FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK
BERGMEKANIKK/GEOTEKNIKK 2021

NY LABORATORIEPROSEDYRE FOR INNBLANDINGSFORSØK AV BINDEMIDDELSTABILISERT LEIRE

A new laboratory procedure for preparing soil specimens admixed with binders

Tonje Eide Helle[1], Eivind Schnell Juvik[2], Simon O'Rawe[1], Marianne Dahl[2], Guro Brendbekken[1], Ingrid Hegseth[1], Pernille Wiersholm[1], Atle Gerhardsen[3], Thorbjørn Rekdal[4], Kirsten Syvertsen[5], El Hadj Nouri[2]
[1] Multiconsult, [2] Statens vegvesen, [3]Cautus Geo, [4]Argeo, [5]Norcem

SAMMENDRAG

Gjennom innovasjonspartnerskapet KlimaGrunn er det utarbeidet en ny laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk av bindemiddelstabiliserte løsmasser. Målsetningen er å forene, forbedre og på sikt erstatte de to eksisterende norske prosedyrene. Hvilken av dagens prosedyrer som benyttes varierer mellom ulike aktører, og utførelsen av prosedyrene varierer også. Dermed kan ikke resultater fra ulike laboratorier sammenlignes direkte. KlimaGrunn har utviklet nytt utstyr som sikrer homogen prøve og konstant volum i prøven under herding slik at forhåndsbestemt densitet oppnås. Temperaturen i grunnen øker etter installasjon av bindemiddelstabiliserte peler, og den forblir ofte høyere enn normalt i flere måneder etter installasjon. Styrken øker derfor raskere i felt enn i laboratoriepreparerte prøver som etter dagens prosedyrer lagres kjølig. KlimaGrunns prosedyre anbefaler å herde prøvene ved 20 °C. Laboratorieresultatene danner grunnlag for utvikling av korrelasjonsmodeller for prediksjon av styrke og stivhet i bindemiddelstabiliserte løsmasser. Sensorteknologi og seismikk benyttes for å monitorere herdeforløpet i felt og endringer av skjærbølgehastighet over tid. Feltdata korreleres til laboratorieresultatene slik at styrke og stivhet i installerte bindemiddelstabiliserte peler kan predikeres. Bedre samsvar mellom oppnådd styrke i felt og laboratorium vil bidra til optimalisering av bindemiddelmengden for lokale grunnforhold, og dermed redusere klimagassutslippene knyttet til grunnforsterkning med bindemidler.

SUMMARY

KlimaGrunn has developed a new laboratory procedure admixing soil specimens with binders, aiming to unite, improve and in the future replace the two existing Norwegian procedures. Which of the procedures and how they are conducted varies between the various laboratories. Consequently, results from different laboratories cannot be compared directly. New equipment is developed, obtaining homogeneous specimens which maintain constant volume during curing, and thereby achieve predetermined density. The temperature in the subsurface increases and often remains higher than normal for months in soils admixed with binders. Therefore, the strength develops faster in-situ than in the laboratory specimens cured at low temperatures. KlimaGrunns procedure recommends curing at 20 °C. The laboratory results form the basis for developing correlation models for prediction of strength and stiffness in soils admixed with binders. Data on the curing process and shear wave velocity collected with sensors and geophysics are to be correlated to the laboratory results for predicting in-situ strength and stiffness in the piles. Better correspondence between strength parameters measured in-situ and in the laboratory will contribute to optimize the binder content to local conditions, and thereby reduce the climate-gas emissions.

INNLEDNING

For å dokumentere bindemiddelenes evne til å stabilisere løsmasser utføres det innblandingsforsøk på laboratoriet der det prepareres prøver tilsatt bindemiddel. Prøvene herder over en viss tid før utføring av enaksialforsøk. I Norge finnes det to ulike prosedyrer for innblandingsforsøk som er beskrevet i Statens vegvesens retningslinjer «Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser» (2016) og Norsk Geoteknisk Forening (NGF) sin «Veileder for grunnforsterkning med kalksementpeler» (2012). I Sverige benyttes en egen prosedyre (Svensk Djupstabilisering 2006). Prosedyrene er stort sett like med noen mindre forskjeller. I tillegg praktiseres prosedyrene noe ulikt mellom ulike laboratorium og også blant laboranter. Dermed kan ikke resultater fra ulike laboratorieprogram sammenlignes direkte.

Det er en kjent problemstilling at styrken målt på laboratoriepreparerte prøver som oftest er lavere enn det man oppnår i bindemiddelstabiliserte peler i felt. Herdemiljøet og innblandingsarbeidet beskrevet i dagens laboratorieprosedyrer gjenskaper ikke forholdene for bindemiddelstabiliserte peler i felt. Hvilken styrke som oppnås i bindemiddelstabiliserte peler avhenger av flere faktorer som bl.a.:

- Løsmassenes egenskaper
- Type- og mengde bindemiddel
- Innblandingsarbeid (type visp, rotasjonshastighet, stigehøyde)
- Herdeprosess (tid, temperatur, overlagringstrykk)

I det følgende er de norske og svenske prosedyrene gjennomgått for å avdekke forskjeller, og for å se på hvilke elementer fra disse som bør benyttes videre i en framtidig felles prosedyre. Gjennomgangen resulterte i utarbeidelse av en ny prosedyre for innblandingsforsøk for bindemiddelstabiliserte løsmasser der målsetningen har vært å:

- forbedre samsvaret mellom herdeforholdene i felt og på laboratorium
- sikre god reproduserbarhet i resultatene uavhengig av operatør og geoteknisk laboratorium
- utvikle utstyr med lave investeringskostnader

EKSISTERENDE LABORATORIEPROSEDYRER

Følgende prosedyrer ble gjennomgått:

- Norsk Geoteknisk Forening (2012) Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler
- Statens vegvesen (2016) Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser
- Norsk Geoteknisk Forening (2020) NGFs beskrivelsestekster for grunnundersøkelser
- Svensk Djupstabilisering (2006) Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering. Rapport nr. 17

I hovedsak er prosedyrene like, men med noen mindre forskjeller:

<u>Løsmasser</u>
Både forstyrrede og uforstyrrede prøver benyttes i innblandingsforsøkene. Løsmassene som benyttes er ofte rester etter gjennomførte laboratorieprogram. Det er derfor ofte begrenset med tilgjengelig materiale. For å få nok materiale blandes (homogeniseres) derfor løsmasser fra

ulike dybder innenfor samme lagpakke. Restene homogeniseres i kjøkkenmaskin før bindemiddelet tilsettes. Kapasiteten til kjøkkenmaskinen begrenser hvor mye masser som kan homogeniseres i hver omgang. Dette igjen begrenser hvor mange prøver som kan prepareres fra samme blanding (batch).

Selv om leira fra de ulike sylinderne har like egenskaper, så kan mineralogien og kornformen variere. Dette kan påvirke hvordan leira vil reagere med bindemiddelet.

Hvordan restene lagres i tidsrommet fra prøveåpning fram til innblandingsforsøkene utføres vil også påvirke sluttresultatet. Ved noen laboratorier lagres materialet i bokser. Da vil noe av vannet kunne fordampe, og vanninnholdet i løsmassene som benyttes i innblandingsforsøkene vil dermed kunne avvike fra in-situ vanninnhold. Hvorvidt vanninnholdet i de homogeniserte massene dokumenteres og eventuelle avvik fra in-situ vanninnhold tas til følge i vurderingene er med dagens prosedyrer opp til hver enkelt saksbehandler.

