

## Utvärdering av skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från vingförsök, CPT-sondering och dilatometerförsök

ROLF LARSSON & HELEN ÅHNBERG





**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**  
**SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**

Varia **528**

**Utvärdering av skjuvhållfasthet  
och förkonsolideringstryck  
från vingförsök, CPT-sondering  
och dilatometerförsök**

ROLF LARSSON & HELEN ÅHNBERG

<b>Varia</b>	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI Litteratortjänsten Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: info@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA--03/528--SE
Projektnummer SGI	11549
Dnr SGI	1-9909-548
©	Statens geotekniska institut

# Innehåll

<b>Bakgrund</b> .....	4
<b>Nya undersökningar</b> .....	4
<b>Allmänna jordmodeller</b> .....	5
<b>Inkonsekvenser i bestämning av förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet</b> .....	5
Vingförsök .....	5
CPT-sondering .....	6
Dilatometerförsök .....	6
<b>Exempel på resultat med olika metoder vid olika överkonsolideringsgrader</b> .....	6
<b>Utvärdering av förkonsolideringstryck med olika metoder</b> .....	12
Vingförsök .....	12
CPT-sondering .....	14
Dilatometerförsök .....	15
<b>Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet</b> .....	15
Vingförsök .....	15
CPT-sondering .....	18
Dilatometerförsök .....	19
<b>Exempel</b> .....	19
<b>Referenser</b> .....	22

## Bakgrund

De metoder för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck från fältförsök som används i Sverige bygger i huvudsak på erfarenheter från normalkonsoliderade eller endast svagt överkonsoliderade jordar. Detta gäller till exempel de korrektionsfaktorer baserade på flytgränsen som används för utvärdering av vingförsök [1]. Dessa är framtagna bland annat genom jämförelser med inträffade brott i full skala i fält. I de databaser för erfarenhetsvärden som använts för att få fram dessa faktorer har resultat från mer överkonsoliderad lera uteslutits med motiveringen att dessa brott kan ha varit mer eller mindre dränerade och därför inte är helt relevanta för en jämförelse med den odränerade skjuvhållfastheten.

De utvärderingsmetoder som används för CPT-sondering [2] är framtagna genom kalibrering mot normalkonsoliderade eller endast svagt överkonsoliderade jordar samt utländska erfarenheter från överkonsoliderade och mer eller mindre sprickiga jordar. Motiveringen att införliva de senare var att kunna utvärdera egenskaper också i de översta jordlagren som påverkats av torrskorpeeffekter och som normalt har en viss sprickighet. Några relevanta data från mer homogena svenska överkonsoliderade jordar fanns inte då metoderna togs fram. Motsvarande förhållande gäller i princip för de utvärderingsmetoder som rekommenderats för dilatometerförsök [3].

## Nya undersökningar

En större undersökning om effekten av avschaktning av släntkrön för slänTERS stabilitet har nu genomförts [4]. Denna undersökning har givit en unik möjlighet att studera effekten av överkonsolidering på resultaten från olika typer av hållfasthetsprovningar, såväl i fält som i laboratorium. Inom tre olika områden i Västsverige har undersökningar utförts i olika sektioner med jordar som i princip haft samma avsättnings- och förkonsolideringshistoria men där jordarna fått olika överkonsolideringsgrader på grund av dels avschaktningar som utförts, dels den naturliga erosionen från vattendragen vid slänternas nedre delar. De tre områdena ligger i Torp i södra Munkedal, Strandbacken vid Lilla Edet och Sundholmen i Viskans dalgång mellan Borås och Varberg.

I Torp utgörs slänten av en cirka 20 meter hög erosionsslänt ned mot Örekilsälven. Här har en cirka 5,5 meter djup och 25 - 50 m bred avschaktning av slänTKRÖNET utförts över en flera hundra meter lång sträcka. Inom ett delområde har avschaktningen varit större och utförts i två steg med 5,5 respektive 9,5 meters djup över en total bredd av cirka 70 meter. Slänten i Strandbacken utgörs av en från början cirka 10 meter hög erosionsslänt ned mot Göta älv där nu slänTKRÖNET schaktats av ned till 4 meters djup över en bredd av cirka 50 meter. Den tredje slänten i Sundholmen hade en ursprunglig höjd av cirka 5 meter över Viskans medelvattenstånd och här har knappt 2 meter schaktats av över en bredd som i medeltal är runt 25 meter. Utöver de angivna slänthöjderna tillkommer vattendjupen, som varierar mellan 2 och 4 meter för undersökningspunkterna i vattendragen. Områdena har en gång varit tämligen plana med i huvudsak horisontella och jämntjocka jordlager, men på grund av erosionen och avschaktningarna har överkonsolideringsgraderna i sektionerna kommit att variera mellan nära nog normalkonsoliderad till mycket starkt överkonsoliderad jord. Överkonsolideringsgraderna varierar mellan ungefär 1,1 och 100 och i dessa fall rör det sig om homogena jordar där överkonsolideringen till helt övervägande grad beror på reella avlastningar.

En ytterligare undersökning i överkonsoliderad jord har utförts i skånsk lermorän [5]. Denna jord är långt ifrån lika homogen som de i den ovannämnda undersökningen, men en del av erfarenheterna från denna undersökning är likartade.

Resultaten av de nya undersökningarna har visat att i överkonsoliderad jord erhålls betydliga skillnader i utvärderade egenskaper beroende på vilken undersökningsmetod och utvärdering som används.

## Allmänna jordmodeller

Idag finns ett antal olika jordmodeller för att beskriva hur jordens odränerade skjuvhållfasthet varierar med förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad, t.ex. SHANSEP och CRITICAL STATE SOIL MECHANICS [6, 7, 8, 9, 10]. Dessa modeller är baserade på de samband som erhållits i avancerade laborieförsök som direkta skjuvförsök, triaxialförsök och plane-strainförsök. Formuleringarna är lite olika men gemensamt för modellerna är att den odränerade skjuvhållfastheten kan skrivas

$$t_{fu} = a s'_v OCR^b \quad \text{Ekv. 1}$$

där  $t_{fu}$  = odränerad skjuvhållfasthet  
 $s'_v$  = effektivt överlagringstryck  
OCR = överkonsolideringsgrad  
 $s'_c$  = förkonsolideringstryck  
 $a$  = faktor beroende på jord och belastningsriktning (anisotropi)  
 $b$  = exponent, materialkonstant

Resultat som presenterats i litteraturen, såväl svenska som för utländska jordar av liknande typ, visar att faktorn  $a$  är i storleken 0,33 för fallet med aktiva triaxialförsök på lera och upp till 0,5 i organisk jord [7, 11, 12, 13]. För direkta skjuvförsök och passiva triaxialförsök har  $a$  befunnits variera med flytgränsen. Ett medelvärde av cirka 0,22 används ofta för fallet med direkt skjuvning i lera medan högre värden gäller i organisk jord. Erfarenhetsmässigt ger direkta skjuvförsök och korrigerade vingförsök likartade värden i normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad jord. Resultat från båda dessa typer av bestämningar har använts för att kalibrera utvärderingarna av CPT-sondering och dilatometerförsök i motsvarande jord och alla fyra försökstyperna förväntas därmed ge samstämmiga resultat.

Faktorn  $b$  är normalt i storleken 0,75 – 0,85 för såväl triaxialförsök som direkta skjuvförsök [7, 12] och antas ofta schablonmässigt vara 0,8. De värden som uppmätts i laborieförsöken i denna undersökning har varit inom det normala storleksintervallet.

## Inkonsekvenser i bestämning av förkonsolideringstryck och odränerad skjuvhållfasthet

### Vingförsök

I Sverige bestäms den odränerade skjuvhållfastheten ofta med vingförsök i fält, vilket normalt anses vara den bäst beprövade metoden. Det uppmätta hållfasthetsvärdet korrigeras sedan erfarenhetsmässigt med ledning av flytgränsen [1]. Samtidigt uppskattas förkonsolideringstrycket i svenska leror ofta ur samma hållfasthetsvärde och flytgräns med Hansbos samband [14]. Motsvarande samband har funnits för ett stort antal utländska jordar, även om man här baserar formeln på plasticitetsindex i stället för flytgränsen [15].

Dessa utvärderingar är tillsammans inte förenliga med det ovanstående allmänna sambandet mellan odränerad skjuvhållfasthet, förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrad. För att få överensstämmelse i överkonsoliderad jord fordras att antingen den ur vingförsöket utvärderade odränerade skjuvhållfastheten eller det utvärderade förkonsolideringstrycket, eller eventuellt båda, korrigeras för överkonsolideringsgraden.

## ***CPT-sondering***

Den vanligaste metoden att utvärdera den odränerade skjuvhållfastheten ur CPT-sondering baseras på det uppmätta nettospetstrycket ( $q_T - s_v$ ) dividerat med en konfaktor. Likaså utvärderas förkonsolideringstrycket oftast ur nettospetstrycket med användande av en konfaktor som avpassats för detta.

Konfaktorena i utvärderingen varierar för olika typer av jordar, t.ex. med flytgränsen, men har hittills inte direkt föreslagits variera med överkonsolideringsgraden. Detta är i likhet med utvärderingen av vingförsöken oförenligt med det allmänna sambandet mellan skjuvhållfastheten, förkonsolideringstrycket och överkonsolideringsgraden. I den utvärdering av förkonsolideringstrycket som tidigare föreslagits av SGI [2, 16] har en korrektion gjorts för överkonsolidering vid utvärdering av förkonsolideringstryck, men denna är främst avsedd att kompensera för sprickighet i torrskorpepåverkad jord och är inte tillämplig i mer homogen reellt överkonsoliderad jord.

