FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK
BERGMEKANIKK/GEOTEKNIKK 2022

KLIMAGRUNNS ARBEIDSMETODIKK FOR DOKUMENTASJON OG PREDIKSJON AV SKJÆRFASTHET OG STIVHET I BINDEMIDDEL-STABILISERTE PELER

Documenting strength and stiffness of ground-improved soils applying KlimaGrunns methodology

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

SAMMENDRAG

I dag dokumenteres oppnådd fasthet i bindemiddelstabiliserte peler med forinstallert omvendt pelesondering (FOPS), (forboret) kalkpelsondering (F)KPS eller trykksondering (CPTU). Grunnet begrensninger ved metodene utføres testene som oftest ila. den første uken etter installasjon. Dette er tidlig i herdeforløpet siden fastheten i pelene vil fortsette å utvikle seg i lang tid etter installasjonstidspunktet. For å sikre at det kan dokumenteres at krav til oppnådd fasthet er oppfylt, benyttes det derfor ofte større mengder bindemidler enn nødvendig. Innovasjonspartnerskapet KlimaGrunn har utviklet ny metodikk for å dokumentere og predikere fasthet og stivhet uavhengig av hvilken fasthet pelene har på testtidspunktet. Metoden kombinerer materialteknologisk og geoteknisk forståelse, sensorteknologi og seismikk, og benytter korrelasjonsmodeller fra publiserte studier til å korrelere temperatur og skjærbølgehastighet målt i felt med fasthet og stivhet fra laboratorieforsøk. Denne artikkelen beskriver stegvis KlimaGrunns nyutviklede arbeidsmetodikk med eksempler fra feltforsøkene gjennomført på anlegget til E18 Vestkorridoren.

SUMMARY

Today the strength of lime-cement piles is documented by reversed pile soundings (RPS), (predrilled) lime-pile soundings or cone penetration tests (CPTU). These tests are often conducted during the first week after installation of the piles. The strength increase continues far beyond the first week, and the early testing may thereby cause excess consumption of binders. KlimaGrunn have developed a new non-destructive procedure for documentation and prediction of strength and stiffness in lime-cement piles that may be conducted independently of elapsed time after installation and may also be repeated during the curing process. The procedure is developed interdisciplinary based on concrete technology, geotechnical engineering, sensor technology and geophysics, and correlation models from published studies are applied for correlating the in-situ measured temperature and shear wave velocity to strength and stiffness determined on laboratory-prepared specimens. This paper describes KlimaGrunns procedure, also presenting results from the field experiments carried out at the infrastructure project E18 Vestkorridoren west of Oslo, Norway.

INNLEDNING

KlimaGrunn er et innovasjonspartnerskap hvor Statens vegvesen, Bane NOR og Statsbygg har mottatt støtte fra Innovasjon Norge og Nasjonalt program for leverandørutvikling (LUP) for å utvikle nye metoder for å redusere klimagassutslippene og miljøulempene knyttet til grunnforsterkning. Målsetningen med utviklingsløpet i KlimaGrunn har vært å utvikle en innovativ metode for å dokumentere styrke, deformasjonsegenskaper og homogenitet ved grunnforsterkning i kvikkleirer. I 2020 ble det utlyst konkurranse for gjennomføring av utviklingsløpet hvor oppdragsgiver stilte krav til at løsningen skulle kunne måle utviklingen av skjærfasthet og stivhet over tid langs hele pelen. I tillegg skulle løsningen kunne benyttes til å dokumentere homogeniteten i enkeltpeler. Leverandørene Multiconsult, Cautus Geo, Norcem og Argeo inngikk arbeidsfellesskap og vant den utlyste konkurransen, og har gjennomført utviklingsløpet i tett samarbeid med oppdragsgiver.

En av utfordringene knyttet til grunnforsterkning i dag er å kunne dokumentere oppnådd skjærfasthet i den stabiliserte grunnen. De vanligste testmetodene er forinstallert omvendt pelesondering (FOPS) eller (forboret) kalkpelsondering (F)KPS. Disse testene utføres som oftest i løpet av den første uken etter installasjon for å unngå at wiren til FOPSen gror fast i pelen, eller at fastheten i pelen blir så høy at vingen til FOPS og (F)KPS ikke kommer gjennom pelen og/eller (F)KPS går ut av pelen ved dybder over 8-10 m. Metodene er i tillegg destruktive da vingen skjærer gjennom og kløyver pelen. Under testen logges motstanden, og skjærfastheten tolkes ved å multiplisere den målte motstanden med en faktor (Ligning 1 og Ligning 2). Den tolkede skjærfastheten betraktes som et gjennomsnitt over pelens tverrsnitt.

Trykksonderinger (CPTU) kan også benyttes for å tolke oppnådd skjærfasthet. Grunnet liten diameter på sonden sammenlignet med pelen, så vil den tolkede skjærfastheten representere bare en liten del av pelens tverrsnitt. Inhomogen innblanding av bindemiddel kan medføre at pelen har ulik fasthet over tverrsnittet. Dermed kan skjærfastheten tolket fra CPTU-resultater føre til over- eller underestimering av fastheten over pelens tverrsnitt. Ved høy fasthet i pelen, så er det også for CPTU en risiko at sonden går ut av pelen på dybder over 8-10 m. Ofte tolkes skjærfastheten fra CPTU-data ved å benytte en bæreevnefaktor for spissmotstand (N_{kt}) lik 15 (Ligning 3) (Statens vegvesen 2014).

FOPS:	$c_u = 0{,}1 \cdot q_{net}$	Hvor q_{net} er drakraften minus andel friksjonsmotstand langs wiren dividert med arealet på vingen og borstangen (Larsson 2006, NGF 2012)	*Ligning 1*
(F)KPS:	$c_u = N \cdot q_{spiss}$	Hvor faktoren N velges etter hvilken vinge som er benyttet under sonderingen	*Ligning 2*
CPTU:	$c_u = \frac{q_n}{N_{kt}}$	Hvor bæreevnefaktoren for netto spissmotstand (q_n) N_{kt} ofte velges lik 15 (Statens vegvesen V221)	*Ligning 3*

Den eneste sikre metoden for dokumentasjon av skjærfasthet og stivhet i hele pelens dybde er å enten ta opp kjerneprøver fra pelen eller grave opp pelen etter endt herdetid for testing på laboratoriet. Dette er både tid- og kostnadskrevende, og det kan i mange tilfeller være vanskelig å få opp prøver av god nok kvalitet til å utføre forsøk på laboratoriet. Man kan også ta opp prøver fra fersk pel (innen to timer etter at pelen er installert) for videre herding på laboratoriet før testing på ønsket herdetidspunkt. Grunnet seigheten i materialet, så kan det også her være krevende å få opp representative prøver av tilstrekkelig kvalitet. I tillegg endres herdeforholdene, slik at resultatene ikke lenger er representative for pelen i felt.

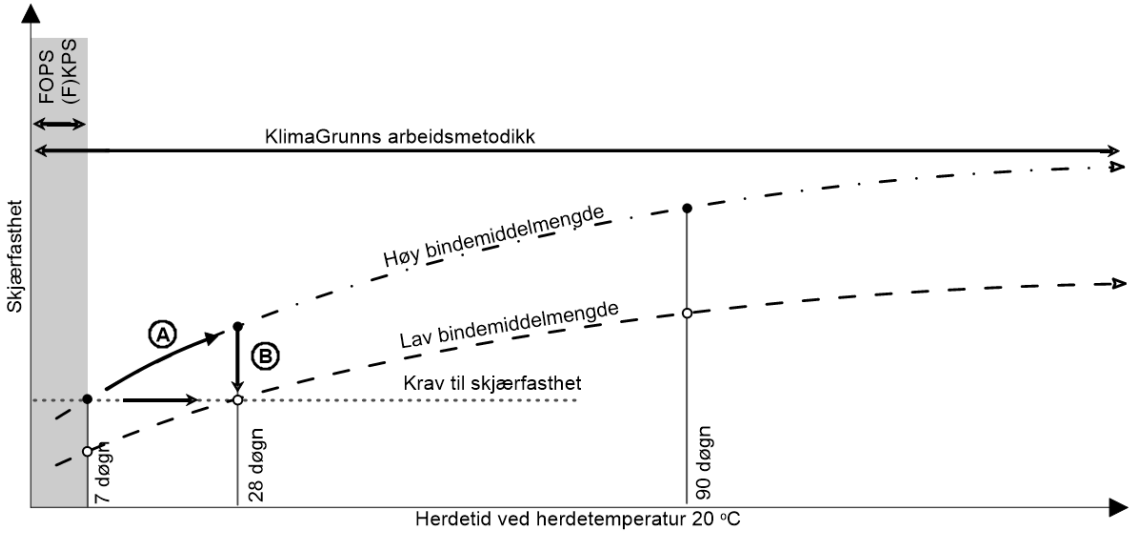
I Statens vegvesens veileder V221 «Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger» (2014) oppgis styrketak for skjærfastheten for peler herdet i 28 døgn. Dvs. at dersom laboratorieforsøk viser

høyere fasthet, så kan man ikke legge denne til grunn i prosjekteringen. Man kan imidlertid benytte høyere skjærfasthet i prosjekteringen dersom dette dokumenteres ved testing av prøvepeler i felt. Grunnet utfordringene beskrevet over, utføres disse testene ofte på et tidligere tidspunkt enn 28 døgn. Flere prosjekter rapporterer om oppnådd skjærfasthet i pelene langt over Statens vegvesens styrketak for skjærfasthet. Noe av grunnen til dette er at det blandes inn høyere bindemiddelmengder enn det som egentlig er nødvendig for å være sikker på at kravet til skjærfasthet er oppnådd og kan dokumenteres på testtidspunktet. I de fleste tilfeller utføres testene i løpet av den første uken etter installasjon (Figur 1). Herdeprosessen pågår imidlertid i flere måneder, og skjærfastheten fortsetter å øke til herdeprosessen stopper opp. I følge Åhnberg et al. (1995) skjer den raskeste utviklingen av skjærfasthet i prøver stabilisert med sement eller kalk/sement i løpet av de fire første ukene. Skjærfastheten fortsetter å øke også i månedene etter, men ofte med en noe lavere rate.

