NVE

Jernbaneverket

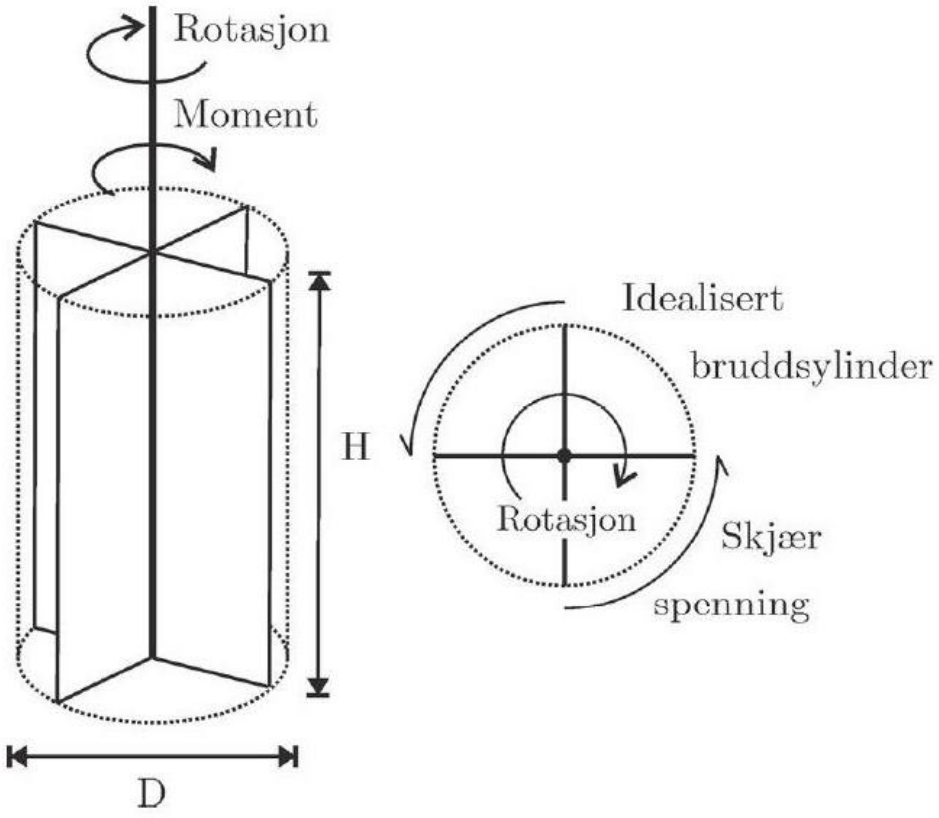
Statens vegvesen

Utvidet tolkningsgrunnlag for vingebor

Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6 Kvikkleire

79
2015

RAPPORT



NIFS
NATURFARE
INFRASTRUKTUR - FLOM - SKRED

Utvidet tolkningsgrunnlag for vingebor

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktør:

Forfattere: Anders Samstad Gylland NTNU

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag:

Forsidefoto:

ISBN 978-82-410-1126-9

Sammendrag: NTNU har utført vingeborforsøk ved tre blokkprøvelokasjoner. Det har vært et steg mot å danne en vingebor-blokkdatabase med mål om et utvidet og forbedret tolkningsgrunnlag for vingebor. Det er vist et tydelig potensial for vingeboret i prosjektet, både relatert til parameterbestemmelse og bruk som kvikkleiredetektor. Men datagrunnlaget er foreløpig for tynt, rapporten anbefaler derfor et videre arbeid som omfatter et komplett testprogram på samtlige blokkprøvelokasjoner i Norge.

Emneord: Geoteknikk, in-situ testing, grunnundersøkelser, kvikkleire, vingebor, 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

NTNU
Det skapende universitet

Faggruppe for geoteknikk
Høgskoleringen 7A, 7491 Trondheim

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

RAPPORT

Rapportens tittel	Dato
Utvidet tolkningsgrunnlag for vingebor Resultater fra forprosjekt ved NTNU	11.12.2014 Antall sider/bilag 18
Saksbehandlere/forfattere Anders Samstad Gylland	Oppdragsgiver NIFS DP6 Kvikkleire
Institutt/Faggruppe Institutt for bygg- anlegg og transport, faggruppe for geoteknikk	Oppdragsgivers ref. Vikas Thakur

Sammendrag

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

Det er utført en serie vingeborforsøk som et første steg mot å danne en vingebor-blokkdatabase med mål om et utvidet og forbedret tolkningsgrunnlag for vingebor, i likhet med arbeidet som er gjort med CPTU. Ved å utføre vingeborforsøk på lokasjoner hvor det allerede er testet blokkprøver vil man raskt kunne generere et stort datasett med høy kvalitet. Det er her fokusert på korrelasjoner mellom vingebor og aktiv udrenert skjærfasthet, stivhet samt faktorer som forbedrer vingeborets potensial som "kvikkleiredetektor", dvs. sensitivitet og omrøringsenergi. Ved å videreutvikle disse faktorene kan vingeboret bli et verdifullt verktøy i kartlegging og beskrivelse av kvikkleireforekomster.

NTNU har utviklet og bygget et nytt vingeborinstrument og kjørt vingeborforsøk på tre blokkprøvelokasjoner; Tiller, Esp og Glava. Det er vist at det er mulig å etablere en korrelasjon mellom udrenert skjærfasthet fra vingebor og aktiv treaks som funksjon av plastisitetsindeks samt at det er et potensial i å utlede stivhetsparametere og overkonsolidering fra vingeboret. Ang. sensitivitet er det ikke en-til-en samsvar mellom hva som måles av vingeboret og hva som måles med konus i laboratoriet. Vingeboret ser ut til å måle for høy omrørt skjærfasthet, spesielt ved dypere sonderinger i sensitive masser. Dette er et sentralt punkt å utrede videre med tanke på vingebor som kvikkleiredetektor. Samtidig er det mulig å tolke ut parametere for evaluering av skredkonsekvens fra vingeboret.

Totalt sett er det vist et tydelig potensial for vingeboret i dette prosjektet, båre relatert til parameterbestemmelse og bruk som kvikkleiredetektor, og arbeidet anbefales utvidet med et komplett testprogram 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 VINGEBORINSTRUMENT 4

3 FORSØKSLOKALITETER 5

4 VINGEFORFORSØK 6

4.1 Dybdeprofil, s_u og s_r 6
4.2 Arbeidskurver 6

5 KORRELASJONER 8

5.1 Aktiv skjærfasthet 8
5.2 Stivhet 10
5.3 Omrørt skjærfasthet og sensitivitet 11
5.4 Omrøringsenergi og $S_{t,90}$ 12
5.5 Overkonsolidering 13

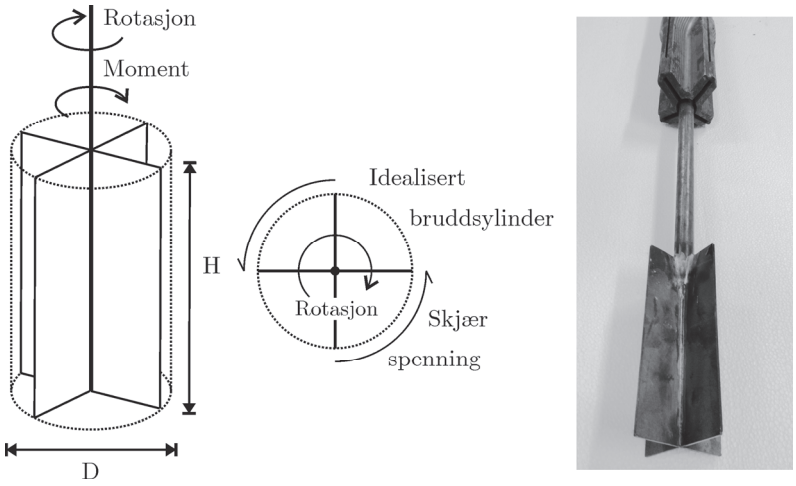
6 OPPSUMMERING OG DISKUSJON 14

7 KONKLUSJON OG ANBEFALINGER 16

REFERANSER 17

1 BAKGRUNN

Vingeboret består av to plater i kryss som presses ned i jorda (Figur 1). Ved ønsket dybde påføres rotasjon og resulterende moment måles. Momentet kan overføres til en ekvivalent udrenert skjærfasthet ved å gjøre antagelser om bruddforhold rundt vingen som vist i ligning (1). For rektangulær fordeling av skjærspenning på topp/bunn er $\kappa = 6$. Vingeboret brukes først og fremst i leirige jordarter.