## ***Dilatometerförsök***

För dilatometerförsöket finns två metoder för utvärdering av den odränerade skjuvhållfastheten. Den ena metoden motsvarar i princip den klassiska utvärderingen av pressometerförsöket och hållfastheten utvärderas då ur [3, 17]

$$t_{fu} = \frac{p_1 - K_0 s'_v - u_0}{F} \quad \text{Ekv. 2}$$

där  $p_1$  = tryck vid full expansion av dilatometermembranet  
 $K_0$  = jordtryckskoefficient  
 $s'_v$  = effektivt överlagringstryck  
 $u_0$  = in situ portryck  
 $F$  = faktor

Faktorn  $F$  kan variera något med jordart men har aldrig relaterats till överkonsolideringsgrad. En mindre korrektion för överkonsolideringsgrad erhålls eftersom jordtryckskoefficienten ökar med ökande överkonsolideringsgrad, men denna är endast marginell.

Den andra metoden använder sig av den allmänna modellen för den odränerade skjuvhållfastheten, dvs. Ekvation 1, [18]. Vid denna utvärdering är det endast överkonsolideringsgraden som utvärderas ur dilatometerförsöket. Vid en preliminär utvärdering uppskattas också överlagringstrycket ur resultaten. Faktorerna  $a = 0,22$  och  $b = 0,8$  används som schablonvärden för homogen lera. För andra typer av jord, som t.ex. lermorän eller organisk jord, måste dessa faktorer kalibreras eller andra erfarenhetsvärden användas.

I överkonsoliderad jord är dessa utvärderingar inbördes oförenliga. Den första metoden ger värden som i princip liknar de som erhålls med vingförsök och CPT-sonderingar utvärderade enligt metoderna som anges ovan, medan den andra metoden ger resultat som fullt ut motsvarar den allmänna jordmodell som den bygger på.

## **Exempel på resultat med olika metoder vid olika överkonsolideringsgrader**

Hur de olika fältmetoderna reagerar på avlastningar och därmed åtföljande ökade överkonsolideringsgrader kan illustreras med nedanstående exempel. I dessa redovisas resultat från olika punkter i samma sektion mot provningsnivån. På grund av bildnings- och spänningshistorien är förkonsolideringstrycken på respektive nivå mycket likartade.



I **Fig. 1** redovisas utvärderade odränerade skjuvhållfastheter från vingförsök med den vanliga utvärderingsmetoden. I Torpområdet, där mer än 20 m jord eroderats bort ses en klar hållfasthetsminskning under älven och vid älvbrinken, medan någon effekt av den cirka 5 meter djupa avschaktningen är svårare att spåra. I Strandbacken är nivåskillnaden 10-15 meter. Också här ses en klar effekt av avlastningen, även om denna är mindre och något överdriven på grund av något lägre förkonsolideringsstryck under älven. I Sundholmen är nivåskillnaden minst och här kan överhuvudtaget ingen effekt av avlastningen spåras utom i den översta metern under åbotten.

Resultaten visar på att en viss effekt på resultaten från vingförsök erhålls vid stora avlastningar (höga överkonsolideringsgrader) men att denna är betydligt mindre än vad som skulle förväntas enligt den generella jordmodellen. Detta stämmer i stora drag med tidigare erfarenhet som säger att en mindre påverkan ofta kan spåras i ett ytligt skikt ned till djup av 5 à 10 meter under botten av vattendrag men just inte djupare [19, 20].

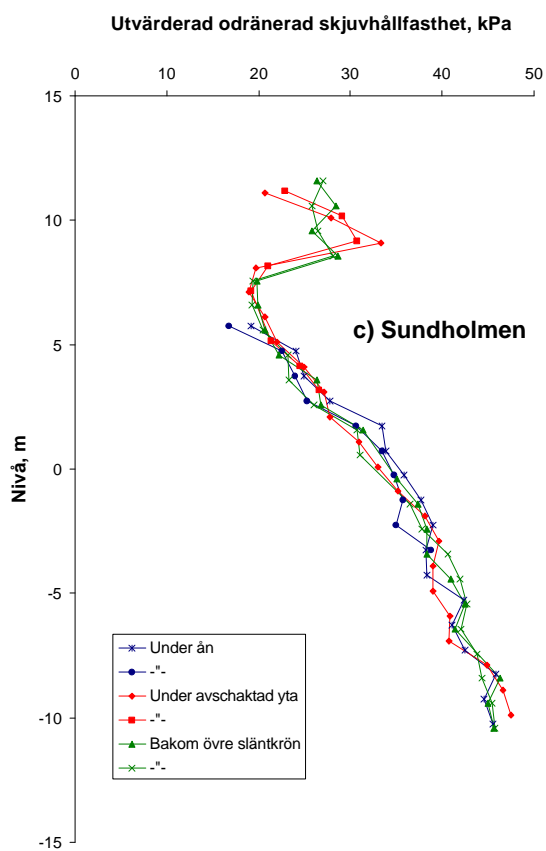
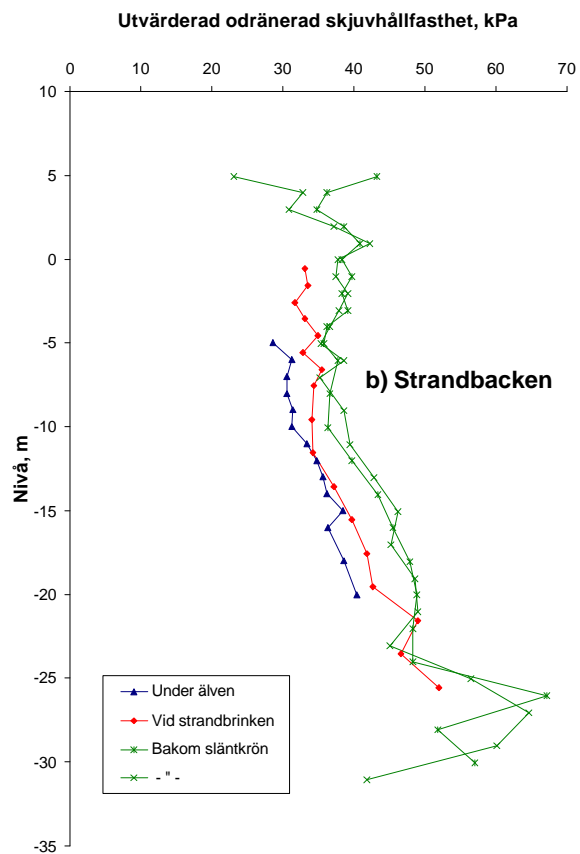
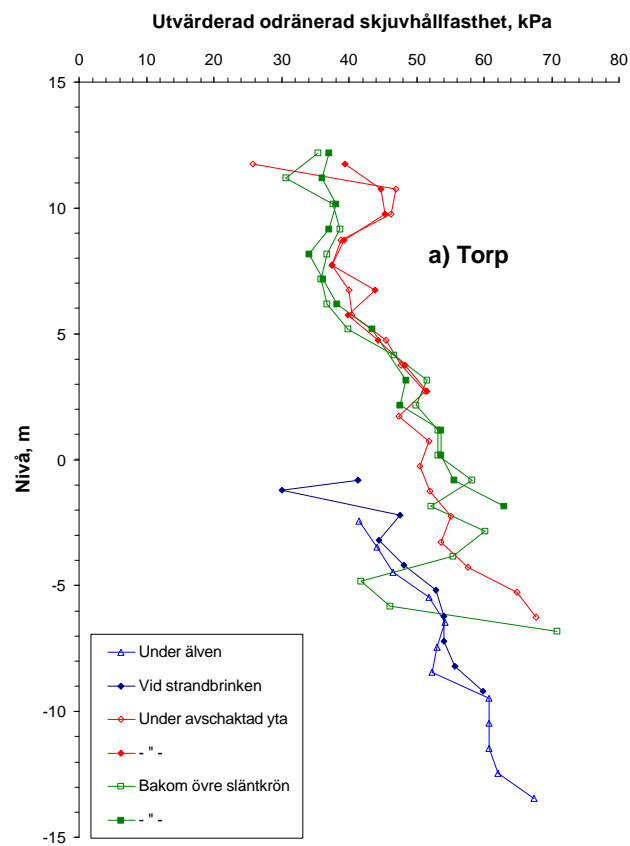
För CPT-sonderingar kan ingen effekt av avlastning utläsas ur resultaten. I **Fig. 2** visas resultaten från den sektion i Torp där avschaktningen utförts i två steg. Resultaten inkluderar således sonderingar från markytan bakom avschaktningarna, från den övre avschaktade ytan 5,5 meter därunder, från den undre avschaktade ytan ytterligare 4 m längre ned och under älvbotten där mer än 20 meter jord eroderats bort. Bortsett från den översta metern under vattendraget finns inget i resultaten som på något sätt avspeglar de inträffade avlastningarna.

Denna totala avsaknad av effekt av avschaktningen tyder å andra sidan på att man kan utvärdera förkonsolideringstrycket direkt ur nettospetstrycket utan korrektion för överkonsolideringsgrad.