KlimaGrunn har utviklet en arbeidsmetodikk der skjærfastheten kan dokumenteres uavhengig av hvilken fasthet som er oppnådd på testtidspunktet i den bindemiddelstabiliserte pelen. Målingene er ikke-destruktive og kan derfor repeteres utover i herdeforløpet. Dermed kan man tillate at pelene herder over et lengre tidsrom før man utfører målingene, og man kan gjenta målingen på et senere tidspunkt dersom tilstrekkelig fasthet ikke er oppnådd. Ved å la pelene herde over et lengre tidsrom så kan den totale bindemiddelmengden reduseres, og slik redusere klimagassutslippene og kostnadene knyttet til grunnforsterkning ved at (Figur 1):

A høyere fasthet dokumenteres i pelene, og antall peler kan reduseres såfremt anbefalt maksimal avstand mellom pelene eller ribbene overholdes
B antall peler beholdes, men lavere mengder bindemiddel tilsettes i de enkelte pelene

For å kunne nyttiggjøre seg av alternativ A forutsettes det at det installeres peler i et testfelt i god tid før anleggsvirksomheten starter. KlimaGrunns første versjon av arbeidsmetodikken er kortfattet beskrevet i denne artikkelen. I tillegg presenteres hovedresultatene fra feltforsøk hvor metodikken er testet ut. Arbeidsmetodikken beskrives i sin helhet i KlimaGrunn (2022a) som publiseres på www.vegvesen.no i løpet av 2023.



Figur 1: Dagens testmetoder utføres som oftest i løpet av den første uken etter installasjon. Ved å benytte KlimaGrunns arbeidsmetodikk kan testene utføres lengre ut i herdeforløpet (f.eks. 28 døgn i stedet for 7 døgn) Reduksjon i bindemiddelmengde og dermed også reduksjon av klimagassutslipp, kan enten oppnås ved at høyere skjærfasthet dokumenteres lengre ut i herdeforløpet slik at antall peler kan reduseres (A), eller mengde bindemiddel i pelene kan reduseres (B). NB! Færre peler eller lavere bindemiddelmengde fører til lavere temperaturutvikling, og dermed lengre herdetid.

KLIMAGRUNNS ARBEIDSMETODIKK V.1.0

Generelt

KlimaGrunn har utviklet en helhetlig arbeidsmetodikk for dokumentasjon og prediksjon av skjærfasthet og stivhet (Figur 2). Arbeidsmetodikken er testet i to feltforsøk ifm. Statens vegvesens utbyggingsprosjekt E18 Vestkorridoren – Forberedende entreprise E101. Erfaringene fra første feltforsøk bidro til å optimalisere løsningen før gjennomføring av det andre feltforsøket. Mindre justeringer kan bli aktuelle etter hvert som man får mer erfaring ved bruk av metodikken. Metodikken består i korte trekk av:

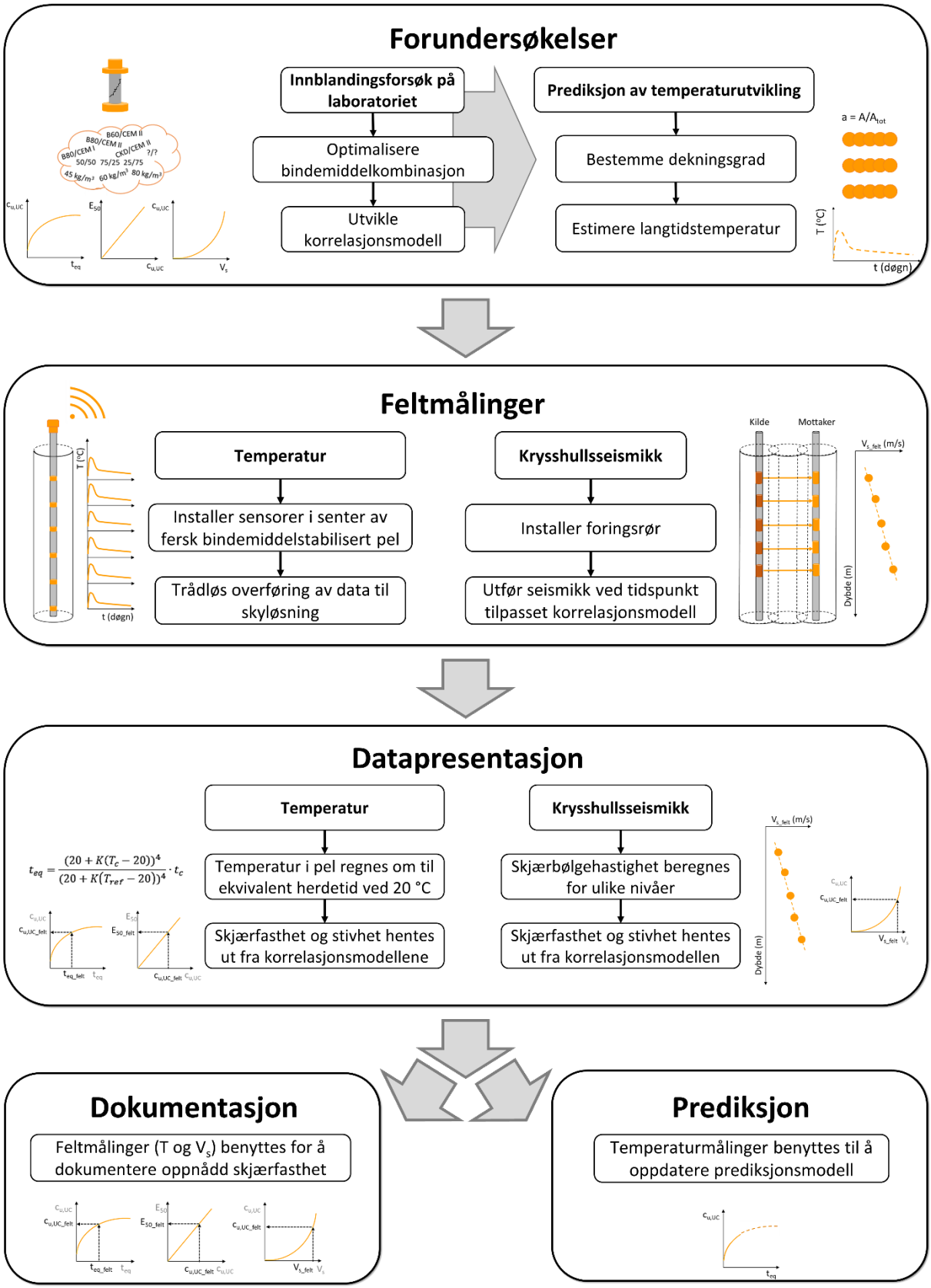
- optimalisering av bindemiddelkombinasjon (type, sammensetning og mengde) til lokale grunnforhold
- utvikling av korrelasjonsmodeller basert på laboratorieforsøk på bindemiddelstabiliserte laboratoriepreparerte prøver
- kontinuerlig monitorering av temperaturutviklingen under herdeprosessen i bindemiddelstabilisert pel
- krysshullsseismikk for estimering av skjærbølgehastigheten på gitte tidspunkt i bindemiddelstabiliserte peler
- presentasjon av måledata og korrelasjonsmodeller i Cautus Web som kan benyttes til dokumentasjon og prediksjon

Korrelasjonsmodeller

<u>KlimaGrunns laboratorieprosedyrer</u>
Alle data som benyttes til å utvikle korrelasjonsmodeller bør være produsert etter samme prosedyre. Det finnes ingen standardisert prosedyre for å preparere bindemiddelstabiliserte prøver (innblandingsforsøk). I Norge benyttes to prosedyrer for innblandingsforsøk: *«Veileder for grunnforsterkning med kalksement-peler»* (NGF 2012) og *«Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser»* (Statens vegvesen 2016). Prosedyrene er nokså like, men med noen mindre forskjeller. I tillegg er det blitt avdekket at prosedyrene praktiseres noe ulikt mellom ulike laboratorier. Laboratoriedata fra tidligere prosjekter med grunnforsterkning kunne dermed ikke benyttes for utvikling av korrelasjonsmodeller. Skjærbølgehastigheten kan også korreleres til skjærfasthet, og kan måles ved å utføre benderelementforsøk på laboratorieprøvene. Per i dag eksisterer ingen tilgjengelig prosedyre for hverken utførelse eller tolking av benderelementforsøk. Gjennom KlimaGrunn er det derfor utarbeidet to laboratorieprosedyrer:

- Ny laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk (Helle et al. 2021; KlimaGrunn 2022b)
- Laboratorieprosedyre med anbefalinger for utførelse og tolkning av benderelementforsøk (KlimaGrunn 2022c)

KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk er benyttet i begge KlimaGrunns feltforsøk. I tillegg har KlimaGrunn fått tilgang til data fra ett av Multiconsults oppdrag og en masteroppgave ved NTNU (Baustad 2022) hvor prøvene er preparert iht. den nye prosedyren. Prosedyren for benderelementforsøk er kun benyttet i KlimaGrunns andre feltforsøk. Datagrunnlaget er per nå for lite til å utvikle egne korrelasjonsmodeller for utvikling av skjærfasthet og stivhet over tid og for å korrelere skjærbølgehastighet til skjærfasthet. Korrelasjonsmodellene i KlimaGrunns arbeidsmetodikk er derfor hentet fra publiserte studier. Etter hvert som mer data produseres iht. KlimaGrunns prosedyrer, så vil disse datasettene kunne benyttes til å utvikle korrelasjonsmodeller tilpasset ulike grunnforhold og bindemiddelkombinasjoner (type, sammensetning og mengde).



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

Figur 2: KlimaGrunns arbeidsmetodikk v.1.0.

Kobling mellom temperatur i pel og herdetemperatur på laboratoriet

Herdeprosessen og styrkeutviklingen i bindemiddelstabiliserte løsmasser påvirkes av herdetemperaturen. Dess høyere temperatur, dess raskere er styrkeutviklingen. Som i betongteknologien herdes prøvene preparert iht. KlimaGrunns prosedyre for innblandingsforsøk ved 20 ± 2 °C. I pelene i felt er temperaturen høyest (ofte over 20 °C) like etter installasjon. I løpet av dager/uker/måneder synker temperaturen til opprinnelig temperatur i grunnen. Hvor lang tid dette tar avhenger bl.a. av type og mengde bindemiddel, leiregenskaper og dekningsgrad (Åhnberg og Holm 1987; Åhnberg et al. 1995; Wiersholm 2018; Bache et al. 2022).