Bindemiddel

I de norske prosedyrene anbefales det at bindemiddelet ikke er eldre enn 1 år. Den svenske prosedyren er strengere, og sier at bindemiddelet i åpnet beholder ikke skal være eldre enn 6 måneder.

Bindemiddelet tilsettes den homogeniserte massen, og blandes inn ved bruk av kjøkkenmaskin. Siden massen etter hvert fester seg i blandebollen anbefaler Statens vegvesen å først blande i 30 sekunder, for så å skrape massene sammen igjen før ytterligere 30 sekunder med miksing.

Reaksjonene imellom leire og bindemiddel inntrer raskt. I den svenske prosedyren er det anbefalt at alle prøver fra blandingen må være ferdig preparert (innstampet) innen 30 minutter fra tilsetting av bindemiddelet. Det foreligger ingen anbefalinger for dette i de norske prosedyrene.

Utstyr

Innstampingsutstyr og-metoder er ulike mellom de ulike prosedyrene. Iht. standard for enaksialforsøk (ISO 2017) så skal forholdet mellom høyde og diameter (H/D) for sylindriske prøver være mellom 1,8 og 2,5. I NGFs prosedyre benyttes et H/D-forhold mellom høyde og diameter på 2, mens det i R210 benyttes et H/D-forhold på 1,85. I Sverige prepareres prøvene med et H/D-forhold på 3,4. Materialet stampes lagvis inn i sylindere ved:

- NGF: et 1,2 kg lodd med diameter 20 mm slippes ned på prøven ca. 20 ganger
- R210: et komprimeringsapparat tilfører hvert lag et trykk på 200 kPa i 10 sekunder
- Svensk: en håndholdt pakningsstav benyttes for å stampe lagene inn

Densiteten som oppnås i sylinderne vil variere, og densiteten i prøvene påvirker også hvilken styrke som oppnås. Paniagua et al. (2021) fant at laboratoriepreparerte prøver preparert iht. NGFs prosedyre (NGF 2012) resulterte i en densitet ±5 % av in-situ densitet i leira. Dvs. at dersom leira har en in-situ densitet på 1,9 g/cm^3, så vil man ved å benytte denne prosedyren kunne oppnå densiteter i laboratoriepreparerte prøver på mellom 1,8 og 2,0 g/cm^3. Forskjellen i densitet skyldes luftlommer/-porer i de bindemiddelstabiliserte prøvene.

Herdemiljø

De bindemiddelstabiliserte prøvene herdes vanligvis i sylinderne som de ble stampet inn i. Endeflatene forsegles og prøvene lagres kjølig fram til forsøkstidspunkt. I NGFs og den

svenske prosedyren er det beskrevet at prøvene skal herdes ved 100 % luftfuktighet. I NGFs beskrivelsestekster for grunnundersøkelser er det krav om at prøvene skal lagres i plast for å unngå tap av vann, og de påpeker også at prøvene aldri skal lagres kjølig.

Tøyningshastighet i enaksialforsøk
Iht. gjeldende standard for enaksialforsøk (ISO 17892-7:2017) skal forsøkene kjøres med en hastighet på 1- 2 %/min. Både de norske og svenske prosedyrene anbefaler å kjøre enaksialforsøkene med en hastighet på 1- 2 %/min. Tidligere ble enaksialforsøk på leirer kjørt med en hastighet på 4 %/min, og enkelte laboratorier har også kjørt enaksialforsøk på bindemiddelstabiliserte prøver med denne tøyningshastigheten.

NY LABORATORIEPROSEDYRE

Behov for endringer i prosedyren

Det er ikke mulig å gjenskape forholdene i felt i laboratoriet, og samtidig holde kostnadene ved forsøksmetodene nede. I tillegg er løsmasser med leire/silt å anse som et inhomogent materiale. Innblandingen og reaksjonsproduktene vil variere over pelens dybde og tverrsnitt, og også over høyden og tverrsnittet i innstampede prøver. I den nye prosedyren er det derfor tatt sikte på å fastholde noen parametere for å sikre så god som mulig operatøruavhengig reproduserbarhet av prøvene slik at resultater på tvers av ulike laboratorier kan inngå i utviklingen av korrelasjonsmodeller for prediksjon av styrke og stivhet. Følgende parametere er lagt til grunn for utvikling av ny laboratorieprosedyre og nytt utstyr:

Densitet
Under installasjon av bindemiddelstabiliserte peler i felt, påsettes et lufttrykk i borstengene for å blåse bindemiddelet ut i løsmassene. Vispen roteres for å blande bindemiddelet inn i massene. Dette medfører at det oppstår luftlommer og/eller -porer i ferdig installert pel. Man klarer derfor ikke å anslå hvilken densitet ferdig installert pel vil ha da dette kan variere fra pel til pel og også over dybden og tverrsnittet i samme pel. For å unngå å overestimere styrken i laboratorieprepererte prøver anbefales det derfor å unngå å øke densiteten utover in-situ densitet i løsmassene før stabilisering.

Luftfuktighet
Uttørking av prøvene under herding må unngås. I «NGFs beskrivelsestekster for grunnundersøkelser» (2020) stilles det krav til at bindemiddelstabiliserte prøver skal lagres i plast for å unngå tap av vann under avbindingen. Bindemiddelet forbruker vann som er tilgjengelig i løsmassene i herdeprosessen. Det finnes lite dokumentasjon på permeabiliteten og metningsgraden i bindemiddelstabiliserte peler. Det er uvisst om bindemiddelstabiliserte peler utover i herdeprosessen trekker til seg mer vann fra omkringliggende løsmasser, eller om bindemiddelet kun har tilgang til vannet i massene som bindemiddelet blandes sammen med. Det anbefales derfor at prøvene herdes i et miljø der uttørking og tilgang til mer vann enn det som er tilgjengelig i prøven unngås.

Temperatur
I Norge ligger temperaturen i bakken på 6-8 °C. Dagens prosedyrer beskriver at laboratorieprepererte prøver skal herdes i kjøleskap/-rom. De kjemiske reaksjonene som følge av tilsatte bindemidler fører til at temperaturen i bindemiddelstabiliserte peler øker i starten av herdeprosessen. Temperaturmålinger i felt viser at temperaturen i bindemiddelstabiliserte peler ofte er høyere enn temperaturen i bakken, og at forhøyet temperatur vedvarer i flere måneder etter

installasjon (Åhnberg og Holm 1987; Wiersholm 2018). Hvilken temperatur som oppnås i bindemiddelstabiliserte peler i felt påvirkes av flere faktorer som bl.a.:

- Installasjonsmønster
  - Det oppnås høyere temperatur og mer langvarig forhøyet temperatur i blokker enn i f.eks. enkeltpeler der temperaturen raskere utjevnes med temperaturen i omkringliggende leire (Åhnberg og Holm 1987; Christensen et al. 1998)
- Innblandingsarbeid
  - Jevn innblanding fører til bedre kontakt mellom bindemiddel og leir-/silt-partikler, og dermed større reaksjonshastighet og raskere temperaturutvikling (Kitazume og Terashi 2013)
- Bindemiddeltype
  - Kalk fører til temperaturøkning i starten av herdeprosessen. Temperatur-utviklingen er høyere i peler med høy andel kalk enn i peler med kun sement (Åhnberg et al. 1995). I bindemidler hvor kalk er erstattet av f.eks. Cement Kiln Dust (CKD) produserer de kjemiske reaksjonene mindre varme.
- Bindemiddelmengde
  - Generelt vil en økning i tilsatt mengde bindemiddel gi høyere temperatur-utvikling.
- Leiras termiske materialparametere
  - Dess høyere spesifikk varmekapasitet, dess saktere oppvarming av omkring-liggende leire, og dess høyere varmeledningsevne, dess raskere temperatur-utjevning med omgivelsene (Åhnberg og Holm 1987).

