

**Svenska Geotekniska Föreningen**  
Swedish Geotechnical Society

**SGF Notat 2:2018**

# **Falkonförsöket**

SGF:s Laboratoriekommitté

Linköping 2018



## Förord

Fallkonförsöket är ett av de absolut vanligaste geotekniska laborieförsöken i Skandinavien. Försöket används för att bestämma ett jordprovs skjuvhållfasthet i ostört och omrört tillstånd, och med det även jordprovets sensitivitet, samt för bestämning av konflytgränsen.

För utvärdering av skjuvhållfasthet från fallkonförsöket används idag en metod framtagen på Statens Geotekniska Institut i slutet av 1950-talet. Utvärderingen innehåller en empirisk faktor, den s k konfaktorn, som för kolvprover har kalibrerats så att fallkonförsöket ger en skjuvhållfasthet som motsvarar resultat från vingförsök i fält.

Från och med 2017 gäller en ny europeisk och internationell standard, SS-EN 17892-6, där konfaktorena ändras så att fallkonförsöket istället kalibreras mot skjuvhållfasthet motsvarande laborievingförsök. Standarden tillåter dock att respektive land kan använda andra konfaktorer under förutsättning att tillräckligt underlag finns.

I samband med införandet av denna standard initierade SGF:s Laborierkommitté ett projekt för att dels utreda om underlaget för de svenska konfaktorena är tillfredsställande, dels upprätta föreliggande notat innehållande rekommendationer om vilka konfaktorer som bör användas. I notatet rekommenderas en fortsatt utvärdering med nu använda konfaktorer enligt f d SS 027125, d v s med kalibrering mot fältvingförsöket. Detta rekommenderas som en tilläggsredovisning på laborieprotokoll eftersom SS-EN 17892-6 kräver en redovisning med andra konfaktorer. I notatet beskrivs även fallkonförsökets historiska utveckling och inverkan faktorer vid utförande.

Notatet har författats av Sölve Hov, GeoMind/LabMind, och Martin Holmén, Statens Geotekniska Institut. Det har granskats av följande medlemmar i SGF:s Laborierkommitté: Tobias Thorén, Bohusgeo, och Nancy Bono, GeoMind. Notatet har remissgranskats av Leif Eriksson, f d Statens Geotekniska Institut, som även bidragit stort med värdefulla fakta och analyser.

Stockholm och Linköping, april 2018

Sölve Hov

Martin Holmén



# Innehållsförteckning

## Förord

<b>1</b>	<b><u>INLEDNING .....</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1	Allmänt .....	1
<b>2</b>	<b><u>HISTORISK UTVECKLING .....</u></b>	<b><u>2</u></b>
2.1	Bakgrund.....	2
2.2	SJ:s geotekniska kommission 1922 .....	2
2.3	Utveckling 1920 – 1950-talen.....	4
2.4	Hansbo 1957 .....	6
2.5	SGFs kolvborkommitté 1963 .....	8
2.6	Laboratorieanvisningarna 1985 .....	9
2.7	Laboratoriekommittén 2001 .....	11
2.8	Internationell praxis .....	11
<b>3</b>	<b><u>SS 027125 (F D SVENSK STANDARD) - SS EN 17892-6 .....</u></b>	<b><u>12</u></b>
<b>4</b>	<b><u>INVERKANDE FAKTORER.....</u></b>	<b><u>14</u></b>
4.1	Inledning .....	14
4.2	Inverkande faktorer av jordmaterialet och jordprovet .....	15
4.3	Inverkande faktorer vid genomförande.....	16
<b>5</b>	<b><u>REKOMMENDERAD ANVÄNDNING AV KONFAKTORER .....</u></b>	<b><u>18</u></b>
5.1	Inledning .....	18
5.2	Underlag för kalibrering mot fältvingförsök .....	19
5.3	Underlag för kalibrering mot laboratorievingförsök .....	20
5.4	Rekommenderade konfaktorer.....	21
5.5	Rekommenderad redovisning i laboratorieprotokoll .....	22
<b>6</b>	<b><u>REFERENSER.....</u></b>	<b><u>22</u></b>



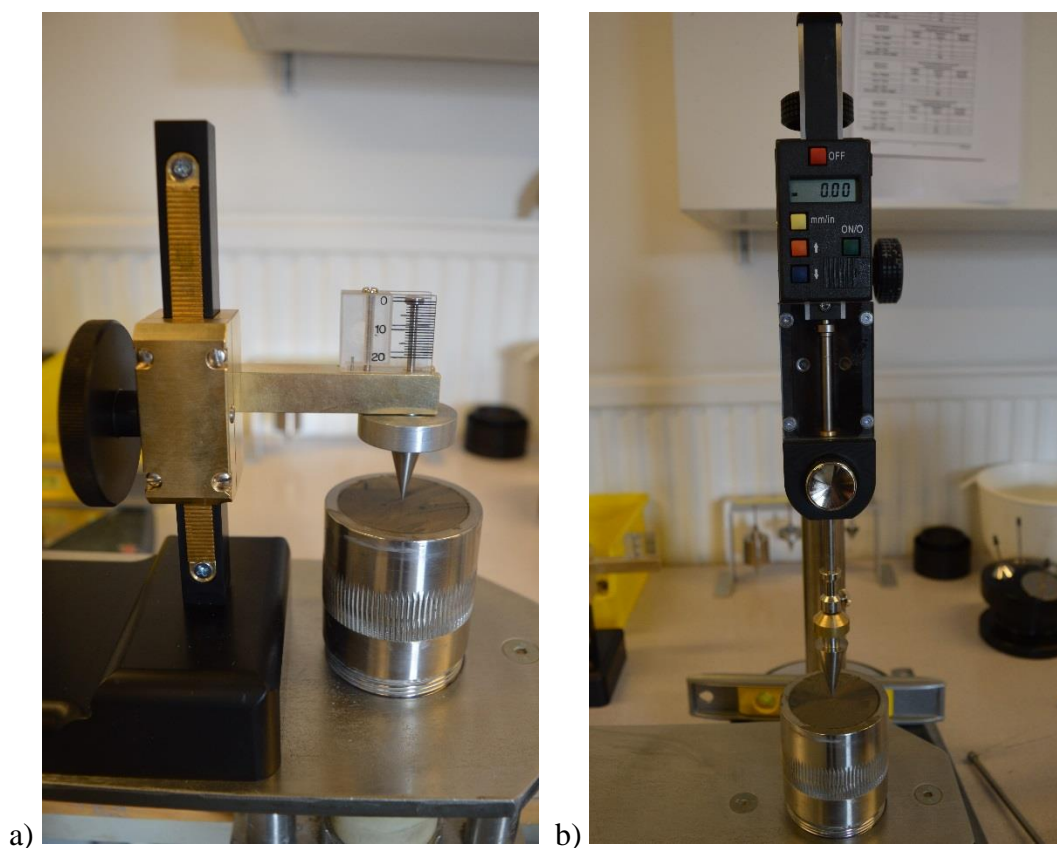
# 1 INLEDNING

## 1.1 Allmänt

Fallkonförsöket är ett enkelt och snabbt försök som utförs som en del av rutinanalys på kolvprover för att undersöka ”ostörd”<sup>1</sup> och omrörd skjuvhållfasthet, och därigenom även sensitivitet. Dessutom används fallkonförsöket för bestämning av konflytgränsen.

Fallkonförsöket utförs genom att en kon, med en viss vikt och med en viss spetsvinkel, släpps fritt från en utgångspunkt där spetsen tangerar jordprovets överyta, se Figur 1. Konens intryck i jordprovet används sedan för utvärdering av jordprovets skjuvhållfasthet.

I Sverige har fallkonförsöket under en längre tid utvärderats med ett samband innehållande en empirisk  $s_k$  konfaktor. Denna konfaktor har för ostörda jordprover kalibrerats mot fältvingförsök, och för omrörda prover mot laboratorievingsförsök. I samband med införandet av de kommande internationella och europeiska standarderna kommer utvärderingen ändras och istället kalibreras mot laboratorievingsförsöket även för ostörda jordprover. Föreliggande notat rekommenderar däremot en fortsatt utvärdering med konfaktorer kalibrerade mot fältvingförsök.



Figur 1. Konapparat med a) manuell avläsning, och b) digital avläsning

<sup>1</sup> Benämningen ”ostörda” jordprover är missvisande eftersom all provtagning oundvikligen innebär en viss störning, men eftersom benämningen är allmänt vedertagen används det även fortsättningsvis i notatet.

## 2 HISTORISK UTVECKLING

### 2.1 Bakgrund

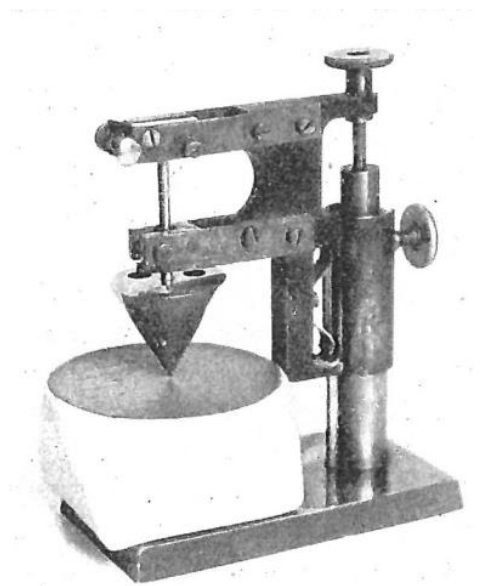
Fallkonförsöket togs fram som en del av arbetet vid Statens Järnvägars geotekniska kommission mellan åren 1914 och 1922. Syftet var att undersöka kohesionsjordars hållfasthet, då kallad konsistens.

Dess uppfinning och utveckling bör beskrivas mot bakgrund av den utveckling som ägde rum inom mekaniken i slutet av 1800-talet och i början av 1900-talet. Idén till fallkonförsöket kom sannolikt från det så kallade Brinellprovet som uppfanns år 1900 och då användes till att mäta en metalls motstånd mot plastisk deformation (Bjerrum och Flodin, 1960; Flodin & Broms 1981). Metoden innebär att en kula med 10 mm diameter pressades mot ett material med en given kraft varpå intryckets area uppmättes. Inom plasticitetsteorin hade man upptäckt att det finns ett unikt samband mellan det motstånd ett smalt objekt möter vid penetration och materialets tryckhållfasthet, och Brinellprovet kunde således användas för att beräkna materialets hållfasthet.

För undersökning av jordars skjuvhållfasthet fanns därför möjligheten att använda ett liknande försök, men eftersom intrycket skulle bli avsevärt större krävdes en metod där de geometriska förhållandena förblev oförändrade under provningen, vilket är fallet vid användandet av en kon. Även om SJ:s geotekniska kommission var först i världen med att utveckla fallkonförsöket, utvecklades av denna orsak också liknande konförsök, sannolikt oberoende, av Karl Terzaghi i Konstantinopel (Istanbul) kring år 1923 för provning av kohesionsjordar, av Edward Kindle i Kanada år 1925 för provning av mjuka bergarters hårdhet samt av den österrikiska väg- och vattenbyggnadsföreningen i mitten av 1920-talet (Terzaghi, 1927). Utformningen och utförandena av försöken varierade men principen var densamma.

### 2.2 SJ:s geotekniska kommission 1922

Fallkonförsöket tillkom i början av kommissionens arbete då dess sekreterare John Olsson presenterade försöket vid ett möte i juni år 1915 (Bjerrum & Flodin 1960). Metodiken för utvärdering presenterade Olsson vidare i ett möte året därpå. Konapparaten visas i Figur 2.



Figur 2. Konapparat (ur Olsson, 1921).



