

KlimaGrunns arbeidsmetode for grunnforsterkning

Reduksjon av klimagassutslipp og kostnader ifm.
grunnforsterkning

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 915



Tittel

KlimaGrunns arbeidsmetode for grunnforsterkning

Undertittel

Reduksjon av klimagassutslipp og kostnader ifm. grunnforsterkning

Forfatter

T.E. Helle, A. Gerhardsen, T. Rekdal, S. Giese, I. Hegseth, P. Wiersholm

Avdeling

Teknologi og utvikling Utbygging

Seksjon

Prosjektnummer

B11228

Rapportnummer

915

Prosjektleder

Eivind S. Juvik

Godkjent av

Hanne Hermanrud

Emneord

klimagrunn, grunnforsterkning, klimagassutslipp, materialteknologi, seismikk, instrumentering, laboratorieprosedyre

Sammendrag

I rapporten beskrives KlimaGrunns arbeidsmetodikk v.1.0 for å dokumentere og predikere oppnådd skjærfasthet og stivhet i bindemiddelstabiliserte peler. Metodikken er basert på informasjon og erfaringer fra litteraturstudium, diskusjoner med entreprenører og leverandører, laboratorieforsøk og feltforsøk. Metodikken består av forundersøkelser og utvikling av korrelasjonsmodeller, feltmålinger, datapresentasjon og bruk av data til dokumentasjon og prediksjon. Man vil kunne kontinuerlig overvåke styrkeutviklingen i felt og få økt kontroll i byggefasen. Ved optimalisering av bindemiddelmengden vil man kunne redusere klimagassutslipp og kostnader.

Title

KlimaGrunn's work methodology for soil stabilization

Subtitle

Reduction of greenhouse gas emissions and costs from soil stabilization

Author

T.E. Helle, A. Gerhardsen, T. Rekdal, S. Giese, I. Hegseth, P. Wiersholm

Department

Technology and Development

Section

Project number

B11228

Report number

915

Project manager

Eivind S. Juvik

Approved by

Hanne Hermanrud

Key words

klimagrunn, soil stabilization, emissions, materials technology, seismology, instrumentation, laboratory procedures

Summary

This report describes KlimaGrunn's work methodology v.1.0 for documentation and prediction of strength and stiffness of columns stabilized with a binder. The method is based on literature studies, discussions with contractors and suppliers, laboratory testing and field experiments. The method is built upon preliminary investigations and correlation models, measurements in the field, data presentation and use of data for documentation and prediction. Continuous measurements of strength in the field will increase control during construction. Optimizing the amount of binder in projects will reduce greenhouse gas emissions and costs.

Innovasjonspartnerskap for prosjektet KlimaGrunn

KlimaGrunns arbeidsmetodikk for grunnforsterkning

OPPDRAAGSGIVER

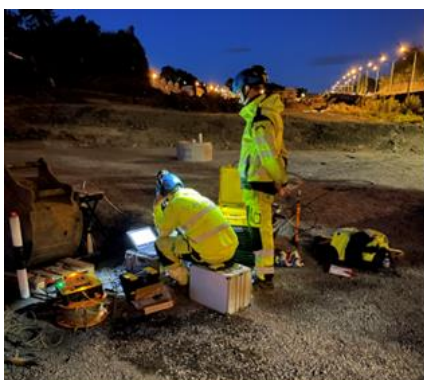
Statens Vegvesen, Statsbygg og Bane NOR

EMNE

KlimaGrunns arbeidsmetodikk for
grunnforsterkning

DATO / REVISJON: 31. mai 2023 / 01

DOKUMENTKODE: 10222597-RIG-RAP-021



INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Introduksjon	3
2	Potensielle gevinster ved å benytte KlimaGrunns arbeidsmetodikk	4
2.1	Generelt	4
2.2	KlimaGrunns arbeidsmetodikk medfører reduserte utslipp og kostnader	4
2.3	Eksempel fra KlimaGrunns feltforsøk	6
2.4	Potensiale for ytterligere reduksjon av klimagassutslipp	7
3	KlimaGrunns arbeidsmetodikk for dokumentasjon og prediksjon av styrke og stivhet i bindemiddelstabiliserte leirer	9
3.1	Generelt	10
3.2	Forundersøkelser og korrelasjonsmodeller	10
3.2.1	Innblandingsforsøk – optimalisering av bindemiddelmengden og input til korrelasjonsmodellene	10
3.2.2	Valg av bindemiddelkombinasjon	12
3.2.3	Korrelasjonsmodeller	13
3.2.4	Prediksjon av temperaturutvikling	15
3.3	Feltmålinger	16
3.3.1	Temperaturmålinger i bindemiddelstabiliserte peler i felt	17
3.3.2	Krysshullsseismikk	18
3.4	Datapresentasjon	21
3.5	Dokumentasjon og prediksjon av oppnådd fasthet og stivhet	22
3.5.1	Dokumentasjon av oppnådd skjærfasthet i bindemiddelstabiliserte peler	22
3.5.2	Prediksjon	22
4	Usikkerheter knyttet til løsningen	25
4.1	Generelt	25
4.2	Forskjeller mellom laboratorium og felt	25
4.3	Korrelasjonsmodellene	25
4.4	Prediksjon av temperatur	26
4.5	Installasjon av sensorer	26
4.6	Seismikk	27
4.7	Datapresentasjon	28

Vedlegg

Vedlegg A: Symboler og forkortelser

Vedlegg B: Utviklingsløpet – kort oppsummert

Vedlegg C: Valg av parametere som inngår i korrelasjonsmodellen for herdeprosessen

Vedlegg D: Valg av korrelasjonsmodeller

Vedlegg E: KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk

Vedlegg F: KlimaGrunns laboratorieprosedyre for utførelse og tolking av benderelementforsøk

Vedlegg G: Seismikk

Vedlegg H: Videre arbeid

Vedlegg I: Referanseliste

01	31.05.2023	Inkl. beregninger av reduserte klimagassutslipp og kostnader ved å benytte KlimaGrunns arbeidsmetodikk. Oppdatert utslippsfaktorer for bindemidler. Inkl. nyeste revisjon av laboratorieprosedyren for innblandingsforsøk (10222597-RIG-NOT-001 Rev 04, datert 25.04.2023).	Tonje Eide Helle Pernille Wiersholm	Steffen Giese	Odd Arne Fauskerud
00	31.08.2022		Tonje Eide Helle Atle Gerhardsen Thorbjørn Rekdal Steffen Giese Ingrid Hegseth Pernille Wiersholm	Odd Arne Fauskerud	Odd Arne Fauskerud
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

1 Introduksjon

KlimaGrunn er et innovasjonspartnerskap hvor Statens vegvesen, Bane NOR og Statsbygg sammen har mottatt støtte fra Innovasjon Norge og Nasjonalt Program for Leverandørutvikling for å utvikle nye metoder for grunnstabilisering. Målsetningen med KlimaGrunn har vært å utvikle en innovativ metode for å dokumentere styrke, deformasjonsegenskaper og homogenitet ved grunnforsterkning i kvikkleirer. I 2020 lyste Statens vegvesen, Statsbygg og Bane NOR ut en konkurranse for gjennomføring av utviklingsløpet i innovasjonspartnerskapet. Leverandørene Multiconsult, Cautus Geo, Heidelberg Materials (tidligere Norcem) og Argeo inngikk arbeidsfellesskap og var en av tilbyderne i konkurransen. Arbeidsfellesskapet ble i oktober 2020 valgt til å samarbeide med prosjekteierne for å utvikle en løsning som svarer til kravene i behovsbeskrivelsen:

