

# Horisontella vilojordtryck i lera

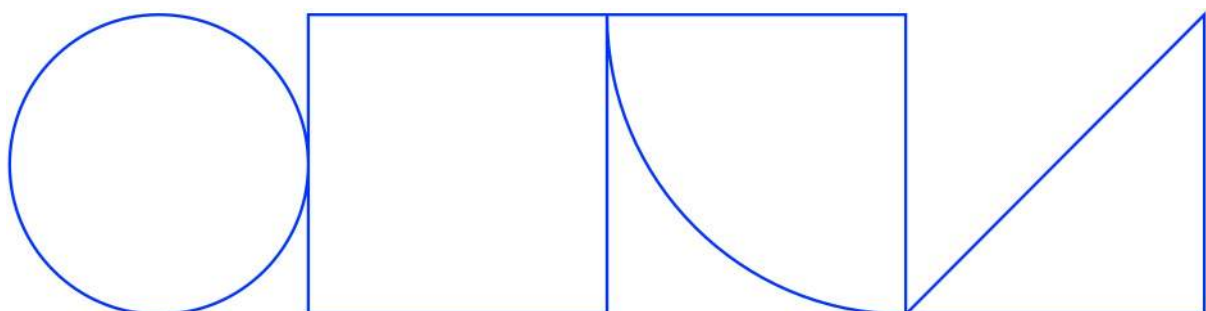
Sammanställning av mätresultat samt uppdaterade empiriska samband för normal- till svagt överkonsoliderade leror

---

Johannes Tornborg  
Skanska Sverige AB

2024-09-17

**SKANSKA**



## Förord

Detta dokument utgör en avrapportering av SBUF-projektet ”Horisontella vilojordtryck i lera” (SBUF 14361). De första stegen till projektet togs under våren 2024, då undertecknad hade kontakt med professor emeritus Göran Sällfors och Per-Evert Bengtsson i syfte att söka svar på (i) vilken data som utgjorde underlag till den befintliga svenska empirin för vilojordtryck i lera, samt (ii) hur empirin skulle tolkas och tillämpas.

Undertecknad vill härmed rikta ett stort tack till Göran Sällfors och Per-Evert Bengtsson för deras vilja att svara på frågor, deras engagemang och stöttning samt att de kontinuerligt bidragit med sin kompetens inför och under projektets gång. Tack även till Rainer Massarsch för snabb respons på en förfrågan om litteratur.

Förutom finansiering från SBUF har projektet erhållit finansiellt stöd från Skanska Sverige AB samt egeninsatser från de företag som medverkat i projektets referensgrupp. Projektets arbetsgrupp har utgjorts av följande personer från Skanska:

- Johannes Tornborg
- Torbjörn Edstam
- Anders Kullingsjö

En referensgrupp bestående av följande personer har varit kopplad till projektet:

- Per-Evert Bengtsson (PEB Geoteknik)
- Lars Hall (NCC)
- Kristy Heng (Trafikverket)
- Mats Karlsson (Chalmers)
- Michael Sabattini (Peab)
- Carolina Sellin (SGI)
- Göran Sällfors (Chalmers och Geoforce)

Referensgruppen har bidragit med inspel och synpunkter vilka har varit mycket värdefulla för projektet och därmed även för branschen. Stort tack!

Göteborg, 2024-09-17

Johannes Tornborg

[johannes.tornborg@skanska.se](mailto:johannes.tornborg@skanska.se)

## Sammanfattning

Detta projekt initierades då det förelåg oklarheter angående vilken data som utgjorde underlag till den befintliga svenska empirin för uppskattning av horisontella vilojordtryck i lera (Larsson 1977) samt hur empirin skulle tolkas och tillämpas. Hypotesen var att den befintliga empirin i gällande regelverk och riktlinjer tolkas och beskrivs på så sätt att jordtrycken överskattas. Vid nybyggnation kan detta resultera i överdimensionering med ökade materialmängder och ökad klimatbelastning som följd. I laboratorieförsök kan det resultera i att lerans skjuvhållfasthet riskerar att bestämmas på felaktiga grunder.

Projektets syfte är att utreda och beskriva bakgrunden till befintlig empiri (Larsson 1977) avseende horisontella vilojordtryck i normal till svagt överkonsoliderad lera, samt att arbeta fram förslag till uppdaterade och väl definierade empiriska samband.

Genomförandet relaterade till projektets fem delmål. Inledningsvis utfördes en litteraturstudie och ett antal tidigare mätningar av horisontella jordtryck i laboratorium och fält digitaliserades. Denna data sammanställdes därefter i diagramformat mot diverse indexparametrar samt lerans överkonsolideringsgrad  $OCR$ . Detta möjliggjorde att fastställa och beskriva bakgrunden inklusive vilken data som låg till grund för den befintliga empirin (Larsson 1977) för horisontella vilojordtryck i lera.

Med kännedom om bakgrunden till den befintliga empirin påvisas att om denna tolkas och tillämpas att gälla för  $OCR=1$ , vilket är troligt att merparten av geotekniker och konstruktörer i branschen gör utifrån de texter och ekvationer som finns i befintliga regelverk (t.ex. Trafikverket 2023) och riktlinjer (t.ex. SGI 2023), riskerar vilojordtryckskoefficienten  $K_0$  att överskattas. Föreliggande rapport beskriver hur horisontella vilojordtryck i lera (mot exempelvis stödmurar, tråg, tunnlar, permanenta sponter) i och med befintliga regelverk och riktlinjer därmed riskerar att överskattas. Då överkonsolideringsgraden  $OCR$  i praktiken inte sällan är  $>1.25$  innebär det att jordtrycken mot en konstruktion i många fall överskattas med minst 10 à 15 %. Det beskrivs även att överskattningen av de horisontella vilojordtrycken riskerar att påverka laboratorieförsök på så sätt att icke-konservativa värden på skjuvhållfastheten erhålls.

Förslag till uppdaterade och väl definierade empiriska samband för uppskattning av horisontella jordtryck i lera har tagits fram inklusive beskrivning av begränsningar, antaganden och bakomliggande mätdata. Detta genom att resultat från laboratorieförsök, fältmätningar och empiri för friktionsvinkeln  $\phi'$  har integrerats i diagram och normaliserats med avseende på  $OCR$ . Detta möjliggör att ett samband av typen  $K_0 = K_0^{OCR=1} OCR^m$  kan nyttjas för att beräkna  $K_0$  och horisontella vilojordtryck med beaktande av  $OCR$  samt plasticitetsindex  $I_P$  alternativt konflytgränsen  $w_L$ . Här bör det noteras att  $I_P$  och  $w_L$  är så kallade ställföreträdare, eller ett mått, på jordens friktionsvinkel.

Förslagen till uppdaterade empiriska samband har jämförts med fältmätningar av  $K_0$  och även mot den empiri som avser graden av odränerad skjuvhållfasthetsanisotropi. Detta då det, enligt den förenklade flyttemodell vilken beskrivs av Larsson och Sällfors (1981), finns en koppling mellan  $K_0$  och skjuvhållfasthetskvoten  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv}$ .

Projektet inklusive den föreslagna uppdaterade empirin för horisontella vilojordtryck i lera ökar branschens kunskap i ämnet. Framförallt redovisas härmed tydligt vilka data de tidigare och nu föreslagna empiriska sambanden bygger på. De uppdaterade empiriska sambanden kan direkt användas som underlag för implementering i praktiken. Detta bidrar till harmonisering i branschen och undanröjer bland annat fördyrande överskattningar av vilojordtryck mot konstruktioner. Projektet bidrar även till att avancerade laboratorieförsök (t.ex. triaxialförsök) konsolideras för rätt jordtryck vilket resulterar i representativa skjuvhållfasthetsvärden. Därmed undviks icke-konservativa, höga, värden för framförallt passiv skjuvhållfasthet. Projektet bidrar således till säkrare arbetsplatser då jordens skjuvhållfasthet kan uppskattas med tillförlitlig ingångsdata/empiri till laboratorieförsök. Summerat bidrar projektet till optimerade konstruktioner (materialmängder och säkerhetsnivåer) med bibehållen produktions- och livslängdskostnad.

## Beteckningar och symboler

$c'$	kohesionsintercept
$c_u$	odränerad skjuvhållfasthet
$c_{u,aktiv}$	odränerad skjuvhållfasthet vid aktiv skjuvning
$c_{u,direkt}$	odränerad skjuvhållfasthet vid direkt skjuvning
$c_{u,passiv}$	odränerad skjuvhållfasthet vid passiv skjuvning
$m$	exponent
$w_L$	konflytgräns
$w_P$	plasticitetsgräns
$I_P$	plasticitetsindex
$K_0^{nc}$	jordtryckskoefficient bestämd vid "primary loading" och stora töjningar
$\Delta K_0^{nc}$	jordtryckskoefficient bestämd som inkrementell förändring av den horisontella och vertikala effektivspänningen i ett spänningsintervall $\sigma'_v > \sigma'_{vc}$
$K_0^{yield}$	jordtryckskoefficient bestämd som kvoten mellan horisontellt och vertikalt förkonsolideringstryck
$K_0$	vilojordtryckskoefficient
$K$	jordtryckskoefficient
$K_0^{OCR=1}$	vilojordtryckskoefficient normaliserad med hänsyn till $OCR$
$OCR$	överkonsolideringsgrad
$\phi'$	friktionsvinkel
$\sigma'_h$	horisontell effektivspänning
$\sigma'_v$	vertikal effektivspänning
$\sigma'_{h0}$	horisontell effektivspänning i vilotillstånd
$\sigma'_{v0}$	vertikal effektivspänning i vilotillstånd
$\sigma'_{hc}$	horisontellt förkonsolideringstryck
$\sigma'_{vc}$	vertikalt förkonsolideringstryck

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	1
1.2	Syfte & mål . . . . .	1
1.3	Genomförande . . . . .	2
1.4	Avgränsningar . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Horisontella vilojordtryck i lera</b>	<b>3</b>
2.1	Definitioner avseende jordtryckscoefficients . . . . .	3
2.2	Mätningar i laboratorie- och fältförsök . . . . .	3
2.3	Kopplingen mellan jordtryckscoefficients och graden av skjuv- hållfasthetsanisotropi i en förenklad flytytemodell . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Larssons (1977) empiriska samband för horisontella vilojordtryck</b>	<b>6</b>
3.1	Utredning avseende underlaget för empirin . . . . .	7
3.2	Tillämpning av Larssons (1977) empiri i befintliga regelverk och riktlinjer . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Förslag till uppdaterade empiriska samband för horisontella vilojordtryck</b>	<b>15</b>
4.1	Jordtryckscoefficients $K_0^{\text{OCR}=1}$ . . . . .	15
4.2	Vilojordtryckscoefficients $K_0$ . . . . .	21
4.3	Jämförelse av sambandet för $K_0$ mot empirin avseende uppskattning av anisotrop odränerad skjuvhållfasthet . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Rekommendationer</b>	<b>29</b>
	<b>Referenser</b>	<b>31</b>

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Detta SBUF-projekt avser att komplettera och förbättra byggbranschens kunskap om horisontella vilojordtryck (horisontella effektivspänningar) i normal till svagt överkonsoliderade leror. Anledningen är att horisontella vilojordtryck har avgörande betydelse för bland annat:

- Strukturella påkänningar, mot t.ex. källarväggar, tunnlar och permanenta stödkonstruktioner.
- Jordens "förspänning" och därmed styvhet samt skjuvhållfasthet i olika plan (graden av s.k. spänningsinducerad hållfasthetsanisotropi). Detta påverkar stabiliteten för såväl temporära som permanenta schakter samt befintliga slänter.
- Beräkning av markdeformationer, t.ex. rörelser i samband med schakter i stadsmiljö med hjälp av numeriska metoder.

Hypotesen är att befintlig empiri (Larsson 1977) för uppskattning av horisontella vilojordtryck i lera i gällande regelverk och riktlinjer tolkas och tillämpas så att jordtrycken överskattas. Detta innebär att i de projekt där Trafikverkets regelverk (Trafikverket 2023) eller SGIs Vägledning 8 "Utredning av släntstabilitet" (SGI 2023) används (i praktiken betraktas dock båda dokumenten som branschpraxis och används därmed även i projekt som inte krävställer dokumenten), riskerar de horisontella vilojordtrycken i lera att överskattas med minst 10 à 15 % (detta behandlas i avsnitt 3.2). Överskattningen av de horisontella vilojordtrycken riskerar även att påverka laboratorieförsök på så sätt att icke-konservativa värden på skjuvhållfastheten erhålls.

Vid en inledande översyn av den befintliga empirin (Larsson 1977) och efterforskning avseende branschkunskap om dess bakgrund, framkom att det är oklart vilken data empirin grundas på. Hypotesen om att gällande regelverk och riktlinjer ger missvisande tolkningar och tillämpning av Larssons (1977) empiriska samband för horisontella vilojordtryck bekräftades dock av den inledande översynen.

## 1.2 Syfte & mål

Syftet med projektet är att utreda och beskriva bakgrunden till befintlig svensk empiri (Larsson 1977) avseende horisontella vilojordtryck i normal till svagt överkonsoliderad lera, samt att ta fram förslag till uppdaterade och väl definierade empiriska samband. Projektets delmål är att:

- (i) Digitalisera ett antal tidigare mätningar av horisontella jordtryck i laboratorium och fält.
- (ii) Upprätta förslag på entydiga definitioner avseende jordtryckscoefficienter, t.ex.  $K_0^{nc}$  och  $K_0$ .
- (iii) Redogöra för bakgrunden till empirin enligt Larsson (1977) avseende horisontella vilojordtryck i lera.
- (iv) Upprätta förslag på uppdaterade empiriska samband för vilojordtryckscoefficienterna  $K_0^{OCR=1}$  och  $K_0$  (se definitioner i avsnitt 2.1) i lera som en funktion av indexparametrar bestämda i rutinförsök (t.ex. konflytgränsen) samt lerans överkonsolideringsgrad.
- (v) Belysa hur uppdaterade empiriska samband för  $K_0$  påverkar empirin avseende odränerad skjuvhållfasthetsanisotropi.

Målsättningen med projektet är att upprätta förslag på uppdaterade och väl definierade empiriska samband vilka har förankrats med en bred och kompetent referensgrupp.

### 1.3 Genomförande

Projektets mål låg till grund för genomförandet, vilket innefattade att:

- (i) Utföra en litteraturstudie inklusive digitalisering av ett antal relevanta tidigare mätningar av horisontella jordtryck i laboratorium och fält. Med "relevanta" avses här horisontella vilojordtryck i normal till svagt överkonsoliderad lera samt, vad gäller fältmätningar, fall med plan markyta.
- (ii) Analysera den digitaliserade datan inklusive att utföra sammanställningar i diagramformat mot diverse indexparametrar (t.ex. plasticitetsindex och konflytgräns) samt lerans överkonsolideringsgrad.
- (iii) Utredda bakgrunden inklusive vilken data som låg till grund för den befintliga empirin (Larsson 1977) för vilojordtryckskoefficienter i lera.
- (iv) Upprätta förslag på uppdaterade empiriska samband för vilojordtryckskoefficienterna  $K_0^{\text{OCR}=1}$  och  $K_0$ .
- (v) Jämföra det uppdaterade empiriska sambandet för  $K_0$  mot empirin för uppskattning av anisotrop odränerad skjuvhållfasthet. Detta utförs genom att grafiskt redovisa det uppdaterade empiriska sambandet mot mätningar av aktiv och passiv skjuvhållfasthet i ett antal fallstudier med varierande konflytgräns och överkonsolideringsgrad (Sällfors och Larsson 2016).

### 1.4 Avgränsningar

Rapporten behandlar enbart horisontella jordtryck i normal till svagt överkonsoliderad lera och fall med plan markyta samt horisontella jordlager och horisontell grundvattenyta. Det är möjligt att de i föreliggande rapport givna förslagen till uppdaterade empiriska samband kan gälla även för leror med högre överkonsolideringsgrad än normal till svag överkonsolidering. Detta bör i så fall verifieras genom jämförelser mot fältmätningar av  $K_0$  i den typen av leror, vilket är en av rekommendationerna i avsnitt 6.

## 2 Horisontella vilojordtryck i lera

Spänningstillståndet i en jord karakteriseras ofta med så kallade jordtryckskoefficienter. Med kännedom om t.ex. den vertikala effektivspänningen och en vilojordtryckskoefficient, kan det horisontella (effektiva) vilojordtrycket beräknas. Kännedom om rådande effektiva normalspänningar (”förspänning”) verkande mot olika plan i jorden, via kännedom om vilojordtryckskoefficienten, är av största vikt då det påverkar jordens hållfasthet och styvhet i olika riktningar samt jordtryck mot geokonstruktioner. Nedan redovisas de definitioner på jordtryckskoefficienter som används i föreliggande rapport.