Till en början provades koner med vikter mellan 10 och 1000 gram och med olika spetsvinklar. Så småningom gick man över till systematisk provning med koner med 30° och 60° spetsvinkel och med 10, 30, 60, 100, 200 och 300 grams vikt. De koner som kommissionen i sitt slutbetänkande (SJ, 1922) rekommenderade var konerna 100g-30°, 60g-60° och 10g-60°. 60g-60°-konen valdes som ”standardkon”.

Utvärderingen utgjordes av relativa värden som benämndes ”relativa hållfasthetstal” eller enbart ”hållfasthetstal” och kunde beräknas ur erhållet konintryck. Beteckningarna  $H_3$  användes för ostörda jordprover,  $H_2$  för delvis störda jordprover och  $H_1$  för omrörda jordprover. Beteckningen  $H_2$  upphörde dock snabbt att användas. Hållfasthetstalen användes för leror, silt och finsandiga jordar i tillägg till organiska jordarter, t ex gyttja och med vissa förbehåll även torv.

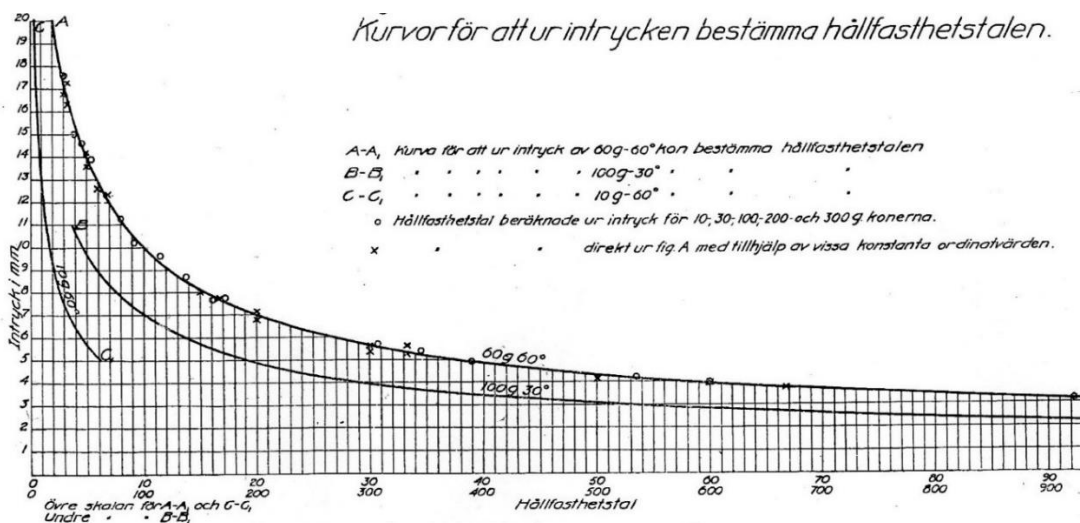
Utvärderingen baserades på att det fanns ett proportionellt samband mellan det yttre arbetet, orsakat av konvikten och konintrycket, och det inre motståndet, d v s jordprovets konsistens (hållfasthet). En stor mängd jämförande försök utfördes med de olika konerna som visade på sinsemellan linjära samband och bekräftade därför antagandet om proportionalitet.

En skala upprättades där hållfasthetstalet  $H = 10$  motsvarade ett konintryck av 10 mm för standardkonen, d v s 60g-60°-konen. Hållfasthetstalet vid andra konintryck erhöles genom att variera konvikten till dess att konintrycket för en 60°-kon blev 10 mm. Hållfasthetstalet  $H$  kunde därefter beräknas som en sjättedel av konens massa:

$$H = \frac{1}{6} m_{60^\circ} \quad \text{Ekv. 1}$$

där  $m_{60^\circ}$  = konens massa vid 10 mm konintryck

Eftersom det rådde proportionalitet mellan jordprovets konsistens, konvikten och konintrycket, kunde grafer och tabeller tas fram för att enkelt hitta hållfasthetstalet ur erhållet konintryck med de olika konerna, se exempel i Figur 3. Kommissionen gjorde i sitt arbete inga försök på att utvärdera skjuvhållfasthetsvärden.



**Figur 3. Geotekniska kommissionens graf för utvärdering av det relativa hållfasthetstalet ur erhållet konintryck (ur SJ, 1922).**

Dessa ursprungliga tabeller och grafer som upprättats i SJ (1922) kom så småningom att ändras något, och man misstänkte även att olika tabeller behövdes för ostörda respektive omrörda leror, samt även för olika lertyper (Olsson, 1925; Ekström, 1927).

Utvecklandet av fallkonförsöket var en avsevärt förbättring jämfört med tidigare praxis där markundersökningar oftast utfördes endast med en enkel sondering till fast botten. Bara i undantagsfall togs jordprover för att försöka bestämma jordlagerföljden och om några laboratorieförsök överhuvudtaget utfördes bestod de av enstaka vattenkvotsbestämningar (Olsson, 1921). Fallkonförsöket och utvärderingen presenterades i bland annat i Olsson (1921), i kommissionens slutbetänkande SJ (1922) och i Ekström (1927).

I kommissionens arbete kom också fallkonförsöket att börja användas för att uppskatta ett jordprovs finleksgrad genom att bestämma vattenkvoten på ett omrörd jordprov som gett 10 mm konintryck med standardkonen, d v s vid hållfasthetstalet 10. Vattenkvoten benämndes finlekstalet och motsvarar idag konflytgränsen, se vidare beskrivning i SGF Notat 1:2018.

### 2.3 Utveckling 1920 – 1950-talen

Det arbete som den geotekniska kommissionen inom SJ utförde var av stort intresse av väg- och vattenbyggnadsingenjörer, både inom Sverige och i de nordiska grannländerna, och redan i början av 1920-talen blev de fält- och laboratiemetoder som kommissionen utvecklat väl använda, däribland fallkonförsöket (Bjerrum & Flodin 1960). Försöket förblev dock relativt okänt utanför Skandinavien även om snarlika metoder fanns.

De relativa hållfasthetstalen hade i sig själv inget värde, och man försökte därför inom kort tid korrelera talen till skjuvhållfasthetsvärden. John Olsson gjorde i början av 1930-talet en sådan studie där han fann att kvoten mellan hållfasthetstalet och skjuvhållfastheten var närmast konstant och ungefär 4 upp till  $H \approx 100$ :

$$\tau = \frac{H_3}{C} \approx \frac{H_3}{4} \quad \text{Ekv. 2}$$

där  $\tau$  = skjuvhållfasthet  
 $H$  = hållfasthetstal  
 $C$  = omräkningsfaktor

Omräkningsfaktorn baserades på undersökningar som Olsson gjorde i läget där Wendel (1900) gjort provtryckningar av pålar samt baserat på bakåträkning från dokumenterade skred. Olsson publicerade dock inte resultaten förrän i slutet av 1930-talet (Olsson, 1937; Hultin, 1937; Flodin & Broms, 1981; Flodin, 1990).

Den första som publicerade en laboratiestudie mellan hållfasthetstalen och skjuvhållfasthet var Skaven Haug i Norge som 1931 gjorde jämförelser mellan ett skjuvförsök liknande en skjuvbox och fallkonförsöket. Skaven Haug (1931) fann följande samband:

$$\tau = \frac{H_3}{3,2+0,0073H_3} \text{ [kPa]} \quad \text{Ekv. 3}$$

Försöken gjordes på leror som var vanligt förekommande i Norge och hade relativt låg plasticitet och flytgräns. Några år senare gjordes även jämförande laborieförsök i Sverige då

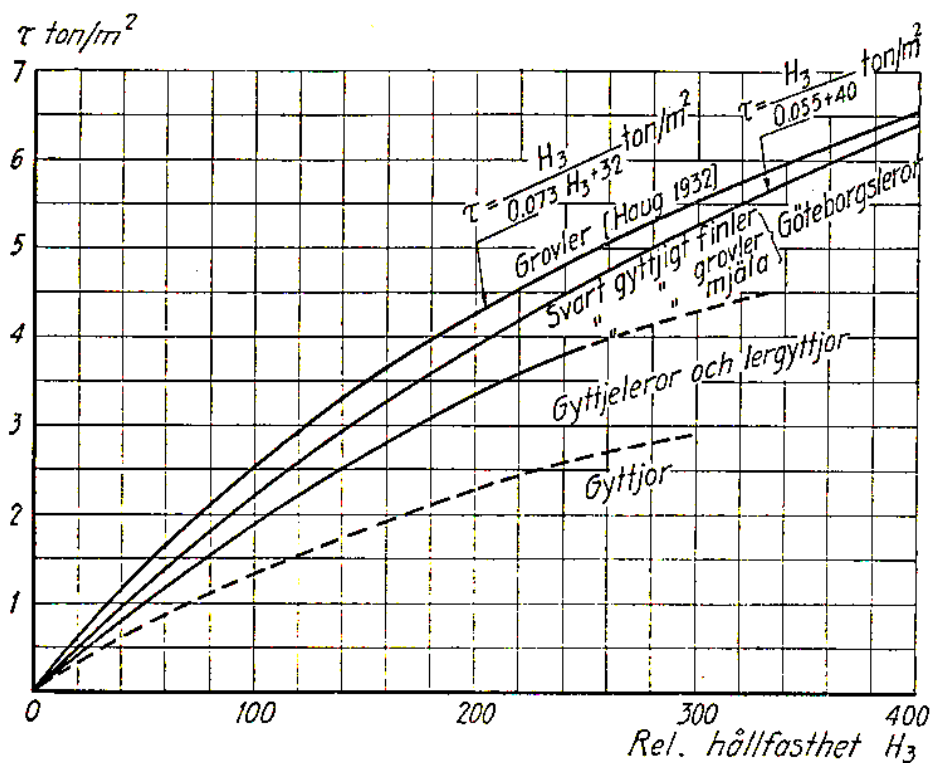
Hultin (1937) och Caldenius (1938) gjorde provtryckningar av lerkuber, likt enaxliga tryckförsök, respektive försök med en apparat som stansade ut en cylinder ur ett prov. De gjorde även bakåträkningar av provbelastningar av pålar och dokumenterade skred. Undersökningarna gjordes på Göteborgslera som normalt har en relativt högre plasticitet och flytgräns jämfört med de norska lerorna. De fann följande samband:

$$\tau = \frac{H_3}{4,0+0,0055H_3} \text{ [kPa]} \quad \text{Ekv. 4}$$

Studier av Fellenius (1938a och 1938b) visade på överensstämmiga resultat, och inom kort tid kom man i Sverige att använda ett medelvärde av dessa (Caldenius och Lundström, 1956):

$$\tau = \frac{H_3}{3,6+0,0064H_3} \text{ [kPa]} \quad \text{Ekv. 5}$$

Nämnamnaren fick inte understiga 4. Figur 4 visar en sammanställning av dessa samband, vilka är överensstämmande med Olssons tidigare fynd.



Figur 4. Relation mellan hållfasthetstal och skjuvhållfasthet (ur Caldenius, 1938).

Som framgår av figuren var korrelationen inte densamma för leror med organiskt innehåll. Olsson (1937) anger att en gyttjig lera har omkring 0,6 – 0,7 gånger skjuvhållfastheten som en ren lera med samma uppmätta hållfasthetstal. Olsson ska ha känt till detta redan i mitten av 1920-talet (Osterman, 1960; Kallstenius, 1963).

Fellenius (1938a) och Caldenius (1938) anger att skjuvhållfastheten bör korrigeras med 0,8 – 0,9 för gyttjig lera, 0,7 för lerig gyttja och 0,6 för gyttja och torv. Dessa är tillsammans med Olssons studier de första kända korrektionsfaktorerna med hänsyn till en jords benämning och plasticitet (Flodin och Broms, 1981). Sedan 1960-talet används dock enbart värdet på flytgränsen för att avgöra korrektionen (SGI, 1969). En detaljerad genomgång av historiken av korrektionsfaktorn ges i bl a Larsson et al (2007), Persson (2017) och Helenelund (1977).