Ulik herdetemperatur kan være en av årsakene til ulik styrkeutvikling i laboratoriestabiliserte prøver og i bindemiddelstabiliserte peler i felt siden styrkeutviklingen akselereres av høyrere temperaturer (Bell 1996). I Wiersholm (2018) ble det målt temperaturer på rundt 20 °C i dobbelt- og trippelribber med 80 kg/m^3 50/50 kalk og sement tre måneder etter installasjon. I «NGFs beskrivelsestekster for grunnundersøkelser» (2020) er det beskrevet at bindemiddel-stabiliserte prøver aldri skal lagres kjølig, med mindre dette er spesifisert i «spesiell beskrivelse». Det er imidlertid ikke gitt noen anbefalinger til hvilken temperatur prøvene bør herdes ved.

Herdetemperaturen i laboratoriet burde ideelt sett være lik som i felt. Dette er vanskelig å gjen-skape da temperaturen i pelen endres over tid, og også over dybden i pelen. Modenhetstall har lenge blitt benyttet innen betongteknologi for å kunne sammenligne herdeforløp for betong med forskjellig temperaturhistorie, og har senere også blitt tilpasset bindemiddelstabilisert leire (Åhnberg og Holm 1987):

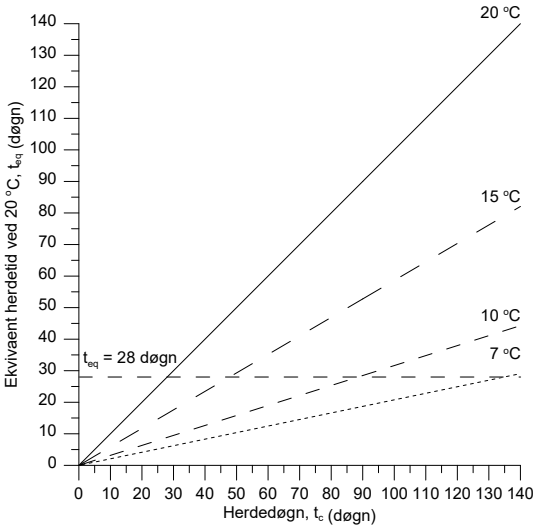
(1) $$M(T_c, t_c) = (20 + K(T_c - 20))^2 \cdot \sqrt{t_c}$$

Hvor M er modenhetstallet, T_c er herdetemperaturen i °C og t_c er herdetiden i enten timer eller døgn. Konstanten K varierer avhengig av type løsmasser og bindemiddel. For svenske leirer og siltige leirer, er formelen for M best tilpasset med en K-verdi lik 0,5.

Vervoorn og Barros (2020) anbefaler å herde prøvene ved 20 °C (referansetemperatur T_{ref}), noe som også benyttes innenfor betongteknologi. Basert på ligning 1 kan følgende formel benyttes for å finne ekvivalent herdetid ved 20 °C (t_{eq}):

(2)
$$t_{eq} = \frac{(20 + K(T_c - 20))^4}{(20 + K(T_{ref} - 20))^4} \cdot t_c$$

Dvs. at en prøve som herder ved 7 °C må herde i ca. 140 døgn for å oppnå samme modenhetstall som om samme prøve herdet ved 20 °C i 28 døgn (Figur 1). For å kunne sammenligne resultatene fra felt og lab anbefales det å normalisere resultatene på ekvivalent herdetid 28 døgn ved 20 °C. Det anbefales derfor å herde prøvene i laboratoriet ved 20 ± 2 °C. Dermed unngår man å måtte regne om laboratorieresultatene, og man sikrer høy styrkeutvikling i løpet av kortere tid enn om prøvene herdes ved lavere temperaturer.



Figur 1: En prøve som herder ved 7 °C må herde i ca. 140 døgn for å oppnå samme modenhetstall som en prøve herdet i 28 døgn ved 20 °C (t_{eq}).

Tøyningshastighet i enaksialforsøk

For å kunne sammenligne resultatene fra ulike laboratorier anbefales det å kjøre forsøkene med en tøyningshastighet på 1,5%/min, som er i samsvar med NGFs prosedyre.

Oppsummert

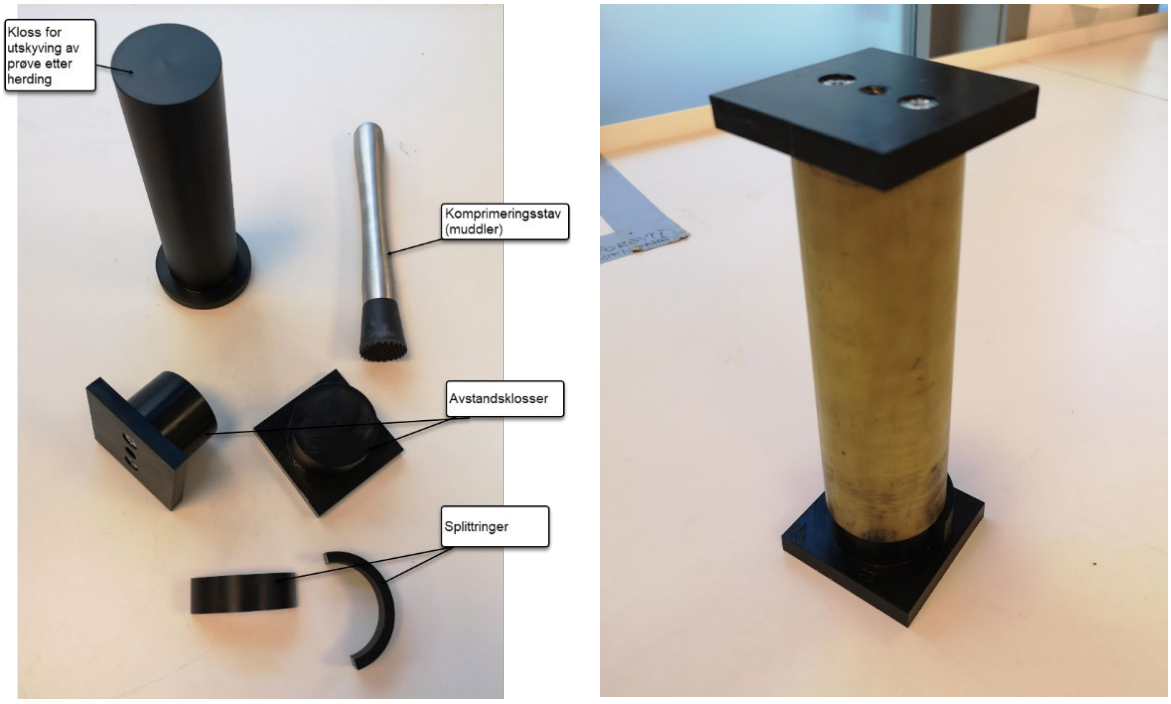
KlimaGrunns laboratorieprosedyre er utviklet for å unngå at resultatene er laboratorie- og operatøravhengig. Med bakgrunn i det overstående er følgende endringer innarbeidet i prosedyren:

- Densiteten på stabilisert prøve bestemmes før innstamping
- Prøvene herdes ved 20 ± 2 °C
- Nytt spesiallaget utstyr for preparering av homogene prøver med forhåndsbestemt densitet og for å sikre at prøvene beholder konstant volum under herding

Nytt laboratorieutstyr

Det nye utstyret består av en 180 mm høy komposittsylinder med diameter 54 mm (Figur 2). Ferdig preparert prøve skal ha en høyde på 100 mm (H/D-forhold = 1,85). Dette sikres ved to propper/avstandsklosser som stikker 40 mm inn i sylinderen på hver side. Topp- og bunnstykket har en 1-2 mm ventil for å slippe ut luft under sammenpressingen. For å sikre at prøven komprimeres fra hver ende, monteres en 10-20 mm høy splittring på bunnstykket før montering av sylinder. Et fuktig papirfilter legges i bunn og på topp av prøven for å hindre at leire fra prøven

skvises ut gjennom ventilen i toppstykket under sammenpressing. Leiren stampes inn i sylinderen ved hjelp av en håndholdt komprimeringsstav med vaffelmønster. Splittringen fjernes, og enaksialapparatet benyttes til å presse proppene inn i sylinderen.



a) *b)*

Figur 2: a) Avstandsklosser, splittring, komprimeringsstav og kloss for utskyving av prøven. b) Avstandsklossene sørger for at ferdig preparert prøve blir 100 mm høy.

Prosedyre

<u>Prøveåpning og homogenisering</u>

Det må sikres at det tas opp nok prøver fra lag med like egenskaper for å få nok materiale til å preparere representative bindemiddelstabiliserte prøver. Prøvene åpnes på vanlig måte, og parametere bestemmes for hver sylinder/blokk/pose (Tabell 1). Så mye materiale som mulig lagres kjølig, tett omsluttet av plast ved 100 % luftfuktighet. Lagringstiden fra prøvetaking til prøveåpning, og fra prøveåpning til innblanding av bindemidler bør være kortest mulig. Prøvene bør helst prepareres umiddelbart etter at bestilling foreligger, og helst innen en-to uker etter prøvetaking.

Homogenisering av materialet utføres om mulig på kjølerom, og materialet holdes kjølig fram til innblanding av bindemiddel. Det må påses at massen ikke mister fuktighet før innblanding av bindemiddel.

Fortrinnsvis skal det unngås å blande masser fra ulike sylindere eller poseprøver da egenskapene til leira (bl.a. mineralogi, leirinnhold, rutineparametere) ofte varierer over dybden. Leiras egenskaper påvirker hvilken styrke og stivhet som oppnås i kalk-/sementstabilisert materiale. Dersom det ikke er nok materiale tilgjengelig, så kan dette avvikes og materiale med like egenskaper fra samme lag homogeniseres.

Dersom det skal prepareres et stort antall prøver, så anbefales det å homogenisere alt av tilgjengelig materiale for hånd eller med en mørtelmikser for å sikre likest mulig egenskaper i leira som benyttes i innblandingsforsøkene.

Ved preparering av et mindre antall prøver (1-3 stk.) kan 1-2 kg løsmasser blandes ved lav hastighet i kjøkkenmaskinen (48-50 rpm) i ca. 30 sekunder. Deretter stoppes maskinen og materiale som har festet seg på veggen i bollen og vispen tilbakeføres til bunnen vha. slikkepott. Maskinen kjøres videre til det oppnås en homogen masse. Blandingstiden noteres. Det tas umiddelbart ut to prøver av den homogene massen for bestemmelse av vanninnhold. Dersom materiale fra flere sylindere eller poseprøver blandes, bestemmes også kornfordelingen av homogenisert masse.

Tabell 1: Parameterbestemmelse

	Prøveåpning[1]	Etter homogenisering[2]	Etter innblanding	Etter herding
Vanninnhold	x (x)	x	x	x
Densitet	x			x
Kornfordeling	x (x)	x		
Organisk innhold	x (x)			
Enaksialforsøk	x			x
Konusforsøk	x (omrørt)			
Flyte-/utrullingsgrense	x (x)			

[1] uforstyrrede prøver og (poseprøver)
[2] like før innblanding av bindemiddel

Innblanding av bindemiddel

Bindemiddelet drysses jevnt over den kjølige homogeniserte massen, og bindemiddel og løsmasser blandes ved lav hastighet i kjøkkenmaskin (48-50 rpm) i ca. 30 sekunder. Deretter stoppes maskinen og materiale som har festet seg på veggen i bollen og vispen tilbakeføres til bunnen vha. slikkepott. Maskinen kjøres videre i ca. 30 sekunder til det oppnås en homogen masse. Blandingstiden noteres. Det tas umiddelbart ut to prøver av den homogene massen tilsatt bindemiddel for bestemmelse av vanninnhold.

Innstamping av prøver

Det prepareres tre prøver for hver leire og bindemiddelkombinasjon som skal herdes like lenge. Som et minimum prepareres tre like prøver som herdes i 28 døgn. Det anbefales å også preparere tre parallelle serier med like prøver som herder i f.eks. 3, 7, 14 og 90 døgn. Prøvene prepareres slik:

1) Avstandskloss/propp smøres inn med silikon. Splittring monteres på bunnstykket før påmontering av sylinder.
2) Sylinderen og endeflatene på proppene smøres med olje e.l. på innsiden for enkel utskyving av prøve etter herding.
3) Fuktig papirfilter legges i bunn av sylinder
4) Mengde materiale (leire og bindemiddel) veies opp slik at densiteten i innbygd prøve tilsvarer densiteten til in-situ løsmasser.
5) Del det innveide materialet opp i fire like deler med lik vekt. Fyll sylinder lagvis med håndholdt kompresjonsstav for å fjerne luftlommer. Avstand fra topp sylinder og ned til lag nr. 2 måles med tommestokk for å påse at massen fyller 5.0-5.5 cm av sylinderen. Når dette er oppnådd stampes lag nr. 3 og 4 inn i sylinderen. Dette sikrer lik vekt i hver halvdel av prøven.

6) Påse at overflaten er godt oppriflet mellom hvert lag for å sikre kontakt med neste lag.
7) Jevn ut overflaten på toppen av prøven, og legg et fuktet papirfilter på toppen av prøven.
8) Fjern splittring fra bunnstykket.
9) Smør silikon rundt toppstykket/proppen og press denne rett ned i toppen av sylinderen vha. enaksialapparatet. Påfør press til topp- og bunnstykket er i kontakt med sylinderveggene for å oppnå riktig volum og dermed densitet av prøven.
10) Proppene må fastholdes (f.eks. vekt på toppen, stropp eller vakuumpakking) for å unngå at prøven får mulighet til å svelle under herding.
11) Legg våt klut rundt prøvesylinderen, og pakk inn prøven i diffusjonstett plast slik at den blir tett.
12) Prøven lagres vertikalt ved 20 ± 2 °C og 100% luftfuktighet fram til utskyvning og testing. Temperaturen i rommet under hele herdeforløpet dokumenteres.

Prøver fra samme blanding (batch) må bygges inn umiddelbart, og må være ferdig innbygd etter maksimalt 30 minutter etter tilsetning av bindemiddel.

Enaksialforsøk
Sylinder med prøve veies før kjøring av enaksialforsøk for kontroll av densitet etter endt herdeperiode. Prøven skyves ut, og høyden kontrollmåles før forsøket for rapportering av H/D-forholdet.