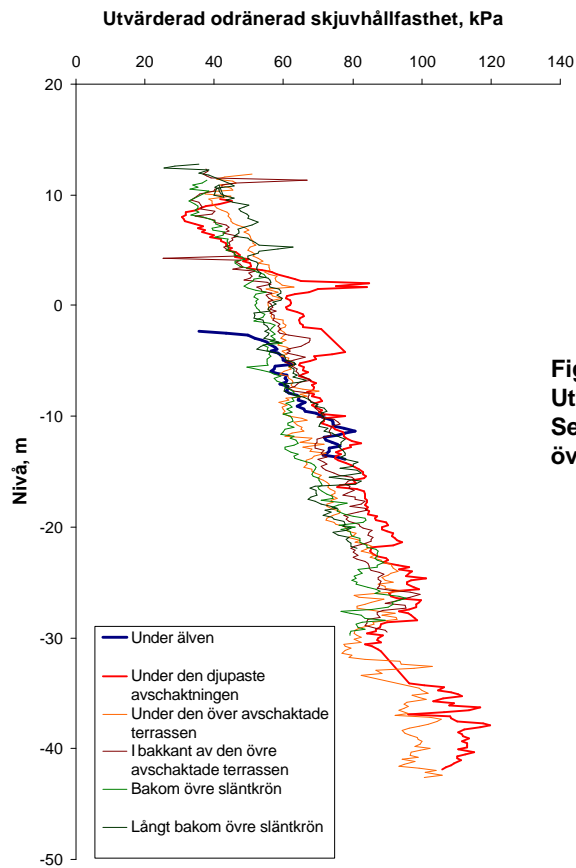
För dilatometerförsöken beror inverkan av överkonsolideringen på vilken utvärderingsmetod som används, **Fig. 3**. Vid användande av den metod som i princip motsvarar pressometerutvärdering erhålls just ingen effekt av avlastningen medan metoden som bygger på den generella hållfasthetsmodellen som väntat ger en påtaglig effekt.

Den olika påverkan av överkonsolideringsgraden på de olika försöksresultaten kan också ses när resultaten från olika försök i den starkt överkonsoliderade jorden under vattendragen sammanställs, **Fig. 4**. Det framgår då att försök och utvärderingsmetoder som inte påverkas av avlastningen, dvs. främst CPT-sondering och dilatometerförsök med ”pressometerutvärdering” genomgående ger de högsta värdena. Därefter kommer vingförsöken, som endast påverkas i måttlig grad, medan dilatometerförsök utvärderade enligt den generella hållfasthetsmodellen ger lägst värden. De senare är också i samma storlek som de som erhålls i de direkta skjuvförsöken i laboratoriet. I vissa fall har direkta skjuvförsök utförts på jordprover från borrhöjden. För övriga punkter har använts resultat från motsvarande material i andra borrhöjden i sektionen, varpå skjuvhållfastheterna vid direkt skjuvning på olika nivåer i punkten beräknats med ledning av de kalibrerade  $a$  och  $b$ -faktorerna samt uppmätta förkonsolideringstryck och beräknade överkonsolideringsgrader. I de överkonsoliderade jordprofilerna kan observeras att de olika hållfasthetsbestämningarna tenderar att närma sig varandra på större djup allteftersom överkonsolideringsgraden successivt minskar.

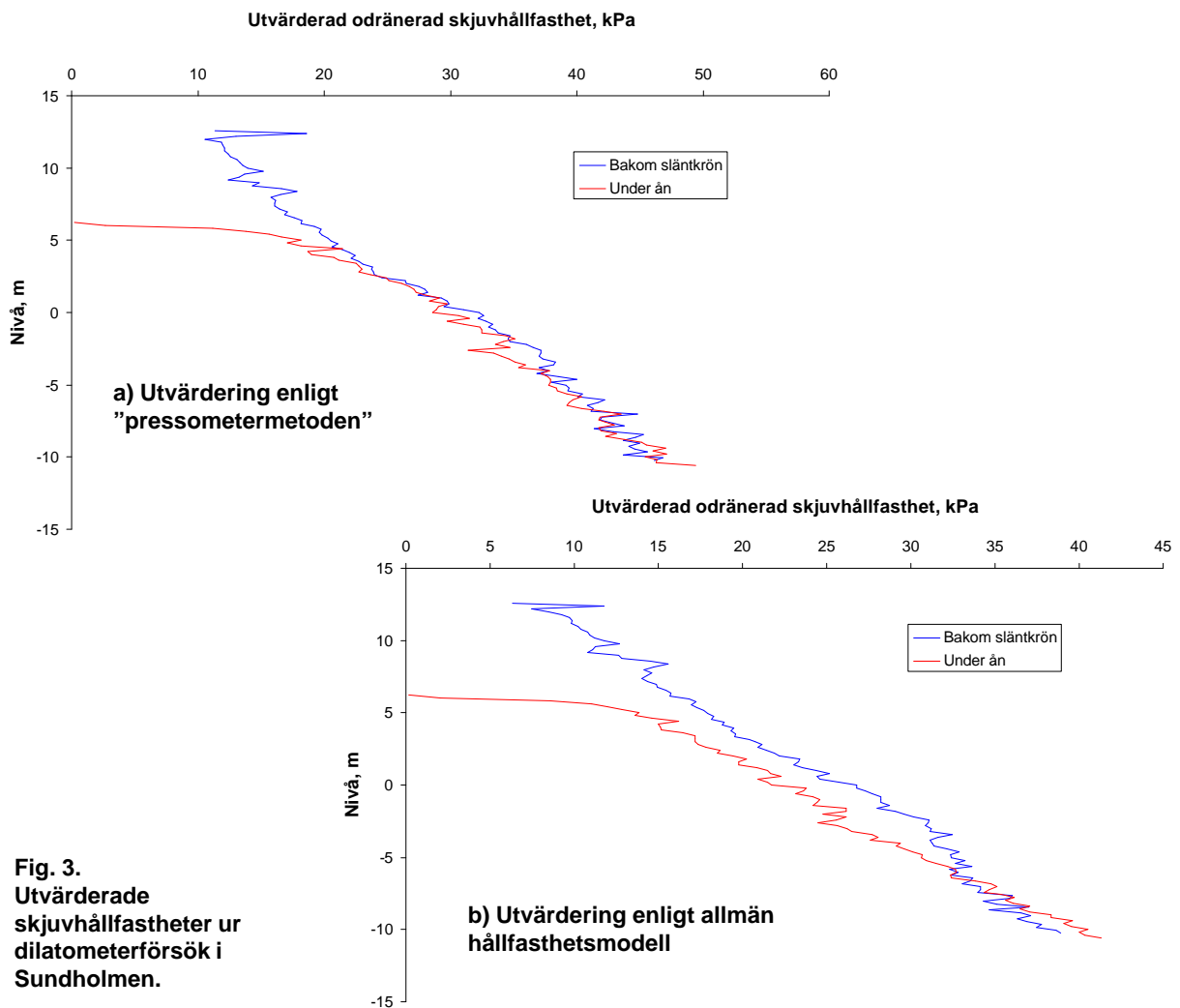
För jämförelsen skall ha relationen mellan motsvarande försök i en endast svagt överkonsoliderad jordprofil inritats, **Fig. 4e**. Vid jämförelsen bör beaktas att de övre jordlagren består av organiska och siltiga svämsediment, vilket gör att relevansen för de faktorer i utvärderingarna som baseras på jordtyp (flytgräs) är osäker och att schablonvärdet  $a = 0,22$  i dilatometerutvärderingen inte är tillämpligt. Under 6 meters djup består jorden av homogen lera.



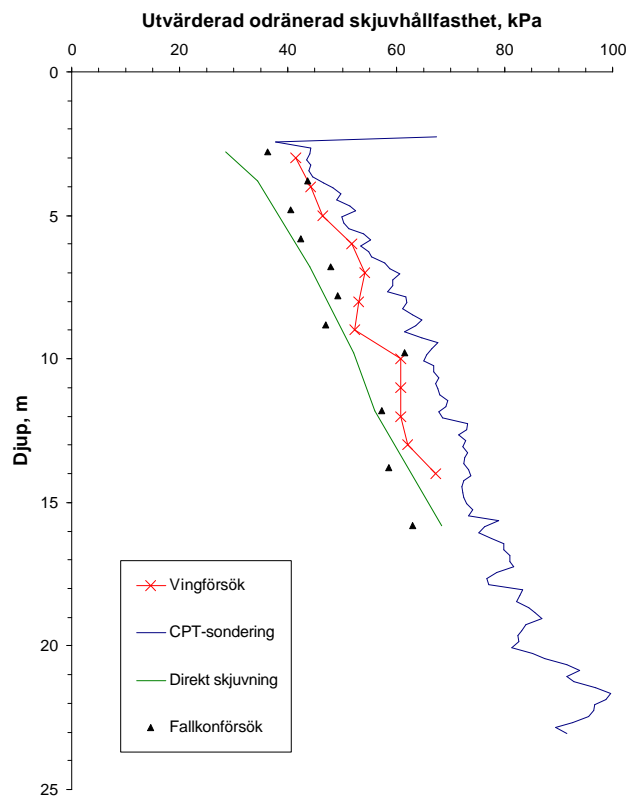
**Fig. 1. Exempel på effekter av avlastning på den odränerade skjuvhållfastheten bestämd med vingförsök utvärderade utan beaktande av överkonsolideringseffekter.**



