



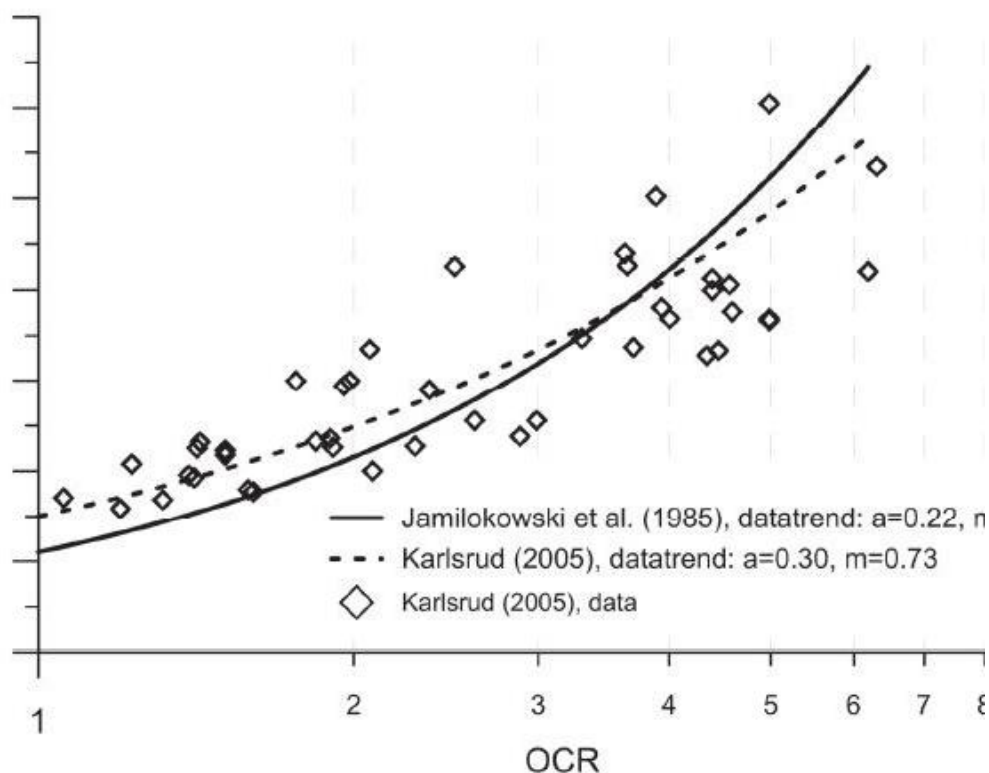
Jernbaneverket

Statens vegvesen

Tolking av aktiv udrenert skjærefasthet fra vingebor

Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire

81
2015



R
A
P
P
O
R
T

Tolking av aktiv udrenert skjærefasthet fra vingebor

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktør:

Forfattere: Anders Samstad Gylland

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag:

Forsidefoto:

ISBN 978-82-410-1132-0

Sammendrag: Rapporten ser på muligheten for å etablere en korreksjonsfaktor for vingebor relatert til skjærefasthet fra aktiv treaksialforsøk basert på datasett med vingeborforsøk og aktive treaksialforsøk - i alt 137 datapunkter fra 21 lokasjoner. Det konkluderes med at det er mulig å etablere en slik korrelasjon som funksjon av plastisitetsindeks. Det anbefales videre å arbeide for å etablere et utvidet datagrunnlag av høy kvalitet i form av en vingebor/ blokkprøvedatabase.

Emneord: Vingebor, plastisitetsindeks, aktiv udrenert skjærfasthet

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

2015

Faggruppe for geoteknikk
 Høgskoleringen 7A, 7491 Trondheim

 Telefon: +47 73 59 4590
 Telefax: +47 73 59 4609

Rapportens tittel Tolkning av aktiv udrenert skjærfasthet fra vingebor	Dato 08.12.2014 Antall sider/bilag 17
Saksbehandlere/forfattere Anders Samstad Gylland	Oppdragsgiver NIFS DP6 Kvikkleire
Institutt/Faggruppe Institutt for bygg- anlegg og transport, faggruppe for geoteknikk	Oppdragsgivers ref. Vikas Thakur
<p>Sammendrag</p> <p>Vingeboret har vært diskutert siden det først ble introdusert og flere studier har sett på vingeborets muligheter innen geoteknisk design, bla. gjennom utvikling av korreksjonsfaktorer. I dette arbeidet er det fokusert på muligheten for å etablere en korreksjonsfaktor for vingebor relatert til den fasthetsparameteren som benyttes som input i norsk geoteknikk; udrenert skjærfasthet fra aktive treaksialforsøk. Hovedkilden er vurderingene er et datasett med parallelle vingeborforsøk og aktive treaksialforsøk som omfatter 137 datapunkter fra 21 lokasjoner.</p> <p>Følgende hovedkonklusjoner er funnet.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Det er mulig å etablere en korrelasjon mellom udrenert skjærfasthet fra vingebor og aktiv udrenert skjærfasthet som funksjon av plastisitetsindeks. • Anisotropi i udrenert skjærfasthet er tolket til å være den viktigste faktoren å ta høyde for i etableringen av en korreksjonsfaktor for vingebor som relaterer seg til aktiv udrenert skjærfasthet. • For leirer med I_p under 20% er det behov for en sterk korreksjon av målt vingeborfasthet. Korreksjonen kan innebære en økning med en faktor på 3.5 for å få ekvivalent aktiv udrenert skjærfasthet. • For å utvikle en korreksjonsfaktor med høy pålitelighet trengs et utvidet datagrunnlag av høy kvalitet. Arbeidet utført her anbefales utvidet med et komplett testprogram som tar sikte på å utvikle en solid vingebor-blokkprøvedatabase som omfatter samtlige blokkprøvelokasjoner i Norge. 	

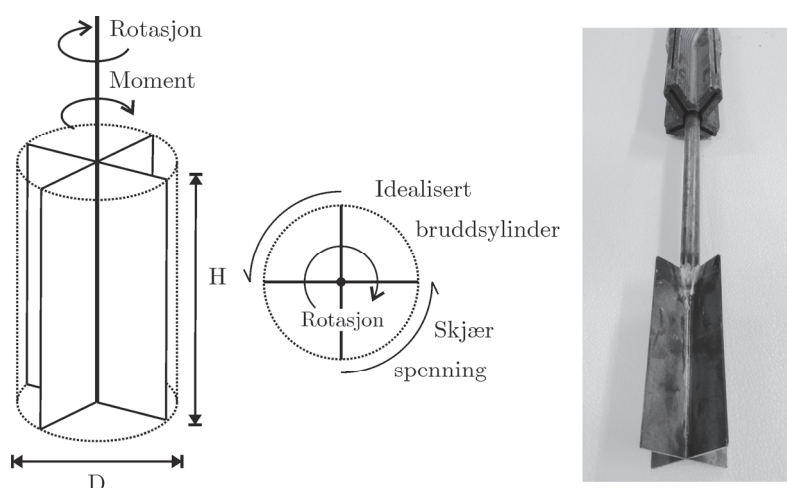
Nøkkelord, norsk	Keywords, English
Geoteknikk	Geotechnical Engineering
In-situ testing	In-situ testing
Vingebor	Shear vane testing
Tolkning	Interpretation

INNHold

1. BAKGRUNN	3
2. TOLKNING.....	3
2.1 Udrenert skjærfasthet	3
2.2 Behov for korreksjon.....	4
2.3 Faktorer som påvirker korreksjonsfaktoren	5
3. KORREKSJONSFAKTOR: AKTIV UDRENERT SKJÆRFASTHET	7
3.1 Relasjon basert på parallelle vingebor- og treaksialforsøk	7
3.2 Relasjon basert på Bjerrums korreksjonsfaktor.....	8
3.3 Relasjon basert på vertikal og horisontal anisotropi.....	10
4. DISKUSJON.....	10
4.1 Usikkerheter i datasettet	10
4.2 Betydning av OCR	12
4.3 Muligheter og implikasjoner av en vingebor-korreksjon basert på aktiv udrenert skjærfasthet.....	13
5. KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID	14
REFERANSER	15

1. BAKGRUNN

Vingeboret er et in-situ instrument for bestemmelse av uforstyrret og omrørt udrenert skjærfasthet i leire. Selve vingen består av to plater 90° relativt til hverandre som presses ned i grunnen til ønskt dybde (Figur 1). Typisk H/D -forhold er 2. Rotasjon påføres og resulterende moment måles. Udrenert skjærfasthet kan tolkes fra det maksimale målte momentet. Omrørt måling gjøres etter 25 manuelle rotasjoner av vingeboret. Rutiner for utførelse av vingeborforforsk i Norge er f.eks. gitt i SVV Håndbok R211.