### 2.1 Definitioner avseende jordtryckskoefficienter

Följande definitioner används i föreliggande rapport.

- $K_0^{\text{nc}} = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$  vid ”primary loading” dvs det asymptotvärde som kvoten  $\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$  antar vid stora töjningar ( $\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vc}} > \text{ca } 2$ , se t.ex. Figur 8b).
- $\Delta K_0^{\text{nc}} = \frac{\Delta \sigma'_h}{\Delta \sigma'_v}$ . Kvoten mellan inkrementell förändring av den horisontella och vertikala effektivspänningen i ett spänningsintervall  $\sigma'_v > \sigma'_{vc}$ .
- $K_0^{\text{yield}} = \frac{\sigma'_{hc}}{\sigma'_{vc}}$ . Kvoten mellan det horisontella och vertikala förkonsolideringstrycket.
- $K_0 = \frac{\sigma'_{h0}}{\sigma'_{v0}}$ . Kvoten mellan den horisontella och vertikala effektivspänningen i vilotillstånd in situ.
- $K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$ . Kvoten mellan den horisontella och vertikala effektivspänningen.
- $K_0^{\text{OCR}=1} = \frac{K_0}{\text{OCR}^m}$ . Ett  $K_0$ -värde mätt i fält vilket normaliseras med avseende på  $\text{OCR}$  med hjälp av ett samband av typen  $K_0 = K_0^{\text{OCR}=1} \text{OCR}^m$ .

I avsnitt 6 *Rekommendationer* föreslås att branschen, t.ex. genom SGF eller SGI, bör tillse att standardiserade begrepp för jordtryckskoefficienterna införs. Detta då det är troligt att viss begreppsförvirring har förekommit historiskt, vilket sannolikt lett till att empiriska samband (Larsson 1977) tolkas och tillämpas av gällande regelverk och riktlinjer på så sätt att horisontella vilojordtryck överskattas (detta behandlas i avsnitt 3.2).

### 2.2 Mätningar i laboratorie- och fältförsök

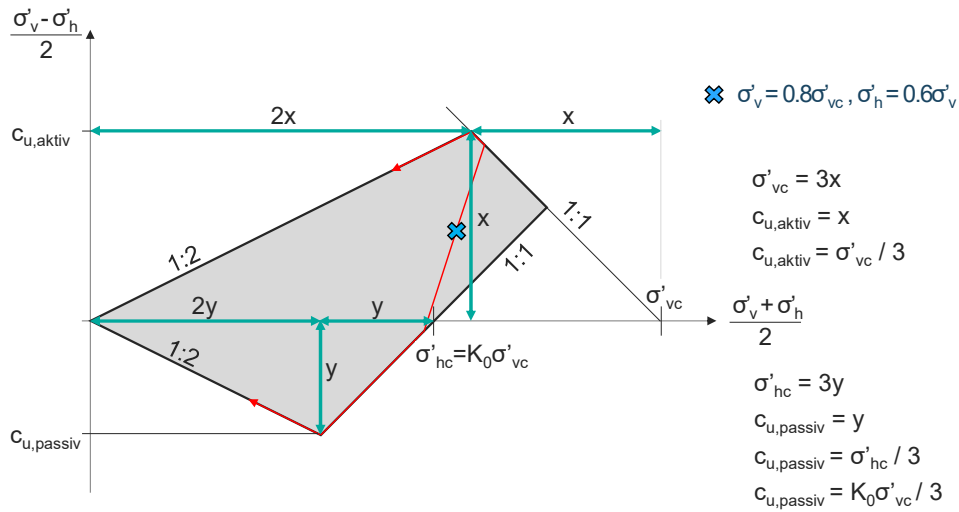
Delar av mätdata i följande rapporter har digitaliserats och sammanställts inom ramen för detta SBUF-projekt: Bjerrum och Andersen (1972), Torstensson (1973), Larsson (1975), Massarsch et al. (1975), Sällfors (1975), Larsson (1977), Larsson och Eskilsson (1989), Rankka (1994), Kullingsjö (2007) och Olsson (2013). Den digitaliserade datan finns tillgänglig på SBUFs hemsida (projektnummer 14361).

I litteraturen redovisas i vissa fall värden på t.ex.  $K_0$  i tabell- eller diagramform utan källhänvisning och/eller fullständig redovisning av metodbeskrivningen av hur värdena erhållits. Sådana fall har inte beaktats eller digitaliserats i denna rapport (t.ex. delar av Larsson och Eskilsson 1989).



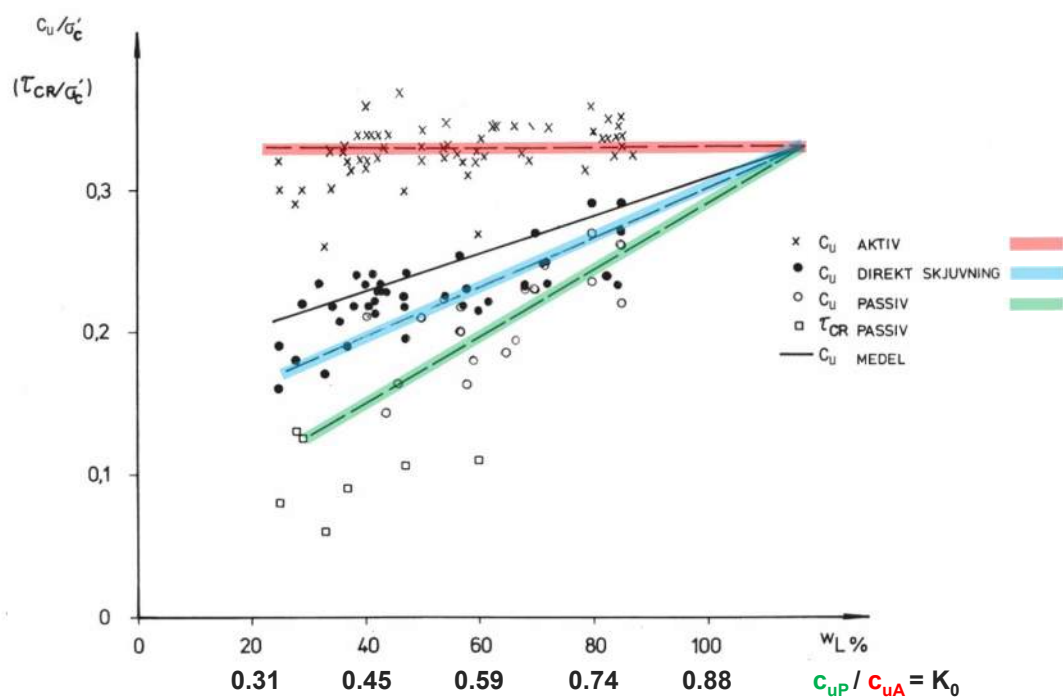
### 2.3 Kopplingen mellan jordtryckskoefficient och graden av skjuvhållfasthetsanisotropi i en förenklad flytytemodell

I avsnitt 1.1 *Bakgrund* anges att det horisontella vilojordtrycket har avgörande betydelse för bland annat jordens skjuvhållfasthet i olika plan (graden av s.k. hållfasthetsanisotropi). Denna koppling är måhända inte uppenbar och illustreras därför i det följande kortfattat med hjälp av en förenklad flytytemodell (Larsson och Sällfors 1981). I denna modell är  $c_{u,aktiv} = \sigma'_{vc}/3$  för normal till svagt överkonsoliderade leror. Detta illustreras grafiskt i Figur 1. Motsvarande förhållande för den passiva odränerade skjuvhållfastheten är  $c_{u,passiv} = K_0 \sigma'_{vc}/3$ . Detta innebär förenklat att endast  $c_{u,passiv}$  beror på  $K_0$  och att kvoten  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv} = K_0$ . Med "förenklat" avses här att även  $c_{u,aktiv}$  sannolikt påverkas mer eller mindre av  $K_0$  mht att denna påverkar medeleffektivspänningen och deviatorspänningen vid konsolideringen och den efterföljande skjuvningen av försöket.



Figur 1: Förenklad flytyta (avgränsar det gråmarkerade området) enligt Larsson och Sällfors (1981) där  $c' = 0$  kPa och  $\phi' = 30^\circ$  med grovt skissade effektivspänningsvägar (röda linjer) för odränerat aktivt respektive passivt triaxialförsök.

Ett empiriskt samband för kvoten  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv}$  från odränerade aktiva och passiva triaxialförsök återfinns i Larsson et al. (2007). Där ges  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  och  $c_{u,aktiv}/\sigma'_{vc}$  som funktion av konfliktgränsen  $w_L$ . Dock är det inte  $w_L$  som är styrande för graden av hållfasthetsanisotropi utan snarare  $K_0$  ( $w_L$  kan sägas vara en "ställföreträdare" för  $K_0$ ). Om det väljs (förenklas) att  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv} = K_0$  enligt den förenklade flytytemodellen i Figur 1 kan  $w_L$  i Larsson et al. (2007, figur B7) ersättas med  $K_0$  så som här gjorts i Figur 2. Detta exempel avser att illustrera betydelsen av  $K_0$  eller snarare betydelsen av den horisontella effektivspänningen på jordens beteende, i det här exemplet i form av anisotrop odränerad skjuvhållfasthet.



Figur 2: Värden på  $K_0$  om  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv} = K_0$  enligt den förenklade flytytemodellen (Larsson och Sällfors 1981) och  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv}$  tas från Larsson et al. (2007, figur B7). Bakgrund från Larsson et al. (2007, figur B7) med färglagda linjer.

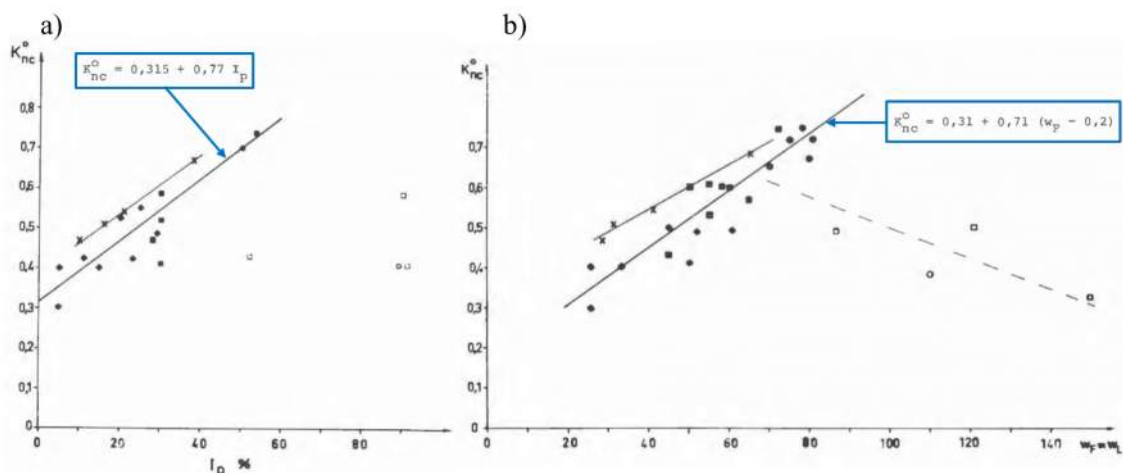
### 3 Larssons (1977) empiriska samband för horisontella vilojordtryck

I SGI rapport 4 “Basic behaviour of Scandinavian soft clays” (Larsson 1977) beskrivs empiriska samband för “ $K_0^{\text{nc}}$ ” som funktion av lerans plasticitetsindex och konflytgräns. De empiriska sambanden, vilka återges i Figur 3 samt i Ekvation 1, uppges att grundas på data från Brooker och Ireland (1965), Bjerrum och Andersen (1972) och Massarsch et al. (1975) samt “Author’s measurements”. Här skall nämnas att Brooker och Ireland (1965) redogör för data från laboratorieförsök på “remoulded soils”, medan Bjerrum och Andersen (1972) redogör för data från såväl laboratorie- som fältförsök och Massarsch et al. (1975) för data från fältförsök. I sammanställningen i Larsson (1977) har en datapunkt från Brooker och Ireland (1965) på Bearpaw shale ( $I_P = 78\%$  och  $K_0^{\text{nc}} = 0.70$ ) utelämnats av ej angiven anledning och samtliga data i Massarsch et al. (1975) tycks ej ha inkluderats. Det framgår ej i Larsson (1977) vilka data som låg till grund för “Author’s measurements”.

$$K_0^{\text{nc}} = 0.315 + 0.77I_P \quad (1a)$$

$$K_0^{\text{nc}} = 0.31 + 0.71(w_F - 0.2) \quad (1b)$$

...där  $I_P$  är plasticitetsindex och  $w_F$ , enligt notationen i Larsson (1977), är konflytgräns bestämd med fallkon (enligt SGF 2018 definierades fram till och med början av 1980-talet konflytgränsen bestämd med fallkon som  $w_F$  och Casagrandes stötflytgräns som  $w_L$  - numera betecknas konflytgränsen som  $w_L$ ).



Figur 3: Empiriska samband för horisontella jordtryck i lera (utdrag från Larsson 1977).

De empiriska sambanden i Ekvation 1 med tillhörande beskrivande text i Larsson (1977) ger upphov till följande frågor:

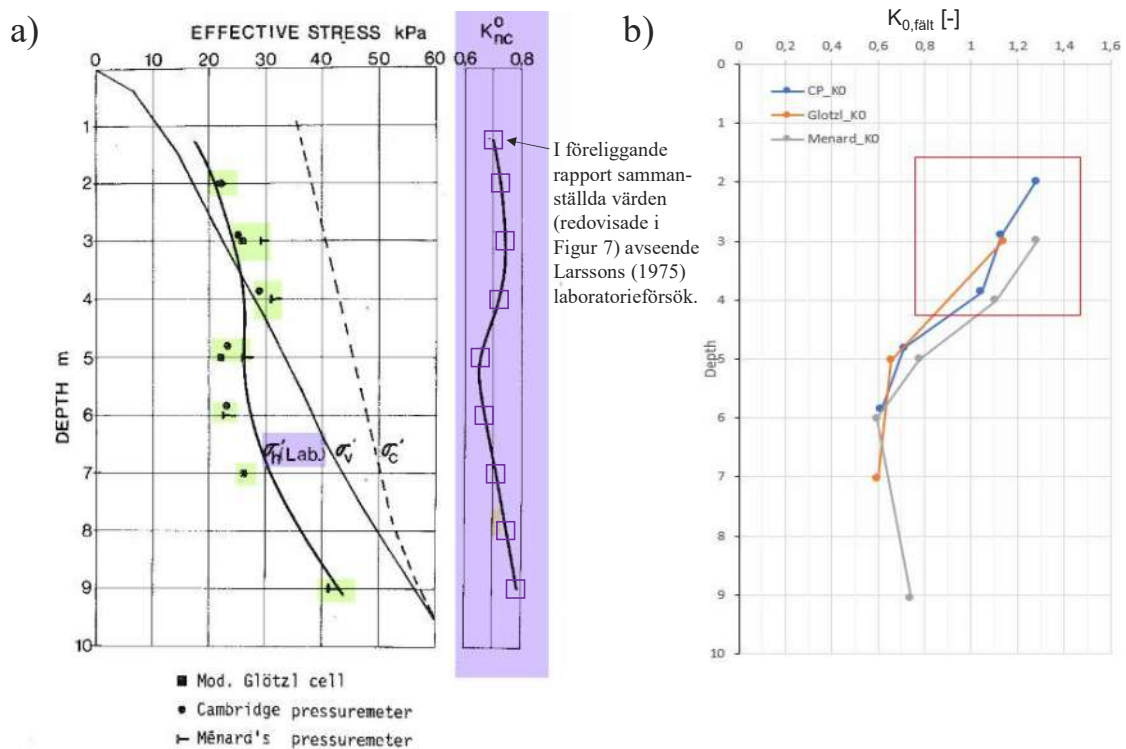
1. Vad avsågs med “ $K_0^{\text{nc}}$ ”? T.ex. jordtryckskoefficient vid primary loading och stora töjningar (definierat som  $K_0^{\text{nc}}$  i föreliggande rapport) eller  $K_0$  mätt i fält och i så fall vid vilken överkonsolideringsgrad  $OCR$ ? Frågan uppstår då texten i Larsson (1977) omnämner  $K_0^{\text{nc}}$  som:
  - $1 - \sin \phi'$  (sid 19 i Larsson 1977) dvs Jakys (1948) formel och jordtryckskoefficient vid primary loading (definierat som  $K_0^{\text{nc}}$  i föreliggande rapport).
  - $\sigma'_{\text{hc}} / \sigma'_{\text{vc}}$  (sid 20 i Larsson 1977) dvs kvoten mellan horisontellt och vertikalt förkonsolideringstryck (definierat som  $K_0^{\text{yield}}$  i föreliggande rapport)
  - $K_0 / OCR^{\sin 1.2 \phi'}$  med  $\phi' = 30^\circ$  och där  $K_0$  uppges vara data från fält- och laboriemätningar på Skandinaviska leror (sid 20 i Larsson 1977) dvs beräknat med Schmidts (1966) formel (definierat som  $K_0^{\text{OCR}=1}$  i föreliggande rapport)

2. Avsåg "Author's measurements" laborieförsök och/eller fältmätningar och i vilken eller vilka lokal(er)?
3. För vilket intervall på  $OCR$  gäller empirin?