Figur 1 Illustrasjon av vingebor

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

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

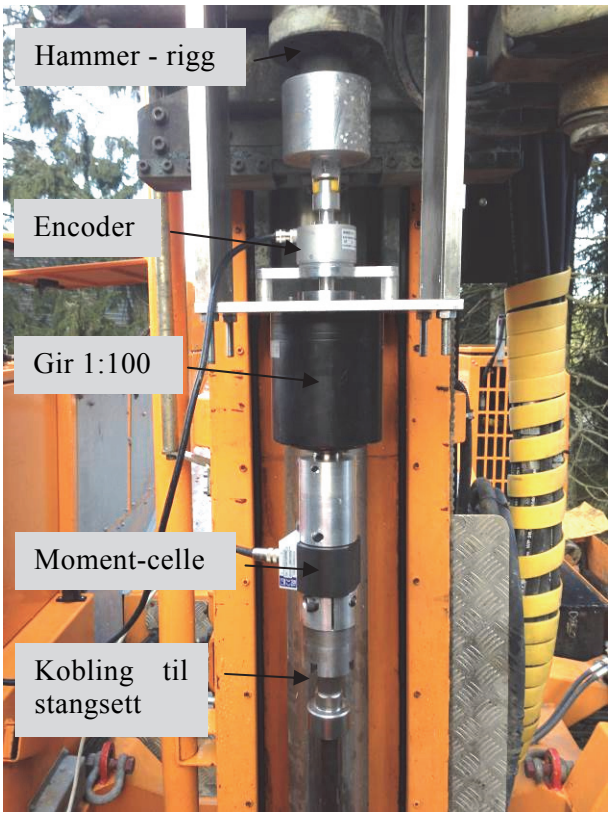
Arbeidet presentert i denne rapporten tar sikte på å forbedre tolkningsgrunnlaget for vingeboret. Ett aspekt er tolkning av udrenert skjærfasthet, andre aspekter er tolkning av avledede parametere som OCR og stivhet. Ett annet aspekt er bruk av vingebor som «kvikkleiredetektor». En aktuell problemstilling i det geotekniske landskapet i Norge i dag er påvisning og avgrensning av kvikkleireforekomster. Trykksonderinger som totalsondering og CPTu kan indikere kvikkleire, men resultatene er ikke entydig pålitelige (NIFS 2012). Det er derfor nødvendig med utstrakt prøvetaking for sikker påvisning av kvikkleire. En av styrkene til vingeboret er muligheten til direkte å kunne gi sensitivitet in-situ i og med at man kan måle omrørt skjærfasthet. I dette ligger det et potensiale til å bruke vingebor mer aktivt i arbeid med kvikkleirepåvisning, og dermed redusere behov og omfang av prøvetaking. Samtidig vil man kunne få fasthet og stivhetsdata fra samme boring.

Eksisterende tolkningsgrunnlag for vingeboret inneholder betydelig spredning og grunnlaget er ikke i utstrakt grad basert på høykvalitets blokkprøver. I denne rapporten startes arbeidet med å bygge opp en vingebor-blokk-database for å gi et oppdatert tolkningsgrunnlag langs samme linjer som gjort av Karlsrud *et al.* (2005) for CPTU. Grunntanken er å utføre vingeborforsøk på alle lokasjoner i Norge hvor det eksisterer data fra blokkprøver. Denne rapporten baserer seg på et innledende sett med forsøk fra tre felter i Trøndelag; Tiller, Esp og Glava.

2 VINGEBORINSTRUMENT

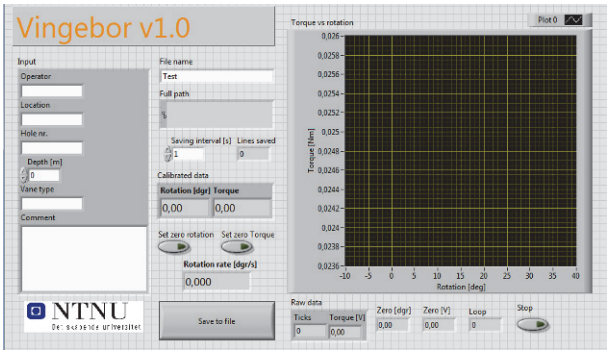
For utførselen av vingeborforsøkene har NTNU utviklet og bygget et vingeborinstrument for forskningsformål og rutineproduksjon av vingeborforsøk (Figur 2, Figur 4). Rotasjonsenheten er bygd inn på undersiden av borhammeren på borerigg (Figur 3). Rotasjon fra borhammeren på boreriggen benyttes for å påføre moment. Denne rotasjonen (vinkel og hastighet) måles med en encoder. Det er ikke mulig å få borhammeren til å rotere kontrollert med såpass lav hastighet som skal påføres under et vingeborforsøk (0,2 grader/s). Det er derfor satt inn et gir (1:100). Påført moment måles direkte under giret. Kobling mellom vingeborinstrument og stangsett gjøres med en egenutviklet glidekobling som tillater en viss grad av skjevhet i systemet.

Figur 2 Vingebor, utførelse i felt



Figur 3 NTNU-vingebor

Figur 4 Vingebor, utførelse i felt



Figur 5 Vingebor, programvare

Det er utviklet et tilpasset program for logging av moment, rotasjon og rotasjonshastighet på ekstern PC (Figur 5). Kontinuerlig logging av arbeidskurven er nødvendig for å hente ut informasjon om jordens motstand gjennom hele rotasjonsforløpet. Boreriggens egne systemer for

logging benyttes ikke, riggens systemer brukes kun for styring av rotasjonshastighet. For manøvrering av stangsystem opp og ned benyttes boreriggens chuck. Systemet er tilpasset et stort spenn av rotasjonshastigheter og måler rotasjon med en nøyaktighet på 1/144000 grader. Systemet er konstruert for et maksimalt moment på 100 Nm og har gjennomgående IP67-klassifisering.

Selve vingeboret er levert av GeoTech AB. Det har beskyttelsessko og glippkobling for måling av friksjon i systemet. Ø22 mm innerstenger er benyttet.

Forsøkene er utført i henhold til SVV HB R211. For forsøkene rapportert her er det brukt ving med diameter 65 mm og høyde 130 mm.

3 FORSØKSLOKALITETER

Tre lokaliteter hvor det er tatt blokkprøver er inkludert i denne rapporten. Lokasjon er vist i Figur 6. Tiller har gjennom en årrekke vært NTNUs forsøksfelt for kvikkleire. Feltet består av et øvre sensitivt lag (ned til ca 8 m) og et nedre kvikkleirelag (omrørt skjærfasthet = 0,1 kPa). Det er her tatt blokkprøver med Sherbrooke- og NTNU miniblokkprøvetaker. Forsøksfelt Esp ligger like ved skredgropa for kvikkleireskredet som gikk i 2012 og består av kvikkleire med omrørt skjærfasthet i området 0,2-0,4 kPa. Det er her tidligere tatt blokkprøver med NTNU miniblokkprøvetaker. Glava ligger i Stjørdal og har vært et tidligere forsøksfelt for NTNU. Materialet er ikke utvasket og har en høyere plastisitet og lavere sensitivitet enn Tiller og Esp. Det er tidligere tatt blokkprøver med Sherbrooke blokkprøvetaker på Glava. En oppsummering av parametere for feltene er gitt i Tabell 1.