Løsningen som utvikles må minimum gi informasjon om:

- *Skjærfasthet kontinuerlig langs peler fra 0 m til 30 m dybde*
- *Stivhet (deformasjonsegenskaper) kontinuerlig langs peler fra 0 m til 30 m dybde*
- *Utvikling av skjærfasthet og stivhet i peler fra de blandes og 6 måneder fram i tid*
- *Homogenitet i enkeltpeler*
- *Identifikasjon av hvilke(n) pel(er) som testes*

Løsningen som er utarbeidet er en tverrfaglig arbeidsmetodikk basert på materialteknologisk forståelse, sensorteknologi, seismikk og et brukergrensesnitt for presentasjon av data. Fagressursene i arbeidsfellesskapet innehar spisskompetanse innen materialteknologi, geoteknikk, sensorteknologi og seismikk. Den tverrfaglige sammensetningen har vært en forutsetning for å kunne lykkes med et komplekst utviklingsløp der inngående kunnskap om både herdeprosessen, materialparametere og måleteknologi har vært nødvendig. Leverandørsiden har vært ansvarlig for utviklingsløpet som har pågått i tidsrommet 1. desember 2020 til 31. august 2022. Utviklingsløpet er utført i tett samarbeid med prosjekteierne, og bestod av litteraturstudium, modellering, test av utstyr, utarbeiding av laboratorieprosedyrer og gjennomføring av to feltforsøk i forbindelse med Statens vegvesens utbyggingsprosjekt E18 Vestkorridoren. Utviklingsløpet er oppsummert i Vedlegg B.

Denne rapporten beskriver KlimaGrunns første versjon av den nyutviklede arbeidsmetodikken for å dokumentere og predikere styrke, stivhet og homogenitet av bindemiddelstabiliserte peler.

Dokumentasjon er inkludert som vedlegg.

2 Potensielle gevinster ved å benytte KlimaGrunns arbeidsmetodikk

2.1 Generelt

I utbyggingsprosjektet E6 Trondheim – Melhus ble det installert til sammen ca. 1 million løpemeter med bindemiddelstabiliserte peler, også ofte kalt kalk-/sementpeler (Statens vegvesen 2020). Det ble benyttet totalt ca. 17 000 tonn bindemidler, og klimagassutslippene knyttet til produksjonen av bindemiddelet utgjorde en fjerdedel av de totale utslippene knyttet til anlegget.

I dag benyttes ofte større mengder bindemidler enn det som er nødvendig for å oppnå ønsket fasthet i det grunnforsterkede jordvolumet. En av grunnene til dette er praktiske utfordringer ved dagens målemetoder som benyttes for å dokumentere oppnådd fasthet i pelene og som derfor medfører at testen ofte må utføres i løpet av den første uken etter at pelene er installert. Dette er tidlig i herdeforløpet, og man vet at fastheten i pelene fortsetter å utvikle seg i lang tid etter installasjonstidspunktet.

Gjennom KlimaGrunn er det utviklet en helhetlig løsning hvor styrken, stivheten og homogeniteten i bindemiddelstabiliserte peler dokumenteres lengre ut i herdeforløpet enn det som er mulig ved å benytte dagens målemetoder. Ved å la pelene herde lengre vil det utvikles større fasthet i pelene før målingen utføres. Dersom man inkluderer hensynet til herdeforløpet allerede i prosjekteringen, så vil man kunne redusere bindemiddelmengden, og følgelig også kostnader og klimagassutslipp knyttet til grunnforsterkning. Herdeforløpet som grunnlag for prosjekteringen beskrives ved hjelp av en korrelasjonsmodell som settes opp basert på innblandingsforsøk på laboratoriet. I byggefasen vil kontinuerlig overvåking av fasthetsutviklingen kunne bidra til ytterligere optimalisering av bindemiddelbruken. I dette kapittelet presenteres potensielle gevinster knyttet til reduserte kostnader og klimagassutslipp ifm. grunnforsterkning, samt økt kontroll med fasthetsutviklingen i byggefasen ved å ta KlimaGrunns arbeidsmetodikk i bruk.

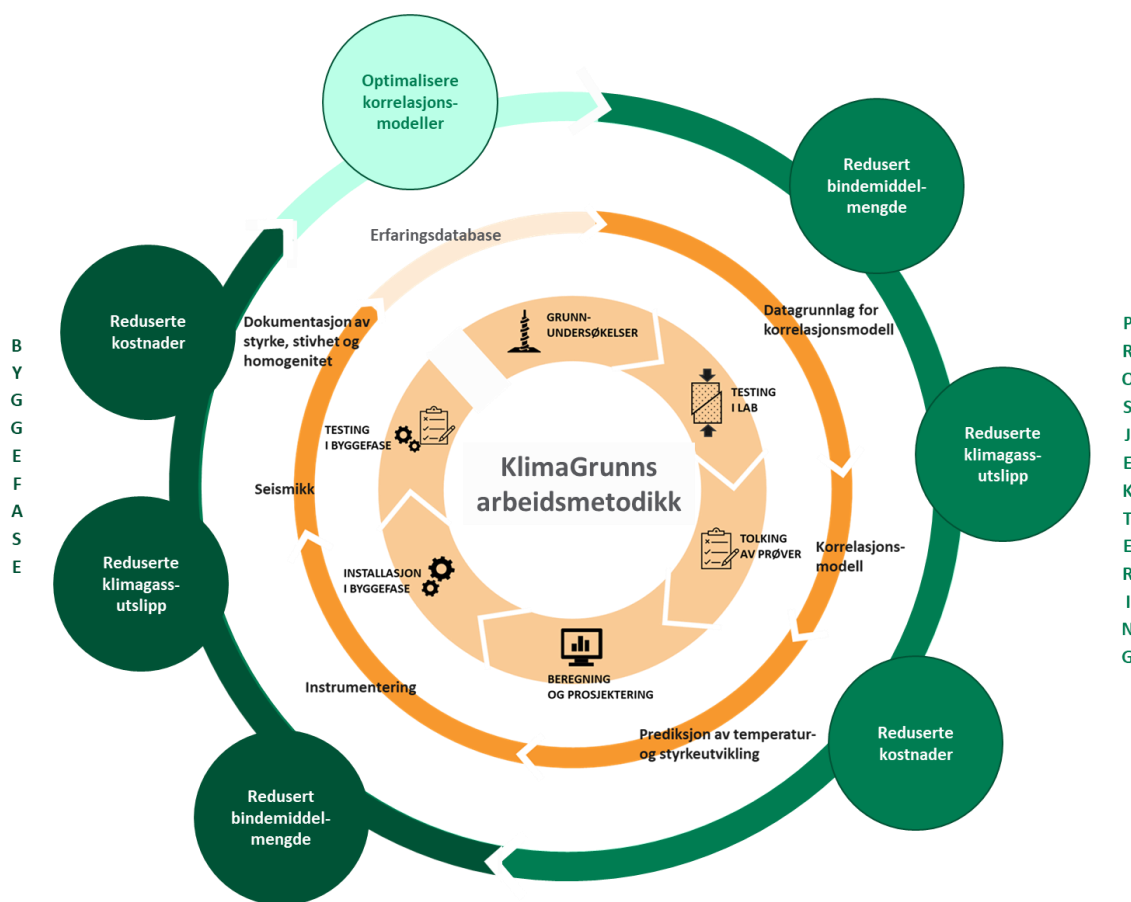
2.2 KlimaGrunns arbeidsmetodikk medfører reduserte utslipp og kostnader

I Norsk Geoteknisk Forenings «Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler» oppgis det at det normalt benyttes en bindemiddelmengde på 90-110 kg/m³ løsmasser (NGF 2012). I enkelte prosjekter har man forsøkt å optimalisere bindemiddelmengden og redusert den til 60-80 kg/m³ løsmasser. Laboratorieforsøk der det er blandet inn ulike bindemiddelmengder har vist at man kan oppnå tilstrekkelig høy fasthet i bindemiddelstabiliserte laboratorieprøver også ved lave innblandingsmengder helt ned til 30 kg/m³ løsmasser (NGI 2020).