### 3.1 Utredning avseende underlaget för empirin

Undertecknad hade inför ansökan till detta SBUF-projekt mailkorrespondens och samtal med Torbjörn Edstam, Anders Kullingsjö, Per-Evert Bengtsson och Göran Sällfors i syfte att bringa klarhet i de frågor vilka listades i föregående avsnitt. I samband med dessa samtal erhöles en teknisk rapport utgiven av Chalmers tekniska högskola (Larsson 1975). I rapporten redovisas resultat från laborieförsök och fältmätningar av horisontella jordtryck i Bäckebo (beläget ca 10 km norr om centrala Göteborg) mot indexparametrar hämtade från Torstensson (1973).

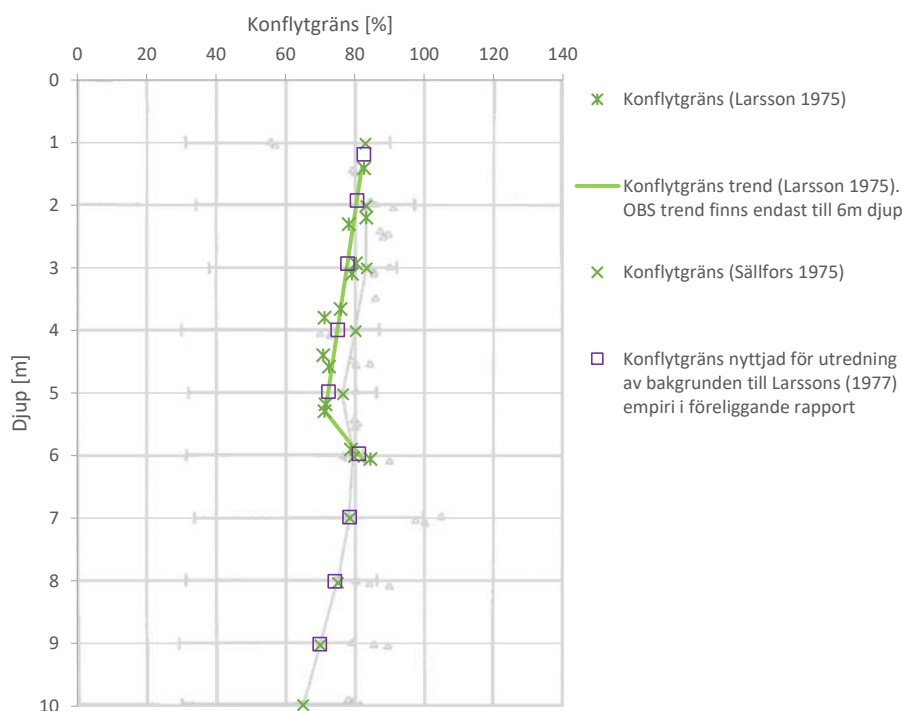
I Larsson (1975) framgår att jordtryckscoefficients har uppmätts i laboriet med triaxialförsök och CRS-försök med mätning av vertikal och horisontell effektivspänning. Dock ger rapporten en fjärde (jmf punktlistan ovan) möjlig definition på " $K_0^{nc}$ ", dvs i Larsson (1975) anges  $K_0^{nc}$  som  $\Delta\sigma'_h/\Delta\sigma'_v$  efter att förkonsolideringstrycket passerats (ej specificerat med hur mycket). I Figur 4 återges mätresultaten i Larsson (1975).



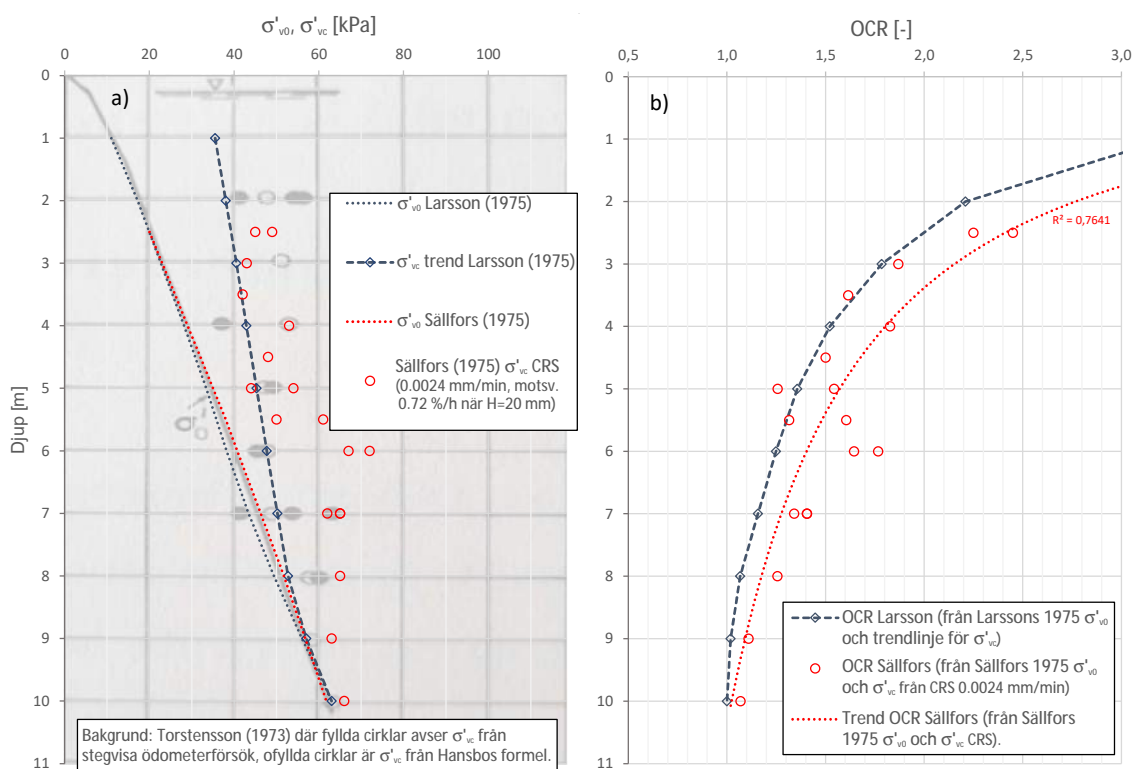
Figur 4: Fält- och laboriemätningar av horisontella vilojordtryck i Bäckebo norr om Göteborg: (a) utdrag från Larsson (1975) med gröna och lila färgmarkeringar påförda i föreliggande rapport. (b) Fältmätningarna i a) omräknade till  $K_0$  via den i a) givna profilen för  $\sigma'_v$ . Värdena ovan 4 m djup under markytan har rödmarkerats då de bedöms påverkade av förekomst av rotträd i leran.

För att utreda bakgrunden till Larssons empiri sammanställdes i föreliggande rapport värdena på  $K_0^{nc}$  från laboriemätningar (Figur 4a) samt  $K_0$  från fältmätningarna (Figur 4b) mot indexparametrar (Figur 5) från Larsson (1975) och Sällfors (1975) samt  $OCR$  grundade på en tolkad profil för  $\sigma'_{vc}$  enligt Larsson (1975), se Figur 6 ("OCR Larsson"). Målet med sammanställningen är att utreda vad "Author's measurement" i Larsson (1977) avser samt vilken definition på jordtryckscoefficients som empirin återspeglar

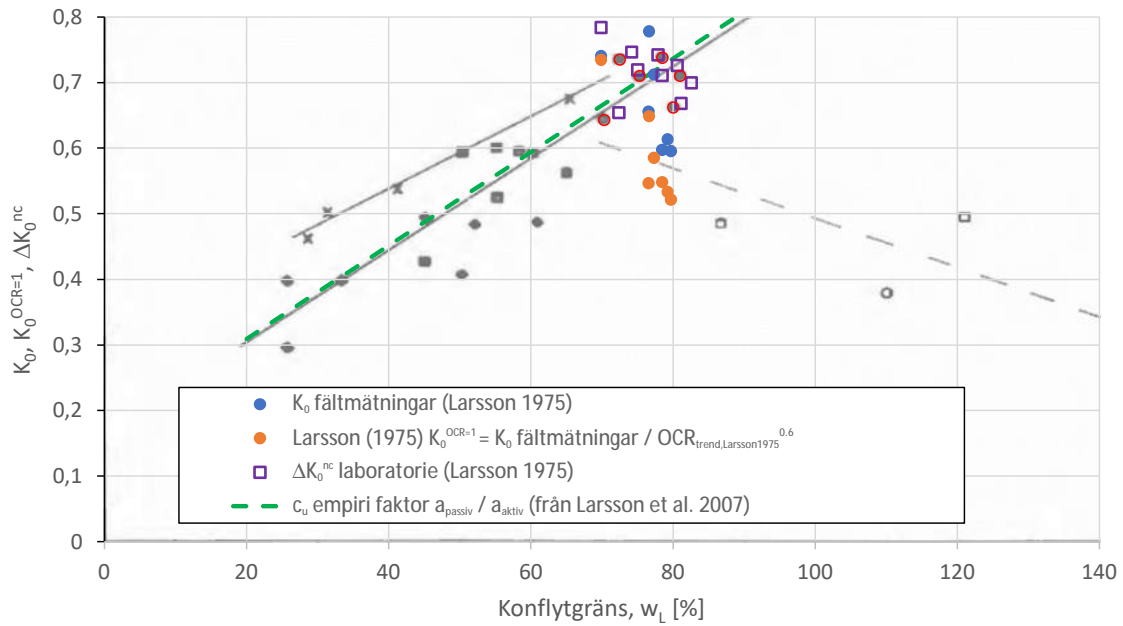
och för vilket  $OCR$  den är giltig. Sammanställningen av mätdata och jämförelsen mot Larssons empiriska samband redovisas i Figur 7.



Figur 5: Indexparametrar för Bäckeboleslera från Larsson (1975) och Sällfors (1975, utgör bakgrund i diagrammet). I figuren framgår de värden på konflytgräns vilka nyttjas för utredningen av bakgrunden till Larssons (1977) empiri (sammanställningen i Figur 7).



Figur 6:  $\sigma'_{v0}$ ,  $\sigma'_{vc}$  och  $OCR$  i Bäckeboleslera: (a) utdrag från Torstensson (1973) kompletterat med data från Larsson (1975) och Sällfors (1975). (b) trender och värden i a) redovisade som  $OCR$ .



Figur 7: Sammanställning av mätdata i Larsson (1975) mot bakgrund av Larssons (1977) data och empiriska samband (i bakgrunden avser fyllda cirkel, vilka här har inringats med rött, “Author’s measurements” i Larsson 1977). Figuren inkluderar även kvoten för empiriska samband för  $c_u$  (enligt Larsson et al. 2007) vid aktiv och passiv skjuvning i odränerade triaxialförsök.

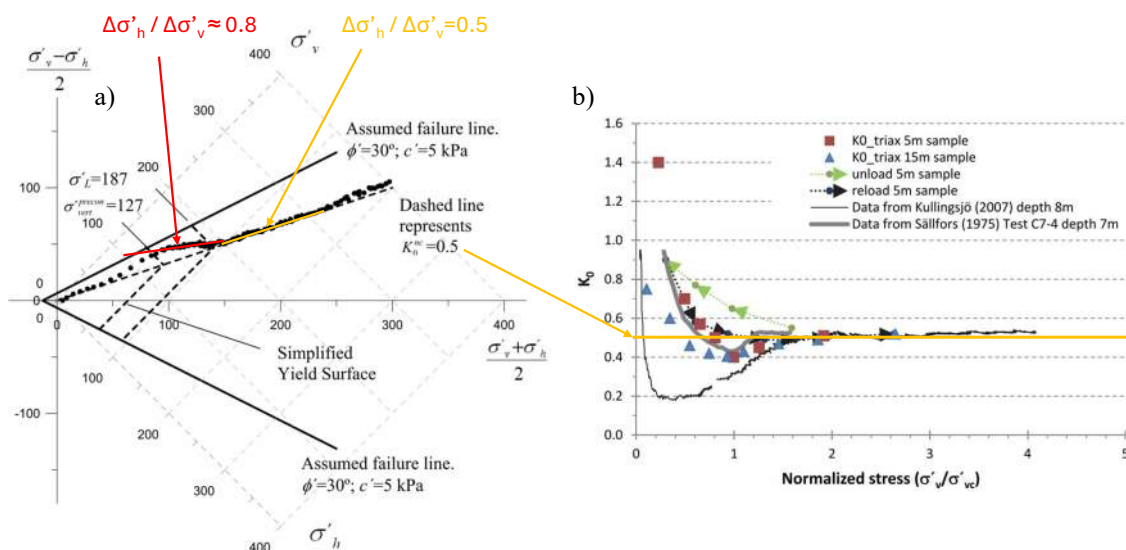
Med stöd av Figur 7 kan följande observationer göras:

- “Author’s measurement” i Larsson (1977) - fyllda svarta cirkel i bakgrunden - stämmer väl överens mot data från laborieförsök i Larsson (1975) vid redovisning mot konflytgränsen (notera att denna betecknas som  $w_F$  i Larsson 1977 och numera som  $w_L$ ).
- Fältmätningarna av  $K_0$  i Larsson (1975) ingår inte i diagrammen i Larsson (1977).
- Empirin överskattar generellt  $K_0$  uppmätt i fält något.  $OCR$  vid de aktuella fältmätningarna är 1.0 à 1.5 enligt Figur 6 för aktuella djup ( $>4$  m). Överskattningen ökar om datan redovisas mot stötflytgränsen (enligt en nu utförd sammanställning av data på kon- och stötflytgränsen i Larsson 1977, Bäckebo, och Larsson 1981, Lilla Mellösa, är stötflytgränsen ca 1.0 à 1.1 × konflytgränsen).
- Sammanfattningsvis: “Author’s measurement” i empirin grundar sig enbart på laborieförsök, specifikt  $\Delta K_0^{nc}$  bestämt efter att förkonsolideringstrycket passerats.

Ovanstående observationer ger upphov till följande frågor:

- Avspeglar empirin  $K_0^{nc}$  eller  $K_0$  (enligt definitionerna i avsnitt 2.1) och för vilket  $OCR$ ?
- Vid vilket spänningsintervall (i förhållande till  $\sigma'_{vc}$ ) utvärderade Larsson  $\Delta K_0^{nc}$ ?

En vägledning i dessa frågor kan fås genom att studera resultat från Kullingsjö (2007) och Olsson (2013), se Figur 8. I Figur 8a illustreras en spänningsväg för ett CRS-försök utfört med en triaxialcell och i Figur 8b en sammanställning av  $\sigma'_h/\sigma'_v$  mot  $1/OCR$  för Göteborgsleror. Detta ger att den storleksordning som Larssons empiri ger på  $K_0^{nc}$  troligtvis kommer från  $\Delta K_0^{nc}$  utvärderade i ett spänningsintervall mellan  $\sigma'_{vc}$  och gränsspänningen  $\sigma'_L$ . Frågan är dock hur väl värden från detta spänningsintervall kan avspegla  $K_0$  i fält med hänsyn till att lerans struktur i laborieförsöket har förändrats och delvis förstörts jämfört med (vilo)tillståndet in situ.