Det undersøkes at endeflatene er plane. Endeflatene pusses eller trimmes ved behov. Vekt og høyde før og etter ev. pussing/trimming registreres.

Enaksialforsøk gjennomføres umiddelbart etter utskyvning. Forsøket kjøres med hastighet 1,5%/min (1,5 mm/min for 10 cm høy prøve). Prøven tørkes etter skjærforsøk for bestemmelse av vanninnhold. Prøven fotograferes etter utskyvning for å dokumentere eventuelle inhomogeniteter, og etter forsøket for å dokumentere bruddform.

RESULTATER FRA INNBLANDINGSFORSØK IHT. KLIMAGRUNNS PROSEDYRE

Løsmasser og bindemiddel

Den nye laboratorieprosedyren er testet ut på tre ulike leirer fra Østlandet, Leire 1, 2 og 3 (Tabell 2). Leirene har ulik kornfordeling, densitet og naturlig vanninnhold. Det er benyttet ulike bindemiddeltyper og -mengder, samt innstampet densitet i de ulike laboratorieprogrammene (Tabell 3).

Evaluering av ny prosedyre

Det er per nå ikke utført et kontrollert studium av repeterbarheten og reproduserbarheten av KlimaGrunns prosedyre og sammenlignet med eksisterende prosedyrer. I datasettet som presenteres her er det totalt preparert 94 stk. prøver iht. KlimaGrunns laboratorieprosedyre. De preparerte prøvene herdet i 1-90 døgn. Temperaturen i rommet ble målt under hele herdeperioden, og lå innenfor kravet om 20 ± 2 °C. Avhengig av tilgang til prøvemateriale, ble det preparert sett med 1-3 prøvestykker fra samme type leire og bindemiddelkombinasjon som

Tabell 2: Oversikt over gjennomsnittlige parametere i leirene før innblanding av bindemiddel.

	Leire 1	Leire 2	Leire 3
Benyttet i lab.prg.	1	2a, 2a2 og 2a3	4a, b, c og d
Leirinnhold[1] (%)	36	47	-
Siltinnhold[1] (%)	63,9	52,9	-
Organisk innhold (%)	0,8	1,4	1,1
Naturlig vanninnhold[1] (%)	34,5	43,5	36,8
Densitet (g/cm^3)	1,90	1,87[2]	1,90
Omrørt skjærfasthet[1] (kPa)	0,12	0,10	-
Plastisitetsindeks[1] (%)	7,1	9,0	-

[1] Etter homogenisering
[2] Densitet basert på veid prøvesylinder

Tabell 3: Bindemiddeltype og -mengde benyttet i de ulike laboratorieprogrammene.

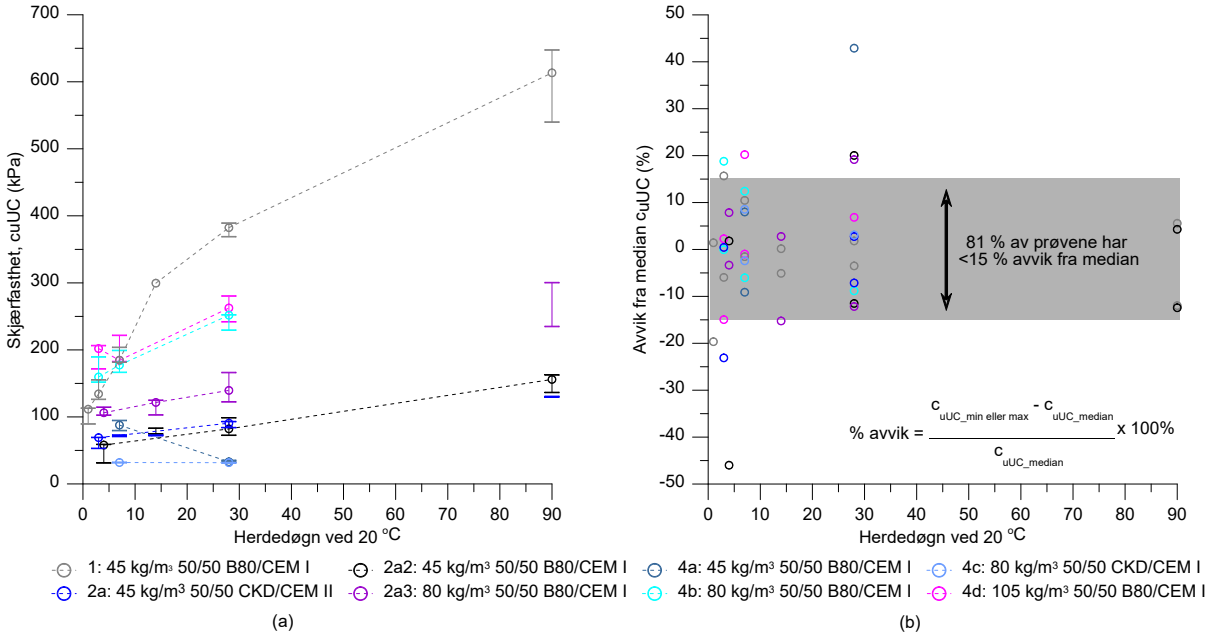
Laboratorieprogram	Bindemiddeltype	Bindemiddelmengde	Innstampet densitet	Antall prøver
1	50/50 B80/CEM I	45 kg/m^3	1,90	23
2a	50/50 CKD/CEM II	45 kg/m^3	1,80[1]	12
2a2	50/50 B80/CEM I	45 kg/m^3	1,80[1]	11
2a3	50/50 B80/CEM I	80 kg/m^3	1,80[1]	12
4a	50/50 B80/CEM I	45 kg/m^3	1,90	6
4b	50/50 B80/CEM I	80 kg/m^3	1,90	9
4c	50/50 CKD/CEM I	80 kg/m^3	1,90	6
4d	50/50 B80/CEM I	105 kg/m^3	1,90	9

[1] Basert på tidligere grunnundersøkelser i området der feltforsøket ble utført. Prøvene til innblandings-forsøkene ble tatt opp ca. 100 m fra førsøksfeltet.