Figur 6 Forsøkslokaliteter (norgeskart.no)

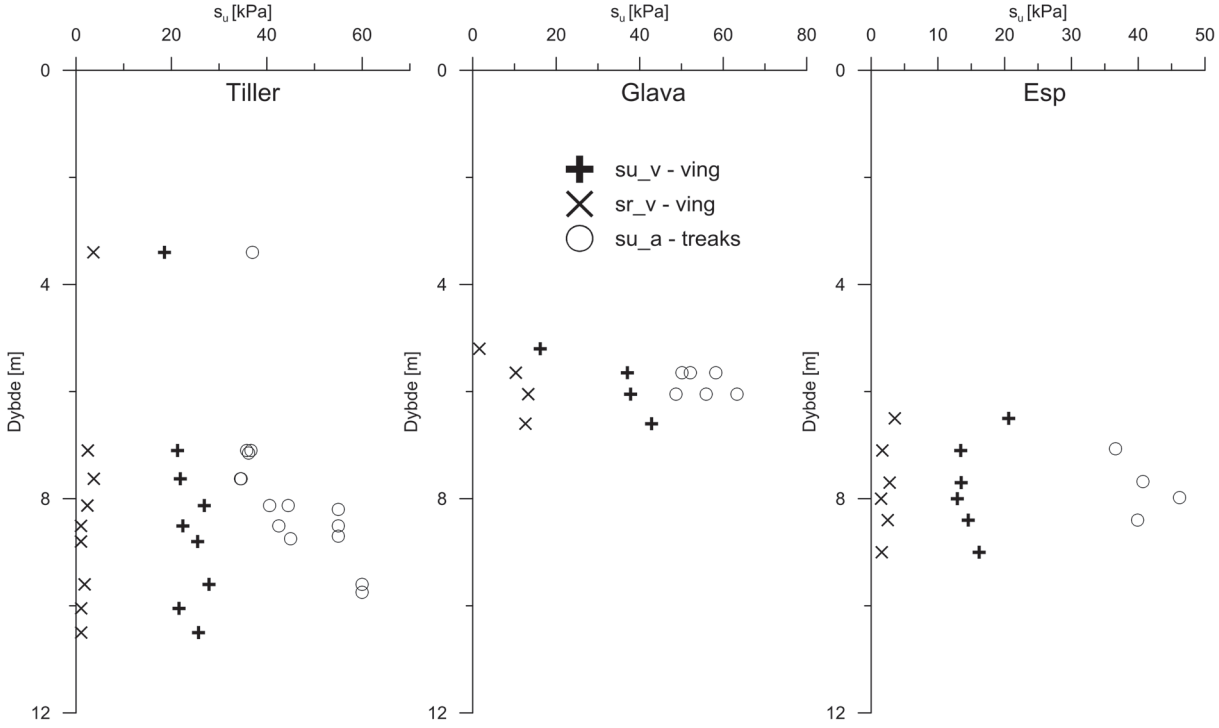
Tabell 1 Oppsummering av indeksparametere

Lokasjon	w [%]	I_p [%]	S_t [-]	OCR [-]	Leirinnhold [%]
Esp	36-40	4,5-6,0	70-100	1,6-1,8	31-32
Glava	37-39	17-18	7-10	4,0	30-33
Tiller	36-44	5-10	25-250	1,5-3,5	31-42

4 VINGEFORFORSØK

4.1 Dybdeprofil, s_u og s_r

Dybdeprofiler for udrenert skjærfasthet fra utførte vingeborforsøk sammenstilt med aktive treaksialforsøk fra blokkprøver for de tre lokasjonene er oppsummert i Figur 7. Omrørt skjærfasthet fra vingebor er også inkludert i figuren. Totalt er det utført 19 vingeborforsøk. For de tre lokasjonene er det totalt 23 aktive treaksialforsøk fra blokkprøver kjørt på dybder tilsvarende vingeborforsøkene. Blokkprøvedata fra Tiller er hentet fra Ørbech (1999), Gylland *et al.* (2013) samt nyere testing av blokkprøver ved NTNU. Blokkprøvedata for Glava er hentet fra Sjursen (1996). Blokkprøvedata for Esp er basert på nyere testing av blokkprøver ved NTNU. For tolkning av vingebor er det benyttet ligning (1) med $\kappa = 6$.



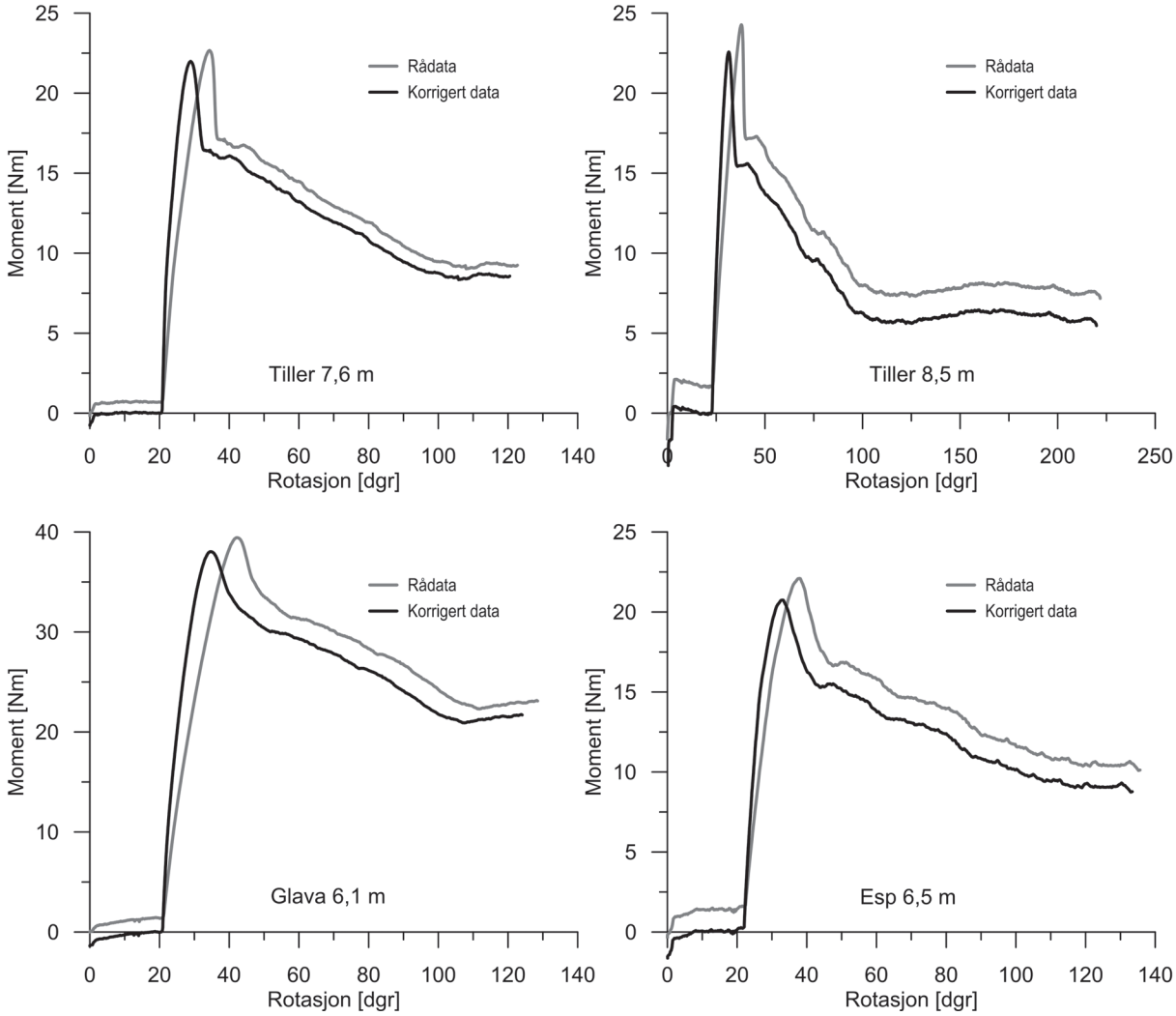
Figur 7 Dybdeprofil for udrenert skjærfasthet, Tiller, Glava og Esp

4.2 Arbeidskurver

Et utvalg arbeidskurver fra de tre lokasjonene er vist i Figur 8. Eksemplene viser logget rådata og korrigert kurve. Korrigeringen består i å ta hensyn til rotasjon i stangsystemet og friksjon i vingeborsystemet. Friksjon måles i glippkoblingen de første ca. 20-25 gradene med rotasjon. Denne verdien trekkes fra målt moment i korrigeringen. Målt rotasjon på topp av stangsystemet

består av to komponenter: rotasjon av vinge i bakken og torsjonsrotasjon i stangsystem. Rotasjon i stangsystem kan regnes ut frakjent torsjonsstivhet av stengene, radius, stanglengde og moment. Denne rotasjonen trekkes fra målt rotasjon i korrigeringen for å få rotasjon av vingebor i bakken.