I motsetning til dagens testmetoder, så har KlimaGrunn utviklet en arbeidsmetodikk der skjærfastheten kan dokumenteres uavhengig av herdetid og oppnådd fasthet ved testtidspunktet i den bindemiddelstabiliserte pelene. En klar forbedring sammenlignet med dagens praksis er at temperaturutviklingen i det bindemiddel-stabiliserte materialet inkluderes i vurdering av fasthetsutviklingen. Dette medfører bedre samsvar mellom fasthet målt på laboratoriepreparerte prøver og i felt. Feltmålingene 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 enda. Ved å inkludere temperaturutviklingen i pelene under vurderingen av fasthet og også la pelene herde over et lengre tidsrom, så kan den totale bindemiddelmengden reduseres. Klimagassutslippene og kostnadene knyttet til grunnforsterkning kan reduseres ved at:

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

KlimaGrunns arbeidsmetodikk (Figur 2-1) reduserer kostnader og klimagassutslipp i den prosjekterte løsningen ved at bindemiddelkombinasjon (mengde og type) optimaliseres for å oppnå krav til nødvendig fasthet innenfor fastsatt tidsrom og for å minimere klimagassutslippene. Korrelasjonsmodellene kan benyttes til å planlegge framdriften på anlegget basert på predikert fasthetsutvikling for valgt bindemiddelkombinasjon.



Figur 2-1: KlimaGrunns arbeidsmetodikk bidrar til å redusere klimagassutslipp og kostnader i både prosjekterings og byggefase.

I byggefase kan kostnadene og klimagassutslippene reduseres ytterligere ved at instrumentering og målinger utføres enten på et testfelt eller tidlig i installasjonsfasen for oppdatering av predikert fasthetsutvikling over tid, og/eller ytterligere optimalisering av bindemiddelmengden. Den kontinuerlige overvåkingen medfører at man har kontroll på om fasthetsutviklingen i byggefase samsvarer med den predikerte fasthetsutviklingen fra prosjekteringsfasen. Man kan dermed tidlig oppdage eventuelle ugunstige avvik og iverksette avbøtende tiltak. Slik bidrar KlimaGrunns arbeidsmetodikk også til økt sikkerhet under byggefase.

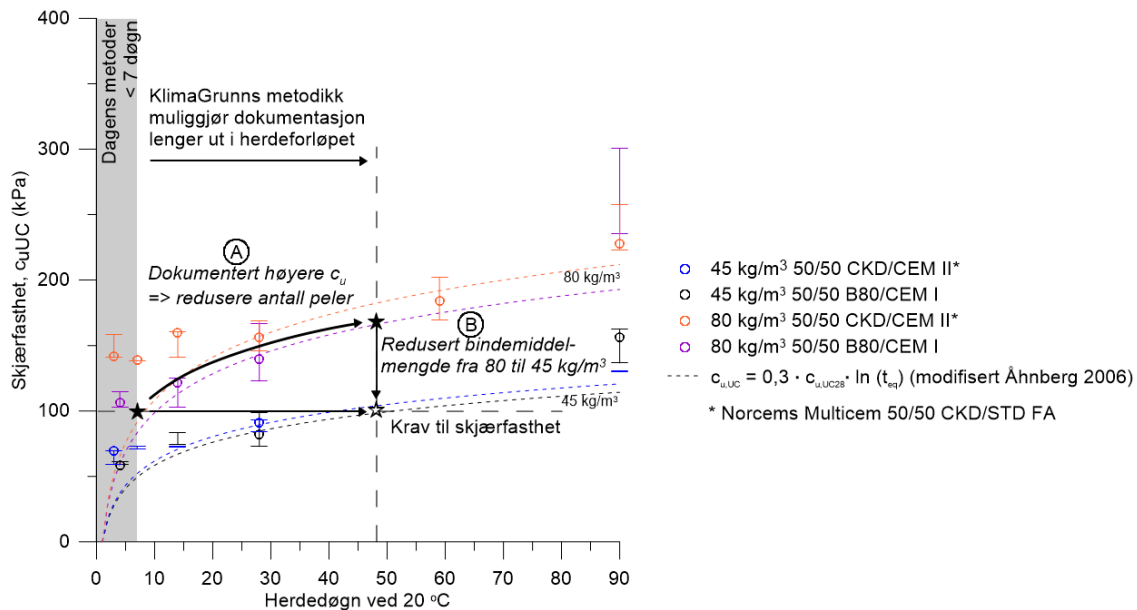
På sikt bør det etableres en erfaringsdatabase der data fra ulike prosjekter med grunnforsterkning sammenstilles. Dette datasettet kan benyttes til å utvikle pålitelige korrelasjonsmodeller for ulike grunnforhold og bindemiddelkombinasjoner slik at prediksjonen av fasthetsutviklingen blir enda mer treffsikker.

2.3 Eksempel fra KlimaGrunns feltforsøk

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 800 mm installert 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 horisontal grå linje i Figur 2-2), og gjennomsnittlig skjærfasthet i jordvolumet skal i dette tilfellet være 60 kPa. For KlimaGrunns to feltforsøk ble det utført innblandingsforsøk med bindemiddelmengde 45 kg/m³ og 80 kg/m³ med bindemiddelsammensetningen 50/50 Terraplast B80/CEM I og 50/50 CKD/CEM II. Resultatene fra innblandingsforsøkene er vist i Figur 2-2.

Iht. KlimaGrunns nyutviklede laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk, så skal prøvene herdes ved 20 ± 2 °C i stedet for i kjøleskap/-rom som beskrevet i gjeldende prosedyrer i NGF (2012) og Statens vegvesen (2016). I felt oppstår det imidlertid langt høyere temperaturer i pelen like etter installasjon (> 20 °C), og temperaturer på 15-20 °C kan vedvare over flere måneder etter installasjon. Dette medfører at fastheten i pelene utvikles raskere enn fastheten i laboratoriepreparerte prøver som herdes i kjøleskap. Ved å heller herde de laboratoriepreparerte prøvene ved 20 ± 2 °C oppnås en hurtigere fasthetsutvikling. Langtidstemperaturen i installasjonsmønsteret kan estimeres (se kap. 3.2.4), og temperaturutviklingen i pelene verifiseres ved temperaturmålinger i feltinstallerte peler. Disse temperaturmålingene benyttes til å regne om herdetiden etter installasjon til ekvivalent herdetid ved 20 °C (se kap. 3.2.3). Dermed er fastheten som hentes ut fra korrelasjonsmodellen basert på samme temperaturhistorie som i pelen i felt. Ergo vil man ved å benytte KlimaGrunns arbeidsmetodikk kunne hente ut høyere fasthet som legges til grunn i prosjekteringsfasen enn det som gjøres ved å benytte dagens praksis.