Figur 1 Illustrasjon av vingebor

Vingeboret var et mye brukt in-situ testinstrument på 60-70 og 80-tallet i Norge. Den senere tid er det kun unntaksvis brukt. Noe av dette skyldes økende bruk av CPTU, men usikkerheter i tolkning av udrenert skjærfasthet fra vingeboret er også en årsak.

Etablerte korreksjonsfaktorer for vingeboret relaterer seg til fasthet fra direkte skjær eller fyllingsbrudd. I geoteknisk praksis i Norge i dag benyttes aktiv udrenert skjærfasthet som hovedparameter i design. Arbeidet presentert i denne rapporten tar sikte på å undersøke tolkningsgrunnlaget for vingeboret med tanke på å etablere en korreksjonsfaktor som relaterer vingebor til udrenert skjærfasthet fra aktiv treaks. Per i dag eksisterer ingen slik korreksjonsfaktor.

2. TOLKNING

2.1 Udrenert skjærfasthet

Det totale momentet som måles i et vingeborforforsk, når man ser bort fra utstyrsfriksjon, består av to komponenter; motstand på de vertikale blad-endene som relaterer seg til udrenert skjærfasthet for horisontal skjær i et vertikalplan (s_v) og motstand på de horisontale topp/bunn endene som relaterer seg til horisontal skjær i et horisontalplan (s_h). Det totale momentet kan dermed skrives som ligning (1). Ved å anta $H = 2D$ kan det totale momentet skrives som vist i ligning (2). Faktoren κ beskriver fordeling av skjærspenninger (s_h) på top-/bunnbladene. En rektangulær fordeling er gitt av $\kappa = 6$, mens en triangulær fordeling er gitt av $\kappa = 8$. Hvis man antar $s_v = s_h$ får man den klassiske tolkningen som vist i ligning (3). Avhengig av antagelser rundt κ , bidrar komponenten s_v til 86-94% av det totale målte momentet (Chandler, 1988).

$$T_{tot} = T_v + 2T_h \quad (1)$$

$$T_{tot} = \pi D^3 \left(s_v + \frac{1}{\kappa} s_h \right) \quad (2)$$

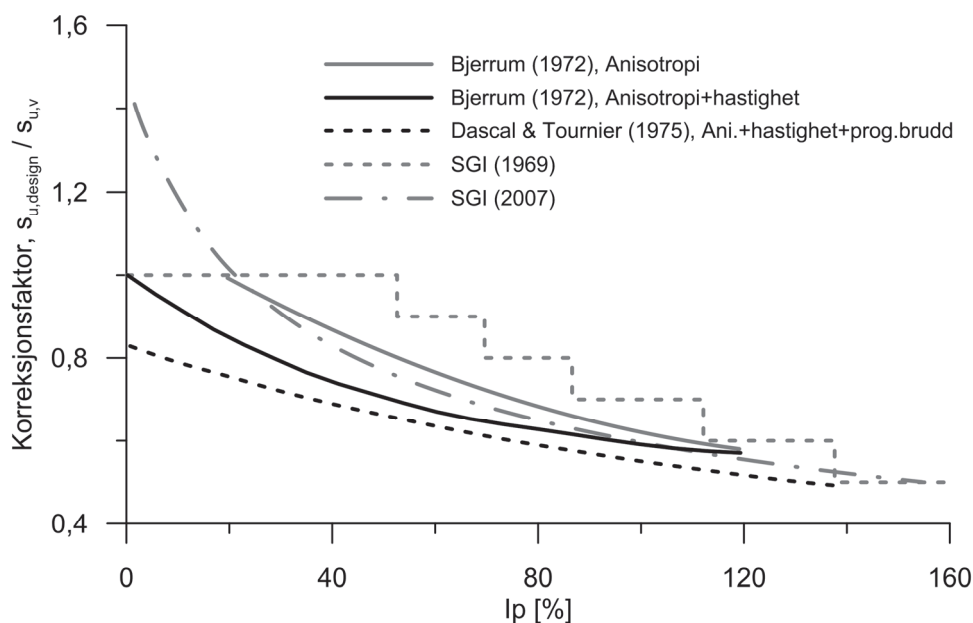
$$s_{u,v} = \frac{\kappa}{(\kappa+1)} \frac{T_{tot}}{\pi D^3} \quad (3)$$

2.2 Behov for korreksjon

Vingeboret kan intuitivt virke relativt enkelt, men i bruk er det beheftet med flere svakheter og feilkilder. Noen av disse er oppsummert og diskutert i Flaate (1966). Under installasjon i bakken vil det oppstå forstyrrelse av prøvematerialet og i enkelte tilfeller oppbygging av poreovertrykk med tilhørende konsolidering over tid. Det vil også være ulike grader av friksjon i utstyret. Dette kan likevel håndteres med veldefinerte rutiner og korreksjon for friksjon. Vingeboret er også følsomt for heterogeniteter i jorda slik som tynne sand/siltlag og steiner.

Når det gjelder tolkning av målt moment til en udrenert skjærfasthet er det flere faktorer som må vurderes. Disse er i hovedsak spenningsfordeling rundt vingeboret, antagelser rundt konsolideringsforhold, geometrisk form på bruddflaten, progressiv bruddutvikling i sprøbruddsmaterialer, effekter relatert til tøyningshastighet samt anisotropi av udrenert skjærfasthet. De tre første faktorene er ofte håndtert gjennom antagelsene som ligger til grunn for en tolkningsligning av typen som er vist i ligning (3). De tre siste faktorene er ofte samlet sammen i en korreksjonsfaktor.

Tilbakeregninger av fyllingsbrudd gjort av Bjerrum (1972) viste at design basert på udrenert skjærfasthet fra vingebor, som gav materialfaktorer over 1.0, faktisk gikk til brudd. Ved å sammenstille dataene kunne en trend med økende materialfaktor for økende plastisitetsindeks tolkes ut. Dette motiverte en av de best kjente korreksjonsfaktorene for vingebor. Bjerrum antok at de to viktigste komponentene som lå til grunn for behovet for en korreksjonsfaktor var anisotropi og hastighetseffekter. Han separerte disse to effektene som vist i Figur 2.



Figur 2 Et utvalg av korreksjonsfaktorer for vingebor

I litteraturen fins det flere korreksjonsfaktorer hvor noen av de viktigste er SGI (1970, 1984), Pilot (1972), Dascal & Tournier (1975), Azzouz *et al.* (1983) og Aas *et al.* (1986). Noen av disse er vist i Figur 2 (SGI-korreksjonene er overført fra w_l til I_p ved å bruke sammenhengen gitt i avsnitt 4.2). Til tross for dette betydelige arbeidet relatert til vingebores korreksjonsfaktor, er den originale Bjerrum-korreksjonen en av de mest brukte i dag.

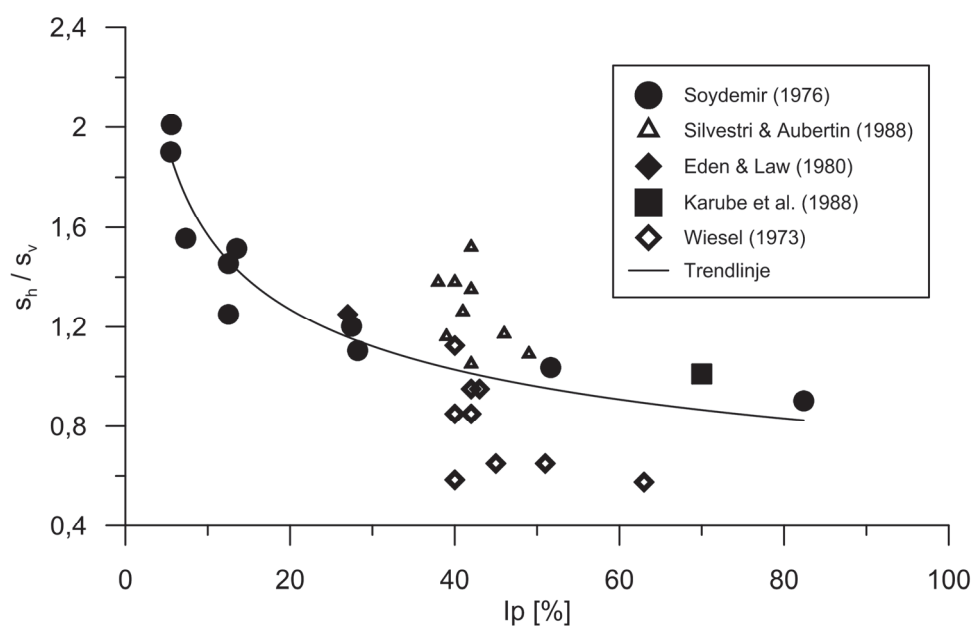
2.3 Faktorer som påvirker korreksjonsfaktoren

I etablerte korreksjonsfaktorer er det i hovedsak tre aspekter som er styrende; anisotropi, hastighetseffekter og OCR. Disse faktorene diskuteres i de følgende avsnittene.