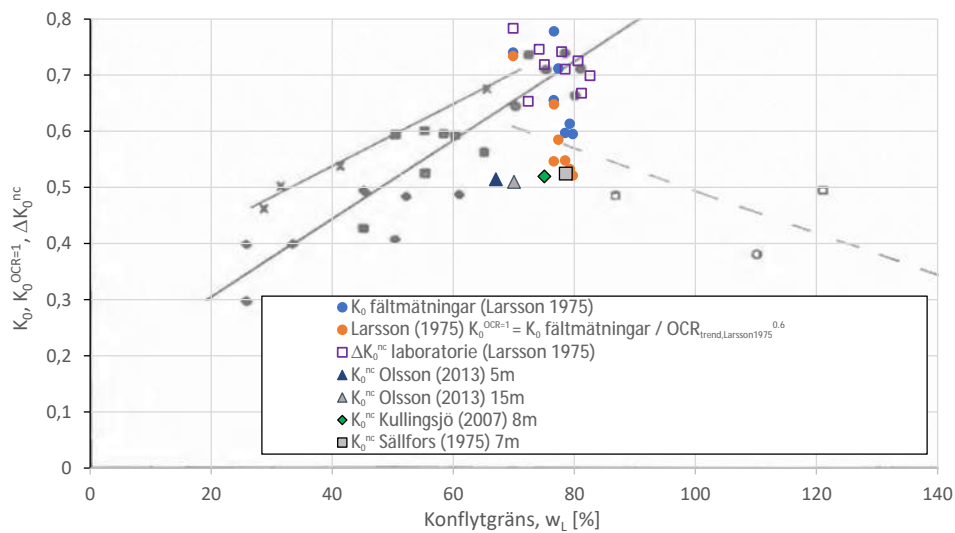


Figur 8: Spänningsintervallets betydelse för  $\sigma'_h/\sigma'_v$ : (a) spänningsväg för ett CRS-försök (figur visande test 1470b8 från Kullingsjö 2007 annoterad med röd och gul text samt pilar). (b) sammanställning av  $\sigma'_h/\sigma'_v$  mot  $1/OCR$  för Göteborgslerer (från Olsson 2013).

I och med den föreliggande redovisningen har bakgrundsdatan till “Author’s measurements” i Larssons (1977) empiri klagjorts. Om vi återvänder till problemställningen (och föreliggande rapportens titel), dvs uppskattning av horisontella vilojordtryck i normal till svagt överkonsoliderad lera, föreligger det anledning att se över om empirin kan förfinas och uppdateras. Detta då empirin ej tycks avspegla  $K_0$  mätt i fält (blå punkter i Figur 7) väl (inte heller beakta eventuell inverkan av  $OCR$ ) och inte  $K_0^{nc}$  enligt definitionen i föreliggande rapport (mätdata från Sällfors 1975; Kullingsjö 2007; Olsson 2013 i Figur 8b ger  $K_0^{nc} \approx 0.5$ ).

Figur 9 illustrerar att en förnyad empiri behövs för att uppskatta  $K_0$  respektive  $K_0^{nc}$  i linje med datan från Sällfors (1975), Kullingsjö (2007) och Olsson (2013). Hypotesen är härmed att om  $K_0^{nc}$ , eller med fördel  $K_0^{OCR=1}$  ( $K_0$  i fält normaliserad mht  $OCR$ ), är given via ett empiriskt samband, kan ett samband av typen  $K_0 = K_0^{OCR=1} OCR^m$  (Schmidt 1966, Mayne och Kulhawy 1982) därefter nyttjas för att uppskatta  $K_0$ . Genom att nyttja Jakys (1948) formel som en vägledning vid upprättandet av de empiriska sambanden kan såväl  $\phi'$  (via någon typ av “ställföreträdande” indexparameter, så som t.ex.  $I_p$  eller  $w_L$ ) som  $OCR$  inkluderas som faktorer i den empiriska uppskattningen av  $K_0$ .

I avsnitt 4 ges förslag till uppdaterade empiriska samband för horisontella vilojordtryck i lera. Dessförinnan redogörs i avsnitt 3.2 för hur Larssons (1977) empiri har tillämpats i befintliga riktlinjer och regelverk samt hur dessa riskerar att överskatta de horisontella jordtrycken i fält.



Figur 9:  $K_0$  mätt i fält (blå cirklar) och  $\Delta K_0^{nc}$  (lila fyrkanter) mätt i laboratoriet (båda från Larsson 1975) samt  $K_0^{OCR=1}$  (orange symboler) beräknade från fältmätningarna. Därtill  $K_0^{nc}$  mätt i laboratoriet (Sällfors 1975; Kullingsjö 2007; Olsson 2013). Samtliga mot bakgrund av empirin från Larsson (1977).



### 3.2 Tillämpning av Larssons (1977) empiri i befintliga regelverk och riktlinjer

Nedan återges vad några riktlinjer och regelverk anger avseende uppskattning av horisontella vilojordtryck i lera.

- Handboken Bygg 1984: "...för en friktionsjord och  $K_0 = [0.31 + 0.71(w_L - 0.2)]OCR^{\sin(1.2\phi')}$  för en högplastisk lera."
- SGI Information 3 (Larsson et al. 2007): "Förhållandet mellan de effektiva och vertikala spänningarna vid normalkonsoliderad jord anges med jordtryckskoefficienten  $K_0^{nc}$ ." ... " $K_0^{nc}$  i svenska leror har funnits variera enligt relationen  $K_0^{nc} \approx 0.31 + 0.71(w_L - 0.2)$ " ... " $K_0 = K_0^{nc}OCR^{0.5 \text{ à } 0.6}$ ".
- SGF Rapport 2:2012 "Triaxialförsök - En vägledning" (SGF 2012): "...och för normalkonsoliderad lera:  $K_0^{nc} \approx [0.31 + 0.71(w_L - 0.2)]$ " ... "För överkonsoliderade leror ( $OCR = \sigma'_c/\sigma'_v$ ) kan följande samband användas:  $K_0 \approx K_0^{nc}OCR^{0.5 \text{ à } 0.6}$ ".
- TRVINFRA-00230 (Trafikverket 2023): "För normalkonsoliderad jord" ... "Lera  $K_0 = [0.31 + 0.71(w_L - 0.2)]$ " ... "För överkonsoliderad jord får  $K_0$  sättas till  $K_{0(NC)} \times OCR^{0.55}$ ".
- SGI Vägledning 8 "Utredning av släntstabilitet" (SGI 2023): "För att uppskatta storleken på  $K_{0(NC)}$  kan samband enligt ekvation 3-1 användas:  $K_{0(NC)} = 0.31 + 0.71(w_L - 0.2)$ " ... " $K_0 = K_{0(NC)} \times OCR^{0.5-0.6}$ " (ekvation 4-1).

Det kan noteras att riktlinjerna och regelverken tolkar och tillämpar Larssons empiri som gällande för normalkonsoliderad lera.

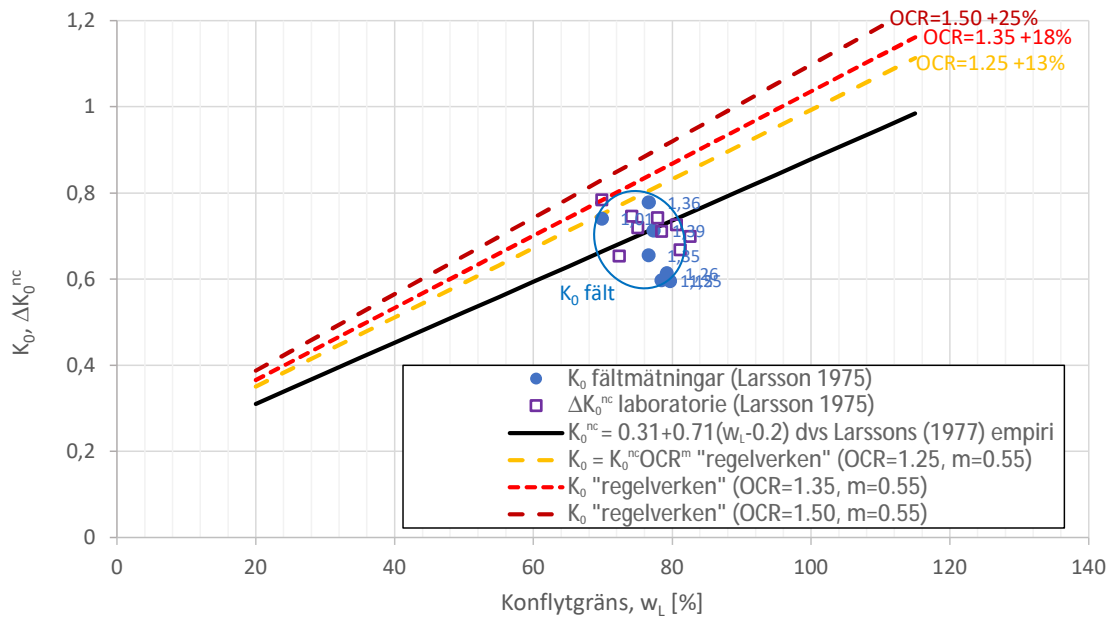
Vad gäller beskrivning av överkonsolideringsgrad kan och bör det skiljas på uttrycken "normalkonsoliderad" ( $OCR=1$ ), "normal till svagt" alternativt "normal till lätt" överkonsoliderad ( $OCR=1-1.5$  enligt Larsson 2008) och " normalt " överkonsoliderad, vilket förr användes av vissa geotekniker i Göteborgsregionen för att beteckna  $OCR$  kring 1.3 (personlig kommunikation Bengtsson & Sällfors 2024). Således är det sannolikt att geotekniker och konstruktörer i branschen riskerar att tolka Larssons empiri för " $K_0^{nc}$ " som giltig för  $OCR=1$  och därefter nyttja samband av typen  $K_0 = K_0^{nc}OCR^{0.5 \text{ à } 0.6}$  för att bestämma  $K_0$  och det horisontella vilojordtrycket in situ. Ett sådant förfarande riskerar att överskatta  $K_0$  mer eller mindre kraftigt. Detta illustreras i Figur 10 där fältmätningarna av  $K_0$  i Bäckebo jämförs med hur Larssons empiriska samband sannolikt tillämpas av en inte oanselig del geotekniker och konstruktörer i branschen mot bakgrund av regelverken och riktlinjerna.

#### 3.2.1 Innebörd av tolkningarna - exempel jordtryck mot geokonstruktion

Om Larssons empiriska samband (Ekvation 1) tolkas att gälla för  $OCR=1$  överskattas  $K_0$  mätt i fält (jämför t.ex. orange och röda linjer i Figur 10 med blå datapunkter). En sådan tolkning, vilken är trolig att merparten av geotekniker och konstruktörer i branschen gör utifrån de texter och ekvationer som finns i befintliga regelverk och riktlinjer, innebär att horisontella vilojordtryck mot permanenta konstruktioner riskerar att överskattas. Då  $OCR$  i praktiken inte sällan är  $>1.25$  ger detta att jordtrycken mot en konstruktion i många fall överskattas med minst 13 %.

#### 3.2.2 Innebörd av tolkningarna - exempel triaxialförsök

Från resultaten av passiva odränerade triaxialförsök finns indikationer på att riktlinjernas och regelverkens tolkningar av Larssons empiri överskattar horisontella (effektiva) vilojordtryck. Detta då passiva odränerade triaxialförsök, vilka konsoliderats för horisontella effektivspänningar uppskattade enligt riktlinjerna och regelverken, resulterat i värden



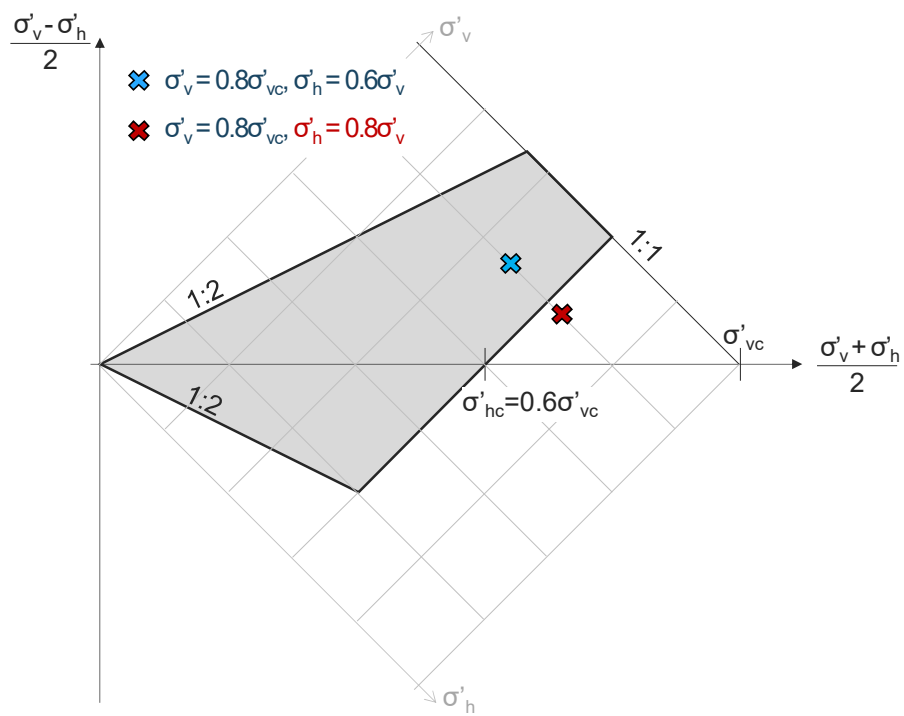
Figur 10:  $K_0$  mätt i fält (blå symboler inkl. antecknade  $OCR$  beräknade från Larsson 1975) samt  $\Delta K_0^{nc}$  (lila symboler), båda från (Larsson 1975), jämfört med Larssons (1977) empiriska samband (svart linje).

motsvarande eller högre än de som erhållits i direkta skjuvförsök. Ett exempel på detta (från provlokal Lilla Mellösa) återfinns senare i föreliggande rapport, avsnitt 4.3 Figur 22l.

I Figur 11 illustreras en förenklad flytyta (vilken avgränsar det gråmarkerade området) för en lera med  $c' = 0$  kPa,  $\phi' = 30^\circ$  och  $\sigma'_{hc}/\sigma'_{vc} = 0.6$  enligt ett konceptet presenterat av Larsson och Sällfors (1981). Leran antas ha ett  $OCR = 1.25$ . Vid utförande av anisotropt konsoliderade triaxialförsök behöver  $K_0$  uppskattas som indata för bestämning av den radiella effektiva konsolideringsspänningen. I Figur 11 illustreras spänningstillstånden för  $K_0 = 0.6$  och  $0.8$ . Som synes riskerar spänningstillståndet vid  $K_0 = 0.8$  att hamna utanför den förenklade flytytan. Dvs korrekt uppskattning av  $K_0$  som indata till konsolidering av triaxialförsök är av stor vikt. Felaktig uppskattning av  $K_0$  innebär en risk för ett spänningstillstånd utanför den förenklade flytytan, dvs att konsolideringsfasen ger nedbrytning av lerans struktur och påverkan på flytytan, vilket i sin tur påverkar effektivspänningsvägen i skjuvfasen, resulterande  $c_u$  samt graden av hållfasthetsanisotropi, t.ex. kvoten  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv}$ .

Det kan spekuleras i, att om  $K_0$  överskattas kan flytytan möjligen expandera under konsolideringsfasen av försöket. Därmed kan tänkas att främst den passiva odränerade skjuvhållfastheten påverkas. Den aktiva skjuvhållfastheten bedöms inte bli lika påverkad då det, enligt den förenklade flytytemodellen, gäller att för en normal till svagt överkonsoliderad lera är  $c_{u,aktiv} = \sigma'_{vc}/3$  medan  $c_{u,passiv} = K_0 \sigma'_{vc}/3$ .

$K_0 = 0.6$  ger således förväntad  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc} = 0.198$  medan motsvarande kvot vid  $K_0 = 0.8$  är  $0.264$ . Notera att en kvot på  $0.26$  överstiger kvoten för  $c_{u,direkt}/\sigma'_{vc}$  i de fall när  $w_L < 65\%$  (jmf figur B7 i Larsson et al. 2007). Att  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  överstiger  $c_{u,direkt}/\sigma'_{vc}$  i provlokal Lilla Mellösa (Figur 22l) kan förklaras av ovanstående resonemang då  $K_0$  vid konsolideringen av de passiva triaxialförsöken där var  $0.81$ – $0.85$  (Larsson 1977).



Figur 11: Illustration avseende påverkan av  $K_0$  på spänningstillståndet i anisotropt konsoliderat triaxialförsök i förhållande till en förenklad flytyta (avgränsar det gråmarkerade området).