## 2.4 Hansbo 1957

Arbetet med att bestämma ett jordprovs skjuvhållfasthet empiriskt via hållfasthetstalet var förhållandevis omständligt och inte särskilt vetenskapligt, och i mitten av 1950-talet utfördes därför studier av fallkonförsöket på Statens Geotekniska Institut i syfte att försöka undkomma omvägen via hållfasthetstalen. Arbetet resulterade i en utvärdering av försöket som ännu idag används, Hansbo (1957). Arbetet omfattade en djupgående teoretisk analys, filmning med höghastighetskamera för att studera plasticering kring den fallande konen samt en jämförelse, och kalibrering, med utförda fältvingförsök. Jämförelser utfördes även med laboratorievingsförsök och enaxliga tryckförsök.

En approximativ teoretisk lösning på utvärdering av skjuvhållfastheten från konintrycket kunde tas fram som syftade till att ersätta den dittills använda utvärdering via hållfasthetstalet.

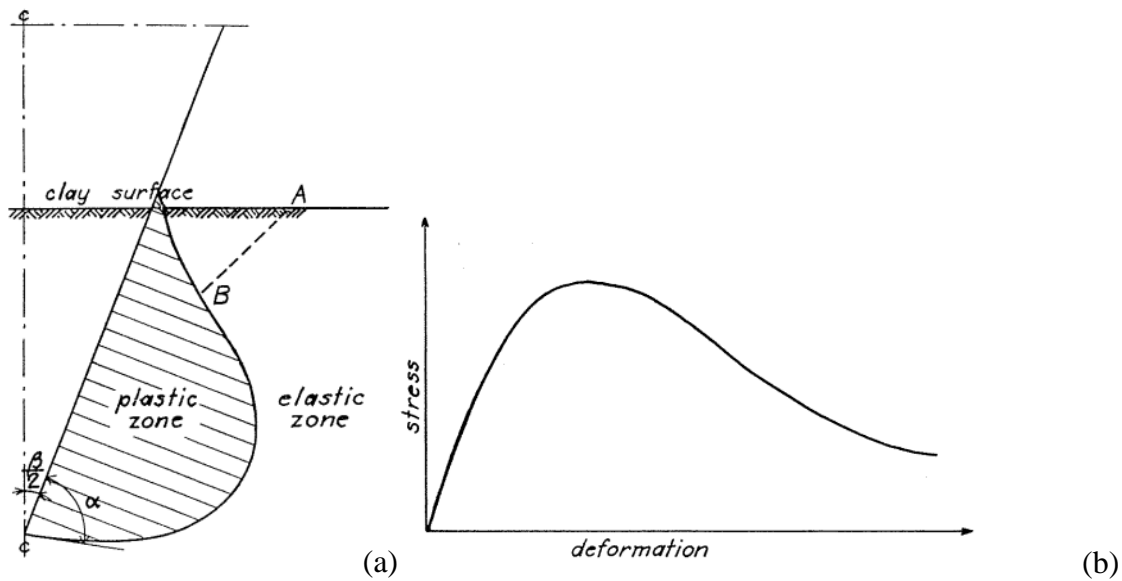
Hansbo (1957) härledde följande ekvation där en empirisk sk konfaktor ingår:

$$\tau = K \frac{mg}{i^2} \quad \text{Ekv. 6}$$

där  $\tau$  = skjuvhållfasthet (kPa)  
 K = konstant (konfaktor)  
 m = konens vikt (g)  
 g = tyngdacceleration (9,81 m/s<sup>2</sup>)  
 i = konintryck (mm)

Denna semi-empiriska ekvation är härledd ur en omformulering av Newtons andra lag,  $P = m \times a$ , som beskriver kraften som funktion av massa och acceleration, och efter omformuleringen av konintryckets retardation som funktion av tiden. Ur detta kraft-rörelsesamband och en antagen spänningsfördelning, se Figur 5, kunde Ekvation 6 härledas.

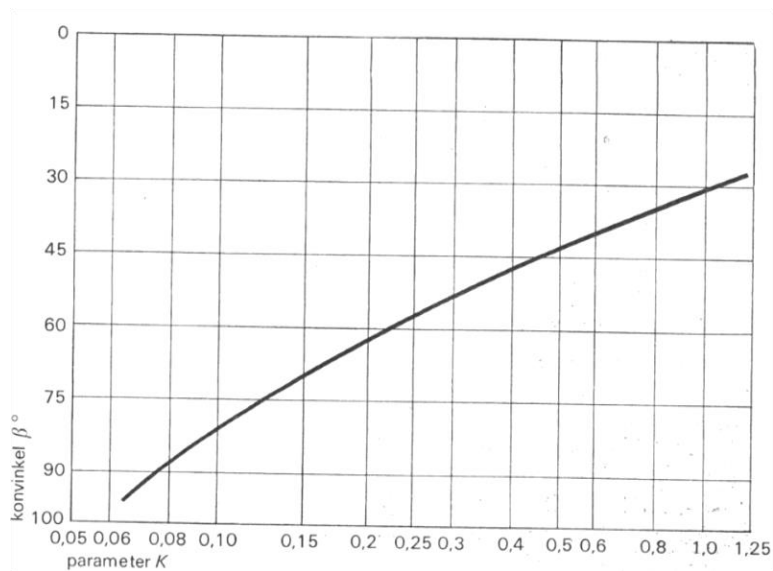
Hansbo (1957) kalibrerade konfaktorn för ostörda leror mot fältvingförsök och för omrörda leror mot laboratorievingsförsök. Enligt Hansbo beror konfaktorn huvudsakligen på konens spetsvinkel men för ostörda jordprover även på vilken typ av provtagare som provet tagits med, dvs att fallkonförsöket är beroende av den specifika störning en viss provtagare ger. I Hansbos studie användes två olika provtagare, SGI IV och SGI VI, båda med 60,5 mm inre diameter men med olika längder och olika utförande vid nedpressning, utstansning och uppdragning. Skillnaden i utvärderad hållfasthet från fallkonförsöket på prover tagna med dessa två olika provtagare uppgick till ca 25 %. En större studie av olika störningseffekter som olika provtagare ger hade tidigare utförts av Jakobson (1954) och en än mer omfattande studie gjordes senare av Kallstenius (1958). Båda dessa visar på lika stora skillnader, och i enstaka fall ännu större.



**Figur 5. a) Antagen spänningsfördelning och plasticitetszon runt konen, b) antaget spännings-töjnings samband (ur Hansbo 1957).**

För ostörda prover tagna med provtagaren SGI IV och 100g-30°-konen fann Hansbo  $K \approx 1,0$  och för SGI IV  $K \approx 0,8$  medan han för 60g-60°- och 10g-60°-konerna fann  $K \approx 0,25$  respektive  $K \approx 0,2$ . De sistnämnda konfaktorerna kalibrerades inte direkt mot fältvingförsök utan genom en indirekt jämförelse mellan de två konerna.

Enligt Hansbos senare publikationer (1962, 1975) kan konfaktorn för ostörda prover antas vara en funktion av konens spetsvinkel, se Figur 6.



**Figur 6. Konfaktor som funktion av konens spetsvinkel (för prover tagna med standardkolvprovtagaren), ur Hansbo (1975).**

Konfaktorn för omrörda leror kalibrerades av Hansbo (1957) mot laboratorievingförsök och för 10g-60°-konen fanns  $K \approx 0,30$ . Spridningen var dock stor. Karlsson (1961) gjorde nya studier och fann  $K \approx 0,27$  för omrörda leror. Den huvudsakliga orsaken till att konfaktorn för omrörda prover skiljer sig från ostörda prover är att sensitiviteten inte längre har någon påverkan, d v s spännings-töjnings sambandet som visas i Figur 5 är annorlunda.

I samband med utvecklingen av en enkel apparat kallad fjäderkonen utvecklade Hansbo (1962) hans ursprungliga ekvation. I det fall konen släpps från en högre nivå än provet överkant kan ett tillägg till den ursprungliga ekvationen användas:

$$\tau = K \frac{mg}{i^2} \left( 1 + \frac{a}{i} \right) \quad \text{Ekv. 7}$$

där  $a$  = fri fallhöjd från konspets till provets överyta (mm).

Hansbos (1957) utvärdering är snarlik Karl Terzaghis utvärdering från 1920-talet. Terzaghi (1927) utförde konförsök med koner med 90° spetsvinkel, vilket hade den matematiska fördelen att konens intryck ( $i$ ) alltid var lika radien ( $r$ ) på konens nedtrycka projicerade yta. Kraften ( $Q$ ) som den fallande konen verkar på jordprovet är fördelad över den projicerade ytan:

$$\frac{Q}{\pi r^2} = \frac{Q}{\pi i^2} \quad \text{Ekv. 8}$$

Från plasticitetsteorin finns som redan nämnts en unik faktor ( $c_1$ ) mellan materialets tryckhållfastheten ( $q$ ) och det tryck ( $p$ ) som det penetrerande föremålet verkar på jordmaterialet:

$$\frac{Q}{\pi i^2} = p = c_1 q \quad \text{Ekv. 9}$$

och

$$q = \left( \frac{Q}{\pi c_1} \right) \frac{1}{i^2} = C \frac{1}{i^2} \quad \text{Ekv. 10}$$

där  $C$  = konstant unik för aktuell kon och jordtyp.

Terzaghi utförde en serie fallkonförsök som jämfördes med tryckförsök. Ingen bra korrelation kunde dock hittas och Terzaghi uttryckte därför en viss tveksamhet till konförsökets användbarhet. Terzaghi utförde dock fallkonförsöken med konen fritt hängande 40 mm över jordprovets överyta, vilket innebar att hans utvärdering, baserad på statiska ekvationer, gav missvisande resultat. Hans försök var i allra högsta grad dynamiska. Hansbo (1962) kunde däremot genom den utökade ekvationen (7) visa att Terzaghis resultat ändå var samstämmiga med tryckförsöken.

## 2.5 SGFs kolvborkommitté 1963

Ungefär samtidigt som Hansbo utförde sina studier tillsattes inom SGF en kommitté i syfte att ta fram en standardiserad provtagare för att få ett enhetligt arbete och kvalitet i branschen samt erhålla jämförande resultat från skjuvhållfasthetsprovning. Under samma tidsperiod hade

det på SGI genomförts omfattande forskning kring provtagningsstörningar och olika provtagare utförts. År 1961 standardiserades provtagaren SGI XI och kallades från och med då St I (SGI, 1961).

I samband med införandet av den nya standardkolvprovtagaren utarbetade kommittén nya provisoriska rekommendationer för utvärdering av fallkonförsöket (SGFs kolvborrkommitté, 1963). En av förutsättningarna var då att utvärderingen skulle gälla normala svenska leror som har en flytgräns i närheten av den naturliga vattenkvoten och för vanliga provtagningsdjup mellan ca 5 och ca 20 m. Begränsningen i djup gjordes för att fallkonförsöket hade visat sig nästan alltid underskatta hållfastheten på djup större än 15 – 18 m.

Jämförande utvärderingar gjordes på prover tagna i Götaälvdalen och i Stockholmsområdet med ”SGIs äldre formel”, d v s mellanformen av Skaven Haug och Caldenius-Hultin enligt ekvation 5, John Olssons metod, Hansbos (1957) och en då nyligen framtagen formel av Kallstenius<sup>2</sup>. Utvärderingarna jämfördes med fältvingförsök. För fallkonförsöken användes endast 100g-30°-konen.

Kolvborrkommittén valde att rekommendera den äldre och mer beprövade utvärderingen ”SGIs äldre formel”, dock med en korrektionsfaktor 0,9 som krävdes för att anpassa utvärderad hållfasthet till fältvingförsöken. För Hansbos utvärdering krävdes en korrektionsfaktor 0,965 men ansågs vara tillräckligt nära 1,0.