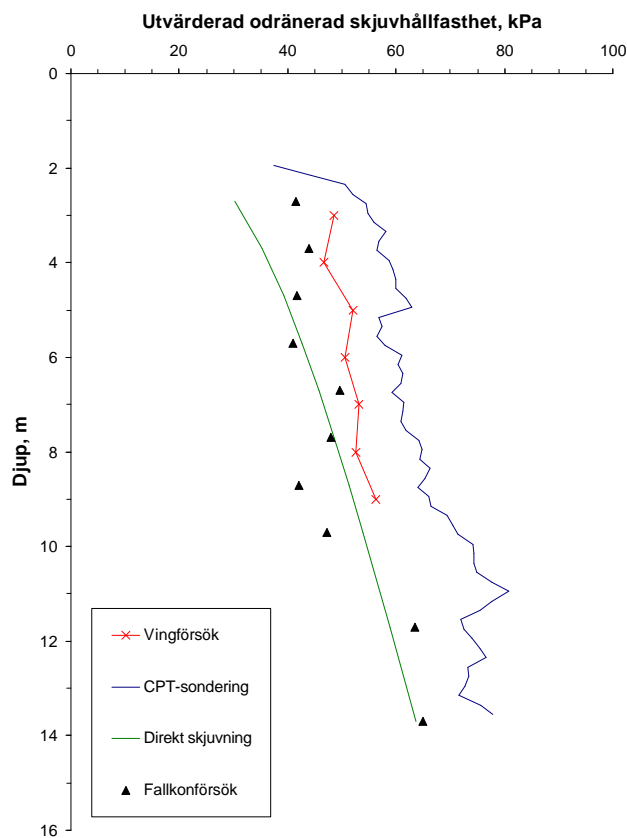
**Fig. 2.**  
Utvärderade skjuvhållfastheter ur CPT-sonderingar i Sektion C i Torp utan korrektion för överkonsolideringseffekter.



**Fig. 3.**  
Utvärderade skjuvhållfastheter ur dilatometerförsök i Sundholmen.

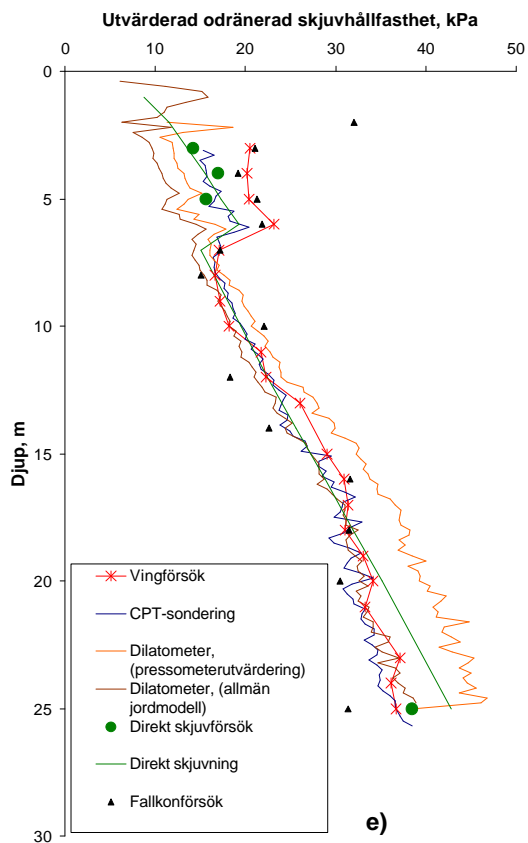
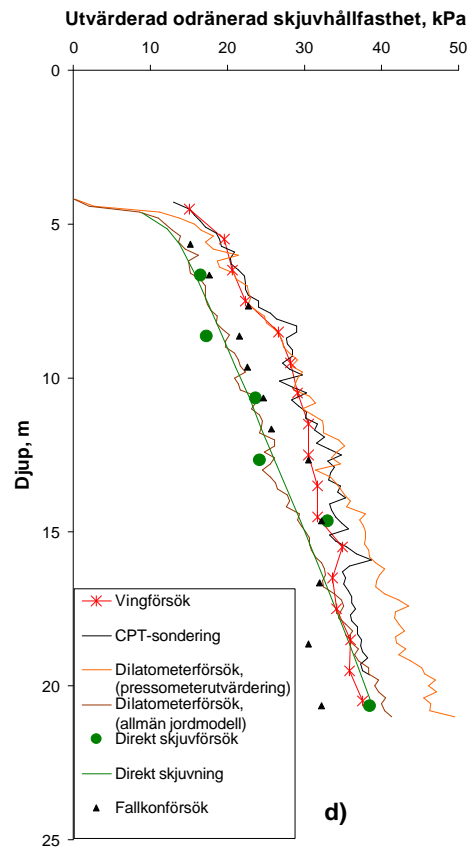
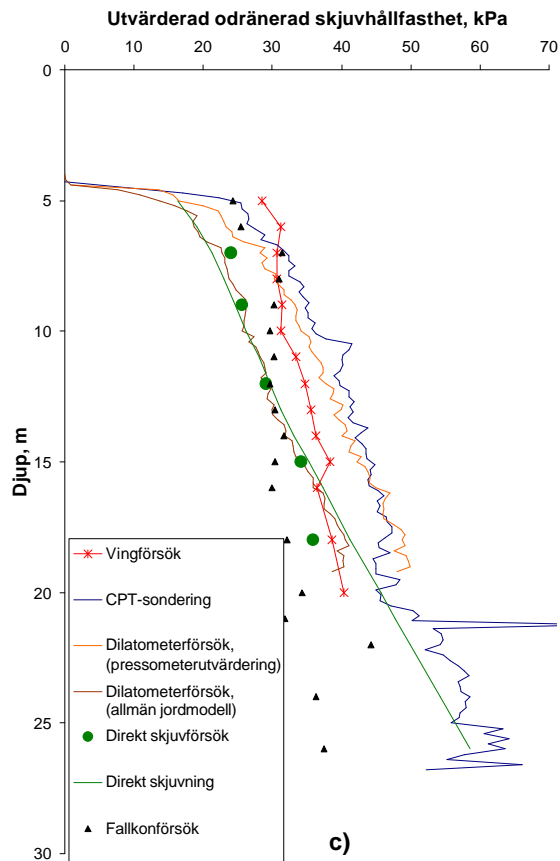


a)



b)

**Fig. 4. Jämförelse mellan odränerade skjuvhållfastheter bestämda med olika metoder och utvärderade utan speciell korrektion för överkonsolidering.**  
**a) överkonsoliderad jord under älven i Sektion A i Torp**  
**b) överkonsoliderad jord under älven i Sektion C i Torp**



**Fig. 4.**  
**Jämförelse mellan odränerade skjuvhållfastheter bestämda med olika metoder och utvärderade utan speciell korrektion för överkonsolidering.**  
**c) överkonsoliderad jord under älven i Strandbacken**  
**d) överkonsoliderad jord under ån i Sundholmen**  
**e) endast svagt överkonsoliderad jord bakom avschaktningen i Sundholmen**

## Utvärdering av förkonsolideringstryck med olika metoder

I varje punkt där fältförsök utförts har också ett stort antal ödometerförsök utförts på ostörda prover i laboratoriet. En detaljerad modell för förkonsolideringstrycken och deras variation inom respektive område har skapats med hjälp av resultaten från dessa försök och vad som är känt om områdets geologiska historia. Resultaten från de olika fältförsöken har sedan jämförts med förkonsolideringstryck och överkonsolideringsgrader enligt dessa modeller.

### Vingförsök

Ur resultaten från vingförsöken har förkonsolideringstrycken utvärderats ur Hansbos samband. Jämför man de utvärderade överkonsolideringsgraderna framträder ett klart samband, där Hansbos samband och ödometerförsöken i stort ger samma värden i normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad jord medan ödometerförsöken ger högre värden i överkonsoliderad jord. För att få överensstämmelse också i överkonsoliderad jord behöver överkonsolideringsgraden utvärderad med Hansbos samband korrigeras enligt

$$OCR = \left[ \frac{t_v}{0,45 w_L s'_v} \right]^{1,11} \quad \text{Ekv. 3}$$

där  $OCR$  = överkonsolideringsgrad  
 $t_v$  = okorrigerat hållfasthetsvärde från vingförsök  
 $w_L$  = flytgräns  
 $s'_v$  = effektivt överlagringstryck

se [Fig. 5](#).

Appliceras denna korrigering på förkonsolideringstrycken modifieras Hansbos samband till

$$s'_c = s'_v^{-0,11} \left( \frac{t_v}{0,45 w_L} \right)^{1,11} \quad \text{Ekv. 4}$$

där  $\sigma'_c$  = förkonsolideringstryck

Efter denna modifiering faller de utvärderade förkonsolideringstrycken inom ett intervall av  $\pm 35\%$  av de värden som utvärderats ur ödometerförsöken, [Fig. 6](#). En viss tendens för högre värden från ödometerförsöken finns fortfarande. Denna är dock inte längre relaterad till överkonsolideringsgraden utan får liksom en stor del av spridningen hänföras till metodens känslighet för flytgränsen.

Utvärderingen av förkonsolideringstryck ur vingförsök behöver således korrigeras för överkonsolideringsgraden. Denna korrektion är dock inte så stor att den motsvarar hela den effekt av en avlastning som den generella jordmodellen anger, utan resultaten antyder att också den utvärderade odränerade skjuvhållfastheten behöver korrigeras.