2.3.1 Anisotropi av udrenert skjærfasthet

Det er kjent at leirer viser anisotropi i udrenert skjærfasthet. Dvs. at skjærfastheten er avhengig av retningen på skjærbelastningen (f.eks. aktiv, direkte, passiv) (Soydemir, 1976). Som vist i ligning (2) påvirkes vingebores skjærfasthetene s_v og s_h . Flere studier har vist at det er rimelig å anta at bruddmoden for disse komponentene rundt vingebores tilsvarer DSS (Morgenstern & Tchalenco 1967, Wroth 1984, Chandler 1988 og Gylland *et al.* 2013). Dette betyr at s_h tilsvarer en horisontal DSS-test i horisontal retning og at s_v tilsvarer en horisontal DSS-test i et vertikalplan. Figur 3 viser en samling data for forholdet mellom disse to skjærkomponentene, s_h / s_v . Spesielt for lave verdier av I_p er det betydelig forskjell på s_h og s_v . Dette innebærer at anisotropi er en viktig faktor i tolkning av vingebor.

Korrelasjonsparametere brukt for å angi anisotropi inkluderer, i tillegg til I_p , flytegrensen w_l (SGI 1961, SGI 1984 og Larsson 1980) og vanninnhold w (Karlsrud & Martinez 2013). I følge dataene til Karlsrud & Martinez (2013) er det ingen relasjon mellom anisotropi og OCR for norske leirer. I denne rapporten er det valgt å benytte I_p som parameter for å beskrive grad av anisotropi.



Figur 3 Anisotropi mellom skjærfasthet på et horisontalplan og vertikalplan som funksjon av plastisitetsindeks

2.3.2 Tøyningshastighet

Økt udrenert skjærfasthet med økt tøyningshastighet er et kjent fenomen i leirer (f.eks. Graham *et al.* 1983, Sheahan *et al.* 1996). For vingebores nås maksimal motstand, og brudd, i løpet av ca 2 minutter (høy hastighet). I laboratoriet er tid til brudd typisk i størrelsesorden 1-4 timer (medium hastighet). For en reell bruddsituasjon av en skråning eller et fundament kan tid til brudd være i størrelsesorden dager eller uker (lav hastighet). Pga. av denne effekten alene og de ulike

hastighetene er det forventet at det vil være en forskjell i udrenert skjærfasthet når man sammenligner en laboratorie- eller feltsituasjon med en måling gjort med vingebor.

2.3.3 Overkonsolidering, OCR

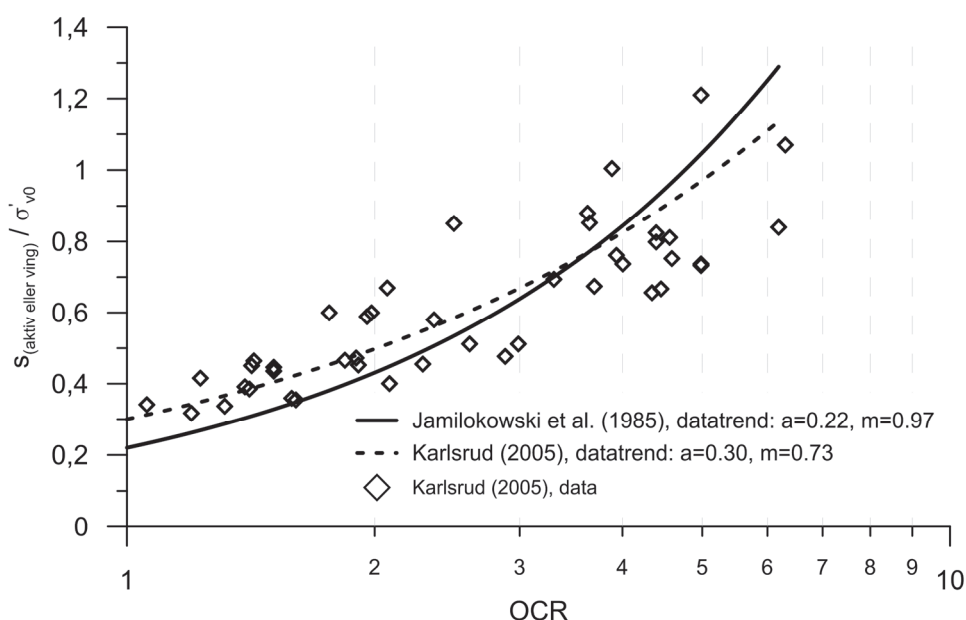
Det er to faktorer relatert til OCR som er av relevans for en vingebor-korreksjonsfaktor. Den ene er at størrelsen på hastighetseffekter er avhengig av OCR, den andre er at udrenert skjærfasthet fra vingebor og laboratorieforsøk (f.eks. DSS eller aktiv treaks) viser forskjellig relasjon til OCR i et SHANSEP-rammeverk (Ladd & Foott 1974).

Aas *et al.* (1986) antok at OCR er en mer sentral parameter for å beskrive hastighetseffekter enn I_p . Dette var basert på Bjerrum's (1967) porell – $\log \sigma'_{v0}$ –tid teori og antagelsen om at hastighetseffekter for udrenert skjærfasthet er knyttet til porell, som indikert av OCR. Karlsson (1963) og Sheahan *et al.* (1996) har vist at hastighetseffekter blir mer fremtredende for økende porøsitet og reduserende OCR.

I Figur 4 er det vist testdata fra treaksialforsøk på norske leirer (Karlsruud *et al.* 2005) sammen trendlinjen fra et omfattende internasjonalt vingebordatasett samlet av Jamiolkowski *et al.* (1985). Trendlinjene er tolket i et SHANSEP-rammeverk som vist i ligning (4). Sammenligningen av treaksial- og vingebordata viser at vingeboret har sterkest relasjon til OCR (høyere m). Larsson & Åhnberg (2003) har brukt denne forskjellen i eksponent til å utvide den tradisjonelle SGI-korreksjonsfaktoren med et ledd relatert til OCR. For svenske leirer har de funnet $m = 0.80-0.85$ for DSS-forsøk, mens vingebor har gitt $m = 0.98$. Larsson & Åhnberg (2003) har på bakgrunn av dette brukt en eksponent på -0.15 (forskjell i m -verdier) i korreksjonen (ligning (5)).

$$\frac{S_u}{\sigma'_{v0}} = \alpha OCR^m \quad (4)$$

$$\frac{S_{u,DSS}}{S_{u,v}} \approx f_L = \left(\frac{43}{w_l}\right)^{0,45} \left(\frac{OCR}{1,3}\right)^{-0,15} \quad (5)$$