SGFs kolvborrkommitté upprättade tabeller för utvärdering av skjuvhållfasthet för konintryck mellan 2,0 och 19,9 mm för konerna 100g-30°, 60g-60° och 10g-60°. 100g-30°-konen rekommenderades för ostörda prover medan 60g-60°- och 10g-60°-konerna rekommenderades för omrörda prover. Kommittén provade inte 400g-konen.

Kommittén föreslog vidare att man i laboratorieprotokoll skulle redovisa okorrigerade värden och vidare att man istället för att utgå från den okulära jordartsbenämningen som dittills gjorts istället korrigerade hållfastheten baserat på konflytgränsen. Detta förslag blev verklighet då man vid ett branschmöte år 1969 kom överens om en korrigerad enbart baserad på konflytgränsen (SGI, 1969).

## 2.6 Laboratorieanvisningarna 1985

Under 1980-talet framtogs ett antal detaljerade laboratorieanvisningar för de vanligaste förekommande laboriemetoderna. I anvisningarna för skjuvhållfasthet, utarbetad år 1985 av Carl-Eric Wiesel, Sven Hansbo och Bengt Broms, infördes Hansbos utvärdering av konförsöket istället för den äldre metoden (Wiesel et al, 1985).

Undersökningar av Kallstenius (1963) hade visat att konfaktorn  $K \approx 1,0$  för 100g-30°-konen även kunde appliceras på prover tagna med den då nya standardkolvprovtagaren St I. I samband med detta undersöktes även 400g-konen. Undersökningen visade på ett klart linjärt samband mellan dessa två koner och att 400g-konen gav dubbla konintrycket jämfört med 100g-konen inom intervallen 4-20 mm för 400g-konen och 2-10 mm för 100g-konen.

---

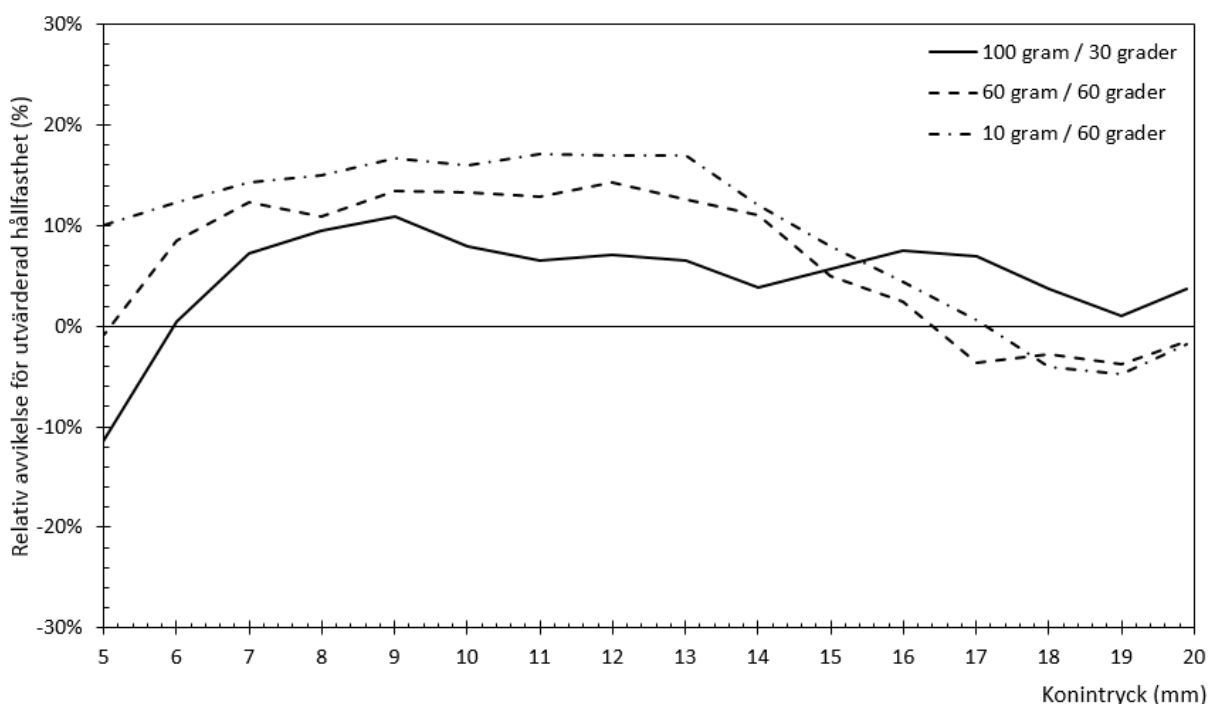
<sup>2</sup> Kallstenius utvärderingsmetod gavs av  $\tau_{fu} = \frac{3,7+0,2H}{K^i}$ , där H = provtagningsdjup i m, i = konintryck för 100g-30°-konen i mm och K = empirisk faktor baserad på flytindex  $I_L = \frac{w-w_P}{w_L-w_P}$  (för normalsensitiva svenska leror är  $I_L$  ofta kring 1). Vid porövertryck minskar provtagningsdjupet med övertrycket dividerat med volymvikten. Kallstenius metod visade överlägsen överensstämmelse med fältvingförsök jämfört med de andra utvärderingsmetoderna, men kommittén rekommenderade inte denna då den till stor del var obeprövad och till viss del svåränd. Se Kallstenius (1963) för vidare beskrivning.

I laboratorieanvisningarna gavs baserat på detta utvärderingstabeller för 400g-30°, 100g-30°, 60g-60° och 10g-60°-konerna och där 100g-30°-konens angavs som standardkon för provning av ostörda jordprover. För omrörda prover angavs 60g-60°-konen som standardkon. De tidigare varierande konfaktorena för ostörda respektive omrörda prover förenklades så att konfaktorena  $K = 1,0$  användes för 30°-konerna och  $K = 0,25$  för 60°-konerna.

Utvärderingsintervallen inskränktes till mellan 5 och 19,9 mm, från tidigare 2,0-19,9 mm, eftersom skillnaden mellan SGFs kolborrkommitté och Hansbos utvärdering mellan 2 och 5 mm visade upp till 60 % skillnad i utvärderad hållfasthet. Skillnaden i utvärderad hållfasthet mellan konerna inom intervallet 5-19,9 mm visas i Figur 7. Den maximala avvikelserna, som inträffade för 10g-konen vid konintrycket 11,5 mm, var ca 18 %.

I samband med införandet av Hansbos utvärdering i början av 1980-talet erhöles alltså i genomsnitt mellan ca 5 och ca 10 % lägre skjuvhållfasthet av ostörda jordprover jämfört med den äldre utvärdering som använts från 1930-talet.

Rekommendationerna i laboratorieanvisningarna låg sedan till grund, och användes i princip utan ändringar, vid upprättande av svensk standard SS 02 71 25 år 1991.



**Figur 7. Utvärderad hållfasthet, jämförelse kolborrkommitté 1963 och laboratorieanvisningarna 1985 (400g-konen utvärderades inte av kolborrkommittén 1963).**

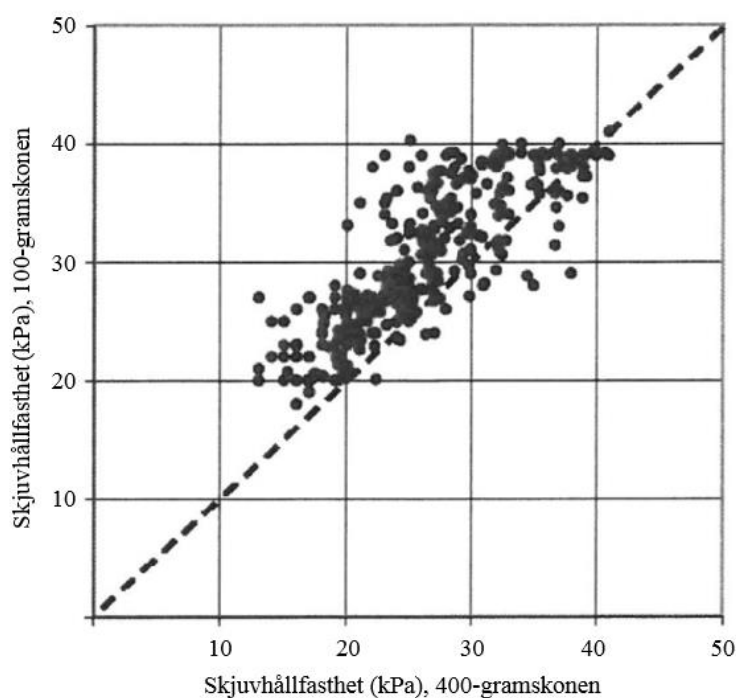


## 2.7 Laborierkommittén 2001

Åren 2000-2001 genomförde SGFs Laborierkommitté en systematisk studie med dubbelprovning mellan 100g- och 400g-konen för att undersöka övergången mellan de två konerna. Studien, som redovisas i Eriksson (2001), utfördes eftersom man misstänkte att 100g-konen överskattade utvärderad hållfasthet vid konintryck nära lägsta tillåtna konintryck som var 5 mm. Omkring 350 dubbelprovningar sammanställdes och visade på att 100g-konen överskattade utvärderad hållfasthet med i genomsnitt 15 % för konintryck mellan 5 och 7 mm, se Figur 8.

Slutsatsen och rekommendationerna var, baserat på antagandet att en tyngre kon ger mer representativa värden, att inskränka tillåtet konintryck från 5-20 mm till 7-20 mm för att minska osäkerheterna i utvärderingen, minimera felkällor orsakade av förslitningstoleranser och avläsningsfel samt för att minimera markanta språng i utvärderad skjuvhållfasthet vid övergång till den tyngre konen.

Trots att dessa rekommendationer inte inarbetades i någon reviderad standard har i praktiken samtliga laborier i Sverige följt kommitténs rekommendationer sedan 2001.



**Figur 8. Jämförelse av utvärderad hållfasthet mellan 100g- och 400g-konen inom konintryck 5 och 7 mm för 100g-konen (ur Eriksson, 2001).**

## 2.8 Internationell praxis

Sällfors & Larsson (2017) genomförde en översiktlig internationell enkätstudie i syfte att utreda hur olika länder normalt bestämmer lerors skjuvhållfasthet. Enkätsvaren visade att fallkonförsökets användning i världen för bestämning av odränerad skjuvhållfasthet är tämligen begränsat. De länder som använder försöket i kommersiella projekt är huvudsakligen Sverige, Finland, Norge och delvis Kanada. I andra länder, exempelvis Storbritannien, Japan och USA,

har fallkonförsöket utretts som en möjlig metod men inte ansetts ge tillräckligt representativa och tillförlitliga resultat (ex Tanaka et al 2012).

I Norge och Finland utförs fallkonförsök sporadiskt men erhållna värden på skjuvhållfastheten har låg status och används oftast inte vid dimensionering. Värden från fältförsök, och i Norges fall även värden från skjuv- och triaxialförsök i laboratorium, används i långt större grad. I Finland utvärderas fallkonförsöket med samma konfaktorer som i Sverige, medan fallkonförsöket i Norge utvärderas med kalibrering mot enaxliga tryckförsök i laboratorium.

I Kanada bestäms skjuvhållfastheten huvudsakligen i fält med CPT- och vingförsök. I de få fall där prover tas in till laboratorium utförs dock fallkonförsök.

Sverige är därmed det enda land där försöket utförs rutinemässigt på ostörda jordprover och där erhållna hållfasthetsvärden ofta används vid dimensionering. Det bör dock nämnas att det även inom Sverige till del råder tveksamhet kring försökets tillförlitlighet och oftast anses vara ett indexförsök.

Fallkonförsöket för bestämning av konflytgränsen används dock i större grad i flertalet länder, se vidare SGF Notat 1:2018.

