondering vid SGI har i huvudsak bedrivits med inriktning på speciella svenska förhållanden med mycket lösa och finkorniga jordar och utgjort ett komplement till den omfattande forskning som bedrivs runt om i världen. De delar av denna skrift som behandlar standard för utrustning, utförande och redovisning har samordnats med det standardiseringsarbete som tidigare bedrivits av Svenska geotekniska föreningens fältkommitté och senare inom den europeiska standardiseringen av CEN\TC341\WG2. Det senare har resulterat i den nya internationella standarden SS-EN ISO 22476-1:2012. Om de råd som ges i denna informationsskrift följs uppfylls kraven i såväl SGFs rekommendationer från 1993 som den internationella standarden.

Illustrationerna har framtagits av Vägverket, Sektion Geoteknik.

Författare till informationsskriften är Rolf Larsson, SGI. Ett stort antal kollegor och forskningsinstitut har också bidragit med sitt kunnande och sina erfarenheter.

Linköping i mars 2015
Statens geotekniska institut

Innehållsförteckning

1. Introduktion	6
2. Sonderingsprincip	9
2.1 Sonderingssprincip	9
2.2 Standard och rekommendationer	10
2.3 Definitioner	11
2.4 Sonderingsklasser	12
3. CPT-utrustning	15
3.1 Mätprincip och detaljerad kalibrering	15
3.2 Måttspecifikationer och krav på utrustningen	18
4. Utförande av CPT-sondering	28
4.1 Förberedelser	28
4.2 Försöksutförande	31
4.3 Speciella problem	34
5. Redovisning och databehandling av sonderingsresultat	37
5.1 Parametrar för utvärdering	37
5.2 Databehandling	37
5.3 Uppritning	38
5.4 Vidare databehandling	39
6. Utvärdering av jordlagerföljd och klassificering av jord	42
7. Utvärdering av förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad	48
8. Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet i lerjord	50
9. Utvärdering av lagringstäthet	52
10. Utvärdering av friktionsvinkel i sand	54
11. Utvärdering av hållfasthetsegenskaper i siltjord	56
12. Utvärdering av deformationsegenskaper	58
13. Exempel	60
Litteratur	70

1. Introduktion

CPT-sonderingens främsta användningsområde är bedömning av jordlagerföljd och preliminär uppskattning av geotekniska egenskaper.

Inom geotekniken finns ett stort behov av att rationellt kunna bestämma jordlagerföljden kontinuerligt och att kunna bedöma jordens egenskaper på plats under naturliga förhållanden. Ett stort antal metoder har på senare tid utvecklats för detta ändamål. Efter en större genomgång av de metoder som främst är avsedda för lösa till fasta jordar, med kornstorlekar upp till grusfraktionen, utvaldes CPT-sondering med samtidig porttrycksmätning som en av de metoder som bedömdes ha goda förutsättningar att bli användbara i svenska jordar. Forskning och utveckling av metoderna har sedan bedrivits för svenska förhållanden under många års tid.

CPT-sonderingens främsta användningsområde är, som ovan nämnts, bedömning av jordlagerföljd och preliminär uppskattning av geotekniska egenskaper. Metoden används i lösa till fasta jordar med kornstorlekar upp till grusfraktionen, d.v.s de jordar där en sond kan tryckas ned utan slag eller rotation. I dessa jordar är metoden ööverträffad för rationell detaljbestämning av jordlagerföljd. I ren sand kan sonderingen utföras utan porttrycksmätning, utom på så stora vattendjup att de hydrostatiska vattentrycken är stora nog att påverka resultaten. I all annan jord utförs CPT-sonderingen med samtidig registrering av genererade porvattentryck. Sonderingsstopp erhålls på grund av gruslager, stenar, mycket fasta och/eller grovkorniga moräner, fasta sandlager eller berg.

Andra in situ-metoder, liksom provtagning och laboratorieförsök, kan vara bättre lämpade för detaljbestämning av speciella egenskaper i olika jordar. De delområden och de nivåer där sådana kompletterande undersökningar bör utföras kan då lokaliseras ur resultaten från CPT-sonderingarna. Likaså kan en bedömning av lämplig undersökningsmetod göras.

Friktionsjord

För en del jordar, främst sand, finns en omfattande empirisk erfarenhet av resultat från CPT-sondering och resultaten används ofta direkt för bedömning av bärighet och sätt-

ningar i denna typ av jord. I detta fall används beräkningsmetoder som utarbetats empiriskt speciellt för denna sonderingsmetod.

Också en del andra geotekniska parametrar kan utvärderas med relativt god noggrannhet. I sand gäller detta främst friktionsvinkeln. Finns dessutom tillgång till data från parallella dilatometerförsök i jorden, varmed en uppskattning av rådande horisontaltryck kan göras, blir denna uppskattning mycket god.

Olika moduler och lagringstäthet i sand kan uppskattas i en del fall. Jordens överkonsolidering och materialets krossningsbenägenhet och kornfördelning har dock stor inverkan på utvärderingen av dessa parametrar samtidigt som de senare faktorerna inte kan utvärderas ur sonderingsresultaten. De empiriska samband som finns gäller därför enbart för relativt ensgraderad normalkonsoliderad kvarts-fältspatsand.

Kohesionsjord

I finkorniga jordar som lera, lermorän, sulfidjord och gyttja kan odränerad skjuvhållfasthet uppskattas och en översiktlig bild erhållas av förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad. De empiriska relationerna för dessa egenskaper är oftast beroende av jordens konsistensgränser och en god uppskattning kräver kompletterande upptagning av jordprover. För detta ändamål räcker det dock med störda prover. En utvärdering av egenskaper i lösare finkorniga jordar ställer också speciella krav på försöksutrustningen och dess handhavande.

Silt

Utvärdering av egenskaper i silt görs som för kohesionsjord eller friktionsjord beroende på om jorden uppträtt odränerat eller dränerat under sonderingen. Om jorden uppträtt partiellt dränerat finns en speciell metod att uppskatta dess effektiva hållfasthetsparametrar.

Möjligheter med CPT-sondering

Fördelen med elektrisk mätning vid sondspetsen är främst ökad noggrannhet, repeterbarhet, möjlighet till mätning av flera parametrar och nära nog kontinuerlig registrering mot djupet. Tillkomsten av porttrycksmätning har medfört:

- möjlighet att korrigera uppmätta värden på spetsstryck och mantelfriktion för de obalanserade vattentryck som verkar på de olika delarnas ändtyor och som i lös finkornig jord medför stora felkällor vid mätningarna. Efter denna korrektion erhålls rättvisande värden och jämförbara resultat mellan spetsar av olika fabrikat och detaljutförande.
- möjlighet att bedöma jordens dräneringsegenskaper
- möjlighet att rationellt mäta porvattentrycket in situ, främst i mer permeabla skikt och jordlager.
- ökade möjligheter till bedömning av jordlagerföljd och klassificering av jorden.
- ökade möjligheter till bedömning av geotekniska egenskaper i främst finkornig jord.

Krav vid CPT-sondering

Den kombinerade spetsstryck- och porttrycksonderingen med elektrisk mätning vid spetsen ställer stora krav på utrustningens noggrannhet, kalibrering och handhavande. Ett strikt följande av en detaljerad standard för såväl utrustning som försöksutförande för sonderingar är därför av största vikt.

CPT-sondering, speciellt med porttrycksmätning, medför en något högre initialkostnad än andra sonderingsmetoder för motsvarande ändamål och kräver utbildad personal med vissa kunskaper om och känsla för elektronik. Metoden kräver också mer i fråga om förberedelser och efterkontroll samt organisation för underhåll och kalibrering. Å andra sidan är det den metod som ger den mest detaljerade informationen om jordlagerföljden. Senare tids forskning och utveckling har också markant förbättrat möjligheten till utvärdering av jordens egenskaper ur sonderingsresultaten.

CPT-sondering – utveckling och erfarenhetsbas

Sondering i lös jord för bestämning av jordlagerföljd och djup till fast botten har utförts i olika former sedan omkring 1915, då viktsonderingen introducerades. För att få en god upplösning och mätvärden som är representativa för de aktuella jordlagren, bör sonderingsmotståndet mätas direkt vid spetsen och därmed bli oberoende av stångfriktionen. De första typerna av spetsstrycksondering (CPT-sondering) introducerades runt 1935 och mätningen var då helt mekanisk. Sedan 1950-talet har man mer och mer övergått till elektrisk mätning och utökat antalet mätta parametrar. Främst mäts, förutom spetsstrycket, också mantelfriktionen mot en friktionshylsa placerad direkt ovanför spetsen, porttrycket vid sondspetsen och sondens lutning under sonderingen. Ytterligare parametrar som ibland mäts är temperatur och skjuvvågshastighet.

Porttrycksondering introducerades 1975. Avsikten med metoden är främst att bättre kunna särskilja jordar med olika dräneringsegenskaper och att registrera relativt tunna skikt av såväl sand och silt i lera som lerskikt i friktionsjord. Denna sonderingstyp standardiserades i Sverige 1984.

Här utfördes spetsstrycksondering och porttrycksondering ofta som separata och ibland parallella sonderingar. Utomlands, och senare också i Sverige, har metoderna integrerats i CPT-sondering där spetsstryck, mantelfriktion och porttryck mäts samtidigt. CPT-sondering används i mycket stor omfattning i många länder liksom vid undersökningar off-shore.

Spetsstrycksondering i större omfattning har således använts sedan 1940 – 1950-talet, främst utomlands men också i Sverige. Erfarenhetsunderlaget för sondering i främst normal sand med kvarts- och fältspatsmineral är omfattande. Speciella beräkningsmetoder för bärighet och sättningar i denna typ av jord finns framtagna och används allmänt liksom klassificeringsdiagram för främst friktionsjord. Eftersom porvattentrycket normalt inte har någon signifikant inverkan i friktionsjord, kan all denna samlade erfarenhet användas i denna typ av jord, oavsett om porttrycket mäts eller inte. I de fall vattentrycket har någon inverkan i denna typ av jord, vilket främst gäller vid sonderingar på stora vattendjup off-shore, innebär det en felkälla som elimineras vid användande av sonder med porttrycksmätning och korrektion för uppmätt porttryck.

”
CPT-sondering ställer stora krav på utrustningens noggrannhet, kalibrering och handhavande.

Forskningen beträffande CPT-sondering i sand har bland annat bedrivits genom storskaletförsök i kalibreringskammare för att ytterligare förfinas de empiriska och halvempiriska samband som redan funnits och att om möjligt utöka användningsområdet. I samband härmed har också möjligheten att förbättra utvärderingen genom parallella sonderingar med dilatometer studerats.

Erfarenhetsbasen från finkornig jord är av senare datum. Här är det dock endast under senare tid som man varit fullt medveten om vikten av korrektion för porttryck, temperaturstabilitet, måttoleranser och filterplacering. Hela den databas som finns från äldre spetstrycksonderingar och också stora delar av databasen från CPT-sonderingar med porttrycksmätning i finkorniga jordar är därför inte användbar (utom för specifika sonder under specifika förhållanden i speciella regioner). På senare tid har dock omfattande undersökningar utförts med iakttagande av dessa faktorer i lösare och finkornigare jordar i främst Norge, England och Canada, men också i andra länder. Ett flertal undersökningar i lermorän har utförts i Danmark. I Sverige har stora undersökningar utförts med CPT-sondering i relativt lösa leror, gyttjor och sulfidjordar, i siltjordar och i lermorän. Sammantaget bildar dessa undersökningar en solid bas för en rationell och generell empirisk utvärdering av resultaten från CPT-sondering också i finkornig jord.

”
*Det finns en ny
internationell
standard för
CPT-sondering.*

Standard

Den internationella geotekniska föreningens (ISSMGE) rekommendation för internationell standard för spetstrycksondering utarbetades 1988. Rekommendationen inrymde porttrycksmätning (piezocone), men denna del var inte standardiserad. 1993 utarbetade SGF:s fältkommitté en ny rekommendation för standard för CPT-sondering, där också porttrycksmätning ingår. Den europeiska standardiseringsorganisationen har nu via CEN\TC 341\WG2 utarbetat en ny internationell standard för CPT-sondering betecknad SS-EN ISO 22476-1, som också antagits i Sverige 2012. Jämfört med SGF:s rekommendation från 1993 har krav på korrigering av sonderingsdjupet med hänsyn till sondens lutning tillkommit. Denna standard är avsedd att kunna användas globalt och i alla jordförhållanden. De allmänna noggrannhetskraven är därmed något lägre men det påpekas att i regioner med mycket lösa jordar, som i Sverige, kan högre krav gälla, som de enligt SGF 1993.

2. Sonderingsprincip

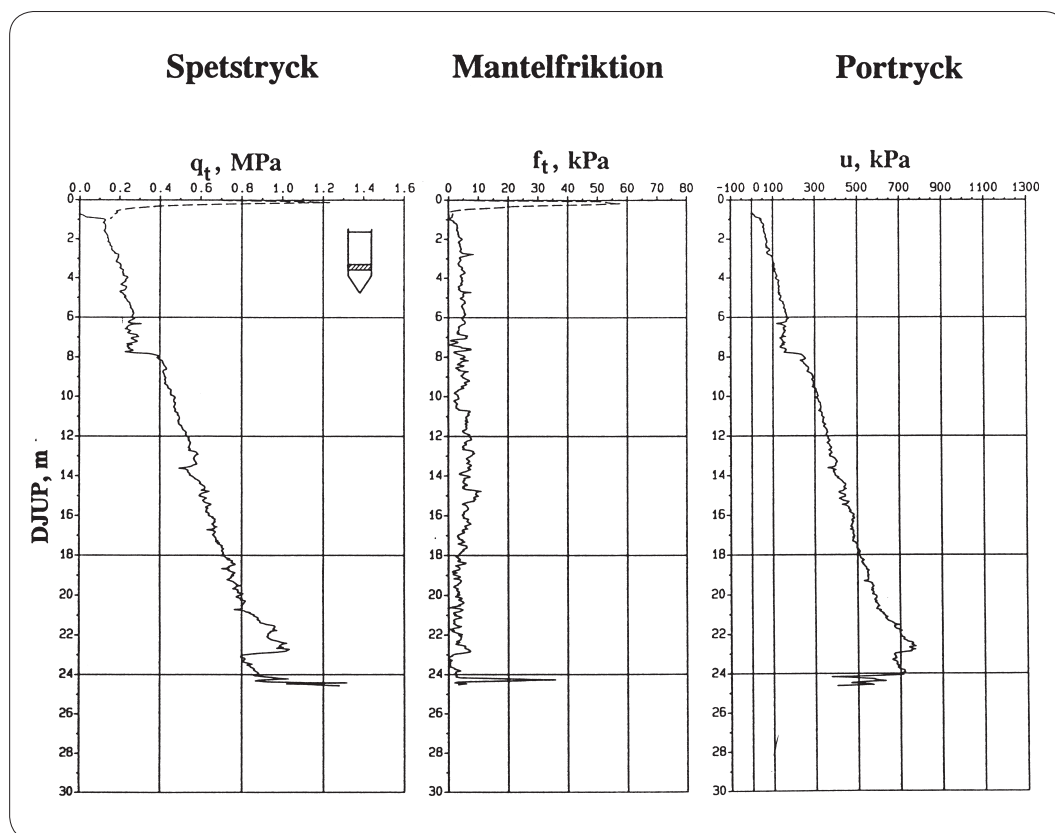
2.1 Sonderingsprincip

Vid CPT-sondering drivs en cylindrisk sond med tvärsnittsarean 1000 mm² och med spetsvinkeln 60° ned i jorden med en konstant hastighet av 20 mm/s.¹⁾ Därvid mäts neddrivningsmotståndet mot sondspetsen, mantelfriktionen mot den cylindriska ytan strax ovanför spetsen samt, vid samtidig porttrycksmätning, det porvattentryck som genereras vid spetsen under neddrivningen. Mätningen sker elektriskt och avläsningsfrekvensen skall vara så tät att nära nog kontinuerliga kurvor över mätvärdenas variation med djupet erhålls, Figur 1.

Sondens yttre geometriska utformning och en del av den terminologi som används framgår av Figur 2.

Huvudsyftet med försöket är som regel att erhålla en god bild av lagerföljd och variation i jordens egenskaper med djupet. Även om mätvärdena registreras nära nog kontinuerligt måste man ta hänsyn till vissa aspekter:

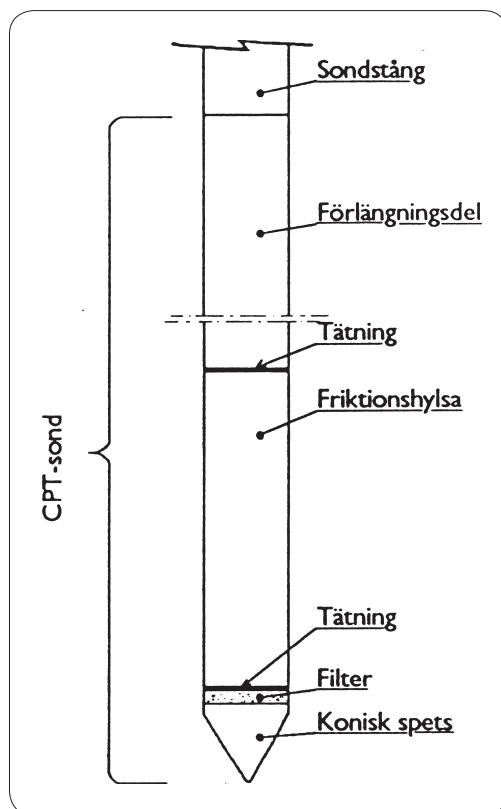
- På grund av sondens konstruktion är de olika mätvärdena inte helt oberoende av varandra och de varierar dessutom beroende på sondens geometriska utformning och eventuella slitage. Detta ställer krav på standard och specificerade toleranser. För att erhålla relevanta värden på spetsmotstånd och friktion vid sonderingar där höga vattentryck råder eller skapas, måste mätvärdena för såväl spetstryck som mantelfriktion korrigeras. Detta gäller främst vid sondering i finkornig jord och vid all sondering på stora vattendjup.



Figur 1.
Resultat från
CPT-sondering.

¹⁾ Beroende på grundförhållanden kan andra sondstorlekar bli aktuella.

Figur 2.
Geometrisk utformning av en CPT-sond.



- Spetsmotståndet påverkas av en större jordvolym runt spetsen. Storleken av denna volym varierar med jordens styvhet. Normalt antas att vid sondering i skiktad jord behöver tjockleken av ett fastare lager vara 0,4 – 0,7 m för att helt representativa värden på spetstrycket skall erhållas i lagrets mitt. För lösare lager är motsvarande lagertjocklek 0,2 – 0,4 m. Tunnare fasta respektive lösare lager registreras vid den kontinuerliga mätningen, men värdena hinner då inte stabiliseras till helt representativa storlekar för det aktuella lagret.
- Mantelfriktionen mäts som ett medelvärde över en sträcka av 134 mm.
- Porvattentrycket mäts som regel med ett 5 mm högt filter och kan betraktas som rättvisande för aktuell nivå. Möjligheten att registrera tunna skikt är här främst avhängig av avläsningsfrekvens och att portrycksmätningssystemet reagerar tillräckligt snabbt för tryckändringar i jorden.
- Eftersom mätning av spetstryck, portryck

och mantelfriktion sker på olika ställen längs sonden kommer mätvärden som är relevanta för samma nivå att registreras vid olika tidpunkter.²⁾ Spetstrycket skall korrigeras med hänsyn till det portryck som rådde samtidigt som spetstryckavläsningen gjordes och mantelfriktionen för det portryck som rådde vid denna senare mätning. Vid mycket skiktad jord ställer detta speciella krav på avläsningsrutiner och avläsningsfrekvenser. Skillnaderna måste också beaktas i samband med tillfälliga stopp i neddrivningen och tillhörande spänningsrelaxationer, t. ex. vid påskärvning av sondstänger och omtag med neddrivningsutrustningen.

- Vid tillfälliga stopp i neddrivningen kan också utjämningsförloppen för de genererade porövertrycken studeras. Detta kan vara till stor hjälp vid bedömningen av jordart och jordens dräneringsegenskaper. I mer permeabla jordar och skikt, där utjämnningen går snabbt, erhålls dessutom värden på rådande porvattentryck i jorden.

2.2 Standard och rekommendationer

I Sverige finns sedan länge en av SGF rekommenderad standard för CPT-sondering som innefattar portrycksmätning. Dessutom finns nu den internationella standard som utarbetats av CEN\TC341\WG2 och i Sverige betecknas SS EN ISO 22476-1:2012.

Den nya internationella standarden innehåller krav på att sonderingsdjupet skall korrigeras med hänsyn till sondens lutning. Noggrannhetskraven är satta efter vad som är praktiskt möjligt och väsentligt i fastare, grövre och mer svårsonderade jordar än de som är vanliga i Sverige. Det påpekas dock att för lösare jordar kan andra krav gälla och för svenska förhållanden bör också de krav som uppsatts av SGF (1993) uppfyllas.

I rekommendationerna för sonderingsutrustningen är det främst själva sonden, som utgör den cirka 1,05 m långa nederdelen där mätningarna utförs, som har standardiserade mått och toleranser. För övriga delar av utrustningen gäller funktionskrav.

²⁾ Vid kontinuerlig sondering med standardhastighet med en sond med filtret placerat i normal position ovanför spetsen betyder detta, att för en viss nivå registreras först ett värde på spetstryck, cirka 0,7 sekunder senare registreras portrycket och efter ytterligare cirka 3,4 sekunder registreras tillhörande mantelfriktion. Med normal filterplacering avses ett 5 mm högt filter placerat med underkanten 5 mm över spetsens konade del.

2.3 Definitioner

(se också Figur 3)

Spetsmotstånd q_t (alt. q_c)

Spetsmotståndet är den kraft per ytenhet som erhålls genom att dividera den totala axialkraften mot sondspetsen med spetsens tvärsnittsarea (normalt 1 000 mm²).

Beteckningen q_c avser det spetstryck som mäts med kraftgivaren vid spetsen och används främst vid CPT-sondering utan portrycksmätning. q_t är motsvarande värde korrigerat för de felkällor som förorsakas av att olika vattentryck verkar på olika delar av spetsen. Det används då portrycket vid den koniska spetsens bas är uppmätt.

På grund av sondens konstruktion påverkas spetsen av obalanserade vattentryck. Dessa kan utgöra en väsentlig felkälla i de fall vattentrycken är höga. I dessa fall registrerar inte mätetelementet för spetstryck värden som är relevanta för den totala spetskraften. I sonderingar med mätning av portrycket vid den koniska spetsens bas kan spetstrycken korrigeras så att det totala spetsmotståndet erhålls

$$q_t = \frac{\text{Total spetskraft}}{\text{Tvärsnittsarea}}$$

$$q_c = \frac{\text{Okorrigerat mätvärde på spetskraft}}{\text{Tvärsnittsarea}}$$

(I specialfallet att porvattentrycket $u \approx 0$ eller är försumbart blir $q_c \approx q_t$).

Spetsmotståndet anges i MPa eller kPa.

Lokal mantelfriktion f_t (alt. f_s)

Den lokala mantelfriktionen erhålls genom att dividera den totala friktionskraften mot friktionshylsan med hylsans mantelyta (normalt 15 000 mm²). Mätvärdena för mantelfriktionen påverkas av obalanserade vattentryck i friktionshylsans ändytor. Mätvärdet måste därför korrigeras för signifikanta vattentryck för att erhålla rättvisande värden på den totala mantelfriktionen.

$$f_t = \frac{\text{Total friktionskraft}}{\text{Mantelyta}}$$

$$f_s = \frac{\text{Okorrigerat mätvärde på friktionskraft}}{\text{Mantelyta}}$$

(Parametern f_s är endast relevant i friktionsjord vid små vattentryck).

Den lokala mantelfriktionen uttrycks i kPa eller MPa.

Friktionskvot R_{ft} (alt. R_f)

Friktionskvoten R_{ft} definieras som kvoten mellan mantelfriktion och spetsmotstånd på aktuell nivå

$$R_{ft} = \frac{f_t}{q_t}$$

$$\left(R_f = \frac{f_s}{q_c} \right)$$

Jämviktsportrycket u_0 (kPa)

motsvarar rådande porvattentryck på nivån in-situ, vilket också återinträder efter full portrycksutjämnning vid stopp i sonderingen.

Registrerat portryck u (kPa)

är det portryck som uppmäts under sonderingen, ($u = u_0 + \Delta u$). Beteckningen u_2 används för portryck uppmätta med normal filterplacering ovanför den koniska spetsen. För portryck uppmätta vid den alternativa filterplaceringen halvvägs upp på spetsens konade del används beteckningen u_1 och portryck uppmätta vid friktionshylsans överkant betecknas u_3 .

Genererat portryck Δu (kPa)

är den portrycksförändring ($u - u_0$) som uppstår på grund av sonderingen. Portrycket vid normal filterplacering $\Delta u_2 = u_2 - u_0$. Det genererade portrycket kan vara positivt eller negativt beroende på jordens egenskaper och är dessutom starkt beroende av filtrets placering på sonden. (Vid alternativ filterplacering blir $\Delta u_1 = u_1 - u_0$ respektive $\Delta u_3 = u_3 - u_0$).

Portrycksparameter B_q

Portrycksparametern B_q definieras som kvoten mellan genererat portryck vid normal filterplacering och nettospetstryck på aktuell nivå

$$B_q = \frac{\Delta u_2}{q_t - \sigma_{v0}}$$

där σ_{v0} är rådande överlagringstryck på aktuell nivå i jorden.

*”
På grund av
sondens
konstruktion
påverkas
spetsen av
obalanserade
vattentryck.*

”
CPT-sondering utförs i samtliga typer av jord där sonden kan tryckas ned.

2.4 Sonderingsklasser

CPT-sondering utförs i samtliga typer av jord där sonden kan tryckas ned, från fast lagrad grovsand med inslag av enstaka gruskorn till lösa finkorniga jordar. Sönderna har i Sverige normalt en kapacitet av 5 tons spetskraft, bland annat beroende på begränsningar i neddrivningsutrustningarna. Utomlands är både 10 tons och 20 tons sonder vanliga och ännu kraftigare sonder finns. Detta möjliggör sondering i fastare jordar men medför samtidigt begränsningar i noggrannhet, vilket begränsar användbarheten i lösa och finkorniga jordar. I områden med mycket lösa jordar kan sonder med lägre kapacitet men högre noggrannhet vara aktuella.

Ett önskemål är att ha en utrustning som är användbar inom ett så brett område som möjligt. Ett annat är att ha en så god noggrannhet och

upplösning att en detaljerad klassificering och utvärdering av egenskaper kan göras också för lösa och finkorniga jordar.

I grovkornig jord uppstår ett avsevärt slitage av främst sondspetsen och ganska vida toleranser för spetsens geometri måste tillåtas. I finkornig jord, där också porttrycken används vid utvärderingen, är måttnoggrannheten väsentlig och avvikelserna bör hållas till ett minimum.

Dessa önskemål och krav är motstridiga och oförenliga. På grund av den stora spännvidden i undersökningarna, och att olika krav ställs beroende på jordtyp och användning av resultaten. I den internationella standarden SS-EN ISO 22476-1 görs en indelning av de krav som kan ställas i användningsklasser enligt Tabell 1.

Tabell 1.
Användningsklasser

Användningsklass	Sonderings-typ	Mätt parameter	Tillåten minsta noggrannhet ^a	Största längd mellan mätningar	Användning	
					jord ^b	Tolkning/utvärdering
1	TE2	Spetstryck	35 kPa eller 5 %	20 mm	A	G, H
		Mantelfriktion	5 kPa eller 10 %			
		Portryck	10 kPa eller 2 %			
		Lutning	2°			
		Sonderingslängd	0,1 m eller 1 %			
2	TE1 TE2	Spetstryck	100 kPa eller 5 %	20 mm	A B C D	G, H* G, H G, H G, H
		Mantelfriktion	15 kPa eller 15 %			
		Portryck ^d	25 kPa eller 3%			
		Lutning	2°			
		Sonderingslängd	0,1 m eller 1 %			
3	TE1 TE2	Spetstryck	200 kPa eller 5 %	50 mm	A B C D	G G, H* G, H G, H
		Mantelfriktion	25 kPa eller 15 %			
		Portryck ^d	50 kPa eller 5 %			
		Lutning	5°			
		Sonderingslängd	0,2 m eller 2 %			
4	TE1	Spetstryck	500 kPa eller 5 %	50 mm	A B C D	G* G* G* G*
		Mantelfriktion	50 kPa eller 20 %			
		Sonderingslängd	0,2 m eller 2 %			

Anmärkning: För extremt lösa jordar kan ännu högre krav för noggrannheten behövas

^a Den tillåtna minsta noggrannheten för den mätta parametern är det högsta värdet av de två angivna.

Den relativa noggrannheten avser det mätta värdet och inte mätområdet.

^b Enligt ISO SS-EN 14688-2:

A homogent lagrade jordar med mycket lösa till fasta leror och silt (typiskt $q_c < 3$ MPa)

B växellagrade jordar med lösa till fasta leror (typiskt $q_c \leq 3$ MPa) och medel fast lagrad sand (typiskt $5 \text{ MPa} \leq q_c < 10 \text{ MPa}$)

C växellagrade jordar med fasta leror (typiskt $1,5 \text{ MPa} \leq q_c < 3 \text{ MPa}$) och mycket fast lagrad sand (typiskt $q_c > 20 \text{ MPa}$)

D mycket fasta till hårda leror (typiskt $q_c \geq 3 \text{ MPa}$) och mycket fast lagrad grovjord ($q_c > 20 \text{ MPa}$)

^c G bestämning av jordprofil och identifiering av material med låg tillhörande osäkerhetsnivå

G* antydande bestämning av jordprofil identifiering av material med hög tillhörande osäkerhetsnivå

H utvärdering i form av konstruktionsparametrar med låg tillhörande osäkerhetsnivå

H* antydande utvärdering i form av konstruktionsparametrar med hög tillhörande osäkerhetsnivå

^d Portryck kan endast mätas om TE2 används

Som tidigare nämnts och som påpekas i standarden kan andra krav gälla i mycket lösa jordar. Detsamma gäller mycket sensitiva jordar av den typ som är vanlig i Sverige. CPT-sondering används i allt högre grad för bestämning av egenskaper i sådana jordar och för en fullgod bestämning måste högre krav ställas. Rekommendationer för sådana krav gavs av SGF 1993 med ledning av vad som erfarenhetsmässigt visat sig vara praktiskt möjligt att uppnå*.

I SGF:s rekommenderade standard indelas sonderingarna i olika klasser med olika krav på noggrannhet. I rekommendationen gjordes indelningen i klasserna 1-3, vilket här har bytts till bokstavs-beteckningar för att undvika sammanblandning med användningsklasserna i Tabell 1.

Som underlag för klassindelningen beaktas följande faktorer :

- SGF:s rekommenderade standard för CPT-sondering avser endast utrustningar med elektrisk mätning och registrering av spetstryck och friktion samt i de flesta sonderingsklasser också portryck.
- I friktionsjord ger portrycksmätning endast informationen att inga porövertryck uppstår. Undantaget är sonderingar på stort vattendjup där spetstryck och mantelfriktion behöver korrigeras för de stora vattentrycken. I finkornig jord måste portrycken alltid mätas och spetstryck och mantelfriktion korrigeras. Vid otillräcklig måtnoggrannhet blir portrycksmätningen så osäker i förhållande till jordens egenskaper att den inte kan användas till annat än korrektion och eventuellt uppskattning av portryck in situ. För närmare klassificering av kohesionsjord och bedömning av dess egenskaper måste därför snäva måttoleranser användas.
- Mätnoggrannheten begränsas bland annat av upplösningen i mätutrustningen (mät-noggrannhet hos volt- och amperemätare och antalet digitala enheter vid överföring och lagring av data). Upplösningen är begränsad till det maximala mätområdet dividerat med antalet digitala enheter. Om antalet digitala enheter t.ex. är 4 000 för en 5-tons spets blir upplösningen $(5\,000 \cdot 98,1)/(10 \cdot 4\,000) \approx 12$ kPa. Bättre mät-

noggrannhet än ± 1 à 2 ggr upplösningen kan inte uppnås.