Modenhetsprinsippet har lenge blitt benyttet innen betongteknologi for å kunne sammenligne herdeforløp for betong med ulik temperaturhistorie. Sammenhengen mellom modningstall og temperatur for kalksementstabilisert leire ble foreslått av Åhnberg og Holm (1987). For å kunne relatere herdeforløpet i felt med korrelasjonsmodellen basert på laboratorieresultater, så må man sørge for at man knytter sammen verdier med samme temperaturhistorie. Til dette benyttes prinsippet om ekvivalent herdetid (t_{eq} i enten timer eller døgn) for en gitt referansetemperatur (T_{ref} som her er lik 20 °C) (Ligning 4). Ekvivalent herdetid beregnes per tidsinkrement (t_c) og verdiene summeres for å finne akkumulert t_{eq}. T_c er den faktiske herdetemperaturen i pelen (°C).

$$t_{eq} = \frac{\left(20 + 0{,}5(T_c - 20)\right)^4}{\left(20 + 0{,}5\left(T_{ref} - 20\right)\right)^4} \cdot t_c$$

Utledet fra Åhnberg og Holm (1987), modifisert etter Vervoorn og Barros (2020) — *Ligning 4*

Korrelasjonsmodeller for skjærfasthet og stivhet

Ekvivalent herdetid benyttes inn i Ligning 5 hvor $c_{u,UC}(t_{eq})$ er enaksiell udrenert skjærfasthet (kPa) for prøver herdet ved t_{eq} ved T_{ref} (her 20 °C), $c_{u,UC28}$ er enaksiell udrenert skjærfasthet (kPa) ved t_{eq} = 28 døgn. Korrelasjonsmodellen samsvarer godt med de laveste verdiene for fasthetsutvikling i KlimaGrunns datasett, og kan dermed benyttes for å gi et nedre konservativt estimat av fasthetsutviklingen over tid.

Det fremkom ingen entydig korrelasjon mellom elastisitetsmodulen ($E_{50,UC}$) og den udrenerte skjærfastheten ($c_{u,UC}$) hverken i litteraturstudiet eller fra enaksialforsøkene utført for KlimaGrunn. Konstanten A i Ligning 6 bør derfor bestemmes for hvert enkelt laboratorieprogram.

Sammenhengen mellom $c_{u,UC}$ og skjærbølgehastigheten (V_s i m/s) basert på KlimaGrunns resultater samsvarer relativt godt med Dannewitz et al. (2005) sin korrelasjon i Ligning 7.

$$\frac{c_{u,UC}(t_{eq})}{c_{u,UC28}} = 0{,}3 \cdot \ln\left(t_{eq}\right)$$

Modifisert Åhnberg (2006) — *Ligning 5*

$$E_{50,UC} = A \cdot c_{u,UC}$$

Ligning 6

$$c_{u,UC} = 0{,}0424 \cdot V_s^{1,462}$$

Dannewitz et al. 2005 — *Ligning 7*

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

Ligning 8

$$\frac{G_0(t_{eq})}{G_{0,28}} = 0{,}2145 + 0{,}2381 \cdot \ln\left(t_{eq}\right)$$

Modifisert Flores et al. (2010) — *Ligning 9*

Skjærmodulen (G_0) beregnes ut fra densitet (ρ) og skjærbølgehastighet (Ligning 8). Basert på KlimaGrunns resultater så kan Ligning 9 (Flores et al. 2010) der G_0 normaliseres på G_0 ved 28 herdedøgn ($G_{0,28}$) benyttes som et nedre konservativt estimat for G_0 ved ulike herdetidspunkt.

Korrelasjonsmodellene og tilhørende konstanter bør vurderes og ev. oppdateres etter hvert som man får tilgang til mer data.

Forundersøkelser

Innblandingsforsøk på laboratoriet

Prøver prepareres på laboratoriet og forsøk utføres iht. KlimaGrunns prosedyrer for innblandingsforsøk (KlimaGrunn 2022b) og benderelementforsøk (KlimaGrunn 2022c). Laboratorieresultatene benyttes til å optimalisere bindemiddelkombinasjonen (mengde, type og sammensetning) og deretter bestemme hvilke korrelasjonsmodeller som benyttes videre.

I KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk benyttes et nyutviklet utstyr som sikrer at volumet holdes konstant under hele herdeprosessen. Hvilken densitet prøvene skal ha bestemmes på forhånd. Grunnet innblåsing av luft oppnår de feltinstallerte pelene mest sannsynlig noe lavere densitet enn ustabiliserte løsmasser på stedet. Det anbefales derfor at prøvene stampes inn med 5 % lavere densitet enn in situ densitet i ustabiliserte løsmasser. Det prepareres tre like prøver for hver bindemiddelkombinasjon og herdetid.

Det må sikres at det hentes opp nok løsmasser til hele laboratorieprogrammet fra lag med like egenskaper og som er representative for grunnforholdene der det skal grunnforsterkes. Dvs. at ved variert lagdeling og store anleggsområder med varierende grunnforhold, så må bindemiddelet testes på materiale hentet fra de ulike lagene og områdene på anlegget som skal grunnforsterkes. Dersom det er homogene grunnforhold, er det tilstrekkelig å hente løsmasser fra en lokasjon. Det bør regnes ca. 700-800 g løsmasser per innstampet prøve.

Styrkeutviklingen varierer med både mengde, type og sammensetning av bindemiddel, og også med egenskapene til løsmassene. For å optimalisere bindemiddelkombinasjon kan det prepareres prøver med ulikt bindemiddel og ulike mengder. Man kan også optimalisere med tanke på klimagassutslipp knyttet til ulike typer og sammensetninger av bindemidler. Kombinasjonen av type, sammensetning og mengde bindemiddel som faktisk blir brukt i felt skal alltid testes på laboratoriet. For å utvikle korrelasjonsmodeller for den valgte bindemiddelkombinasjonen som benyttes i felt, bør det som et minimum prepareres prøver som herder i 28 døgn. For å utvikle en modell mest mulig tilpasset lokale grunnforhold og bindemiddelkombinasjon, så anbefales det i tillegg å preparere prøver som herder i 3, 7 og 90 døgn.

Prøvene herdes ved 100 % luftfuktighet og 20 ± 2 °C innbygd i KlimaGrunns nyutviklede utstyr. Vanninnhold (w) og densitet (ρ) bestemmes for alle prøver etter endt herdetid, og det utføres benderelement- og enaksialforsøk.

Enaksialforsøkene kjøres med en tøyningsrate på 1,5 %/min (1,5 mm per min dersom prøvehøyden er 100 mm). Skjærfastheten ($c_{u,UC}$) tolkes som maksimal skjærspenning ved brudd. Elastisitetsmodulen (E_{50}) tolkes fra spennings-tøyningskurven.

I benderelementforsøk sendes det ut en skjærbølge (S-bølge) fra benderelementet i toppen av prøven. Signalet mottas i benderelementet i bunnen av prøven. P-bølger og støy i signalet kan gjøre det vanskelig å detektere første ankomne S-bølge. For enklere deteksjon av første

ankomne S-bølge anbefales det å utføre benderelementforsøkene ved å sende ut S-bølger med ulike perioder på samme prøve. Skjærbølgehastigheten tolkes ved å dividere avstanden mellom benderelementene (her benyttes 60 % av elementhøyden $L_{60\%}$) på tidsdifferansen mellom første bølgetopp i utsendt bølge til første bølgetopp i mottatt bølge (Δt) (Ligning 10). Mest nøyaktig plukking av ankomsttiden av første bølge får man fra signalet sendt ut med kortest mulig bølgeperiode. Den korteste bølgeperioden i GDS sine benderelement er 0,20 ms.

$V_s = L_{60\%}/\Delta t$ *Valsson et al. (2021)* *Ligning 10*

Prediksjon av temperaturutvikling

Ved å predikere temperaturutviklingen så kan man også predikere styrkeutviklingen i den prosjekterte løsningen. Basert på valgt bindemiddelkombinasjon, dekningsgrad (a = stabilisert jordvolum/totalt jordvolum) og grunnforhold kan man beregne et øvre estimat for langtids-temperaturen i senter av pel (Wiersholm 2018; Bache et al. 2022). Prediksjonen kan benyttes til å:

- gi en indikasjon på forventet oppnådd fasthet i pelen ved gitte tidspunkt
- planlegge ved hvilke tidspunkt krysshullsseismikken skal utføres i felt
- planlegge fremdrift i byggefasen

Feltmålinger

Det utføres kontinuerlig temperaturmåling i bindemiddelstabiliserte peler i felt. Krysshulls-seismikk utføres ved ulike tidspunkt i herdeforløpet for å dokumentere oppnådd skjærfasthet i det bindemiddelstabiliserte materialet. Hvor mange peler som bør monitoreres på et anlegg avhenger bl.a. av hvor varierende grunnforholdene er mellom de ulike områdene som skal grunnforsterkes, hvorvidt det installeres peler i ulike mønstre (enkeltpeler, ribber, gitter, blokk) og om det benyttes ulike bindemiddelkombinasjoner på anlegget.

Temperaturmålinger i bindemiddelstabiliserte peler

Temperaturmålinger i bindemiddelstabilisert pel utføres ved at man installerer temperatursensorer på ulike nivåer i senter av pelen. Temperatursensorene må ha god kontakt med de bindemiddelstabiliserte massene slik at temperaturmålingene blir representative. Installasjon av sensorer og igangsetting av datalogging bør skje umiddelbart etter at pelen er installert. Temperatursensorene som benyttes må være av en kvalitet som er beregnet for industriell eller geoteknisk instrumentering. Måledata overføres trådløst til en skyløsning hvor dataene presenteres i nær sanntid.

Antall temperatursensorer og avstanden mellom disse er avhengig av pelens lengde, men det anbefales som et minimum å installere fire stk. sensorer per 10 m pel. Begrensningen på antall sensorer avhenger av dimensjonene på kablene og røret som benyttes for installasjon. Sensorer bør ikke installeres i de øverste 2-3 meterne da disse vil bli sterkt påvirket av lufttemperaturen. Temperatursensorene bør plasseres jevnt fra 0,5 meter over bunnen av pelen og opp til 3 m under terreng.