Figur 4 Normalisert udrenert skjærfasthet som funksjon av OCR

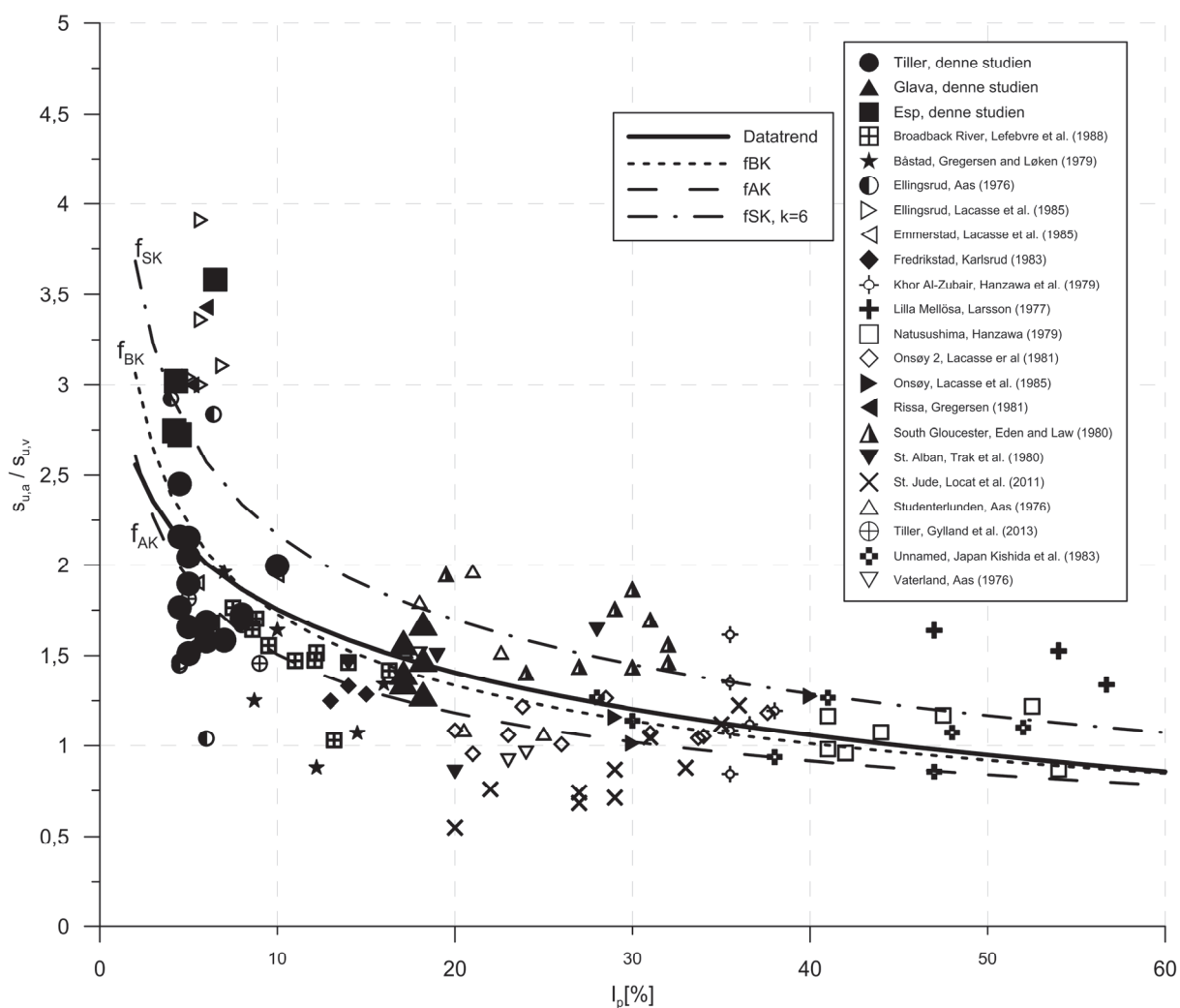
3. KORREKSJONSFAKTOR: AKTIV UDRENERT SKJÆRFASTHET

Det er her studert tre fremgangsmåter for etablering av en korreksjonsfaktor som relaterer udrenert skjærfasthet målt fra vingebor ($s_{u,v}$) til udrenert skjærfasthet fra aktiv treaksial forsøk ($s_{u,a}$).

3.1 Relasjon basert på parallelle vingebor- og treaksialforsøk

En direkte fremgangsmåte er å relatere parallelle data av $s_{u,a}$ og $s_{u,v}$. Dette er gjort her som vist i Figur 5. Datasettet er basert på tilgjengelig data i litteraturen og testing gjort i forbindelse med dette studiet. Hvert datapunkt representerer et treaksialforsøk og et vingeborforsøk ved samme dybde på samme lokasjon. Figuren inkluderer flere trendlinjer som vil bli introdusert i de følgende avsnittene.

Figur 5 viser en klar trend med avtagende $s_{u,a} / s_{u,v}$ med økende I_p under 25%. For I_p over 25% er forholdstallet nærmest konstant. For I_p i området 5-7% er $s_{u,a}$ større enn $s_{u,v}$ med en faktor på nesten 4. Dette området er dominert av tre lokasjoner som har til felles at de består av svært sensitive og siltige leirer (Ellingsrud, Rissa og Esp). De fleste datapunktene gir en relasjon mellom $s_{u,a}$ og $s_{u,v}$ som er større enn 1.0. Dette indikerer at vingeboret generelt sett gir lavere udrenert skjærfasthet enn hva som måles i aktive treaksialforsøk.



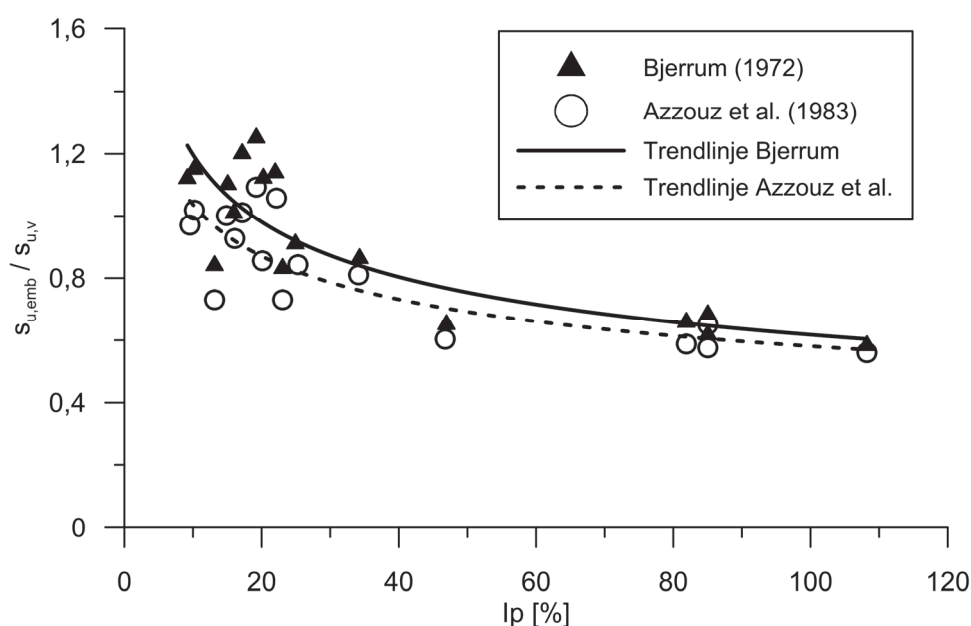
Figur 5 Forhold mellom aktiv udrenert skjærfasthet og udrenert vingeborfasthet som funksjon av plastisitetsindeks

3.2 Relasjon basert på Bjerrums korreksjonsfaktor

Det er mulig å etablere en relasjon mellom $s_{u,a}$ og $s_{u,v}$ indirekte ved å kombinere uavhengige datasett. Datasettet bak Bjerrums korreksjonsfaktor (Figur 6) relaterer målt $s_{u,v}$ til en gjennomsnittlig designfasthet relevant for fyllingsbrudd ($s_{u,emb}$). Dette er i hovedsak sirkulære brudd og det er rimelig å anta like bidrag fra aktiv, direkte og passiv udrenert skjærfasthet i denne fasthetskomponenten. Siden DSS-fasthet ofte tilsvareer gjennomsnittet mellom aktiv og passiv fasthet (Lunne *et al.* 2006), burde $s_{u,emb}$ være tilnærmet lik DSS-fasthet ($s_{u,DSS}$). Dette definerer ligning (6) hvor f_B er trendlinjen i Bjerrums datasett..

$$f_B(I_p) = \frac{s_{u,emb}}{s_{u,v}} \approx \frac{s_{u,DSS}}{s_{u,v}} \approx -0,244 \ln(I_p) + 1,7303 \quad (6)$$

$$(R^2 = 0,71)$$



Figur 6 Korreksjonsdata for vingebor fra Bjerrum (1972) og Azzouz *et al.* (1983)