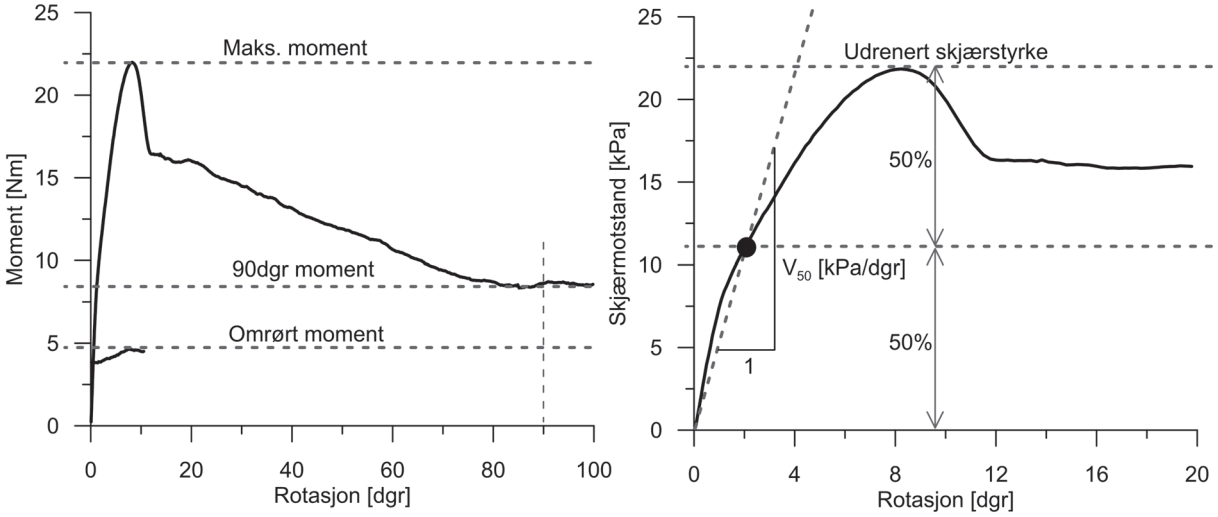
Eksemplene i Figur 8 viser hvordan maksimalt moment mobiliseres ved en rotasjon i området 6-10 grader. Noe avhengig av sensitiviteten vil maksimalt moment etterfølges av et distinkt fall i moment, før kurven flater ut til en nær konstant reduksjon i moment ved økende rotasjon. Ved ca. 90 grader rotasjon av vingeboret flater kurven ut til å bli nær konstant. Dette tilsvarer en situasjon hvor en full sirkel er skjært av vingeboret i bakken. Forsøk med rotasjon opp til 360 grader indikerer at nivået ved 90 grader rotasjon holdes jevnt.



Figur 8 Eksempler på arbeidskurver fra vingeborforsøkene

For å analysere dataene er det definert et sett med parametere for å beskrive oppførselen med tanke på stivhet og omrøringsenergi (Figur 9). Maksimalt moment (T_{max}) tolkes til udrenert skjærfasthet ($s_{u,v}$) mens moment etter omrøring tolkes til omrørt skjærfasthet ($s_{r,v}$). Vingeborsensitiviteten blir da $S_{t,,v} = T_{max} / T_{omrørt}$. Moment ved 90 grader rotasjon brukes her for å definere parameteren $S_{t,90} = T_{max} / T_{90}$. Denne parameteren tilsvarer en sensitivitet og er et mål på omrøringsenergi. En høy verdi tilsier at materialet lett mister sin fasthet under omrøring, mens en lav verdi indikerer større motstand mot å tape fasthet under omrøring. Det er mulig å definere andre parametere for å beskrive samme egenskap, $S_{t,90}$ er valgt her pga. den enkle definisjonen. Det er ikke nødvendigvis noen sammenheng mellom sensitivitet relatert til omrørt skjærfasthet, målt etter 25 raske rotasjoner av vingeboret ($S_{t,,v}$) og $S_{t,90}$.

For å tolke ut stivhet fra vingeborforsøkene, er parameteren V_{50} [kPa/grad] definert som vist i Figur 9. Analogt til f.eks. treaksialforsøk og tolkning av E_{50}, velges et punkt på arbeidskurven som er 50% av maks skjærfasthet for å gi en representativ helning på kurven i området før brudd. Også her er det mulig å benytte andre beskrivelser av kurvens helning. V_{50} er valgt pga. den enkle definisjonen.



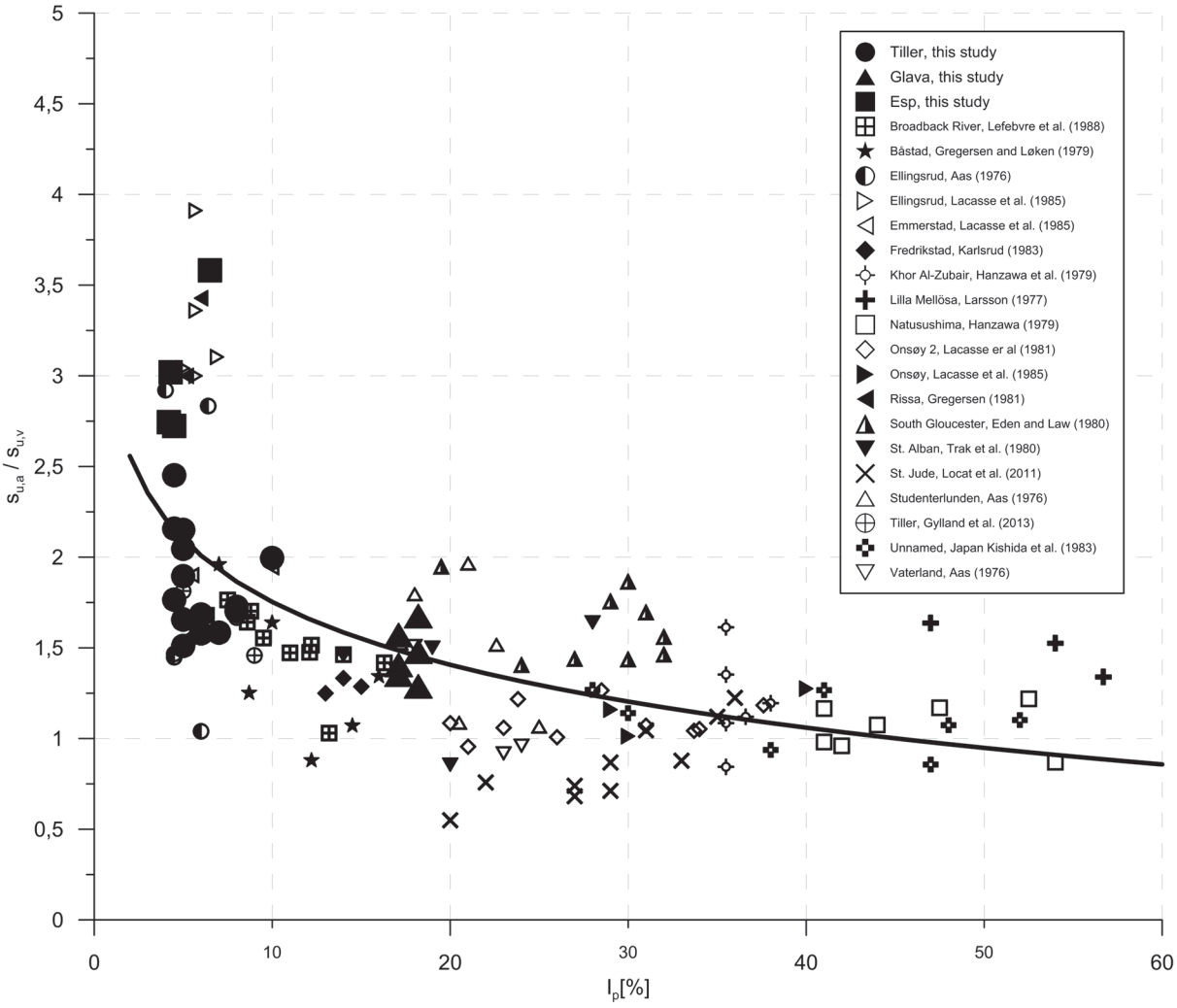
Figur 9 Definisjon av parametere

5 KORRELASJONER

Her presenteres korrelasjoner mellom data fra vingeborforsøkene og parametere som aktiv udrenert skjærfasthet, stivhet, OCR og sensitivitet. Det er fokusert på spenningsforhold og plastisitet (I_p) som korrelasjonsparametere da disse er to av viktigste faktorene med tanke på fasthet, stivhet og anisotropi i leire. Anisotropi er avgjørende for tolkning av vingeboret da bruddsituasjonen er dominert av skjærfasthet i et vertikalplan, mens en design-situasjon relaterer seg til horisontalplanet. Plastisitetsindeksen er den parameteren Bjerrum valgte å benytte i sin korreksjonsfaktor for vingebor (Bjerrum 1972).