- Portrycksmätare måste ha mycket liten egendeformation, vara temperaturstabila samt ha en mycket god upplösning. Detta gäller även för den grövsta sonderingsklassen enligt SGF (se nedan), där man skall kunna mäta med en noggrannhet av ± 10 kPa med givare som ofta har mätområden i storleken $40\text{ Bar} \approx 4000\text{ kPa}$. Detta innebär en mät-noggrannhet av cirka $\pm 0,25\%$ inklusive alla felkällor. Högklassiga givare av denna typ som kan monteras in i sondererna krävs och finns på marknaden.
- Sondererna kan göras relativt temperaturstabila med begränsade kostnadstillägg. Detta bör alltid krävas. De flesta sonderingar utförs utan temperaturkontroll och enda sättet att försäkra sig om att noggrannhetskraven uppfylls är att göra temperaturstabiliteten så god att all eventuell temperaturinverkan blir försumbar.

Klassindelning enligt SGF (1993):

Klass C. Beteckning: CPTC (tidigare CPT1)

- Användningsområde: All typ av jord, dock främst friktionsjord. I finkornig jord endast i de fall som jordens fasthet eller lagerföljd förhindrar användning av noggrannare sonderingsklass.
- Mätning av spetstryck, friktion och lutning samt eventuellt portryck.
- Relativt vida måttoleranser (se kap. 3.2)
- Mät-noggrannhet enligt rekommendation (se kap. 3.2) med en generellt tillåten onoggrannhet i spetstryck av 100 kPa, i mantelfriktion av 10 kPa, i lutning av 2 grader och i portryck av 10 kPa.
- Möjlig utvärdering: Lagerföljd och egenskaper i friktionsjord och mellanjord. Lagerföljd och egenskaper i fast kohesionsjord kan utvärderas under förutsättning att portrycksmätning görs under sonderingen. Utvärdering av lagerföljder och egenskaper i lös och medelfast kohesionsjord bör inte göras.
- Utrustning: 5 – 10 tons sonder
- Begränsningar: Grundvattenytan måste bestämmas separat. Vid stora vattendjup bör

*) Det är beställaren som skall ange vilken noggrannhet som skall krävas. Eftersom beteckningarna för användningsklasser i den internationella standarden är snarlika de som använts i mer än 20 år för noggrannhetsklasser enligt SGF:s rekommendationer från 1993 finns risk för missförstånd och det måste klart framgå vad som avses.

sonderingen ske med portrycksmätning. Om möjligt bör en noggrannare sonderingsklass användas i mellanjord och kohesionsjord.

Klass B. Beteckning: CPTB (tidigare CPT2)

- Användningsområde: All typ av jord. I fast lagrad sand är dock nedträngningsförmågan begränsad. I lös och medelfast finkornig jord bör sonderingen utföras enligt klass CPTA om lagerföljden så medger.
- Mätning av spetstryck, friktion, lutning och portryck.
- Snäva måttoleranser avpassade för sondering i kohesionsjord. (se kap. 3.2)
- Mätnoggrannhet enligt rekommendation (se kap 3.2) med en generellt tillåten onoggrannhet av 40 kPa i spetstryck, 4 kPa i mantelfriktion, 2 grader i lutning och 5 kPa i portryck.
- Möjlig utvärdering: Lagerföljd och egenskaper i all typ av jord. Noggrannheten är dock begränsad i lös och medelfast finkornig jord.
- Normal utrustning: 5-tons sonder med portrycksmätning.
- Begränsning: Begränsad nedträngningsförmåga i fast lagrad friktionsjord. Otillräcklig noggrannhet för en fullgod utvärdering av egenskaper i lös och medelfast kohesionsjord.

Klass A. Beteckning: CPTA (tidigare CPT3)

- Användningsområde: All typ av jord. I främst sand, men också annan fast jord, är dock nedträngningsförmågan begränsad. I de fall lastbegränsningar och noggrannheter inte kan uppfyllas på grund av jordlagerföljden sänks sonderingsklassen.
- Mätning av spetstryck, friktion, lutning och portryck.
- Snäva måttoleranser avpassade för sondering i kohesionsjord. (se kap. 3.2)
- Mätnoggrannhet enligt rekommendation (se kap. 3.2) med en generellt tillåten onoggrannhet av 20 kPa i spetstryck, 2 kPa i mantelfriktion, 2 grader i lutning och 1 kPa i portryck.
- Möjlig utvärdering: Lagerföljd och egenskaper i all typ av jord, dock främst lös och medelfast finkornig jord.
- Normal utrustning: Specialkalibrerade 5-tons sonder med portrycksmätning eller motsvarande sonder med lägre mätområdet.
- Begränsning: Starkt begränsad nedträngningsförmåga i fast jord och vid inslag av grövre partiklar.

Användningsområdena för de olika sonderingsklasserna framgår också av Tabell 2.

Tabell 2.
Användningsområde för olika sonderingsklasser.

Klass	Jordtyp					
	Friktionsjord		Mellanjord		Kohesionsjord	
	Lagerföljd	Egenskaper	Lagerföljd	Egenskaper	Lagerföljd	Egenskaper
CPTC ^A	● ¹	● ¹	○	○	–	–
CPTC ^B	●	●	▲	▲	○ ²	○ ²
CPTB	(●) ³	(●) ³	●	●•	▲	▲
CPTA	((●)) ⁴	((●)) ⁴	(●) ⁵	(●) ⁵	●	●

Anmärkning:

- 1) Grundvattenyta bestäms separat. Vid sondering på stora vattendjup bör sondering med portrycksmätning användas.
- 2) Endast i fast kohesionsjord
- 3) Något begränsad användning i friktionsjord
- 4) Starkt begränsad användning i friktionsjord
- 5) Begränsad användning i fast mellanjord

^{A)} utan mätning av portryck vid sonderingen

^{B)} med mätning av portryck vid sonderingen

Värdering:

- God
- ▲ Relativt god
- Grov
- Går ej

3. CPT-utrustning

3.1 Mätprincip och detaljerad kalibrering

3.1.1 Mätprincip

Vid CPT-sondering mäts spetstryck, mantelfriktion och, i de flesta fall, portryck. Det axialtryck som verkar mot spetsen överförs till sondens övre delar via en mät kropp med trådtöjningsgivare. Givarna skall vara så applicerade att en eventuell excentricitet i lasten inte påverkar resultaten. De skall också vara kopplade till kompensationsselement så att eventuella temperaturändringar inte heller påverkar resultaten. Möjligheten för det senare är relativt goda, men vissa begränsningar finns. Speciellt temperaturgradienter som uppstår under temperaturändringar är svåra att helt komma till rätta med.

På motsvarande sätt överförs kraften från friktionshylsan via en mät kropp med kompensera de trådtöjningsgivare. Av tillverkningstekniska skäl har många sonder konstruerats med två närmast identiska mät kroppar, den ena placerad över den andra. Den undre mät kroppen har mätt spetskraft och den övre summan av spetskraft och mantelfriktion. Mätvärdet för mantelfriktion har då erhållits som skillnaden mellan signalerna från de två mät kropparna, s.k. ”subtraktionssonder”. Detta utförande medför dock stor risk för interferens mellan mätvärdena med påföljande problem med kalibrering, tolkning och mät noggrannhet. Nyare konstruktioner är därför oftast av typen ”kompressionssond”, där mantelfriktionen mäts separat i en mät kropp som är så placerad att den skall vara opåverkad av spetstrycket.

Portrycket mäts med tryckgivare. För att erhålla erforderlig mät noggrannhet måste tryckgivarna vara av högsta kvalitet och dessutom ha en minimal egendeformation vid mätningen. Givare av denna typ finns på marknaden och kan monteras in i sondaerna. Detta krav var man tidigare ofta tvungen att specificera vid beställning av utrustningen, men efter införandet av standarder med specificerade krav kan detta normalt förväntas i de kommersiella utrustningar som finns på marknaden.

Konstruktionen av en CPT-sond visas schematiskt i Figur 3.

3.1.2 Korrektion för porvattentryck

Som framgår av figuren påverkas både mätning av spetstryck och mantelfriktion av obalanserade porvattentryck i spetsens basyta och friktionshylsans ändtor. För att erhålla det totala spetstrycket och den totala mantelfriktionen måste mätvärdena q_c och f_s från respektive mät kropp således korrigeras för de vattentryck som verkar mot ändtorerna.

Vid normal filterplacering mäts porvattentrycket i spalten mellan spetsen och friktionshylsan och det obalanserade trycket mot spetsens basyta och friktionshylsans undre ändtor är då känt. Porvattentrycket vid friktionshylsans övre ändtor mäts normalt inte, men kan med relativt god noggrannhet empiriskt beräknas ur

$$u_3 \approx 0,7 \cdot (u_2 - u_0) + u_0 \approx 0,7 \cdot \Delta u_2 + u_0$$

Med kännedom om storlekarna av sondens olika portryckspåverkade ändtor kan således mätvärdena korrigeras för portryckets inverkan. Ändtorernas storlek brukar uttryckas som areafaktorerna a och b .

Areafaktorn a används för korrektion av mätvärdet för spetstryck

$$a = A_N / A_T \approx (A_T - A_L) / A_T$$

och

$$q_t \approx q_c + u_2 \cdot (1 - a)$$

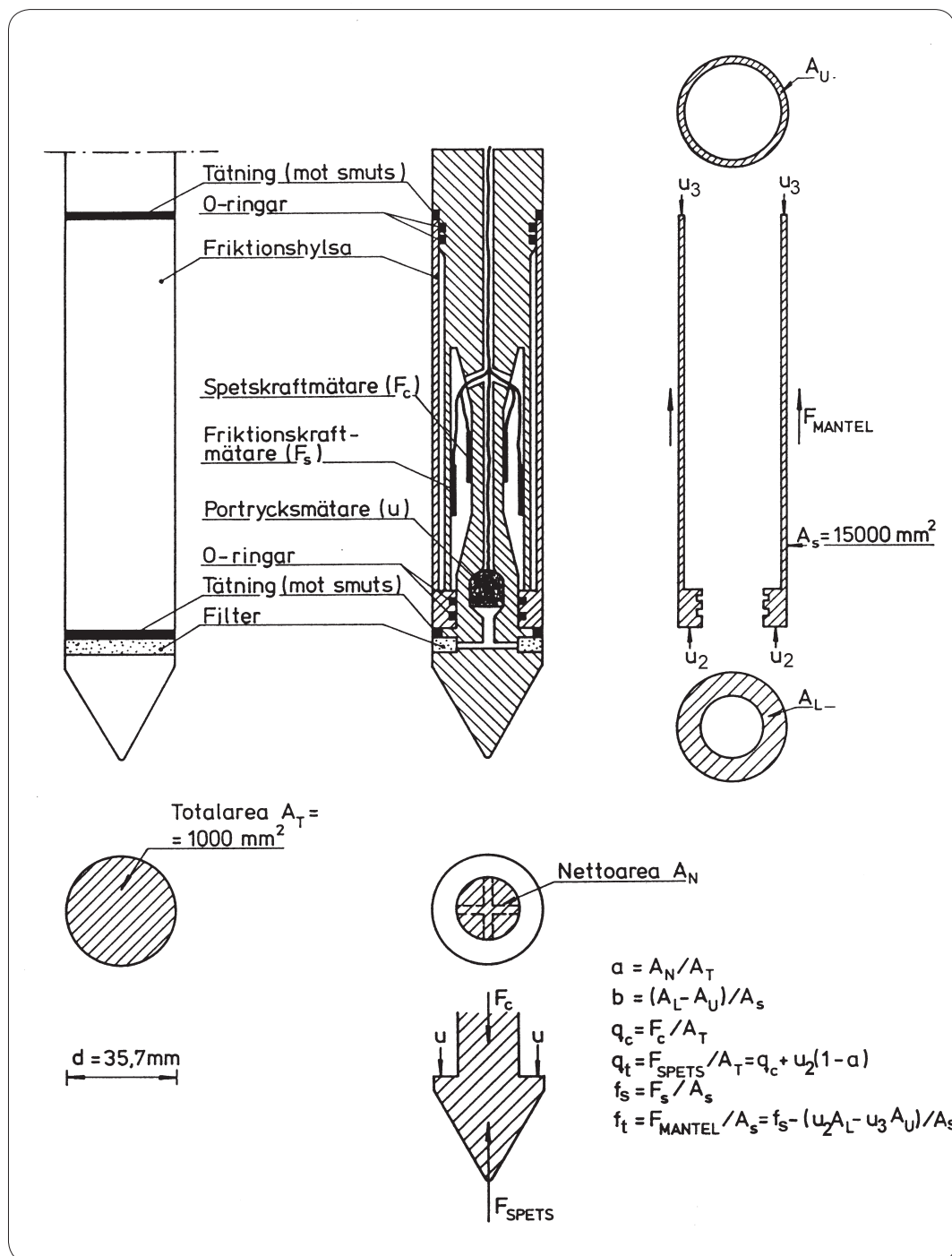
Areafaktorn b används för korrektion av mätvärdet för mantelfriktion

$$b = (A_L - A_U) / A_S$$

Med den empiriska relationen för portrycket i friktionshylsans övre ändtor för en standardkon med spetsarean 1 000 mm² och hylsarean 15 000 mm² blir då

$$f_t \approx f_s - \left[u_2 b + 0,3 \Delta u_2 \left(\frac{1-a}{15} - b \right) \right]$$

”
Vid CPT-sondering mäts spetstryck, mantelfriktion och, i de flesta fall, portryck.



3.13 Detaljerad kalibrering

Det finns också andra felkällor som t. ex. inre friktion i o-ringstättningarna. Areafaktorerna kan inte heller mätas direkt geometriskt på grund av osäkerheter i hur olika areor påverkas av trycken och hur krafterna överförs. Även om det är tänkt att mätkropparna för spetstryck och mantelfriktion endast skall påverkas av respektive krafter måste detta också kontrolleras. Varje ny sond måste därför genomgå en detaljerad kalibrering av areafaktorer, inverkan av inre friktion och eventuell så kallad "cross-talk"- eller interferenseffekter. Dessa värden är sonderspecifika, men de kan

ändras om spetsar med annan geometrisk utformning används. De måste därför kalibreras för varje typ av spets som skall användas och måste omkalibreras vid minsta förändring av sondens konstruktion.

De flesta sonder är konstruerade för att kunna användas i lös till fast jord, från organisk jord och lera till grovsand. Maximal spetslast är normalt 5 till 10 ton (50 till 100 kN) men sonder med såväl högre som lägre maxlast förekommer. Hög stålqualität ger, tillsammans med matchande trådtöjningsgivare och modern elektronik, som regel mycket goda

egenskaper ifråga om stabilitet, lineäritet och repeterbarhet då mätnoggrannheten uttrycks i procent av full skala. När 5–10 tons sonder används i lös lera, utnyttjas emellertid oftast endast omkring 1 % av den totala kapaciteten, vilket betyder att den mycket goda noggrannhet som anges vid kalibrering för hela mätområdet blir 100 ggr sämre med avseende på det mätområde som utnyttjas. Många sonder har dock en mycket god mätnoggrannhet också inom mycket låga mätområden och 5-tonsonder kan ofta mycket väl användas i mycket lös jord, förutsatt att de är specialkalibrerade för detta lägre mätområde.

Kalibrering av spetstryck och mantelfriktion utförs genom att spetsen respektive friktionshysan belastas axiellt och stegvis. Vid belastningen av friktionshysan ersätts spetsen med en adapter som är så konstruerad, att axialkrafterna överförs till friktionshysans undre ändyta. Kalibreringarna utförs separat, men samtidigt kontrolleras de båda andra mätgivarna så att de inte påverkas av den pålagda lasten.³⁾ Kalibreringen utförs för olika mätområden och speciellt med hänsyn till de mätområden som kan bli aktuella. Vid kalibrering av en ny sond utsätts de olika mätgivarna först för 15 – 20 lastcykler upp till fullt mätområde innan själva kalibreringen utförs.

Kalibrering av areafaktorer måste göras i en speciell kalibreringskammare. Denna kammare är så utformad, att sondens nederdel kan föras in i kammaren och låsas och tätas ovanför friktionshysan, Figur 4.

Sonden kan sedan utsättas för ett allsidigt tryck i kammaren. Detta sker stegvis och samtidigt avläses spetstryck-, mantelfriktion- och porttrycksgivarna i sonden. *På detta vis erhålls en kalibreringskurva för porttrycksgivaren, areafaktorerna a och b samt värden på den inre friktionen i sonden*, Figur 5. Med en speciell registreringsutrustning kan också porttrycksgivarens responstid för tryckstötter kontrolleras.

Den totala korrektionen av mätvärden för spetstryck och mantelfriktion efter kalibrering blir

$$q_t = q_c - o_c - c_1 \cdot f_s + u_2 \cdot (1-a)$$

och

$$f_t \approx f_s + o_f - c_2 q_c - \left[u_2 b + 0,3 \Delta u_2 \left(\frac{1-a}{15} - b \right) \right]$$

där o_c och o_f = inre friktion (främst i o-rings-tätningar)

c_1 och c_2 = konstanter för "crosstalk" mellan givarna för spetstryck och mantelfriktion

c_1 och c_2 bör vara mycket små och kunna försummas. o_c och o_f är normalt små, men kan påverka resultaten i främst lösa och sensitiva leror där spetstrycket är mycket lågt och mantelfriktionen är nära noll.

Vid korrektion för den inre friktionen måste också beaktas om krafterna på friktionshysan är så stora att den inre friktionen är mobiliserad. I annat fall finns risk för överkorrektion och negativa värden på friktionen. I nya sonder strävar man efter att göra faktorn a stor och faktorn b liten för att minska inverkan av korrektionerna för porttryck.

Senare **kalibreringskontroller av porttrycksgivaren** kan utföras genom att en adapter till en tryckslang skruvas in i sondspetsens anslutningsgånga och fordrar således ingen kalibreringskammare.

Kalibreringarna utförs med den elektronik och registreringsutrustning som senare ska användas i fält, så att hela systemet och dess felkällor kontrolleras. Som referenssystem används precisionsgivare som kontrolleras regelbundet.

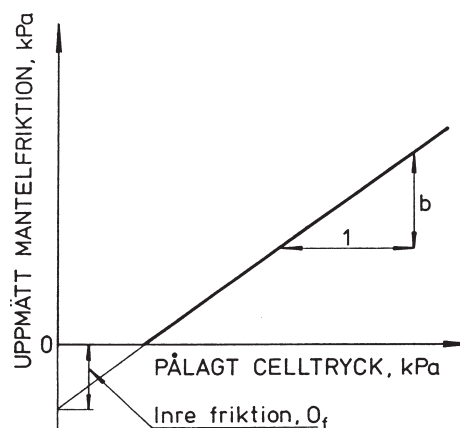
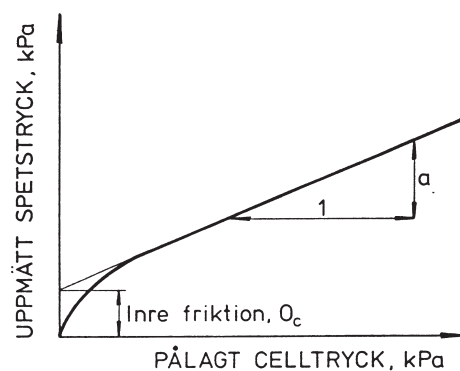
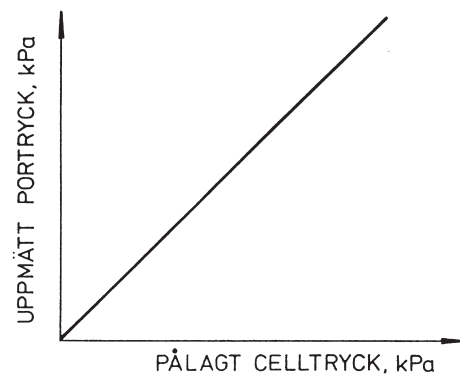
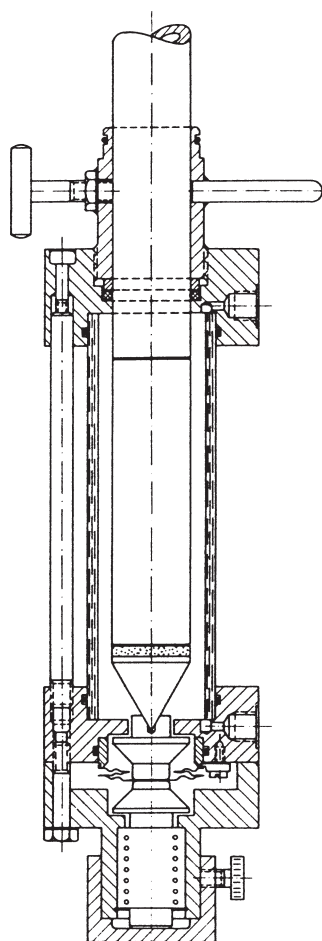
Sonderna skall också kalibreras för **temperatur effekter**. Detta sker genom att sänka ned dem i vattenbad med olika temperaturer. De olika signalerna avläses sedan mot tiden tills dess att värdena stabiliserats. Ur resultaten utvärderas nollpunktsförskjutningen per °C och dessutom erhålls ett mått på hur lång tid som behövs för att stabilisera sonden nedsänkt i vatten. Det senare är värdefullt att veta när det blir aktuellt att anpassa sonden till marktemperaturen i fält. Erfarenhetsmässigt ligger detta värde runt 10 minuter, men det kan variera mellan olika sonder.

I den mån sonden har fler mätvärdesgivare, som t.ex. temperatur, lutning eller seismiska givare, skall dessa också kalibreras.

Mätning av sondens lutning och korrektion av sonderingsdjupet för denna är standard enligt SS-EN ISO 22476-1.

”
Kalibreringarna utförs med den elektronik och registreringsutrustning som senare ska användas i fält.

³⁾ I annat fall måste konstanterna för "cross-talk" mellan givarna bestämmas.



Figur 5 (till höger)
Resultat från kalibrering
i kalibreringskammare.

Figur 4.
Kalibreringskammare typ
SGI för
CPT-sonder.

Kalibreringskammare.

3.2 Måttspecifikationer och krav på utrustningen

Nedan anges de måttspecifikationer och krav på utrustningen som enligt såväl SS-EN ISO 22476-1 som SGF:s rekommendationer gäller för utrustning för CPT-sondering. Dessutom anges förklaringar och motiv för kraven och konsekvenser av avvikelser från standarden.

3.21 Sondens geometri

Sondens yttre delar består av en konisk spets, filter, friktionshylsa och förlängningsdel. Frik-

tionshylsan och förlängningsdelen skall helst ha en sammanlagd längd av minst 1 000 mm, Figur 6. Utefter denna längd bör diametern vara konstant (inom angivna toleranser). I de fall en lokal utvidgning av diametern för reduktion av friktionen mot stängerna används, skall denna vara placerad minst 0,4 m ovanför skarven mellan den koniska spetsen och friktionshylsan. Vid sonderingar enligt SGF:s sonderingsklasser CPTA och B skall avståndet dock vara minst 1 m.

Konisk spets

Spetsen består av en konisk del och en cylindrisk förlängning. Spetsvinkeln skall vara 60° . Den cylindriska delen, (inklusive filter), skall vara 10 mm (minus förslitningstoleransen). Utformning, mått och toleranser framgår av Figur 7.

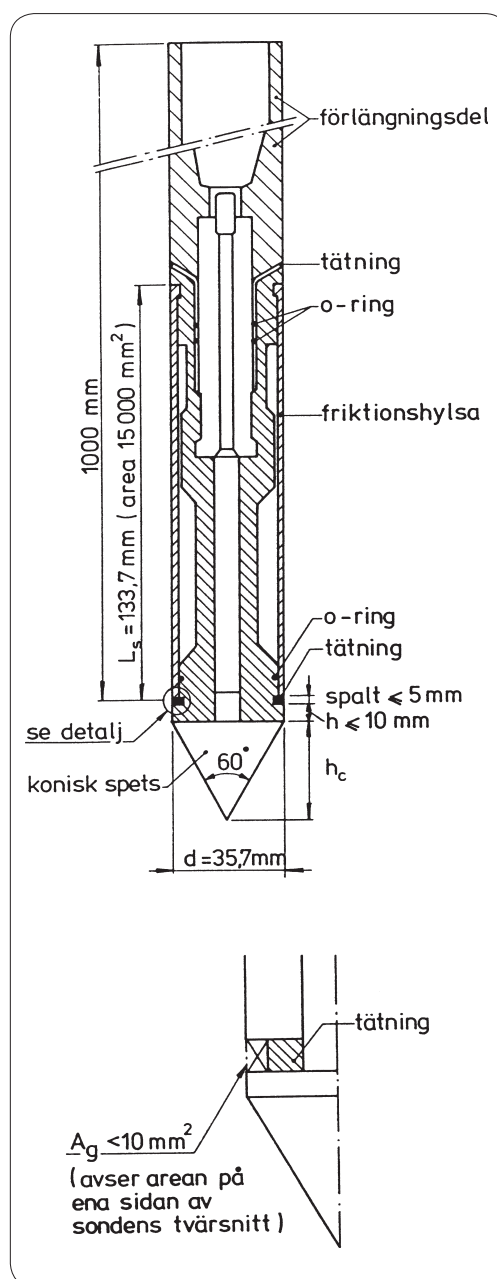
CPT-sonder med porttrycksmätning skall ha en cylindrisk förlängning av 5 µm och ett filter placerat direkt ovanför denna. Det har visat sig att de genererade porttrycken är mycket känsliga för filtrets placering och därför bör endast spetsar och filter med dessa mått användas.

Spetsens tvärsnittsarea skall vara 1 000 mm² vid den cylindriska förlängningen, vilket motsvarar en diameter av 35,7 mm.⁴⁾

Spetsen tillverkas med en ytråhet < 5 µm, vilket skall motsvara vad som skapas av jordens friktion mot spetsen.

Vid spetstrycksondering i sand uppstår en kraftig förslitning av spetsen och ganska grova toleranser måste tillåtas. I sonderingsklass CPTC, där porttrycken inte mäts eller endast används för korrigering av uppmätt spetstryck och friktion, tillåts en förslitning av spetsen så att höjden av den koniska delen får minska med upp till 7,2 mm och förlängningsdelen med 3 mm. Förslitningen medför dessutom oftast en urgröpning av den koniska ytan, vilket också accepteras. Spetsen skall dock alltid vara symmetrisk och påtagligt snedförslitna spetsar skall kasseras. Motsvarande krav gäller enligt SS-EN ISO 22476-1.

Vid noggrannare CPT-sondering i finkornig jord, där porttrycket alltid skall mätas och dessutom används för klassificering av jorden och utvärdering av dess egenskaper, kan dessa

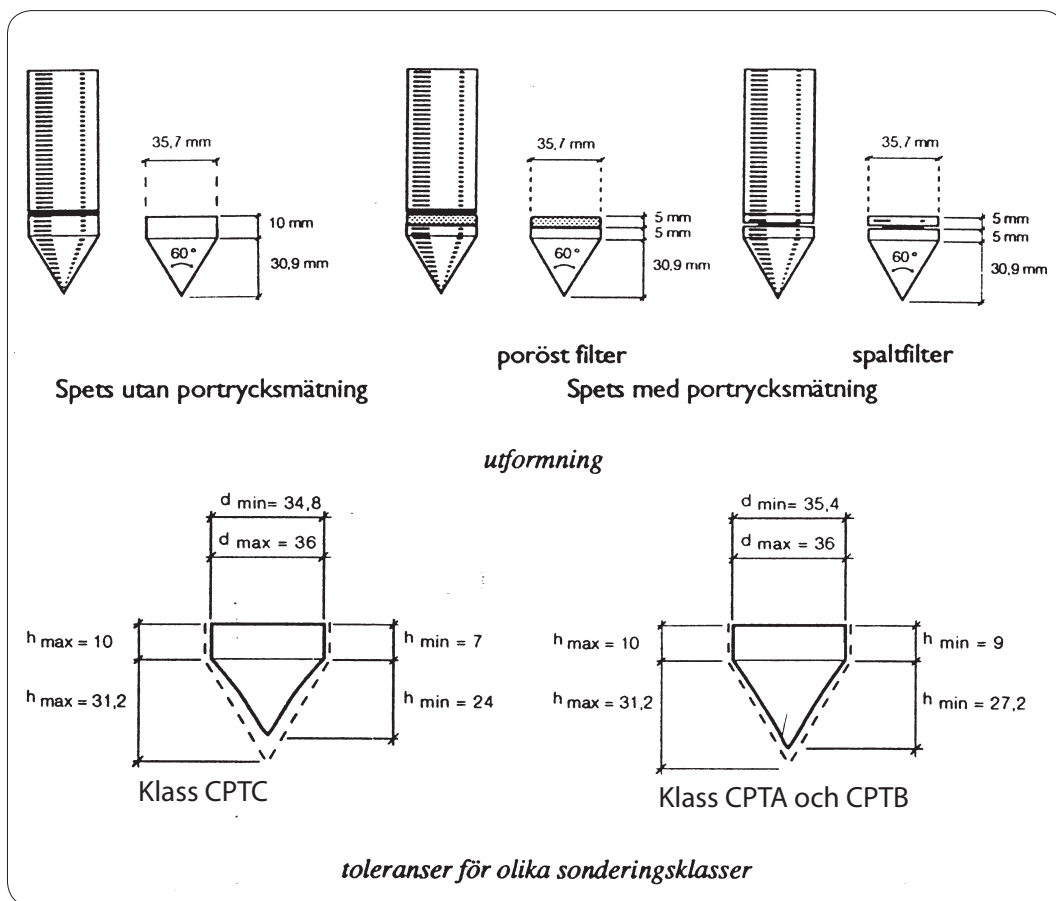


”
Spetsen består av en konisk del och en cylindrisk förlängning.

Figur 6. Måttspecifikationer för en CPT-sond enligt SGF:s rekommendationer och SS-EN ISO-standard. (Endast sonderingsklass CPTC utan porttrycksmätning. För sondering med porttrycksmätning får måttet A_g vara max 0,5 mm²).

grova toleranser inte tillämpas. Dels går de inte att passa ihop med övriga krav på måttoleranser och relationer till andra delar av sonden, dels är de genererade porttrycken känsliga för spetsens geometri. Vid CPT-sondering i finkornig jord bör därför endast mycket måttliga förslitningar accepteras. En viss rundning av övergången mellan de koniska och cylindriska delarna är ofrånkomlig och ett rimligt krav är att den cylindriska delen får vara maximalt 1 mm lägre än för en ny spets. Vid stopp mot berg eller sten stukas alltid spetsen något, varför man måste tillåta en viss rundning om inte en ny spets skall behöva användas.

⁴⁾ Beroende på grundförhållanden kan koner med diametrar mellan 25 mm (area 500 mm²) och 50 mm (area 2000 mm²) användas utan att någon korrektion för sondstorleken behöver appliceras. Övriga geometriska mått och toleranser justeras då proportionellt mot diametern.



Figur 7.
Utformning, mått
och toleranser för son-
dens koniska spets.

”
*Filtrets diam-
eter skall vara
lika med spets-
sens diameter.*

das för varje sondering. En maximal slitning – stukning av yttersta spetsen av 4 mm tillåts därför, under förutsättning att den är symmetrisk, men ingen påtaglig formförändring därutöver.

Motsvarande gäller för spetsar med alternativ icke standardiserad filterplacering på spetsens konade del. Dessa bör utformas så att den cylindriska delen vid ny spets är 10 mm hög. Filtren bör vid denna typ av spets placeras på halva höjden av den koniska delen.

Helst borde sonderarna ge möjlighet att mäta porttrycken både på spetsens konade del och vid spetsens basyta ovanför dess cylindriska förlängning. I avvaktan på att sådana sonder blir tillgängliga på marknaden, bör standard-spetsarna vara utbytbara mot spetsar där filtret placerats halvvägs upp på den konade delen. Parallella eller alternativa sonderingar kan då vid behov utföras med respektive filterplacering.

Diametern för spetsens cylindriska del skall vara inom $35,7 \text{ mm} + 0,3 \text{ mm} / - 0,9 \text{ mm}$ vid all CPT-sondering och inom $35,7 \pm 0,3 \text{ mm}$ vid sondering med porttrycksmätning inom sonderingsklasserna CPTA och CPTB.