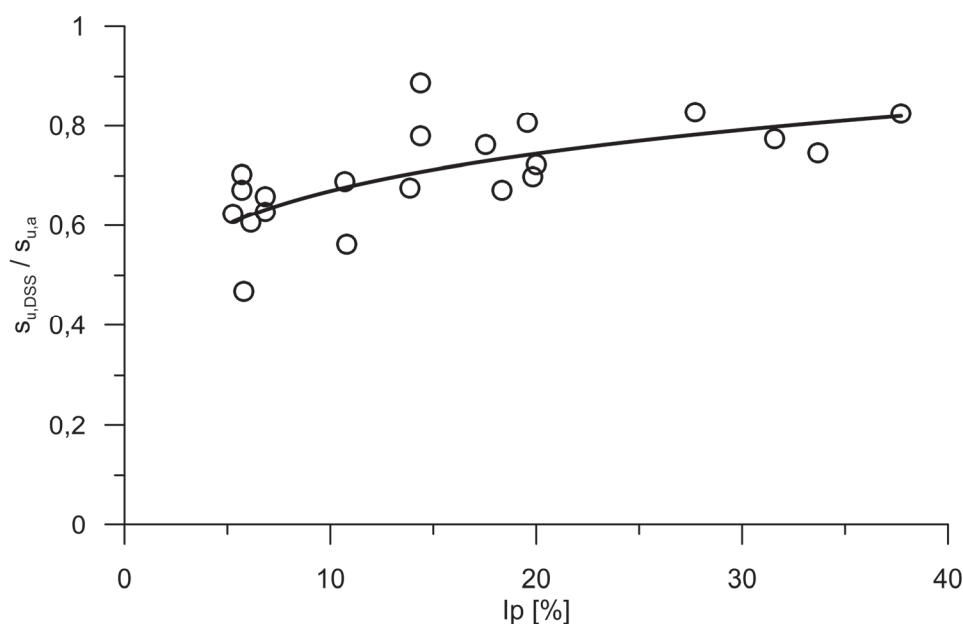
For å benytte denne funksjonen for å danne en relasjon mellom $s_{u,v}$ og $s_{u,a}$, trengs et datasett som sammenstiller $s_{u,DSS}$ og $s_{u,a}$. Dette er tilgjengelig i Karlsrud *et al.* (2005) som inneholder et omfattende datasett basert på norske blokkprøver (Figur 7). Funksjonen f_K som vist i ligning (7) er trendlinjen for dette datasettet.

$$f_K(I_p) = \frac{s_{u,DSS}}{s_{u,a}} \approx 0,1036 \ln(I_p) + 0,438 \quad (7)$$

$$(R^2 = 0,47)$$

Ved å kombinere disse to datasettene kan det etableres en relasjon mellom $s_{u,a}$ og $s_{u,v}$ som vist i ligning (8). Funksjonen f_{BK} er plottet i Figur 5.

$$f_{BK}(I_p) = \frac{f_B(I_p)}{f_K(I_p)} \approx \frac{s_{u,a}}{s_{u,v}} \quad (8)$$



Figur 7 Udrenert skjærfasthet fra DSS-forsøk normalisert med aktiv udrenert skjærfasthet (Karlsruud et al. 2005)

Azzouz *et al.* (1983) oppdaterte Bjerrums tilbakeregninger ved å inkludere 3D-effekter (Figur 6). Denne korreksjonsfaktoren skal dermed i prinsippet være mer korrekt enn Bjerrums originale korreksjonsfaktor. Her er $f_A(I_p)$ i ligning (9) definerer tilsvarende som i ligning (7), men med datasettet til Azzouz *et al.* (1983). Relasjonen $f_{AK}(I_p)$ kan da defineres som vist i ligning (10). $f_{AK}(I_p)$ er plottet i Figur 5.

$$f_A(I_p) = \frac{s_{u, emb}}{s_{u,v}} \approx \frac{s_{u,DSS}}{s_{u,v}} \approx -0,193 \ln(I_p) + 1,4634 \quad (9)$$

$$(R^2 = 0,67)$$

$$f_{AK}(I_p) = \frac{f_A(I_p)}{f_K(I_p)} \approx \frac{s_{u,a}}{s_{u,v}} \quad (10)$$

I Figur 5 vises det at funksjonen f_{BK} ligger nært trenden i datasettet. Funksjonen f_{AK} ligger under f_{BK} . Grunnen til dette er at Bjerrums korreksjon, f_B , er ca 10% høyere enn Azzouz-korreksjonen, f_A . I prinsippet burde f_A vise bedre overenstemmelse med datasettet enn f_B . For å forklare dette må antagelsene bak ligningene vurderes. I sammenstillingen av data som er gjort i Figur 5 blir forholdet mellom hastighetene i bruddsituasjonene [medium/høy] (se Avsnitt 2.3.2). Funksjonene f_{BK} og f_{AK} har hastighetsrelasjonen [sakte/høy]. Tilgjengelige datasett indikerer at det er små forskjeller i udrenert skjærfasthet for hastigheter som tilsvarer «medium» og «sakte» som brukt her (f.eks. Lunne *et al.* 2007). Dermed er det rimelig at hastighetsrelasjonene [medium/høy] og [sakte/høy] er tilnærmet like. På bakgrunn av dette er det andre faktorer en hastighet som kan være årsaken til at f_{AK} ligger under trenden i datasettet i Figur 5. Siden f_{AK} ligger under datatrenden betyr det enten at f_A er for lav, eller at f_K er for høy. f_K er basert på et høykvalitets datasett og burde ikke være feilkilden i denne sammenhengen. f_A derimot er basert på en antagelse om at $s_{u,EMB}$ kan tilnærmes med $s_{u,DSS}$. Dette er ikke gyldig hvis f.eks. aktiv skjærfasthet dominerer i tilbakeregningen av $s_{u,EMB}$. Resultatet i dette tilfellet er $s_{u,EMB} > s_{u,DSS}$ og en mulig forklaring på hvorfor f_{AK} ligger på undersiden av datatrenden i Figur 5.

Sammenligningen av data og analysen som er gjort her viser at den originale Bjerrum korreksjonsfaktoren fanger hovedelementene i vingeboroppførselen svært godt i en setting hvor vingebor relateres til laboratorieforsøk. I det spesifikke tilfellet hvor vingeborfasthet relateres til

aktiv udrenert skjærfasthet er det mulig at den forenklete antagelsen gjort gjennom ikke å inkludere 3D-effekter kompenserer for feilen som ligger i å anta likhet mellom $s_{u,emb}$ og $s_{u,DSS}$.

3.3 Relasjon basert på vertikal og horisontal anisotropi

Datasettet vist i Figur 3 inkluderer skjærfasthet i et horisontalplan, s_h , og i et vertikalplan, s_v . Ved å benytte denne relasjonen kan et forhold mellom $s_{u,a}/s_{u,v}$ utledes ved å følge samme fremgangsmåte som i Avsnitt 3.2. Utgangspunktet er tolkningsligningen for vingebor som vist i ligning (2). I ligning (11) er det vist hvordan s_v og s_h bidrar til den tolkede $s_{u,v}$. Videre defineres funksjonen f_s i ligning (12) med utgangspunkt i datasettet vist i Figur 3. Det er her antatt av $s_h \approx s_{u,DSS}$

$$s_{u,v} = \frac{\kappa}{\kappa+1} \left(s_v + \frac{1}{\kappa} s_h \right) \quad (11)$$

$$f_s(I_p) = \frac{s_h}{s_v} \approx \frac{s_{u,DSS}}{s_{u,v}} \approx -0,378 \ln(I_p) + 2,4617 \quad (12)$$

$$(R^2 = 0,59)$$

Ved å kombinere ligning (11) med (12) samt å innføre en relasjon mellom $s_{u,a}$ og $s_{u,DSS}$ fra f_k (ligning (7)) får man funksjonen f_{SK} som vist i ligning (13).

$$f_{SK}(I_p) \approx \frac{s_{u,a}}{s_{u,v}} \approx \frac{\kappa+1}{\left[\kappa \left(\frac{f_k}{f_s} + \frac{1}{\kappa} f_k \right) \right]} \quad (13)$$

f_{SK} er plottet i Figur 5. Formen på kurven stemmer over ens med trenden i datasettet, men f_{SK} ligger helt i overkant av målingene. Faktoren κ påvirker i liten grad resultatet (flytter kurven ca 1%). Som diskutert tidligere, bør ikke funksjonen f_k være hovedårsaken til forskjellen. Dette innebærer at f_s er for høy og at $\frac{s_{u,DSS}}{s_{u,v}} < \frac{s_h}{s_v}$. Hastighetene involvert her er for $\frac{s_h}{s_v}$ [medium/medium] mens det for $\frac{s_{u,DSS}}{s_{u,v}}$ er [medium/høy]. Dette betyr at hastighetsforskjellene alene impliserer $\frac{s_{u,DSS}}{s_{u,v}} < \frac{s_h}{s_v}$. Forskjellen mellom f_{SK} og datatrenden er i størrelsesorden 25%. Denne forskjellen viser ingen sterk avhengighet av I_p . Typisk vil man kunne forvente en forskjell i størrelsesorden 20% når man sammenligner udrenert skjærfasthet ved høy vingeborhastighet og medium labhastighet (Lunne *et al.* 2007). Samsvaret i disse verdiene indikerer at hastighetseffekter alene er hovedårsaken til at f_{SK} ikke treffer datatrenden i Figur 5 og at korrekt behandling av hastighetseffekter er en nødvendighet i en vingebor-korreksjonsfaktor. Videre indikeres det at hastighetseffekter ikke er sterkt knyttet til plastisitetindeksen.