5.1 Aktiv skjærfasthet

Figur 10 viser en sammenstilling av data for udrenert skjærfasthet fra aktiv treaks og vingebor ($s_{u,a}/s_{u,v}$) som en funksjon av plastisitetsindeks. Data samlet fra litteraturen er presentert sammen med data fra dette arbeidet. Hvert datapunkt representerer vingeborforsøk og treaksialforsøk fra samme dybde. Datapunktene fra litteraturen inneholder betydelig usikkerhet i form av ulike prosedyrer for vingebor og treaksialforsøk samt ulikt utstyr og ulik prøvekvalitet. Disse bør derfor betraktes som et bakteppe for de nye forsøkene.

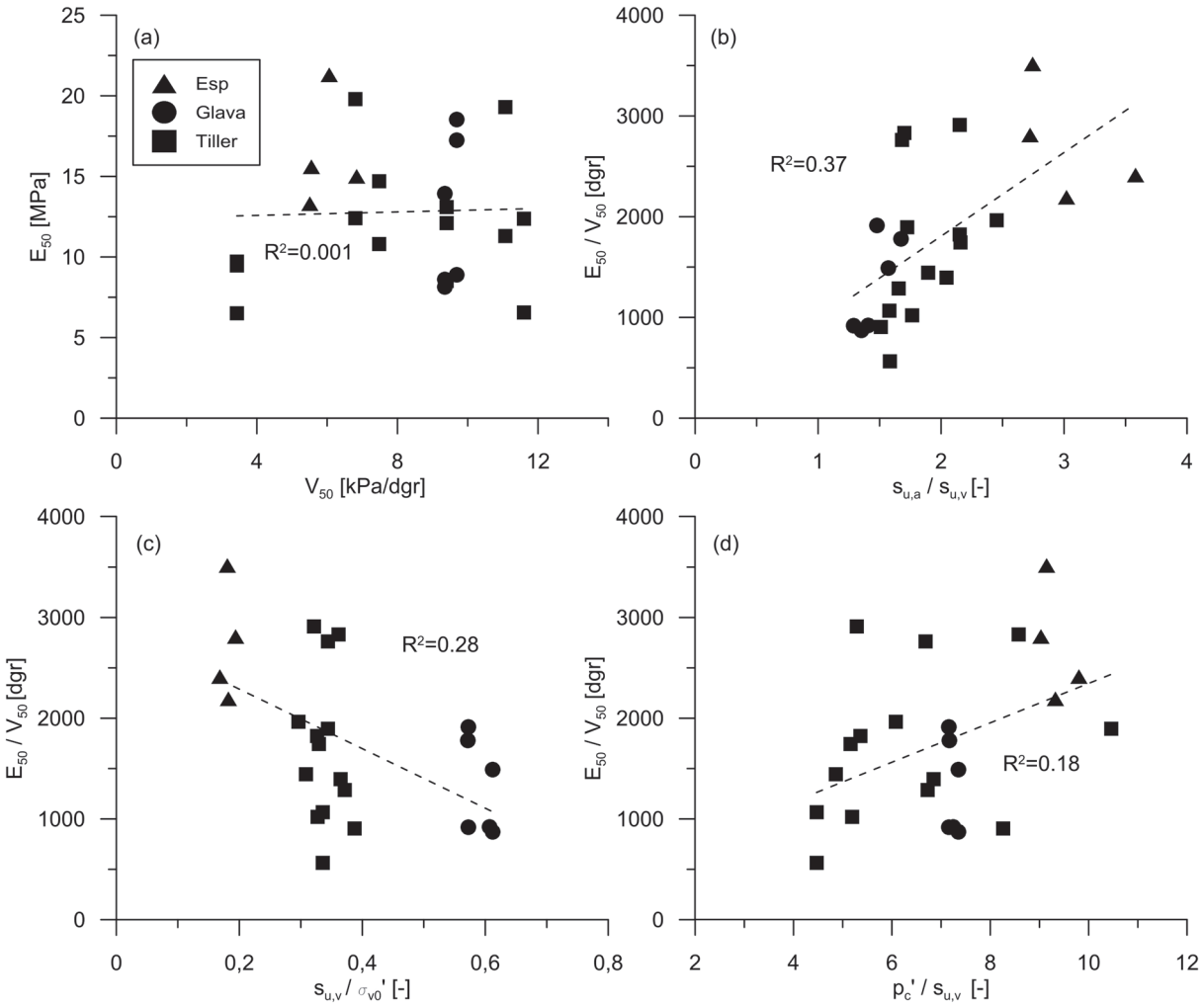


Figur 10 Aktiv udrenert skjærfasthet

Det er en klar trend i økende forskjell i udrenert skjærfasthet fra vingebor og aktiv treaks med reduserende I_p. For I_p over ca 25% er forholdstallet $s_{u,a}/s_{u,v}$ nærmest konstant, mens for I_p under 25% øker forholdstallet fra ca 1,2 til ca 3,5 når I_p nærmer seg 5%. De høyeste forholdstallene er styrt av i hovedsak tre lokasjoner; Ellingsrud, Rissa og Esp. Disse tre feltene karakteriseres av svært sensitive masser med lavt leirinnhold. De høye forholdstallene kommer ikke av høye verdier for aktiv skjærfasthet, men heller lave verdier for målt vingeborfasthet.