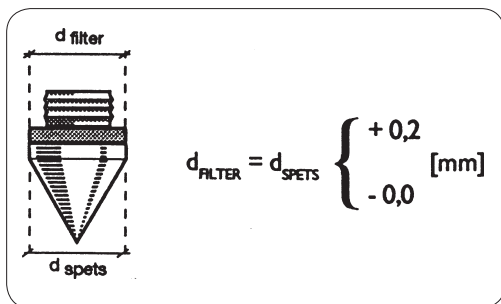
Filter

Filtrets diameter skall vara lika med spetsens diameter. Den kan vara aningen större men absolut inte mindre. Tillåtna toleranser framgår av Figur 8.

Filtret skall uppfylla detta krav också efter sonderingen. Det bör normalt endast användas för engångsbruk och bytas ut efter varje sondering.

Filtrets höjd är normalt 5 mm. Filter med lägre höjd kan användas förutsatt att en distansring då används så att kraven på spetsens geometri uppfylls.

Filter skall vara finporiga och inkompressibla samt ha en god nötningsbeständighet. Normalt rekommenderas filter av sintrat rostfritt stål eller brons med en porstorlek av $2 - 20 \mu\text{m}$. Också keramiska filter kan användas, men dessa är skörare och risken för skador är större, speciellt vid filterplaceringar på spetsens konade del. Filter av porös plast används också ibland. Dessa filter kan endast användas för standardplaceringen vid spetsens basyta. För att klara måttoleranserna bör de dessutom vara gjutna och inte svarvade.



Det finns också sonder där filtren ersatts av en tunn spalt fylld med ett trögflytande medium. Jämförande resultat visar att en viss begränsning i mätnoggrannheten kan uppstå beroende på vad som används för att fylla spalt och tryckkanaler i sonden och det kan vara svårt att uppnå uppställda noggrannhetskrav. Detta gäller främst i de fall de uppmätta portrycken används för en detaljerad utvärdering av jordens egenskaper eller för uppmätning av utjämnade in-situ portryck. För korrektion av spetstryck och mantelfriktion är metoden dock normalt helt tillfyllest. När denna mätmetod används skall spalten vara placerad inom intervallet för normal filterplacering, dvs inom 5 till 10 mm över spetsens koniska del.

Friktionshylsa

Friktionshylsan skall ha en mantelyta av $15\,000\text{ mm}^2 \pm 2\%$, vilket ger en längd av cirka 133,7 mm. Mått och toleranser för friktionshylsan framgår av Figur 9. Den skall vara placerad direkt ovanför spetsen och filtret. Maximalt avstånd på grund av spalter och tätningar är 5 mm.

Friktionshylsans diameter skall vara lika med eller aningen större än diametern för underliggande delar. Vid normal filterplacering mellan spets och friktionshylsa kan det genererade portrycket påverkas av friktionshylsans diameter och i detta fall skall följande kriterier gälla för CPT klass A och B enligt SGF (1993):

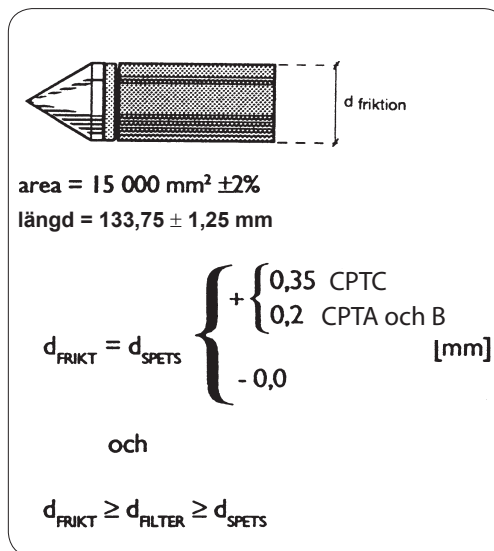
$$d_{\text{FRIKTIONSHYLSA}} \geq d_{\text{FILTER}} \geq d_{\text{SPETS}}$$

$$d_{\text{SPETS}} \leq d_{\text{FRIKTIONSHYLSA} \leq d_{\text{SPETS}} + 0,2\text{ mm}$$

I de fall portrycken mäts på spetsens konade del är de opåverkade av friktionshylsan, varvid samma krav för CPT-sondering utan portrycksmätning kan användas

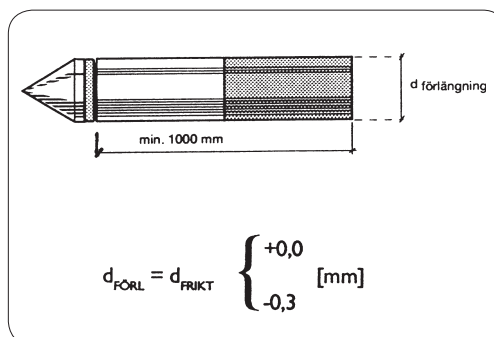
$$d_{\text{SPETS}} \leq d_{\text{FRIKTIONSHYLSA} \leq d_{\text{SPETS}} + 0,35\text{ mm}$$

Detta krav gäller genomgående i SS-EN ISO22476-1.



Figur 8 (till vänster). Toleranser för filtrets diameter.

Figur 9. Mått och toleranser för friktionshylsa.



Figur 10. Mått och toleranser för förlängningsdel.

Ytråheten r längs hylsan skall vara inom gränserna $0,4 \pm 0,25\text{ }\mu\text{m}$.

Förlängningsdel

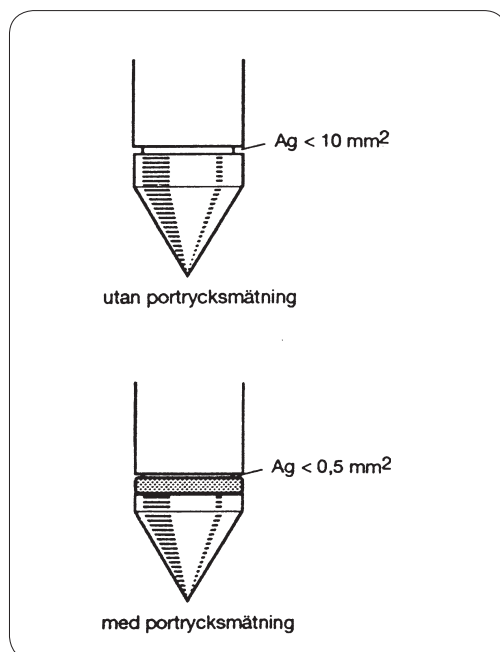
Förlängningsdelen skall ha samma diameter som friktionshylsan med en tolerans av $+0\text{ mm}/-0,3\text{ mm}$ och bör tillsammans med denna ha en längd av minst 1 000 mm, Figur 10.

Spalter och tätningar

Spalter mellan sondens olika delar får inte vara högre än 5 mm. Tätningar i spalter skall vara så utformade att de hindrar jordpartiklar att tränga in. Tätningarna måste vara så kompressibla i förhållande till mätelemtet, att inga signifikanta krafter kan överföras och medföra mätfel. Den del av en spalts tvärsnittsarea som inte upptas av tätningen får vid sondering utan portrycksmätning inte överstiga 10 mm^2 . Vid sondering med portrycksmätning och med normal placering av filtret får motsvarande area inte överstiga $0,5\text{ mm}^2$, Figur 6 och 11. Det senare kravet beror på att eventuella gap i dessa spalter medför portrycksförändringar som påverkar såväl mätta portryck som korrekationer för portryckseffekter.

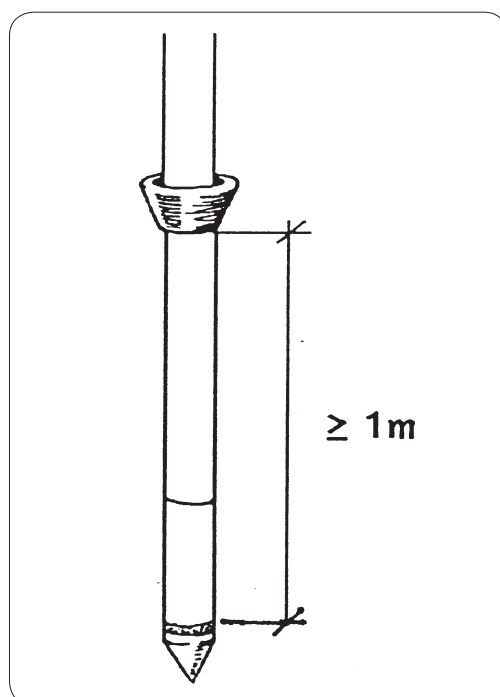
”
Spalter mellan
sondens olika
delar får inte
vara högre än
5 mm.

Figur 11.
Mått och
toleranser
för spalter.



Hylsa för reduktion av stångfriktion

Det är vanligt att en hylsa, som medför en lokal förtjockning av sondstängens, appliceras längst ned på den första sondstängens eller på övergångsstycket mellan CPT-sonden och sondstängerna. Avsikten med denna påsvetsade hylsa är att reducera friktionen mot de efterföljande sondstängerna och därmed det totala neddrivningsmotståndet. En sådan hylsa får i sonderingsklasserna CPTA och B endast appliceras ovanför den 1 000 mm långa sträckan av friktionshylsa + förlängningsdel med standardiserat tvärsnitt, Figur 12. För grövre sonderingsklasser och enligt SS-EN ISO-standard är kravet dock att avståndet skall vara minst 0,4 m.



”
Uppehåll i sonderingen görs endast för skarvning av sondstänger och omtagning av grepp.

Figur 12.
Placering av hylsa för
reduktion av stångfriktion.

För att ytterligare reducera stångfriktionen kan en bentonitsuspension pumpas ned genom sondstängerna och ut vid reduceringshylsans överkant. Detta kräver dock en kombination av ihåliga sondstänger och kabelfri signalöverföring.

Inklinometer

Sonden skall vara försedd med en inklinometer som mäter dess lutning i förhållande till vertikalaxeln. Mätområdet skall normalt vara minst $\pm 15^\circ$. Mindre mätområden begränsar ofta de sonderingsdjup som kan nås.

3.22 Neddrivningsutrustning

Neddrivningsanordningen

skall ha en slaglängd av minst en meter. Den skall pressa ned sonden och stängerna med en konstant specificerad hastighet. Anordningen skall vara belastad eller förankrad så att den inte rör sig relativt jorden under neddrivningen och ge erforderlig neddrivningskraft. Slag eller rotation får absolut inte förekomma.

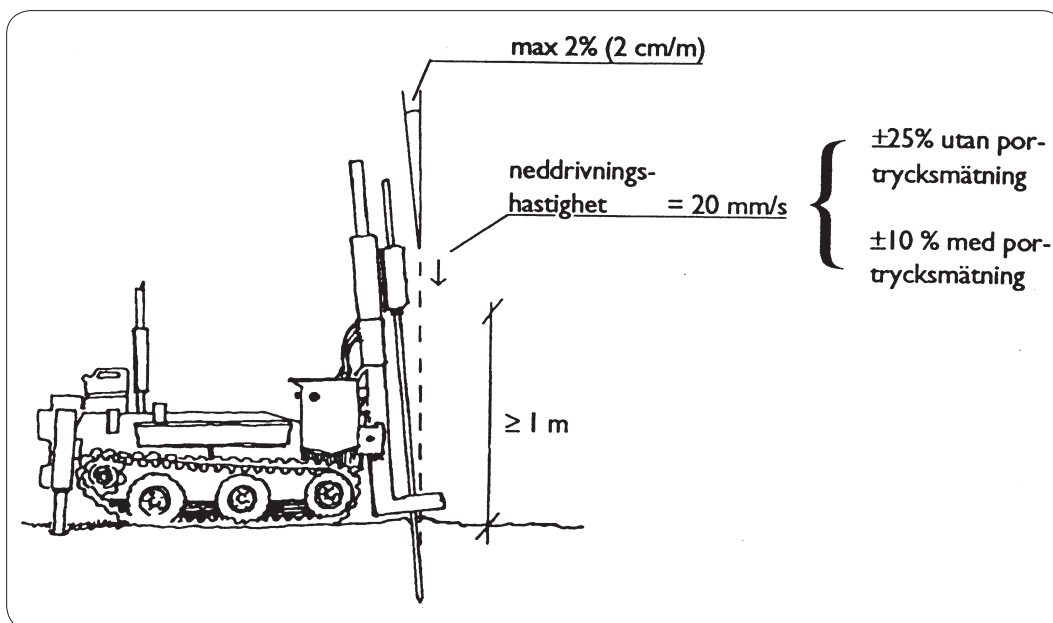
Neddrivningen skall ske vertikalt och kontinuerligt och mätningarna utförs under pågående neddrivning med konstant hastighet. Uppehåll i sonderingen görs endast för skarvning av sondstänger och omtagning av grepp. I samband härmed, eller på inplanerade nivåer, kan också längre stopp göras för studier av det genererade porttryckets utjämning med tiden. Det rekommenderas dock att en kontinuerlig sondering med så få och korta stopp som möjligt först utförs och att eventuella längre porttrycksutjämningsstudier utförs i efterföljande kompletterande sonderingar. Detta gäller dock inte korta stopp i permeabla lager med mycket snabb porttrycksutjämning.

Neddrivningsutrustningen skall riktas in så vertikalt som möjligt. Avvikelsen från lodlinjen skall inte vara större än 2 %. Sondstängernas axel skall sammanfalla med neddrivningsutrustningens tryckriktning.

Neddrivningshastigheten skall vara 20 mm/s. Toleransen enligt SS-EN ISO-standard och vid sondering utan porttrycksmätning är ± 5 mm/s. Utförs sonderingen med samtidig porttrycksmätning skall neddrivningshastigheten enligt SGF:s rekommendation vara inom 20 ± 2 mm/s, Figur 13.

Sondstänger

väljs med hänsyn till erforderlig neddrivningskraft och signalöverföringssystemet för mätdata. Signalöverföring med kabel fordrar



Figur 13.
Krav och toleranser för
vertikalitet och ned-
pressningshastighet.

ihåliga stänger (rör) och skarvtappar. Kraven i övrigt är att skarvarna skall vara styva och stängerna raka. För de nedersta 5 metrarna bör den maximala utböjningen på mitten av en 1 m lång stång vara 0,5 mm i förhållande till en rät linje genom ändpunkterna. Motsvarande mått för sondstänger högre upp är 1 mm. Motsvarande krav på rakhet gäller också skarvarna, Figur 14. Kraven på rakhet finns inte med i den internationella standarden då lutningen mäts men bör vara uppfyllda även i dessa fall om inte sonden skall böja ut redan på ett tidigt stadium av sonderingen.

3.23 Mätutrustning

Givare, mätinstrument och datainsamlingsenheter

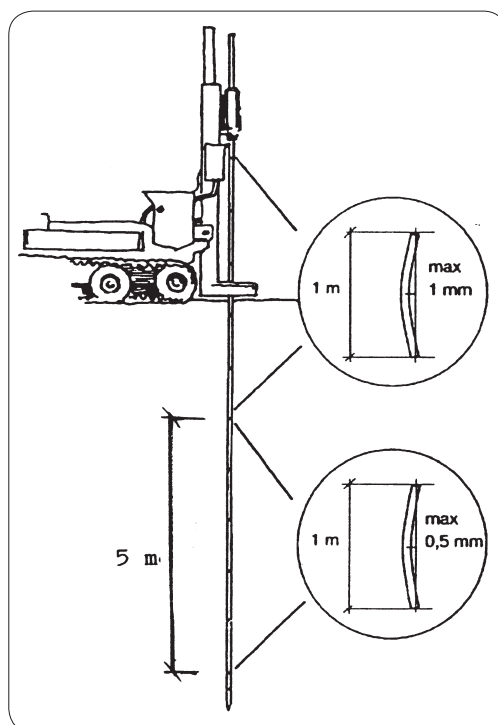
Krafter och tryck skall mätas med lämpliga givare och signalerna skall överföras med ändamålsenlig metod till registrerande mätinstrument och datainsamlingsenheter. Tre huvudalternativ finns på marknaden: (Figur 15)

- överföring av signalerna med kabel från givarna till mätinstrument/insamlingsenhet vid markytan.
- akustisk (kabelfri) överföring av signalerna via sondstänger till mätinstrument/insamlingsenhet vid markytan
- lagring av signalerna i ett minne placerat i sonden, vilket töms i insamlingsenheten efter sondens uppdragning

Registreringsmetoder som medger att mätvärdena kan observeras under sonderingsförloppet i fält rekommenderas ofta. Skälet är främst att man vill ha kontroll över vad som sker under sonderingen. Man kan då fortlöpande förvissa sig om att allt fungerar och bedöma om sonderingen bör avbrytas på grund av sondens lutning, samt modifiera metodiken och omfattningen av undersökningarna på basis av de erhållna resultaten.

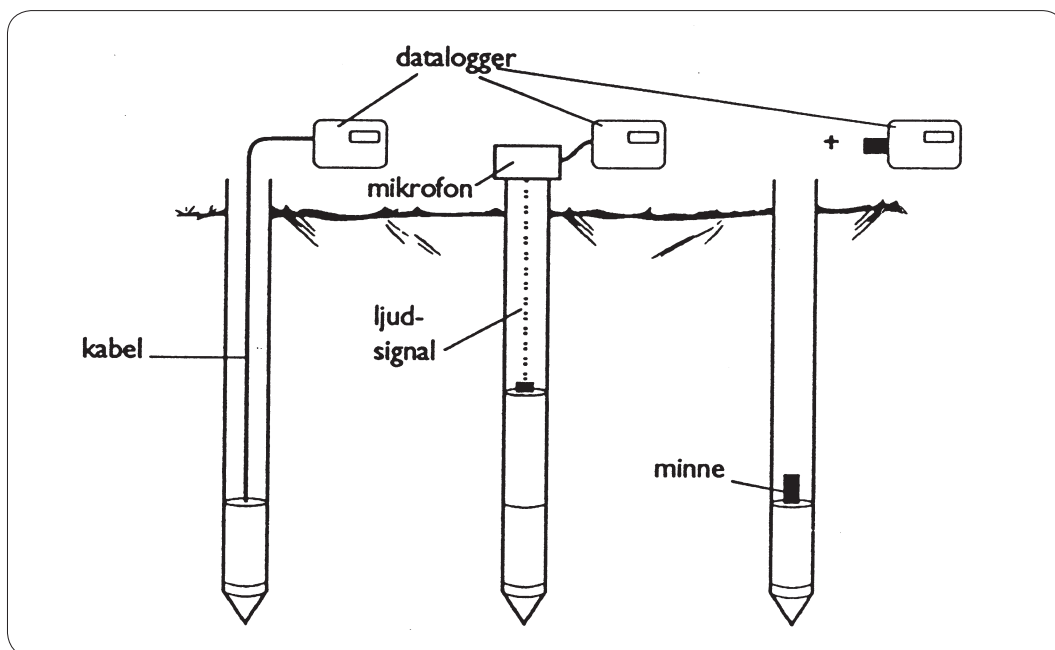
Ju mer kontroll och utvärdering som skall utföras i fält, desto mer omfattande blir utrustningen och kraven på en för elektroniken anpassad arbetsmiljö. Möjligheterna till detta varierar också starkt mellan olika utrustningar. Omfattningen av erforderlig kontroll och utvärdering av sonderingsresultaten i fält bör

Registreringsmetoder som medger att mätvärdena kan observeras under sonderingsförloppet i fält rekommenderas.

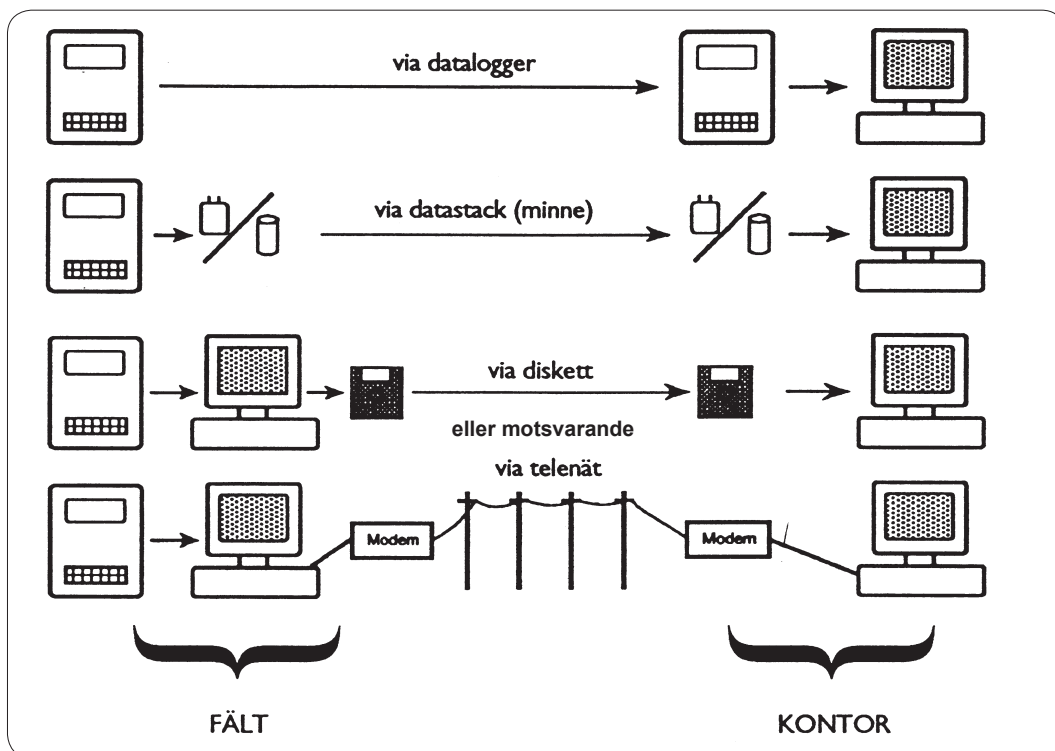


Figur 14.
Krav på stängernas
rakhet.

Figur 15.
Insamling av
sonderingsdata
i fält.



Figur 16.
Metoder för
datahantering och
dataöverföring vid son-
dering.



bedömas från fall till fall och kostnaderna vägas mot eventuella merkostnader för att senare kompletterande undersökningar i annat fall kan behövas. Direkt utvärdering i fält kan medföra vissa tidsvinster. Utvecklingen av utrustning för datainsamling och dataöverföring är dock snabb och redan idag är det t.ex. tekniskt möjligt att överföra mätresultaten direkt till kontoret under sonderingens gång via telefonmodem. Det är därför svårt att ge några detaljerade rekommendationer för lämpligaste tekniska lösning för registrering och insamling av data. Olika metoder för datahantering visas i Figur 16.

Portrycksmätning skall utföras med högprecisionsgivare med mycket liten egendeformation. Hållrummen i spetsen bör utformas så att den totala volymen är så liten som möjligt och att fullständig vätskemättnad vid monteringen underlättas. Hållrum, filter och kanaler skall vara mättade med inkompressibla och avluftade vätskor. På basis av svenska erfarenheter rekommenderas vakuumbehandlad glycerin eller urkokt vatten, alternativt specialfett som förblir lättflytande även vid låga temperaturer.

Målet är att med god precision kunna mäta det under neddrivningen starkt varierande

vattentrycket i den omgivande jorden med ett minimum av erforderlig vatteninströmning (respektive utströmning) på grund av tryckändringarna. Dessa egenskaper i mätsystemet skall dessutom i görligaste mån bibehållas vid passage av lager där negativa portryck och tendenser för att suga ut vätskan ur sonden skapas.

Portrycksmätningen sker som regel med absoluttryckgivare. Detta betyder att de kan påverkas av lufttrycket. Detta har normalt endast betydelse vid tidskrävande sonderingar med långa stopp för mätning av portrycksutjämningsförlopp.

Avläsningsintervall

Avläsningsintervallen för de olika parametrarna kan variera och väljs med hänsyn till vilka jordvolymmer som influerar de olika mätvärdena. Typiska avläsningsintervall för spetskraft och friktion är varje 0,05 m och det finns ingen påtaglig anledning för tätare avläsningar eftersom dessa mätvärden utgör medelvärden för djupintervall med tjocklekar av mellan 0,14 och 0,7 m. Vid sondering i klass C kan glesare avläsningar av dessa parametrar accepteras och görs då minst varje 0,2 m.

För portrycksmätningar är det önskvärt att göra avläsningar på samma avstånd som filtrets höjd, d.v.s. ungefär varje 5 mm. Detta är inte alltid praktiskt möjligt, men en avläsningsfrekvens av portrycket vid åtminstone varje 10 mm bör eftersträvas, även om standarden idag medger avläsningar endast vid varje 20 mm. Används samma avläsningsfrekvens för spetstryck och friktion kan dessa avläsningar medelvärdesbildas för längre djupintervall om 50 mm innan de lagras. Alternativt kan avläsningsfrekvenserna varieras så att de senare värdena endast avläses var 50 mm.

Enligt den internationella standarden krävs att också klockslaget vid varje avläsningstillfälle registreras.

Djupregistrering

Enligt rekommendationerna skall sondspetsens verkliga nivå kunna bestämmas med en noggrannhet av $\pm 0,1$ m. Detta krav erfordrar att en manuell kontroll görs av verklig sonderingslängd och att registrerad längd justeras här till samt att sonderingsdjupet beräknas med

hänsyn till sondens lutning under sonderingen. En manuell kontroll av sonderingslängden vid sonderingsstopp skall alltid göras. Upplösningen i den elektriska djupregistreringen bör vara minst 0,01 m.

Temperaturkompensation

Alla mätvärdesgivare och övrig elektronik skall vara temperaturstabila. Vid handhavandet skall tillses att temperaturförändringar i sonden minimeras, men vissa förändringar kan inte undvikas. Praktisk erfarenhet har visat att den stabilitet som kan uppnås för nollpunktsförskjutningar i vanliga 5-tons sonder är:

2,0 kPa/°C	för spetstryck
0,1 kPa/°C	för mantelfriktion
0,05–0,1 kPa/°C	för portryck (beroende på givarens mätområde som normalt är 1–2 MPa).

Denna stabilitet krävs och skall kontrolleras. För sonder med högre mätområden tillåts en proportionell ökning av temperaturkänsligheten.

Alla fel på grund av temperaturförändringar skall tillsammans med övriga felkällor ligga inom kraven på total noggrannhet som specificeras nedan. Då temperaturen i de flesta fall inte mäts, är enda sättet att försäkra sig att mätnoggrannheten uppfylls att ha en så god temperaturstabilitet att alla tänkbara fel på grund av temperatureffekter kan inrymmas i noggrannhetskraven.

Mätnoggrannhet

Om alla tänkbara felkällor tas med (inre friktionsförluster, fel hos mätutrustning, excentrisk belastning av spets och friktionshylsa, temperatureffekter m.m.) får avvikelser i mätvärdena enligt SGF:s rekommendationer inte vara större än

2 % av det typiska mätvärdet (medelvärdet) för något av de jordlager som ska klassificeras och för vilket egenskaper skall uttolkas ⁵⁾

1 % av mätvärdet för statiska portryck

Dessa krav går dock inte att uppfylla vid mycket små krafter och tryck. Den använda utrustningen och sonderingsklassen väljs med hänsyn till vilken typ av jord som skall under-

”
Om alla tänkbara felkällor tas med får avvikelserna i mätvärdena inte vara större än enligt SGF:s rekommendationer.

⁵⁾ Med jordlager avses separata lager eller, vid tjockare homogena lager, djupintervall om en meter.

sökas; ju grövre och fastare jord desto kraftigare utrustning och lägre sonderingsklass. Detta medför att det finns olika praktiska gränser för hur små tryck och krafter som kan mätas i de olika sonderingsklasserna. För de olika klasserna i SGF:s rekommendation gäller därför som undre begränsning att en onoggrannhet i mätvärdet av nedan angivna värden generellt kan accepteras:

Sonderings-klass	Spetstryck	Friktion	Portryck
CPTC	100 kPa	10 kPa	10 kPa
CPTB	40 kPa	4 kPa	5 kPa
CPTA	20 kPa	2 kPa	1 kPa

Denna noggrannhet måste verifieras genom regelbunden kalibreringskontroll för den aktuella utrustningen.

För samtliga klasser erfordras sonder av hög kvalitet. För sonderingsklass CPTB och CPTC kan 5-tons sonder användas och för sonderingsklass CPTA kan antingen sonder med lägre mätområde eller specialkalibrerade 5-tons sonder användas.

Figur 17.
Förborrning.

Kraven i SGF:s rekommendation är avpassade för vanliga svenska jordförhållanden och maximalt 5-tons sonder, vilket också motsvarar vad som kan tryckas med vanliga borrhandsvagnar.

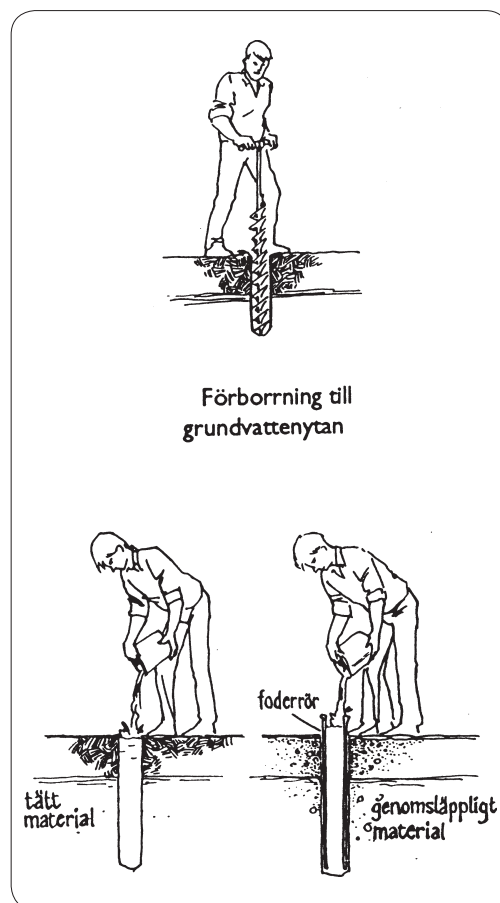
Den internationella standarden är främst avpassad för andra jordförhållanden med grövre och fastare samt mindre sensitiva och mindre homogena jordar, sonder med högre kapacitet och motsvarande kraftigare neddrivningsutrustningar. Kraven i standarden är därmed genomgående lägre, men det påpekas att högre krav kan behöva ställas i lösa jordar.

För lutningsmätning med inklinometer gäller att den maximala onoggrannheten är 2°.

3.24 Speciella anordningar

Förborrning

Vid sondering med porttrycksmätning i lösa jordar innebär passagen genom torrskorpan speciella problem. Dels är torrskorpan normalt inte vattenmättad, dels uppstår ofta stora negativa porttryck. Båda dessa faktorer medför risk för att vätskemättnaden i sonden förloras och att de uppmätta porttrycken på djupare nivåer inte blir relevanta. Dessutom uppstår stora spetstryck och mantelfriktioner i den fastare torrskorpan. Detta medför risk för hystereseffekter och nollpunktsförskjutningar



som i sin tur medför att mät noggrannheten för spetstryck och mantelfriktion blir sämre i underliggande lösare lager. Dessutom ökar risken för att fastare jord och partiklar pressas in i spalterna mellan sondens olika delar och påverkar mätresultaten.

Vid sondering i lös jord bör förborrning genom torrskorpan därför utföras efter att en första sondering givit besked om dess mäktighet och fasthet. Det förborrade hålet vattenfylls normalt och i de flesta fall erfordras foderrör, dels för att hålla det förborrade hålet öppet, dels för att behålla vattennivån, Figur 17.

Fyllningar med inslag av grövre material förborras alltid.

I en del fall kan förborrningen ersättas av att en massiv dummysond med en diameter av cirka 45 – 50 mm först trycks genom de fastare lagren.

Styrning av stänger

Över markytan och i vatten skall sondstängerna vid behov förses med styrrullar, foderrör eller andra anordningar så att de inte knäcker ut.

*Fyllningar
med inslag av
grövre mate-
rial förborras
alltid.*

Lutningskontroll

Normalt kan sondering i homogena jordar utföras till 15 å 20 m djup utan problem med utböjning. I inhomogena jordar eller invid schakter och byggnader är motsvarande djup mindre än 10 m. Sondens lutning bör studeras fortlöpande under sonderingen. Plötsliga lutningsändringar och/eller alltför stor lutning medför risk för att sonden skadas. Lutningsmätaren kan också kopplas till en brytfunktion för nedpressningsutrustningen. Risker för att sonden skadas på grund av utböjning är normalt större än att den överbelastas vertikalt.