## 4 Förslag till uppdaterade empiriska samband för horisontella vilojordtryck

I avsnitt 3.1 utreds bakgrunden till den befintliga empirin (Larsson 1977). I avsnitt 3.2 redovisas att befintliga riktlinjer och regelverk tolkar och beskriver en tillämpning av den befintliga empirin på så sätt att horisontella vilojordtryck troligtvis överskattas i många projekt (vilket leder till överskattade horisontella jordtryck i design av geokonstruktioner och i indata till triaxialförsök, vilket i sin tur leder till missvisande icke-konservativ skjuvhållfasthet samt påverkad grad av skjuvhållfasthetsanisotropi).

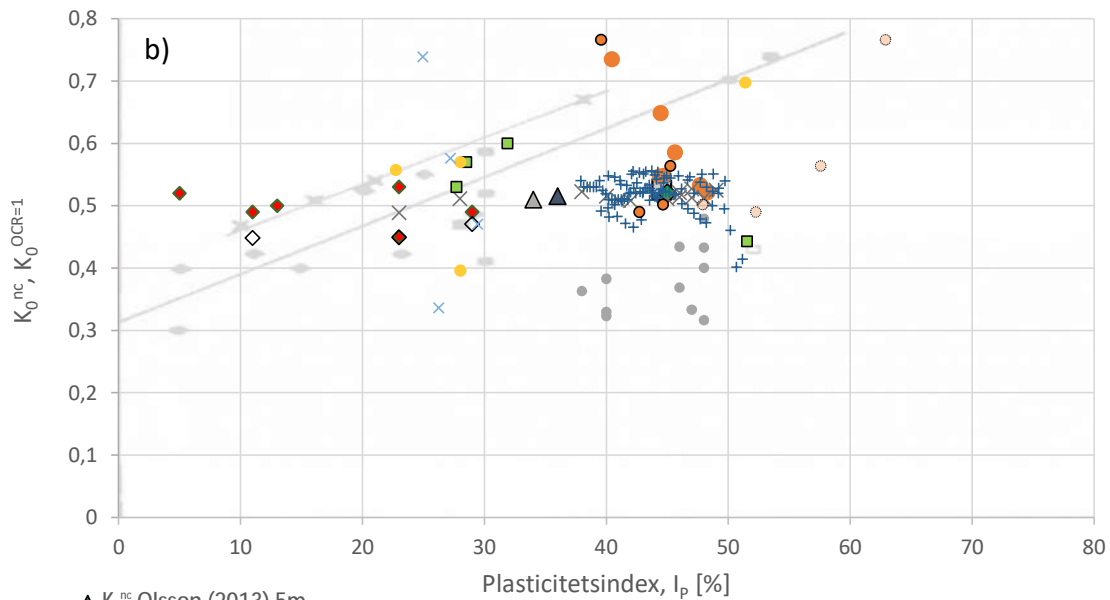
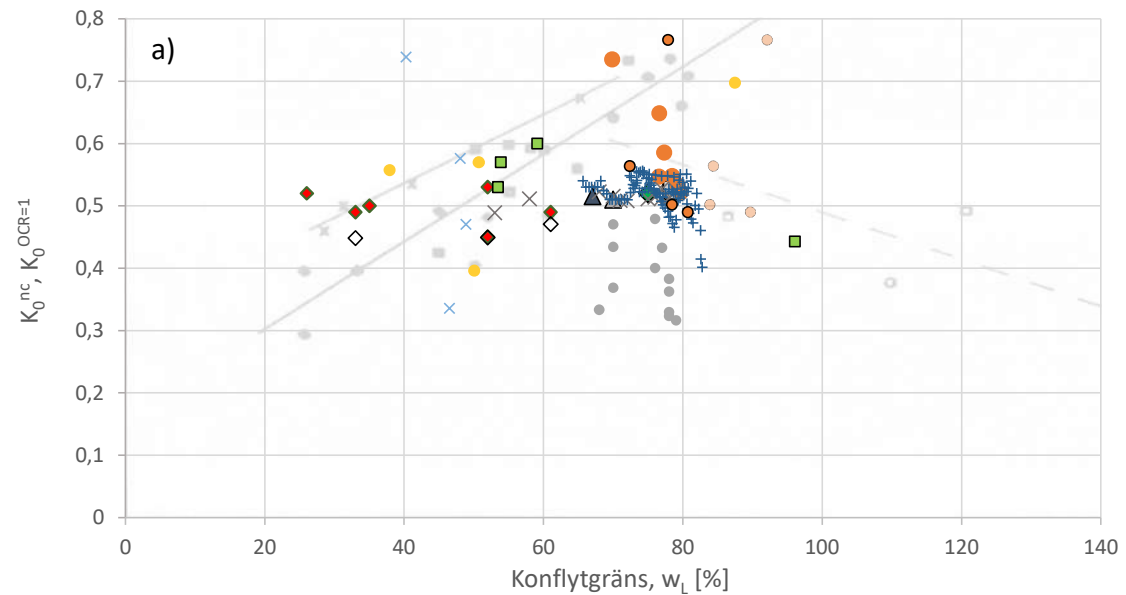
I detta avsnitt ges förslag till uppdaterade empiriska samband för jordtryckskoefficienterna  $K_0^{\text{OCR}=1}$  och  $K_0$ . För definitioner avseende jordtryckskoefficienterna, se avsnitt 2.1.

### 4.1 Jordtryckskoefficienten $K_0^{\text{OCR}=1}$

I Figur 12 har ett antal mätningar av  $K_0^{\text{nc}}$  i laboratorieförsök samt  $K_0^{\text{OCR}=1}$  beräknade från fältmätningar sammanställts mot  $I_P$  och  $w_L$ . Här bör det påpekas att i  $K_0^{\text{nc}}$  från laboratorieförsök har lerans struktur uttraderats, då värdena avser  $\sigma'_h/\sigma'_{vc}$  vid "primary loading", dvs vid stora töjningar ( $\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vc}} > \text{ca } 2$ , jmf Figur 8b). Detsamma gäller inte för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  vilka beräknats från fältmätningar och i egentlig mening endast är ett sätt att normalisera  $K_0$  med avseende på OCR. Det skall också påpekas att i Massarsch et al. (1975) ges ej om de redovisade värdena på flytgränsen avser konflytgräns eller stötflytgräns. En jämförelse mot konflytgränser och stötflytgränser bestämda i Bäckebol (Sällfors 1975), ger att flytgränserna för Bäckebol i Massarsch et al. (1975) troligtvis är stötflytgränser. Datan i Sällfors (1975) och i Larsson (1977) indikerar att stötflytgränsen är 1.0 à 1.1 × konflytgränsen. Således har därför datan från Bäckebol i Massarsch et al. (1975) även redovisats mot värden på konflytgränsen från Sällfors (1975).

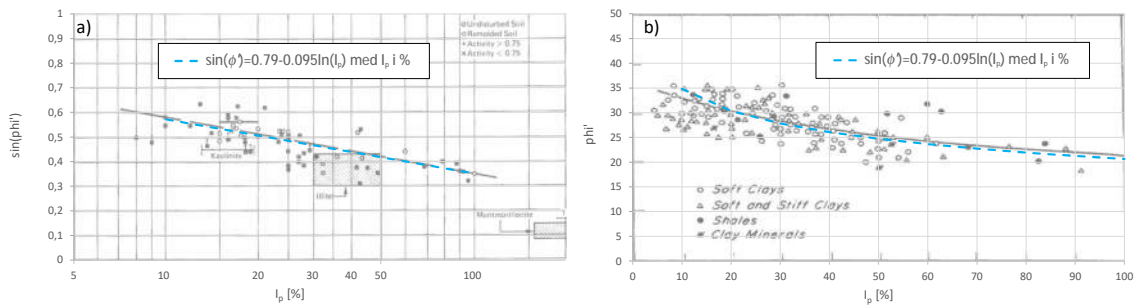
Figur 12 ger en vägledning till hur ett empiriskt samband för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  mot indexparametrar skulle kunna te sig. Ytterligare vägledning kan fås via Jakys (1948) samband  $K_0^{\text{nc}} = 1 - \sin\phi'$  kombinerat med empiriska samband för friktionsvinkel  $\phi'$  som en funktion av indexparametrar. I Figur 13 ges ett exempel på ett empiriskt samband för  $\phi'$  mot bakgrund av två referenser.

Samband för  $\phi'$  som en funktion av  $w_L$  har inte hittats i litteraturen (sannolikt eftersom plasticitetsindex  $I_P = w_L - w_P$ , där  $w_P$  är plasticitetsgränsen, internationellt sett är en vanligare nyttjad indexparameter för empiriska samband jämfört enbart  $w_L$ ). För att kringgå detta har  $I_P$  sammanställts mot  $w_L$ , se Figur 14, vilket ger sambandet  $I_P = 0.85(w_L - 20)$ . Detta stämmer relativt väl med en liknande sammanställning utförd av Burland (1990) för leror med stor variation på  $w_L$  och  $w_P$ . Via sambandet mellan  $I_P$  och  $w_L$  kan ett empiriskt samband för  $\phi'$  som en funktion av  $w_L$  tecknas, se Figur 15. **Det skall påpekas att detta samband endast bör nyttjas för att få en vägledning för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  som en funktion av  $w_L$ , dvs inte som indata till t.ex. stabilitetsberäkningar.**

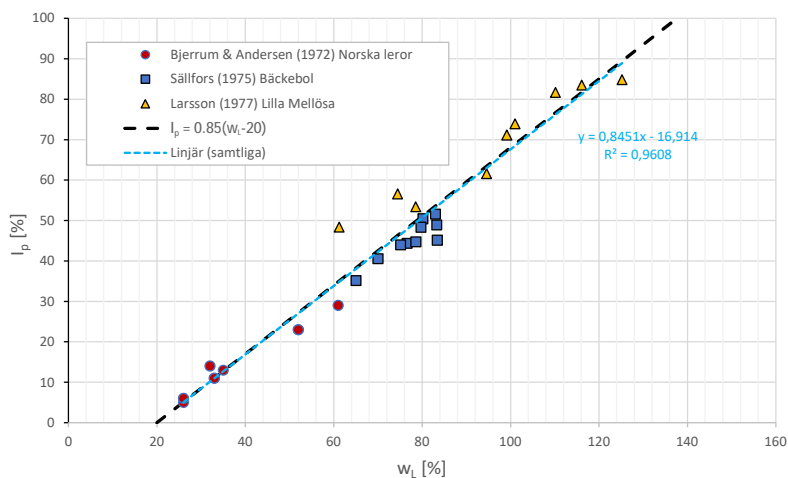


- ▲  $K_0^{nc}$  Olsson (2013) 5m
- ▲  $K_0^{nc}$  Olsson (2013) 15m
- $K_0^{nc}$  Sällfors (1975) 7m
- ◆  $K_0^{nc}$  Kullingsjö (2007) 8m ( $w_p=30\%$  antagen för ber. av  $I_p$ )
- ◆ Bjerrum & Andresen (1972)  $K_0^{nc}$  lab.
- Larsson (1975)  $K_0^{OCR=1} = K_0$  fältmätningar /  $OCR_{trend, Larsson1975}^{0.6}$
- ◇ Bjerrum & Andresen (1972)  $K_0^{OCR=1} = K_0$  fältmätningar /  $OCR^{0.6}$
- × Rankka (1994) Hede  $K_0^{OCR=1} = K_{0,dilatometer} / OCR^{0.6}$  ( $w_p=30\%$  antagen för ber. av  $I_p$ )
- Rankka (1994) Hede  $K_0^{OCR=1} = K_{0,jordtrykscell} / OCR^{0.6}$  ( $w_p=30\%$  antagen för ber. av  $I_p$ )
- + Larsson & Eskilsson (1989) Bäckebo  $K_0^{OCR=1} = K_{0,dilatometer} / OCR^{0.6}$
- Massarsch et al. (1975) Skå-Edeby  $K_0^{OCR=1} = K_{0,Glötzl} / OCR^{0.6}$
- Massarsch et al. (1975) Järva krog  $K_0^{OCR=1} = K_{0,Glötzl} / OCR^{0.6}$
- × Massarsch et al. (1975) Ursvik  $K_0^{OCR=1} = K_{0,Glötzl} / OCR^{0.6}$
- Massarsch et al. (1975) Bäckebo  $K_0^{OCR=1} = K_{0,Glötzl} / OCR^{0.6}$
- Massarsch et al. (1975) Bäckebo  $K_0^{OCR=1} = K_{0,Glötzl} / OCR^{0.6}$  med konflytgräns "nyttjad" och  $w_p$  enl. Fig. 6

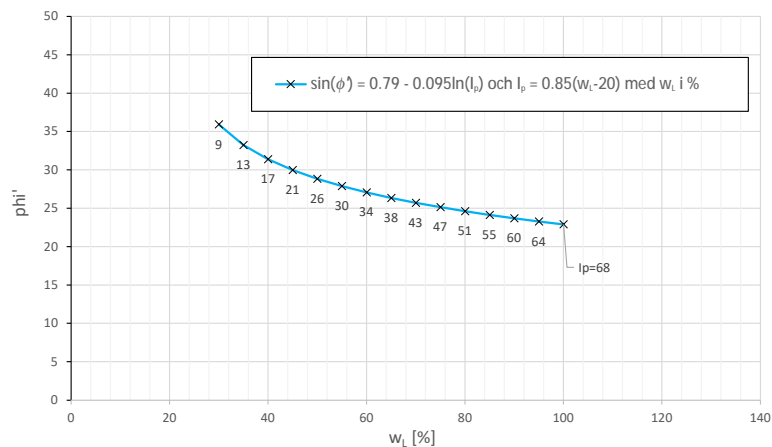
Figur 12: Data för  $K_0^{nc}$  och  $K_0^{OCR=1}$  mot bakgrund av Larssons (1977) empiriska samband: (a) sammanställt mot  $w_L$ . (b) sammanställt mot  $I_p$ . Data från Bjerrum och Andersen (1972), Larsson (1975), Massarsch et al. (1975), Sällfors (1975), Larsson och Eskilsson (1989), Rankka (1994), Kullingsjö (2007) och Olsson (2013).



Figur 13: Empiriska data för  $\phi'$  som en funktion av  $I_p$ . Ett samband (blå linje) har inritats i ett försök att efterlikna trendlinjerna i de båda referenserna: (a)  $\sin \phi'$  mot bakgrund från Mitchell (1976) där datan är från Kenney (1959). (b)  $\phi'$  mot bakgrundsdata från Terzaghi et al. 1996.

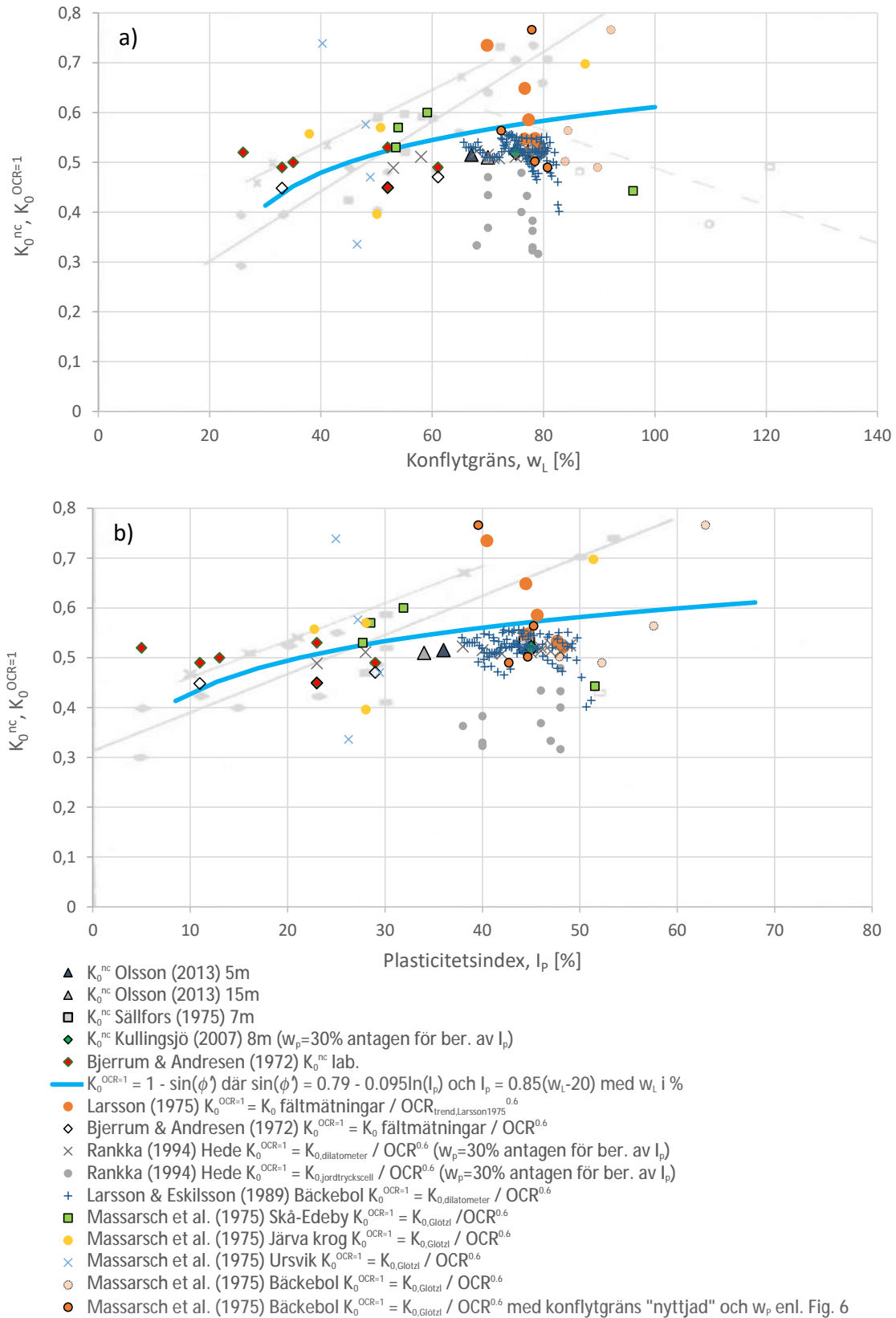


Figur 14: Empiriskt samband för  $I_p$  som en funktion av  $w_L$ . Data från Bjerrum och Andersen (1972), Sällfors (1975) och Larsson (1977).