5.2 Stivhet

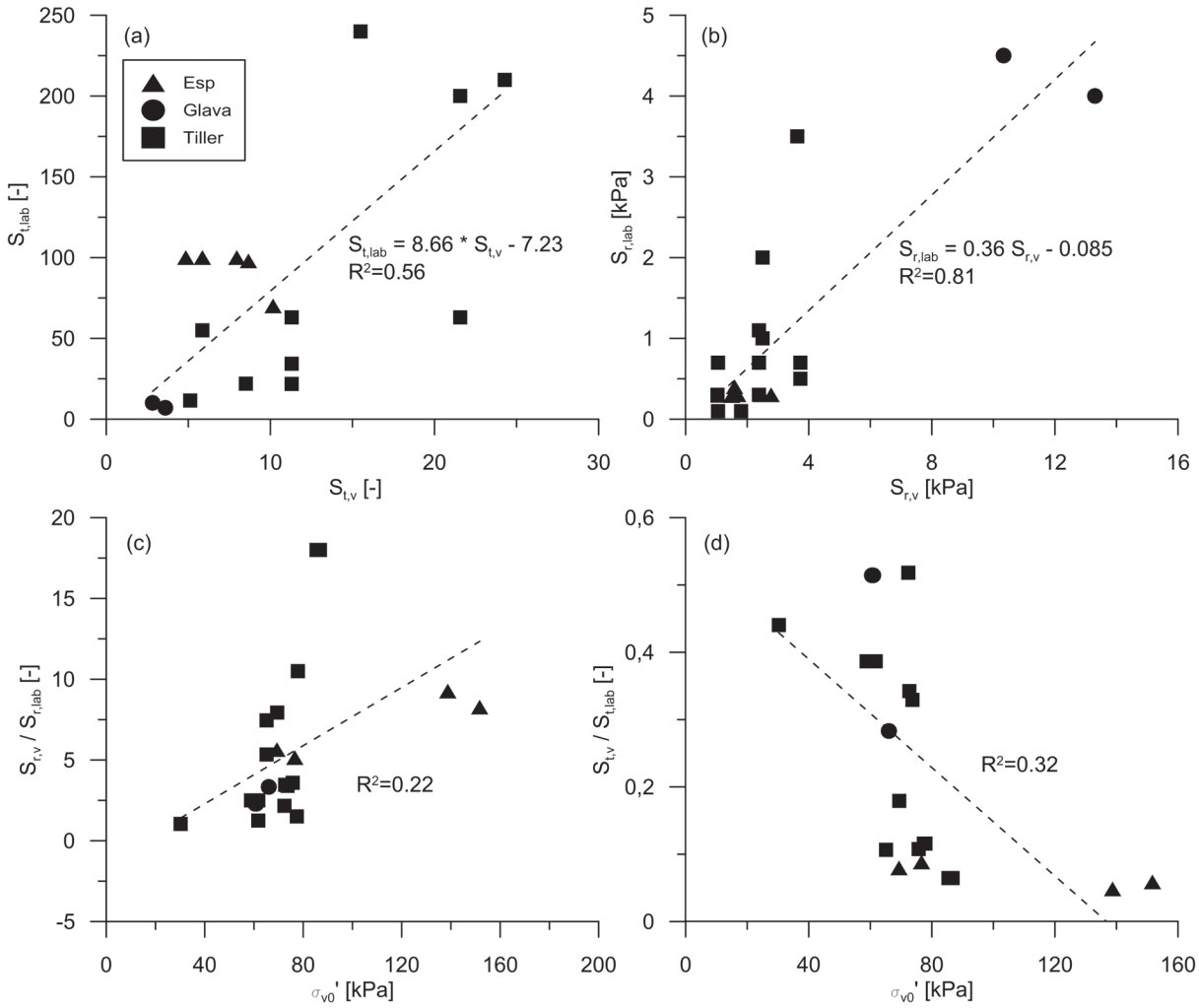
En samling plot relatert til stivhetsparameterne V_{50} fra vingeborforsøk og E_{50} fra treaksialforsøk er vist i Figur 11. Det kan i (a) ikke identifiseres en klar relasjon direkte mellom V_{50} og E_{50}, men en trend med økende E_{50} / V_{50} for økende $s_{u,a}$ / $s_{u,v}$ kan tolkes ut i (b). Det kan også tolkes ut en trend med økende E_{50} / V_{50} for økende $s_{u,v}$ / σ'_{v0} i (c). Det er videre en mulig trend med reduserende E_{50} / V_{50} for økende $p_c'/s_{u,v}$ (tilsvarer α i Figur 15) som vist i (d). Sammenstillinger av stivhetsdata mot effektiv overlagring, I_p, OCR og sensitivitet gir ingen korrelasjon.



Figur 11 Stivhet

5.3 Omrørt skjærfasthet og sensitivitet

En av styrkene til vingeboret er muligheten for å måle omrørt skjærfasthet in-situ og dermed bestemme sensitivitet. Erfaringsmessig er det ikke alltid samsvar mellom sensitivitet som er målt i laboratoriet med konustest og sensitivitet målt med vingebor i felt. Figur 12 undersøker dette videre. I (a) vises sammenheng mellom sensitivitet fra laboratorieforsøk og vingeborforsøk. Det indikeres en lineær sammenheng, men spredningen er betydelig. Det vises også at laboratoriemålt sensitivitet er jevnt over høyere enn vingeborsensitivitet. Denne forskjellen skyldes i hovedsak ulik måling av omrørt skjærfasthet. Dette er vist i (b) hvor omrørt skjærfasthet fra laboratoriet er lavere enn hva som måles med vingeboret. Det antydes en klar lineær trend.

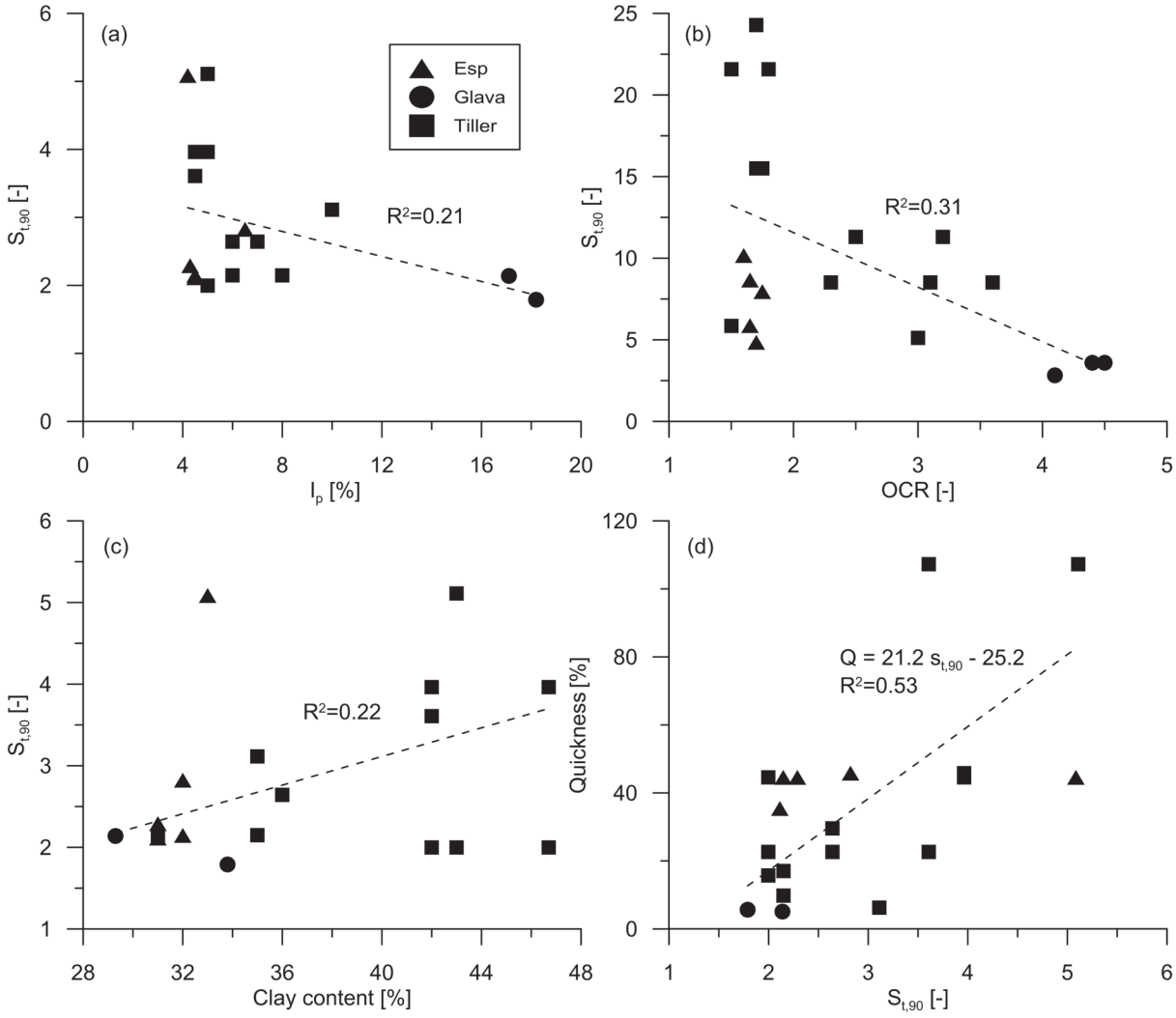


Figur 12 Omrørt skjærfasthet og sensitivitet

Forskjellen i omrørt skjærfasthet ser ut til å øke med økende vertikal effektiv overlagring (dybde) som vist i (c). Omrørt skjærfasthet fra vingeboret har en økende trend med dybden samtidig som laboratoriemålt skjærfasthet ikke følger samme trend. Dette gir redusert forhold mellom vingeborsensitivitet og laboratoriesensitivitet med dybden som vist i (d). Hvis laboratoriesensitivitet benyttes som referanse, vil vingeboret underestimere sensitivitet, spesielt ved dypere sonderinger.