I dette eksempelet antas det at laboratorieresultatene samsvarer med resultatene i felt. Ved å tilsette en bindemiddelmengde på 80 kg/m³ løsmasser så kan det dokumenteres at krav til skjærfasthet i dette tilfellet er oppnådd allerede i løpet av den første uken. Ved å tillate at pelene herdes 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 pelene 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/m³ løsmasser (A i Figur 2-2). Dermed kan man øke senteravstanden konservativt mellom ribbene fra 1,5 m til 2,2 m. Et annet alternativ er å heller redusere bindemiddelmengden i pelene til 45 kg/m³ og la pelene herde over et tidsrom slik at krav til skjærfasthet oppnås (B i Figur 2-2). I et reelt tilfelle der temperaturen i felt avviker fra 20 °C så må man ta med i betraktningene at redusert bindemiddelmengde eller dekningsgrad også vil påvirke temperaturutviklingen i felt. Dette kan medføre at man må planlegge med lengre herdetid før nødvendig skjærfasthet oppnås i felt.



Figur 2-2: Ved å benytte KlimaGrunns arbeidsmetodikk kan man dokumentere skjærfastheten på et tidspunkt lengre ut i herdeforløpet enn ved å benytte dagens målemetoder. Dette bidrar til å redusere klimagassutslippene ved å A: la pelene herde over et lengre tidsrom slik at høyere fasthet kan dokumenteres, og dermed redusere antall peler, eller B: tilsette lavere mengder bindemiddel og la pelene herde lengre slik at krav til skjærfasthet likevel oppnås. I grafen vises resultater fra laboratorieforsøk utført ifm. KlimaGrunns feltforsøk ved E18 Vestkorridoren. Stiplede linjer viser korrelasjonsmodellen etter Åhnberg (2006).

Utslippsfaktorene varierer for de ulike bindemidlene. I dette tilfellet ser det ut til at skjærfastheten ikke påvirkes av type bindemiddel, og bindemiddelsammensetningen med lavest utslippsfaktor kan derfor velges. I dette tilfellet anbefales 50/50 CKD/CEM II som har en utslippsfaktor på 291 kg CO₂/tonn bindemiddel dersom bindemiddelet leveres fra Heidelberg Materials anlegg på Brevik. Klimagassutslippene reduseres med 34 % for alternativ A og 44 % for alternativ B (Tabell 2-1). Økonomisk sett betraktes alternativ A som det mest gunstige alternativet med en reduksjon i kostnader på hele 34 %. Kostnadene reduseres både som følge av installasjon av et færre antall peler og en reduksjon i total mengde bindemiddel (Tabell 2-1).

Tabell 2-1: 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/m ³ 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

2.4 Potensiale for ytterligere reduksjon av klimagassutslipp

For å ta ut maksimal, potensiell miljøgevinst som ligger i å redusere bindemiddelmengden bør det:

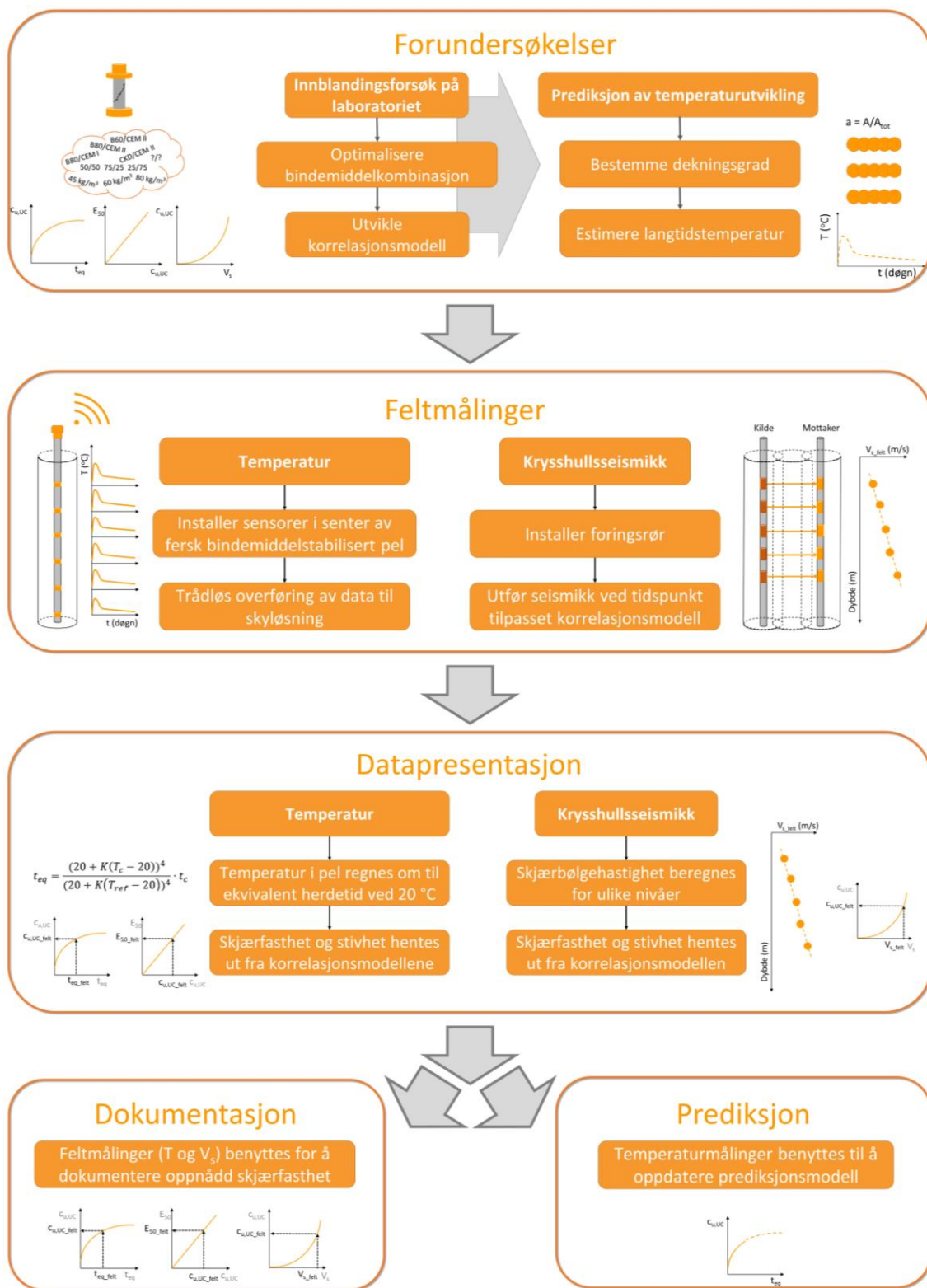
- planlegges for at bindemiddelstabiliserte peler installeres i god tid før igangsettelse av arbeider (utgraving/belastning) på forsterket grunn

- utvikles installasjonsutstyr som muliggjør installasjon av homogene peler med lavere innblandingsmengder enn dagens utstyr tillater
- utvikle en offentlig tilgjengelig erfaringsdatabase hvor laboratorie- og feltresultater fra ulike grunnforsterkningsprosjekter samles for å danne et datagrunnlag for:
 - enklere optimalisering av bindemiddeltype og -mengder for ulike typer grunnforhold
 - å oppnå en mer treffsikker prediksjon av fasthetsutviklingen

På de fleste bygge- og anleggsplasser er det stort fokus på framdrift, og tidsintervall mellom grunnforsterkning og igangsetting av anleggsarbeidene er ofte minimalt. Det benyttes derfor større mengder bindemidler enn nødvendig slik at kravet til oppnådd fasthet kan dokumenteres tidlig i herdeforløpet. For at KlimaGrunns arbeidsmetodikk skal tas i bruk i bransjen, så bør det opprettes incentiver i prosjektene for å stimulere bransjen til å la de bindemiddelstabiliserte 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 dette.