Figur 15: Empiriskt samband för  $\phi'$  som en funktion av  $w_L$ . Detta grundas på samband (blå linje) i Figur 13 och sambandet  $I_p = 0.85(w_L - 20)$  i Figur 14.

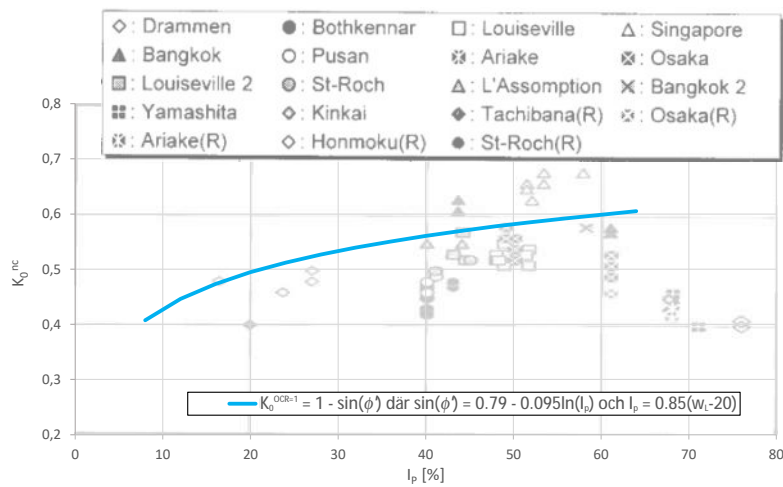
Genom de empiriska sambanden för  $\phi'$  som en funktion av  $I_P$  respektive  $w_L$  kan en vägledning erhållas för empiriska samband för  $K_0^{\text{OCR}=1}$ . Dessa redovisas i Figur 16. I diagrammen redovisas även mätningar av  $K_0^{\text{nc}}$  i laboratorieförsök samt  $K_0^{\text{OCR}=1}$  beräknade från fältmätningar. De empiriska sambanden för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  tycks ge en acceptabel återspeglning med hänsyn till dels  $K_0^{\text{nc}}$  bestämd i laboratorieförsök och dels  $K_0^{\text{OCR}=1}$  beräknad (normaliserad till  $OCR = 1$ ) från fältmätningar. Det bedöms dock vara viktigast att ett empiriskt samband i huvudsak kan återspegla  $K_0^{\text{OCR}=1}$  beräknade från fältmätningar, detta då dessa värden avser ett tillstånd då lerans struktur bedöms vara intakt (gäller möjligtvis inte för dilatometerförsök men sannolikt för jordtrycksceller vilka varit installerade en viss tid innan avläsning sker).



Figur 16: Förslag till empiriska samband (blå linjer) för  $K_0^{OCR=1}$  (indata till beräkning av  $K_0$  i fall där  $OCR > 1$ ) som en funktion av: (a)  $I_p$  och (b)  $w_L$ . De empiriska sambanden är beräknade med Jakys (1948) formel och samband för  $\phi'$ ,  $I_p$  och  $w_L$  vilka redovisats i Figur 13, 14 och 15.



I Figur 17 jämförs det i Figur 16b föreslagna empiriska sambandet för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  mot bakgrund av en sammanställning av värden på  $K_0^{\text{nc}}$  från Watabe et al. (2003). Det i denna rapport föreslagna empiriska sambandet för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  är i överkant av bakgrundsdatan (endast laboratorieförsök). Dock skall det beaktas, att då det föreslagna empiriska sambandet för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  i förlängningen skall användas för att uppskatta  $K_0$  (detta förfarande beskrivs i nästa avsnitt, 4.2) bör det återspegla ett tillstånd med en intakt struktur – vilken är delvis eller helt uttraderad i  $K_0^{\text{nc}}$ -värden bestämda i laboratoriet vid “primary loading” och stora töjningar. Dvs, den blå linjen bör ligga i överkant av värdena i sammanställningen av Watabe et al. Här bör också noteras att Watabe et al. inte hade någon uppenbar förklaring till de avtagande värdena på  $K_0^{\text{nc}}$  vid  $I_p > 60\%$ .



Figur 17: Jämförelse av det i denna rapport föreslagna empiriska sambandet för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  (enligt Figur 16) mot bakgrund av en sammanställning av värden på  $K_0^{\text{nc}}$  bestämda i laboratorieförsök (Watabe et al. 2003).

## 4.2 Vilojordtryckskoefficienten $K_0$

I detta avsnitt kombineras de i avsnitt 4.1 föreslagna empiriska sambanden för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  med ett samband av typen  $K_0 = K_0^{\text{OCR}=1} \text{OCR}^m$  för att erhålla empiriska värden på  $K_0$ . De empiriska värdena på  $K_0$  jämförs mot fältmätningar. I avsnitt 4.3 jämförs de empiriskt uppskattade värdena på  $K_0$  mot empirin avseende graden av odränerad skjuvhållfasthetsanisotropi.

Att  $K_0$  ökar med ökande  $\text{OCR}$  pga avlastning visades av Brooker och Ireland (1965). Mesri och Castro (1987) diskuterade att effekten av ökande  $\text{OCR}$  pga "åldring" skulle påverka  $K_0$  på samma sätt som vid avlastning. Att  $K_0$  ökar pga "åldring" i samband med krypning diskuterades även av Schmertmann (1983) och fastslogs av Schmertmann (2012). För en utförligare beskrivning se t.ex. Tornborg (2024), där det även visas att ett samband av typen  $K_0 = K_0^{\text{OCR}=1} \text{OCR}^m$  kan nyttjas för att uppskatta  $K_0$  i ett naturligt åldrat lerlager.

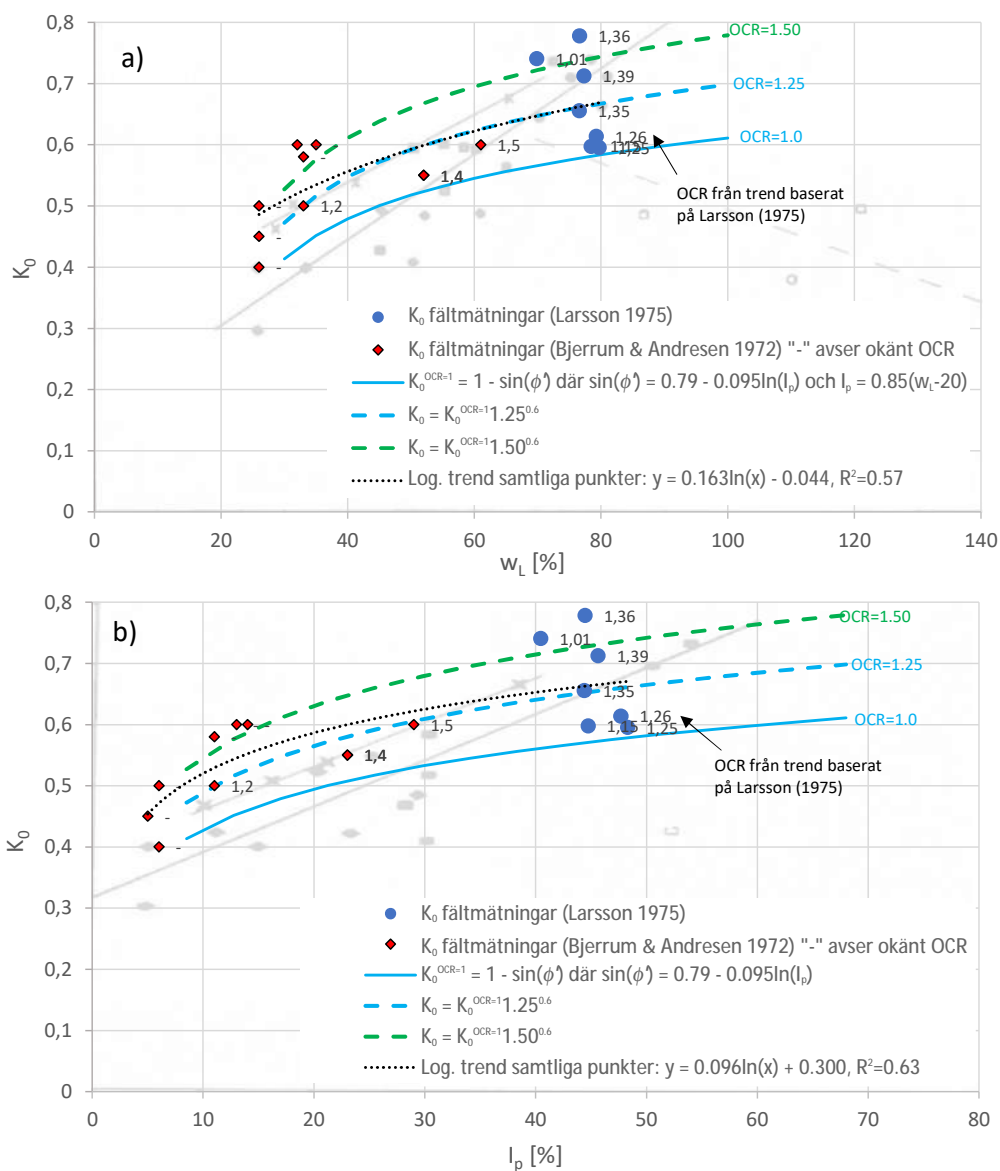
Vad gäller exponenten  $m$  beskrivs även denna i Tornborg (2024). Kortfattat har denna, liksom  $K_0^{\text{nc}}$ , funnits bero på  $\phi'$  t.ex.  $m = \sin(1.2\phi')$  (Schmidt 1966) och  $m = \sin\phi'$  (Mayne och Kulhawy 1982). För Göteborgslera ( $w_L \approx 70\%$ ) fann Kullingsjö (2007) att  $m = 0.6$  vilket även stämde väl överens vid utvärdering av spänningsvägar och  $K_0$  baserat på fältmätningar i en schakt och under en konstruktion i Göteborg (Tornborg et al. 2024). I det följande ansätts  $m = 0.6$  oberoende av värde på  $I_P$  eller  $w_L$ .

I Figur 18 redovisas en jämförelse av  $K_0$  (uppskattat med de empiriska sambanden för  $K_0^{\text{OCR}=1}$ , enligt blå linjer i Figur 16, och  $K_0 = K_0^{\text{OCR}=1} \text{OCR}^{0.6}$ ) med data från fältmätningar. Dessa jämförelser visar på god överensstämmelse mellan fältmätningarna av  $K_0$  vid varierande  $I_P$ ,  $w_L$  och  $\text{OCR}$ . Notera att  $\text{OCR}$  för respektive datapunkt i Figur 18 bygger på stegvisa ödometerförsök. Sällfors (1975) föreslog en metod för utvärdering av CRS-försök för att matcha resultaten från stegvis ödometer. Dock byggde Sällfors (1975) data på prover ned till ca 15 m djup under markytan, varför Sällfors (2022) rekommenderar justering av resultaten från CRS-försök om  $\sigma'_c > 100$  kPa. Rekommendationer med hänsyn till detta ges i avsnitt 6.

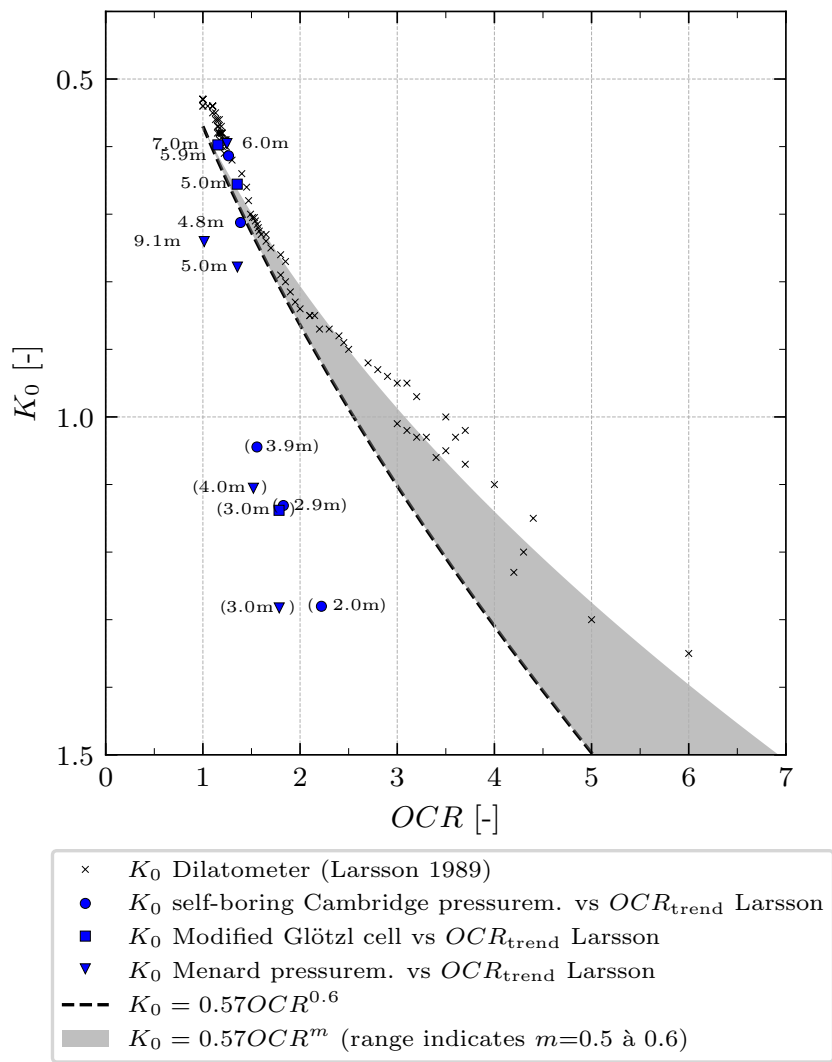
Trendlinjen för samtliga fältmätningar i Figur 18 är till utseendet mycket lik trenden för den härmed föreslagna empirin. Den härmed föreslagna empirin för  $K_0^{\text{OCR}=1}$  och  $K_0$  bygger på Jakys formel (Jaky 1948) och empiri för  $\phi'$  kopplad mot  $I_P$ . Fördelen med det här beskrivna förfarandet för uppskattning av  $K_0$  är därmed att såväl  $\phi'$  (via de "ställföreträdande" indexparametrarna  $I_P$  alternativt  $w_L$ ) samt  $\text{OCR}$  beaktas i uppskattningen av  $K_0$ . Detta förfarande innebär därmed ett förtydligande och en vidareutveckling av den empiri vilken Larsson (1977) lade grunden till.

Som ses i Figur 18 avviker de föreslagna empiriska trendlinjerna för  $K_0$  vid olika  $\text{OCR}$  mer eller mindre från Larssons (1977) empiriska samband. Larssons (1977) empiriska samband återspeglade exakt det empiriska sambandet för kvoten mellan passiv och aktiv odränerad skjuvhållfasthet, dvs graden av skjuvhållfasthetsanisotropi, som en funktion av  $w_L$  (dvs kvoten mellan faktorerna "a" för passiv och aktiv skjuvning enligt Larsson et al. 2007). De i föreliggande rapport föreslagna empiriska trendlinjerna avviker däremot i detta avseende. Därmed krävs en jämförelse av den i föreliggande rapport föreslagna empirin för  $K_0$ , mot empirin avseende uppskattning av graden av odränerad skjuvhållfasthetsanisotropi. En sådan jämförelse redovisas i avsnitt 4.3.