### **3 SS 027125 (F D SVENSK STANDARD) - SS EN 17892-6**

I den tidigare gällande svenska standarden SS 027125 beskrivs hur fallkonförsök utförs på både ostörda och omrörda prover. Standarden specificerar att provningen på ostörda prover ska utföras på jordmaterial som är kvar i provhylsan och att provet ska vara taget med en svensk standardkolvprovtagare. Den ostörda provningen ska ske, i första hand, i mellanhylsans underdel och den får inte utföras i överhylsans överdel eller underhylsans underdel.

För att minska inverkan av störningar trycks 10-15 mm av provet ut ur hylsan och skärs av med trådvaskärare. Konen sänks ner till den tangerar provets yta och släpps sedan. Konintrycket läses av och sedan trycks 1,5 ggr. konintrycket ut och skärs av så att en ny provyta skapas. På detta vis görs tre provningar och om något värde avviker mer än 10 % från medelvärdet så görs en ny provning. Medelvärdet på konintrycket beräknas och sätts in i ekvation 6 för att beräkna den odränerade skjuvhållfastheten.

De provbitar som provats och skurits av används till provning av den omrörda skjuvhållfastheten. Provbitarna läggs i en blandningsskål och rörs om med en spatel tills det är helt omrört. Därefter planas provytan av jäms med skålens överkant och fallkonen släpps i mitten av provet. Konintrycket noteras och provet rörs om på nytt. Provningen upprepas till dess två på varandra utförda provningar med omrörning emellan ger samma konintryck. Detta konintryck används för att beräkna den omrörda skjuvhållfastheten med ekvation 6.

Den nu gällande standarden SS EN 17892-6 har en mer detaljerad beskrivning av provningsförfarandet och ett mer generellt synsätt på vilken typ av prover som kan betraktas som ostörda. Prover som tryckts ur sin provhylsa eller trimmats från större prov räknas också som ostörda. Den ostörda hållfastheten betraktas som ett indexvärde och avser provets hållfasthet på bänken i laboratoriet.

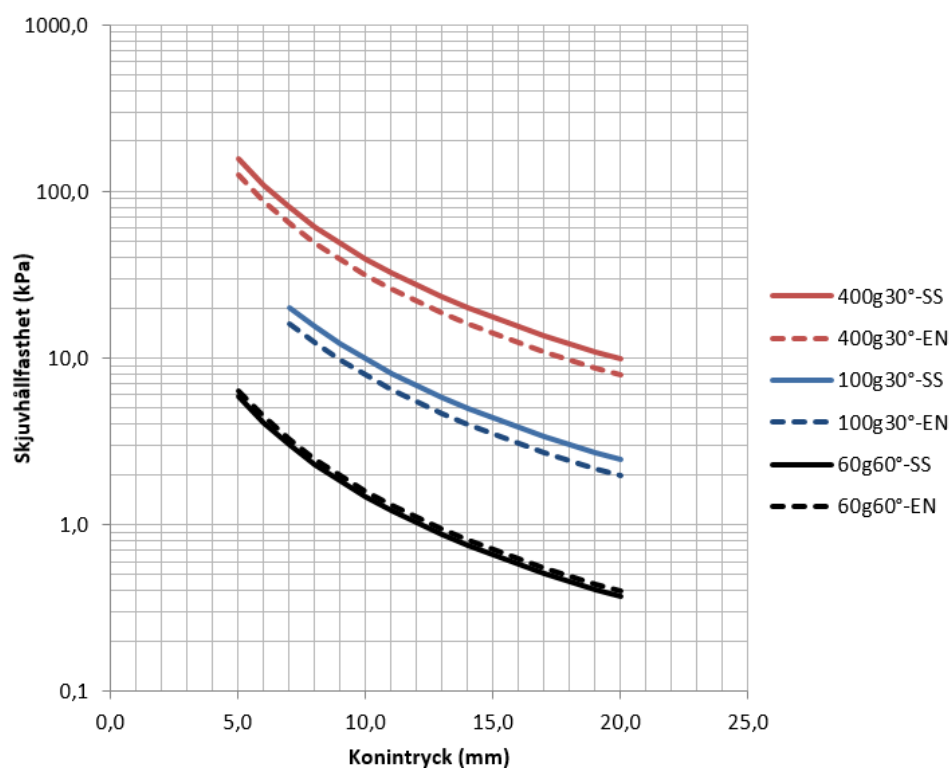
När det gäller den omrörda skjuvhållfastheten skiljer förfarandet sig inte åt mellan standarderna. Kraven på konernas vikt och geometri är samma som i SS 027125.

Den stora skillnaden ligger i värdet på konfaktorn,  $K$ , och därmed den skjuvhållfasthet som beräknas med ekvation 6, se tabell 2 och Figur 9.

Tabell 2. Tillgängliga koner och skillnader mellan f d SS 207125 och kommande SS EN 17892-6

Konvinkel	Konvikt	SS 027125		SS EN 17892-6 <sup>1</sup>	
		Kon-faktor	Skjuvhållfasthets-intervall	Kon-faktor	Skjuvhållfasthets-intervall
30°	400 gr	1,0	9,8 – 157 kPa	0,8	7,8 – 126 kPa
	100 gr		2,5 – 20 kPa		2 – 16 kPa
60°	60 gr	0,25	0,37 – 5,9 kPa	0,27	0,4 – 6,4 kPa
	10 gr		0,06 – 0,98 kPa		0,07 – 1,06 kPa

<sup>1</sup> I standarden finns även en 80g-30°-kon men denna kommer knappast börja användas i Sverige och beskrivs således inte här.



Figur 9. Jämförelse av beräknad skjuvhållfasthet med konfaktorer enligt SS 0207125 (heldragna linjer) och SS EN 17892-6 (streckade linjer).

Om fallkonförsöket utvärderas enligt SS EN 17892-6 blir alltså den ostörda hållfastheten (30°-kon) lägre än enligt f d SS 0207125. Däremot blir den omrörda hållfastheten (60°-kon) något högre. Sensitiviteten, som är kvoten mellan ostörd och omrörd hållfasthet, blir därav lägre med den nya standarden än tidigare.

I den nya standarden finns en skrivning som säger att man utöver skjuvhållfastheten, som beräknats med ekvation 6, kan använda andra korrelationer som baseras på lokala erfarenheter av specifika jordar. Detta ger en öppning för svenska laboratorier att även i framtiden rapportera

hållfasthetsvärden som beräknats med konfaktorer enligt SS 207125. Dessa värden måste emellertid rapporteras som tillägg till de hållfasthetsvärden som de nya konfaktorererna ger.

En mycket viktig observation är att SS EN 17892-6 inte ställer krav på att provningen utförs på prov som sitter kvar i sin provhylsa, att provet är taget med en standardkolvprovtagare och att provningen inte utförs på del av provhylsa med dålig provkvalitet. Detta innebär en risk att ett geotekniskt laboratorium rapporterar fallkonresultat enligt SS EN 17892-6, med värden på hållfastheten beräknade med de gamla konfaktorererna utan att ha uppfyllt de krav som SS 0207125 ställde. Exempel på detta skulle kunna vara att provningen utförts på nederdelen av en underhylsa eller på en hylsa från en norsk 54 mm provhylsa. Provningen och resultaten skulle fortfarande uppfylla kraven som ställs i SS EN 17892-6, men provningen uppfyller inte kraven för att få använda konfaktorererna i SS 0207125.

## 4 INVERKANDE FAKTORER

### 4.1 Inledning

Enighet råder om att fallkonförsöket kan antas motsvara ett direkt värde på jordmaterialets/jordprovets hållfasthet (Koumoto & Houlsby, 2001, Vardanega & Haigh, 2014 m fl). För bestämning av skjuvhållfasthetsvärdet från ett visst erhållet konintryck finns flertalet studier utförda, både inom Sverige och internationellt. I princip samtliga dessa baseras på Hansbos (1957) ekvation:

$$\tau = K \frac{mg}{i^2} \quad \text{Ekv. 6}$$

Det huvudsakliga målet för studierna har varit att ta fram representativa värden på konfaktorn K. Denna konfaktor har visat sig bero av flertalet saker, bland annat konens spetsvinkel och egenskaper hos jordprovet.

Internationellt används fallkonförsöket endast för bestämning av en jords konflytgräns,  $d$  v s för omrörda jordprover, och de internationella studierna har därför inte tagit hänsyn till sensitivitet eller typ av provtagare.

Houlsby (1982), och senare också Koumoto & Houlsby (2001), utförde teoretiska statiska och dynamiska beräkningar av konfaktorn. I dessa beräkningar antogs dels att jordmaterialet var isotropt, dels att jordmaterialet hade sensitiviteten 1,0,  $d$  v s att ingen minskning av skjuvhållfastheten sker vid påtvingad töjning (= omrörda prover). Analyserna visade att konfaktorn huvudsakligen påverkades av spetsvinkeln, konens ytojämnhet – och därmed adhesionen mellan jordprovet och konens yta – och skjuvtöjning vid konens penetration.

Enligt studierna är adhesionens inverkan på konfaktorn mindre ju större konens spetsvinkel är, och det teoretiska värdet av konfaktorn varierade mellan ca 1,0 och nära 2,0 för 30° spetsvinkel och mellan ca 0,25 och ca 0,4 för 60° spetsvinkel. De lägre värdena gäller då adhesionen mellan konens yta och jordmaterialet är lika jordens skjuvhållfasthet. Utifrån detta rekommenderade Koumoto & Houlsby (2001) användandet av 60°-konerna för bestämning av en jords skjuvhållfasthet, men då särskilt för omrörda prover och för flytgränsbestämning. Några teoretiska studier av ostörda jordprover har veterligen inte utförts.

Analysen av Houlsby (1982) visade vidare att effekten av jordprovets densitet var försumbar i förhållande till konens vikt, d v s en variation av jordens densitet och vattenkvot har ingen påverkan på erhållet konintryck. Detta innebär en stor fördel vid provning av omrörd jord. Detta faktum kunde även konstateras av bland andra Koumoto & Houlsby (2001) och Vardanega & Haigh (2014).

Sammanfattningsvis visar teoretiska och empiriska studier att konfaktorn, förutom konens spetsvinkel, påverkas av:

- Typ av konmaterial, d v s ytojämnhet och adhesion mellan konens yta och jordprovet (Houlsby, 1982 och Koumoto & Houlsby, 2001)
- Jordens sensitivitet (Hansbo, 1957)
- Typ av lera (Leskelä, 1968)
- För omrörda prover plasticitetstalet, d v s i huvudsak flytgränsvärdet (Karlsson, 1961)
- För ostörda prover typ av provtagare, d v s provkvalitet (Hansbo, 1957 och Kallstenius, 1958 och 1963, m fl)

## 4.2 Inverkande faktorer av jordmaterialet och jordprovet

Bortsett från ovannämnda påverkande faktorer finns en naturlig variation av erhållna konintryck och således utvärderad skjuvhållfasthet, både för omrörda och ostörda jordprover.

Kallstenius (1963) analyserade en stor mängd försök på omrörda prover utförda av SJ (1922) med olika typer av koner och kunde konstatera att spridning av konintrycken var ca  $\pm 10\%$ .

För bestämning av hållfastheten hos ostörda jordprover tillkommer naturliga variationer orsakade av jordens mesostruktur. Hellgren (1961) gjorde en serie fallkonförsök på snittade ytor med 25 mm avstånd på en lera med ca 5 – 10 mm tjocka varv och uppmätte en standardavvikelse på ca 14 % på utvärderad hållfasthet. I samma lera var standardavvikelsen för vattenkvoten ca 13 %, för konflytgränsen ca 12 % och för sensitiviteten ca 23 %. Liknande avvikelser vid hållfasthetsbestämningar av ostörda prover erhöles även av Kallstenius (1963).

För prover med silt- och sandskikt riskeras att för låga hållfasthetsvärden på leran erhålls genom att leran sugit åt sig vatten från silt- och sandskikten, medan att hållfasthetsvärden kan överskattas vid provning nära ett förekommande skikt.