Överlastskydd

Mätgivarna i sondaerna har konstruerats för maximala mätområden som inte bör överskridas. Sondstänger och skarvtappar har på motsvarande sätt en maximal lastkapacitet. Vid användande av normala CPT-sonder med minst 5-tons spetstryckskapacitet i homogena jordar är detta inga problem om neddrivningsutrustningarnas kapacitet inte är större. Friktionskraftmätarens mätområde är normalt så avpassat, att ingen risk föreligger att denna skall överbelastas före spetskraftmätaren.

Porttrycksmätare väljs ofta så att större delen av mätområdet utnyttjas. En enkel kontroll av att mätområdet är tillräckligt är att det skall vara större än rådande porttryck på största sonderingsdjup + 20 ggr maximal förväntad odränerad skjuvhållfasthet. Detta täcker in alla eventuella filterplaceringar. Vid normal filterplacering räcker det att mätområdet är större än rådande porttryck + 15 ggr maximal förväntad odränerad skjuvhållfasthet. I överkonsoliderad jord blir porttrycken avsevärt lägre än dessa värden, speciellt vid normal filterplacering.

Sondstängerna är oftast vanliga sondstänger med diametern 32 eller 36 mm, eller alternativt ihåliga ϕ 36 mm stänger eller kolvborrör. Också för dessa är vertikallasten normalt inga problem.

Vid användning av specialsonder med lägre lastkapacitet eller då man vill försäkra sig om att ett visst kalibrerat lastområde inte överskrids, bör lastbegränsning införas på neddrivningsutrustningen. Detta gäller också om en kraftigare neddrivningsutrustning med större kapacitet än sonder och stänger används.

Neddrivningsutrustningarna är som regel hydrauliska och den enklaste formen av lastbegränsning är att en reglerbar säkerhetsventil för oljetrycket installeras. Inställningen

kalibreras sedan så att en skala för inställd maximal neddrivningskraft erhålls. Neddrivningskraften är dock summan av spetskraft och friktion längs sond och stångsystem, där friktionen ofta kan utgöra huvuddelen av kraften. Inställningen kan därför föras med en extra skala, som anger hur mycket den maximala kraften kan ökas beroende på den spetskraft som registreras då inställd säkerhetslast överskrids.

Den största risken för att sonder ska skadas uppstår vid sondering i lös jord och stopp mot fast botten, speciellt mot lutande berg, samt i stenig och blockig jord. Härvid finns en markant risk för böjning och knäckning av sond eller stänger. Denna risk kan minskas genom att införa kontroller och lastbegränsningar av den typ som nämnts ovan.

Ett mer utvecklat överlastskydd kan införas med hjälp av elektronik. I detta fall inför man gränsvärden för spetstryck, mantelfriktion och porttryck samt helst också för lutning. Överskrids något av dessa gränsvärden kan en brytventil på neddrivningsutrustningen aktiveras på elektrisk väg varvid neddrivningen omedelbart stoppas. Operatören kan sedan analysera orsaken och bedöma om sonderingen skall fortsätta eller avbrytas.

Temperaturgivare

Sondens ska hanteras så att den i alla skeden befinner sig så nära jordtemperaturen (normalt 7 – 8 °C) som möjligt. Att helt uppfylla detta krav är inte möjligt men man bör eftersträva att sondens temperatur vid avläsning av nollvärden och under hela den påföljande sonderingsprocessen inte avviker mer än ± 5 °C från riktvärdet. Detta kontrolleras enklast med en inbyggd temperaturgivare.

”
Porttrycksmätare väljs ofta så att större delen av mätområdet utnyttjas.

4. Utförande av CPT-sondering

4.1 Förberedelser

4.1.1 Kontroller

Före start av ett sonderingsprojekt skall sonden kontrollkalibreras och spetsar och friktionshylsor kontrolleras. Detta gäller också medtagna reservspetsar och hylsor samt eventuella utbytesspetsar med filtret placerat på spetsens konade del. O-ringstättningar och spalttättningar kontrolleras. Alla delar som inte håller måttet byts ut. Likaså kontrolleras alla sondstänger och övergångsstycken som tas med ut i fält.

I de fall mätsignalerna skall överföras med kabel förträds denna genom stängerna.

Elektronikens funktion kontrolleras i samband med kalibreringen. Dessutom kontrolleras eventuella säkerhetsfunktioner på neddrivningsutrustningen och funktion av eventuell övrig utrustning som t. ex. generatorer.

En bedömning görs av hur många sonderingar med porttrycksmätning som kan bli aktuella och motsvarande antal filter väljs ut. Dessa provas individuellt genom att monteras tillsammans med den spets de skall användas med. Filtren skall gå lätt att montera, ha rätt diameter och efter att spetsen skruvats fast skall filtren lätt kunna roteras med fingertopparna men dock inte glappa, (kravet på roterbarhet gäller inte specialfilter som är monterade på spetsens konade del). Eventuella grader från tillverkningen kan avlägsnas i svarv eller med hjälp av fil och smärgelduk. Denna första kontroll av filtren utförs med torra filter och de som inte uppfyller kraven åtgärdas eller kasseras. Efter vätskemättnaden är det för sent att åtgärda dem.

Ett schema för de kontroller som skall utföras före och under ett sonderingsprojekt visas i Tabell 2.

Detta schema bör användas tillsammans med tillverkarens handledning för den speciella utrustningen för att uppnå en god kvalitets-säkring.

De punkter som anges under ”start av projekt” utförs normalt i verkstad, förråd och/eller laboratorium innan utrustningen tas ut i fält.

En mer detaljerad förklaring till kontrollschemas punkter ges nedan:

Sondstängernas raket

Innan sonderingen utförs kontrolleras raketeten hos främst de nedersta fem stängerna. Kontrollen görs före varje sondering och speciell uppmärksamhet bör iakttas efter sonderingar i lös jord med stopp mot berg eller annan fast botten, speciellt om denna är lutande, och i jord med innehåll av sten eller andra grövre partiklar.

Slitage

Spetsens och friktionshylsans slitage och ytråhet, samt att kriterierna för relationerna mellan spetsens, filtrets och friktionshylsans diametrar uppfylls, kontrolleras före varje sondering. De mycket strängare kraven vid sondering med porttrycksmätning i finjord än vid enbart spetstrycksondering i sand måste observeras.

Tätningar

Kvaliteten på tätningarna mellan sondens olika delar skall kontrolleras före varje sondering. Eventuella jordpartiklar som trängt in i spalter och tätningar avlägsnas. Ingen påtaglig förslitning av tätningarna kan accepteras i de högre sonderingsklasserna.

Kalibreringskontroll och funktionskontroll

Kalibreringskontroll för mätsystemet skall utföras om nollpunktavläsningar och enklare funktionskontroller tyder på att något ändrats samt regelbundet under längre sonderingsprogram, minst var sjätte månad. Enklare funktionskontroller kan utföras på plats.

Kalibreringskontroll skall normalt utföras minst var sjätte månad samt då sonden överbelastats. Undantag kan göras för sonder som inte använts sedan den senaste kalibreringen. Att en aktuell kalibrering finns måste kontrol-

”
*Elektronik-
ens funktion
kontrolleras i
samband med
kalibreringen.*

Kontroll	Tidpunkt				
	Start av projekt	Under projekt	Start av sondering	Efter sondering	Minst var 6:e månad
Sondstänger	●		●		
Tätningar	●		●		
Filterpassning	●		●		
Slitage och passning	●		●	●	
Kalibreringskontroll	(●)				●
Säkerhetsfunktioner	●				
Funktionskontroll	●	●			
Nollpunktsförskjutning		●	●	●	
Vertikalitet hos nedpressningsutrustning			●		
Nedpressningshastighet			●		

Tabell 2.
Kontrollschema för ett sonderingsprojekt med CPT-sondering.

leras före start av varje sonderingsprojekt och skall kunna verifieras.

Med **kalibreringskontroll** avses att kalibreringen för givarna för spetstryck, mantelfriktion och portryck kontrolleras mot kraftgivare respektive tryckgivare, som har en sådan precision att det kan verifieras att sonden uppfyller de uppställda kraven i de olika sonderingsklasserna. Vid denna kontroll används adaptrar för att mätning av de olika storheterna skall kunna ske kontrollerat och utan att skada utrustningen. Den kan utföras varhelst tillräckligt noggrann referensutrustning finns. Vid kalibreringskontrollen skall användas tillhörande elektronik och registreringsutrustning som används i fält, så att hela mätsystemet och dess felkällor kontrolleras. Vid påläggning av spetskraft respektive friktionskraft registreras också de båda andra parametrarna för kontroll av att ingen interferens mellan mätvärdena uppstått. Datum och uppmätta värden vid kalibreringskontrollen rapporteras i liggare och förvaras tillsammans med sonderingsutrustningen.

Med **funktionskontroll** avses att man kontrollerar att elektronik och givare fungerar och att utslagen (mätsignalerna) blir i rätt

storleksordning. Däremot är det inte meningen att man med ledning av denna enkla kontroll skall ändra några kalibreringsvärden. Funktionskontrollen kan utföras genom att spetskraften och friktionen kontrolleras mot en tryckdosa eller belastas med en känd vikt. Också i detta fall erfordras adaptrar för att påföra lasten utan att skada utrustningen. Känsligare portrycksgivare kan kontrolleras genom att sonden sänks ned i ett vattenfyllt hål, t. ex. vid förborrning genom torrskorpan. Under hela sonderingsprogrammet och mellan kalibreringstillfällena kontrolleras givarnas nollsignaler före och efter varje sondering och dessa skall förbli stabila. En loggbok för detta skall föras.

Vid större skador på sonden skall en förnyad detaljerad kalibrering utföras efter reparation och eventuella utbyten av givare.

Avstånd till närliggande sonderingar och borrhål

Avståndet till närliggande sonderingar bör vara minst 2 m. I de fall sonderingen kompletteras med störd provtagning skall sonderingen utföras först och provtagningsdjupen väljas med ledning av sonderingsresultaten.

”
Utför kalibrerings- och funktionskontroll.

Efter för-
kontrollen
vätskemättas
filtren.

Nedpressningsutrustning

Nedpressningsutrustningens vertikalitet kontrolleras vid varje flyttning och uppsättning. Eventuella säkerhetsanordningar för maximal last skall vara kalibrerade. Nedpressningshastigheten kontrolleras före varje sondering.

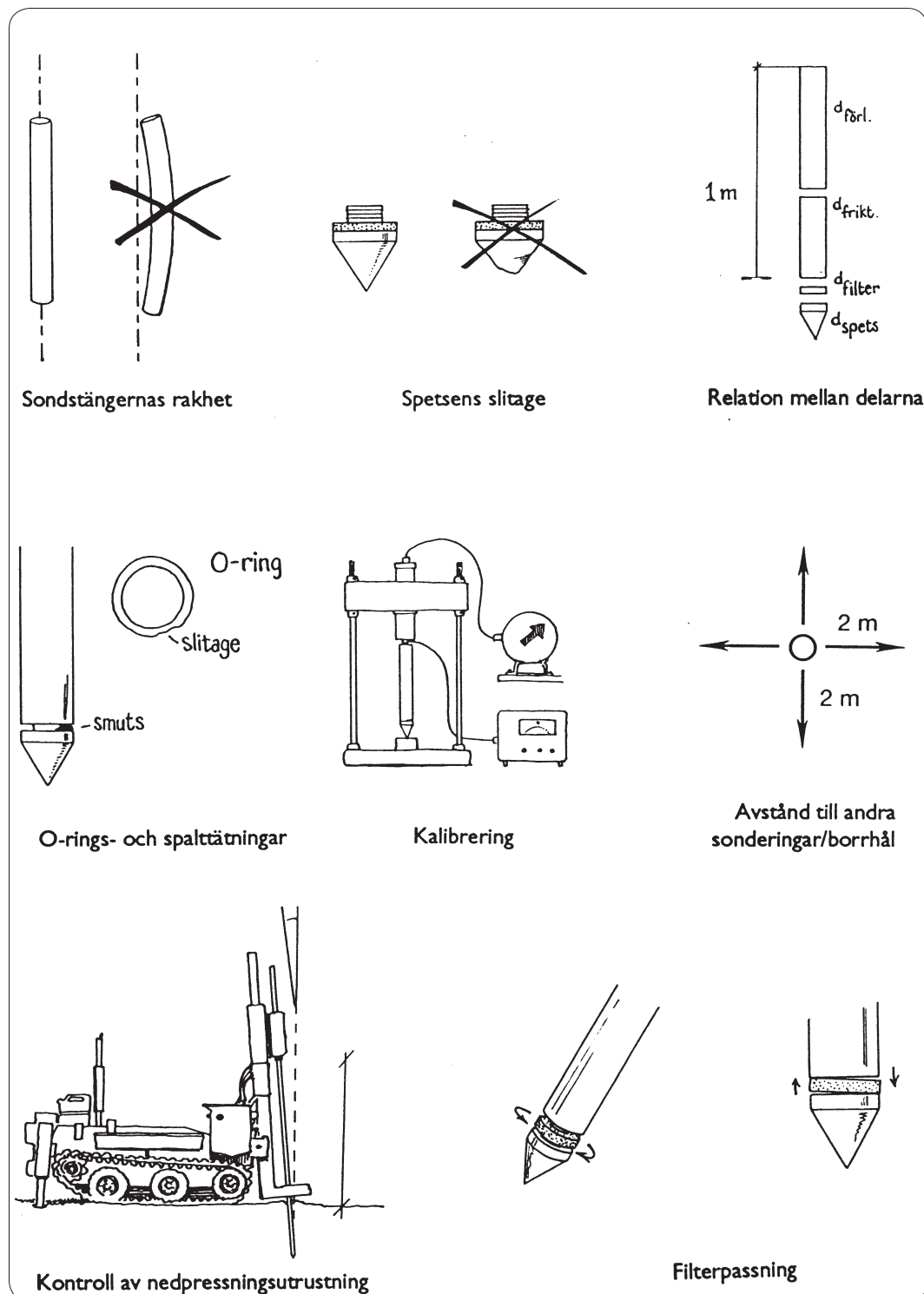
Filterhöjd

Efter att sonden vätskemättats och de olika delarna skruvats ihop kontrolleras filtrets passning på nytt. Dess höjd skall vara sådan att filtret inte glappar samtidigt som det lätt kan

roteras med fingertopparna. Denna kontroll tillförsäkrar att inga onödiga spalter existerar samtidigt som inga inspänningskrafter som kan påverka mätvärdena skapats, Figur 18.

4.12 Vätskemättning av filter och behandling av vätskor och behandling av vätskor

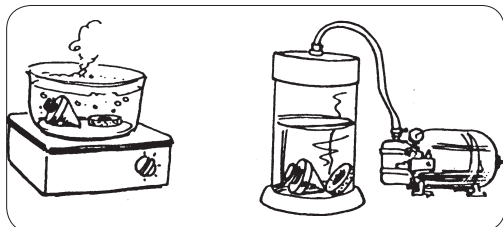
Efter förkontrollen vätskemättas filtren. Skall sonderingen utföras i jord där negativa portryck kan befaras, t.ex. fast lagrad sand och silt eller överkonsoliderad lera, i icke vattenmättad jord eller utan förborrning genom torr-



Figur 18.
Allmänna kontroller
före sondering.

skorpan, väljs glycerin. Vid övrig sondering kan vatten användas som alternativ.

Vid användning av glycerin läggs de torra filtren ned i vätskan och behandlas med hög-vakuum under ett par timmars tid, Figur 19. Också en större mängd glycerin behandlas på



samma sätt. Filter och vätskor förvaras sedan i lufttåta behållare.

Vid användning av vatten kokas filtren i minst 15 minuter. Filter och kokvatten får svalna under tättslutande lock och förvaras sedan i väl fyllda lufttåta behållare. Dessutom avluftas en större vattenmängd med hjälp av t.ex. vattensug. Också detta vatten förvaras i tättslutande behållare.

Vätskemättnings av filter och vätskor görs normalt i förråd eller laboratorium.

4.13 Övrigt

Till utrustningen hör också monteringsutrustning (-ar) för filter, håltagningsutrustning och foderrör, eventuella kablar, generator, bränsle och/eller batterier för strömförsörjning, registreringspapper, datakassetter eller andra minnesenheter och protokoll samt rengöringsutrustning och vaselin till sonderarna. I de fall sonderingarna skall utföras i områden där artesisiska vattentryck kan förekomma, bör också utrustning för håltätning medtagas.

I övrigt hänvisas till tillverkarens manualer för aktuell sonderingsutrustning.

4.2 Försöksutförande

- **Neddrivningsutrustningen** placeras vid sonderingspunkten, förankras vid behov och riktas in vertikalt. Eventuell förborrning utförs. Som regel vattenfylls det förborrade hålet och vid behov används foderrör, dels för att få hålet att stå öppet, dels för att täta och behålla vattnet. Förborrade och vattenfyllda hål kan behövas för temperaturanpassning av sonden också i det fall sonderingen skall utföras från markytan. Dessa hål placeras då på några meters avstånd från sonderingspunkten.

- **Neddrivningshastigheten** ställs in och kontrolleras liksom eventuella lastbegränsningar.

- **Mätssystemet** kopplas upp och får stå på för uppvärmning och sonden monteras. Instruktioner för hantering av mätvärdesinsamlings-system är systemspecifika varför närmare handledning härför får sökas i instruktionsböckerna från respektive tillverkare.

Sonden ska hela tiden förvaras och monteras så att extrema temperaturer undviks. Den skyddas således mot direkt solljus, hetta och kyla. Detsamma gäller filter och vätskor.

- Vid den vanligaste metoden **för montering av filter** med glycerin vänds sonden upp och ned och spetsen skruvas av. En medelstor plasttratt träs över sonden med pipen nedåt. Pipen skall vara avskuren så att den precis passar sondens diameter. Över pipen skall en bit cykelslang vara träd. När tratten kommit i läge viks slangen ned så att den tätar mot sonden (friktionshylsan) och tratten fixeras. Försiktighet måste sedan iaktas eftersom friktionshylsan inte är låst förrän monteringen är färdig, Figur 20.

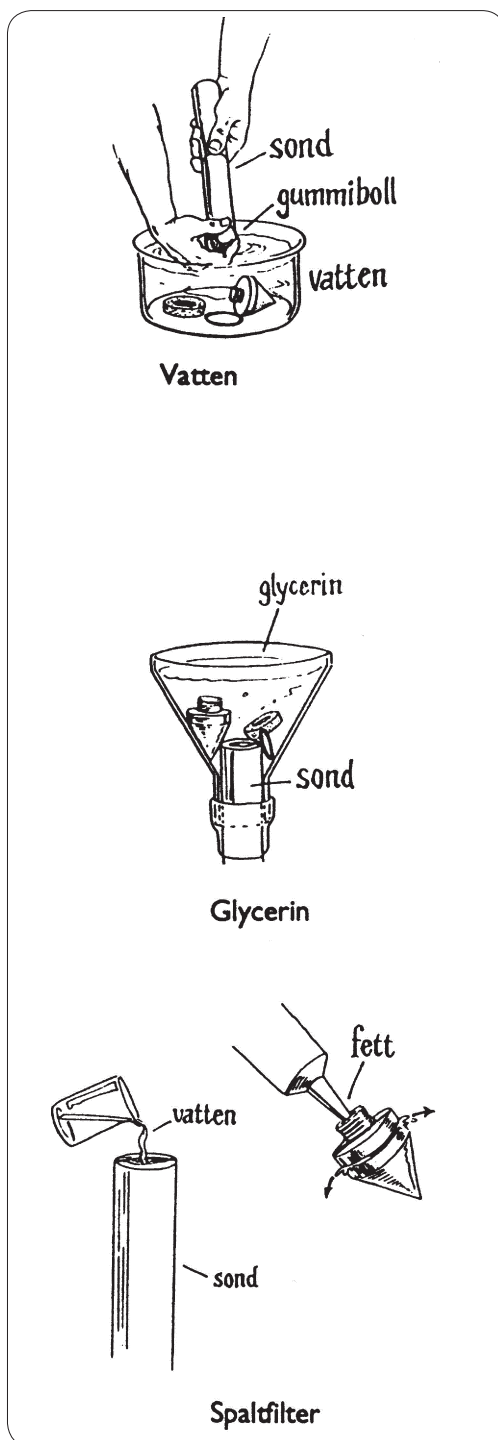
I tratten fylls nu försiktigt avluftad glycerin. Med hjälp av en spruta med kolv avlägsnas alla luftbubblor i sondens och spetsens hålrum, kanaler och gängor samt på tätningar och eventuella andra lösa delar. Filtret överförs försiktigt från sin behållare till tratten och alla delar monteras under vätskeytan. (Behållarna för filter och glycerin försluts direkt efter påfyllning av glycerin respektive överföring av filtret). Efter det att spetsen skruvats fast, kontrolleras filtrets passning ånyo så att det lätt kan roteras med fingertopparna samtidigt som det inte glappar. Därefter hålls glycerinet i tratten av, gummislangen viks upp på trattpipen och tratten avlägsnas. Sonden överförs sedan direkt till sonderingspunkten.

- Sondering från markytan eller i förborrat men inte vattenfyllt hål påbörjas sedan utan onödigt dröjsmål. I vattenfyllda hål kan man dock låta sonden **anpassa sig till temperaturen** en viss tid innan sonderingen startar. Är sonden försedd med en temperaturgivare avläses denna och man kan då kontrollera att temperaturen är stabil och ligger inom tillåtna gränser. I annat fall väljs anpassningstiden med ledning av den tid det tog för den aktuella sonden att bli stabil vid temperaturkalibreringen och genom att läsa av de olika mätgivarna och kontrollera att värdena inte förändras. I det fall sondering skall utföras från markytan

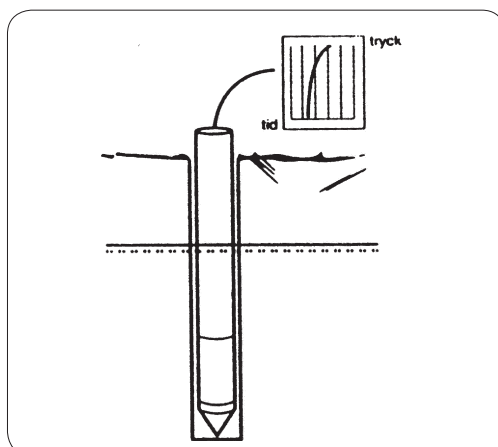
Figur 19
Vätskemättnings.

”
*Sonden ska
hela tiden
förvaras och
monteras så att
extrema
temperaturer
undviks.*

”
Om vatten
används i
sond och fil-
ter kan olika
förfaranden
användas vid
monteringen.



Figur 20.
Montering av filter.



Figur 21.
Temperaturanpassning.

men sonden först behöver temperaturstabiliseras i ett vätskefyllt hål, bör sondens nederdel vara skyddad av en glycerinfylld plastpåse under stabiliseringen, Figur 21.

- I det fall **vatten** används i sond och filter kan olika förfaranden användas vid monteringen. Den metod som har använts vid SGI är att spetsen skruvas av och läggs i en behållare med avluftat vatten tillsammans med tätningar och övriga lösa delar. Dessa vätskemättas omsorgsfullt och eventuella luftbubblor avlägsnas med en spruta med kolv. Därefter överförs filtret till behållaren. Förvaringskärlen för vatten och filter återförluts utan onödiga dröjsmål. Sondens vänds upp och ned. Hållrum och kanaler i denna vätskemättas och tätas därefter genom att en gummiboll trycks mot sondens nederände. I detta tillstånd vänds sonden och nederänden förs ned under vattenytan i behållaren. Gummibollen avlägsnas och sonden monteras under vatten, Figur 20.

Sondens nederdel hålls kvar under vattenytan. Först kontrolleras filtrets passning och därefter vattenfylls en plastpåse och förs över sondens nederdel. Med nederdelen inuti den vattenfyllda plastpåsen förs nu sonden över till det förborrade och vattenfyllda hålet. När spetsen är nedförd väl under vattenytan i hålet dras plastpåsen upp och slits sönder. Hela monteringen och överföringen sker således under vatten och inget tillfälle ges för luft att komma in i systemet.

Metoden kan också användas för glycerin, men då behövs ingen plastpåse efter monteringen.

Vätskemättningen och monteringen är ofta det kritiska momentet som avgör om sonderingsresultatet skall bli av god kvalitet. Mycket stor omsorg måste därför läggas ned i alla led; avluftning av filter och vätskor, transport och förvaring, montering i fält och användning av endast avluftade vätskor förvarade i lufttäta kärl som noggrant återförluts direkt efter användning.

Monteringen i fält är svår och tålamodskrävande, speciellt under ogynnsamma väderleks- och ljusförhållanden. Speciella hjälpmedel i form av monteringscylindrar, som kan träs på sonden och där vakuum kan appliceras på filter, vätska och sondens nederdel under olika stadier av monteringen, är under utprovning, men ännu inte i allmänt bruk.

- En annan metod, som är avsedd att underlätta förfarandet, är att ersätta filtret med en smal spalt. Också i detta fall krävs en noggrann vätskemättnings. Denna görs genom att spetsen skruvas av. Pipen på en fettub sticks in i hålet i spetsens bakkant och fett pressas in så att det fyller alla hålrum. Pipen dras ut under fortsatt fettuttryckning så att spetsen blir helt fylld. Sonden vänds upp och ned och hålrummet vid porttrycksmätaren fylls med avluftat vatten varpå spetsen skruvas fast. Det fett som pressas ut vid åtdragningen kan torkas av och sonden är färdig att användas, Figur 20.

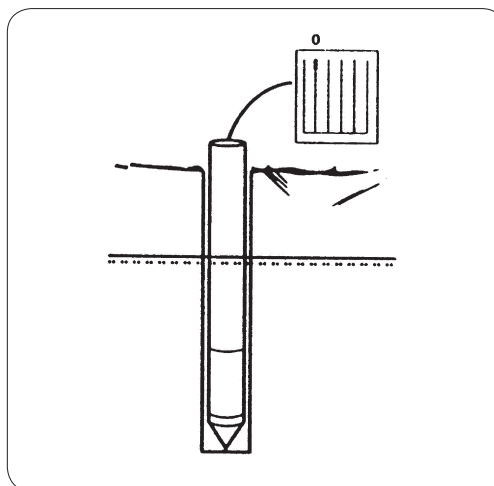
Som tidigare nämnts medför detta förfarande ofta en större onoggrannhet i porttrycksmätningarna. Å andra sidan underlättas monteringen och möjligheten att bevara vätskemättnaden i fast och icke vattenmättad jord är relativt god. Metodens användbarhet får avgöras från fall till fall med hänsyn till noggrannhetskrav och aktuell jordprofil.

Vid planering av CPT-sondering måste man vara medveten om att förberedelserna inför varje sondering, speciellt vid samtidig porttrycksmätning, ofta kräver längre tid än själva sonderingen. Undantaget är mycket djupa sonderingar och sonderingar med avbrott för olika specialförsök.

- Sondens temperatur vid **avläsning av nollvärden** bör helst vara lika med jordtemperaturen, som är 7 – 8 °C i mellersta Sverige, ett par grader högre i Skåne och 3 – 4 °C i de nordligaste delarna av landet. Av praktiska skäl kan sondens temperatur tillåtas variera cirka ± 5 °C från riktvärdena för sonder med god temperaturstabilitet.

Vid sondering i vattendrag bör observeras att vattnets yttemperatur och botten temperatur kan skilja stort. Det är då lämpligt att låta sonden stabiliseras någon meter över botten och sedan starta registreringen från denna nivå.

Efter temperaturstabilisering (och eventuell erforderlig uppvärmningstid för sondens elektronik) avläses givarnas nollvärden före sonderingen. Sonden skall då hänga fritt. I de fall nollvärdena avläses med sonden nedsänkt i ett vattenfyllt hål noteras hur långt under vattenytan sondspetsen befann sig vid nollavläsningen. På motsvarande sätt noteras spetsens nivå under markytan då nollvärdet för djupregistreringen avläses, Figur 22.



Figur 22.
Nollavläsning under vattenyta.

- **Sonderingen** utförs sedan med en konstant hastighet av 20 mm/s. Stopp för påskarfning av nya stänger och omtag med neddrivningsutrustningen utförs utan onödiga dröjsmål.

Om stopp inträffar på grund av inställd begränsning i neddrivningskraft avläses spetskraften (om möjligt) vid stoppet. Visar det sig då att spetstrycket är långt från kritiska värden och stoppet inträffat på grund av för stor stångfriktion kan neddrivningskraften ökas.

Under sonderingen studeras kurvorna för spetstryck, mantelfriktion, porttryck och lutning så att man förvissas sig om att allt fungerar ⁶⁾. Också registreringen av sonderingslängd kontrolleras genom jämförelse med okulära observationer. En preliminär bedömning av jordarter kan också göras liksom en bedömning av eventuella problem och åtgärder för att förbättra resultaten, (t. ex. utökad förborrning, alternativ filterplacering eller byte av sond).

- Speciella sonderingar med **uppehåll för porttrycksutjämnning** i olika lager eller seismiska försök utförs som regel som separata sonderingar. En del utrustningar har dock en avläsningsrutin där porttrycksutjämnningen automatiskt avläses varje gång neddrivningen stoppas. I dessa fall kan kortare uppehåll av 5 – 10 minuter också ingå vid rutinsonderingar.

- Vid den senare utvärderingen är det nödvändigt att veta **porttrycket in-situ**. Det är därför värdefullt om de utjämnade porttrycken i mer permeabla lager kan avläsas vid sonderingen. I annat fall erfordras kompletterande porttrycksmätning. All sondering med porttrycksmätning som stoppas vid fast botten

”
Sonderingen utförs med en konstant hastighet av 20 mm/s.

⁶⁾ Alternativt görs detta direkt efter varje sondering.

eller i friktionsjord bör därför avslutas med att portrycket läses under några minuter för att se om jorden är så permeabel att utjämningen går snabbt och ett stabilt utjämnat värde kan erhållas. Detta kan relativt enkelt göras även om ingen automatisk avläsningsrutin finns för den aktuella utrustningen. Motsvarande avläsningar kan också göras i andra permeabla skikt.

- **Sonderingslängden vid sonderingsstopp** avläses också manuellt. Detta görs med hjälp av kännedom om sondens längd, längden av påskavade sondstänger samt en mätning av kvarvarande längd av dessa över markytan.

- Därefter dras sonden upp. Direkt efter uppdragningen och innan sondens temperatur ändras tas nya nollvärden. Härvid bör observeras att vid uppdragningen skapas ofta stora undertryck som kvarstår i portrycksmätningssystemet efter uppdragningen. **Nollvärden efter uppdragning** bör därför avläsas dels direkt, dels efter att spetsen lossats så att eventuella undertryck utjämnats.

Eventuell onormal förslitning kontrolleras och noteras.

Inför varje ny sondering byts filtret ut mot ett nytt och sonden vätskemättas och monteras som tidigare beskrivits. Spalter och tätningar inspekteras och rengörs.

- Efter sonderingen studeras **vattenytan i borrhålet**. Visar det sig att artesiskt vatten strömmar upp ur borrhålet måste detta tätas. Detta kan t.ex. göras genom att ett längre foderrör trycks ned i hålet och att hålet sedan fylls med bentonitpellets under samtidig uppdragning av foderröret. Speciella bentonitstavar för håltätning finns nu på marknaden. Efter att vattenflödet stoppats går hålen på större djup som regel igen med tiden. Det är dock mycket väsentligt att vattenflödet stoppas mycket snabbt eftersom skador och erforderliga åtgärder annars kan bli omfattande.

Under mer normala förhållanden studeras den fria grundvattenyta som med tiden utbildas i sonderingshålen.

- Direkt efter att sonderingen avslutats införs all nödvändig information och gjorda iakttagelser i **protokoll**, Figur 23, och sonderingspunkten avvägs och mäts in. En sammanställning av olika moment vid sonderingen och efter dess avslutande finns i Figur 24.

- Eventuella **kompletterande portrycksmätningar** startas med installation av filterspetsar

så tidigt som möjligt, så att de om möjligt hin- ner stabiliseras under den tid övriga undersök- ningar utförs. De skall placeras så att de inte påverkas av övriga undersökningar.

- Eventuell **provtagning** i anslutning till son- deringarna görs efter att sonderingen utförts.