5.4 Omrøringsenergi og $S_{t,90}$

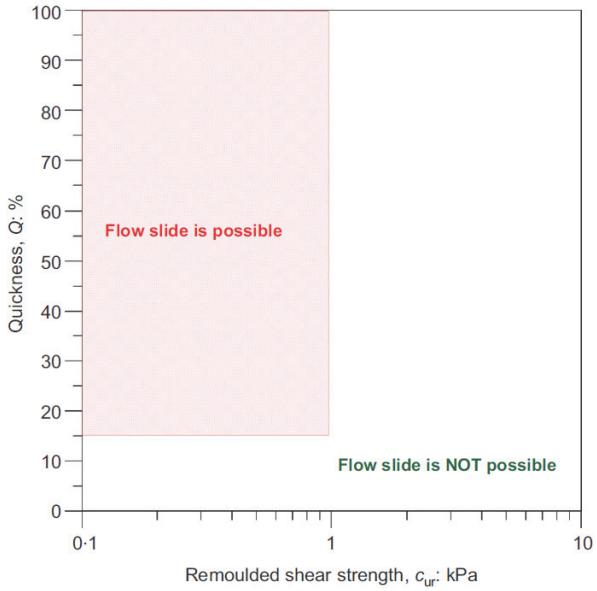
Omrøringsenergi relaterer seg til det arbeidet som må til for å gå fra intakt tilstand til omrørt tilstand. Erfaringsmessig vil leirer med høyt leirinnhold og høy plastisitet være tyngre å omrøre enn leirer som er mer siltige og med lavere plastisitet. Det er ikke nødvendigvis noen sammenheng mellom sensitivitet og omrøringsenergi. Her er parameteren $S_{t,90}$ brukt for å vurdere omrøringsenergi fra vingeboret. Figur 13 viser noen sammenhenger. I (a) ses en svak trend med reduserende $S_{t,90}$ for økende plastisitetsindeks. Det er også en svak trend med økende $S_{t,90}$ for økende leirinnhold som vist i (c). Noe overaskende viser (b) en trend med reduserende $S_{t,90}$ for økende OCR. Dette er uventet i og med at økende OCR forventes å gi større motstand mot omrøring. Dette resultatet kan skyldes det begrensede datautvalget benyttet her hvor materialet med høy OCR (Glava) også er det med lavest sensitivitet.



Figur 13 Omrøringsenergi og $S_{t,90}$

Thakur & Degago (2012) har foreslått en enkel test for å avgjøre potensiale for omfattende kvikkleireskred; quickness-test. Konseptet er at omrørt leire fylles inn en ring med definert geometri. Ringen står på en flate og løftes så rett opp. Man måler nedsynkning av leirmassen relativt til opprinnelig høyde inne i ringen. Denne verdien er definert som quickness. Basert på et datasett av skredhendelser er det foreslått en klassifisering som vist i Figur 14 for estimering av potensiell skredutvikling basert på quickness og omrørt skjærstyrke. Her er relasjonen

$Q = 17 * s_{r,lab}^{-0.8}$ fra Thakur & Degago (2012) benyttet for å estimere quickness for datasettet ut fra omrørt skjærstyrke. Resultatet er vist i Figur 13d hvor en lineær sammenheng mellom Q og $S_{t,90}$ kan tolkes ut.



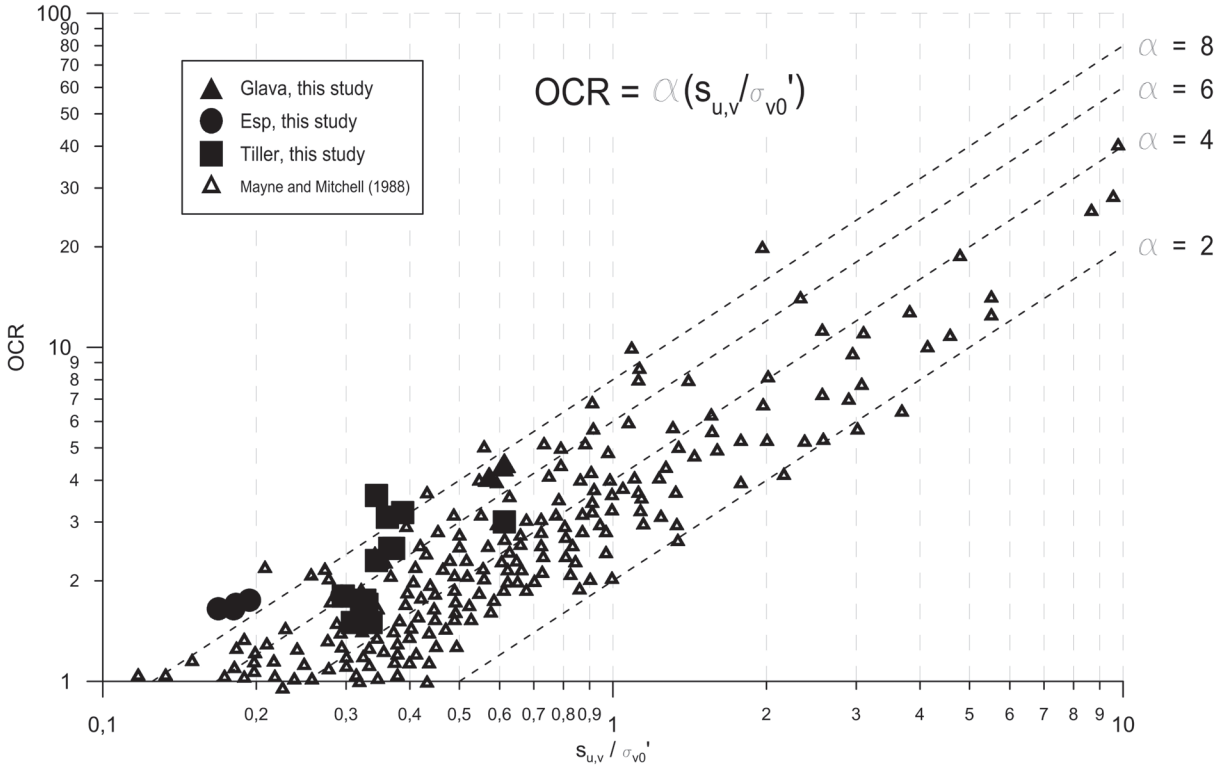
Figur 14 Quickness og skredutvikling (Thakur & Degago 2012)

5.5 Overkonsolidering

Det er gjort arbeid på tolkning av overkonsolidering fra vingebor tidligere. Et av studiene er Mayne & Mitchell (1988) hvor det er benyttet en SHANSEP-tankegang (Ladd & Foott 1974) som viser at det er en sterk sammenheng mellom OCR og udrenert skjærstyrke (ligning (2)). Ved å kjenne den udrenerte skjærfastheten fra vingeboret, sammen med passende SHANSEP-parametere (α og m), kan overkonsolidering bestemmes.

$$\frac{s_u}{\sigma'_{v0}} = \alpha OCR^m \qquad (2)$$

I Mayne & Mitchell (1988) er det samlet et betydelig datasett for å undersøke validiteten av denne sammenhengen for vingebor. Datasettet er gjengitt her i Figur 15 sammen med data samlet i dette prosjektet. Datasettet til Mayne & Mitchell (1988) viser en klar trend med økende $s_{u,v}/\sigma_{v0}'$ for økende OCR. Linjer for fire proporsjonstall (α) er tegnet inn i figuren. De tre norske leirene undersøkt i dette prosjektet ligger innenfor datatrenden og indikerer α-verdier i området 6-8.



Figur 15 OCR og $s_{u,v}$ / σ_{v0}' (tilpasset fra Mayne & Mitchell 1988)

6 OPPSUMMERING OG DISKUSJON

Det er utført et sett vingeborforsøk som et første steg mot å danne en vingebor-blokkdatabase med mål om et utvidet og forbedret tolkningsgrunnlag for vingebor, tilsvarende arbeidet som er gjort med CPTU (Karlsrud *et al.* 2005). Ved å utføre vingeborforsøk på lokasjoner hvor det allerede er tatt og testet blokkprøver vil man raskt kunne generere et stort datasett med høy kvalitet.