KlimaGrunns arbeidsmetodikk bidrar til en bærekraftig utvikling innenfor grunnforsterkning. Arbeidsmetodikken bør implementeres for bruk i bransjen for raskt å kunne fremskaffe et større erfaringsgrunnlag og for å utvikle pålitelige korrelasjonsmodeller tilpasset ulike grunnforhold og bindemiddelkombinasjoner.

3 KlimaGrunns arbeidsmetodikk for dokumentasjon og prediksjon av styrke og stivhet i bindemiddelstabiliserte leirer



Figur 3-1: KlimaGrunns arbeidsmetodikk for å dokumentere og predikere oppnådd skjærfasthet og stivhet

3.1 Generelt

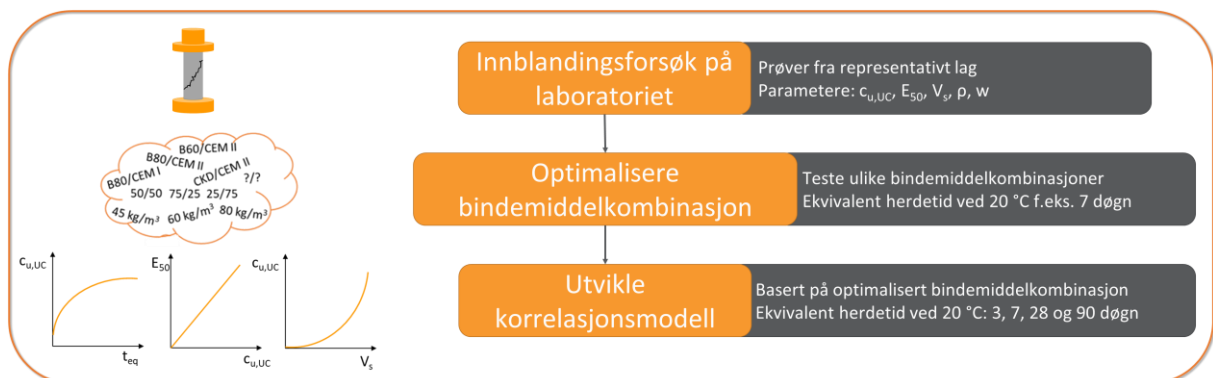
KlimaGrunns arbeidsmetodikk er basert på informasjon og erfaringer fra litteraturstudium, diskusjoner med entreprenører og leverandører, laboratorieforsøk og de to feltforsøkene som ble utført ifm. E18 Vestkorridoren og oppdragsgivers test på Vikingtidsmuseet på Bygdøy. I dette kapittelet beskrives KlimaGrunns arbeidsmetodikk v.1.0 for å dokumentere og predikere oppnådd skjærfasthet og stivhet i bindemiddelstabiliserte pelar (Figur 3-1). Arbeidsmetodikken består av:

- Forundersøkelser og utvikling av korrelasjonsmodeller
- Feltnmålinger
- Datapresentasjon
- Bruk av data for dokumentasjon og prediksjon

3.2 Forundersøkelser og korrelasjonsmodeller

3.2.1 Innblandingsforsøk – optimalisering av bindemiddelmengden og input til korrelasjonsmodellene

Innblandingsforsøk prepareres og utføres iht. KlimaGrunns prosedyrer for innblandingsforsøk (Vedlegg E) og benderelementforsøk (Vedlegg F) for å optimalisere bindemiddelkombinasjonen (mengde, type og sammensetning) og deretter utvikle korrelasjonsmodeller (Figur 3-2).



Figur 3-2: Innblandingsforsøk benyttes for å optimalisere bindemiddelkombinasjonen og til å produsere nødvendig input til korrelasjonsmodellen

Innblandingsforsøk

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.

Grunnet innblåsing av luft har de feltinstallerte pelene en tendens til å oppnå noe lavere densitet enn ustabiliserte løsmasser på stedet. Det anbefales derfor at prøvene stemples inn med 5 % lavere densitet enn ustabiliserte løsmasser in situ. Det skal prepareres tre like prøver for hver bindemiddelkombinasjon og herdetid.

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 tøyingsrate 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-tøyingskurven.

For enklere bestemmelse av første ankomne skjærbølge (S-bølge) anbefales det å utføre benderelementforsøkene ved å sende ut S-bølger med ulike perioder på samme prøve (f.eks. 0,20, 0,40, 0,50, 0,75 og 1,00 ms). 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). Mest nøyaktig plukking av ankomsttiden av første bølge får man fra signalet sendt ut med kortest mulig bølgeperiode. For GDS sine benderelement er dette 0,20 ms.

Optimalisering av bindemiddelkombinasjon

Oppnådd skjærfasthet kan variere for ulike løsmassetyper blandet med samme bindemiddelkombinasjon (mengde, type og sammensetning). For å finne den optimale kombinasjonen anbefales det å utføre laboratorieforsøk på aktuell løsmasse med ulike bindemiddeltypene og -mengder. Dette kan utføres ved å stampe inn sett med tre like prøver per bindemiddelkombinasjon for utførelse av forsøk etter f.eks. 7 herdedøgn (Tabell 3-1).

Kombinasjonen av bindemiddeltypene og -mengde som faktisk blir brukt i felt skal alltid testes på laboratoriet.

Tabell 3-1: Eksempel på hvordan man kan planlegge laboratorieprogram for optimalisering av bindemiddel

Laboratorieprogram # Innstampet densitet x g/cm ³	Herdetid alle prøver: x døgn					
	Batch 1	Batch 2	Batch 3	Batch 4	Batch 5	Batch 6
Bindemiddelmengde kg/m ³	60	60	60	50	80	80
Andel hver bindemiddeltypen	50/50	50/50	25/75	50/50	50/50	50/50
Bindemiddeltypen	B80/CEM II	CKD/CEM II	CKD/CEM II	CKD/CEM II	CKD/CEM II	B80/CEM II
A	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
B	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
C	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6

Utvikle korrelasjonsmodeller

Korrelasjonsmodeller kan utvikles for valgt bindemiddelkombinasjon ved å preparere flere sett med tre like prøver per herdetid. Som et minimum prepareres tre like prøver som herder i 28 døgn, men det anbefales å i tillegg preparere prøver som herder i 3, 7 og også 90 døgn dersom det på anlegget tillates at den bindemiddelstabiliserte leira herder over lang tid før området graves ut eller belastes (Tabell 3-2).

Dersom det er variasjon i grunnforholdene der det skal grunnforsterkes, så bør det utvikles korrelasjonsmodeller for de ulike løsmassetypene.

Tabell 3-2: Eksempel på hvordan laboratorieprogram for utvikling av korrelasjonsmodell kan planlegges. Løsmassene som benyttes i Batch 1-3 er homogenisert på forhånd før man blander inn bindemiddelet. Dette sikrer at man får sammenlignbare forsøk.