- **Efter varje utfört sonderingsprojekt** lik- som vid slutet av varje arbetsdag skall sonden tas isär och rengöras. O-ringar och tätningar kontrolleras och smörjs in med vaselin och eventuell fukt torkas ut innan sonden åter sätts ihop. Uttorkningen får endast ske vid rums- temperatur och inte genom upphettning.

4.3 Speciella problem

Problem vid CPT-sondering på land är oftast relaterade till sondering med portrycksmät- ning i fast, icke vattenmättad eller starkt överkonsoliderad jord. Svårigheten är här att bibehålla vätskemättnaden i portryckssystemet och att få relevanta mätvärden på portrycket.

I de fall problemen är relaterade endast till torrskorpan kan de avhjälpas genom förbor- ning genom denna. Det är då ofta lämpligt att starta sonderingsprogrammet med en son- dering från markytan med en sond med hög kapacitet. Resultaten ger en uppskattning av jordlagerföljden, storleken på sonderingsmot- ståndet och torrskorpans mäktighet. På basis härav kan sedan erforderligt förbörningsdjup bestämmas. Finns flera sonder med olika mät- områden kan också den lämpligaste sonden väljas. Vid sondering genom torrskorpan utan förbörning bör observeras att i de fall den fullständiga vätskemättnaden gått förlorad blir de mätta portrycken i underliggande jordlager inte relevanta. Ofta erhålls åter rätt storleks- ordning på portrycken vid ett djup av cirka 5 m under grundvattenytan men respons och mätvärdenas noggrannhet förblir osäkra.

Vid sondering i mycket lös jord måste också förbörning ofta utföras för att de stora kraf- ter som uppstår i torrskorpan inte skall skapa nollpunktsförskjutningar eller hystereseffekter som menligt påverkar mätnoggrannheten i de underliggande lösa lagren. Vid användning av mycket känsliga specialsonder och/eller lastbegränsningar för specialkalibrerat mät- område överskrids dessutom ofta tillåten last i torrskorpan.

Problem med negativa portryck på större djup kan åtgärdas dels genom mer komplicerad vätskemätningsteknik eller eventuellt genom att använda spaltfilter med fett, dels genom att placera filtret på spetsens konade del. Vid

”
*Problem med
negativa
portryck på
större djup
kan åtgärdas.*

Försöksplats: _____ Datum: _____

Projektnummer: _____ Sondhålsnummer: _____

Fältingenjör: _____

Förborring: _____ m Fri grundvattenyta: _____

Sondens typ: _____ Sondens nummer: _____

Kalibreringsdatum: _____

Filtertyp: _____ Använd vätska: _____

Förborrat material: _____

	djup	tryck
Portrycksobservationer:	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____

Bedömd sonderingsklass: _____

Nollavläsning	före	efter
spetstryck :	_____	_____
portryck:	_____	_____
mantelfriktion:	_____	_____

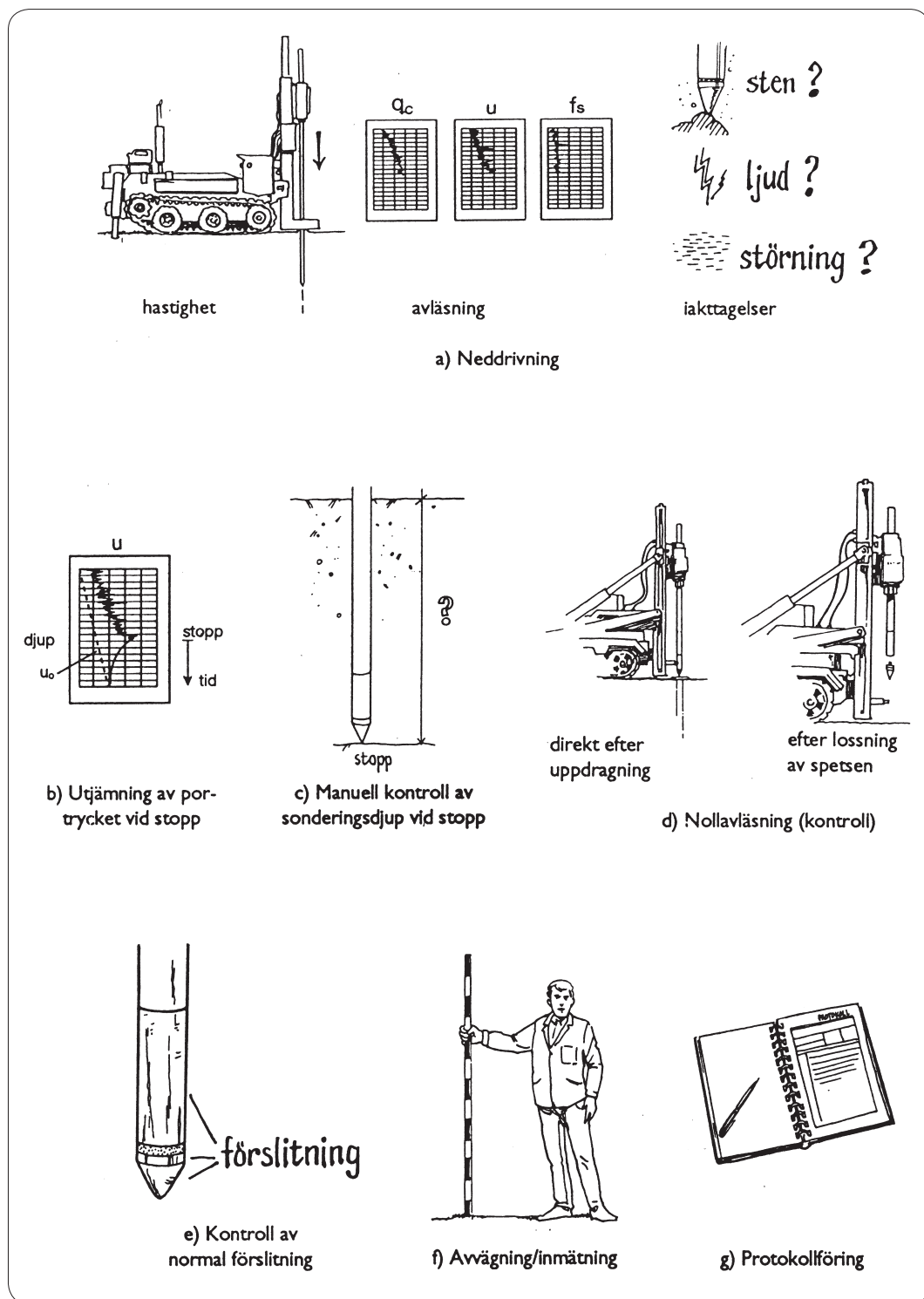
Uppmätt djup vid sonderingsstopp: _____ m

Iakttagelser och anmärkningar: _____

Fig. 23.
Exempel på sonde-
ringsprotokoll för CPT-
sondering.

*Sondering
i gyttja och
organisk lera
kan medföra
speciella
problem.*

Figur 24.
Utförande av
CPT-sondering.



denna filterplacering blir porttrycken som regel alltid positiva och det är dessutom ofta möjligt att få en mer detaljerad bild av jordlagföljden. Å andra sidan kan mätvärdena för spetsstryck och mantelfriktion inte korrigeras till helt korrekta värden. Sondering med filtret på spetsens konade del utförs därför som komplement till sondering med den vanliga konfigurationen. Också i vattenmättad jord utan problem med porttrycksmätningen är kompletterande försök med filtret placerat på spetsens

konade del av stort värde för utvärdering av jordens egenskaper.

Sondering i gyttja och organisk lera kan medföra speciella problem. Denna typ av jord innehåller ofta såväl skal som gaser och har visat sig ha en speciell benägenhet att sätta igen filter. I dessa jordar rekommenderas främst användande av glycerin för vätskemätning av filter och porttryckssystem.

5. Redovisning och databehandling av sonderingsresultat

5.1 Parametrar för utvärdering

De basparametrar som fås ur CPT-sonderingen är

- Totalt spetstryck, q_t
- Total mantelfriktion, f_t
- Totalt portryck, u

För att erhålla basparametrarna q_t och f_t måste portrycket mätas vid spetsens bas mellan spetsen och friktionshylsan, och mätvärdena för spetstryck och mantelfriktion korrigeras härför. I litteraturen finns ett antal förslag till empiriska korrekationer så att också portryck mätta på spetsens konade del skulle kunna användas för korrektion av spetstryck och mantelfriktion. Dessa kan dock vara grovt missvisande och bör inte användas generellt.

Då portrycket varierar starkt beroende på var det är mätt bör beteckningarna u (och Δu) endast användas för portryck som mätts vid den normala filterplaceringen. Portrycket mätt halvvägs upp på spetsens konade del utgör en fjärde basparameter som kan erhållas ur kompletterande CPT-sonderingar och bör särskiljas som

- Totalt portryck mot spetsens konade del, u_l

För tolkning av resultaten erfordras också basparametrarna

- Initieellt in-situ portryck, u_0
- Initieellt rådande vertikalktryck in-situ, σ_{v0} (beräknat ur jordens densitet)

Det initiella portrycket uppskattas med hjälp av observationer av fri grundvattenyta samt utjämnade portryck mätta i permeabla skikt vid sonderingen. Saknas de senare värdena får kompletterande portrycksmätning utföras på ett antal nivåer.

Det initiella vertikalktrycket in-situ uppskattas med hjälp av jordens densitet. Denna uppskattning kan ofta göras interaktivt med ledning av ur sonderingsresultaten bedömd jordart och fasthet. I lera och organisk jord erfordras för en noggrannare utvärdering att prover tas för bestämning av flytgränsen, w_L . Ur dessa prover kan också densiteten bestämmas. Till basparametrarna för mycket finkornig jord kan därför också indirekt räknas

- Flytgräns, w_L

I friktionsjord kan tolkningen av CPT-sonderingen förbättras genom parallella dilatometerförsök. Ur de senare försöken erhålls, som komplettering till basparametrarna, främst en parallell jordartsklassificering, en god uppskattning av densiteten samt en uppskattning av jordtryckskoefficienten K_0 . Den senare kan i viss mån också indirekt räknas som en basparameter för främst friktionsjord.

Sekundära tolkningsparametrar

För tolkning av sonderingsresultaten används olika relationer mellan basparametrarna. För preliminär tolkning och jordartsbedömning används ofta parametrarna

- $\Delta u = u - u_0$
(eller mer korrekt $\Delta u_2 = u_2 - u_0$)
respektive $\Delta u_1 = u_1 - u_0$
- Friktionskvot $R_{ft} = (f_t/q_t) \cdot 100, \%$
- Portrycksparemeter $B_q = \Delta u_2/(q_t - \sigma_{v0})$

5.2 Databehandling

De mätvärden som avläses upprättas normalt på en bildskärm i fält för kontroll och preliminär bedömning. Samtidigt lagras de på ett minne för vidare behandling och upprättning i kontorsmiljö. För att minska erforderligt minnesutrymme kan en viss selektering utföras redan i fält. Vid sonderingar i klass A och B bör dock portrycksavläsningar göras så frekvent som möjligt, helst på varje 5 – 10 mm, och samtliga värden lagras i obearbetad form.

I friktionsjord kan tolkningen av CPT-sonderingen förbättras genom parallella dilatometerförsök.

”
De avlästa nollvärdena vid sonderingens start ska korrigeras med hänsyn till det eventuella vatten-tryck som rådde vid nollavläsningen.

För spetstryck och friktion räcker det med att värden lagras för omkring varje 50 mm djupintervall. Helst skall det då vara medelvärden över denna sträcka som lagras.

Den registrerade sonderingslängden ska kontrolleras mot den manuella mätningen vid sonderingsstopp. Vid signifikant avvikelse studeras operatörens anteckningar och fältuppritningen för att om möjligt utröna om felet uppstått vid en viss nivå eller om det kommit gradvis. I det första fallet justeras djupen under felnivån med ett konstant värde och i det andra fallet multipliceras alla djupvärden med en korrektionsfaktor så att sonderingdjupet överensstämmer med det manuellt uppmätta. Mindre fel, i storleken $\pm 1\%$, kan t.ex. uppstå på grund av temperatureffekter för en del djupregistreringsenheter.

De avlästa nollvärdena vid sonderingens start ska korrigeras med hänsyn till det eventuella vatten-tryck som rådde vid nollavläsningen. I de fall sonden sänkts ned i ett förborrat vattenfyllt hål påverkas den av ett visst vatten-tryck vid nollavläsningen som i sin tur påverkar nollvärdena. Detta gäller främst portrycket men beroende på sondens konstruktion i olika grad också spetstryck och mantelfriktion. Dessa korrigerade nollvärden skall jämföras med de nollvärden som erhöles efter uppdragning av sonden.

I den mån signifikanta avvikelser uppstått skall dessa analyseras. Den vanligaste orsaken till nollpunktsförskjutning är stora laster vid stopp mot berg om ingen lastbegränsning använts. Likaså förorsakar stopp på grund av utböjning ofta nollpunktsförändringar. Kan nollpunktsförskjutningarna härledas till slutfasen av sonderingen används de korrigerade nollvärden som uppmätts före sonderingen. Kan nollpunktsförskjutningen i stället härledas till stora krafter på en viss nivå, t.ex. i mycket fast torrskorpa eller passage av ett mycket fast lager eller en sten, används de första nollvärdena ned till denna nivå och de senare därunder.

Finns ingen logisk förklaring bör en analys göras av möjliga temperatureffekter och med ledning härav används sedan, under förutsättning att nollpunktsförskjutningen är måttlig, medelvärdet av nollvärdena före och efter sonderingen eller alternativt en gradvis övergång mellan dessa.

Är nollpunktsförskjutningarna stora och inte med säkerhet kan härledas skall sonderingen

göras om. Också i övriga fall där korrigerings-arna varit av en sådan storlek att de signifikant påverkat utvärderingen bör resultaten behandlas med varsamhet och undersökningarna kompletteras.

Vid den påföljande uppritningen ritas samtliga portrycksavläsningar mot djupet för att få en så god upplösning som möjligt. Mätvärdena för spetstryck och mantelfriktion korrigeras enligt kalibreringsdata och de portryck som avlästes samtidigt med dessa mätvärden. Har en medelvärdesbildning gjorts för spetstryck och mantelfriktion, får motsvarande medelvärdesbildning för det aktuella djupintervallet göras för de samtidigt mätta portrycken innan korrekturen kan utföras.

Vid insättning av portryck, mantelfriktion och spetstryck för beräkning av parametrarna R_{fi} och B_q används också medelvärden för motsvarande sträckor. Vid denna medelvärdesbildning, liksom vid djuprelatering av de olika parametrarna, måste beaktas att mätningarna utförs på olika ställen längs sonden. I förhållande till yttersta spetsen på en helt ny sondspets mäts spetstrycket cirka 21 mm högre upp, portrycket vid normal filterposition cirka 38 mm upp, mantelfriktionen cirka 110 mm upp (och portrycket mot spetsens konade del cirka 16 mm upp). De sonderingsdjup som registrerats samtidigt med de aktuella avläsningarna måste därför räknas om för respektive mätvärde med hänsyn till lägesförskjutningarna. Detta görs efter att spetstryck och mantelfriktion korrigerats för tillhörande portryck.

Därefter utförs uppritning och vidare utvärdering. Den senare kan göras manuellt eller med stöd av utvärderingsprogram som normalt är PC-baserade.

5.3 Uppritning

Först redovisas mätresultaten i form av avlästa värden på q_c, f_s, u och sondlutning samt det totala spetsmotståndet q_t mot djupet. Sonderingsresultaten uppritas sedan som kurvor över basparametrarna q_p, f_t och u mot djupet.

Okorrigerade värden på q_c respektive f_c får aldrig presenteras utan att det klart framgår att detta är okorrigerade värden som inte kan användas för utvärdering, utom i de specialfall där inverkan av portrycken kan försummas, (d.v.s främst i sand).

Som stöd för en preliminär manuell bedömning och utvärdering redovisas också kurvor

över u_o , Δu , R_{fi} och B_q (samt eventuella värden på Δu_l) mot djupet.

Enligt den internationella standarden skall uppritningen göras med följande förhållande mellan skalorna:

$$\text{Djup} - q_p, q_c \quad 1\text{m} - 2\text{ MPa}$$

$$\text{Djup} - f_p, f_s \quad 1\text{m} - 50\text{ kPa}$$

$$\text{Djup} - u \quad 1\text{m} - 20\text{ kPa}$$

I denna uppritning visas också sondens lutning mot djupet.

Enligt den internationella standarden rekommenderas att alltid göra en första uppritning i ovanstående skalor för att ge en enhetlig bild av jordens relativa fasthet och att sedan göra en detaljerad uppritning av samtliga parametrar i skalor som valts med ledning av de aktuella mätvärdena, Figur 25. I dessa uppritningar redovisas således också parametrarna u_o , Δu , R_{fi} och B_q (samt eventuella värden på Δu_l) mot djupet. För den första uppritningen väljs skalförhållandena:

$$\text{Djup} - R_{fi} \quad 1\text{m} - 2\%$$

$$\text{Djup} - B_q \quad 1\text{m} - 0,5$$

Om temperaturmätning gjorts skall mätvärdena från denna också uppritas mot djupet.

Utöver de uppritade värdena kräver den internationella standarden att alla avlästa värden och tillhörande klockslag ska finnas tillgängliga i tabellform.

I **rapporteringen** ska också anges:

- Projekt och projektnummer
- Försöksplats
- Borrföretag
- Borrningsledare
- Datum
- Sondhålets beteckning
- Sondhålets läge i plan och dess nivå
- Använd referensnivå
- Fria grundvattenytans läge
- Utförda porttrycksobservationer
- Förborrningsdjup
- Uppgifter om det förborrade materialet
- Vid sondering från schaktbotten skall också schaktdjup och det bortschaktade materialets natur anges.

- Utrustningens typ och fabrikat
- Sondspetsens nummer, filterplacering och mätområden
- Datum för kalibrering
- Areafaktorer
- Sondens geometri om annan än standard
- Använd vätska i porttrycksmätningssystemet
- Eventuella längre stopp i sonderingen för utförande av specialförsök (typ seismisk eller porttrycksutjämning)
- Alla observationer som operatören gjort under och efter sonderingen angående indikationer på förekomst av sten, ljud från stängerna, störningar som kan påverka resultatet, krökta stänger eller tappar, onormal förslitning av sonden eller signifikanta nollvärdesförskjutningar.
- Skillnader i nollvärdesavläsningarna före och efter sonderingen anges i kPa. Signifikanta skillnader i kalibreringarna före och efter den aktuella tidpunkten skall också anges samt avvikelser i djupregistreringen.
- I den mån signifikanta nollvärdesförskjutningar uppstått skall anges hur detta hantearats vid databehandlingen.

I plan rekommenderar SGF:s fältkommitté att utförd CPT-sondering redovisas med symbolen



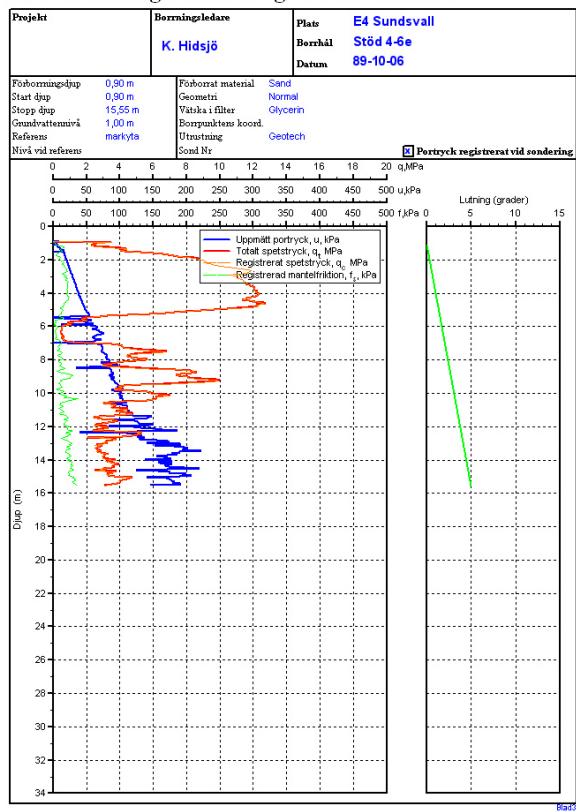
5.4 Vidare databehandling

För vidare databehandling av mätvärdena måste dessa som regel filtreras och medelvärdesbildas. Filtringen görs för att mätvärden som inte är relevanta skall sällas bort. Exempel på sådana värden är de relativt låga värden på spetstryck och porttryck respektive höga värden på mantelfriktion som uppmäts direkt efter att sonderingen återupptagits efter stopp för påskavning av sondstänger och omtag med neddrivningsutrustningen. Andra exempel är ”spikar” i mätvärdena vid passage av snäckskal eller andra grövre partiklar i lera. Medelvärdesbildningen görs för att informationen skall bli hanterlig och relevant.

Innan detta utförs måste de uppritade kurvorna för $q_t, f_t, u, \Delta u, R_{fi}$ och B_q studeras. Djupgränser för signifikanta skikt och lager utvärderas och markeras. Likaså markeras de djupintervall där mätvärdena betraktas som osäkra eller missvisande (t.ex. vid risk för låga porttryck på grund av ofullständig vattenmätning).

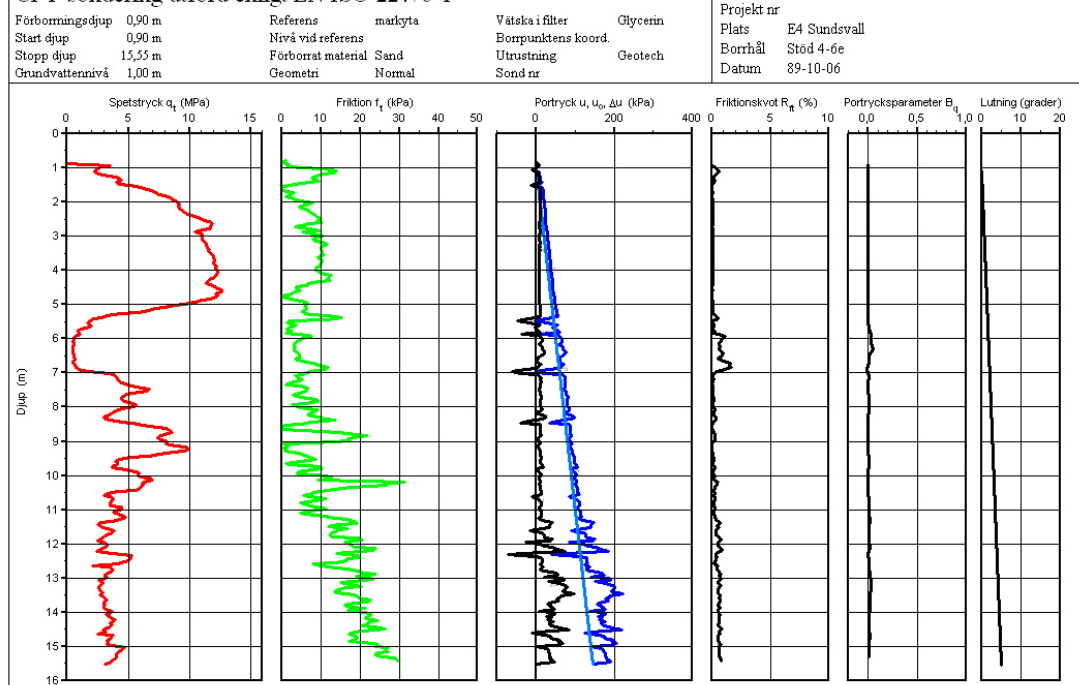
”*Utöver uppritade värden kräver den internationella standarden att alla avlästa värden och tillhörande klockslag ska finnas tillgängliga i tabellform.*”

CPT-sondering utförd enligt EN ISO 22476-1



Statens geotekniska institut
581 93 Linköping, telefon 013-201800, fax 013-201914

CPT-sondering utförd enligt EN ISO 22476-1



Statens geotekniska institut
581 93 Linköping, telefon 013-201800, fax 013-201914

Blad3
2006-12-18

Fig. 25. Uppritning av resultat från CPT-sondering.
a) uppritning av mätvärden med standardskalor.
b) detaljerad uppritning av bas- och stödparametrar med valda skalor

CPT - sondering

Projekt				Plats E4 Sundsvall Borrhål Stöd 4-6e Datum 89-10-06																															
Förbormningsdjup 0,90 m Startdjup 0,90 m Stoppdjup 15,55 m Grundvattenyta 1,00 m Referens märkta Nivå vid referens				Förbortat material Sand Geometri Normal Vätska i filter Glycerin Bormningsledare K. Hidsjö Utrustning Geotech ☒ Porttryck registrerat vid sondering																															
Kalibreringsdata Spets Datum 89-10-02 Areafaktor a 0,580 Areafaktor b 0,014 Inre friktion O_2 8,0 kPa Inre friktion O_2 1,0 kPa Cross talk c_1 0,001 Cross talk c_2 0,001				Inmatade nollvärden <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th></th> <th>Porttryck</th> <th>Friktion</th> <th>Spetstryck</th> </tr> <tr> <td>Före</td> <td>127</td> <td>127</td> <td>127</td> </tr> <tr> <td>Efter</td> <td>127</td> <td>127</td> <td>129</td> </tr> </table>					Porttryck	Friktion	Spetstryck	Före	127	127	127	Efter	127	127	129																
	Porttryck	Friktion	Spetstryck																																
Före	127	127	127																																
Efter	127	127	129																																
Skalfaktorer <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Porttryck Område</th> <th>Faktor</th> <th>Friktion Område</th> <th>Faktor</th> <th>Spetstryck Område</th> <th>Faktor</th> </tr> <tr> <td>0,50 2500</td> <td></td> <td>0,10 2300</td> <td></td> <td>20 2930</td> <td></td> </tr> </table>				Porttryck Område	Faktor	Friktion Område	Faktor	Spetstryck Område	Faktor	0,50 2500		0,10 2300		20 2930		Beräknade nollvärden (kPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th></th> <th>Porttryck</th> <th>Friktion</th> <th>Spetstryck</th> </tr> <tr> <td>Före</td> <td>62,01</td> <td>13,48</td> <td>2116,44</td> </tr> <tr> <td>Efter</td> <td>62,01</td> <td>13,48</td> <td>2149,77</td> </tr> <tr> <td>Diff</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> <td>33,33</td> </tr> </table>					Porttryck	Friktion	Spetstryck	Före	62,01	13,48	2116,44	Efter	62,01	13,48	2149,77	Diff	0,00	0,00	33,33
Porttryck Område	Faktor	Friktion Område	Faktor	Spetstryck Område	Faktor																														
0,50 2500		0,10 2300		20 2930																															
	Porttryck	Friktion	Spetstryck																																
Före	62,01	13,48	2116,44																																
Efter	62,01	13,48	2149,77																																
Diff	0,00	0,00	33,33																																
☒ Använd skalfaktorer vid beräkning				Korrigerig Porttryck (ingen) Friktion (ingen) Spetstryck (ingen)																															
Porttryckobservationer <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Djup (m)</th> <th>Porttryck (kPa)</th> </tr> <tr> <td>1,00</td> <td>0,00</td> </tr> </table>				Djup (m)	Porttryck (kPa)	1,00	0,00	Skiktgränser <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Djup (m)</th> </tr> <tr> <td> </td> </tr> </table>				Djup (m)																							
Djup (m)	Porttryck (kPa)																																		
1,00	0,00																																		
Djup (m)																																			
Klassificering <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Djup (m)</th> <th>Densitet (ton/m³)</th> <th>Flytgräns</th> <th>Jordart</th> </tr> <tr> <td>Från Till</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,00 1,00</td> <td>0,80</td> <td>0,00</td> <td>Sa F</td> </tr> </table>				Djup (m)	Densitet (ton/m ³)	Flytgräns	Jordart	Från Till				0,00 1,00	0,80	0,00	Sa F																				
Djup (m)	Densitet (ton/m ³)	Flytgräns	Jordart																																
Från Till																																			
0,00 1,00	0,80	0,00	Sa F																																
Anmärkning																																			

Figur 25 (forts.) c) eksempel på rapportering

För tunnare skikt måste en manuell bedömning och klassificering göras av jorden. För att en automatisk utvärdering skall kunna göras fordras relevanta mätvärden för såväl spetstryck, friktion som portryck, men för att rättvisande värden av spetstryck och friktion skall erhållas krävs en viss lagertjocklek (0,2 å 0,7 m). Mycket tunnare skikt kan upptäckas och klassificeras genom att den uppmätta profilen för genererade portryck studeras och eventuella variationer kopplas till tendenser till förändringar i spetstryck och friktion på motsvarande nivåer samt jämförs med provtagning och motsvarande genererade portrycksprofiler i närliggande borrhälsar. Denna klassificering av tunna skikt kan endast göras manuellt och bör göras före en eventuellt efterföljande automatisk utvärdering.

Vid filtrering och medelvärdesbildning delas sedan jorden in i djupintervall om förslagsvis 0,2 m. Dessa intervall tillåts dock inte passera en markerad skiktgräns utan denna utgör då

intervallets gräns. För varje intervall avläses de korrigerade parametrarna inom skiktet. Består intervallgränsen av en markerad skiktgräns ignoreras mätvärden på denna. I annat fall tillåts värden på intervallgränsen att ingå i utvärderingen av såväl överliggande som underliggande djupintervall.

Först beräknas medelvärdena för parametrarna inom intervallet och sedan standardavvikelserna. Alla värden med större avvikelse från respektive medelvärde än standardavvikelsen sorteras sedan bort och nya medelvärden beräknas.

Dessa medelvärden används därefter för klassificering av jorden inom respektive intervall och utvärdering av olika egenskaper. Därvid markeras också de intervall där parametrar som ingått i utvärderingen bedömts som osäkra eller irrelevanta.

6. Utvärdering av jordlagerföljd och klassificering av jord

Jordlagerföljd

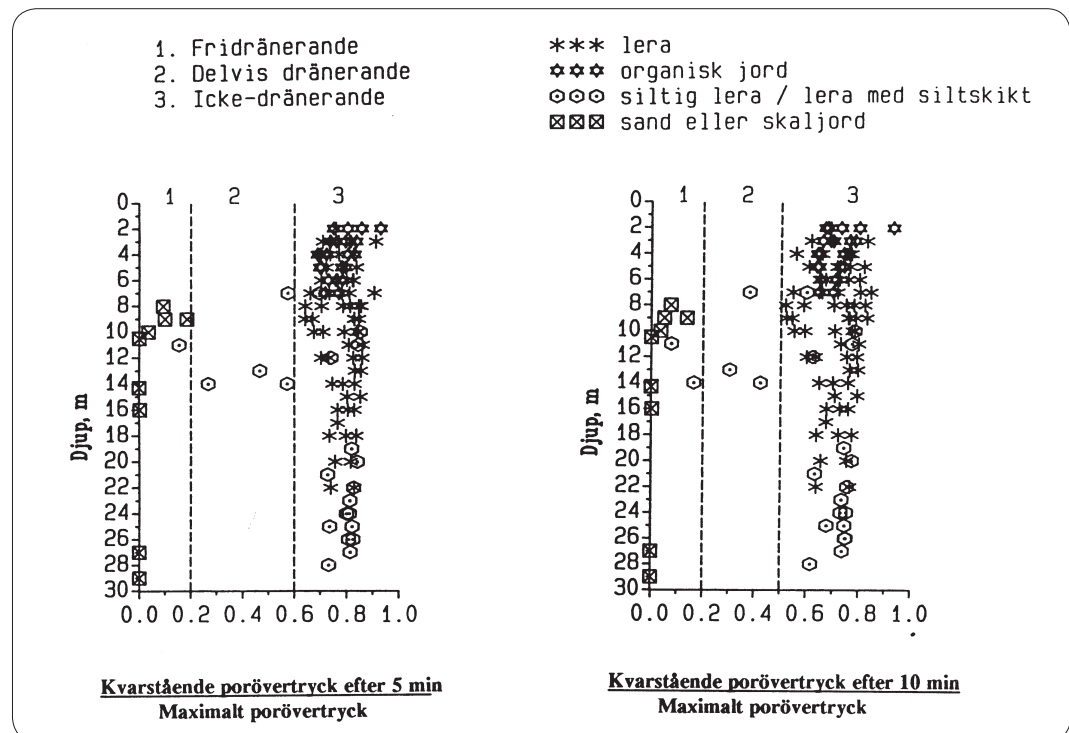
Spetsstryckets storlek är ett mått på jordens fasthet och variation. Spetsstryckskurvans regelbundenhet är också ett mått på kornstorleken i jorden. Upplösningen är relativt god för finkornigare jordar upp till grusfraktionen, där kurvorna blir så oregelbundna att de är svåra att utvärdera. Vid mycket skiktad jord är möjligheten att bedöma fastheten i de olika lagren begränsad. Spetsstrycket påverkas av egenskaperna i såväl ovanliggande som underliggande jord på ett avstånd av 5 – 20 spetsdiameter. Ett fastare lager inbäddat i lösare jord bör vara 0,4 – 0,7 m tjockt för att dess egenskaper skall registreras fullt ut. Lösa skikt i fastare jord bör vara 0,2 – 0,4 m tjocka för att ett korrekt värde på spetsstrycket skall registreras.