4. DISKUSJON

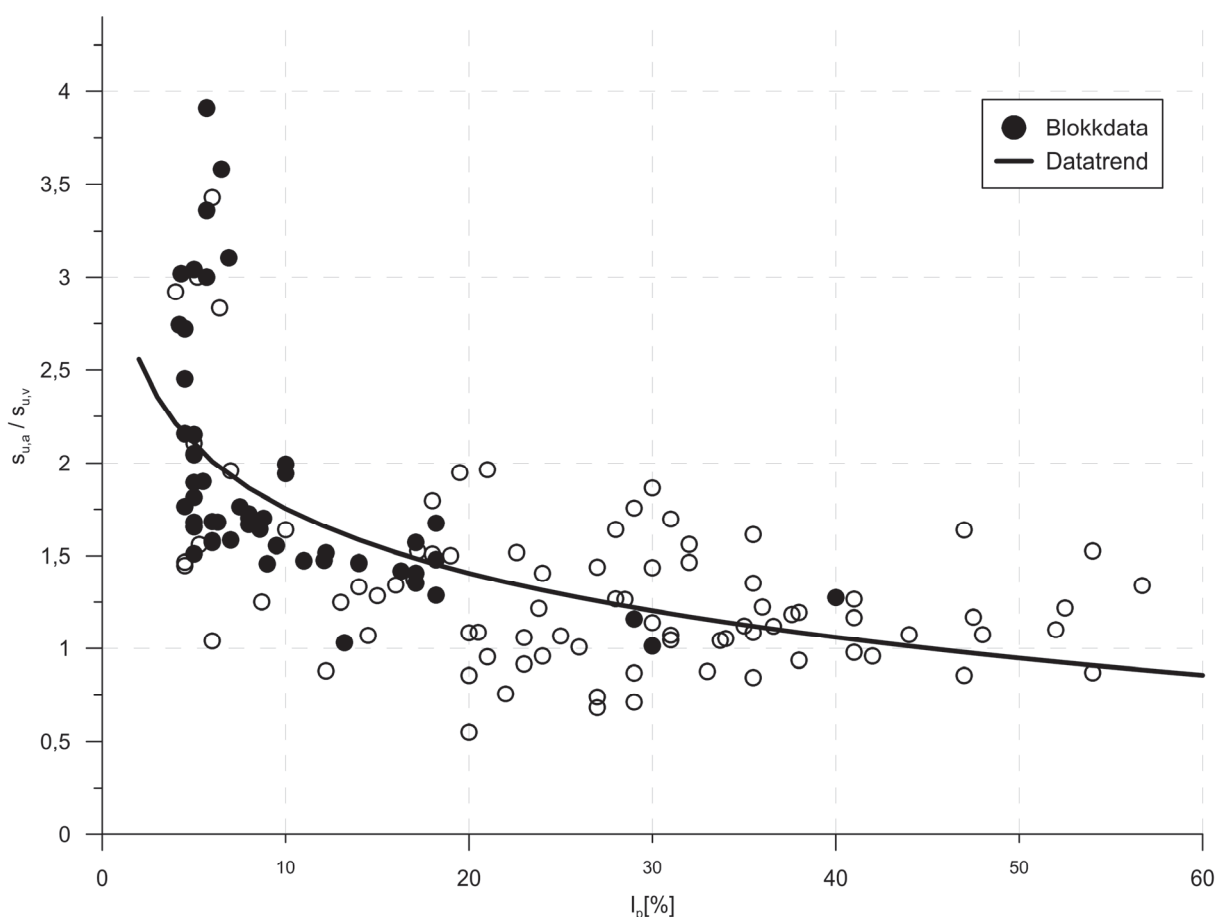
4.1 Usikkerheter i datasettet

Datapunktene i Figur 5 er samlet fra et bredt spekter av kilder og inkluderer dermed usikkerheter relater til prøvetakingsteknikker, prøve kvalitet, testprosedyrer i laboratoriet, prosedyrer for vingeborutførelse, vingeborutstyr samt tolkning av vingebor. Av disse er det grunn til å tro at prøve kvalitet er en av de meste avgjørende faktorene. Det er kjent at lavplastiske ($I_p < 20\%$) og sensitive leirer er spesielt utsatt for forstyrrelse under prøvetaking, prøvetransport og innbygging av prøver i laboratoriet (f.eks. Lunne *et al.* 2006). Resultatet er ofte redusert udrenert skjærfasthet. For å få gode resultater i laboratoriet for slike materialer er det nødvendig å benytte blokkprøver.

Figur 8 viser datapunktene i Figur 5 som er basert på blokkprøvedata. Dekningen er relativt god, spesielt i det lavplastiske området. Basert på diskusjonen over kunne man forventet at blokkprøvepunktene skulle ligge i overkant av datatrenden pga. høyere målt aktiv udrenert skjærfasthet. Dette er ikke tilfellet. Denne observasjonen støtter datasettets validitet til tross for begrensningene som ligger i alle usikkerhetene.

Likevel er det slik at flere av datapunktene er påvirket av dårlig prøve kvalitet og andre usikkerheter. Ved tolkning av udrenert skjærfasthet fra vingebor er det avgjørende at prosedyrer for installasjon og rotasjonshastighet blir fulgt. Det er videre nødvendig å måle, og korrigere for, friksjon i utstyret. For moderne (elektriske) vingeborinstrument ivaretas disse aspektene, mens det for eldre dataserier kan det være uklart om, og hvordan, det er korrigert for friksjon og om den foreskrevne rotasjonshastighet er holdt. Eldre dataserier, uten dokumentasjon av hastighet og friksjon, bør derfor brukes med forsiktighet. Totalen av dette er at datapunktene fra litteraturen må betraktes som et veiledende bakteppe for videre analyser.

For å konkludere med sikkerhet fra et slikt datasett er det nødvendig med data utelukkende fra blokkprøver samt data fra vingeborforsøk som er kjørt med tilsvarende utstyr, tilsvarende prosedyrer samt tilsvarende rutiner for tolkning. Dette vil bidra til å øke påliteligheten til datasettet.

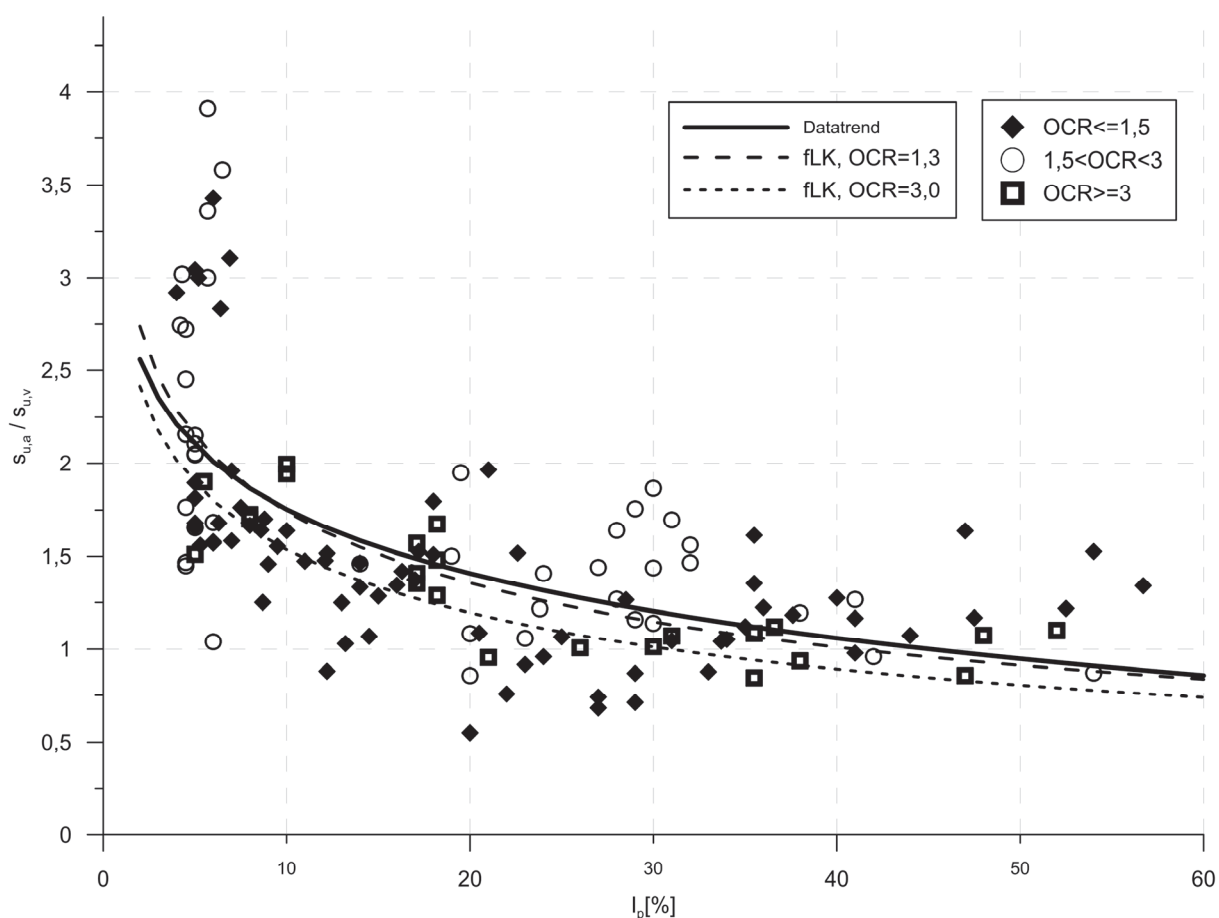


Figur 8 Datapunkter i datasettet som er basert på blokkprøvetaking (data fra Figur 5)