Laboratorieprogram B				
Innstampet densitet x g/cm ³				
80 kg/m ³ 50/50 CKD/CEM II				
Herdetid (døgn)				
	3	7	28	90
Batch 1				
A	A3	A7	A28	A90
Batch 2				
B	B3	B7	B28	B90
Batch 3				
C	C3	C7	C28	C90

3.2.2 Valg av bindemiddelkombinasjon

Kalk-/sementpeler er en samlebetegnelse på grunnforsterkning ved bruk av ulike typer og blandinger av bindemidler, også bindemidler som ikke inneholder kalk som f.eks. Cement Kiln Dust (CKD)/sement¹. Blandingsforhold og -mengde er prosjektavhengig. Ulike bindemiddelkombinasjoner vil fungere ulikt i ulike løsmassetyper. Bindemiddelkombinasjonen som benyttes på anlegget skal alltid testes på laboratoriepreparerte prøver der bindemiddelet er blandet med løsmasser fra representative lag fra lokasjoner der det skal grunnforsterkes.

Tabell 3-3: Utslippsfaktorer for ulike bindemidler.

Sementkomponent		Brent kalk/filterstøv	
Produktnavn	CO ₂ -ekvivalenter (kg CO ₂ /tonn bindemiddel)	Produktnavn	CO ₂ -ekvivalenter (kg CO ₂ /tonn bindemiddel)
Industrisement (CEM I 52,5 R)	716* (EPD datert 07.08.2020)	Terraplus B100 (Ren brent kalk)	1035* (EPD datert 31.10.2021)
Standardsement FA (CEM II/B-M 42,5R)	582* (EPD datert 07.08.2020)	Terraplus B80 (Brent kalk/LKD)	829* (EPD datert 31.10.2021)
CKD**	0***	Terraplus B60 (Brent kalk/LKD)	725* (EPD datert 31.10.2021)
		Terraplus B40 (LKD)	356* (EPD datert 13.08.2019)

* Alle CO₂-ekvivalenter er hentet fra EPDer til de respektive produktene fra Heidelberg Materials (tidligere Norcem) og Franzefoss

** Erstatte kalk i Heidelberg Materials produkt Multicem

*** CO₂-utslipp legges 100% på klinkerproduksjon

Kalk-/sement består av en prosentandel kalk og en prosentandel sement, f.eks. 25/75, 50/50 eller 75/25 brent kalk (f.eks. Terraplus B) og sement med eller uten en andel flygeaske (f.eks. Industrisement (CEM I 52,5 R) eller Standardsement FA (CEM II/B-M 42,5R)). Det er mest vanlig å benytte kalk av typen Terraplus B80 som inneholder ca. 20 % filterstøv (Lime Kiln Dust (LKD)). Dermed knyttes det lavere klimagassutslipp til Terraplus B80 enn Terraplus B100 (Tabell 3-3).

¹ Heidelberg Materials produktnavn for CKD/sement er Multicem. Multicem produseres med ulike blandingsforhold (25/75, 50/50, 75/25) av CKD og enten CEM I eller CEM II (<https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/Multicem>). CKD er bypasstøv fra sementproduksjonen.

Fasthetsutviklingen er imidlertid raskere for Terraplus B100 grunnet høyere reaktivt innhold. Standardsementen har lavere utslippsfaktor enn Industrisementen grunnet innhold av flyveaske.

Det kan også benyttes bindemiddel uten brent kalk. Dette består av en del industrisement (CEM I) eller en del Standardsement FA (CEM II), og en del filterstøv (bypassstøv) fra sementproduksjonen (CKD).

Det foreligger ingen klar anbefaling til hvilken bindemiddelkombinasjon (mengde, type og sammensetning) som er best egnet for ulike typer løsmasser. Man bør derfor prøve ut ulike kombinasjoner på laboratoriet. Herunder nevnes noen erfaringer som kan være til hjelp når man designer et laboratorieprogram:

- Det kan være behov for høyere bindemiddelmengde i løsmasser med høyt vanninnhold.
- I leirer med likt vanninnhold tilsatt samme bindemiddelkombinasjon, så er det observert at leirer med større andel silt oppnår høyere fasthet enn leirer med høyere andel leire (Helle et al. 2021).
- Ifølge Croft (1967) er det krevende å stabilisere leire med sement dersom leirinnholdet er over 50 %. Ved å benytte kun sement, vil styrken øke med avtakende leirinnhold (Bergado et al. 1996).
- Ved stabilisering med ren brent kalk bør leirinnholdet være over 20 % og summen av silt- og leirfraksjonen bør være over 35 % (Broms 1991).
- Sementandelen bør økes i leirer med høyt innhold av organisk materiale, salt eller svovel (sulfider), og i løsmasser med høy siltandel (Statens vegvesen 2014). I torv anbefaler Statens vegvesen (2014) at sementandelen er over 75 %.
- Fasthetsutviklingen er raskere ved å benytte ren Portland sement (CEM I) enn sement iblandet flyveaske (CEM II) (NGF 2012)
- Kaolinitiske og illitiske leirer er mer egnet for stabilisering med sement enn leirer som inneholder store mengder ekspansive leirmineraler. Ekspansive leirmineraler som montmorillonitt reagerer raskere med kalk enn mindre aktive mineraler som kaolinit og illitt (Croft 1967). Leirmineralene i norske kvikkeleirer er dominert av de ikke-svellende leirmineraltypene illitt og kloritt (Rosenqvist 1955; Mitchell og Soga 2005; Løken 1968; Rosenqvist 1975).

3.2.3 Korrelasjonsmodeller

Modenhetsprinsippet har lenge blitt benyttet innen betongteknologi for å kunne sammenligne herdeforløp for betong med forskjellig 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 1). 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).

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

Utledet fra Åhnberg og Holm (1987), modifisert etter Vervoorn og Barros (2020)

Ligning 1

Ekvivalent herdetid benyttes inn i Ligning 2 hvor $c_{u,UC}(t_{eq})$ er enaksiell udrenert skjærfasthet (kPa) for prøver herdet ved ekvivalent herdetid, t_{eq} , ved referansetemperaturen (her 20 °C). $c_{u,UC28}$ er enaksiell udrenert skjærfasthet (kPa) ved $t_{eq} = 28$ døgn. Korrelasjonen utgjør et nedre konservativt estimat i KlimaGrunns datasett.

Det var ikke mulig å finne en generell korrelasjon mellom elastisitetsmodulen ($E_{50,UC}$) og den udrenerte skjærfastheten ($c_{u,UC}$) fra enaksialforsøkene. Konstanten A i Ligning 3 bør derfor inntil det foreligger mer erfaringsdata 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 4. Skjærmodulen (G_0) beregnes ut fra densitet (ρ) og skjærbølgehastighet (Ligning 5). Basert på KlimaGrunns resultater så kan Ligning 6 (Flores et al. 2010) der G_0 normaliseres på G_0 ved 28 herdedøgn ($G_{0,28}$) benyttes som et nedre konservativt estimat for å estimere G_0 ved ulike herdetidspunkt.

Korrelasjonsmodellene og konstantene i Ligning 4 og Ligning 6 bør revurderes etter hvert som man får tilgang til mer data.