Mantelfriktionen är ett mått på bl.a. vilka horisontaltryck som utvecklas vid sonderingen och påverkas således av jordtyp och överkonsolideringsgrad. Övergångarna mellan olika jordtyper markeras främst av att relationen mellan spetsstryck och mantelfriktion, vanligen uttryckt som friktionskvoten $R_{fi} = f_t/q_p$, förändras.

Portrycken som registreras är representativa för jorden vid själva mätpunkten och även mycket tunna skikt kan ofta registreras. Relationen mellan porövertryck och nettospetsstryck $B_q = \Delta u/(q_t - \sigma_{v0})$ är ett mått på vilken jordart som passerar och i normalkonsoliderad lera är det genererade portryckets storlek ett mått på den odränerade skjuvhållfastheten. Tolkningen försvåras av att också andra faktorer, främst överkonsolideringsgraden, också påverkar portrycket. Det är också beroende av var filtret är placerat. Begränsningen i upplösning beror främst på avläsningsfrekvensen och om portrycksmätningssystemet kan hållas fullständigt vätskemättat.

Tolkningsproblem kan uppstå i icke vattenmättad jord, i månggraderad jord och i överkonsoliderad jord liksom t.ex. vid förekomst av stenar och snäckskal i lera. Tolkningen och utvärderingen i finkornig jord underlättas av parallella sonderingar med filtret placerat på spetsens konade del. Kortare stopp i sonderingen och studier av portrycksutjämnningen på mer svårtolkade nivåer kan också vara till god hjälp, Figur 26.

Figur 26.
Klassificering av jords
dräneringsegenskaper
med hjälp av kortare
portrycksutjämnings-
försök.
(Kvarstående poröver-
tryck är uttryckta som
andel av maximalt
porövertryck vid stopp
i sondering. Från
SGI Rapport Nr 42)



För bedömning av speciellt tunnare skikt av t.ex. friktionsjord i lera, vilka kan ha stor betydelse i vissa sammanhang, bör också närliggande sonderingar studeras så att skiktets existens och utbredning kan verifieras. Också tjockare lager kan visa sig vara lokalt inbäddade linser eller ha mycket varierande mäktighet.

Jordartsklassificering

Vid sonderingen mäts normalt spetsmotstånd, portryck och mantelfriktion. Eftersom ett stort antal faktorer påverkar resultaten, kan ingen helt entydig jordartsklassificering erhållas ur enbart dessa parametrar utan ytterligare data behövs. Dessa består främst i en uppmätning av naturlig portrycksprofil in situ, provtagning, fler uppmätta parametrar eller parallella undersökningar med andra metoder. Jordens egenskaper påverkar sonderingsresultaten på bland annat följande sätt:

Spetsmotstånd

- Ju grövre material desto större spetsmotstånd
- Ju högre överlagringstryck desto större spetsmotstånd
- Ju högre horisontaltryck desto större spetsmotstånd
- Ju högre packningsgrad respektive ju fastare lagrat material desto större spetsmotstånd
- Ju högre överkonsolideringsgrad desto större spetsmotstånd

Friktionskvot

- Ju grövre material desto mindre friktionskvot
- Ju fastare lagrad friktionsjord desto mindre friktionskvot
- Ju högre sensitivitet desto mindre friktionskvot
- Ju högre överkonsolideringsgrad i kohe-sionsjord desto större friktionskvot

Portryck

- Ju finkornigare material desto högre portryck
- Ju högre odränerad skjuvhållfasthet i kohe-sionsjord desto högre portryck

- Ju fastare lagrad friktionsjord desto lägre portryck (gäller främst normal filterplacering)
- Ju högre överkonsolideringsgrad desto lägre portryck (gäller främst för normal filterplacering)
- Ju högre sensitivitet desto högre portryck
- Ju grövre material desto lägre portryckskvot
- Ju högre överkonsolideringsgrad desto större skillnad mellan portryck på respektive ovanför spetsens konade del
- Ju finkornigare material desto längre tid erfordras för portrycksutjämning

Som framgår av ovanstående kan någon entydig klassificering inte göras ur dessa ofta mångtydiga samband men de erhållna parametrarna används ändå ofta för en **preliminär klassificering** av jorden. Utöver de uppmätta parametrarna erfordras då främst det initiala portrycket. Vanligen används något av de klassificeringsdiagram som utarbetats empiriskt på basis av hur t. ex. relationen mellan spetsstryck och friktionskvot normalt varierar med jordart. Den härur bedömda jordarten kan sedan kontrolleras mot motsvarande utvärdering med användning av samband för hur relationen mellan portryckskvot och spetsstryck normalt varierar med jordart. Ofta, speciellt för ensgraderade jordar och rena leror, blir klassificeringarna samstämmiga men i andra fall kan motstridiga klassificeringar erhållas. Jordartsbedömningen får då nyanseras och om möjligt göras med utnyttjande av fler bedömningsgrunder. En preliminär klassificering kan göras enligt följande:

Alla kända värden på densiteten för de olika jordlagren används för att beräkna det totala överlagringstryckets förändring med djupet. Med hjälp av de uppmätta portrycken beräknas sedan det effektiva vertikalltrycket. Saknas värden på densiteten från provtagning kan t.ex. värden utvärderade från dilatometerförsök användas. På nivåer eller för hela profiler där densitetsbestämningar saknas får en empirisk utvärdering göras utifrån sonderingsresultaten parallellt med klassificeringen av jorden.

För de översta lagren av torrskorpa eller fyllning ansätts bedömda densiteter. Därefter beräknas total- och effektivtrycken i de underliggande djupintervallen, vilka som regel ges

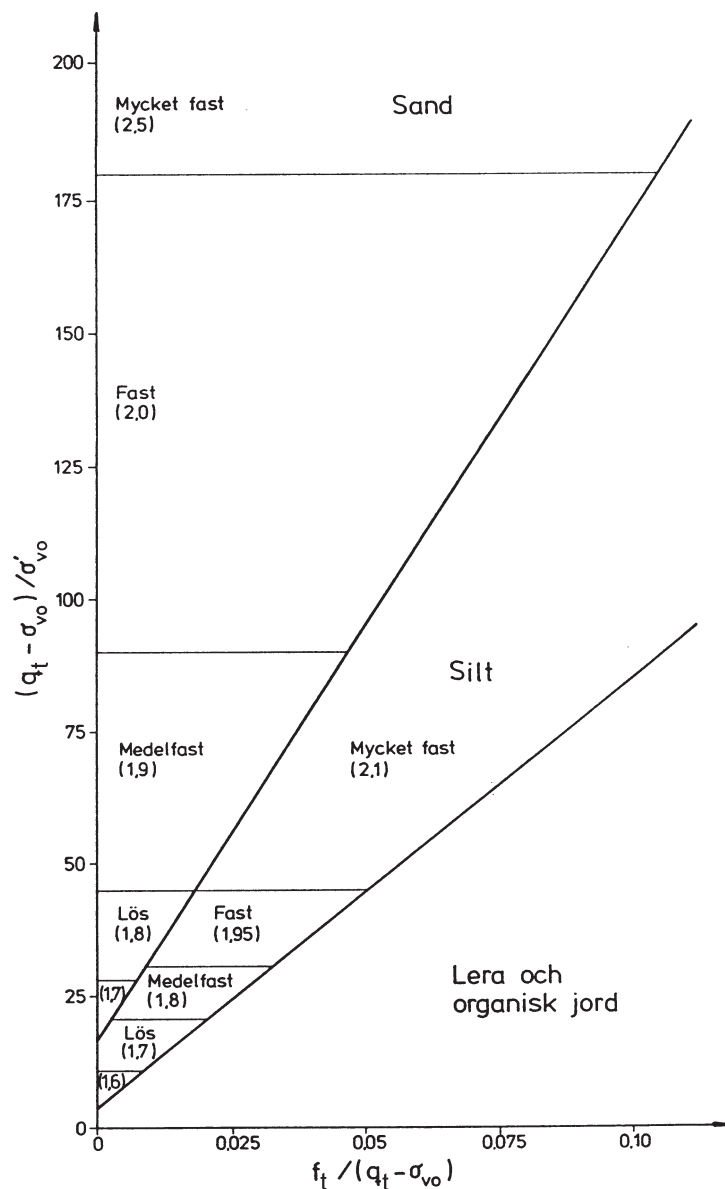
Vid sonderingen mäts normalt spetsmotstånd, portryck och mantelfriktion.

en tjocklek av 0,2 m. Densiteten i det aktuella intervallet ansätts till bestämd densitet eller, då sådan saknas, lika med densiteten i den närmast ovanliggande jorden.

Parametrarna $(q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo}$ och $f_t / (q_t - \sigma_{vo})$ beräknas för intervallet och jordens huvudsakliga karaktär bedöms ur diagrammet i Figur 27.

För de djupintervall där en tidigare klassificering saknas görs **indelningen i sand, silt och finkornigare jord** således främst på basis av relationen mellan spetstryck och rådande spänningstillstånd in situ och vilken friktion som utbildas i relation till detta spetstryck. I lös lera är uppmätt mantelfriktion mycket liten

och relativt osäker, men i starkt överkonsoliderad lera, där spetstrycken kan bli av samma storleksordning som för lös friktionsjord, erhålls oftast pålitliga mått på värdenas storleksordning. Eventuella osäkerheter i mätningen av mantelfriktion har normalt en relativt liten inverkan på denna indelning. Undantag är främst sensitiva och/eller siltiga leror. I dessa kan mantelfriktionen vara mycket låg samtidigt som fastheten i förhållande till överlagringstrycket kan placera jorden i siltregionen i Figur 27. I dessa leror utvecklas dock ofta mycket höga portryck vid sonderingen och en kontroll av om faktorn $B_q [= \Delta u / (q_t - \sigma_{vo})]$ är större eller mindre än 0,6 kan användas för att bedöma om jorden skall klassas som silt eller lera.



Figur 27. Utvärderingsdiagram för silt och sand och skiljelinje för kohe-sionsjord. Siffror inom parentes anger uppskattad vattenmättad skrymdensitet i t/m^3 .

I de fall jorden inom intervallet klassas som sand eller silt bedöms också dess fasthet och, om värden på denna saknas, dess densitet ur samma diagram.

Normalisering genom division med det effektiva vertikalktrycket kan medföra felkällor i ytliga lager där vertikalktrycken är låga. En kontroll får därför göras så att nettospetsstrycket också är $\geq 1,5$ MPa för att jorden skall klassificeras som sand och ≥ 500 kPa för att klassificeras som silt. En kontroll får också göras så att nettospetsstrycket är större än 20 MPa för att sand skall klassas som mycket fast, större än 10 MPa för att klassas som fast, större än 5 MPa för att klassas som medelfast och större än 2,5 MPa för att klassas som lös. För silt är motsvarande värden 10, 5, 2,5 och 1,0 MPa.

Gränserna mellan olika materialgrupper i övrigt är inte distinkta och gäller i princip endast för relativt ensgraderade material. Material vars parametrar plottas i närheten av gränsen mellan sand och silt kan således bestå av silt, sandig silt, siltig sand eller sand. Motsvarande kan material vars värden faller inom siltregionen men i närheten av gränsen för kohe-sionsjord ofta vara lerig. Mer **månggraderade material** som t. ex. lerig sand eller finkornig morän faller troligen inom silt- eller lergränserna beroende på jordens lerhalt. Det faktum

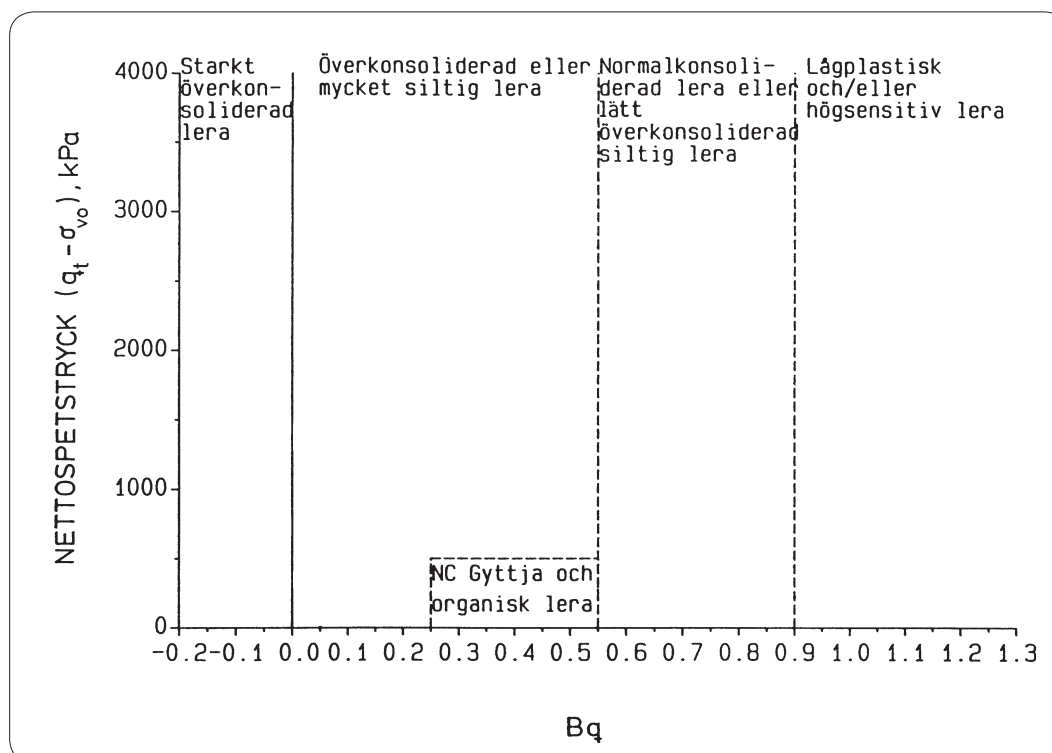
att upplösningen i jordartsklassificeringen är begränsad har lett till att man i denna typ av klassificering ofta hellre talar om "jordens typ av uppträdande ur geoteknisk synvinkel" än direkt klassificering med hänsyn till kornstorleksfördelning. På grund av den komplexa inverkan av olika faktorer på de uppmätta parametrarna bör denna enkla uppdelning baserad endast på spetsstryck och mantelfriktion inte användas utan en parallell kontroll av de genererade porövertrycken. Annars riskeras att t. ex. ett skikt där relativt höga porövertryck utvecklas kan klassificeras som ren sand enbart på grund av att jorden samtidigt är fast och att friktionskvoten är låg.

I de fall jorden i det första diagrammet eller efter kontroller klassificeras som "**lera och organisk jord**" eller om detta är känt från provtagning övergår man till de speciella klassificeringsdiagrammen för denna typ av jord.

Dessa är uppbyggda på parametrarna nettospetsstryck ($q_t - \sigma_{vo}$) och $B_q = \Delta u / (q_t - \sigma_{vo})$.

I diagrammet i Figur 28, delas jorden in i fem huvudgrupper:

- Starkt överkonsoliderad lera
- Överkonsoliderad eller mycket siltig lera
- Normalkonsoliderad lera eller lätt överkonsoliderad siltig lera
- Lågplastisk och/eller högsensitiv lera



Figur 28. Klassificeringsdiagram för lera och organisk jord.

(Klassificering med avseende på fasthet görs på basis av utvärderad odränerad skjuvhållfasthet.)

- Normalkonsoliderad lera eller lätt överkonsoliderad siltig lera
- Normalkonsoliderad siltig lera och/eller högsensitiv lera
- Normalkonsoliderad gyttja eller organisk lera

Med normalkonsoliderad avses överkonsolideringsgrad OCR 1 – 1,5, med överkonsoliderad avses OCR 1,5 – 10 och med starkt överkonsoliderad avses OCR > 10 i enlighet med det svenska klassificeringssystemet.

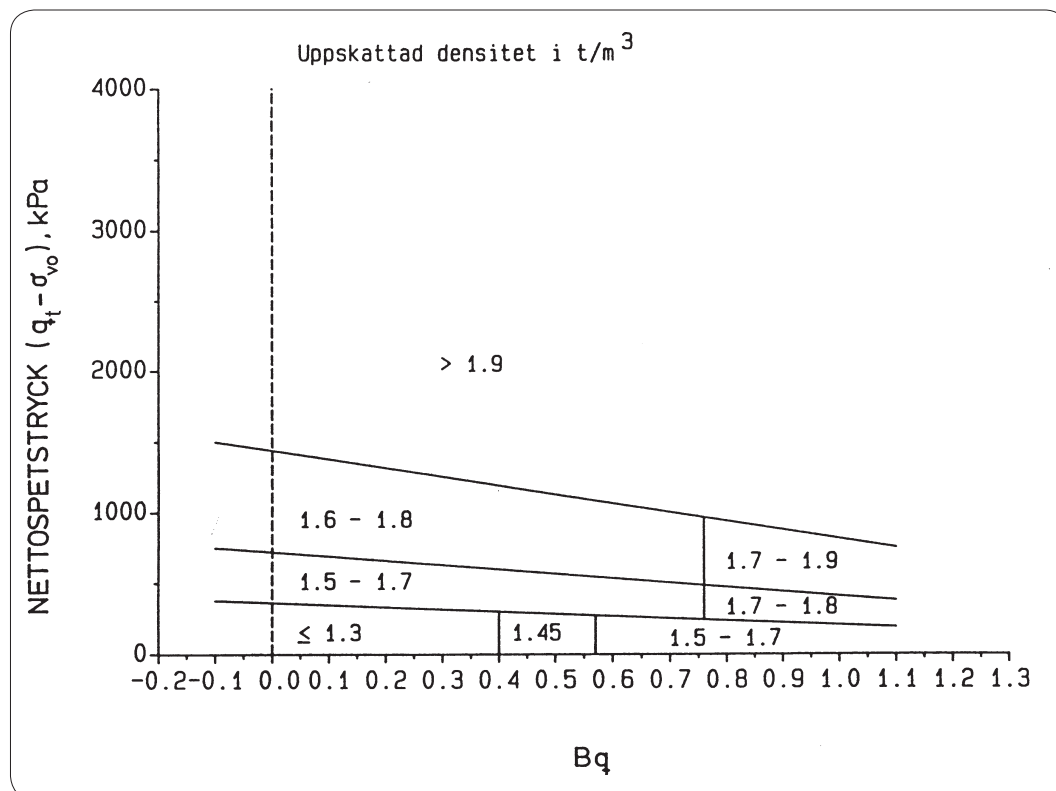
Jordmaterialet i grupperna klassificeras också med avseende på den odränerade skjuvhållfastheten som extremt lös, mycket lös, lös, medelfast, fast, mycket fast eller extremt fast. Denna indelning är preliminär, eftersom förhållandet mellan nettospetstryck och skjuvhållfasthet bland annat beror på jordens flytgräns. Efter en senare noggrannare utvärdering av den odränerade skjuvhållfastheten bör tilläggsbenämningen med avseende på odränerad skjuvhållfasthet justeras enligt:

Odränerad skjuvhållfasthet kPa	Benämning
< 10	Extremt låg
10 – 20	Mycket låg
20 – 40	Låg
40 – 75	Medel
75 – 150	Hög
150 – 300	Mycket hög
> 300	Extremt hög

I denna klassificering är det omöjligt att särskilja normalkonsoliderad **gyttja och organisk lera** från överkonsoliderad lös lera och dessa faller i samma grupp. Överkonsoliderad gyttja kommer främst att klassificeras som lera.

Likaså är det omöjligt att särskilja speciella jordar som sulfidjord från annan typ av silt, lera eller organisk jord.

I de fall värden på densiteten saknas för intervallet, använder man sig av tillhörande densitetsdiagram, Figur 29. Gränserna för olika densitetsgrupper överensstämmer i stort med gränserna i föregående diagram och klassificeringen med avseende på odränerad skjuvhållfasthet, men vissa modifieringar har gjorts med ledning av den empiriska databasen.



Figur 29.
Diagram för uppskattning av densitet i kohesionsjord på basis av resultat från CPT-sondering.

Efter att proceduren för klassificering och eventuell densitetsbedömning utförts i det första intervallet, upprepas den för nästa intervall med insättande av känd eller uppskattad densitet i det nu överliggande intervallet.

I extrema fall kan effektivtrycken i ytliga lager, beräknade med antagen respektive utvärderad densitet inom intervallen, skilja så mycket att det påverkar utvärderingen. Detta kontrolleras och om så är fallet görs klassificeringen om med insättande av bedömt värde på densiteten i det aktuella intervallet.

CPT-sonderingens huvudsyfte är inte klassificering av jorden utan att kartlägga jordlagerföljd och skiktgränser samt att ge en översiktlig bild av jordens egenskaper. Redovisning och utvärdering görs oftast med stöd av dator för att rationalisera det omfattande beräknings- och upprättningsarbetet. I datorprogrammen görs då en preliminär klassificering för de djupintervall där jordarten inte manuellt angivits. På grund av de nämnda svårigheterna och mångtydigheten vid utvärderingen måste denna preliminärt erhållna klassificering kontrolleras manuellt och bedömas med ledning av samtliga sonderingsdata, befintlig provtagning och vad som i övrigt är känt om jordförhållandena. Utvärderingen utförs lämpligen som en interaktiv process.

Även efter en manuell kontroll och bedömning är den erhållna klassificeringen inte entydig utan en indikation på vilken typ av jord som de erhållna värdena normalt är representativa för. Den kan göras säkrare om resultat från parallella sonderingar med alternativ filterplacering eller portrycksutjämningsförsök finns. Sonderingen bör alltid kompletteras med störd provtagning för en korrekt klassificering av jorden och bestämning av t.ex. flytgräns för en noggrannare utvärdering av egenskaperna i lera och gytta. Den erhållna preliminära klassificeringen och utvärderingen är då till stor hjälp vid bedömning av erforderlig provtagning och kan sedan modifieras med hänsyn till resultaten från denna.

”
CPT-sonderingens huvudsyfte är inte klassificering av jorden, utan att kartlägga jordlagerföljd och skiktgränser samt att ge en översiktlig bild av jordens egenskaper.

7. Utvärdering av förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad

En preliminär uppskattning av förkonsolideringstrycket i **kohesionsjord** kan göras ur nettospetstrycket, Figur 30. Denna relation är mycket känslig för såväl jordens plasticitet som dess överkonsolideringsgrad och bör normalt endast utföras då jordens flytgräns är känd.

$$\sigma'_c \approx \frac{q_t - \sigma'_{v0}}{1,21 + 4,4w_L}$$

För **lermorän** kan förkonsolideringstrycket uppskattas ur

$$\sigma'_c \approx \frac{q_t - \sigma'_{v0}}{3}$$

och för **sulfidjord** utvärderas det ur

$$\sigma'_c \approx \frac{q_t - \sigma'_{v0}}{4,75}$$

I de fall portrycket mätts på sondspetsens konnade del kan förkonsolideringstrycket för **normalkonsoliderad och lätt överkonsoliderad jord** uppskattas ur

$$\sigma'_c = \Delta u_1 / a$$

där

$$a = 2,05 + 2,62 \cdot w_L \leq 4,7$$

Efter beräkningen kontrolleras OCR, ($= \sigma'_c / \sigma'_{v0}$). Är denna större än 2 beräknas förkonsolideringstrycket ur

$$\sigma'_c = \frac{\Delta u_1}{1,4 \cdot a \cdot \text{OCR}^{-0,8}}$$

Denna beräkning utförs iterativt.

Saknas värden på jordens flytgräns kan en grövre preliminär uppskattning av förkonsolideringstrycket göras ur

$$\sigma'_c \approx \Delta u_1 / 3,5 \quad \text{för lera}$$

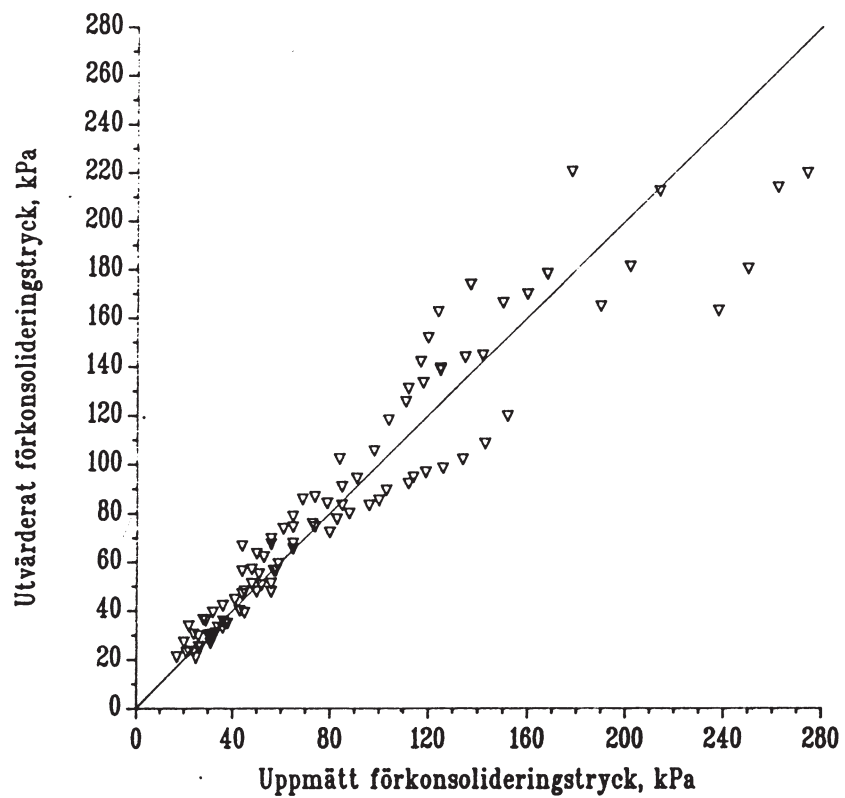
och

$$\sigma'_c \approx \Delta u_1 / 4,7 \quad \text{för gyttja}$$

Förkonsolideringstryck utvärderade ur CPT-sondering kan endast användas som **komplement till ödometerförsök** och aldrig ersätta dessa. Också med denna begränsning fordras att sonderingarna utförs med hög noggrannhet för att en utvärdering av förkonsolideringstrycket skall vara meningsfull.

Efter att förkonsolideringstrycket utvärderats beräknas överkonsolideringsgraden OCR som

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}}$$



Figur 30.
Jämförelse mellan
förkonsoliderings-
tryck utvärderade ur
nettospetsstryck vid
CPT-sonderingar och
referensvärden från
ödometerförsök.

8. Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet i lerjord

Den odränerade skjuvhållfastheten i finkornig jord utvärderas främst ur nettospetstrycket ($q_t - \sigma_{vo}$).

Relationen mellan skjuvhållfastheten och nettospetstrycket är känslig för jordens flytgräns w_L och i viss mån dess överkonsolideringsgrad OCR.

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{13,4 + 6,65w_L} \left(\frac{\text{OCR}}{1,3} \right)^{-0,2}$$

Den så utvärderade skjuvhållfastheten motsvarar direkt den skjuvhållfasthet som erhålls ur korrigerade ving- och fallkonförsök, direkta skjuvförsök och dilatometerförsök, Figur 31.

Då värden på flytgräns saknas kan inget förkonsolideringstryck utvärderas ur resultaten och följaktligen ingen korrektion görs för OCR.

Vid sonderingen provas endast en begränsad jordvolym och i sprickiga och inhomogena jordar kan hållfastheten överskattas. Den utvärderade hållfastheten gäller därför endast i homogen jord. **I mycket sprickig och inhomogen jord kan endast ungefär hälften av denna hållfasthet påräknas.**

Den odränerade skjuvhållfastheten i **sulfdjord** utvärderas ur

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{20} \left(\frac{\text{OCR}}{1,3} \right)^{-0,2}$$

Saknas värden på jordens flytgräns kan en grövre hållfasthetsuppskattning göras enligt

$$c_u \approx \frac{q_t - \sigma_{vo}}{16,3} \quad \text{för lera}$$

och

$$c_u \approx \frac{q_t - \sigma_{vo}}{24} \quad \text{för gytta}$$

Alternativt till nettospetstrycket kan det genererade poröverttrycket användas för utvärdering av motsvarande odränerade skjuvhållfasthet. Den främsta anledningen till att använda poröverttrycket för denna utvärdering är att upplösningen och mätnoggrannheten ofta är bättre för denna parameter i lösa jordar. Det är då främst poröverttrycket vid spetsens konade del, Δu_1 som kan användas. **För normalkonsoliderad och lätt överkonsoliderad homogen finkornig jord** kan hållfastheten utvärderas ur

$$c_u = \frac{\Delta u_1}{16}$$

Denna relation är något beroende av jordens plasticitet och/eller sensitivitet, S_p , och kan utvecklas till

$$c_u = \Delta u_1 / (17,23 - 1,65 \cdot w_L)$$

alternativt

$$c_u = \Delta u_1 / (13 + \ln S_p)$$

Relationen är också känslig för jordens överkonsolideringsgrad och homogenitet och bör därför endast användas i homogen normalkonsoliderad och lätt överkonsoliderad jord.

En liknande relation kan erhållas för det genererade poröverttrycket vid den normala filterplaceringen och för normalkonsoliderad jord, [$c_u \approx \Delta u_2 / (14,1 - 2,8 \cdot w_L)$]. Detta samband är dock så känsligt för jordens överkonsolideringsgrad, och i viss mån också för sondens exakta geometri, att det **bara kan användas i specialfall.**

Noggrannheten i skjuvhållfasthetsbestämningen beror främst på med vilken noggrannhet (sonderingsklass) sonderingen utförts. Önskas en mycket noggrann bestämning bör resultaten dessutom kalibreras lokalt mot direkta skjuvförsök.

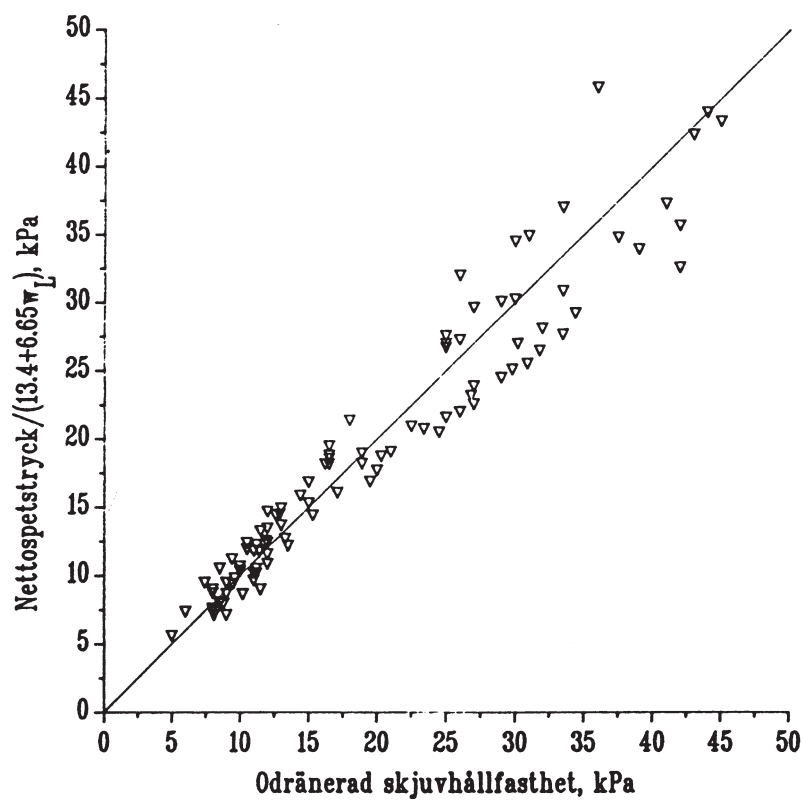
Den odränerade skjuvhållfastheten i *lermorän* utvärderas ur

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{11}$$

Alternativt kan den utvärderas empiriskt som

$$c_u = 0,4 \cdot \sigma'_{vo} \cdot OCR^{0,85}$$

där OCR uppskattas ur sonderingsresultaten.