4.2 Betydning av OCR

Figur 9 viser datasettet fra Figur 5 sortert med tanke på OCR sammen med en relasjon basert på korreksjonsfaktoren til Larsson & Åhnberg (2003) (ligning (5)). Ved å benytte en relasjon mellom flytegrense, w_l , og plastisitetsindeks, I_p basert på NVE (2013), og ved å introdusere f_K fås relasjonen vist i ligning (14).

$$f_{LK} = \frac{s_{u,a}}{s_{u,v}} \approx \frac{f_L}{f_K} = \frac{\left(\frac{43}{1,176I_p + 18,14}\right)^{0,45} \left(\frac{OCR}{1,3}\right)^{-0,15}}{0,1036 \ln(I_p) + 0,438} \quad (14)$$



Figur 9 Datasett sortert etter OCR (data fra Figur 5)

Figur 9 viser at datapunktene for $1.5 < OCR < 3.0$ ligger over $OCR < 1.5$, mens $OCR > 3.0$ er nærmere $OCR < 1.5$. Funksjonen f_{LK} viser for $OCR = 1.3$ godt samsvar med datapunktene i datasettet, faktisk så tilsvarende f_{BK} funksjonen f_{BK} for dette tilfellet. For $OCR = 3.0$ ligger f_{LK} i underkant av datasettet. Datasettet har begrensninger som diskutert i avsnitt 4.1 og resultatet kan endre seg med økende antall datapunkter, likevel gir det eksisterende datasettet grunnlag for å foreslå at 1) OCR har liten innvirkning på en vingebrorrekorsjonsfaktor i en sammenheng med I_p og 2) hvis OCR har en betydning av typen som benyttet i ligning (5), så gir en eksponent på -0.15 for høy korreksjon. En årsak til punkt 2 kan være at det ikke nødvendigvis er korrekt å sammenligne vingebror og laboratorieforsøk en-til-en i samme SHANSEP-diagram med samme normaliseringsparametere. Mens et standard laboratorieforsøk er sterkt relatert til vertikal spenning og vertikal OCR, er vingebroret i større grad styrt av horisontal spenning og «horisontal

OCR». Det er ikke nødvendigvis en lineær sammenheng mellom disse to forholdene (Brooker & Ireland 1965). I dette kan det ligge at en reell SHANSEP-eksponent for vingebor er lavere enn $m = 0.98$ (Figur 4) hvis det benyttes spenningsparametere som er sammenlignbare med laboratorieforsøk.

4.3 Muligheter og implikasjoner av en vingeborkorreksjon basert på aktiv udrenert skjærfasthet

Tolkning av vingebor inkluderer flere faktorer hvorav anisotropi er ett av de avgjørende elementene. Hastighetseffekter er også viktige, mens OCR ser ut til å ha en mindre avgjørende rolle. For å beskrive anisotropi er plastisitetsindeks en relevant størrelse. Det kan ikke konkluderes om størrelse på hastighetseffekter kan entydig knyttes til denne parameteren.

For de sammenstillingene av data som er gjort her indikeres at vingeboret gir samme eller noe lavere fasthet enn aktiv udrenert skjærfasthet fra treaksialforsøk når I_p er over ca 25-30%. For slike lav-plastiske leirer er det f.eks. i Sverige gode erfaringer med bruk av vingebor for bestemmelse av in-situ udrenert skjærfasthet.

For leirer med lavere plastisitet er det et økende avvik mellom vingebor og treaksialdata som trolig kan tilskrives økende anisotropi mellom horisontal og vertikal skjærfasthet, samt økende forstyrrelse ved nedpressing av vingebor i og med at slike leirer ofte også er sensitive. For leirer med I_p ned mot 5% er det trolig nødvendig å korrigere opp målt udrenert skjærfasthet fra vingebor med en faktor på opp mot 3.5 for å få tilsvarende aktiv fasthet.

En slik markant økning i skjærfasthet er konseptuelt utfordrende og krever et solid datagrunnlag hvis det skal gjøres med trygghet. Samtidig er det dette området som er av størst relevans for Norge i og med at vår sensitive leirer ofte også er lavplastiske. En korreksjonsfaktor basert på trendlinjen i Figur 5 kan ikke benyttes per i dag som en korreksjonsfaktor pga. usikkerhetene som er involvert i datasettet. F.eks. er spredningen i det lavplastiske området svært stor; laveste verdi for $I_p = 5\%$ er $s_{u,a}/s_{u,v}=1.1$ mens høyeste er $s_{u,a}/s_{u,v}=3.9$.

Videre viser $s_{u,a}/s_{u,v}$ en sterk avhengighet av I_p i det lavplastiske området. Dette peker på utfordringer knyttet til hvor nøyaktig man kan fastsette I_p . Ved design basert på en fremgangsmåte med en korreksjonsfaktor for vingebor relatert til aktiv udrenert skjærfasthet, kan små variasjoner i I_p få stor betydning for omfang og kostnad av evt. tiltak. For lavplastiske og sensitivt leirer må det også vurderes om selve installasjon av vingeboret skaper såpass mye forstyrrelse at usikkerheten i testresultatet blir for stort til å kunne benyttes i design.

Per i dag fins ikke et godt nok datagrunnlag i Norge for å etablere en sikker korreksjonsfaktor for vingebor relatert til aktiv udrenert skjærfasthet. Gjennom arbeidet med vingebor ved NTNU er arbeidet med å bygge en høykvalitets vingebor-blokkdatabase startet opp (bla. gjennom datapunktene for Esp, Tiller og Glava i Figur 5). Utvidede analyser og relasjoner mellom vingebor og stivhet, sensitivitet, og OCR basert på dette datasettet er gitt i NTNU (2014). For å komme nærmere en korreksjonsfaktor for vingebor som relateres til aktiv udrenert skjærfasthet trengs videre arbeid for å utvide denne databasen.

Det er verd å merke seg hvor godt Bjerrums korreksjonsfaktor samstemmer med nye datasett og sammenhenger som har kommet til, selv 40 år etter at den ble publisert.

5. KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID

Vingeboret har vært diskutert siden det først ble introdusert og flere studier har sett på vingeborets muligheter innen geoteknisk design med konklusjoner som varierer fra «kun brukelig som indekstest» til «nyttig verktøy for design». Virkeligheten er kanskje en plass mellom disse ytterpunktene og avhengig av ståstedet. For leirer med middels til høy plastisitet relaterer vingeboret seg greit til laboratorietester som DSS og aktiv treaks. For lavplastiske leirer er det stor forskjell på udrenert skjærfasthet fra vingebor sammenlignet med laboratorieforsøk. Dette har motivert utviklingen av flere korreksjonsfaktorer. De fleste av disse tar høyde for anisotropi og hastighetseffekter som funksjon av Atterberg-grenser. OCR er også inkludert i noen korreksjonsfaktorer.

I dette arbeidet er det fokusert på muligheten for å etablere en korreksjonsfaktor for vingebor relatert til udrenert skjærfasthet fra aktive treaksialforsøk. Vurderingene er basert på tilgjengelige datasett som beskriver relasjoner mellom fasthetsparametere i leire. Hovedkilden er vurderingene er et datasett med parallelle vingeborforsøk og aktive treaksialforsøk som omfatter 137 datapunkter fra 21 lokasjoner. Følgende hovedkonklusjoner er funnet.