For å verifisere at måledata er representative og for å unngå å miste data ved ev. skade på utstyr under installasjon eller av anleggsarbeider, anbefales det å instrumentere minimum tre peler per anlegg med ellers like betingelser. Ved å installere temperatursensorer i flere peler vil man også

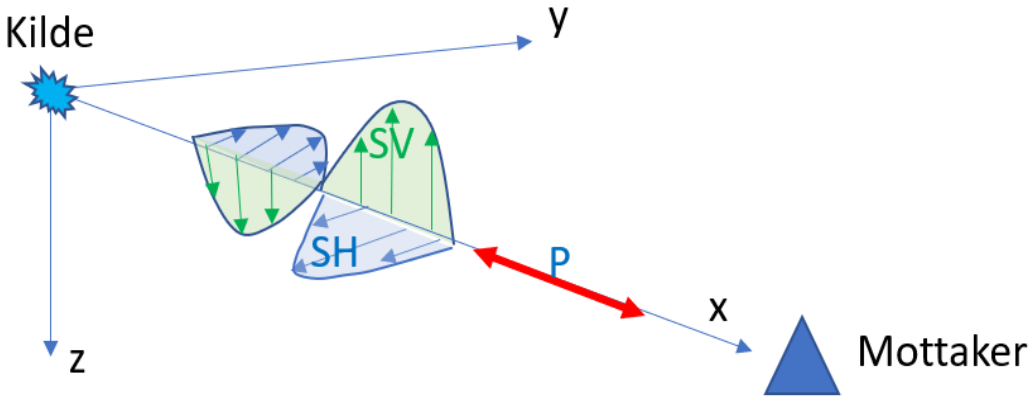
samle inn mer erfaringsdata som på sikt kan benyttes til å gi en sikrere prediksjon av temperatur- og fasthetsutviklingen.

Krysshullsseismikk

Krysshullsseismikk utføres i en ribbe med bindemiddelstabiliserte peler. Målingene benyttes til å estimere gjennomsnittlig skjærbølgehastighet i materialet mellom foringsrørene per dybde-nivå. I motsetning til ved å benytte dagens testmetoder, tolkes dermed en gjennomsnittlig fasthet av hele det stabiliserte materialet. Målinger bør utføres på minst to datoer, der den første målingen utføres tidlig i herdeforløpet og den andre ved ekvivalent herdetid 20-30 døgn ved 20 °C.

Det installeres minimum to stk. foringsrør i plast i to av pelene med en senteravstand på 2-3 m. Foringsrørene settes i senter av pelene til 0,7 m under ønsket største måledybde. For å sikre god overføring av signalet fra geofonen til omkringliggende masser, så må det påses at det ikke oppstår hulrom mellom foringsrøret og omkringliggende masser (pel). Installasjonen av foringsrør må derfor utføres så raskt som mulig etter installasjon av pel, og helst ferdigstilles innen 8 timer etter installasjon av pel. Valgt installasjonsmetode bør ha lav risiko for horisontalavvik av foringsrøret. Retningsavvik i x- og y-retning måles med inklinometer inni foringsrørene. Dette utføres når posisjonene til foringsrørene er stabile, som for eksempel to-tre dager etter installasjon av pel. Inklinasjonsmålingene i foringsrørene benyttes til å beregne avstander mellom kilde og mottaker ved hvert dyp. Inklinasjonsmålingene interpoleres lineært til hvert dyp. Retnings-avvik bør også ideelt sett utføres for de bindemiddelstabiliserte pelene. Enkelte entreprenører er i gang med utvikling av slikt utstyr for sine rigger.

Krysshullmålinger gjennomføres ved å senke kilde og mottaker ned i hvert sitt foringsrør til samme dybde. Foringsrørene skal være tørre på testtidspunktet. Mottakeren bør minimum kunne registrere partikkelbevegelse eller partikkelakselerasjon i de to horisontale retningene i kilde-mottaker planet (Figur 3). Kilden orienteres slik at det sendes ut et støt i retning normalt på linjen mellom kilden og mottakeren. Kildesignalet repeteres 1-3 ganger hvis ikke-repeterbare forstyrrelser er ubetydelige. Deretter roteres kilden 180 grader og kildesignalet repeteres.



Figur 3: Illustrasjon av partikkelbevegelse for P-bølge, vertikal (V) og horisontal (H) S-bølge. Koordinatsystemet er her orientert med x-aksen i retningen mellom kilde og mottaker og z-aksen vertikalt. I et homogent isotropisk medium har SV-bølgen en partikkelbevegelse i vertikalplanet mellom kilde og mottaker og SH-bølgen har partikkelbevegelsen normalt på vertikalplanet definert av kilde og mottaker lokasjon. Partikkelbevegelses-retningen til P-bølgen er vist med røde piler. SH og SV partikkelbevegelse er vist med hhv. blå og grønne piler og blått og grønt skravert felt.

Når en snur kilden 180 grader i negativ y-retning oppnås samme polaritet på P- og SV-bølgene, samtidig som SH-bølgen snur polaritet. Dermed kan man relativt enkelt identifisere første ankomsttid for SH-bølgen. Det anbefales å utføre målinger for hver 10 cm over hele dybden som skal dokumenteres. I tillegg bør hver 10-100 cm kontrollmåles ved å la kilde og mottaker bytte foringsrør. Denne kontrollen kan gi et estimat på usikkerheten i beregningene.

Dataene tas inn i en seismisk prosesseringspakke for frekvensfiltrering, subtraksjon av signalene i de to motsatte retningene for samme kilde- og mottakerposisjon, og plukking av gangtider. I KlimaGrunn er det benyttet båndbreddefiltrering hvor en beholder frekvenser i området 30-300 Hz. SH-bølgen beregnes som beregnet avstand mellom kilde og mottaker dividert på ankomsttid.

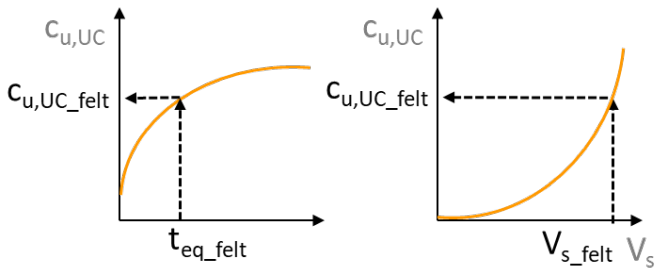
Datapresentasjon

Alle som har behov for å bruke dataene bør ha tilgang til en felles skyløsning, og tilgang til løsningen bør være uavhengig av hvor man befinner seg og fungere både på mobiltelefon, nettbrett og datamaskin. Temperaturmålingene og seismikkdata fra feltmålinger bør overføres og importeres automatisk i skyløsningen for dataforvaltning, analyse og presentasjon av måledata. Når dataene importeres til skyløsningen så må disse kvalitetssjekkes og sammenstilles med tidligere målinger fra samme målepunkt. Omregningen til ekvivalent herdetid (Ligning 4) bør skje automatisk når data er kommet inn i databasen. Ekvivalent herdetid går inn i beregningen av udrenert skjærfasthet ved bruk av korrelasjonsmodellen i Ligning 5.

Skyløsningen bør ha flere valgmuligheter for presentasjon av de ulike dataene både enkeltvis og i samleplott. I tillegg bør skyløsningen ha en kartmodul som viser målepunktenes plassering. For KlimaGrunn er det i Cautus Web laget funksjonalitet for presentasjon av temperatur, utvikling av udrenert skjærfasthet over tid, skjærbølgehastighet, retthetsmåling av foringsrør, poretrykk, vanninnhold, relativ fuktighet og konduktivitet.

Dokumentasjon og prediksjon i byggefasen

Både temperaturmålingene i pelene og skjærbølgehastigheten målt ved krysshullsseismikk benyttes for å hente ut skjærfastheten fra de laboratoriebaserte korrelasjonsmodellene (Figur 4).



Figur 4: Prinsippskisse for hvordan temperaturmålinger omregnet til ekvivalent herdetid (t_{eq_felt}) og skjærbølgehastighet fra krysshullsseismikk (V_{s_felt}) benyttes for dokumentasjon av oppnådd skjærfasthet (c_{u,UC_felt}) i bindemiddelstabilisert pel i felt.

Temperaturhistorien i den bindemiddelstabiliserte pelen regnes om til ekvivalent herdetid ved 20 °C (t_{eq_felt}) ved å benytte Ligning 4. Deretter hentes skjærfastheten ut fra kurven ved den oppnådde ekvivalente herdetiden i felt (c_{uUC_felt} i Figur 4). Skjærbølgehastighetsmålingene fra

krysshullsseismikken (V_{s_felt}) benyttes direkte inn i Dannewitz et al. (2005) sin korrelasjon for skjærbølgehastighet mot skjærfasthet for å hente ut c_{uUC_felt} (Ligning 7).

Sammenlignet med korrelasjonsmodellen for skjærbølgehastighet vs. skjærfasthet, så forventes det at korrelasjonen basert på ekvivalent herdetid gir det mest konservative estimatet av c_{uUC_felt}. Dette fordi korrelasjonsmodellen er basert på enaksialforsøk. I felt herdes imidlertid pelen med omslutningstrykk. Dermed vil skjærfastheten trolig være noe høyere enn i enaksialforsøkene, og også trolig øke med dybden. Korrelasjonen til Dannewitz et al. (2005) er også basert på enaksialforsøk, men siden skjærbølgehastigheten øker med økende skjærfasthet, så vil dybdeeffekten til en viss grad inkluderes ved å hente ut skjærfastheten fra Ligning 7. Kvaliteten på seismikkdata bør tas med i betraktningen av hvilken korrelasjon som benyttes for dokumentasjon av oppnådd skjærfasthet i pelen.

Elastisitetsmodulen hentes ut for c_{uUC_felt} fra den laboratoriebaserte korrelasjonsmodellen (Ligning 6). Skjærmodulen (G_0) kan beregnes fra Ligning 8 dersom densiteten i pelen er kjent. Ev. kan man følge samme prinsipp som for laboratorieprøvene og anta at densiteten er 5 % lavere enn i ustabiliserte løsmasser in-situ. Ligning 9 kan benyttes for et konservativt estimat av G_0.