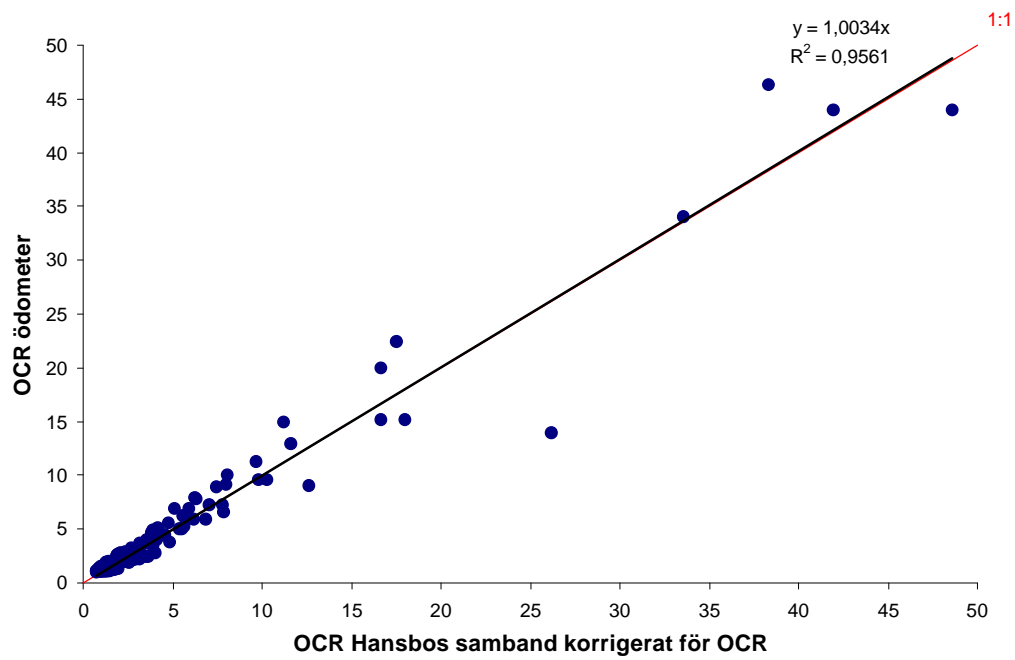


Fig. 5. Jämförelse mellan överkonsolideringsgrader utvärderade ur ödometerförsök och enligt Hansbos samband med korrigering för överkonsolidering

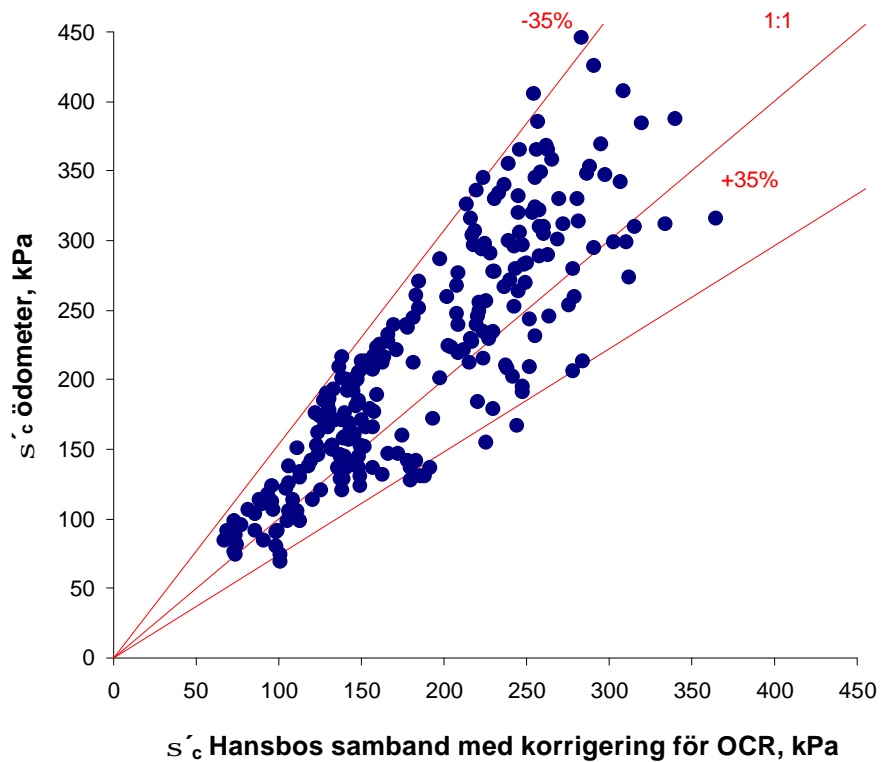


Fig. 6. Jämförelse mellan förkonsolideringstryck utvärderade ur ödometerförsök och enligt Hansbos samband korrigerat för överkonsolidering.

## CPT-sondering

Praktiskt taget ingen inverkan av överkonsolidering kunde spåras i nettospetstrycken från CPT-sonderingarna. Resultaten från CPT-sonderingar i den typ av jord som är vanlig i Sverige är dock mycket känsliga för jordens flytgräns. Tidigare har visats att förkonsolideringstrycket i normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad lera och gyttja kan utvärderas ur [2, 16]

$$s'_c = \frac{q_T - s_v}{1,21 + 4,4 w_L} \quad \text{Ekv. 5}$$

där  $q_T$  = totalt spetstryck  
 $s_v$  = totalt överlagringstryck  
 $w_L$  = flytgräns

Motsvarande konfaktorer har utvärderats genom att jämföra nettospetstrycken med förkonsolideringstrycken för samtliga nivåer i de nu utförda undersökningarna. När de plottas mot flytgränsen finner man att samtliga värden i princip hamnar på samma samband som i de tidigare undersökningarna med en spridning av cirka  $\pm 30\%$ , Fig. 7. Enstaka värden kan hamna något utanför, men detta beror främst på att samtliga värden utvärderade för 0,2 meter tjocka djupintervall tagits med, vilket betyder att spikar vid passerande av grövre objekt och onormala störningar inte sorterats bort.

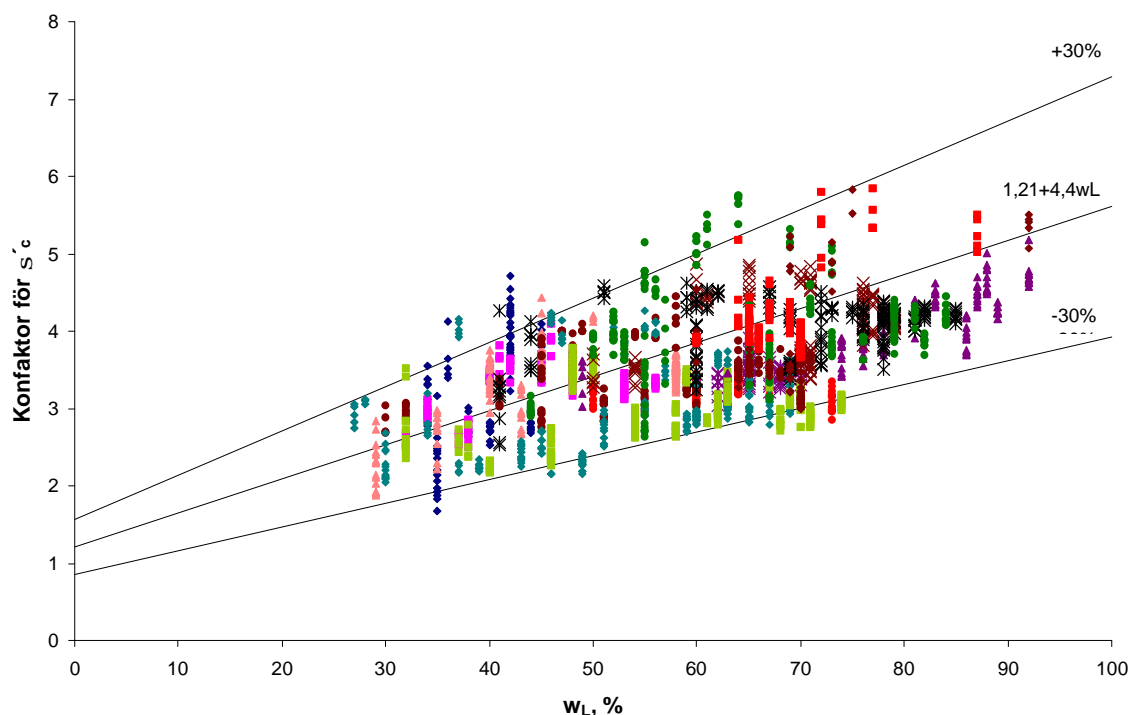


Fig. 7. Utvärderade konfaktorer för förkonsolideringstryck som funktion av flytgräns.



Inget statistiskt samband kunde påvisas mellan överkonsolideringsgraden och förhållandet mellan utvärderat respektive uppmätt förkonsolideringstryck. Att förkonsolideringstrycket kan utvärderas direkt ur nettospetsstrycket oberoende av överkonsolideringsgraden har också funnits i en stor undersökning för kanadensiska leror [21]. För dessa leror fann man konfaktorn vara konstant, cirka 3,4, och spridningen vara cirka  $\pm 30\%$ . För lerorna i den nu aktuella undersökningen blev konfaktorns medelvärde i samma storlek, men dess variation med flytgränsen måste beaktas för att få ned spridningen till motsvarande värden. De tidigare undersökningarna i lermorän antydde också att förkonsolideringstryck i rimlig storlek kunde utvärderas direkt ur nettospetsstrycken.

Utvärderingen av förkonsolideringstryck ur nettospetsryck från CPT-sondering behöver således inte korrigeras för överkonsolideringsgrad i homogena leror. Detta tyder å andra sidan på att den utvärderade odränerade skjuvhållfastheten skall korrigeras fullt ut för att bli i överensstämmelse med den allmänna jordmodellen.