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

Modifisert Åhnberg (2006)

Ligning 2

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

Ligning 3

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

Dannewitz et al. 2005

Ligning 4

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

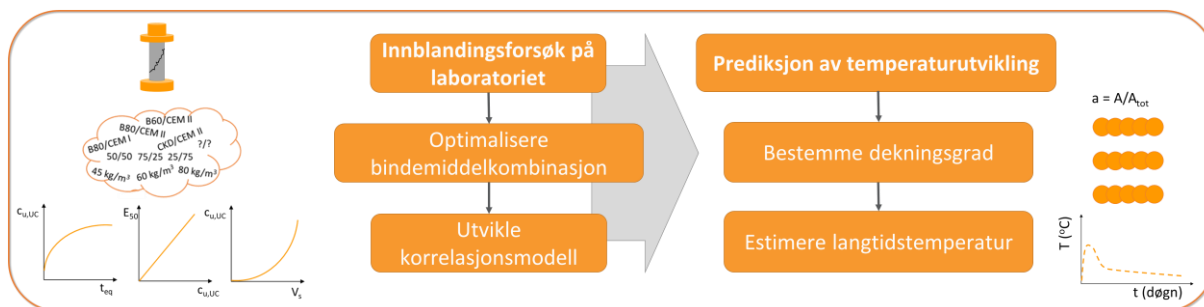
Ligning 5

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

Modifisert Flores et al. (2010)

Ligning 6

3.2.4 Prediksjon av temperaturutvikling



Figur 3-3: Optimalisert bindemiddelkombinasjon benyttes sammen med dekningsgrad for å estimere langtidstemperaturen i de bindemiddelstabiliserte pelene.

Prediksjon av forventet temperaturutvikling i felt vil blant annet kunne:

- gi en indikasjon på forventet oppnådd styrke i pelen ved gitte tidspunkt ved å regne om til ekvivalent herdetid
- benyttes i forbindelse med prosjekteringen
- benyttes for planlegging av på hvilke tidspunkt krysshullsseismikken skal utføres i felt
- benyttes for fremdriftsplanlegging i byggefasen

Utførte simuleringer og temperaturmålinger (Wiersholm 2018) tilsier at man i større ribbesystem vil oppnå en jevn langtidstemperatur i det pelestabiliserte volumet, ofte over flere måneder. Basert på valgt bindemiddelkombinasjon, dekningsgrad ($a = \text{stabilisert jordvolum} / \text{totalt jordvolum}$) og grunnforhold kan man beregne et øvre estimat for langtidstemperaturen i senter av pel (Figur 3-3).

Mengde bindemiddel (C) og type bindemiddel avgjør den totale potensielle energien som tilføres leira. Denne energien bidrar til en temperaturøkning i materialet. Forenklet kan man anta at varmetapet mot bunn- og topp av pel, samt ved ytterkant av pelesystemet er neglisjerbar, og at temperaturen utjevner seg i hele jordvolumet. Dermed estimeres temperaturendringen (ΔT) ved å benytte Ligning 7 og Ligning 8.

$$\Delta T = \frac{Q_u * C}{C_p * \rho} * a \quad \text{Bache et al. (2022)} \quad \text{Ligning 7}$$

$$C_p = (m_s C_p^s + m_w * C_p^w) / m_{tot} \quad \text{Andersland og Landanyi (2004)} \quad \text{Ligning 8}$$

Potensiell varmetilførsel (Q_u) for kalk og sement er angitt i Tabell 3-4. Foreløpig mangler verdier for CKD. Dersom det benyttes en kombinasjon av to bindemiddeltypen vektlegges disse iht. andelen som benyttes. Spesifikk varmekapasitet (C_p) og densitet (ρ) bestemmes basert på materialparametere, og avhenger bl.a. av vanninnholdet. Spesifikk varmekapasitet for leire og vann er angitt i Tabell 3-5. Den spesifikke varmekapasiteten til materialet vektet basert på massen av fast stoff (m_s) og masse vann (m_w). Ettersom mengden bindemiddel som regel er lav sammenlignet med den totale massen av materialet, kan man forenklet beregne den spesifikke varmekapasiteten uten å hensynta varmekapasiteten til selve bindemiddelet da bidraget fra bindemiddelet er neglisjerbart.

Prediksjonen angir et grovt estimat for forventet temperatur med følgende forbehold/usikkerhetsmomenter:

- Prediksjonen beregner en stasjonær tilstand hvor temperaturen i pelene og omkringliggende leire er utjevnet. På kort sikt vil forventet temperatur i pelen være høyere enn dette.
- Prediksjonen er basert på maksimal varmeutvikling fra bindemiddelet, og grad av hydratisering er derfor ikke inkludert. Hydratiseringen kan medføre lavere varmeutvikling, og prediksjonen er derfor ikke konservativ på lang sikt.
- Prediksjonen angir temperaturen i senter av pel. I topp- og bunn av pelen, samt i ytterkant av ribbesystemet må man forvente større påvirkning fra omgivelsene, og lavere langtidstemperatur enn beregnet.
- Prediksjonen tar ikke hensyn til påvirkning fra ytterkant av ribbesystemet, og bør derfor kun benyttes for ribbesystemer av en viss størrelse.
- Forhold som installasjonstidspunkt, grunnvannstrømning og ulike forhold i felt (faktisk innblandingmengde, variasjon i grunnforhold m.m.) vil kunne påvirke temperaturutviklingen.

Temperaturforløpet dokumenteres i felt for hvert prosjekt og tiltak. Temperaturmålingene i felt kan benyttes til å kontrollere prediksjonen og om nødvendig revurdere prosjektert løsning.

Tabell 3-4: Potensiell varmetilførsel for ulike bindemiddel (kJ/kg).

	Sement	Kalk
Potensiell varmetilførsel, Q_u (kJ/kg)	320-360 ¹	1163 ²

¹ Varmeutvikling for en CEM I-sement. Varmeutviklingen avhenger bl.a. av finmalingsgrad og masseforhold. Ved 20% flygeaske reduseres varmeutviklingen med omtrent 15% (Maage et al. 2018)

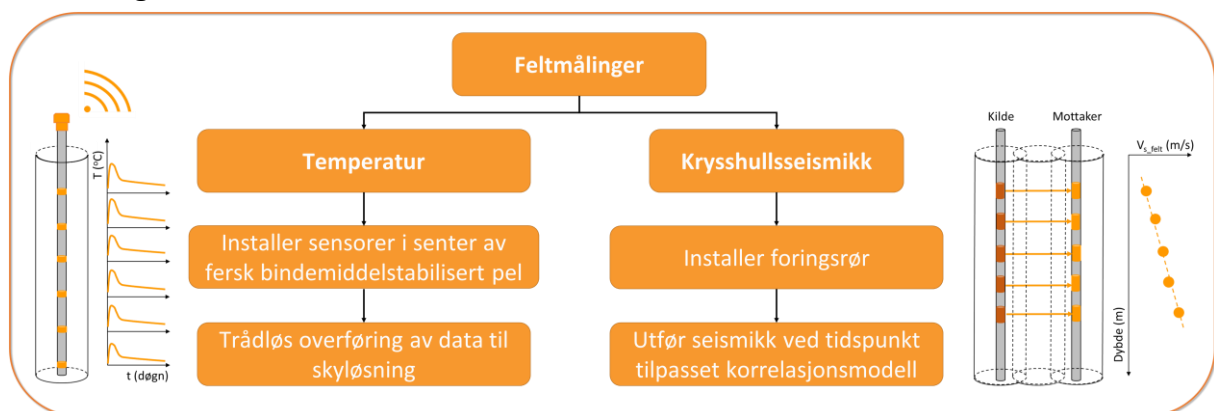
² Ulesket kalk (Boynton 1980)

Tabell 3-5: Spesifikk varmekapasitet for leire og vann (kJ/kgK) (Andersland og Ladanyi 2004)

Materiale, indeks i	Leire	Vann
Spesifikk varmekapasitet, C_p^i [kJ/kgK]	0,72 ¹	4,18

¹ Spesifikk varmekapasitet til leire er avhengig av mineralogien til leiren og kan variere utover oppgitt tall.