Prediksjon av skjærfasthetsutviklingen er nyttig for framdriftsplanleggingen både i byggefasen og for å planlegge når krysshullseismikken skal utføres i felt. Prediksjonen fra forundersøkelsene oppdateres underveis basert på temperaturmålingene i pelen. Per dags dato er det ikke laget funksjonalitet i Cautus Web for å predikere skjærfasthetsutviklingen fram i tid. Prediksjon fram i tid kan imidlertid estimeres ved å anta temperatur ved et fremtidig tidspunkt som benyttes for prediksjon av hvordan skjærfastheten utvikler seg framover i tid. For å vurdere fremtidig temperatur kan man ta utgangspunkt i foreløpig målt temperaturtrend og estimert langtidstemperatur i pel basert på beregninger eller erfaringsdata. Det anbefales å utføre krysshullsseismikk for verifikasjon av skjærfastheten før igangsettelse av utgraving eller pålasting i de grunnforsterkede områdene.

KLIMAGRUNNS ARBEIDSMETODIKK BENYTTET I PRAKSIS

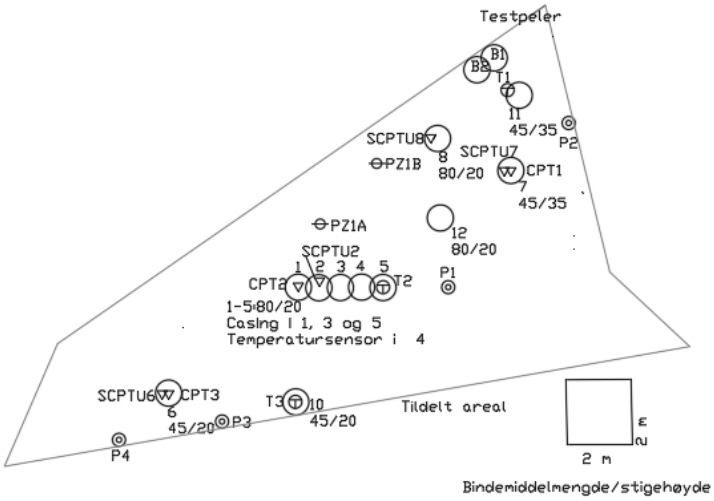
KlimaGrunns andre feltforsøk ble utført i perioden mars/april til august 2022. Dmix AB installerte totalt 13 stk. Ø 800 mm bindemiddelstabiliserte peler med 80 kg/m^3 50/50 CKD/CEM II (Figur 5 og Figur 6). Pel 1 - Pel 5 ble installert i ribbe med 150 mm overlapp mellom hver pel. Temperatursensorer ble installert i Pel 4, og Ø 90 mm foringsrør i plast for utførelse av krysshullsseismikk ble installert i Pel 1, 3 og 5. Enkeltpelene (Pel 6-12) ble installert for å evaluere ulik innblandingsmengde og innblandingsarbeid, men resultater fra dette arbeidet presenteres ikke her. Seismisk CPTU (SCPTU) ble utført i Pel 2, 6, 7 og 8, og FKPS ble utført i Pel 10, 11 og 12 seks døgn etter at pelene var installert. Data fra SCPTU tolkes på samme måte som data fra konvensjonell CPTU.

Laboratorie- og feltundersøkelser for dokumentasjon av oppnådd skjærfasthet

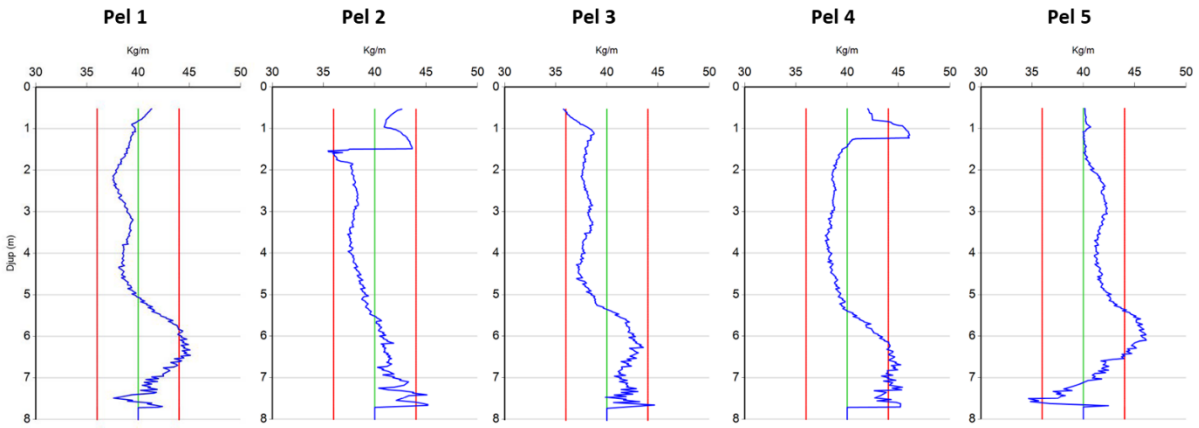
Multiconsult utførte innblandingsforsøk der totalt 18 stk. prøver ble stampet inn med 5 % lavere densitet enn i ustabiliserte masser in-situ. Det ble preparert tre prøver for hvert herdetidspunkt (3, 7, 14, 28, 59 og 90 døgn), alle med 80 kg/m^3 50/50 CKD/CEM II. Det ble utført enaksial- og benderelementforsøk på samtlige prøver (oransje symboler i Figur 7). Skjærfastheten de første 28 døgnene er høyere enn Åhnberg (2006) sin korrelasjon (stiplet svart linje i Figur 7a), men samsvarer relativt godt med korrelasjonen i tidsrommet 28-90 døgn. Tolket skjærbølgehastighet vs. skjærfasthet samsvarer godt med Dannewitz et al. (2005) sin

korrelasjon (stiplet linje i Figur 7b). Det er imidlertid stort sprik i resultatene for stivheten av materialet. Flores et al. (2010) sin korrelasjon kan benyttes til å estimere forventet G_0 for ulike herdetidspunkt (stiplet linje i Figur 7c). Elastisitetsmodulen (E_{50}) ligger stort sett mellom 50-100 ganger enaksiell skjærfasthet.

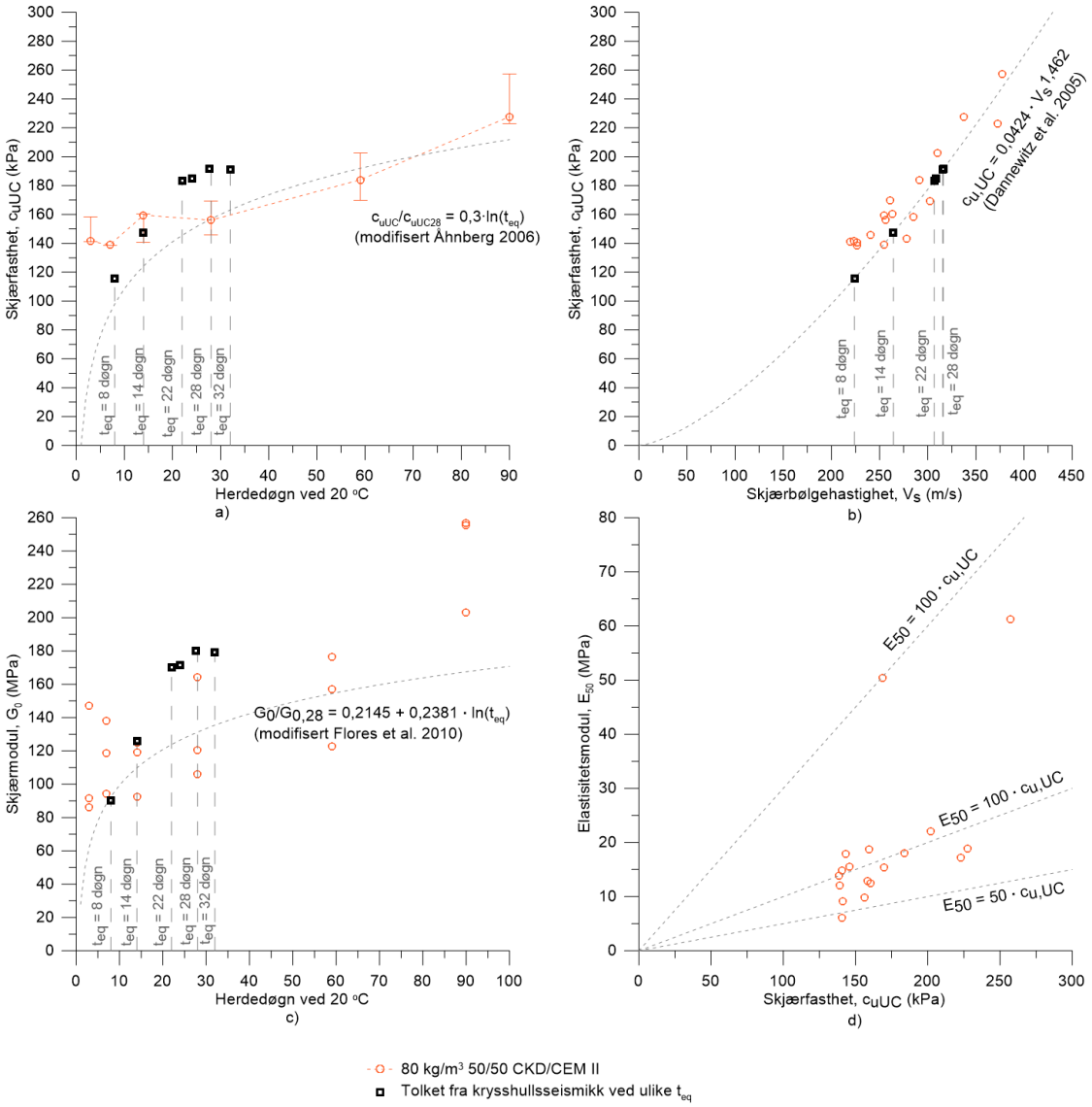
Cautus Geos temperatursensorer ble installert innen 30 min etter installasjon av Pel 4. Målingene viser at bindemiddelstabiliseringen raskt gav økt temperatur i pelen og maksimal temperatur på 24,5 – 37,7 °C ble oppnådd innen et halvt døgn etter installasjon (Figur 8). Målingene viser videre at temperaturen sank relativt raskt, og i stor grad utjevnet seg med temperaturen i omkringliggende leire, ca. 65 døgn etter installasjon. I sensoren på 3,5 m dybde ble det observert at temperaturen økte ca. 50 døgn etter installasjon. Dette skyldes trolig at denne sensoren lå såpass grunt at den ble påvirket av lufttemperaturen. Temperaturmålingene i pelen ble benyttet til å regne ut ekvivalent herdetid ved 20 °C (Ligning 4) i pelen slik at måletidspunktene kunne relateres til laboratorieresultater fra prøver herdet med samme temperaturhistorie (Tabell 1 og Figur 7).