Fallkonförsöket verkar däremot vara oberoende av vilken riktning som konsläppet utförs. Enligt Hellgren (1961) och Kallstenius (1963) erhöles som mest ca 10 % skillnad i uppmätta konintryck mellan provning i axiell och radiell riktning på ostörda jordprover. Detta indikerar att den brottzon som konens penetration orsakar inbegriper både den vertikala och horisontella skjuvhållfastheten. Fallkonförsöket kan därmed i praktiken anses vara oberoende av en leras anisotropi.

Fallkonförsöket för bestämning av ostörda provers hållfasthet är huvudsakligen kalibrerat ned till djup omkring 15 m, och i enstaka punkter ned till 30 m (Jakobsson 1954, Hansbo 1957, SGFs kolvborrkommitté 1963, Kallstenius 1963). Som en konsekvens av detta blir erhållna hållfasthetsvärden från fallkonförsöket ofta för låga på prover tagna djupare än ca 15 m (Jakobsson 1954, Persson 2017, Jonsson & Sellin 2012, Nieminen & Nyqvist 2006, m fl). Enligt Sällfors & Larsson (2017) kan däremot denna effekt, åtminstone delvis, motverkas genom extremt försiktig provhantering och kort tid mellan provtagning och provning. Kopplat till detta kan det också konstateras att fallkonförsöket påverkas starkt av provkvalitet och ger vid störda prover både en ändring i enstaka värden och en större spridning av en serie försök.

Opublicerade studier visar på att provtagning med StII generellt ger högre skjuvhållfasthet från fallkonförsöket än med provtagning med StI.

### 4.3 Inverkande faktorer vid genomförande

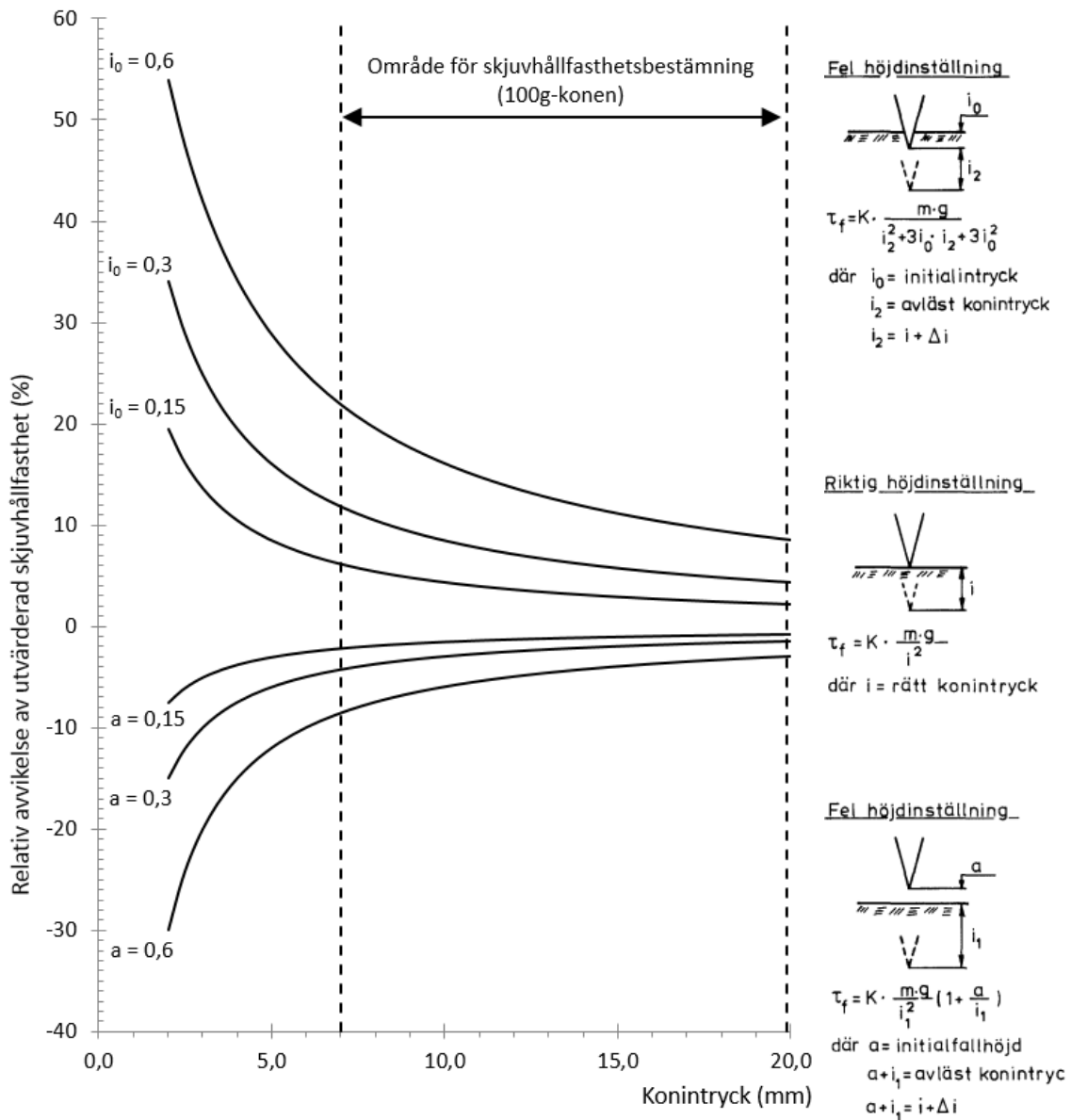
Vid provning finns ett antal inverkan faktorer från utförandet och utrustningen som kan ha betydande påverkan på erhållet konintryck och utvärderad skjuvhållfasthet, bl a konens eventuella nedslitning, konspetsens placering i förhållande till jordprovets överyta, konens vikt, felavläsning samt för omrörda prover tid mellan omrörning och provning. För bestämning av ostörda provers hållfasthet, d v s då provning sker med provet i dess provtub, kan dessutom utvärderad hållfasthet bli för låg om jordprovet inte fyller hela provtuben och därmed saknar sidostöd (Wiesel et al 1985).

Om konens massa avviker  $\pm 1$  % blir felet i utvärderad hållfasthet ca  $\pm 1$  %. För 30°-koner gäller att avvikelsen  $\pm 0,2^\circ$  hos spetsvinkeln ger ett fel i utvärderad hållfasthet på ca  $\pm 1$  %. Om konspetsen är belägen över provets överyta kan jordens hållfasthet avsevärt underskattas. Motsatt gäller om konen från början trängt ner i provet innan släppet. Exempel ges i figur 10.

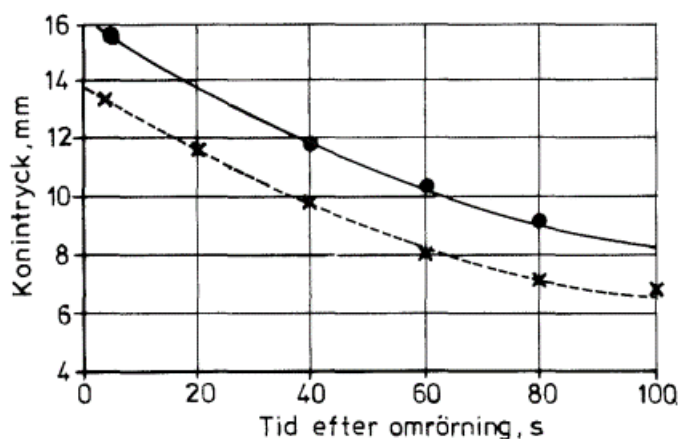
En relativt måttlig nedslitning av konspetsen kan medföra stora fel. En 30°-kon med knappt 1 mm nedsliten spets kan ge 25 – 30 % för hög skjuvhållfasthet vid 7 mm konintryck. Enligt Hansbo (1957) kan däremot ett någorlunda representativt värde erhållas om konens geometriska spets tangerar provets yta istället för den nedslitna spetsen, vilket också Houlsbys (1982) teoretiska studie visade.

För omrörda prov, särskilt högsensitiva, bör tiden mellan omrörning och provning minimeras för att undvika tixotropiska effekter. Ett exempel visas i Figur 11 där konintrycket minskar över tid på grund av hållfasthetstillväxt i högsensitiva omrörda leror.

Enligt Houlsbys (1982) teoretiska studie påverkas jordprovet radiellt upp till som mest 21,4 mm från konens mittpunkt vid ett konintryck av 20 mm. Då de flesta skålar för provning av omrörd hållfasthet är ca 55 mm är detta alltså tillräckligt.



Figur 10. Relativa avvikelser av utvärderad skjuvhållfasthet vid felaktig höjdinställning på konen. Observera skillnader i tillåtna konintryck för konerna.



Figur 11. Exempel på samband mellan konintryck (10g-60°-konen) och tid efter omrörning för två olika kvickleror (ur Wiesel et al, 1985).

## 5 REKOMMENDERAD ANVÄNDNING AV KONFAKTORER

### 5.1 Inledning

Tabell 3 redovisar de vanligt refererade empiriskt och teoretiskt framtagna konfaktorer. Hansbo (1957), Kallstenius (1963) och SGSs kolvborkommitté (193) kalibrerade konfaktorer för ostörda prover mot fältvingförsök och för omrörda prover mot laborievingsförsök. Wood (1985) och Karlsson (1961) kalibrerade konfaktorer för omrörda prover mot laborievingsförsök.

Tabellen visar att erhållna konfaktorer skiljer sig för omrörda och ostörda jordprover, likaså mellan teoretiskt och empiriskt framtagna värden. Detta är naturligt eftersom jordens sensitivitet påverkar konintrycket.

Tabell 3. Sammanställning av ett antal i litteraturen redovisade konfaktorer

Lerans tillstånd	Konvinkel	Bakgrund till f d SS			Bakgrund till SS-EN		
		Hansbo (1957)	Kallstenius (1963)	SGF (1963)	Wood (1985)	Karlsson (1961)	Koumoto & Houlsby (2001) <sup>1</sup>
Omrörd	30°	-	-	-	0,85	0,8	1,33
	60°	0,30	-	-	0,29	0,27	0,31
Ostörd	30°	0,8 / 1,0 <sup>2</sup>	1,0	1,0	-	-	-
	60°	0,2 / 0,25 <sup>3</sup>	-	-	-	-	-

<sup>1</sup> Teoretiska värden baserade på att adhesionen längs konen är halva värdet av skjuvhållfastheten.