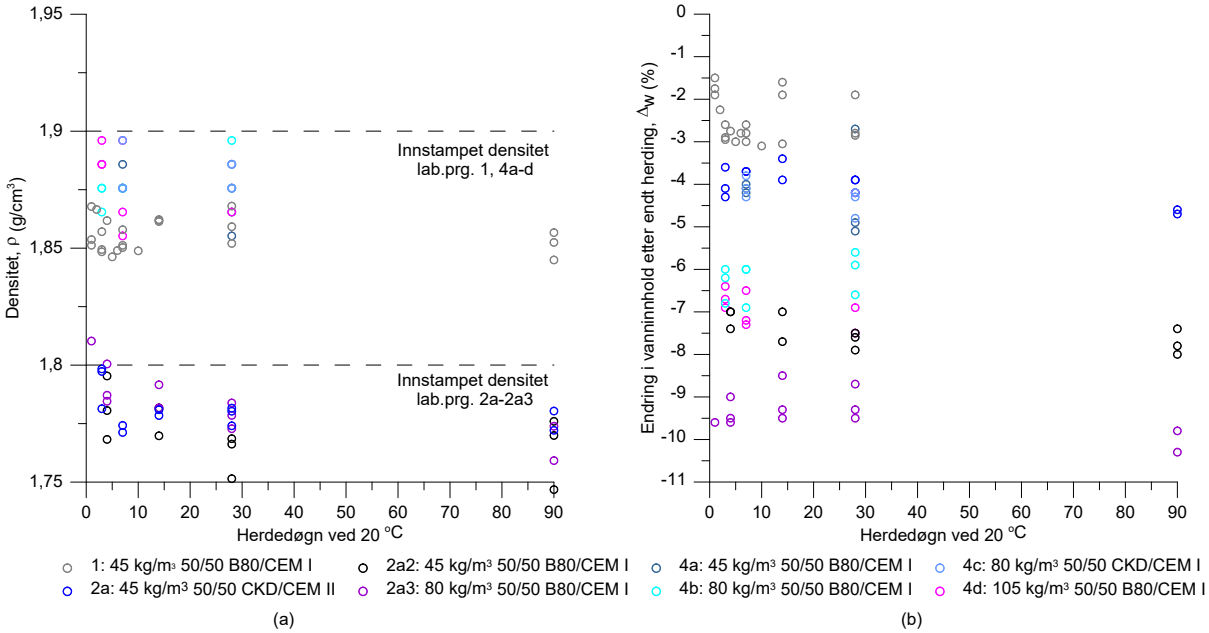
herdet over like mange døgn. Datasettet inneholder 6 sett med kun en prøve, 5 sett med to «like» prøver og 26 sett med tre «like» prøver. De ulike prøvene innenfor hvert sett med lik herdetid ble preparert fra ulike batcher og utgjorde dermed tre serier (f.eks. A, B, C). Dvs. at en batch kunne inneholde fire prøver med ulik herdetid (A3, A14, A28, A90), og at tilsvarende fire prøver ble preparert fra batch B og C. Et «sett» består dermed av f.eks. prøve A28, B28 og C28. Differansen i vanninnhold like etter at bindemiddelet ble tilsatt var liten mellom de ulike batchene benyttet i de inkluderte laboratorieprogrammene (Δw = 0,2-0,6%).

Maksimal skjærfasthet i de ulike prøvestykkene varierer selv om leira, bindemiddelet og herdetiden er lik. I Figur 3a vises median skjærfasthet (c_{uUC_median}) med symboler, og laveste (c_{uUC_min}) og høyeste (c_{uUC_max}) målte skjærfasthet med linjer. Det finnes ingen kriterier for når resultater fra innblandingsforsøk innenfor et «sett» avviker såpass fra hverandre at de skal forkastes. Innenfor betongteknologi prepareres prøver på byggeplass ved uttak av to eller flere prøvelegemer tatt fra et og samme betonglass. Disse herdes i vannbad ved 20 °C i 28 døgn. Prøveresultatet skal forkastes dersom forskjellen mellom høyeste og laveste verdi er mer enn 15 % av gjennomsnittsverdien (Standard Norge 2021), med mindre en undersøkelse gir tilstrekkelig grunnlag til å forkaste en enkelt prøvingsverdi. Ved å benytte dette kriteriet for de inkluderte settene preparert med to og tre prøver, så må hele 52 % av resultatene forkastes.

Det er langt vanskeligere å preparere reproduserbare prøver med leire og bindemidler enn rene betongprøver. Bindemiddelet vil ikke bli helt jevnt fordelt over hele prøven, og det oppstår små luftlommer/-blærer i prøvestykkene. Selv om prøvene stampes inn med lik densitet, så vil det etter endt herding være små forskjeller i densiteten. I KlimaGrunns datasett ble det observert at etter endt herding avvek densiteten med < 3 % fra «bestilt» densitet (Figur 4a). Den største reduksjonen i vanninnhold inntreffer i løpet av de første 1-3 døgnene. Reduksjon i vanninnhold



Figur 3: a) Maksimal udrenert skjærfasthet (c_{uUC}) tolket fra enaksialforsøk på laboratoriepreparerte prøver iht. KlimaGrunns laboratorieprosedyre. Runde symboler markerer median skjærfasthet (c_{uUC_median}) i sett med tre prøvestykker med like betingelser (leire, bindemiddel og herdetid). Laveste (c_{uUC_min}) og høyeste skjærfasthet (c_{uUC_max}) er markert med linjer. b) Prosentvis avvik fra median skjærfasthet c_{uUC_median}.



Figur 4 a) Densitet etter herding. b) Endring i vanninnhold etter herding.

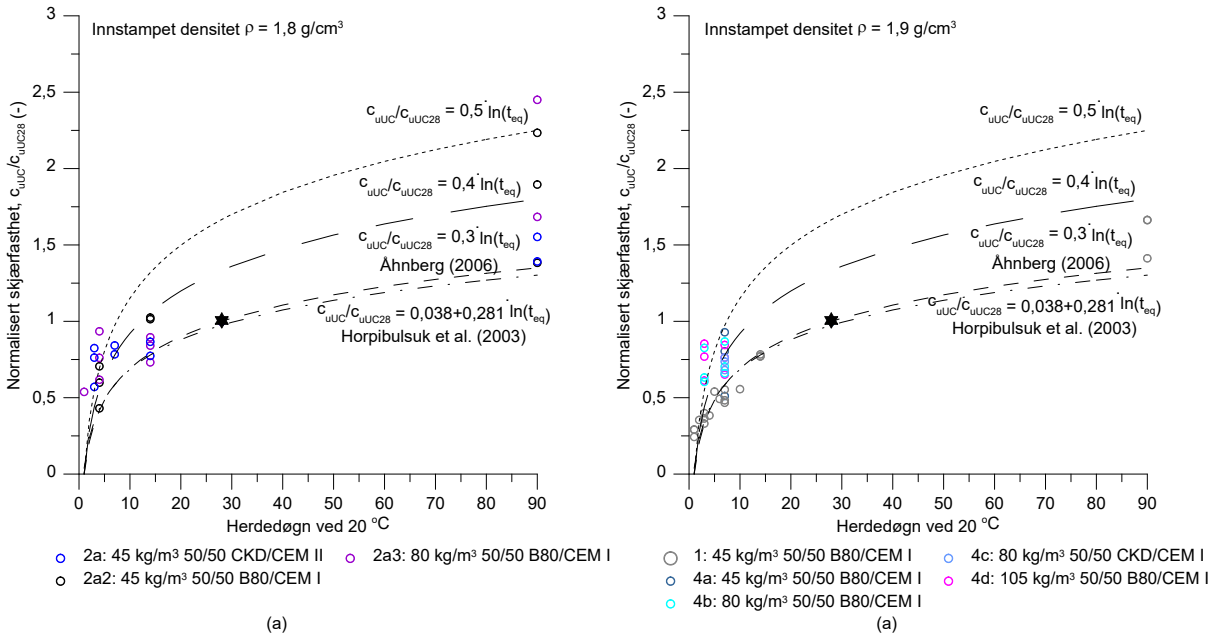
fra homogenisert leire før innblanding til endt herdetid øker som forventet med økende bindemiddelmengde. Kombinasjonen CKD/CEM I og CKD/CEM II ser ut til å gi mindre reduksjon i vanninnhold i samme type leire enn ved å tilsette lik mengde B80/CEM I (Figur 4b). Både inhomogeniteter i fordeling av bindemidler, ulik densitet og vanninnhold påvirker fastheten i de ulike prøvestykkene. Forskjellen i resultatene kan også skyldes at maksimal skjærfasthet oppstår ved ulike bruddtøyninger i de tre ulike prøvestykkene. Størst forskjell i bruddtøyning mellom prøvestykker med ellers like betingelser (leire, bindemiddel og herdetid) ble observert i prøvene som herdet i kun 3 dager i lab.prg. 2a, hvor minste og største bruddtøyningene var på 3,38% og 6,41%.

c_{uUC_median} ligger ofte i nærheten av enten c_{uUC_min} eller c_{uUC_max}. I stedet for å benytte kriteriet fra betongteknologi foreslås det heller å preparere tre «like» prøver og vurdere avviket for c_{uUC_max} og c_{uUC_min} fra c_{uUC_median}, og forkaste resultater som har større avvik fra c_{uUC_median} enn 15 %. Ved å benytte dette kriteriet har 81 % av resultatene mindre enn 15 % avvik fra c_{uUC_median} (Figur 3b).