Figur 5: Plassering av peler (B1, B2 og 1-12) innenfor tildelt område. Plasseringen av grunnundersøkelser utført i forkant av feltforsøket og installerte piezometre (PZ) er også vist. T = totalsondering, CPT = trykksondering med poretrykksmåling (CPTU), P = 54 mm prøvetaking. Seismisk CPTU (SCPTU) ble utført 6 døgn etter installasjon.



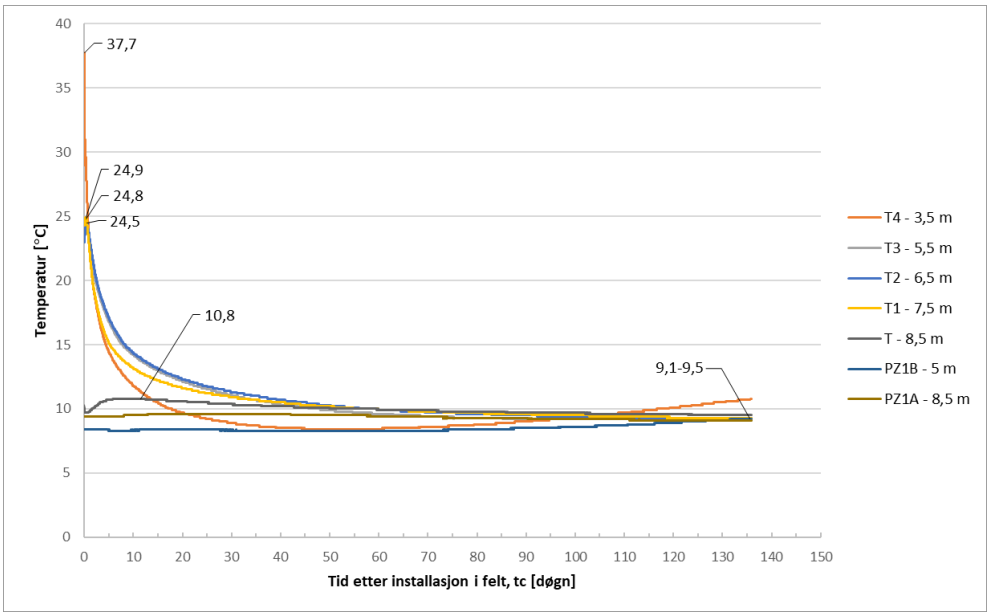
Figur 6: Peleprotokoller for innblandingsmengden i Pel 1-5 (blå linjer). Den grønne linjen indikerer bestilt bindemiddelmengde (40 kg/m = 80 kg/m^3 i Ø 800 mm pel), og røde linjer indikerer toleransekravene (her ± 4 kg/m). Kote terreng 10,9 m.o.h.



Figur 7: Resultater fra enaksial- og benderelementforsøk på laboratoriepreparte prøver er vist med oransje symboler. Svarte symboler viser beregnede verdier basert på korrelasjonsmodellene og resultater fra krysshulls-seismikken utført ved ulike herdetidspunkt (ekvivalent herdetid (t_{eq}) 8, 14, 22 28 og 32 døgn). a) Skjærfasthet vs. ekvivalent herdetid (t_{eq}). Korrelasjonsmodellen til Åhnberg (2006) (stiplet linje). b) Skjærbølgehastighet vs. skjærfasthet. Korrelasjonsmodellen til Dannewitz et al. 2005 (stiplet linje). c) Skjærmodul vs. ekvivalent herdetid. Korrelasjonsmodellen til Flores et al. (2010) (stiplet linje). d) Elastisitetsmodul vs. skjærfasthet.

Tabell 1: Ekvivalent herdetid i pel er beregnet basert på temperaturmålinger i Pel 4. Skjærfasthet er beregnet ved å benytte korrelasjoner med verdier fra feltmålinger som input. Laboratorieresultater fra enaksial- og benderelementforsøk er inkludert for sammenligning.

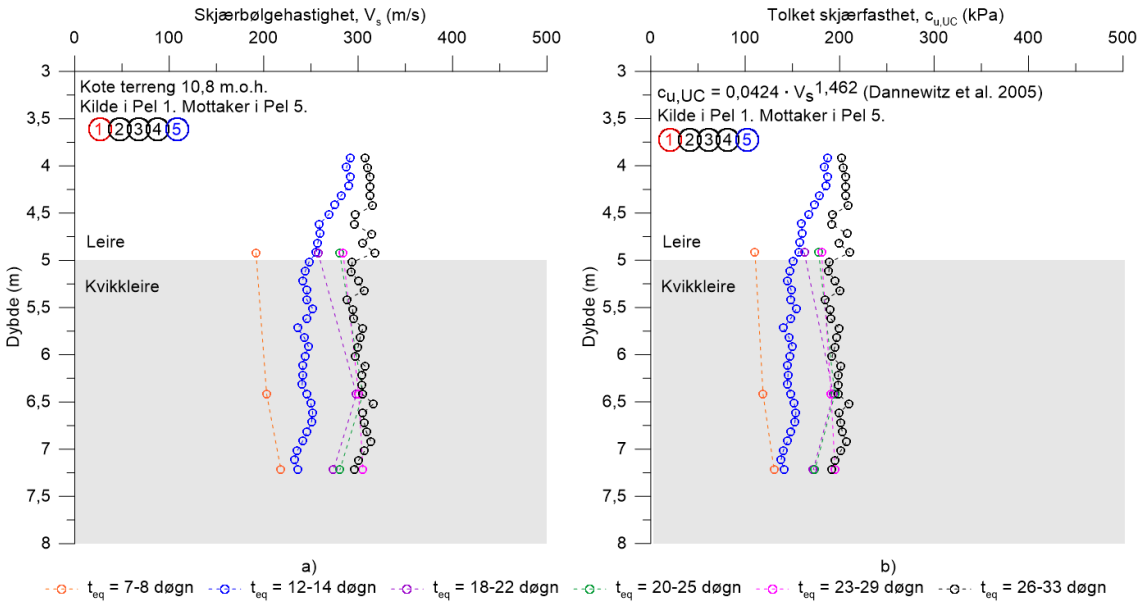
Herdetid		Laboratorieresultater		Krysshullsseismikk	Korrelasjoner	
Fra installasjon t_c (døgn)	Ekvivalent herdetid ved 20 °C t_{eq} (døgn)	Skjærfasthet (c_{u,UC_lab})	Skjærbølgehastighet (V_{s_lab})	Skjærbølgehastighet (V_{s_felt})	Åhnberg (2006) c_u	Dannewitz et al. (2005) c_u
7	7	140	253	240	92	128
8	8			226	98	117
22	14	153	248	260	124	144
44	22			307	146	184
51	24			304	150	181
63	28	157	266	322	157	196
77	32			326	163	200



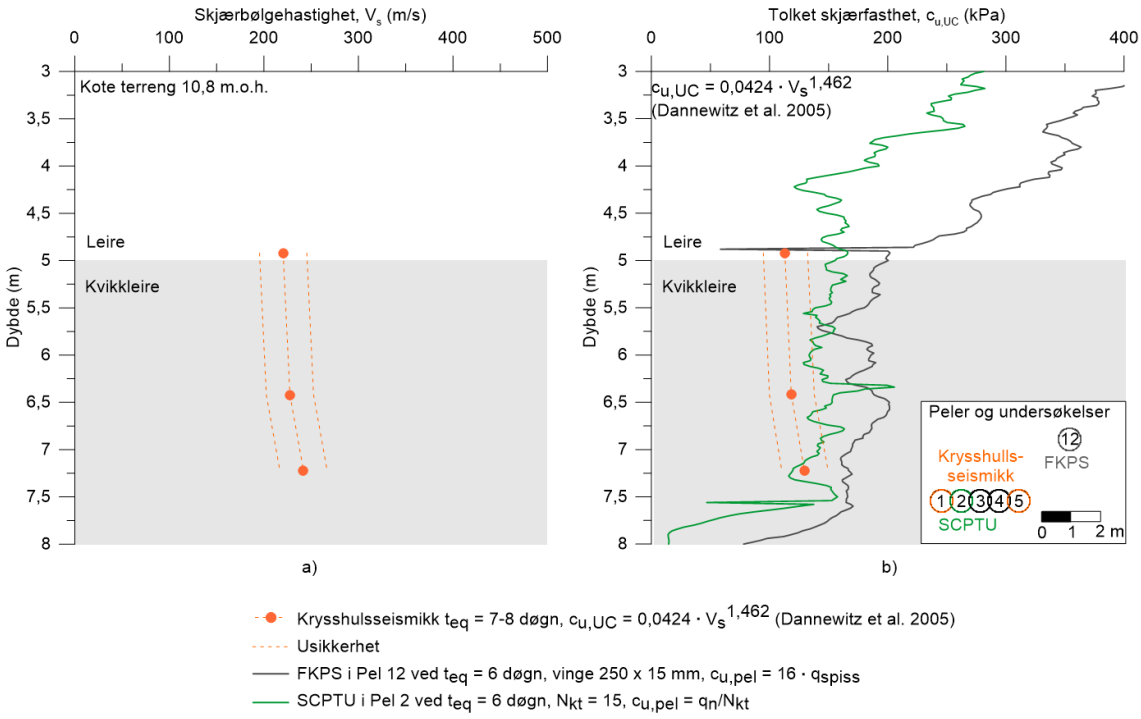
Figur 8: Temperaturmålinger fra Pel 4 og poretrykksmålerne PZ1A og PZ1B inntil ca. 140 døgn (12.08.22) etter installasjon av pel.