Det er her fokusert korrelasjoner mot aktiv udrenert skjærfasthet og stivhet samt faktorer som forbedrer vingeborets potensial som "kvikkleiredetektor", dvs. sensitivitet og omrøringsenergi. Ved å videreutvikle disse faktorene kan vingeboret bli et verdifullt verktøy i kartlegging og beskrivelse av kvikkleireforekomster.

NTNU har utviklet og bygget et nytt vingeborinstrument og kjørt vingeborforsøk på tre blokkprøvelokasjoner; Tiller, Esp og Glava. Utstyret har vist seg å fungere problemfritt.

Sammenstilling av data med tanke på en korrelasjon mellom aktiv udrenert skjærfasthet og vingeborfasthet som funksjon av plastisitetsindeks viser en klar trend. For I_p over ca 25% er forholdstallet $s_{u,a}/s_{u,v}$ nærmest konstant i området 1,0-1,3, mens for I_p under 25% øker forholdstallet fra ca 1,2 til ca 3,5 når I_p nærmer seg 5%. Spesielt siltige sensitive leirer gir høye forholdstall. Dette kan komme av forstyrrelse under nedpressing av vingeboret. Materialet samlet her viser et tydelig potensial i å kunne relatere aktiv udrenert skjærfasthet til målt vingeborfasthet, men for lavplastiske leirer innebærer dette en korreksjon i størrelsesorden 100-150%. Dette er betydelig og kan ikke gjøres i en designsituasjon uten et solid datagrunnlag. En korreksjonsfaktor for vingebor relatert til aktiv udrenert skjærfasthet er diskutert nærmere i NTNU (2014).

Angående stivhet ser ut til å være sammenheng mellom E_{50} og V_{50} forutsatt at det brukes riktig korrelasjonsparametere. Det er dog stor spredning og det er nødvendig med et bredere datagrunnlag for å konkludere med sikkerhet. E_{50} / V_{50} sett i sammenheng med $s_{u,v}$ / σ'_{v0} ser ut til å være mest relevant å studere i videre arbeid.

Det er vist en klar sammenheng mellom sensitivitet som målt med konus i laboratoriet og som målt med vingebor i felt. Samtidig er det er stor spredning i datasettet og det er en klar trend at

sensitivitet fra vingebor er lavere enn hva som måles i lab. Denne forskjellen øker jo dypere vingeborforsøket er. Hovedårsaken ligger i at vingeboret måler til dels betydelig høyere omrørt skjærfasthet enn hva som måles i lab. Det kan være flere årsaker til dette. En faktor er friksjon i vingeborinstrumentet. Selv om denne måles, gir skjærfasthet med mot 0,1 kPa et momentbidrag som er i samme størrelsesorden som usikkerheten i målingen. Videre så er omrøringsprosessen i felt og lab forskjellig. Mens man i laboratoriet gjør en fullstandig og homogen omrøring, er prosessen rundt et vingebor karakterisert av omrøring i kun et tynt sjikt. Her kan effekter av lokal drenasje av poreovertrykk samt effekter relatert til parallellorienterte partikler spille en rolle. Det er med andre ord ikke samme omrøring som gjøres. Dette temaet er belyst i for eksempel DeGroot *et al.* (2012) hvor det er vist en klar betydning av testinstrument og omrøringsmetode på målt omrørt skjørfasthet.

Omrøringsenergi er et tema som ikke er berørt i omfattende grad i litteraturen. Parameteren $s_{t,90}$, som definert her, ser ut til å kunne være relevant i denne sammenhengen, men datagrunnlaget er for smalt til å kunne konkludere. Det er vist en sammenheng mellom $s_{t,90}$ og Quickness, som definert av Thakur & Degago (2012). Dette viser at det kan være mulig å si noe om konsekvensen av en evt. skredhendelse basert på vingeborsonderinger.

Det eksisterer prosedyrer for tolkning av OCR fra vingeborforsøk. Datasettet som er samlet i dette prosjektet viser samme trend som eksisterende datasett i litteraturen og tolkning av OCR burde være mulig basert på dette.

Vingeboret kan være et nyttig og viktig instrument for geoteknikere i Norge. Det er vist gjennom dette arbeidet et potensial for å forbedre og utvide de parametrene man kan tolke ut fra sonderingsmetoden. For flere av sammenhengene er det betydelig spredning i datagrunnlaget. Noe av dette skyldes det begrensede datagrunnlaget samt iboende variasjoner i selve materialet. Ulike prosedyrer for utførelse av treaksialforsøk i laboratoriet for de dataene som er inkludert spiller også inn. Samtidig er det verd å merke seg at det også er betydelig spredning i det datagrunnlaget som i dag benyttes for tolkning av CPTu (Karlsrud *et al.* 2005). Ved et utvidet vingebor-datasett vil det være mulig å kvantifisere og sammenligne spredning og usikkerhet i tolkningsgrunnlaget for disse to sonderingsmetodene.

7 KONKLUSJON OG ANBEFALINGER

- Det er vist en klar mulighet for å etablere en korrelasjon mellom udrenert skjærfasthet fra vingebor og aktiv treaks som funksjon av plastisitetsindeks. For å kunne gjøre dette med sikkerhet trengs et utvidet datagrunnlag.

- Det et potensial i å kunne tolke ut stivhetsparametere fra vingeboret, men det kan ikke konkluderes entydig basert på tilgjengelig data.

- Vingebor underestimerer sensitivitet i dybden sammenlignet med laboratoriemålinger. Årsaken til dette er ikke fullt ut kartlagt og det trengs mer forskning for å få en bedre forståelse. Ved praktisk bruk er det en mulighet å etablere en korreksjonsfaktor for vingeborsensitivitet. Dette er et sentralt punkt å utrede videre med tanke på vingebor som kvikkleiredetektor.

- Det er mulig å tolke ut parametere for evaluering av skredkonsekvens fra vingeboret (omrøringsenergi og quickness). Dette er en styrke med tanke på vingebor som kvikkleiredetektor og et aspekt som anbefales undersøkt videre.

- Det er mulig å tolke OCR fra vingeborforsøk.

- Det er vist et tydelig potensial for vingeboret i dette prosjektet, båre relatert til parameterbestemmelse og bruk som kvikkleiredetektor, og arbeidet anbefales utvidet med et komplett testprogram som 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

Bjerrum, L. (1972) *Embankments on soft ground*, ASCE, Spec. Conf. Perform. Earth and Earth-Support. Struct., Lafayette, 2, pp. 1-45

DeGroot, D., Lunne, T., Andersen, K.H. and Boscardin (2012) Laboratory measurement of the remoulded shear strength of clays with application to design of offshore infrastructure. *Proc. 7th Conf. on Offshore site investigation and geotechnics*, London, pp. 355-364

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

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., 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

Karlsrud, K. (1983) *Analysis of a small slide in sensitive clay in Fredrikstad, Norway*. SGI Report 17, pp. 175-184

Karlsrud, K., Lunne, T., Kort, D.A. and Strandvik, S. (2005) *CPTU correlations for clays*. ICSMFE 16, Osaka, 2, pp. 693-702

Kishida, T., Hanzawa, H. And Nakanowatari, M (1983) Stability analysis with the simple and the advanced φ=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. (1977) *Basic behavior of Scandinavian soft clays*. SGI Report 4, pp. 1-108

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

Mayne, P. & Mitchell, J. (1988) Profiling overconsolidation ratio in clays by field vane. *Canadian Geotechnical Journal*, 25, pp. 150-157

NIFS (2012) *Detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder*. NVE rapport 46/2012. Sandven, R. *et al.*

NTNU (2014) *Tolkning av aktiv udrenert skjærfasthet fra vingebor*. NTNU-rapport levert NIFS

desebmer 2014. Gylland, A.S.

Ørbech, T. (1999) *Prøveforstyrrelse i leire.* Masteroppgave, NTNU

Sjursen, M.A. (1996) *Prøveforstyrrelse i leire og silt*. Masteroppgave, NTNU

Thakur, V. & Degago, S. (2012) Quickness of sensitive clays. *Géotechnique Letters*, 2, pp. 81-88

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

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no