### ***Dilatometerförsök***

Ett antal olika empiriska samband har föreslagits för att uppskatta överkonsolideringsgraden ur det horisontella spänningsindex,  $K_D$ , som utvärderas ur dilatometerförsöket. Ett sådant samband som funnits för överkonsoliderade homogena leror presenterades av Powell och Uglow [22]. Detta samband har också funnits vara användbart för överkonsoliderad skånsk lermorän [5] men har å andra sidan visat sig underskatta överkonsolideringsgraden i normalkonsoliderade och endast svagt överkonsoliderade svenska jordar. För dessa, och sprickiga överkonsoliderade jordar, har en annan utvärdering föreslagits [3].

Med detta som bakgrund har en hybrid använts för att utvärdera överkonsolideringsgraden i de nu undersökta profilerna. Denna har formen

$$\begin{aligned}
 OCR &= 10^{0,16(K_D - 2,5)} & K_D &\leq 5 \\
 OCR &= 2,51 + 0,368(K_D - 5) & 5 < K_D &\leq 7,5 \\
 OCR &= 0,24 K_D^{1,32} & K_D &> 7,5
 \end{aligned}$$

Ekv. 6

Förkonsolideringstrycket beräknas genom att multiplicera den utvärderade överkonsolideringsgraden med det effektiva överlagringstrycket. Ett antal dilatometerförsök har utförts i punkter belägna såväl under vattendrag som i naturlig mark bakom avschaktningarna, men dock inte i samma omfattning som vingförsöken och CPT-sonderingarna. Generellt visade sig dilatometerförsöken med ovanstående utvärdering ge en bättre uppskattning av förkonsolideringstrycken än CPT-sonderingarna.

## **Utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet**

### ***Vingförsök***

Att vingförsök inte ger samma minskning i hållfasthetsvärde vid en avlastning och åtföljande överkonsolidering som laboratorieförsök och de allmänna jordmodellerna är väl känt, [7, 19, 20]. Denna inverkan uttryckt som  $b$ -värde i den allmänna ekvationen tycks enligt sammanställningar av erfarenhetsvärden för icke-cementerade leror vara i storleken 0,95 [7]. Motsvarande värde i den nu genom-

förda undersökningen i svenska leror befanns vara cirka 0,98 [4]. Detta betyder att för att få jämförbara värden med de som erhålls ur avancerade laboratorieförsök måste resultaten från vingförsök i överkonsoliderade leror korrigeras med hänsyn till överkonsolideringsgraden. Enligt de empiriska värden som finns skulle denna vara i storleken

$$m_{OCR} \approx OCR^{-0,15} \quad \text{Ekv. 7}$$

Den vanliga korrektionen med hänsyn till flytgränsen är dock framtagen för jordar med en överkonsolideringsgrad av cirka 1,3 och effekter av överkonsolidering upp till detta värde kan därmed antas vara inräknade i denna. Korrigerad odränerad skjuvhållfasthet bestämd med vingförsök skulle därmed bli

$$t_{fit} = t_v m_{w_L} m_{OCR}$$

$$t_{fit} = t_v \left[ \frac{0,43}{w_L} \right]^{0,45} \left[ \frac{OCR}{1,3} \right]^{-0,15} \quad \text{Ekv. 8}$$

För en preliminär utvärdering kan överkonsolideringsgraden med nöjaktig noggrannhet utvärderas ur vingförsöket enligt Ekvation 3.

Det första påpekandet, att den odränerade skjuvhållfastheten skulle behöva korrigeras med hänsyn till överkonsolidering, gjordes veterligt av Leroueil et al. 1983 [23]. Detta innebar dock främst att stabilitetsberäkningar i överkonsoliderad jord borde baseras på dränerad effektivspänningsanalys snarare än odränerad hållfasthet. Ett verkligt förslag till korrektion för överkonsolidering presenterades 1986 av Aas et al., [24]. I detta förslag delas jorden in i normalkonsoliderad eller endast svagt överkonsoliderad jord, NC, respektive överkonsoliderad jord, OC. Gränsen går vid en överkonsolideringsgrad av cirka 1,5 och bedömningen av vilken grupp jorden tillhör görs på basis av kvoten mellan uppmätt hållfasthet och rådande effektiva överlagringsstryck samt jordens plasticitetsindex, **Fig. 8a**. Därefter väljs korrektionsfaktorn på basis av den ovannämnda kvoten och den bedömda grupptillhörigheten, **Fig. 8b**.

Detta förslag innebär en mycket stor korrektion i överkonsoliderad jord, men förslagsställarna påpekar att den delvis kan antas bero på att den dränerade hållfastheten till stor del är dimensionerande i överkonsoliderad jord. I Sverige hade SGI strax innan gått ut med nya rekommendationer för korrektion av vingförsök [1] och dessutom av användande av kombinerad analys, i vilken det lägsta värdet av odränerad respektive dränerad hållfasthet används för jorden längs potentiella glidytor [25]. Effekterna av det nya förslaget bedömdes därmed i stort redan vara beaktade.

Att göra en exakt jämförelse mellan de olika förslagen är svårt eftersom relationen bland annat beror på jordens konsistensgränser. Databasen för den svenska metoden innehåller dessutom enbart lera och organisk jord från Sverige, Norge och Finland medan den norska databasen inkluderar högplastiska jordar från Sydostasien. För normalkonsoliderade och endast svagt överkonsoliderade låg- och mellanplastiska jordar baseras metoderna dock i princip på samma erfarenhetsvärden och här torde resultaten bli snarlika.

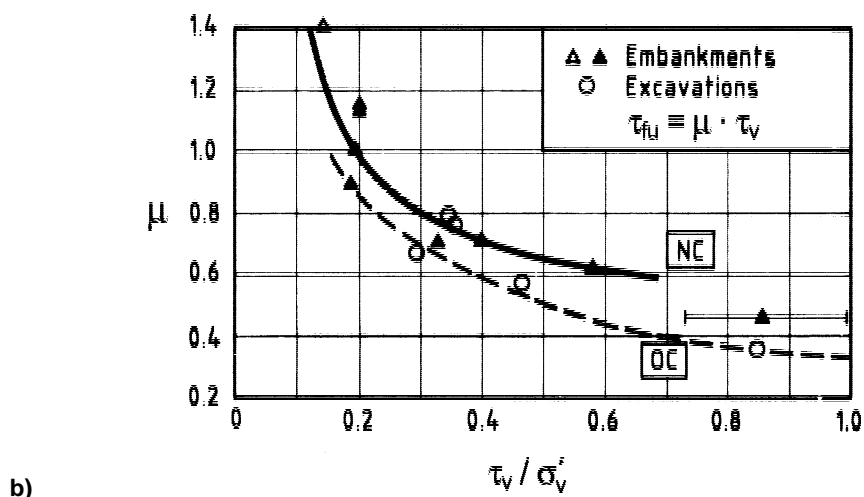
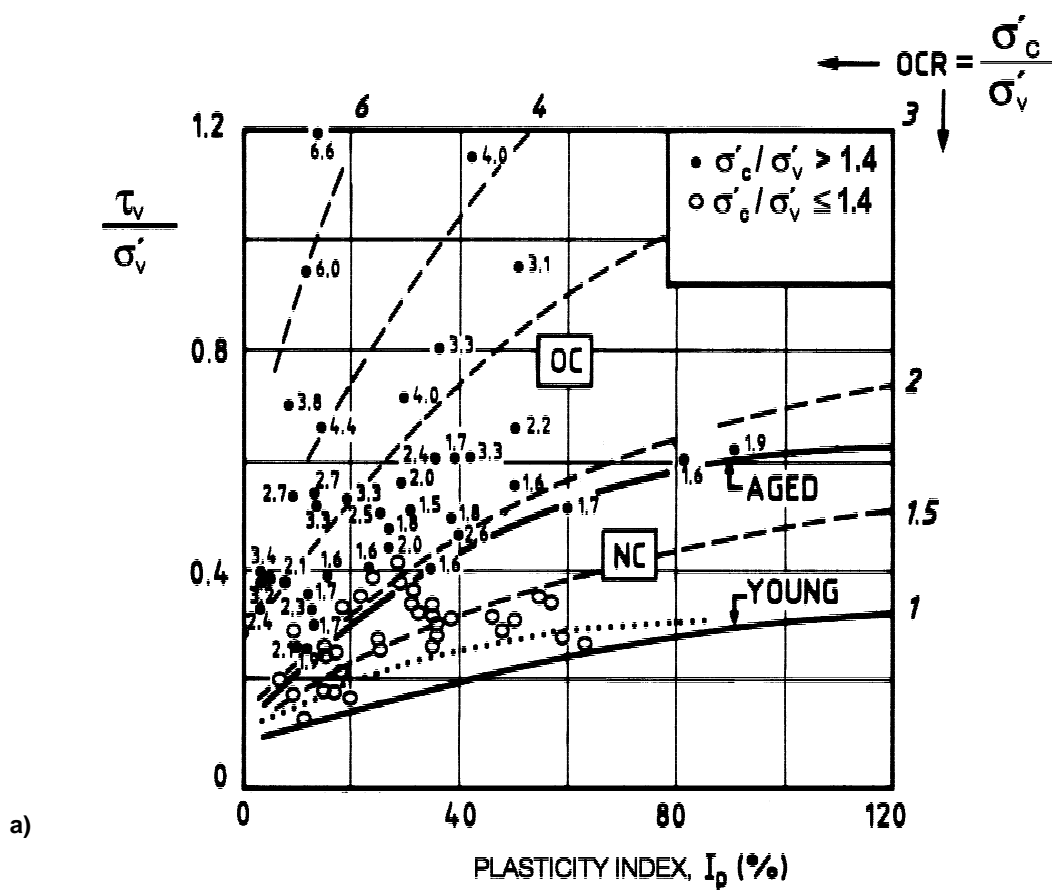
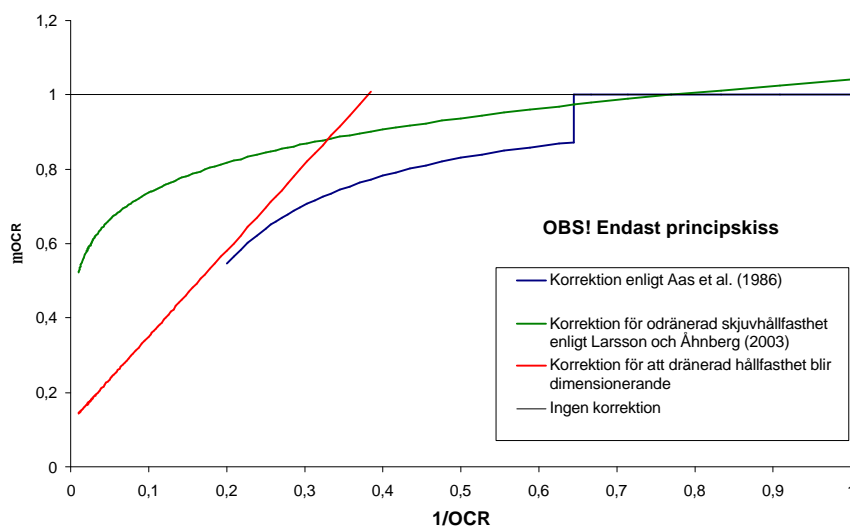