Korrelasjonsmodell for prediksjon av styrke

I Figur 5 er enaksiell skjærfasthet normalisert på skjærfastheten etter ekvivalent herdetid 28 døgn (c_{uUC28}). Ved å normalisere alle skjærforsøkene på resultatet fra 28 døgns herding, så må korrelasjonskurven gå gjennom punktet (x,y) = (28,1) (markert med stjerne i Figur 5). Åhnberg (2006) sin korrelasjon utgjør en nedre grense i KlimaGrunns datasett, og kan benyttes for en konservativ prediksjon av styrke både på kort (t_{eq} < 28 døgn) og lang sikt (t_{eq} > 28 døgn):

(3)
$$\frac{c_{uUC}}{c_{uUC28}} = 0{,}3 \cdot \ln\left(t_{eq}\right)$$



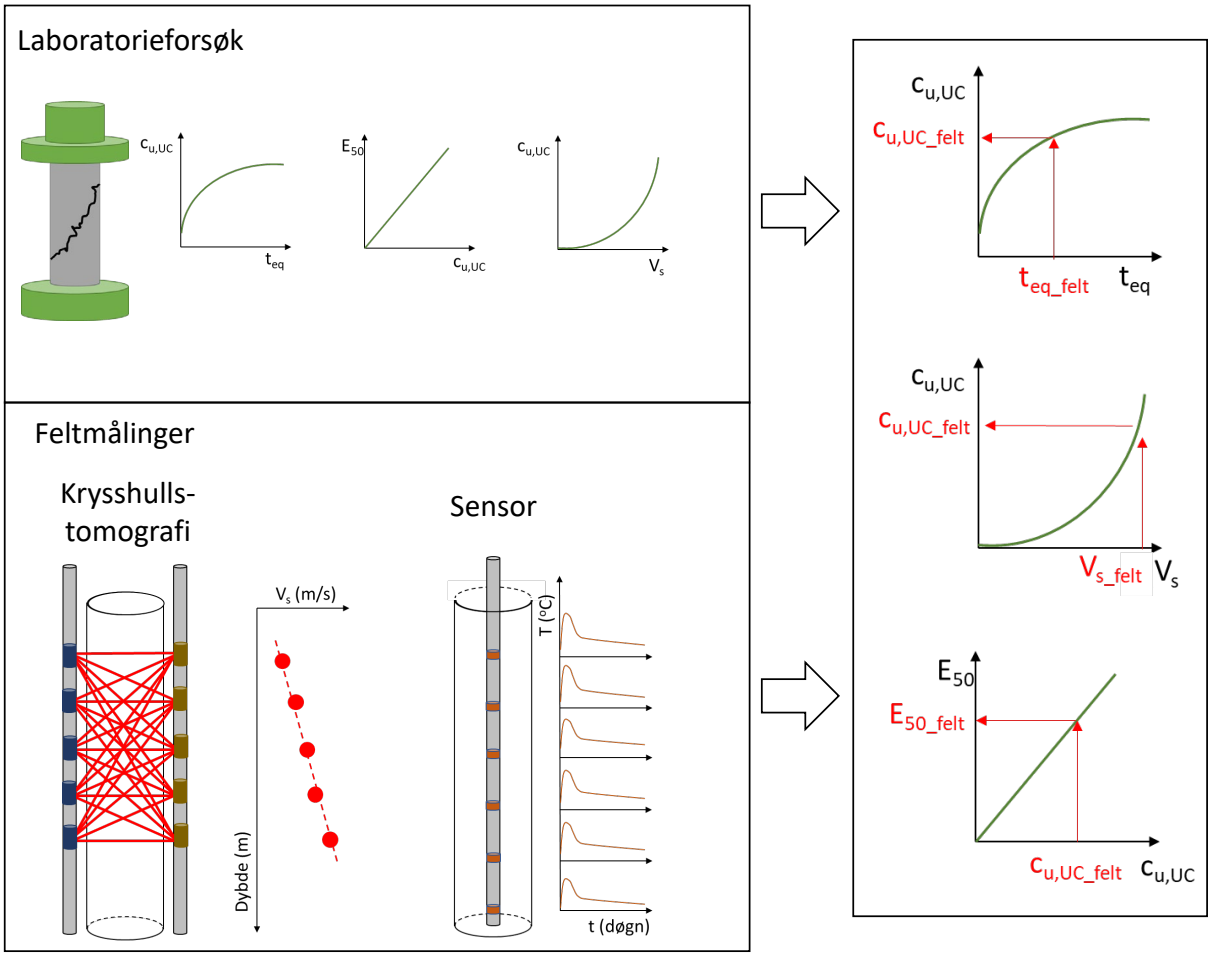
Figur 5: a) Skjærfastheten ved ulike herdetidspunkt normalisert på skjærfastheten etter 28 herdedøgn ved 20 °C for prøver stampet inn med densitet på 1,8 g/cm³ og b) 1,9 g/cm³. c_{uUC}/c_{uUC28} = 1 for alle prøver herdet i 28 døgn, og dette punktet er derfor markert med stjerne.

KORRELASJON MELLOM LABORATORIE- OG FELTMÅLINGER

I KlimaGrunn utvikles en løsning for å dokumentere oppnådd styrke, stivhet og homogenitet i bindemiddelstabiliserte peler. Seismikk og sensorteknologi benyttes for å monitorere herdeforløpet over tid i felt. Krysshullstomografi benyttes for å finne skjærbølgehastigheten (V_{s_felt}) og sensorer måler temperaturen ved ulike dybder i pelen (Figur 6). Temperaturen målt i pelen regnes om til ekvivalent herdetid (t_{eq_felt}) ved å benytte ligning 2. I tillegg til å bestemme udrenert skjærfasthet ($c_{u,UC}$), bestemmes også skjærbølgehastigheten (V_s) i de laboratorieprepererte prøvene etter endt herdetid. Laboratorieresultatene gir grunnlag for å utvikle korrelasjonsmodeller for:

- $c_{u,UC}$ - t_{eq}
- E_{50} - $c_{u,UC}$
- $c_{u,UC}$ - V_s

V_{s_felt} og t_{eq_felt} benyttes for å finne oppnådd skjærfasthet i pelen (c_{uUC_felt}) fra de laboratorie-baserte korrelasjonskurvene, og c_{uUC_felt} benyttes for å finne E_{50_felt} i pelen. Feltdata importeres og korrelasjonsmodellene presenteres i Cautus Web.