Argeo utførte krysshullsseismikk gjennom ribben (Pel 1-5) ved ulike tidspunkt i herdeforløpet (omregnet til t_{eq} i Tabell 1 og vist med stiplede linjer i Figur 7). Det er noe variasjon i innblandingsmengden i de ulike pelene (Figur 6), men avviket er i hovedsak innenfor toleransekravet (her ± 4 kg/m) over pelenes lengder. Tolket skjærbølgehastighet varierer noe over dybden, men trenden viser en relativt jevn V_s over hele dybden (Figur 9). Siden det er litt variasjon i temperaturen nedover i pelen, så er ekvivalent herdetid også noe ulik over pelens dybde. Derfor oppgis t_{eq} i intervall med flere døgn i Figur 9 selv om målingene ble utført innenfor samme døgn. Skjærbølgehastigheten (V_s) målt med krysshullsseismikk viser tydelig økning utover i herdeforløpet (Figur 9) og øker fra 220-240 m/s ved t_{eq} 8 døgn til ca. 330 m/s ved t_{eq} 26-33 døgn. Ved å benytte korrelasjonen til Dannewitz et al. (2005) (Ligning 7) tilsvarer dette en skjærfasthet på ca. 200 kPa, altså høyere enn skjærfastheten tolket med Åhnberg (2006) sin korrelasjon (Ligning 5) ved samme t_{eq} (Tabell 1 og sorte symboler i Figur 7a). Dette skyldes trolig at det måles høyere skjærbølgehastighet i peler som herder med omslutningstrykk enn i laboratoriepreparerte prøvene som herder uten omslutningstrykk. Som følge av dette tolkes en høyere skjærfasthet ved det aktuelle herdetidspunktet (svarte symboler i Figur 7) enn ved å benytte Åhnberg (2006) sin korrelasjon (svarte stiplet linje i Figur 7). Sånn sett inkluderes effekten av omslutningstrykk (dybde) på oppnådd skjærfasthet.

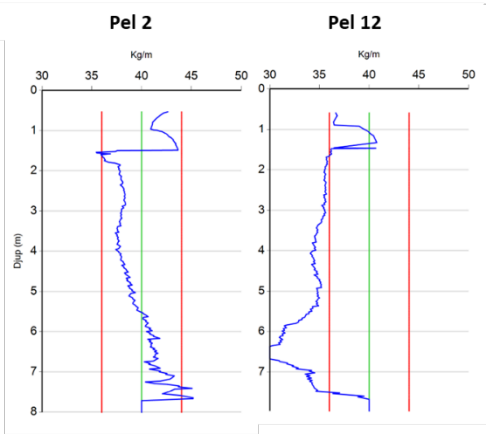
Skjærfasthet tolket basert på resultater fra krysshullseismikken utført ved t_{eq} = 7-8 døgn er sammenlignet med tradisjonelle målemetoder FKPS og CPTU (her SCPTU) uført ved t_{eq} = 6 døgn (Figur 10). Usikkerheten knyttet til tolket skjærbølgehastighet i Figur 10a og følgelig også tolket skjærfasthet i Figur 10b er visualisert med stiplede oransje linjer. For å unngå å ødelegge pelene i ribben, ble FKPS utført i en enkeltpel (Pel 12) med samme innblandingsmengde og installert med samme stigehøyde og rotasjonshastighet som i ribben (20 mm/omdr. og 175 rpm). Innblandingsmengden i enkeltpelen er noe lavere enn toleransekravet (Figur 11). Likevel er skjærfastheten tolket basert på spissmotstanden i FKPS høyere enn for CPTU (Ligning 2 og Ligning 3), og begge gir høyere skjærfasthet enn skjærfastheten tolket basert på skjærbølgehastigheten (Ligning 7). Dette indikerer at KlimaGrunns arbeidsmetodikk ikke overestimerer oppnådd fasthet i pelen sammenlignet med dagens testmetoder.



Figur 9: a) Skjærbølgehastighetsmålinger med dybden for kilde i Pel 1 og mottaker i Pel 5 b) tolket skjærfasthet med kilde i Pel 1 og mottaker i Pel 5.



Figur 10: a) Skjærbølgehastighetsmålinger utført med krysshullsseismikk ved ekvivalent herdetid (t_{eq}) 7-8 døgn. Stiplede linjer indikerer usikkerheten i målingene. b) Beregnet skjærfasthet basert på resultater fra FKPS og SCPTU utført ved t_{eq} = 6 døgn og skjærbølgehastigheter målt med krysshullsseismikk. Stiplede oransje linjer indikerer usikkerheten i resultatene tolket basert på krysshullsseismikken. NB! FKPS er utført i enkeltpel Pel 12.



Figur 11: Peleprotokollene for Pel 2 hvor SCPTU er utført, og Pel 12 hvor FKPS er utført.

Potensiell reduksjon i klimagassutslipp og kostnader

Resultater fra KlimaGrunns forsøk ifm. E18 Vestkorridoren benyttes her for å estimere potensiell reduksjon i klimagassutslipp og kostnader ved å benytte KlimaGrunns arbeidsmetodikk. Det er her tatt utgangspunkt i et forenklet tilfelle der det skal installeres 15 m lange peler med diameter Ø 800 mm med 150 mm overlapp i 20 m lange enkle ribber over et område på 100 x 20 m. Minimumskrav til skjærfasthet i pelene er satt til 100 kPa (stiplet grå linje i Figur 12), og gjennomsnittlig skjærfasthet i jordvolumet skal være 60 kPa. For KlimaGrunns to feltforsøk ble det uført innblandingsforsøk med både 45 kg/m^3 og 80 kg/m^3 50/50 Terraplus B80/CEM I og 50/50 CKD/CEM II (Figur 12).

For enkelhets skyld antas det her at laboratorieresultatene samsvarer med resultatene i felt. Det bemerkes at skjærfasthet tolket fra både FOPS eller (F)KPS trolig vil være høyere enn den som måles i laboratorieforsøk. Laboratorieforsøkene kan likevel benyttes til å optimalisere bindemiddelkombinasjonen, og korrelasjonsmodellen for utviklingen av skjærfasthet over tid gir et konservativt estimat av skjærfastheten i pelen. Dersom temperaturen i pelene er lavere enn 20 °C, så må pelene herde over et lengre tidsrom i felt enn på laboratoriet. Kontinuerlig temperaturmåling må utføres i felt.

Ved å anta at laboratorieresultatene samsvarer med resultatene i felt, vil det i dette tilfellet være mulig å dokumentere at kravet til skjærfasthet er oppnådd i løpet av den første uken ved å tilsette en bindemiddelmengde på 80 kg/m^3 løsmasser. Ved å tillate at pelene herder over et lengre tidsrom før fastheten dokumenteres, så vil herdeprosessen føre til at det utvikles høyere fasthet i pelene. I dette tilfellet, så kan man ved å la prøvene herde i ca. 48 døgn ved 20 °C i stedet oppnå en fasthet på ca. 160 kPa ved å benytte en bindemiddelmengde på 80 kg/m^3 løsmasser (A i Figur 12), og dermed konservativt kunne øke senteravstanden mellom ribbene fra 1,5 m til 2,2 m. Et annet alternativ er å heller redusere bindemiddelmengden til 45 kg/m^3 og likevel oppnå krav til skjærfasthet (B i Figur 12). Både reduksjon av bindemiddelmengde og antall peler vil kunne medføre at temperaturen blir lavere i hele jordvolumet. Dermed må man trolig påregne noe lengre herdetid i felt for å oppnå samme ekvivalente herdetid. Hvor lenge pelene må herde i felt avgjøres basert på omregning av de kontinuerlige temperaturmålingene i et utvalg av peler på anlegget. Man kan også estimere temperaturutviklingen ved beregninger.

Utslippsfaktorene varierer for de ulike bindemidlene. I dette tilfellet ser det ut til at skjærfastheten ikke påvirkes av type bindemiddel. Dermed kan man velge det bindemiddelet som har lavest utslippsfaktor. I dette tilfellet er det 50/50 CKD/CEM II som har en

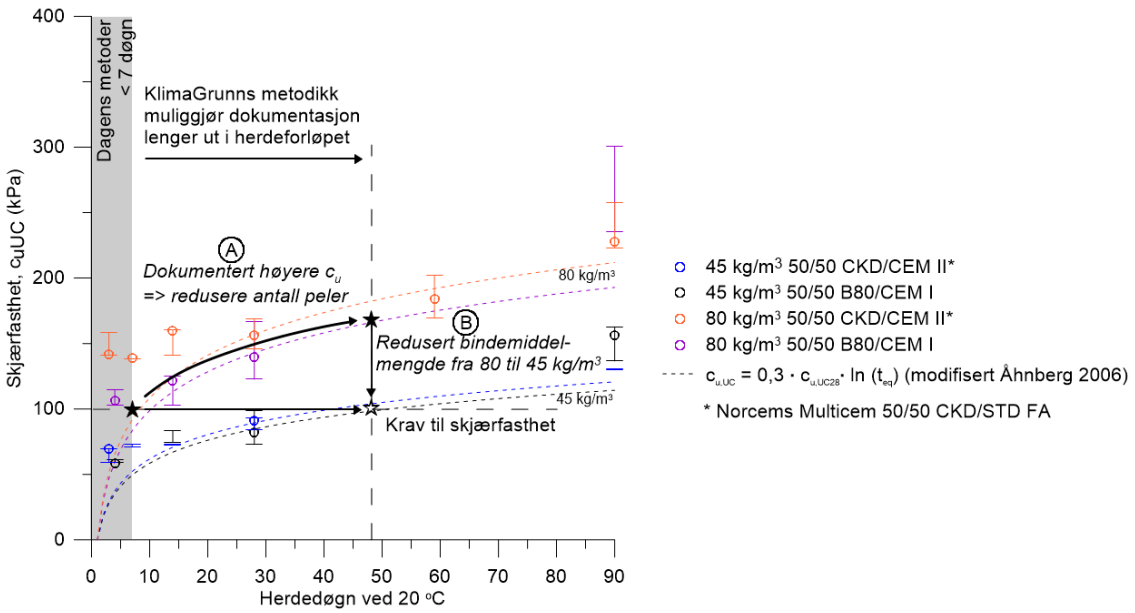
utslippsfaktor på 291 kg CO_2/tonn bindemiddel dersom bindemiddelet leveres fra Brevik. Klimagassutslippene reduseres med 34 % for alternativ A og 44 % for alternativ B (Tabell 2).

Økonomisk sett betraktes alternativ A som det mest gunstige alternativet med en reduksjon i kostnader på hele 34 %. Kostnadene reduseres som følge av reduserte kostnader knyttet til både installasjon av et mindre antall peler og en reduksjon i total mengde bindemiddel (Tabell 2).

Tabell 2 Reduserte klimagassutslipp og kostnader som følge av alternativ A og B. Det er tatt utgangspunkt i bindemiddel 50/50 CKD/CEM II ved beregning av klimagassutslipp. Prisene for bindemiddel og installasjon som er lagt til grunn er estimerte og ikke knyttet til et spesifikt prosjekt.