Fig. 8. Bestämning av korrektionsfaktor för vingförsök enligt Aas et al. [24].  
a) Diagram för bedömning av överkonsolideringsgrupp  
b) Diagram för bestämning av korrektionsfaktor.

Ett försök att i princip illustrera korrektionen för överkonsolidering enligt de två metoderna görs i Fig. 9. Som framgår av figuren blir korrektionen enligt Aas et al. i princip densamma som för den nu föreslagna korrektionen för utvärdering av odränerad skjuvhållfasthet i kombination med en kombinerad analys. Den mest markanta skillnaden är att den första metoden abrupt startar korrektionen med ett stort steg vid en viss överkonsolideringsgrad medan den andra ger en gradvis korrektion av den odränerade skjuvhållfastheten med en brytpunkt där den dränerade skjuvhållfastheten tar över. Den senare metoden ger också möjlighet att särskilja vad det är man korrigerar för och att utvärdera en rent odränerad skjuvhållfasthet.



**Fig. 9. Jämförelse mellan olika korrektioner av hållfasthetsvärden från vingförsök för överkonsolidering.**

Den maximala skillnaden i dimensionerande skjuvhållfasthet jämfört med tidigare utvärderingsmetod är cirka 10 % och inträffar vid en överkonsolideringsgrad runt 3. För normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad jord respektive starkt överkonsoliderad jord blir det ingen påtaglig skillnad i dimensionerande skjuvhållfasthet. Eftersom det är sällsynt med en konstant överkonsolideringsgrad längs en potentiell glidyta är påverkan också generellt lägre än den maximala även i de fall delar av glidytorna går genom jordlager med överkonsolideringsgrader runt 3.

För den helt odränerade skjuvhållfastheten innebär korrektionen att resultaten från vingförsöken bringas i överensstämmelse med resultaten från de försökstyper som visar full hållfasthetsminskning vid avlastning.

### **CPT-sondering**

För CPT-sonderingarna har visats att förkonsolideringstrycket kan utvärderas direkt ur nettospetsstrycket utan korrektion för överkonsolidering. Detta medför att för att få överensstämmelse med den allmänna jordmodellen måste den skjuvhållfasthet som utvärderas ur samma nettospetsstryck korrigeras. Tidigare erfarenheter från normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad lera har givit det empiriska sambandet [2,16]

$$t_{fu} = \frac{q_T - s_v}{13,4 + 6,65 w_L} \quad \text{Ekv. 9}$$

Med korrektion för överkonsolidering blir detta

$$t_{fu} = \left[ \frac{q_T - s_v}{13,4 + 6,65w_L} \right] \left[ \frac{OCR}{1,3} \right]^{-0,2} \quad \text{Ekv. 10}$$

Exponenten  $-0,2$  motsvarar  $b = 0,8$  och används vid en schablonmässig utvärdering. För en preliminär utvärdering kan också överkonsolideringsgraden utvärderas ur resultaten från CPT-sonderingen. En noggrannare utvärdering kan göras då tillgång till resultat från ödometerförsök finns och en ytterligare förfinad utvärdering kan erhållas om  $b$ -faktorn kalibreras genom avancerade laboratorieförsök. I likhet med vingförsöken erhålls ingen större effekt av korrektionen i normalkonsoliderad och endast svagt överkonsoliderad jord. I överkonsoliderad jord blir korrektionen större än för vingförsöken, men i övrigt blir effekten i princip densamma som för dessa.

### ***Dilatometerförsök***

Som ovan nämnts kan förkonsolideringsstrycket utvärderas med relativt god noggrannhet med den ovan angivna metoden. Detta betyder att även den odränerade skjuvhållfastheten kan utvärderas relativt väl ur det allmänna sambandet

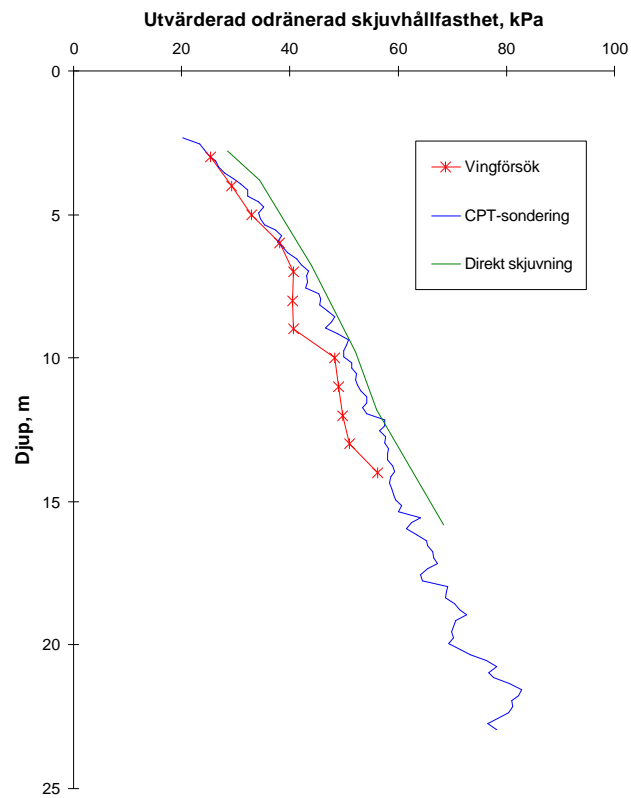
För denna utvärdering fordras att faktorerna  $a$  och  $b$  är kända. Normalt används  $a = 0,22$  och  $b = 0,8$  men dessa schablonvärden gäller endast för lera. Vid användning i annan jord som t.ex. organisk jord fordras att åtminstone  $a$ -faktorn är bestämd genom kalibrering med andra försöksmetoder. För en förbättrad utvärdering kan såväl  $a$ - som  $b$ -värden kalibreras med avancerade laboratorieförsök.

### **Exempel**

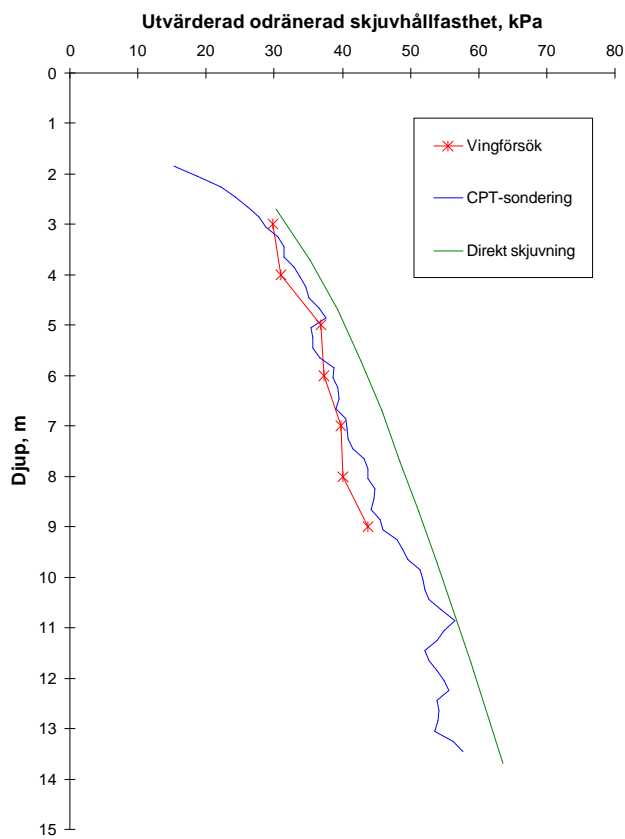
Resultatet av de föreslagna utvärderingsmetoderna kan illustreras med den på detta vis utvärderade odränerade skjuvhållfastheten i de profiler som tidigare visats med hållfastheten utvärderad enligt det tidigare förfarandet, **Fig. 10**. (jfr **Fig.4**).