I Figur 19 redovisas en jämförelse av fältmätningar av  $K_0$  med dilatometer med det i denna rapport föreslagna empiriska sambandet för uppskattning av  $K_0$  för två värden på exponenten  $m$ . Fältmätningarna utfördes av Larsson och Eskilsson (1989) i Bäckebo med konflytgräns 70 à 80%. Detta ger att  $K_0^{\text{OCR}=1}$  uppskattas till 0.56 à 0.58 baserat på de föreslagna empiriska sambanden (Figur 16) vilket är startvärdet vid  $\text{OCR} = 1$ . Detta resulterar i att  $K_0 = K_0^{\text{OCR}=1} \text{OCR}^{0.6}$  överskattar  $K_0$  något jämfört med dilatometermätningarna, men för  $\text{OCR} < 2$  anses överensstämmelsen med övriga fältmätningar och dilatometermätningarna vara acceptabel.



Figur 18: Jämförelse av  $K_0$  uppskattat med empiriska samband för  $K_0^{OCR=1}$ , enligt Figur 16, och  $K_0 = K_0^{OCR=1} OCR^m$  med  $m = 0.6$  mot data från fältmätningar av  $K_0$  (Bjerrum och Andersen 1972; Larsson 1975). Skuggad bakgrund avser empiriska samband från Larsson (1977).



Figur 19: Jämförelse av  $K_0$  uppskattat med empiriska samband för  $K_0^{OCR=1}$ , enligt Figur 16, och  $K_0 = K_0^{OCR=1}OCR^m$  med  $m = 0.6$  mot data från dilatometermätningar (Larsson och Eskilsson 1989).

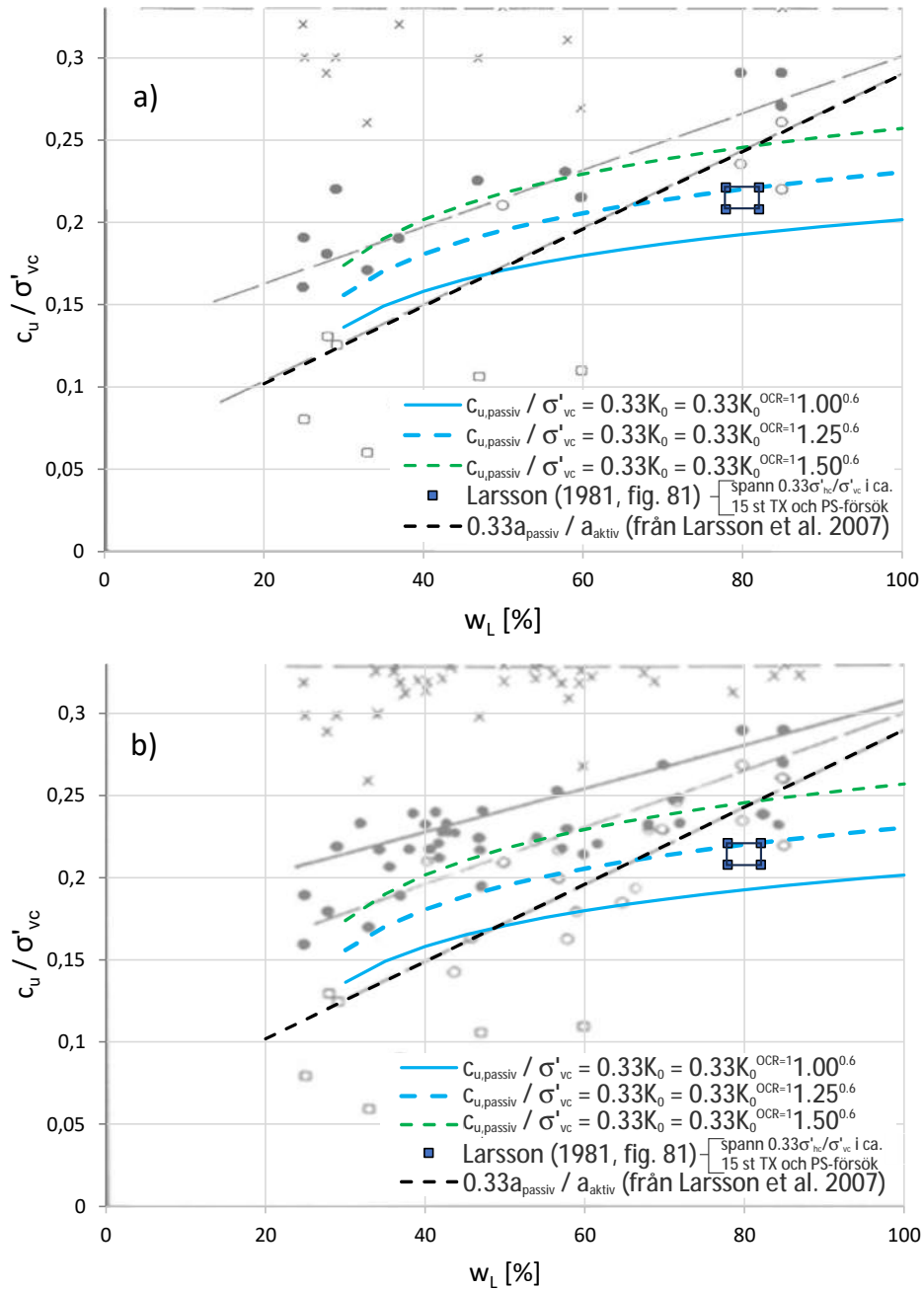
### 4.3 Jämförelse av sambandet för $K_0$ mot empirin avseende uppskattning av anisotrop odränerad skjuvhållfasthet

I detta avsnitt redovisas en jämförelse av den i föreliggande rapport uppdaterade empirin för  $K_0$  mot empirin avseende graden av odränerad skjuvhållfasthetsanisotropi. Notera att  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv} = (c_{u,passiv}/\sigma'_{vc})/(c_{u,aktiv}/\sigma'_{vc}) = K_0$  enligt den förenklade flytytemodellen (beskriven i avsnitt 2.3). Dvs enligt flytytemodellen kan empirin för normal till svagt överkonsoliderad lera avseende  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  jämföras med  $0.33K_0$ . Jämförelsen skall dock göras med viss försiktighet t.ex. då utvärdering av  $c_u$  från konventionella passiva triaxialförsök (minskad axialspänning) är behäftade med osäkerheter relaterade till t.ex. relativt stora töjningar till brott, "necking" och korrektionsmodell för provets areaförändring.

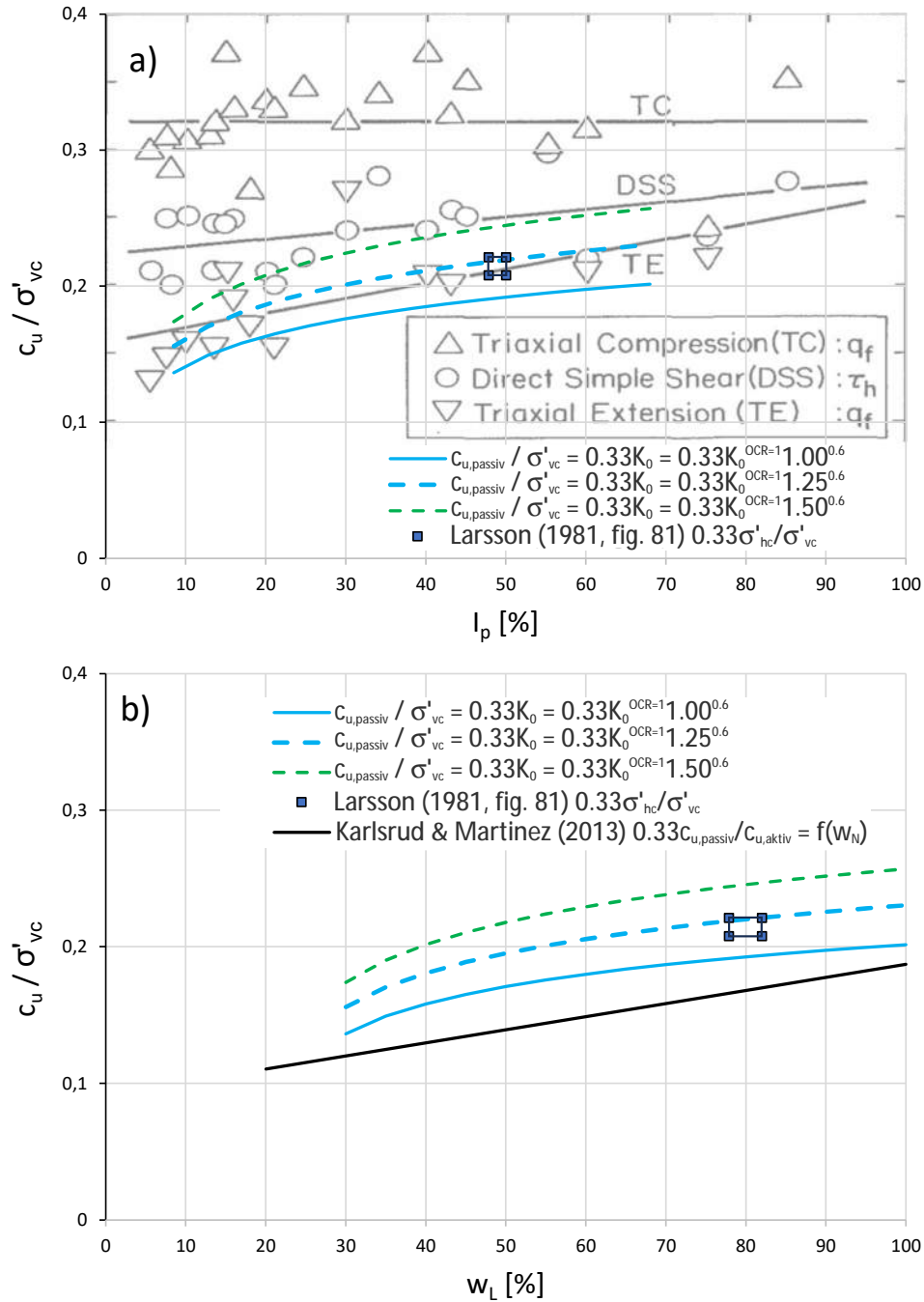
I Larsson et al. (2007, figur B7) återfinns ett diagram vilket ligger till grund för dagens empiri och branschpraxis avseende graden av anisotropi för odränerad skjuvhållfasthet i "normalkonsoliderade och svagt överkonsoliderade" leror. Ett motsvarande diagram i Larsson (1980) bedöms vara en tidig form av datan i Larsson et al. (2007).

I Figur 20 jämförs den i föreliggande rapport uppdaterade empirin för  $K_0$  med empirin för  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  enligt Larsson (1980) och Larsson et al. (2007). Figur 20 har även kompletterats med data från Larsson (1981) där ca 15 st dränerade triaxial- och s.k. plane strain försök indikerade en kvot  $\sigma'_{hc}/\sigma'_{vc} = 0.63$  à  $0.67$ . Det bör dock noteras att flytytan troligtvis expanderar och roterar under tiden då dränerade triaxialförsök utförs och kvoten  $\sigma'_{hc}/\sigma'_{vc}$  från sådana försök överskattar därmed sannolikt  $K_0$  in situ mer eller mindre.

I Figur 21 görs liknande jämförelser mot bakgrund av data från Ladd (1991) och Karlsrud och Hernandez-Martinez (2013). Notera dock att den senare referensen angav kvoten  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv}$  som en funktion av  $w_N$  vilket direkt använts som redovisning mot  $w_L$  i Figur 21. Som synes stödjer datan från Ladd (1991) och Karlsrud och Hernandez-Martinez (2013) att  $K_0$  (ekvivalent med kvoten  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv}$  i flytytemodellen) bör ha ett flackare utseende jämfört med empirin i Larsson et al. (2007). Dvs kvoten  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv}$  närmar sig inte 1 vid  $w_L=110\%$ . Att den inte skall närma sig 1 bedöms vara logiskt eftersom det skulle innebära  $K_0 = 1$  dvs ett isotropt material. Resonemanget stöds av försöksdata i Larsson (1990, fig. 60) på organisk lera och gyttja där  $c_{u,passiv}/c_{u,aktiv}$  går mot 0.84 om  $w_L > 300\%$ . Extrapoleras det nu föreslagna sambandet för  $K_0$  då  $OCR = 1.3$  erhålls  $K_0 = 0.85$  vid  $w_L = 300\%$  dvs i linje med Larsson (1990). Den här föreslagna uppdaterade empirin för  $K_0$  resulterar även i ett utseende på kvoten  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  redovisad mot  $I_P$  som är likt den motsvarande trendlinjen i Ladd (1991) och med ett fåtal undantag väl täcker in de enskilt redovisade passiva försöken (se Figur 21a).



Figur 20: Jämförelse av den i föreliggande rapport föreslagna empirin för  $K_0$  vid  $OCR$  1–1.5 med empirin för  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  för normal till svagt överkonsoliderade leror enligt: (a) Larsson (1980) och (b) Larsson et al. (2007). Båda delfigurerna kompletterade med data från Larsson (1981).



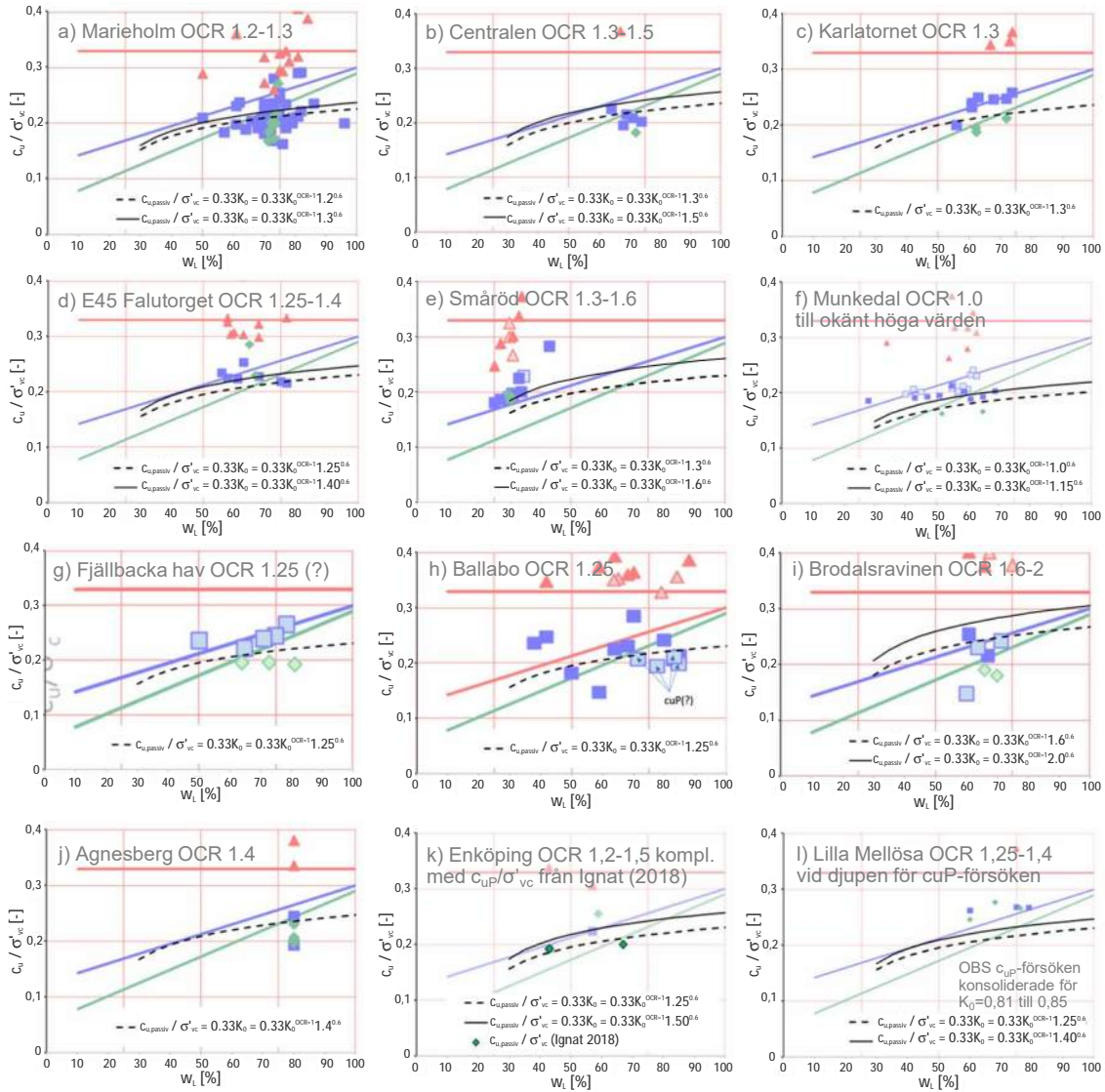
Figur 21: Jämförelse av den i föreliggande rapport föreslagna empirin för  $K_0$  vid  $OCR$  1–1.5 med empirin för  $c_{u,passiv} / \sigma'_{vc}$  enligt: (a) Ladd (1991) och (b) Karlsruhe och Hernandez-Martinez (2013). Båda delfigurerna kompletterade med data från Larsson (1981).