Alternativ	Bindemiddel-mengde kg/m³ løsmasser	Totalt antall peler	Total mengde bindemiddel Tonn	Reduserte klimagassutslipp* tonn CO_2-ekv.	Reduserte kostnader for installasjon og bindemidler %
Opprinnelig	80	2122	1280		
A	80	1399	844	127	34
B	45	2122	720	163	16

* kun for bindemiddelet



Figur 12: Ved å benytte KlimaGrunns arbeidsmetodikk kan man dokumentere skjærfastheten på et tidspunkt lengre ut i herdeløpet enn ved å benytte dagens målemetoder. Dette bidrar til å redusere klimagassutslippene ved å A: la pelene herde lenger slik at høyere fasthet kan dokumenteres, og dermed redusere antall peler, eller B: tilsette lavere mengder bindemiddel og la pelene herde lenger slik at krav til skjærfasthet likevel oppnås. I grafen vises resultater fra laboratorieforsøk utført ifm. KlimaGrunns feltforsøk ved E18 Vestkorridoren. Stiplede linjer viser korrelasjonsmodellen i Ligning 5 (Åhnberg 2006).

USIKKERHETER KNYTTET TIL KORRELASJONSMODELLENE

KlimaGrunns datasett er begrenset i omfang og inneholder data fra innblandingsforsøk utført på kvikkleirer fra tre områder på Østlandet og leirer fra tre områder i Trøndelag. Det har derfor ikke vært mulig å utvikle generelle korrelasjonsmodeller for ulike løsmassetyper eller bindemiddelkombinasjoner. Korrelasjonsmodeller fra publiserte studier er benyttet med enkelte modifikasjoner.

Korrelasjonsmodellene er basert på laboratoriefremstilte resultater. De fleste av KlimaGrunns laboratorieprogrammer viste større fasthetsutvikling både på kort og lang sikt enn beregnede verdier ved å benytte korrelasjonsmodellen for utvikling av skjærfasthet over tid. Som følge av bl.a. ulikt innblandingsarbeid i felt kontra på laboratoriet, inhomogeniteter i pelen og fordi

prøvene på laboratoriet herder uten overlagringstrykk, så vil den beregnede fasthetsutviklingen over tid kunne avvike fra fasthetsutviklingen i felt. I det andre feltforsøket ble det utført både forboret kalkpelsondering (FKPS) og trykksondering (CPTU) for å sammenligne med resultater fra KlimaGrunns arbeidsmetodikk. Feltforsøket gav ingen indikasjoner på at laboratorie-resultatene eller krysshullsseismikken overestimerer fastheten sammenlignet med fastheten tolket fra FKPS og CPTU i feltstabiliserte peler. Korrelasjonsmodellene anses derfor å gi et konservativt estimat av fasthetsutviklingen i pelen over tid.

I KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk bestemmes det på forhånd hvilken densitet prøvene skal oppnå etter innstamping. Det finnes imidlertid lite tilgjengelig dokumentasjon på hvilken densitet som faktisk oppnås i feltinstallerte peler. Flere studier har påpekt at densiteten i prøvene påvirker oppnådd fasthet (bl.a. Falle 2021; Baustad 2022; Hov et al. 2022). Det bør samles inn mer data fra herdede peler i felt for å danne et bedre grunnlag for bestemmelse av hvilken densitet prøvene bør stampes inn ved. Generelt bør densiteten i innstampede prøver ikke overstige densiteten i ustabiliserte løsmasser in-situ da dette i verste fall kan medføre at fastheten overestimeres.

VIDERE UTVIKLINGSBEHOV

KlimaGrunns arbeidsmetodikk bidrar til å redusere klimagassutslippene og også kostnadene knyttet til grunnforsterkning. Gjennom KlimaGrunn er det utviklet en helhetlig arbeidsmetodikk som kan benyttes til å:

- Optimalisere bindemiddelmengden til lokale grunnforhold
- Optimalisere bindemiddelet underveis i anlegget basert på oppdatert informasjon fra feltmålingene
- Dokumentere fasthetsutviklingen over hele pelens dybde over tid
- Tilpasse framdriften iht. oppdatert prediksjon basert på temperaturmålinger i felt
- Dokumentere bestandigheten av eldre bindemiddelstabiliserte peler ved å utføre krysshullsseismikk

Korrelasjonsmodeller benyttes for å dokumentere og predikere oppnådd skjærfasthet og stivhet i de bindemiddelstabiliserte pelene. For å sikre at data som inngår i korrelasjonsmodellene er produsert på samme måte ble det utviklet laboratorieprosedyrer for innblandingsforsøk og benderelementforsøk. KlimaGrunns datasett er for begrenset til å utvikle korrelasjonsmodeller for ulike grunnforhold og bindemiddelkombinasjoner. I KlimaGrunns arbeidsmetodikk benyttes derfor korrelasjonsmodeller fra publiserte studier.

Større datasett kan oppnås ved å utvikle en offentlig tilgjengelig erfaringsdatabase der laboratorie- og feltresultater fra ulike grunnforsterkningsprosjekter samles. Erfaringsdatabasen vil kunne bidra til:

- utvikling av korrelasjonsmodeller tilpasset ulike grunnforhold og bindemiddel-kombinasjoner
- enklere optimalisering av bindemiddelkombinasjoner til lokale grunnforhold både i prosjekterings- og i byggefasen
- mer nøyaktig dokumentasjon og prediksjon av oppnådd skjærfasthet og stivhet

Laboratorieforsøk på ulike bindemiddelmengder har vist at man oppnår tilstrekkelig høy skjærfasthet i bindemiddelstabiliserte laboratorieprøver også ved lave innblandingsmengder helt ned til 30 kg/m^3 (NGI 2020). Likevel klarer man ikke med dagens maskinpark å etablere

homogene peler med såpass lave bindemiddelmengder. Med dagens utstyr anbefales det ikke å redusere bindemiddelmengden under 22,5 kg/m. Dvs. at for Ø 800 mm peler, så kan det være vanskelig å etablere homogene peler med bindemiddelmengder lavere enn 45 kg/m^3, og 80 kg/m^3 for Ø 600 mm peler. For å hente ut potensialet for ytterligere klimagassreduksjon som følge av optimalisert bindemiddelmengde, så bør innblandingsutstyret som benyttes i felt forbedres slik at man kan etablere homogene peler også ved lave innblandingsmengder.

Ved å la pelene herde over et lengre tidsrom så vil det oppnås høyere fasthet i de bindemiddelstabiliserte pelene før igangsettelse av arbeider i byggefasen. På de fleste bygge- og anleggsplasser er det stort fokus på framdrift. Det gis ofte ikke rom til å vente lenger enn strengt tatt nødvendig før igangsettelse av arbeidene i grunnforsterkede områder. Det benyttes derfor større mengder bindemidler enn det er behov for slik at kravet til fasthet dokumenteres tidlig i herdeforløpet. Det bør iverksettes tiltak for å stimulere bransjen til å la de bindemiddel-stabiliserte pelene herde over en lengre tidsperiode før igangsettelse av arbeider. Dette kan f.eks. gjøres ved at klimareduserende tiltak inkluderes i tildelingskriteriene, og/eller ved at det tildeles klimakompensasjon for tiltak som reduserer klimagassutslippene.

TAKK TIL

Forfatterene retter en stor takk til alle våre kollegaer som har bidratt til gode diskusjoner gjennom hele KlimaGrunns utviklingsløp. En spesiell takk til alle som har stått på under utførelsen av grunnundersøkelsene og laboratoriearbeidene. Feltforsøkene hadde ikke vært mulig å gjennomføre uten den gode hjelpen fra entreprenørene Skanska, Marthinsen & Duvholt og Dmix AB. Innovasjonspartnerskapet KlimaGrunn finansieres av Innovasjon Norge, og har også mottatt bistand fra Leverandørutviklingsprogrammet.

REFERANSER

Bache, B.K.F. et al. (2022) «Effect of Temperature on the Strength of Lime–Cement Stabilized Norwegian Clays». Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 148(3). https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002699

Baustad, P. (2022) «En laboratoriestudie av styrke og stivhet i kalksementstabilisert leire». Masteroppgave ved NTNU.

Dannewitz, N. et al. (2005) «Seismisk kontrollmetod för KC-pelare». Svensk Djupstabilisering Arbetsrapport No. 35. Statens Geotekniska Institut, Linköping.

Falle, F.Å. (2021) «Comparing laboratory and field stabilised clay». Masteroppgave ved NTNU

Flores, R.D.V. et al. (2010) «Small-Strain Shear Modulus and Strength Increase of Cement-Treated Clay». Geotechnical Testing Journal 33, 62–71.

Helle, T.E. et al. (2021) «Ny laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk av bindemiddel-stabilisert leire». Geoteknikkdagen 2021.

Hov, S. et al. (2022) «Optimization of Laboratory Molding Techniques for Nordic Dry Deep Mixing». Geotechnical Testing Journal 45(4), https://doi.org/10.1520/GTJ20210245

KlimaGrunn (2022a) «Fase 2.6 Revisjon». Multiconsult rapport nr. 10222597-RIG-RAP-021, datert 31.08.2022.

KlimaGrunn (2022b) «Laboratorieprosedyre innblandingsforsøk». Multiconsult teknisk notat nr. 10222597-RIG-NOT-001 Rev. 03, datert 31.08.2022.

KlimaGrunn (2022c) «Prosedyre for utførelse og tolking av benderelementforsøk». Multiconsult teknisk notat nr. 10222597-RIG-NOT-010, datert 31.08.2022.

Larsson, R. (2006) «Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering – En vägledning». Svensk Djupstabilisering rapport nr. 17. Statens Geotekniska Institut, Linköping.

NGI (2020) «Work package 1 – Laboratory testing results». Sustainable Soil-Improvement (SUSI), NGI teknisk notat nr. 20200055-01-TN rev. 1, datert 10.12.2020.

Norsk Geoteknisk Forening (NGF) (2012) «Veileder for grunnforsterkning med kalksement-peler».

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

Statens vegvesen (2016) «Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser».

Valsson, S.M. et al. (2021) Estimating shear wave velocity with the SCPTu and bender element. In Proceedings of the 18th Nordic Geotechnical Meeting, IOP Conference Series Earth and Environmental Science 710 012017

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.