Figur 31.
Jämförelse mellan odränerad skjuvhållfasthet utvärderad ur nettoppetstryck vid CPT-sondering i svenska normalkonsoliderade och endast svagt överkonsoliderade leror och referensvärden från direkta skjuvförsök och korregerade vingförsök.

9. Utvärdering av lagringstäthet

Lagringstätheten i *friktingsjord* kan uppskattas från spetstrycksonderingsresultat och uttrycks då som regel som relativ lagringstäthet I_D .

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{c_{\max} - c_{\min}}$$

där e är portalet.

Uppskattningen görs ur förhållandet mellan spetstryck och effektivt överlagringstryck. Detta förhållande beror förutom på lagringstätheten också på jordens inre friktion, kornfördelning och kompressionsegenskaper samt på dess överkonsolideringsgrad och därmed sammanhängande horisontaltryck. Den uppskattning av lagringstätheten som kan göras gäller därför ***endast för normalkonsoliderad och relativt ensgraderad sand med huvudsakligen en blandning av kvarts- och fältspatmineral***. För denna typ av sand kan den relativa lagringstätheten uppskattas ur

$$I_D \approx -131 - 66 \log \left(\frac{q_t}{\sqrt{\sigma'_{vo}}} \right), \%$$

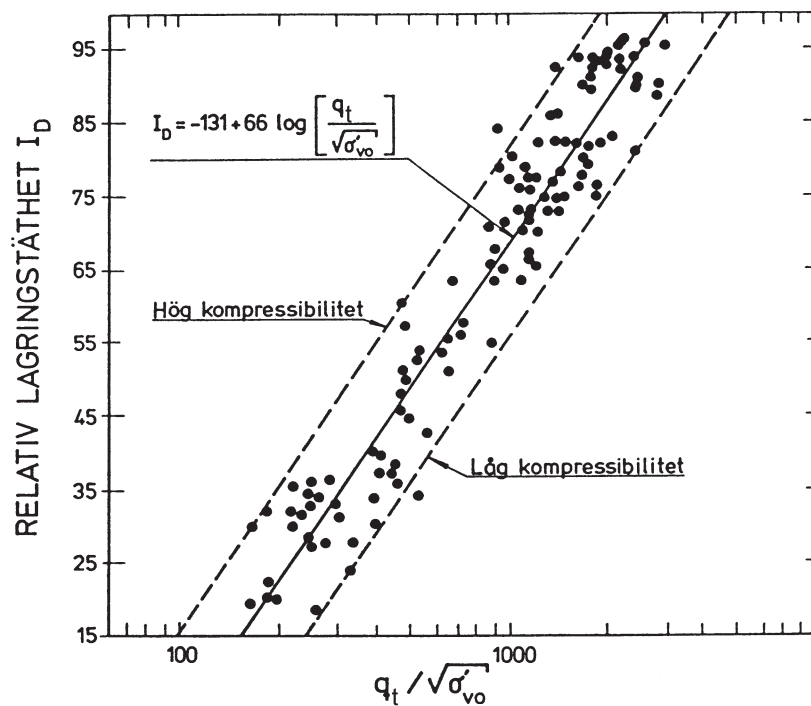
där q_t och σ'_{vo} är yttryckta i kPa (Lancelotta 1983).

Spridningen är normalt inom cirka $\pm 10 \%$ för normalkonsoliderad sand och påverkas främst av jordens kompressibilitet, Figur 32.

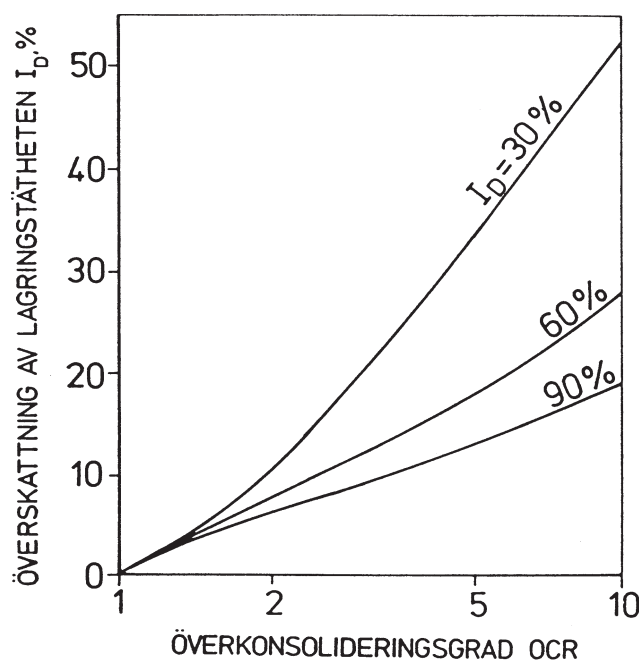
För överkonsoliderad sand överskattas lagringstätheten. Detta gäller speciellt löst lagrad sand, Figur 33.

För grövre material än sand bör den utvärderade lagringstätheten minskas med 10 – 15 % enligt Lunne och Christoffersen (1983).

Sambanden mellan spetstryck, effektivt överlagringstryck och lagringstäthet är främst framtagna genom storskaliga laborieförsök. En viss osäkerhet råder om giltigheten för naturligt avsatta jordar och alltför långtgående slutsatser bör undvikas.



Figur 32.
Samband mellan
relativ lagringstäthet,
spetstryck och effek-
tivt överlagringstryck
i normalkonsoliderad
ensgraderad kvarts-
sand. (efter Lance-
lotta 1983)



Figur 33.
Överskattning av lag-
ringstäthet i sand på
grund av överkonso-
lidering. (efter Baldi et
al. 1986)

10. Utvärdering av friktionsvinkel i sand

Också friktionsvinkeln i **friktingsjord** utvärderas ur förhållandet mellan spetstrycket och det effektiva vertikalktrycket. Egentligen är det främst det horisontella trycket som är styrande för sambandet och innan utvärderingen utförs bör någon form av uppskattning av jordtrycks-koefficienten göras.

En schablonmässig uppskattning av jordtrycks-koefficienten kan göras enligt följande:

- Vilotrycks-koefficienten $K_o \approx 1 - \sin \phi'$ i normalkonsoliderad jord
- Jordtrycks-koefficienten minskar ned mot aktivt jordtryck K_A i övre delen (aktivzonen) i branta slänter
- Jordtrycks-koefficienten ökar gradvis med överkonsolideringsgrad och i passivzoner mot maximalvärdet vid fullt utbildat passivt jordtryck, K_p .

Därefter kan friktionsvinkeln utvärderas ur diagrammet i Figur 34.

Som framgår av figuren är det ingen större skillnad, (maximalt 0,5°), i utvärderad friktionsvinkel mellan antagande av aktivt jordtryck och vilojordtryck. För kraftigt överkonsoliderad jord och passivt jordtryck kan friktionsvinkeln överskattas med maximalt cirka 10 % om inte hänsyn tas till de högre horisontaltrycken.

Friktionsvinkeln är ingen konstant parameter utan varierar med spänningsnivån i jorden, främst på grund av kornens krossning och jordmassans kompressibilitet, samt belastningsfallet (se SGI Information 8). Friktionsvinkeln ϕ' kan således skrivas

$$\phi' = \phi'_{cv} + \mu \cdot F \cdot I_D \cdot [(Q - \ln p') - I]$$

där

ϕ'_{cv} = Friktionsvinkel vid kritisk lagring

μ och Q = Materialparametrar

$F = 3$ för triaxialfallet och 5 för plane-strain

I_D = Relativ lagringstäthet (materialparameter)

p' = Medeleffektivtryck, $(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$

Den ur spetstrycks-sonderingen utvärderade friktionsvinkeln gäller för triaxialfallet och utvärderas vid en spänningsnivå som varierar mellan cirka $0,11 \cdot q_t$ vid $\phi' = 30^\circ$ och cirka $0,06 \cdot q_t$ vid $\phi' = 45^\circ$ (Bellotti et al. 1989).

För vanlig sand, med en blandning av mineralen kvarts och fältspat, kan ϕ'_{cv} antas vara omkring 34° och parametern $Q \approx 10,5$. Skillnaden mellan ϕ' och ϕ'_{cv} är den sammanlagda effekten av parametrarna μ , F och I_D och den relativa spänningsnivån $[(Q - \ln p') - 1]$. De tre parametrarna μ , F och I_D liksom deras produkt, kan i detta sammanhang betraktas som materialkonstanter för jorden, såvida inte denna skall packas eller grävas om.

Då ϕ' och tillhörande p' vid sonderingen är kända, kan produkten $\mu \cdot F \cdot I_D$ beräknas och friktionsvinkeln räknas om till varje annan spänningsnivå av intresse. Detta visas grafiskt i Figur 35.

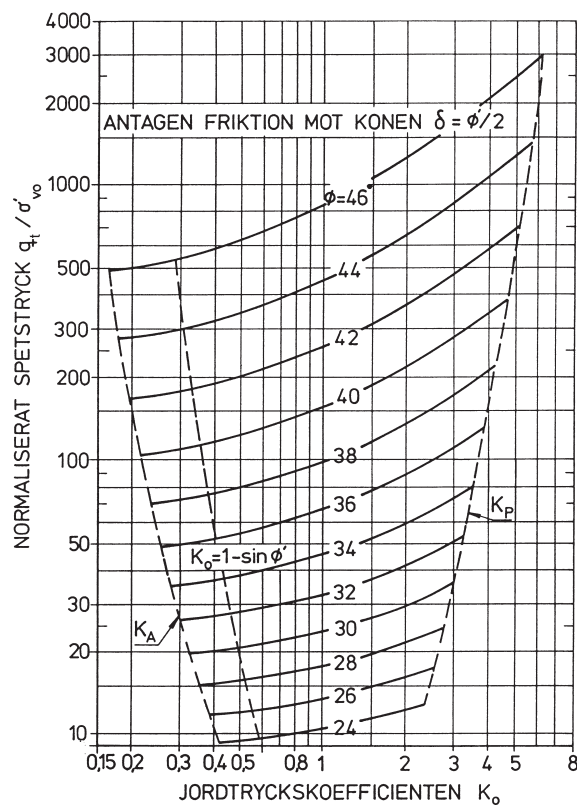
Förutsättningen för att denna utvärdering skall kunna användas är att jorden består av en någorlunda normal kvarts-fältspatsand.

Osäkerheten ökar med ökande värde på ϕ' , men å andra sidan ökar oftast också säkerhetsmarginalen, då det i de flesta fall är friktionsvinkeln vid plane-strain snarare än friktionsvinkeln i triaxialfallet som är dimensionerande vid konstruktioner. Möjlighet finns att räkna om den utvärderade friktionsvinkeln till plane-strain fallet med de formler som givits, men med tanke på den ovannämnda osäkerheten kan detta inte rekommenderas för normala användningsområden.

Vid beräkning av **bärighet för fundament** tar man oftast hänsyn till att det fordras relativt stora deformationer för att mobilisera friktionsvinkeln i löst lagrad sand. För ytligt grundlagda fundament uppskattas friktionsvinkeln i sand då ur

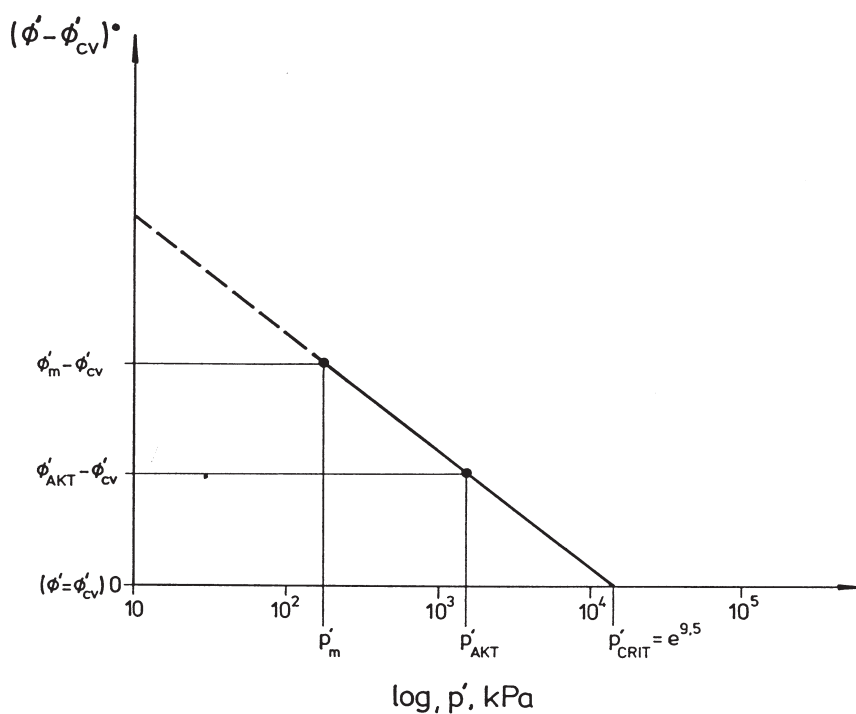
$$\phi' \approx 29 + 2,8 q_c^{0,45}, \text{ grader.}$$

Där q_c är spetstrycket i MPa.



σ'_{vo} = effektivt överlagringstryck
 K_A = jordtryckskoefficient vid aktivt tryck
 K_P = jordtryckskoefficient vid passivt tryck

Figur 34.
Diagram för utvärdering av friktionsvinkel ur resultat från CPT-sondering. (efter Marchetti 1985)



Figur 35. Modifiering av utvärderad friktionsvinkel med hänsyn till spänningsnivå.

ϕ' = uppmätt friktionsvinkel vid spänningsnivån p'_m

ϕ'_{AKT} = sökt friktionsvinkel vid spänningsnivån p'_{AKT}

11. Utvärdering av hållfasthets- egenskaper i siltjord

De hållfasthetsegenskaper som kan utvärderas ur CPT-resultat i silt och anses relevanta beror på om jorden uppträtt odränerat, dränerat eller delvis dränerat under sonderingen. Detta måste bedömas med ledning av genererade portryck, jordartklassificering av upptagna prover samt eventuella uppmätta portrycksutjämningsförlöpp.

Kan man med ledning av detta anta att jorden på den aktuella nivån uppträtt **odränerat** under sonderingen kan också den odränerade skjuvhållfastheten utvärderas och antas ha en viss giltighet, annars inte. Det är främst i mycket lerig eller organisk silt som den odränerade skjuvhållfastheten kan utvärderas ur CPT-sonderingar.

Den odränerade skjuvhållfastheten i siltjord utvärderas ur

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{14,5}$$

Giltigheten för utvärderade dränerade parametrar fordrar en motsvarande noggrann bedömning. Om inga påtagliga portryck genererats under sonderingen, dvs. portrycksparametern $B_q \leq 0,03$, kan sonderingen antas ha utförts under praktiskt taget **dränerade förhållanden** och friktionsvinkeln kan då utvärderas med samma metoder som används för sand, se Kapitel 10.

Vid beräkning av **bärighet för fundament** tar man oftast hänsyn till att det fordras relativt stora deformationer för att mobilisera friktionsvinkeln. Dessa är ofta större i silt än i sand. För ytligt grundlagda fundament uppskattas friktionsvinkeln i silt därmed ur

$$\phi' \approx 26 + 2,8 q_c^{0,45}, \text{ grader.}$$

Där q_c är spetstrycket i MPa.

Om större portrycksförändringar genererats under sonderingen kan den utvärderingsmetod som föreslagits av Senneset och Janbu (1984)

användas med vissa förbehåll. Det faktum att höga genererade portryck uppmäts betyder att sonderingen skett under odränerade eller endast delvis dränerade förhållanden. Detta innebär att de utvärderade hållfasthetsegenskaperna gäller för fall med konstant volym eller begränsade möjligheter till volymändring. Resultaten kan därför endast användas för fall med konstanta eller sjunkande spänningsnivåer, t.ex. stabilitet i naturliga slänter, schakt-slänter etc, men inte i belastningsfall som innebär en pålastning.

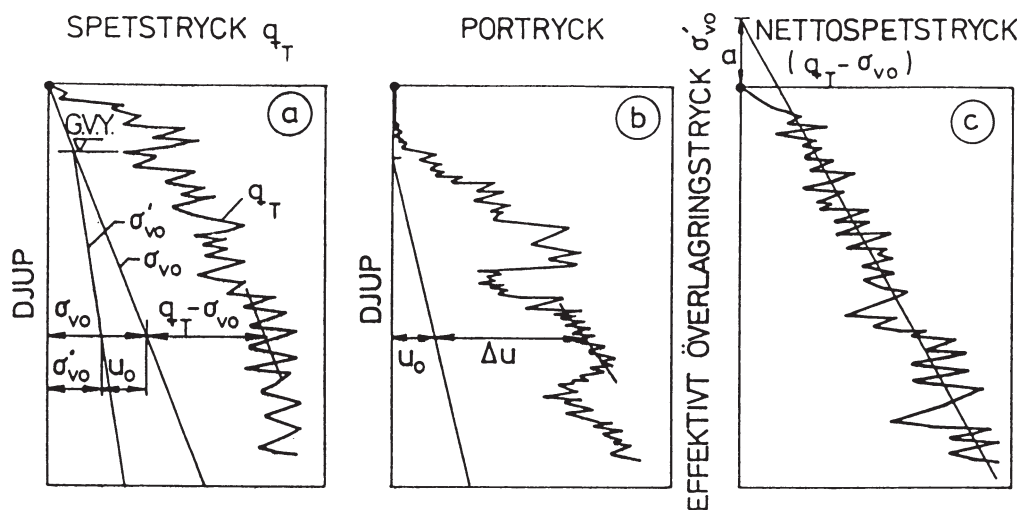
I denna metod studeras kurvorna för spets-tryck och portryck mot djupet och eventuellt ritas ytterligare ett diagram med nettospets-trycket, $(q_t - \sigma_{v0})$, mot det effektiva överlagringstrycket, Figur 36.

För det aktuella djupintervallet bedöms karakteristiska värden för q_p , σ_{v0} , Δu ($= \Delta u_2$) och a , där $a = c' \cot \phi'$. Den grafiska utvärderingen av a kan vara problematisk, speciellt vid varierande jordlager och skiktad jord. I de flesta fall antas dock a -värdet, vilket normalt är av underordnad betydelse, med ledning av jordartsklassificeringen enligt Tabell 3.

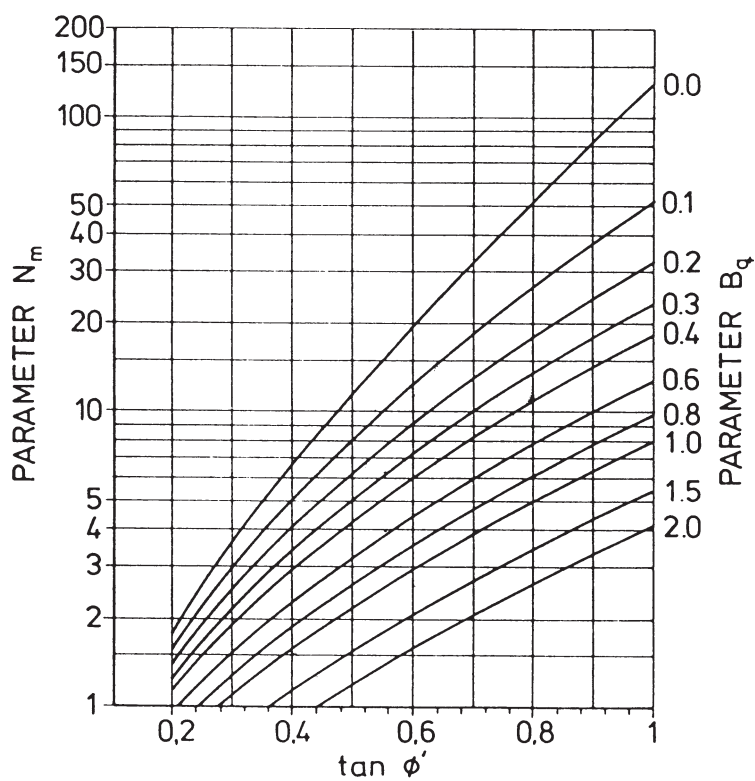
Bedömd fasthet	Hållfasthetsparameter	
	a	c'
kPa	kPa	kPa
Lös	0 – 5	0 – 3
Medelfast	5 – 15	3 – 9
Fast	15 – 30	9 – 20

Parametrarna B_q och $N_m = (q_t - \sigma_{v0})/(\sigma'_{v0} + a)$ beräknas och friktionsvinkeln ϕ' utvärderas sedan ur diagrammet i Figur 37.

Tabell 3.
Typiska värden för
hållfasthetsparametern
 a (respektive c') i siltjord,
(Senneset och Janbu
1984)



Figur 36. Presentation av resultat från CPT-sondering och erforderliga parametrar för utvärdering av effektiva hållfasthetsparametrar. Efter Senneset och Janbu (1984).



Figur 37. Diagram för utvärdering av friktionsvinkel ur resultat från CPT-sonderingar då porövertryck uppstått under sonderingen. Efter Senneset och Janbu (1984).

12. Utvärdering av deformationsegenskaper

Utvärdering av deformationsegenskaper görs normalt inte direkt ur sonderingsresultaten. I friktionsjord använder man sig istället av någon av de väl beprövade beräkningsmetoder som utarbetats speciellt för spetstrycksondering (se t.ex. Bergdahl et al. 1993). Dessa metoder är dock endast avsedda för beräkning av sättningar och bärlighet för plattor på sand och grovsilt vid normala grundläggningsfall.

Vid andra belastningsfall på sand kan kompressionsmoduler och elasticitetsmoduler uppskattas med hjälp av Figur 38 a och b. För den aktuella nivån går man in i diagrammen med aktuellt överlagringstryck och representativt spetstryck och avläser kompressionsmodul respektive elasticitetsmodul. Elasticitetsmodulen är inte konstant utan minskar med ökande skjuvspänningsnivå. Två moduler, E_{25} och E_{50} , är angivna och motsvarar modulerna vid 25 % respektive 50 % av brottlasten. Vid normala säkerhetsfaktorer kan E_{25} anses vara mest representativ.

Kompressionsmodulen för **normalkonsoliderad sand** kan också beräknas ur sambandet

$$M \approx 14,48 q_t \left[\frac{\sigma'_{vo}(1 + 2K_0)}{300} \right]^{-0,116} e^{-1,123 I_D}$$

där σ'_{vo} är uttryckt i kPa, $K_0 \approx 0,45$, I_D beräknas ur sonderingsresultaten och e är naturliga logaritmens bas, (Jamiolkowski et al. 1988).

För **överkonsoliderad sand** multipliceras denna modul med en faktor av storleken $OCR^{0,313}$, men varken överkonsolideringsgrad, K_0 eller I_D i överkonsoliderad jord kan utvärderas ur sonderingsresultaten.

Ovan nämnda beräkningsmetoder och moduler gäller därför främst för normalkonsoliderad sand. Överkonsolidering och packning ökar jordens styvhet väsentligt men detta återspeglas endast i mindre grad i sonderingsresultaten. Önskar man utnyttja dessa förbättrade egenskaper till fullo, får som regel någon annan provningsmetod användas.

Enligt svensk empiri utvärderas den modul som används för beräkning av sättningar vid belastning av sand och grovsilt ur

$$E \approx 4,3 q_t^{0,93} \leq 90 \text{ MPa}$$

där q_t är spetstrycket i MPa.

Modulen betecknas här som en elasticitetsmodul, men används lika ofta som en kompressionsmodul.

Lunne och Christophersen (1983) sammanställde resultatet från olika försök på sand i kalibreringskammare. Enligt dessa kan kompressionsmodulen för **normalkonsoliderad sand** utvärderas ur

$$\begin{aligned} M &= 4 q_t && \text{om } q_t \leq 10 \text{ MPa} \\ M &= 40 \text{ MPa} + 2(q_t - 10) && \text{om } 10 \text{ MPa} < q_t \leq 50 \text{ MPa} \\ M &= 120 \text{ MPa} && \text{om } q_t > 50 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dessa värden liknar de som erhålls ur den svenska empirin, bortsett från det maximala gränsvärdet.

För **överkonsoliderad sand** anger Lunne och Christophersen att

$$\begin{aligned} M &= 5 q_t && \text{om } q_t \leq 50 \text{ MPa} \\ M &= 250 \text{ MPa} && \text{om } q_t > 50 \text{ MPa} \end{aligned}$$

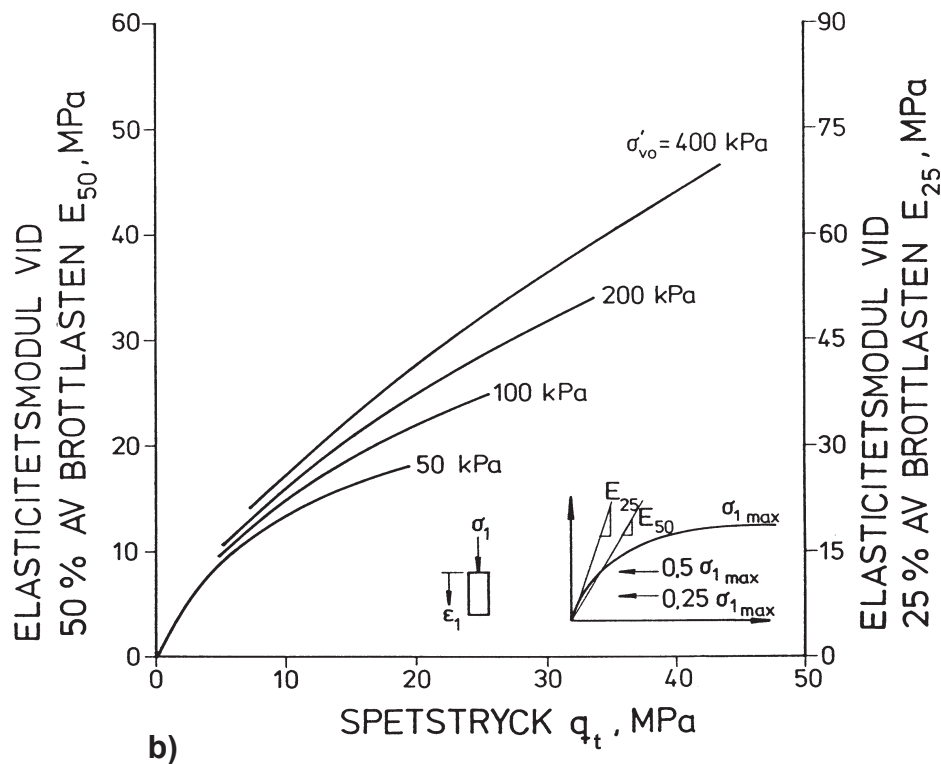
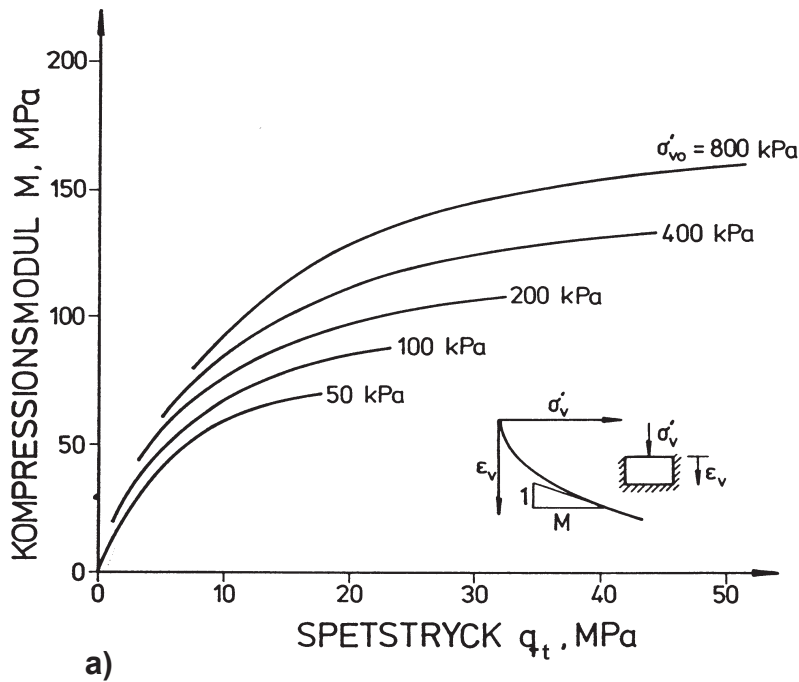
För de senare relationerna återstår problemet att förvissa sig om att jordens överkonsolideringsgrad är tillräcklig för att denna modul skall vara relevant.

Kompressionsegenskaper i **kohesionsjord** bör inte utvärderas direkt ur resultaten från CPT-sondering, vilken i denna typ av jord sker under i det närmaste helt odränerade förhållanden. För utvärdering av dessa egenskaper krävs normalt provtagning och ödometerförsök.

Moduler för beräkning av sättningar i överkonsoliderad kohesionsjord och för beräkning av elastiska initialsättningar uppskattas dock ofta empiriskt med ledning av den odränerade

skjuvhållfastheten. För detta ändamål kan också den ur CPT-sonderingen utvärderade odränerade skjuvhållfastheten användas.

Noggrannare mätningar av jordens elastiska egenskaper vid små deformationer kan göras om konen utrustas med en hastighetsgivare och seismiska försök utförs.



Figur 38.
Diagram för utvärdering av deformations-egenskaper i normal-konsoliderad sand. (efter Robertson and Campanella 1988)
a. Kompressionsmodul.
b. Elasticitetsmodul.

13. Exempel

”
CPT-sonderingar redovisas och utvärderas oftast med hjälp av datorprogram. Ett sådant program, CONRAD, har utvecklats vid SGI.

CPT-sonderingar redovisas och utvärderas oftast med hjälp av datorprogram. Ett sådant program, CONRAD, har utvecklats vid SGI. Detta program är baserat på det arbetssätt som beskrivs i denna skrift. Resultaten presenteras i form av standarduppritningar, diagram för bas och stödparametrar i anpassade skalor samt diagram för utvärderade jordarter och jordparametrar.

I de senare diagrammen redovisas utvärderad jordart med tilläggsbeteckningar beträffande bedömd fasthet samt för lera i förekommande fall också tillägg för bedömda egenskaper som överkonsolidering, siltighet och sensitivitet. Dessutom redovisas bedömd odränerad skjuvhållfasthet i kohesionsjord respektive friktionsvinkel och moduler i sand och silt samt lagringstäthet i sand.

I de fall en noggrannare utvärdering gjorts med hjälp av bestämda flytgränser, kan ytterligare ett diagram uppritas över utvärderad spänningssituation i profiler med kohesionsjord. Om så önskas, kan dessutom en fullständig utskrift fås av samtliga uppmätta och beräknade parametrar samt sammanställningsdiagram för resultat från flera sonderingar.

Som typexempel på resultat från CPT-sondering visas uppmätta och utvärderade parametrar från en profil med lös och delvis organisk lera och en profil med sand och silt samt fastare lera.

Exempel 1:

Profil med lös lera

Profilen med lös lera och gyttjig lera är från Tuve på Hisingen på gränsen mellan Bohuslän och Västergötland. Försöksplatsen ligger inom Göteborgs kommun, strax norr om området för det större jordskredet 1977. Jordartsförhållandena är i detalj beskrivna i SGI Rapport No 18 och 42.

De översta 6 metrarna av jordprofilen består av organisk lera med inslag av växtrester och skal. Torrskorpan är endast en halv meter tjock. Under 6 meters djup är det organiska

innehållet oväsentligt men skalinnehållet ökar. På 6 till 8 meters djup sker en markant förändring i jordens egenskaper. Först kommer en zon med inslag av tunna siltskikt och sedan en lera med högre värden på såväl flytgräns, vattenkvot, skjuvhållfasthet som förkonsolideringstryck än de närmast ovanliggande lerlagren. Detta lerlager fortsätter sedan ned till cirka 23 meters djup, där leran blir siltigare och siltskiktad. Mellan 24 och 25 meters djup påträffas fast botten i form av ett tunt sandlager på berg.