- Det er mulig å etablere en korrelasjon mellom udrenert skjærfasthet fra vingebor og aktiv udrenert skjærfasthet som funksjon av plastisitetsindeks.
- Anisotropi i udrenert skjærfasthet er tolket til å være den viktigste faktoren å ta høyde for i etableringen av en korreksjonsfaktor for vingebor som relaterer seg til aktiv udrenert skjærfasthet. Anisotropi kan i denne sammenhengen knyttes til plastisitetsindeks.
- Hastighetseffekter er også viktige, men det kan ikke tolkes ut noen klar relasjon til plastisitetsindeks.
- OCR har mindre betydning for en korreksjonsfaktor for vingebor som relaterer seg til aktiv udrenert skjærfasthet.
- For leirer med I_p under 20% er det behov for en sterk korreksjon av målt vingeborfasthet. Korreksjonen kan innebære en økning med en faktor på 3.5 for å få ekvivalent aktiv udrenert skjærfasthet. Det bør vurderes om en slik kraftig korreksjon av målt skjærfasthet er gyldig i en designsituasjon.
- For å utvikle en korreksjonsfaktor med høy pålitelighet trengs et utvidet datagrunnlag av høy kvalitet. Arbeidet utført her anbefales utvidet med et komplett testprogram som tar sikte på å utvikle en solid vingebor-blokkprøvedatabase omfatter samtlige blokkprøvelokasjoner i Norge.

REFERANSER

- Aas, G. (1976) *Stability of slurry trench excavations in soft clay*. ECSMFE 6, Vienna, 1.1, pp 103-110
- Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. and Høeg, K. (1986) *Use of in situ tests for foundation design in clay*. ASCE Proc. In-Situ '86, Virginia, USA, pp 589-600
- Azzouz, A.S., Baligh, M.M. and Ladd, C.C. (1983) Corrected field vane strength for embankment design. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 109, pp. 730-734
- Bjerrum, L. (1967) Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings. 7th Rankine Lecture, *Géotechnique*, 2, pp. 81-117
- Bjerrum, L. (1972) *Embankments on soft ground*, ASCE, Spec. Conf. Perform. Earth and Earth-Support. Struct., Lafayette, 2, pp. 1-45
- Brooker, E.W. and Ireland, H.O. (1965) Earth pressure at rest related to stress history. *Canadian Geotechnical Journal*, 2(1), pp. 1-15
- Chandler, R.J. (1988) *The in-situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane*, Vane shear strength testing in soils: Field and laboratory studies. ASTM STP 1014. pp 13-44
- Dascal, O and Tournier, J-P. (1975) Embankments on soft and sensitive clay foundation, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 101(3), pp. 297-314
- Eden, W.J. and Law, K.T. (1980) Comparison of undrained shear strength results obtained by different test methods in soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(3), pp. 369-381
- Flaate, K. (1966) Factors influencing the results of vane tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 3(1), 18-31
- Graham, J., Crooks, J.H.A. and Bell, A.L. (1983) Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays, *Géotechnique*, 33(3), pp. 327-340
- Gregersen, O. (1981) *The quick clay landslide in Rissa*. ICSMFE 10, Stockholm, 3, pp. 421-426
- Gregersen, O. and Løken, T. (1979) The quick-clay slide at Baastad, Norway, 1974. *Engineering Geology*, 14, pp. 183-196
- Gylland, A.S., Jostad, H.P., Nordal, S. and Emdal, A. (2013) Micro-level investigation of the in situ shear vane failure geometry in sensitive clay. *Géotechnique*, 63(14), pp. 1264-1270
- Gylland, A.S., Long, M., Emdal, A. And Sandven, R. (2013) Characterisation and engineering properties of Tiller clay, *Engineering Geology*, 164, pp 86-100
- Hanzawa, H. (1979) Undrained Strength Characteristics of an Alluvial Marine Clay in the Tokyo Bay. *Soils and foundations*, 19(4), pp. 69-84
- Hanzawa, H., Matsuno, T. and Tsuji, K. (1979) Undrained shear strength and stability analysis of soft Iraqi clays. *Soils and foundations*, 19(2), pp. 1-14
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancellotta, R. (1985) *New developments in field and laboratory testing of soils*. ICSMFE 11. 1, pp. 57-153
- Karlsrud, K. (1983) *Analysis of a small slide in sensitive clay in Fredrikstad, Norway*. SGI Report 17, pp. 175-184
- Karlsrud, K. and 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), pp. 1273-1293
- Karlsrud, K., Lunne, T., Kort, D.A. and Strandvik, S. (2005) *CPTU correlations for clays*. ICSMFE 16, Osaka, 2, pp. 693-702
- Karlsson, R. (1963) *On cohesive soils and their flow properties*. SGI report No. 5
- Karube, D., Shibuya, S., Baba, T. and Kotera, Y. (1988) *Analysis of a vane based on effective stress*. Vane shear strength testing in soils: Field and laboratory studies. ASTM STP 1014. Pp. 131-149
- Kishida, T., Hanzawa, H. And Nakanowatari, M (1983) Stability analysis with the simple and the advanced $\phi=0$ method for a failed dikes. *Soils and foundations*, 23(2), pp. 69-82
- Lacasse, S., Berre, T. and Lefebvre, G. (1985) *Block sampling of sensitive clays*. ICSMFE 11, San Fransisco, 2, pp. 887-892
- Lacasse, S., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. and Lunne, T. (1981) *In situ characterization of two Norwegian clays*. ICSMFE 10, Stockholm, 2, pp. 507-511
- Ladd, C.C. and Foott, R. (1974) New design procedure for stability of soft clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(7), pp. 763-786
- Larsson, R. (1980). Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*. 17(4), pp. 591-602
- Larsson, R. and Åhnberg, H. (2003) *Long-term effects of excavations at crests of slopes*. SGI report 61
- Lefebvre, G., Ladd, C.C. and Paré, J-J. (1988) *Comparison of field vane and laboratory undrained shear strength in soft sensitive clays*. Vane shear strength testing in soils: Field and laboratory studies. ASTM STP 1014. pp. 233-246
- Locat, P. *et al.* (2011) *Glissement de terrain du 10 mai 2010, Saint-Jude, Montérégie*. Report MT11-01 Transports Québec
- Lunne T. and Andersen, K.H. (2007) *Soft clay shear strength parameters for deepwater geotechnical design*. Proc. 6th Int. Conf. Offshore Site Investig. and Geotech., London. pp. 151-176
- Lunne, T., Berre, T., Andersen, K.H., Strandvik, S. and Sjørusen, M. (2006) Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 43, pp. 726-750
- Morgenstern, N.R. and Tchalenko, J.S. (1967) Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear, *Géotechnique*, 17(4), pp. 309-328
- NTNU (2014) *Utvidet tolkningsgrunnlag for vingebor, Resultater fra forprosjekt ved NTNU*. NTNU-rapport levert il NIFS desember 2014. Gylland A.S.
- NVE (2013) *State of the art, block sampling* (in Norwegian), NVE report 41/2014, NIFS, Karlsrud, K. *et al.*
- Pilot, G. (1972) *Study of five embankment failures on soft soils*. Proc. Speaclity conference on performance of earth and earth supported structures, Purdue University, Lafayette, 1(1), pp. 81-100.
- SGI (1970). *Reduction of shear strength with respect to fineness number and sulfurcontent* (in Swedish). Summary from technical meeting 1969, Stochmolm
- SGI (1984) *Shear strength – selection in cohension soils* (in Swedish). SGI Infromation 3. 1st . Edition

- SGI (2007) *Shear strength – selection in cohesion soils* (in Swedish). SGI Information 3. 2nd. Edition. Larsson *et al.*
- Sheahan, T.C., Ladd, C.C. and Germaine, J.T. (1996) Rate-dependent undrained shear behavior of saturated clay, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 2, pp. 99-108
- Silvestri, V. and Aubertin, M. (1988) *Anisotropy and in-situ vane tests*. Vane shear strength testing in soils: Field and laboratory studies. ASTM STP 1014. pp. 88-103
- Soydemir, C. (1976) *Strength anisotropy observed through simple shear tests*. Laurits Bjerrum Memorial Volume, NGI, pp 99-113
- Trak, B., La Rochelle, P., Tavenas, F., Leroueil, S. And Roy, M. (1980) A new approach to the stability analysis of embankments on sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(4), pp. 526-544
- Wiesel, C.E. (1973) *Some factors influencing in-situ vane test results*. ICSMFE 8, Moscow, 1.2, pp 475-479
- Wroth, C.P. (1984) The interpretation of in situ soil tests, *Géotechnique*, 34(4), pp. 449-489



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no