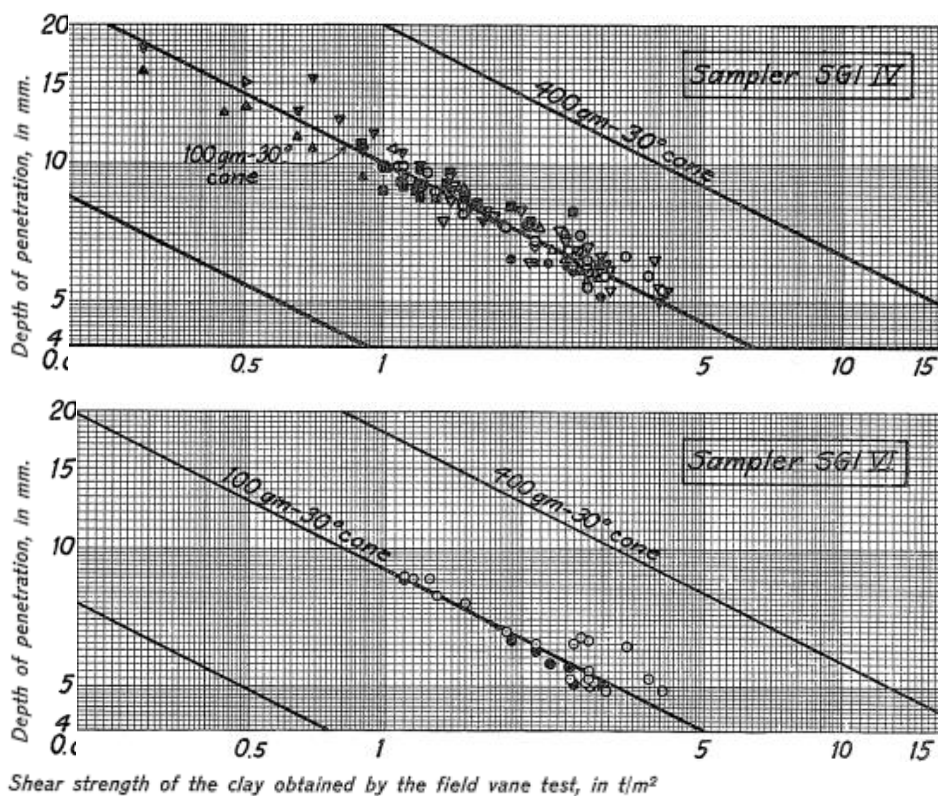
<sup>2</sup> För provtagare SGI IV var  $K = 1,0$  och för SGI VI var  $K = 0,8$ . Enligt Kallstenius (1963) var  $K = 1,0$  för St I.

<sup>3</sup> För provtagare SGI IV var  $K = 0,25$  och för SGI VI var  $K = 0,2$ .

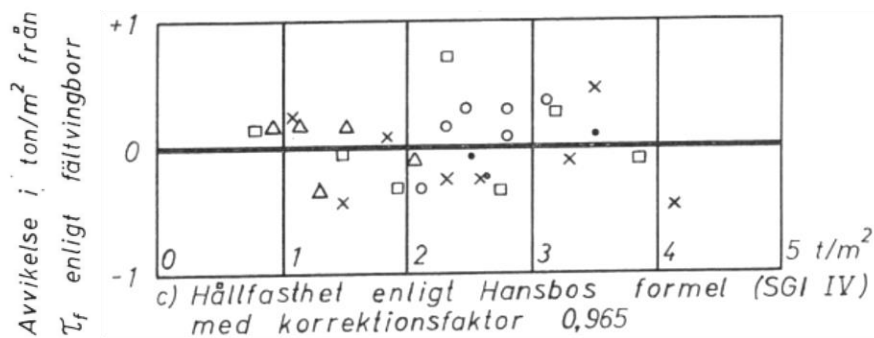


## 5.2 Underlag för kalibrering mot fältvingförsök

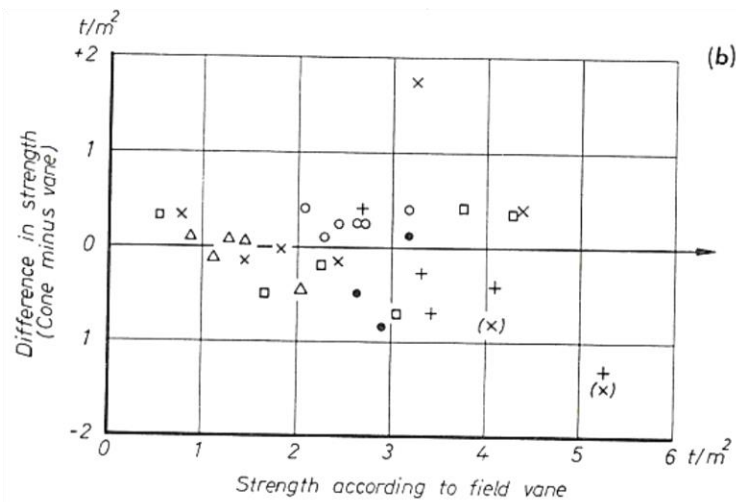
Figur 12 – 14 redovisar underlag för kalibrering av konfaktorn mot fältvingförsök, d v s enligt utvärderingsmetodik angiven i f d SS 027125 och använd i Sverige från början 1980-talet fram till idag.



Figur 12. Underlag för val av konfaktorer  $K = 1,0$  och  $0,8$  för provtagare SGI IV och SGI VI (ur Hansbo, 1957), ostörd lera och med 100g-30°-kon.



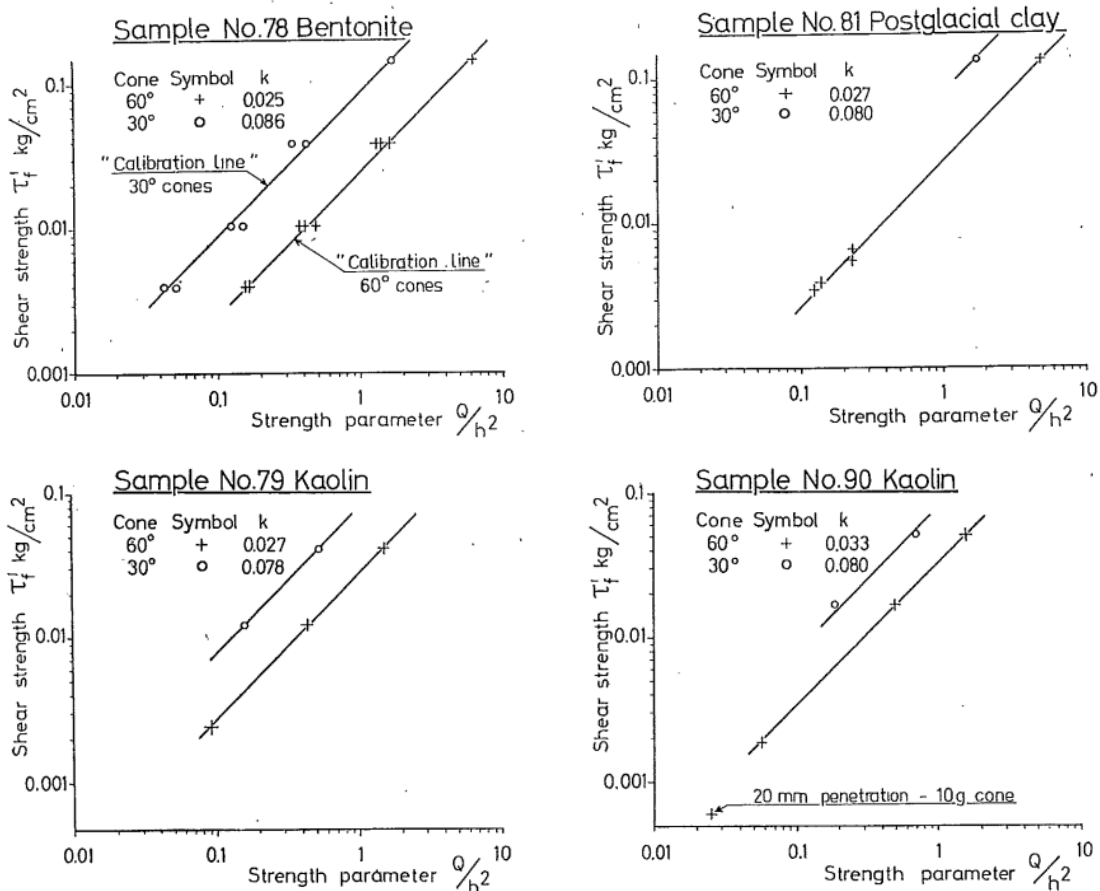
Figur 13. Underlag för val av konfaktor  $K = 1,0$  för standardkolvprovtagaren StI, ur SGFs kolvborkommitté (1963), ostörd lera och med 100g-30°-kon.

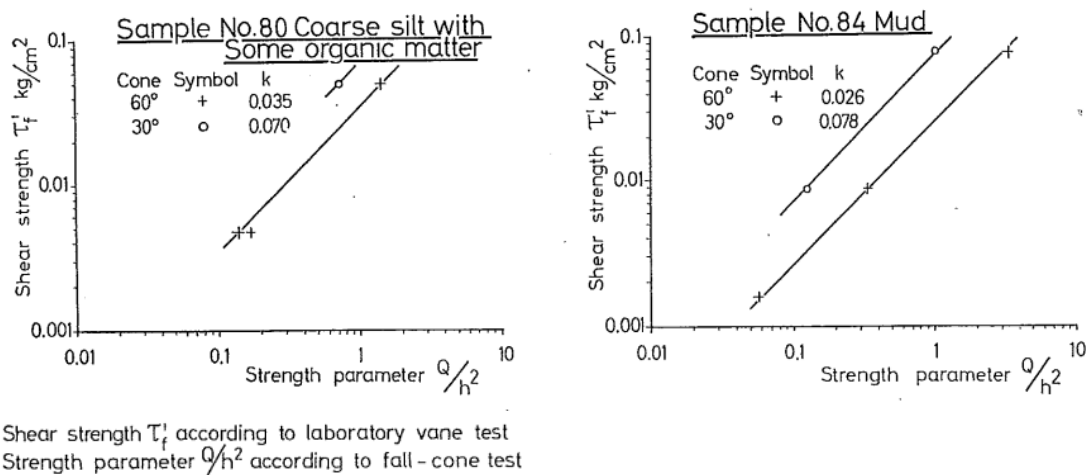


Figur 14. Underlag för val av konfaktor  $K = 1,0$  för standardkolvprovtagaren StI, ur Kallstenius (1963), ostörd lera och med 100g-30°-kon.

### 5.3 Underlag för kalibrering mot laboratorievingsförsök

Underlag för Karlssons (1961) konfaktorer ges i Figur 15, d v s med konfaktorer kalibrerade mot laboratorievingsförsök och angivna i SS EN 17892-6.





**Figur 15. Underlag för konfaktorer  $K = 0,8$  respektive  $K = 0,27$  (ur Karlsson, 1961), omrörd lera och för 30°- respektive 60°-kon.**

#### 5.4 Rekommenderade konfaktorer

Eftersom utvärderingen av fallkonförsöket är semi-empirisk kan konfaktorerna i princip kalibreras mot valfri metod. Baserat på ovan redovisat underlag rekommenderas dock en fortsatt utvärdering med konfaktorer enligt f d SS 027125, d v s kalibrerade mot fältvingförsöket, huvudsakligen av följande orsaker:

- Den baseras på provning med intakta/ostörda jordprover och syftar till att utvärdera jordens skjuvhållfasthet in situ, vilket i de flesta fall är mer ändamålsenligt än jordprovets omrörda skjuvhållfasthet på laboratoriet;
- Det finns betydligt mer omfattande underlag för svenska leror, jmf. avsnitt 5.2-5.3 ovan, trots en viss spridning;
- Svensk praxis baseras sedan i början av 1980-talet i stor grad på utvärdering med konfaktorer enligt f d SS 027125 och en ändrad utvärdering skulle innebära omfattande ändringar i korrigeringsfaktor, riktlinjer, handböcker m m.

Fallkonförsöket har med dessa konfaktorer visat sig kunna ge samstämmiga skjuvhållfasthetsvärden med fältvingförsök och direkta skjuvförsök, förutsatt att högkvalitativa prover erhållits från måttliga djup. Det bör dock noteras att skjuvhållfasthetsvärden från fallkonförsöket bör användas med försiktighet eftersom de i normala fall uppvisar en större spridning än värden från mer avancerade laboratorieförsök, och eftersom skjuvhållfastheten behöver korrigeras med hänsyn till konflytgränsen, vilket i sin tur innebär ytterligare osäkerheter. Fallkonförsöket bör även fortsättningsvis användas som ett indexförsök.

För att även fortsättningsvis följa svensk praxis är det ytterst viktigt att skjuvhållfastheter utvärderade med konfaktorer enligt f d SS 027125 används i beräkningar, vid dimensionering, empiriska korrelationer m m.