Lerans flytgräns avtar från över 110 % närmast under torrskorpan till omkring 95 % på 6 meters djup. Den sjunker till omkring 80 % i lagren med högre skal- och siltinnehåll för att efter den språngvisa förändringen åter öka till omkring 95 % på 9 m djup. Den sjunker sedan gradvis med djupet till cirka 50 % på 23 meters djup. Vattenkvoten är genomgående cirka 10 % högre än flytgränsen i profilen.

Densiteten är cirka 1,4 t/m³ i den organiska leran, omkring 1,5 t/m³ mellan 7 och 10 meters djup och ökar sedan gradvis till att bli 1,7 å 1,8 t/m³ i bottenlagren.

Den fria grundvattenytan ligger mycket högt. Vid provningstillfället var den cirka 0,4 m under markytan men området är säsongvis översvämmat. Försöksplatsen ligger i botten av en dalgång och vatten infiltrerar i sandlagret närmast ovan berget vid dalsidorna, varför vattentrycket i bottenlagren är artesiskt. Vid provningstillfället motsvarade det en fri vattenyta 3,25 meter över markytan.

På grund av porttryckssituationen är effektivspänningarna i jorden relativt låga. Förkonsolideringstrycken och skjuvhållfastheterna är också låga men motsvarar ändå en överkonsolideringsgrad av 1,5 – 2 för större delen av profilen.

Resultat från en CPT-sondering enligt klass A utvärderade med användande av kända flytgränser samt tillhörande rapport redovisas i diagram 1:1 – 1:4.

Specialförsök med portrycksutjämning vid stopp i sonderingen visade att leran på 6 och 8 meter kan klassas som icke dränerande enligt Figur 26, medan leran på 7 m djup i zonen med tunna siltskikt i samma diagram hamnade strax under gränsen för icke dränerande och därmed kan betraktas som delvis dränerande.

Exempel 2:

Profil med sand, silt och halvfast till fast lera

Detta exempel kommer från undersökningar för en järnvägsbro över Hybo flottningskanal på linjen mellan Bollnäs och Ljusdal i Hälsingland. Sonderingarna utfördes vintertid från isen.

Under en meters vattendjup består jorden av lös sand – siltig sand ner till 8 m djup. Mellan cirka 8 och 12 meters djup finns ett fast lagrat siltlager. Därunder vidtar ett 4 – 5 m tjockt halvfast till fast lerlager som på 15 – 17 m djup åter övergår till fast lagrad silt och sand. Sonderingarna har inte drivits vidare då det inte ansetts nödvändigt för problemställningen och då detta skulle krävt en bättre förankring av neddrivningsutrustningen.

Portrycken i det övre sandlagret och de fasta bottenlagren är hydrostatiskt från vattenytan och detta kan antas vara fallet också för de finkornigare jordlagren.

Resultat från en av CPT-sonderingarna enligt klass B och tillhörande rapport redovisas i diagram 2:1 – 2:4.

En första klassificering med programmet indikerade ett par sandskikt i intervallet 9,8 till 10,6 m. Med ledning av portryck och portryckskvot har hela intervallet 9,1 till 11,4 m sedan angivits som silt varpå programmet körts om.

CPT-sondering utförd enligt EN ISO 22476-1

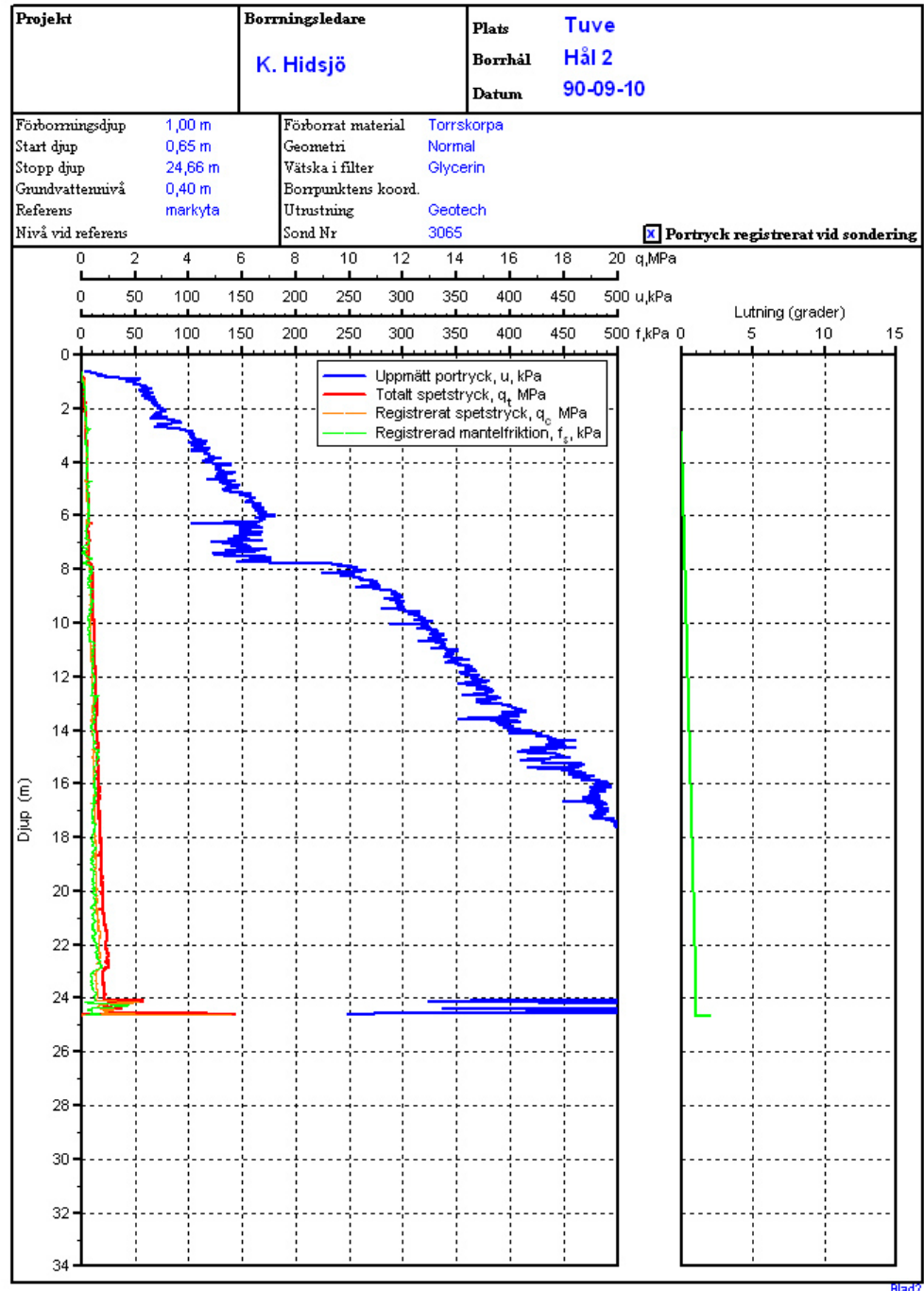
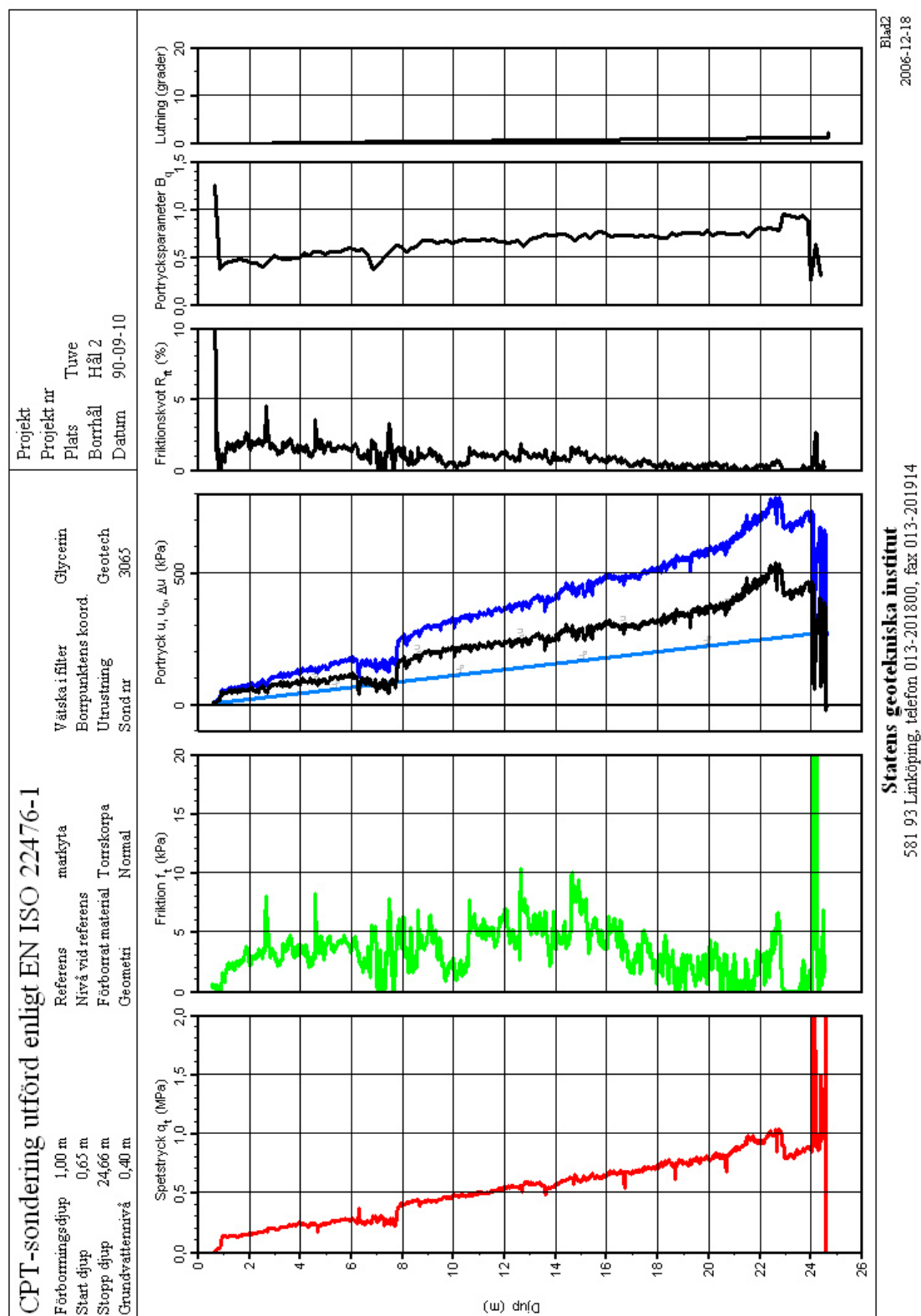
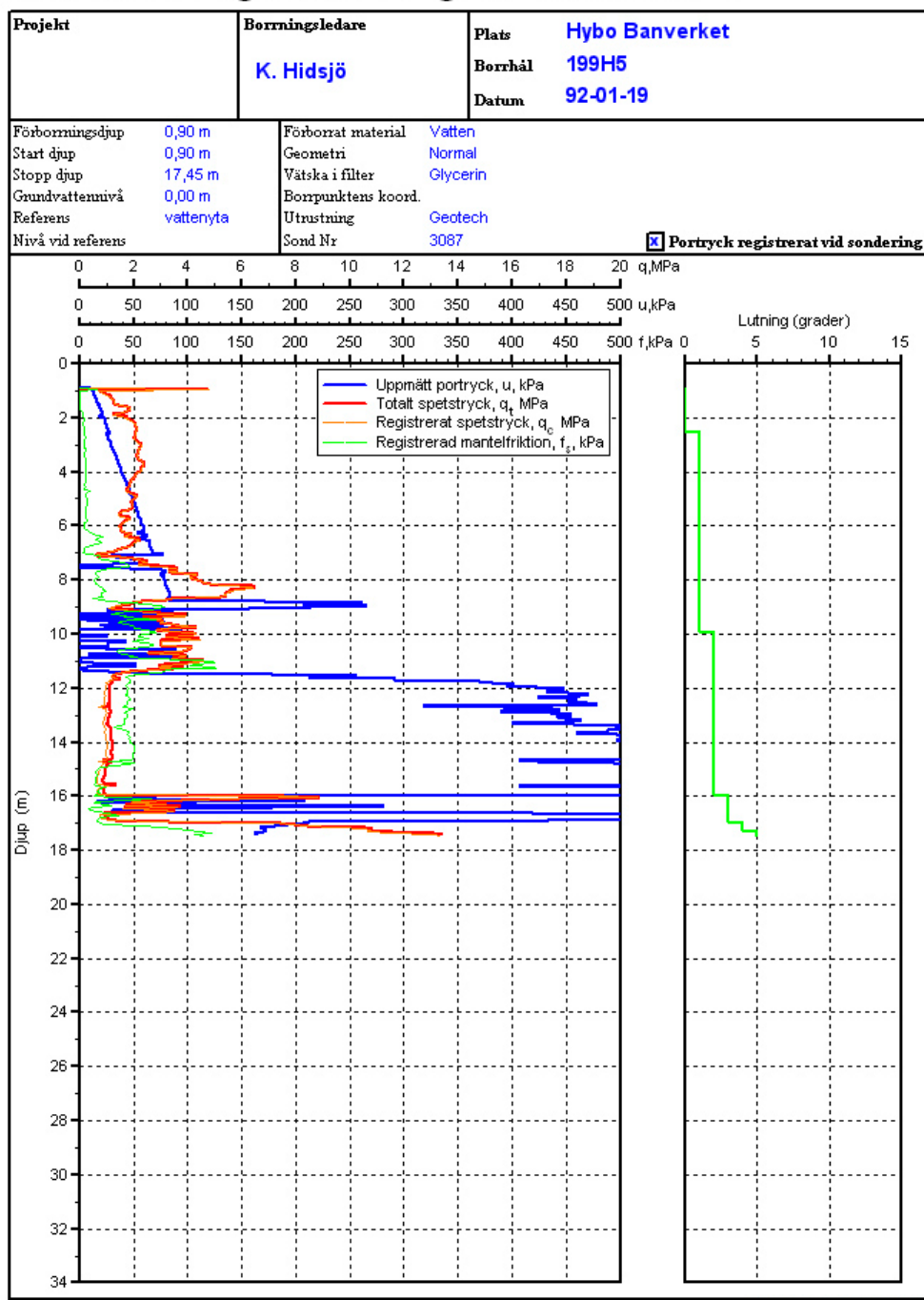


Diagram 1:1.
Standarduppritning.

Diagram 1:3.
Uppritning med valda
skalor.



CPT-sondering utförd enligt EN ISO 22476-1



C:\temp\Conrad3\Blad1.CPW

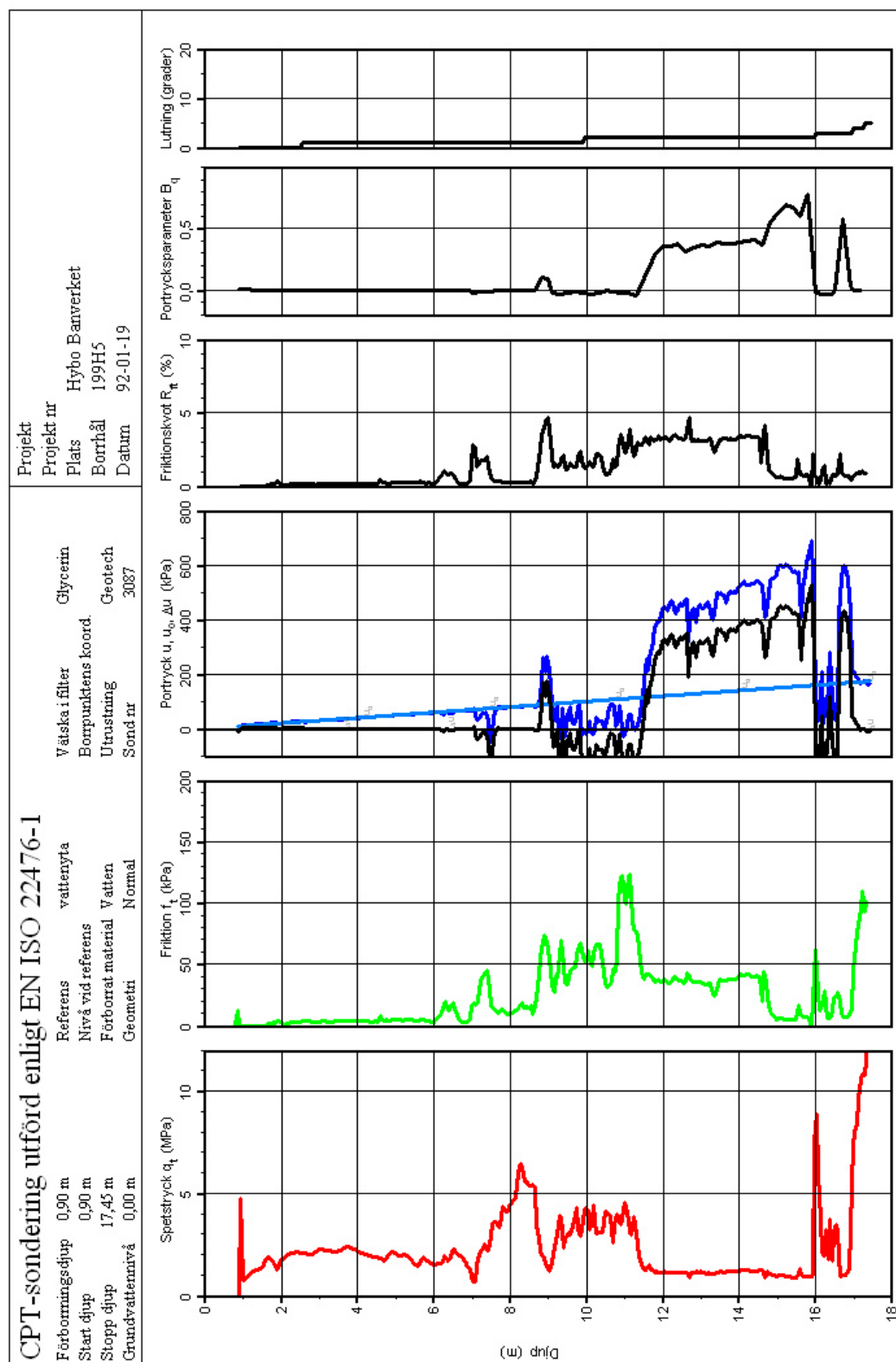
Statens geotekniska institut

581 93 Linköping, telefon 013-201800, fax 013-201914

Projekt				Plats Hybo Banverket Borrhål 199H5 Datum 92-01-19																												
Förbormningsdjup 0,90 m Startdjup 0,90 m Stoppdjup 17,45 m Grundvattenyta 0,00 m Referens vattenyta Nivå vid referens				Förbortat material Vatten Geometri Normal Vätska i filter Glycerin Bormningsledare K. Hidsjö Utrustning Geotech ☒ Porttryck registrerat vid sondering																												
Kalibreringsdata Spets 3087 Inre friktion O_c 8,0 kPa Datum 89-10-02 Inre friktion O_f 1,0 kPa Areafaktor a 0,580 Cross talk c_1 0,001 Areafaktor b 0,014 Cross talk c_2 0,001				Inmatade nollvärden <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th></th> <th>Porttryck</th> <th>Friktion</th> <th>Spetstryck</th> </tr> <tr> <td>Före</td> <td>127</td> <td>127</td> <td>127</td> </tr> <tr> <td>Efter</td> <td>127</td> <td>129</td> <td>128</td> </tr> </table>					Porttryck	Friktion	Spetstryck	Före	127	127	127	Efter	127	129	128													
	Porttryck	Friktion	Spetstryck																													
Före	127	127	127																													
Efter	127	129	128																													
Skalfaktorer <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Porttryck</th> <th>Friktion</th> <th>Spetstryck</th> </tr> <tr> <th>Område Faktor</th> <th>Område Faktor</th> <th>Område Faktor</th> </tr> <tr> <td>1,00 2756</td> <td>0,10 1148</td> <td>20 3150</td> </tr> </table>				Porttryck	Friktion	Spetstryck	Område Faktor	Område Faktor	Område Faktor	1,00 2756	0,10 1148	20 3150	Beräknade nollvärden (kPa) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th></th> <th>Porttryck</th> <th>Friktion</th> <th>Spetstryck</th> </tr> <tr> <td>Före</td> <td>112,50</td> <td>27,01</td> <td>1968,63</td> </tr> <tr> <td>Efter</td> <td>112,50</td> <td>27,43</td> <td>1984,13</td> </tr> <tr> <td>Diff</td> <td>0,00</td> <td>0,43</td> <td>15,50</td> </tr> </table>					Porttryck	Friktion	Spetstryck	Före	112,50	27,01	1968,63	Efter	112,50	27,43	1984,13	Diff	0,00	0,43	15,50
Porttryck	Friktion	Spetstryck																														
Område Faktor	Område Faktor	Område Faktor																														
1,00 2756	0,10 1148	20 3150																														
	Porttryck	Friktion	Spetstryck																													
Före	112,50	27,01	1968,63																													
Efter	112,50	27,43	1984,13																													
Diff	0,00	0,43	15,50																													
☒ Använd skalfaktorer vid beräkning				Korrigerig Porttryck (ingen) Friktion Medel Spetstryck Medel																												
Porttrycksobservationer <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Djup (m)</th> <th>Porttryck (kPa)</th> </tr> <tr> <td>0,00</td> <td>0,00</td> </tr> </table>				Djup (m)	Porttryck (kPa)	0,00	0,00	Skiktgränser <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Djup (m)</th> </tr> <tr> <td>6,05</td> </tr> <tr> <td>6,70</td> </tr> <tr> <td>7,00</td> </tr> <tr> <td>7,45</td> </tr> <tr> <td>8,80</td> </tr> <tr> <td>9,10</td> </tr> <tr> <td>11,40</td> </tr> <tr> <td>14,80</td> </tr> <tr> <td>16,00</td> </tr> <tr> <td>16,50</td> </tr> <tr> <td>17,00</td> </tr> </table>				Djup (m)	6,05	6,70	7,00	7,45	8,80	9,10	11,40	14,80	16,00	16,50	17,00									
Djup (m)	Porttryck (kPa)																															
0,00	0,00																															
Djup (m)																																
6,05																																
6,70																																
7,00																																
7,45																																
8,80																																
9,10																																
11,40																																
14,80																																
16,00																																
16,50																																
17,00																																
Klassificering <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th>Djup (m)</th> <th>Densitet</th> <th></th> <th></th> </tr> <tr> <th>Från</th> <th>Till</th> <th>(ton/m³)</th> <th>Flytgräns</th> </tr> <tr> <td>0,00</td> <td>0,90</td> <td>1,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>0,90</td> <td>1,10</td> <td>2,00</td> <td>0,00</td> </tr> </table>				Djup (m)	Densitet			Från	Till	(ton/m ³)	Flytgräns	0,00	0,90	1,00	0,00	0,90	1,10	2,00	0,00	Jordart Sch Sa M												
Djup (m)	Densitet																															
Från	Till	(ton/m ³)	Flytgräns																													
0,00	0,90	1,00	0,00																													
0,90	1,10	2,00	0,00																													
Anmärkning																																

Diagram 2:2.
Rapportering.

Diagram 2:3.
Upprättning med valda
skalor.



C:\temp\Conrad3\Blad1.CPW
2006-12-18

Statens geotekniska institut
581 93 Linköping, telefon 013-201800, fax 013-201914



Diagram 2:4.
Jordartsklassificering
och utvärderade egen-
skaper.

14. Litteratur

- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V. N., Jamiolkowski, M. and Pasqualini, E. (1986).** Interpretation of CPT's and CPTU's, Second part: Drained Penetration of Sands. Proceedings of the Fourth International Geotechnical Seminar, Singapore, pp 129-156.
- Bellotti, R., Ghionna, V. N., Jamiolkowski, M., Lancelotta, R. and Robertson, P. K. (1989).** Shear strength of sand from CPT. Proceedings, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 179-184.
- Bergdahl, U (1984).** Geotekniska undersökningar i fält. Statens geotekniska institut, Information 2, Linköping.
- Bergdahl, U., Malmborg, B.S. och Ottosson, E. (1993).** Plattgrundläggning. AB Svensk Byggtjänst och Statens geotekniska institut, Linköping.
- EN ISO 22476-1. (2007).** Geotechnical investigation and testing – Part 1: Electrical cone and piezocone penetration tests. CEN.
- International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering ISSMFE (1989).** Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils -TC 16 with Reference Test Procedures, CPT - SPT - DP - WST. Statens geotekniska institut, Information 7, Linköping.
- Jamiolkowski, M., Ghionna, V. N., Lancelotta, R. and Pasqualini, E. (1988).** New correlations of penetration tests for design practice. Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando Florida, Vol. 1, pp. 263-296.
- Lancelotta, R. (1983).** Analisi di Affidabilità in Ingegneria Geotecnica. Atti Istituto Scienza Costruzioni. No. 625, Politecnico di Torino.
- Knutsson, S., Larsson, R., Tremblay, M. och Öberg-Högsta, A.-L. (1998).** Siltjordars egenskaper – silt som konstruktionsmaterial – bestämning av geotekniska egenskaper. Statens geotekniska institut, Information 16, Linköping.
- Larsson, R. (1997).** Investigations and load tests in silty soils – Results from a series of investigations in silty soils in Sweden. Statens geotekniska institut, Rapport 54, Linköping.
- Larsson, R. (2000).** Lermorän – En litteraturstudie – Förekomst och geotekniska egenskaper. Statens geotekniska institut, Varia 480, Linköping.
- Larsson, R. (2001).** Investigations and load tests in clay till. Statens geotekniska institut, Rapport 59, Linköping.
- Larsson, R. (2004).** Piezocone tests in extremely soft soils. Proceedings NGM 2004, XIV Nordic Geotechnical Meeting, Ystad, Vol. 1, pp. C15-C26.
- Larsson, R. och Eskilson, S. (1988).** Kalibrering av kombinerade spetstryckporttrycksönder i laboratorium. Statens geotekniska institut, Varia 223, Linköping.
- Larsson, R. och Eskilson, S. (1989a).** Dilatometerförsök i lera. Statens geotekniska institut, Varia 243, Linköping.
- Larsson, R. och Eskilson, S. (1989b).** Dilatometerförsök i organisk jord. Statens geotekniska institut, Varia 258, Linköping.
- Larsson, R. and Mulabdic, M. (1991a).** Shear Moduli in Scandinavian Clays. Statens geotekniska institut, Rapport 40, Linköping.
- Larsson, R. and Mulabdic, M. (1991b).** Piezocone Tests in Clay. Statens geotekniska institut, Rapport 42, Linköping.
- Larsson, R. och Sällfors, G. (1985).** Nyare in situ metoder för bedömning av lagerföljd och egenskaper i jord. Statens geotekniska institut, Information 5, Linköping.

- Larsson, R. and Åhnberg, H. (2003).** Long-term effects of excavations at crests of slopes. Statens geotekniska institut, Rapport 61, Linköping.
- Larsson, R., Westerberg, B., Albing, D., Knutsson, S. och Carlsson, E. (2007).** Sulfidjord – geoteknisk klassificering och skjuvhållfasthet. Statens geotekniska institut, Rapport 69. Linköping.
- Lunne, T. and Christoffersen, H. P. (1983).** Interpretation of Cone Penetrometer Data for Off-shore Sands. Proceedings of the Fifteenth Annual Offshore Technology Conference, Houston Texas. Även i Publikasjon Nr. 156, Norges Geotekniske Institutt, Oslo.
- Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M. (1997).** Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic & Professional, London.
- Marchetti, S. (1985).** On the field determination of K_0 in sand. Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 5, pp 2667-2673.
- Meigh, A. C. (1988).** Cone Penetration Testing – Methods and Interpretation. CIRIA, Ground Engineering Report: In Situ Testing, London.
- Mulabdic, M., Eskilson, S. och Larsson, R. (1990).** Calibration of Piezocones for Investigations in Soft Soils and Demands for Accuracy of the Equipments. Statens geotekniska institut, Varia 270, Linköping.
- Robertson, P. K. (1990).** Soil classification using the cone penetration test. Discussion in Penetration testing in the UK, pp. 177-179, Thomas Telford, London. Also in Canadian Geotechnical Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 151-158.
- Robertson, P. K. and Campanella, R. G. (1988).** Guidelines for using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for geotechnical design. U.S. Department of Transportation. Report No. FHWA-PA-87-022+84-24. Vol. 2.
- Senneset, K. and Janbu, N. (1984).** Shear Strength Parameters Obtained from Static Cone Penetration Tests. ASTM Special Technical Publication 883, Philadelphia, PA.
- SS-EN ISO 14688-2. (2004).** Geoteknisk undersökning och provning – Identifiering och klassificering av jord, Del 2: Klassificeringsprinciper. SIS. Swedish Standards Institute, Stockholm.
- SS-EN ISO 22476-1:2012. (2012).** Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test. SIS. Swedish Standards Institute, Stockholm.
- Svenska Geotekniska Föreningen – SGF (1993).** Rekommenderad standard för CPT-sondering. SGF Rapport 1:93, Linköping.

SGI Information

1. Jords egenskaper.
(48 sid, 1982/1986/1990/1993/ 58 sid, 2008)
2. Geotekniska undersökningar i fält.
(72 sid, 1984)
3. Skjuvhållfasthet
– utvärdering i kohesionsjord.
(28 sid, 1985/63 sid, 2007)
- 3E. Evaluation of shear strength in cohesive soils
with special reference to Swedish practice and
experience.
(32 pages, 1985)
4. Geotekniska utredningar för
stabilitetsanalyser – allmänna råd för omfatt-
ning och kvalitet.
(20 sid, 1988/1993)
5. Nyare in-situmetoder för bedömning av lager-
följd och egenskaper i jord.
(64 sid, 1988)
6. Torv – geotekniska egenskaper
och byggmetoder.
(34 sid, 1989)
7. Report on the ISSMFE technical committee on
penetration testing of soils
– TC16 with reference test procedures.
CPT - SPT - DP - WST
(50 pages, in english and french, 1989)
8. Hållfasthet i friktionsjord.
(50 sid, 1989)
9. Olje- och kemikalieutsläpp i jord.
(40 sid, 1989)
10. Dilatometerförsök – en in-situmetod för be-
stämning av lagerföljd och egenskaper i jord.
Utförande och utvärdering.
(50 sid, 1990/1993)
11. Mätning av grundvattennivå och portryck.
(116 sid, 1990)
12. Termiska egenskaper i jord och berg.
(28 sid, 1991)
13. Sättningsprognoser för bankar på lös finkornig
jord – beräkning av sättningars storlek och tids-
förlopp.
(51 sid, 1994)
- 13E. Prediction of settlements of embankments on
soft, fine-grained soils – calculation of settle-
ments and their course with time.
(52 pages, 1997)
14. Lärobok i geobildtolkning.
(123 sid, 1991)
15. CPT-sondering.
Utrustning – Utförande – Utvärdering
(80 sid, 1993, 71 sid, 2007, 71 sid 2015)
- 15E. The CPT-test.
Equipment-Testing-Evaluation
(77 pages, 1995)
16. Siltjordars egenskaper.
– Silt som konstruktionsmaterial
– Bestämning av geotekniska egenskaper
(71 sid, 1998)
17. Geodynamik i praktiken.
(51 sid, 2000)
- 18:1 Handbok.
Skumglas i mark- och vägbyggnad
(39 sid, 2008)
- 18:4 Handbok.
Flygaska i mark- och vägbyggnad. Grusvägar
(58 sid, 2006)
- 18:5 Handbok.
Slaggrus i väg- och anläggningsarbeten
(40 sid, 2006)
- 18:6 Handbok.
Bottenaskor från kol-, torv- och biobränsleeld-
ning i väg- och anläggningsarbeten (40 sid,
2010)
- 18:7 Handbok.
Gummiklipp
(47sid, 2008)
19. Deponiers stabilitet.
Vägledning för beräkning
(46 sid, 2007)
20. Vägledning för nyttiggörande av muddermassor
i hamn- och anläggningskonstruktioner. Stabili-
tering och solidifiering av förorenade mudder-
massor
(38 sid, 2011)



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se