En god överensstämmelse erhålls nu för samtliga metoder oavsett överkonsolideringsgrad. För utvärderingen av den odränerade skjuvhållfastheten i Sundholmen med dilatometer har speciellt kalibrerade  $a$ -värden använts. I annat fall hade överensstämmelsen varit betydligt sämre i de organiska svämsedimenten överst i profilen i **Fig. 10e**. Också i övriga undersökningspunkter medför de nya utvärderingsmetoderna en bättre samstämmighet i resultaten från de olika försöksmetoderna.

**Denna studie och de data som presenteras är delresultat av ett större projekt beträffande "Effekter av avschaktningar av slänkrön" [4] som finansierats gemensamt av Räddningsverket, Banverket och Statens geotekniska institut.**

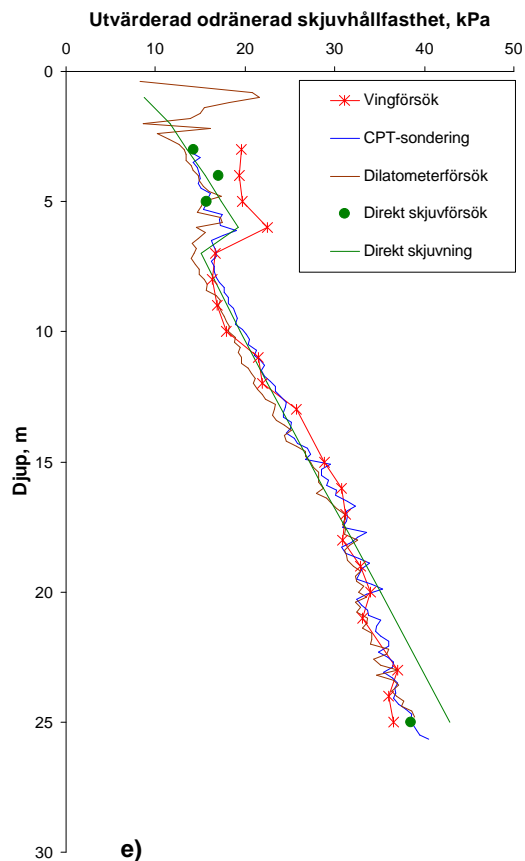
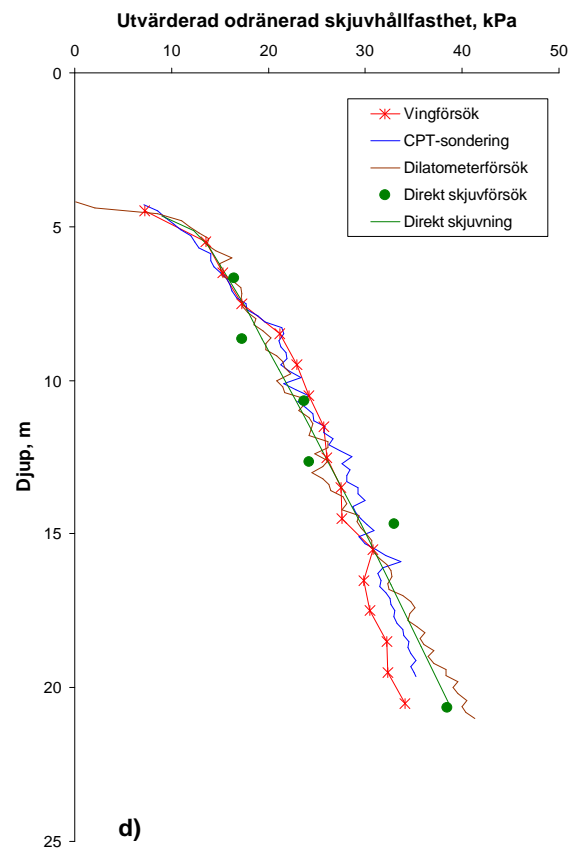
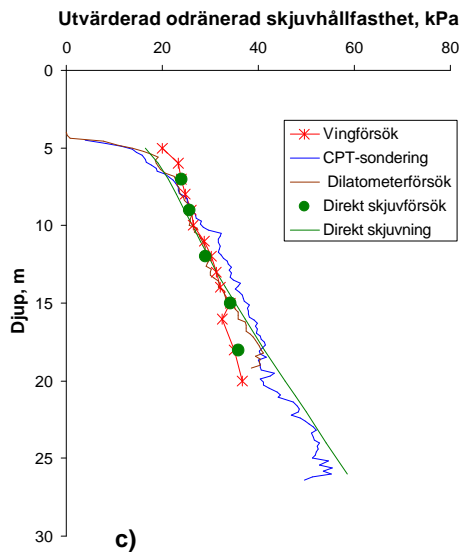


a)



b)

**Fig. 10. Jämförelse mellan odränerade skjuvhållfastheter bestämda med olika metoder**  
**a) överkonsoliderad jord under älven i Sektion A i Torp**  
**b) överkonsoliderad jord under älven i Sektion C i Torp**



**Fig. 10. Jämförelse mellan odränerade skjuvhållfastheter bestämda med olika metoder**  
 c) överkonsoliderad jord under älven i Strandbacken  
 d) överkonsoliderad jord under ån i Sundholmen  
 e) endast svagt överkonsoliderad jord bakom avschaktningen i Sundholmen

## Referenser

- [1] **Larsson, R., Bergdahl, U. och Eriksson, L. (1983).** Utvärdering av skjuvhållfasthet i kohe-sionsjord. Statens geotekniska institut, Information 3, Linköping.
- [2] **Larsson, R. (1992).** CPT-sondering – En in-situmetod för bestämning av lagerföljd och egen-skaper i jord. Statens geotekniska institut, Information 15, Linköping.
- [3] **Larsson, R. (1989).** Dilatometerförsök – En in-situmetod för bestämning av lagerföljd och egenskaper i jord. Statens geotekniska institut, Information 10, Linköping.
- [4] **Larsson, R. och Åhnberg, H. (2003).** Effekter av avschaktningar vid slänkrön, Portrycks-situation - Hållfasthetsegenskaper – Stabilitet – Miljö. Statens geotekniska institut, Rapport No 61, Linköping.
- [5] **Larsson, R. (2001).** Investigations and Load Tests in Clay Till. Statens geotekniska institut, Rapport No 59, Linköping.
- [6] **Ladd, C.C. and Foott, R. (1974).** New Design Procedure for Stability of Soft Clays. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, No. GT7.
- [7] **Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancelotta, R. (1985).** New Develop-ments in Field and Laboratory Testing of Soils. Theme Lecture. Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco. Vol. 1, pp. 57-153
- [8] **Schofield, A. N. and Wroth, C.P. (1968).** Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill. London.
- [9] **Roscoe, K.H. and Burland, J.B. (1968).** On the generalised stress-strain behaviour of "wet" clay. Symposium on Engineering Plasticity. Cambridge, pp. 535-609. Cambridge University Press.
- [10] **Wood, D.M. (1991).** Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge University Press.
- [11] **Larsson, R. (1980).** Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, No. 4, 1980, pp. 591-602.
- [12] **Mayne, P.W. (1988).** Determining OCR in clays from laboratory strength. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 1, pp-76-92.
- [13] **Larsson, R. (1990).** Behaviour of organic clay and gyttja. Statens geotekniska institut, Rapport No 38, Linköping.
- [14] **Hansbo, S. (1957).** A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. Statens geotekniska institut, Proceedings Nr. 14, Stockholm.
- [15] **Mayne, P.W. and Mitchell, J.K. (1988).** Profiling of overconsolidation ratio in clays by field vane. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, No. 1, pp 150-157.



- [16] **Larsson, R. and Mulabdic, M.(1991)**. Piezocone Tests in Clay. Statens geotekniska institut, Rapport No 42, Linköping.
- [17] **Roque, R., Janbu, N. and Senneset, K. (1988)**. Basic Interpretation Procedures of Flat Dilatometer Tests. Proceedings of 1st International Symposium on Penetration Testing, Orlando, Florida, Vol. 1.
- [18] **Marchetti, S. (1980)**. In Situ Tests by Flat Dilatometer. ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 106, No. GT3.
- [19] **Götaälvkommittén (1962)**. Rasriskerna i Götaälvdalen – Betänkande avgivet av Götaälvkommittén. Statens offentliga utredningar, SOU 1962:48, Stockholm.
- [20] **Bergdahl, U. (2002)**. Personlig kommunikation.
- [21] **Demers, D. and Leroueil, S. (2002)**. Evaluation of preconsolidation pressure and the overconsolidation ratio from piezocone tests of clay deposits in Quebec. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, No. 1, pp.174-192.
- [22] **Powell, J.J.M. and Uglow, I.M. (1988)**. The Interpretation of the Marchetti Dilatometer in UK Clays. Penetration Testing in the UK. Thomas Telford. London.
- [23] **Leroueil, S., Collins, G. and Tavenas, F. (1983)**. Total and effective stress analyses of slopes in Champlain sea clays. Symposium on Slopes on Soft Clays. Statens geotekniska institut, Rapport No 17, Linköping.
- [24] **Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. and Hoeg, K. (1986)**. Use of In Situ Tests for Foundation Design on Clay. Proceedings of In Situ '86, a Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, Virginia, ASCE, New York, p 1-30.
- [25] **Larsson, R. (1983)**. Släntstabilitetsberäkningar i lera – Skall man använda totalspänningsanalys, effektivspänningsanalys eller kombinerad analys?. Statens geotekniska institut, Rapport No 19, Linköping.



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](mailto:sgi@swedgeo.se) Internet: [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)