Figur 6: Laboratorieforsøk danner grunnlag for korrelasjonsmodeller for udrenert skjærfasthet (c_{uUC}) versus ekvivalent herdetid ved 20 °C (t_{eq}), stivhet (E_{50}) og skjærbølgehastighet (V_s). Skjærbølgehastigheten (V_{s_felt}) ved ulike dybder i pelen måles med krysshullstomografi. Temperaturen målt i pelen regnes om til ekvivalent herdetid (t_{eq_felt}). V_{s_felt} og t_{eq_felt} benyttes for å finne oppnådd skjærfasthet i pelen (c_{uUC_felt}) fra de laboratoriebaserte korrelasjons-kurvene. c_{uUC_felt} benyttes for å finne E_{50_felt} i pelen.

DISKUSJON OG KONKLUSJONER

KlimaGrunn har utviklet en ny laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk. Iht. ny prosedyre prepareres prøvene med en forhåndsbestemt densitet. Innstampingsmetoden sørger for homogen fordeling av massen over hele prøvens høyde, og det nyutviklede utstyret sørger for uendret volum under herding. Ny prosedyre anbefaler å stampe inn prøver med densitet tilsvarende densitet for in-situ leire og herde prøvene ved 20 ± 2 °C i 100 % luftfuktighet. Etter endt herding viste resultatene at densiteten hadde < 3 % avvik fra «bestilt» densitet. Det er igangsatt en masteroppgave ved NTNU for å undersøke effekten av ulik densitet på oppnådd skjærfasthet.

Selv om det prepareres flere prøver med lik leire (samme lag) og bindemiddelkombinasjon (type, mengde) som herdes under like betingelser (temperatur, tid), så er det variasjon i oppnådd udrenert enaksiell skjærfasthet (c_{uUC}) mellom de ulike prøvene. Det anbefales derfor å preparere tre «like» prøver (lik leire, bindemiddelkombinasjon, herdemiljø). Laboratorieprogrammene utført iht. KlimaGrunns prosedyre viser at 81 % av prøvene i settene med tre «like» prøver i

hver, har < 15 % avvik fra median c_{uUC}. Det bør utføres et kontrollert studium for å finne repeterbarheten og reproduserbarheten av KlimaGrunns prosedyre sammenlignet med eksisterende prosedyrer.

Maksimal skjærfasthet øker med økende bindemiddelmengde. Ved å normalisere c_{uUC} på c_{uUC} etter 28 døgns herding ved 20 °C, så utgjør Åhnberg (2006) sin korrelasjon i ligning 3 en nedre grense i KlimaGrunns datasett, og kan benyttes for en konservativ prediksjon av styrke både på kort (t_{eq} < 28 døgn) og lang sikt (t_{eq} > 28 døgn).

Feltdata korreleres med laboratorieresultatene slik at styrke og stivhet i installerte bindemiddelstabiliserte peler kan predikeres. Bedre samsvar mellom oppnådd styrke i felt og laboratorium vil bidra til optimalisering av bindemiddelmengden for lokale forhold. KlimaGrunn jobber videre med å benytte riggdata og finne nødvendig arbeidsmengde for å oppnå homogene peler i felt.

KlimaGrunn har målt temperaturen ved ulike dybder i en enkeltpel. Temperaturen stiger like etter innblanding. Selv om temperaturen synker igjen, så er det observert at forhøyet temperatur varer over lenger tid, i ribber, grid og blokk. Ved å måle temperaturen i bindemiddelstabiliserte pelesystem og regne denne om til ekvivalent herdetid, vil man kunne predikere styrkeutviklingen basert på laboratorieresultater uansett hvilket system/mønster pelene installeres i.

Skjærbølgehastighet måles på laboratoriepreparerte prøver etter endt herdetid vha. benderelement, og i ulike dybder i bindemiddelstabilisert pel vha. krysshullstomografi. Skjærbølgehastigheten (V_s) øker med økende skjærfasthet (c_{uUC}), og V_{s_felt} benyttes til å finne c_{uUC_felt} fra de laboratoriebaserte korrelasjonskurvene. Det forventes at V_{s_felt} øker med dybden. KlimaGrunn jobber videre med å vurdere effekten av overlagringstrykk under herding, og med å utvikle kostnadseffektive laboratorieprosedyrer for å inkludere effekten av overlagringstrykk.

For å være sikker på at man oppnår kravet til skjærfasthet i pelene, blandes det ofte inn mer bindemiddel enn nødvendig. Iht. NGFs veileder (2012) blandes det normalt inn 90-110 kg bindemiddel/m^3 jord. Laboratorieforsøk kan utføres for å finne optimal bindemiddelmengde. Selv om laboratorieforsøkene viser at man oppnår høy fasthet med lave bindemiddelmengder (45 kg/m^3 jord), så er ofte riggen og installasjonsmetoden (type visp, stigehøyde, rotasjon) begrensningen for hvor lave bindemiddelmengder som kan blandes inn og fortsatt oppnå homogen pel. KlimaGrunn jobber videre med å finne nødvendig innblandingsarbeid for å oppnå homogen pel også med lave mengder bindemiddel.

Ved å tilpasse bindemiddelmengden til lokale grunnforhold vil man i mange tilfeller kunne redusere bindemiddelmengden, og dermed redusere klimagassutslippene knyttet til grunnforsterkning med bindemidler. Laboratorieresultater som er representative for lokale forhold i kombinasjon med feltmålinger for dokumentasjon av styrke, stivhet og homogenitet i feltinstallerte peler bidrar til å oppnå dette.

TAKK TIL

Forfatterene retter en stor takk til alle våre kollegaer som har bidratt til gode diskusjoner så langt i KlimaGrunn. En spesiell takk til alle som har stått på under utførelsen av grunnundersøkelsene og laboratoriearbeidene. Innovasjonspartnerskapet KlimaGrunn finansieres av Innovasjon Norge.

REFERANSER

Bell, F. G. (1996) «Lime stabilization of clay minerals and soils». Engineering Geology 42(4):223–237.

Christensen, S. et al. (1998) «Grunnforsterkning med kalksementpeler». SINTEF Bygg og Miljøteknikk, Trondheim.

Horpibulsuk, S. et al. (2003) «Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis». Géotechnique 53(4), 439-444.

ISO (2017) «Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 7: Unconfined compression test» ISO 17892-7:2017, first edition.

Kitazume, M. og Terashi, M. (2013) «The deep mixing method». CRC Press.

Norsk Geoteknisk Forening (2012) «Veileder for grunnforsterkning med kalksementpeler».

Norsk Geoteknisk Forening (2020). «NGFs beskrivelsestekster for grunnundersøkelser». Melding nr. 10, Rev. nr. 2.

Paniagua, P. et al. (2021) «Strength and stiffness of laboratory-mixed specimens of stabilised Norwegian clays». Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement, https://doi.org/10.1680/jgrim.19.00051

Standard Norge (2021) «Betong — Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar». NS-EN 206:2013+A2:2021+NA:2021

Statens vegvesen (2016) «Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser».

Vervoorn, R.R.E. og Barros A.A.S. (2020) «Deep soil mixing for stabilising deep excavations. Proceedings for the 18th Nordic Geotechnical Meeting. Helsinki, Finland».

Wiersholm P. (2018) «Temperatureffekter I kalksementstabilisert leire». Masteroppgave ved NTNU.

Åhnberg H. (2006) «Strength of stabilised soils – A laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder». Doctoral thesis, Lund University, Lund, Sweden.

Åhnberg, H. og Holm, G. (1987) «Om inverkan av härdningtemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk og cementstabiliserad jord». SGI rapport nr. 30. Statens Geotekniska Institut, Linköping.

Åhnberg H. et al. (1995) «Cement och kalk för djupstabilisering av jord». SGI rapport no. 48. Statens Geotekniska Institut, Linköping.