## 5.5 Rekommenderad redovisning i laboratorieprotokoll

För att uppfylla redovisningskravet i SS-EN 17892-6 krävs att laboratorier redovisar utvärdering av skjuvhållfastheter med konfaktorer enligt SS-EN 17892-6. Det bör även framgå av laboratorieprotokollen vilken kon som använts vid provning.

Det rekommenderas däremot att också alltid göra en tilläggsredovisning med konfaktorer enligt f d SS 027125, d v s  $K = 1,0$  för koner med  $30^\circ$  spetsvinkel och  $K = 0,25$  för koner med  $60^\circ$  spetsvinkel. Detta för att även fortsättningsvis kunna använda resultat från fallkonförsök i enlighet med svensk praxis sedan början av 1980-talet. Skjuvhållfastheter angivna i eventuella .prv-filer eller liknande ska baseras på dessa konfaktorer.

En förutsättning för att rapportera utvärderade värden på skjuvhållfastheten med konfaktorerna i f d SS 027125 är att följande krav är uppfyllda (utöver krav som står i SS-EN ISO 17892-6):

- Provning av ostörd hållfasthet ska utföras på jordmaterial kvarsittande i hylsa tagen med svensk standardkolvprovtagare StI eller StII;
- Provningen ska utföras på till synes ostört jordmaterial från underhylsans överdel eller mellanhylsans underdel;
- Konintrycken ska bestämmas till närmaste 0,1 mm;
- Konintrycken ska bestämmas i intervallet 5-19,9 mm, med undantaget av 100g-30°-konen, där begränsas konintrycket till 7-19,9 mm.

Vid provning på jordmaterial som tryckts ur provhylsan eller som är trimmat eller utstansat från en större diameter, exempelvis från en provtagare med större diameter eller blockprover, gäller strängt taget inte konfaktorer angivna i f d SS 027125. Om skjuvhållfastheten ändå utvärderas med dessa konfaktorer ska detta anmärkas i laboratorieprotokollet.

För omräkning av skjuvhållfastheter mellan f d SS 027125 och SS-EN 17892-6 gäller följande:

$$\tau_{SS-EN} = 0,8 \times \tau_{SS} \quad (30^\circ\text{-koner}) \quad \text{Ekv. 11}$$

$$\tau_{SS-EN} = 1,08 \times \tau_{SS} \quad (60^\circ\text{-koner}) \quad \text{Ekv. 12}$$

$$\tau_{SS} = 1,25 \times \tau_{SS-EN} \quad (30^\circ\text{-koner}) \quad \text{Ekv. 13}$$

$$\tau_{SS} = 0,93 \times \tau_{SS-EN} \quad (60^\circ\text{-koner}) \quad \text{Ekv. 14}$$

I praktiken används alltid en  $30^\circ$ -kon för ostörda prover med en skjuvhållfasthet över 2,5 kPa, och en  $60^\circ$ -kon för omrörda prover med en skjuvhållfasthet lägre än 5,9 kPa (utvärderade enligt f d SS 027125).

## 6 REFERENSER

Bjerrum, L. & Flodin, N., 1960. The development of soil mechanics in Sweden, 1900-1925. Géotechnique, 10(1): 1-18.

- Caldenius, C., 1938. Några rön från grundundersökningar i Göteborg rörande fasthetens variation inom lerorna. Teknisk tidskrift, V. o V. 68(12):137-142.
- Caldenius, C, och Lundström, R., 1956. The landslide at Surte on the river Göta älv. Sveriges geologiska undersökning. Ser. Ca, Avhandlingar och uppsatser, 0348-1352;27.
- Ekström, G., 1927. Klassifikation av Svenska åkerjordar, Kungl. boktryckeriet, P.A. Norstedt & söner, 161 s.
- Eriksson, L. G., 2001. Hur tillförlitligt är fallkonförsöket? En jämförelse mellan resultat från olika koner. Väg- och vattenbyggaren, Nr. 4.
- Eriksson, L. (2014). Konmetoden - tillbakablick. Statens geotekniska institut, SGI, Linköping.
- Fellenius, B., 1938a. Apparat för undersökning av lerors skärhållfasthet. Teknisk tidskrift, V. o V., 68(1):9-10.
- Fellenius, B., 1938b. Provbekastning av i lera nedpressade järnrör. Teknisk tidskrift, V. o V., 68(10):113-118.
- Flodin, N., 1990. Ur SGF 2:95 - Några pionjärprofiler i svensk geoteknik. Svenska Geotekniska Föreningen Rapport 2:95.
- Flodin, N. och Broms, B., 1981. Historical development of civil engineering in soft clay. Soft Clay Engnr, Elsevier, Amsterdam.
- Hansbo, S., 1957. A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. Swedish Geotechnical Institute, Proceedings No. 14, Stockholm.
- Hansbo, S., 1962. Ny konapparat för bestämning av lerors skärhållfasthet. Byggmästaren Nr 10, ss. 215-220.
- Hansbo, S., 1975. Jordmateriallära. AWE/Geber, Stockholm, 218 s.
- Helenelund, K. V., 1977. Methods for reducing undrained shear strength of soft clay. Statens Geotekniska Institut, Rapport Nr. 3, Linköping.
- Hellgren, A., 1961. Strength dispersion in fall-cone tests on varved clay. I Standard piston sampling. Statens Geotekniska Institut, Proc. 19, Stockholm.
- Houlsby, G. T., 1982. Theoretical analysis of the fall cone test. Geotechnique, Vol. 32, 111-118.
- Hultin, T., 1937. Försök till bestämning av Göteborgslerans hållfasthet. Tekn. Samfundets Handlingar, No. 2.
- Jakobson, B., 1954. Influence of sampler type and testing method on shear strength of clay samples, Statens Geotekniska Institut, Proc. 8, Stockholm.
- Jonsson, M. och Sellin, C., 2012. Correction of shear strength in cohesive soil. Master's thesis 2012:61, Chalmers.
- Kallstensius, T., 1963. Studies on clay samples taken with standard piston sampler. Statens Geotekniska Institut, Proc. 21, Stockholm.
- Kallstensius, T., 1958. Mechanical disturbances in clay samples taken with standard piston sampler. Statens Geotekniska Institut, Proc. 16, Stockholm.

- Karlsson, R., 1961. Suggested improvements in the liquid limit test, with reference to flow properties of remoulded clays. Proc. 5<sup>th</sup> International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, p. 171-184, Paris.
- Koumoto, T. och Houlsby, G.T., 2001. Theory and practice of the fall cone test. *Géotechnique*, 51(8): 701-712.
- Larsson R., Sällfors G., Bengtsson P-E., Alén C., Bergdahl U. och Eriksson L., 2007. Skjuvhållfasthet– utvärdering i kohesionsjord, Statens geotekniska institut, Information 3, Linköping.
- Leskelä, A., 1968. Factors bearing an influence on cone test results (Finska). *Takenustekniikka* No. 10.
- Muir Wood, D., 1985. Some fall-cone tests. *Géotechnique* 35(1), 64-68.
- Olsson, O., 1921. Metod för undersökning av lerors hållfasthetsegenskaper, tillämpad vid de geotekniska undersökningarna vid Statens Järnvägar. *Geologiska Föreningens Förhandlingar*, Band 43, Häfte 5, ss. 502-507.
- Olsson, J., 1925. Kolvborr. Ny borrhyp för upptagning av lerprov. *Teknisk Tidskrift*, V. o V. 52(2):13-16.
- Olsson, J. 1937. Om friktion och kohesion i lera. *Teknisk tidskrift*, V. o V. 67(2):21-23.
- Osterman, J., 1960. Views on the stability of clay slopes: *Geologiska Föreningens Förhandlingar*, Band 83, Häfte 3, ss. 346-366.
- Persson, E., 2017. Empirical correlation between undrained shear strength and preconsolidation pressure in Swedish soft clays. *Kungl Tekniska Högskolan, Master of Science Thesis* 17/07.
- SGFs kolvborrskommitté 1963. Tolkning av fallkonprov på provkroppar av lera tagna med standardkolvborr, Svenska Geotekniska Föreningen.
- SGF Notat 1:2018. Konflytgränsen. Svenska Geotekniska Föreningen, Stockholm.
- SIG, 1961. Swedish Committee on piston sampling, Standard piston sampler. Statens Geotekniska Institut, Proc. 19, Stockholm.
- SIG, 1969. Reducering av skjuvhållfasthet med avseende på finlekstal och sulfidhalt. Sammandrag av teknisk träff 1969-12-11, Stockholm.
- SJ, 1922. Statens Järnvägars geotekniska kommission 1914-1922. Slutbetänkande angivet till Kungl. Järnvägsstyrelsen den 31 maj 1922. *Geotekniska meddelanden* Nr 2, Statens Järnvägar, Stockholm.
- Skaven Haug, S., 1931. Skærfasthetsforsøk med lere. *Norges Statsbaner, Meddelande* 6(6), pp. 101-105.
- Skempton, A. W. och Bishop, A. W., 1950. The measurement of the shear strength of soils. *Géotechnique*, 2:90.
- Svensk standard SS 02 71 25, 1992. Geotekniska provningsmetoder – skjuvhållfasthet – Fallkonförsök. *Byggstandardiseringen*, Stockholm.

Sällfors, G. och Larsson, R., 2017. Bestämningar av odränerad skjuvhållfasthet med specialiserade metoder i praktiska tillämpningar, delrapport 3, Sammanställning av ”case records”. Trafikverket, 2017:037.

Tanaka, H., Hirabayashi, H., Matsuoka, T. och Kaneko, H., 2012. Use of fall cone test as measurement of shear strength for soft clay materials. *Soils and Foundations* 2012:52(4):590-599.

Terzaghi, K., 1927. Determination of consistency of soils by means of penetration tests. *Public roads*, 7(12): 240-247.

Vardanega, P.J. och Haigh, S.K., 2014. The undrained strength – liquidity index relationship. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(9): 1073-1086.

Wendel, E., 1900. Om profbelastning på pålar med tillämpning deraf på grundläggningsförhållanden i Göteborg. *Tekn. Samfundets Handlingar*, No. 7.

Wiesel, C.E., Hansbo, S. och Broms, B., 1985. Skjuvhållfasthet – Geotekniska laboratorieanvisningar del 9. Byggforskningsrådet, T2:1985.





## SGF Notat

- 1:2004 Packning och packningskontroll av blandkornig och finkornig jord
- 2:2004 Direkta skjuvförsök - en vägledning
- 3:2004 Laborarieutrustningar med stora provdimensioner - en sammanställning
- 1:2005 Våra framtida geotekniska arbetsredskap - en introduktion
- 2:2005 Permeabilitetsbestämning genom laborieförsök
- 3:2005 Packningsresultat ytpackning - väsentliga faktorer analyserade med AHP-3:2007  
Laborieprovning för geotekniska utredningar
- 4:2005 Karakteristiskt värde - utredning kring riktlinjer hur vi skall tillämpa Eurokod (EN 1997-1 och EN 1997-2) modellen
- 1:2007 Medlemsmatrikel 2006
- 2:2007 Resultatkontroll genom bestämning av luftporhalt och vattenkvot
- 3:2007 Laborieprovning för geotekniska utredningar
- 1:2009 Jämförande sonderingar – Jb-totalsondering, CPT och hejarsondering

Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) bildades 1950 och består av drygt 1300 enskilda medlemmar, med minst två års praktisk erfarenhet av geoteknik. Dessutom ingår ca 30 korporativa medlemmar i form av institutioner, högskolor, myndigheter, konsult- och entreprenadföretag samt tillverkare inom det geotekniska området.

SGF har till ändamål att främja utvecklingen inom geoteknik med Grundläggning, ingenjörsgologi och miljöteknik i ett nationellt och internationellt perspektiv.

Föreningen företräder i Sverige den internationella föreningen, the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

I SGF:s Rapport- och Notatserier utges föreningens metodbeskrivningar, monografier och dokumentation från konferenser, temadagar m.m.