Sedan Larsson et al. (2007) har ett stort antal fallstudier, där såväl aktiva och passiva odränerade triaxialförsök som direkta skjuvförsök utförts, sammanställts av Sällfors och Larsson (2016). Detta möjliggör att det empiriska sambandet för skjuvhållfasthetsanisotropi i Larsson et al. (2007) kan jämföras (utvärderas) mot den i föreliggande rapport uppdaterade empirin för  $K_0$ . Denna jämförelse redovisas i Figur 22. Som synes föreligger inget som uppenbart motsäger att den föreslagna uppdaterade empirin för  $K_0$  skulle vara olämplig att nyttja för att förutse  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  jämfört med det empiriska sambandet för denna kvot i Larsson et al. (2007). Denna slutsats baseras på att  $0.33K_0$  för fall med  $OCR \leq 1.5$  inte avviker stort från försöksdatan avseende  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  i Sällfors och Larsson (2016). Snarare kan den föreslagna uppdaterade empirin för  $K_0$  förklara en del av avvikelserna från empirin enligt Larsson et al. (2007).

Ett undantag från den generella överensstämmelsen i Figur 22 utgörs av fallet Lilla Mellösa i delfigur 1). För Lilla Mellösa misstänks härmed avvikelserna från empirin ha orsakats av att alltför höga  $K_0$  användes för indata till konsolideringsspanningarna i triaxialförsöken. Detta då de uppmätta kvoterna  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  är kring 0.25 och delvis överstiger (!) de uppmätta kvoterna för  $c_{u,direkt}/\sigma'_{vc}$ . Kvoter på  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  kring 0.25 kan ha uppkommit om  $K_0$  i storleksordningen 0.8 ansatts som indata till konsolideringsspanningarna (detta har beskrivits i avsnitt 3.2.2). En närmare studie av datan från Lilla Mellösa (återfinns i Larsson 1977, tabell 1) bekräftar att så är fallet,  $K_0$  i konsolideringsfasen har vid detaljstudier nu funnits vara 0.81–0.85 för de redovisade passiva försöken vilket ger en förväntad kvot på  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  i storleksordningen  $0.33 \times 0.81 = 0.27$  till  $0.33 \times 0.85 = 0.28$  vilket kan förklara avvikelserna från empirin.

Referens till datan för Enköping (delfigur 22k) ges ej i Sällfors och Larsson (2016), men en nu utförd studie ger att datan tycks komma från Ignat (2018). En möjlig förklaring till att bakgrundspunkten för  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  i Figur 22k ligger på  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc} = 0.26$ , är att detta värde möjligen har tagits från Ignats (2018) sammanställning av  $c_{u,passiv}/\sigma'_{v0}$ . Om så är fallet, är den gröna bakgrundspunkten i Figur 22k felaktig. Därför har delfigur Figur 22k kompletterats med en nu utförd utvärdering av  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  från Ignat (2018). Dessa punkter stämmer väl överens med förväntansbilden enligt den föreslagna uppdaterade empirin för  $K_0$ .





Figur 22: Jämförelse av den i föreliggande rapport uppdaterade empirin för  $K_0$  mot bakgrund av försöksdata sammanställt som  $c_u/\sigma'_{vc}$  för ett antal fallstudier redovisade i Sällfors och Larsson (2016). Av intresse är jämförelsen  $0.33K_0$  (svarta linjer) med  $c_{u,passiv}/\sigma'_{vc}$  (gröna datapunkter i bakgrundsdatan). Delfigur k) har kompletterats med en utförd utvärdering av data i Ignat (2018).

## 5 Slutsatser

Syftet med detta projekt var att utreda och beskriva bakgrunden till befintlig empiri (Larsson 1977) avseende horisontella viljordtryck i normal till svagt överkonsoliderad lera, samt att upprätta förslag till uppdaterade och väl definierade empiriska samband.

En litteraturstudie och sammanställning av tidigare mätningar av horisontella jordtryck mot diverse indexparametrar och överkonsolideringsgrad för olika leror utfördes inledningsvis. Detta möjliggjorde att fastställa och beskriva bakgrunden inklusive vilken data som låg till grund för den befintliga svenska empirin (Larsson 1977) för horisontella viljordtryck i lera.

Med kännedomen om bakgrunden till den befintliga empirin konstaterades att om Larssons empiriska samband (Ekvation 1) tolkas och tillämpas att gälla för  $OCR=1$ , riskerar  $K_0$  att överskattas. Dagens regelverk och riktlinjer bidrar dessvärre till att risken för en sådan tolkning, och därmed överskattning av horisontella viljordtryck, är högst trolig i branschen. I rapporten beskrivs att de horisontella viljordtrycken mot en konstruktion i många fall överskattas med minst 10 à 15 % om Larssons (1977) empiri tolkas och tillämpas att gälla för  $OCR=1$ . Överskattningen av de horisontella viljordtrycken påverkar även laboratorieförsök (t.ex. triaxialförsök) på så sätt att icke-konservativa värden på skjuvhållfastheten riskerar att erhållas.

Förslag till uppdaterade empiriska samband för uppskattning av horisontella viljordtryck i lera gavs i avsnitt 4. Detta möjliggör att sambandet  $K_0 = K_0^{OCR=1} OCR^{0.6}$  kan nyttjas för att uppskatta  $K_0$  och horisontella viljordtryck med beaktande av lerans överkonsolideringsgrad och plasticitetsindex alternativt konflytgräns. Förfarandet beskrivs i avsnitt 6 *Rekommendationer*.

De uppdaterade empiriska sambanden för uppskattning av horisontella viljordtryck i lera kan direkt användas som underlag för implementering i praktiken. Detta bidrar till harmonisering i branschen och undanröjer bland annat fördyrande överskattningar av viljordtryck mot konstruktioner samt minskar risken för felaktig indata till laboratorieförsök och bestämning av skjuvhållfasthet.

## 6 Rekommendationer

Baserat på projektresultaten ges följande rekommendationer:

- Följande tillvägagångsätt rekommenderas för uppskattning av horisontella viljordtryck (den horisontella effektivspänningen in situ) i normal till svagt överkonsoliderad lera via de uppdaterade empiriska samband som lämnats i föreliggande rapport:

- (i) Bestäm  $K_0^{OCR=1}$  utifrån de blå trendlinjerna i Figur 16. Trendlinjerna ges som en funktion av  $I_P$  och  $w_L$  och kan uttryckas genom sambandet:

$$K_0^{OCR=1} = 1 - [0.79 - 0.095 \ln(I_P)] \quad (2)$$

...där plasticitetsindex  $I_P$  anges i procent.  $I_P$  kan ersättas med konflytgränsen  $w_L$  genom sambandet  $I_P = 0.85(w_L - 20)$  där  $w_L$  anges i procent. I första hand rekommenderas dock att empirin kopplad mot  $I_P$  nyttjas.

- (ii) Beräkna  $K_0$  med hjälp av sambandet  $K_0 = K_0^{OCR=1} OCR^m$  med  $m = 0.5$  à  $0.6$ .  $m=0.6$  rekommenderas i de fall där  $40\% \leq w_L \leq 80\%$ .  $OCR$  bestäms med hjälp av stegvis ödometerförsök eller CRS-försök, enligt metod beskriven av Sällfors (1975). I de fall CRS-försök utvärderade enligt Sällfors metod ger  $\sigma'_c > 100$  kPa rekommenderas enligt Sällfors (2022) en justering av  $\sigma'_c$  för hastighetseffekt.
- När  $K_0$  uppskattas med empiriska samband, för design eller som indata till laboratorieförsök, bör osäkerheten i bestämningen av  $K_0$  i fält och därmed de empiriska sambanden beaktas genom känslighetsstudier avseende hur  $K_0$  påverkar analysen.

I konsolideringsfasen av laboratorieförsök (t.ex. konsoliderade triaxialförsök) bör volymkompressionen av provet övervakas då denna kan ge en indikation på om en alltför stor medeleffektivspänning påförs provet (illustreras i Figur 11).

- Framtida projekt kan studera om de i föreliggande rapport uppdaterade empiriska sambanden kan gälla även för leror med högre överkonsolideringsgrad än normal till svagt överkonsolidering. Sådana studier bör inkludera verifiering genom jämförelser mot fältmätningar av  $K_0$  i den typen av leror.
- Mätningar av horisontella effektivspänningar i fält, exempelvis med jordtrycksceller, dilatometer och/eller pressometer, för utvärdering av  $K_0$  rekommenderas i såväl normal till svagt överkonsoliderade leror som leror med högre överkonsolideringsgrad. Sådana fältmätningar bör föregås av provtagning och laboratorieförsök för att bestämma indexparametrar samt erhålla en komplett bild av jordlagrens tekniska egenskaper (t.ex. genom aktiva och passiva triaxialförsök samt direkta skjutförsök).
- I avsnitt 3.1 bedömdes att fältmätningar av  $K_0$  i Bäckebo (Larsson 1975) ned till 4 m djup troligtvis påverkats (visar värden på  $K_0 > 1$ ) av rotträd i leran. Således bör det beaktas att i fall där rotträd påträffas kan högre värden på  $K_0$  förekomma, jämfört med vad som ges av de i föreliggande rapport föreslagna empiriska sambanden.
- Denna rapport beskriver vilojordtryck. Fortsatta arbeten rekommenderas för att ge rekommendationer om utvecklingen av horisontella effektivspänningar och portryck i samband med och efter det att temporära eller permanenta stödkonstruktioner och/eller pålar installerats. Med andra ord, fortsatt arbete behövs för att ge rekommendationer om hur installationseffekter och deformationer i byggskedet skall beaktas med avseende på det jordtryck för vilket permanenta geokonstruktioner skall utformas.
- En branschorganisation så som SGF och myndigheter så som SGI och Trafikverket bör samverka för att tillse att nationellt standardiserade begrepp för jordtryckskoefficienterna införs. Se förslag på definitioner utifrån vad som nyttjats i föreliggande rapport, avsnitt 2.1.
- Den härmed föreslagna empirin bör kontinuerligt uppdateras i takt med att fler fältmätningar av horisontella effektivspänningar utförs för olika leror och varierande överkonsolideringsgrader.

## Referenser

- Bjerrum, L., & Andersen, K. H. (1972). *In-situ measurement of lateral pressures in clay* (tekn. rapport). NGI. Oslo.
- Brooker, E. W., & Ireland, H. O. (1965). Earth Pressures at Rest Related to Stress History. *Canadian Geotechnical Journal*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.1139/t65-001>
- Burland, J. B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40(3), 329–378. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.329>
- Ignat, R. (2018). *Ground Improvement by Dry Deep Mixing Lime-Cement Column Panels as Excavation Support* [Ph.D. thesis, KTH].
- Jaky, J. (1948). Pressure in silos. *2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 103–107.
- Karlsrud, K., & Hernandez-Martinez, F. G. (2013). Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high-quality block samples. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(12), 1273–1293. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0298>
- Kenney, T. C. (1959). Discussion of “Geotechnical Properties of Glacial Lake Clays”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85(3), 67–79. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000201>
- Kullingsjö, A. (2007). *Effects of deep excavations in soft clay on the immediate surroundings* [Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology].
- Ladd, C. C. (1991). Stability Evaluation during Staged Construction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(4), 540–615. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:4\(540\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:4(540))
- Larsson, R., Sällfors, G., Bengtsson, P., Alén, C., Bergdahl, U., & Eriksson, L. (2007). *Skjuvhållfasthet - utvärdering i kohesionsjord* (tekn. rapport). Swedish Geotechnical Institute. Linköping.
- Larsson, R., & Sällfors, G. (1981). Hypothetical yield envelope at stress rotation. *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 536–537.
- Larsson, R., & Eskilsson, S. (1989). *Dilatometer försök i lera* (tekn. rapport). Statens Geotekniska Institut. Linköping.
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper - SGI Information 1* (tekn. rapport). Linköping, Swedish Geotechnical Institute.
- Larsson, R. (1975). *Measurement and calculation of horizontal stresses in clay and their importance for strength- and deformation parameters* (tekn. rapport). Chalmers University of Technology. Gothenburg.
- Larsson, R. (1977). *Basic behaviour of Scandinavian soft clays* (tekn. rapport Nr 3). Swedish Geotechnical Institute. Linköping.
- Larsson, R. (1980). Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(4), 591–602. <https://doi.org/10.1139/t80-066>
- Larsson, R. (1981). *Drained behaviour of Swedish clays* (tekn. rapport). Swedish Geotechnical Institute. Linköping.
- Larsson, R. (1990). *Behaviour of Organic Clay and Gyttja* (tekn. rapport). Linköping, Swedish Geotechnical Institute.
- Massarsch, K. R., Holtz, R. D., Holm, B. G., & Fredriksson, A. (1975). Measurement of horizontal in situ stresses. *Speciality Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, 266–286.
- Mayne, P. W., & Kulhawy, F. H. (1982).  $K_0$  - OCR Relationships in Soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108(6), 851–872. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001306>
- Mesri, G., & Castro, A. (1987).  $C_\alpha/C_c$  Concept and  $K_0$  During Secondary Compression. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(3), 230–247. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1987\)113:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:3(230))
- Mitchell, J. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons.

- Olsson, M. (2013). *On rate-dependency of Gothenburg clay* [Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology].
- Rankka, K. (1994). *In situ stress conditions across clay slopes* [Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology].
- Schmertmann, J. (2012). *New concepts for the mobilization of the components of shear resistance in clay* (tekn. rapport). Oslo, NGI.
- Schmidt, B. (1966). Earth Pressures at Rest Related to Stress History. *Canadian Geotechnical Journal*, 3(4), 239–242. <https://doi.org/10.1139/t66-028>
- Schmertmann, J. H. (1983). A Simple Question About Consolidation. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(1), 119–122. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:1\(119\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:1(119))
- SGF. (2012). *Triaxialförsök - en vägledning. Rapport 2:2012* (tekn. rapport). Swedish Geotechnical Society.
- SGF. (2018). *Konflytgränsen - SGF Notat 1:2018* (tekn. rapport). SGF.
- SGI. (2023). *Utredning av släntstabilitet, utgåva 1 rev. 1, SGI Vägledning 8* (tekn. rapport).
- Sällfors, G., & Larsson, R. (2016). *Bestämningar av odränerad skjvuhållfasthet med specialiserade metoder i praktiska tillämpningar - Delrapport 3 - Sammanställning av Case records* (tekn. rapport). Trafikverket.
- Sällfors, G. (2022). *Anpassning av avancerade geotekniska laborieförsök till nya användningsområden* (tekn. rapport). Trafikverket.
- Sällfors, G. (1975). *Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays* [Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology].
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3. utg.). John Wiley & Sons.
- Tornborg, J., Karlsson, M., & Dijkstra, J. (2024). Temporal effective stress response of soil elements below the base of an excavation in sensitive clay. *Canadian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0355>
- Tornborg, J. (2024). *On the temporal evolution of earth pressures in deep excavations in soft clay* [Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology].
- Torstensson, B. (1973). *Friction piles in soft clay - A field-research on model piles* [Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology].
- Trafikverket. (2023). KRAV - TRVINFRA-00230, ver. 2.0 - Geokonstruktion, dimensionering och utformning.
- Watabe, Y., Tanaka, M., Tanaka, H., & Tsuchida, T. (2003). K<sub>0</sub>-consolidation in a triaxial cell and evaluation of in-situ K<sub>0</sub> for marine clays with various characteristics. *Soils and Foundations*, 43(1), 1–20. <https://doi.org/10.3208/sandf.43.1>