3.3 Feltemålinger



Figur 3-4: Det utføres kontinuerlig temperaturmåling og krysshullsseismikk ved tidspunkt tilpasset korrelasjonsmodellen

3.3.1 *Temperaturmålinger i bindemiddelstabiliserte peler i felt*

Temperaturmålinger i bindemiddelstabilisert pel utføres ved at man installerer temperatursensorer på ulike nivåer i senter av pelen (Figur 3-4). Temperatursensorene må ha god kontakt med de bindemiddelstabiliserte massene slik at temperaturmålingene blir representative for temperaturen i massen der sensoren er installert. Installasjon av sensorene må derfor utføres umiddelbart etter at pelen er installert.

Anbefalinger til installasjon av temperatursensorer i bindemiddelstabilisert pel:

Installasjon av sensorer og igangsetting av datalogging bør skje umiddelbart etter at pelen er satt.

Temperatursensorene som benyttes må være av en kvalitet som er beregnet for industriell eller geoteknisk instrumentering.

Dataloggeren bør settes opp til å utføre målinger en gang i timen gjennom hele prosjektperioden. De første dagene etter innblanding av bindemidler har man den raskeste endringen i temperatur. For å fange opp dette bør det utføres målinger hvert 15. minutt i denne perioden.

Det anbefales å benytte en temperaturstreng med termistorer plassert i de nivåene i pelen som man ønsker å monitorere. Sensorene kobles til en datalogger som utfører målingene og overfører måledataene 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 påvirkes av lufttemperaturen.

Temperatursensorene bør plasseres jevnt fra 0,5 meter over bunnen av pelen og opp til 3 m under terreng.

Selve temperaturstrengen presses ned i senter av den ferske pelen av en geoteknisk borerigg ved å bruke poretrykksrør og slippadapter. Når sensorene er plassert på ønsket dybde trekkes poretrykksrøret opp slik at kun termistorstrengen blir stående igjen i pelen.

Overføring av data i nær sanntid til en skyløsning hvor alle som har behov for tilgang har tilgang til de samme data.

Instrumenteringen bør være trådløs og uten behov for å trekke kabler over anleggsområdet.

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.

Det bør i tillegg installeres temperatursensorer på flere områder på anlegget dersom det:

- benyttes ulike installasjonsmønstre (ribber, gitter, blokk, enkeltpeler)
- benyttes ulike bindemiddelkombinasjoner (mengde, type, sammensetning)
- er store variasjoner i grunnforhold

Praktiske forhold som bør ivaretas:

- Instrumenter peler som befinner seg i et område med lite annen aktivitet. Avklar framdrift med prosjekteier, og bruk framdriftsplanen for valg av område.

- Sørge for god sikring av sensorene mot påkjørsel, hæverket, tyveri og annen ødeleggelse.
- Instrumenter peler i testområder i de prosjektene hvor man skal utføre testpeling.

3.3.2 Krysshullsseismikk

Installasjon av foringsrør

Krysshullsseismikk utføres i en ribbe med bindemiddelstabiliserte peler. Det installeres minimum to stk. foringsrør i plast med senteravstand 2-3 m i senter av to av pelene. Foringsrørene settes til en dybde tilsvarende pelenes dybde og til 0,7 m under ønsket største måledybde.

Metodikk for installasjon av foringsrør må vurderes fra prosjekt til prosjekt:

- Ideelt sett bør foringsrøret installeres i senter av pelen i hele pelens lengde
- 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. Retningsavvik bør også ideelt sett utføres for de bindemiddelstabiliserte pelene.
- 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.

Utførelse av krysshullsseismikk

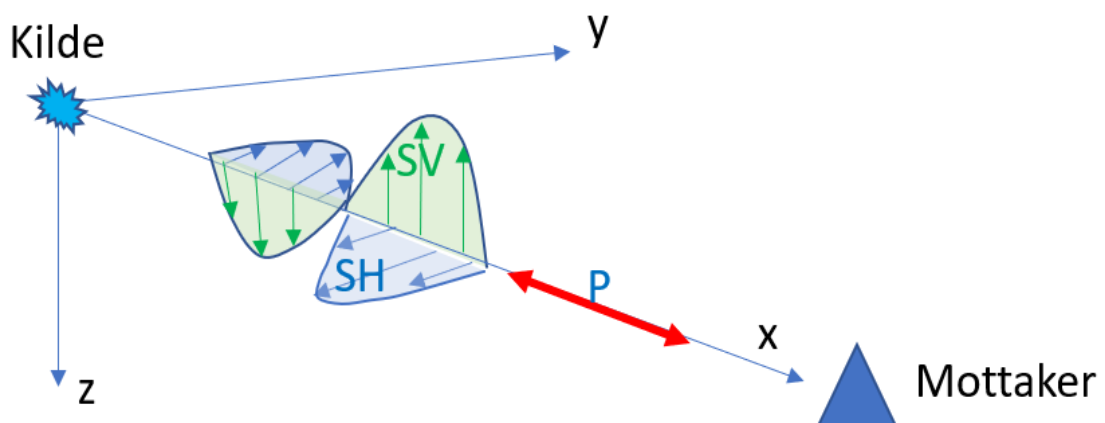
Krysshullmålinger gjennomføres ved å senke kilde og mottakere ned i hvert sitt foringsrør til samme dybde. Mottakerne bør minimum kunne registrere partikkel-bevegelse eller partikkel-akselerasjon i de to horisontale retningene i kilde-mottaker planet (x- og y-retning i Figur 3-5). Kilden og mottakeren presses mot rørveggen ved å fylle en blære med gass til et trykk på ca. 1,5 bar. Kilden orienteres slik at støtet mot rørveggen er i retning normalt på retning mellom kilde og mottaker. I Figur 3-5 vil det bety at kilden sender et støt i y-aksens retning. Årsaken til at en sender støtet normalt på retningen mot mottakeren er for å kunne oppnå samme polaritet på P- og SV-bølgene når en snur kilden 180 grader i negativ y-retning, samtidig som SH-bølgen snur polaritet.

I Figur 3-5 vises de tre bølgetypene som forplanter seg i materialet. Vi ser her bort fra overflatebølger da disse har lavere hastigheter og ankommer senere. P-bølgen ankommer først og deretter S-bølgen. S-bølgen er dekomponert i en horisontal (SH) og vertikal (SV) komponent som har samme hastighet i et isotropt medium. Vi ønsker å bestemme S-bølgehastigheten.

P-bølgene gjør det vanskelig å bestemme ankomsttiden til S-bølgen da P-bølge signalet kan overlappes med S-bølgen. Den første registreringen er signalet som måles når en støter mot rørveggen i positiv y-retning og den andre registreringen er signalet som måles når en snur kilden 180 grader og støter mot rørveggen i negativ y-retning. Ankomsttiden av SH-bølgen tolkes da ideelt ved det tidspunktet der disse to registreringene har ulik polaritet. Ved å subtrahere de to signalene, vil en ideelt fjerne P-bølge og SV-bølgeenergi mens en beholder SH-bølgeenergien. Mottakerne er orientert slik at den ene måler partikkelbevegelse/akselerasjon normalt på kilde-mottaker linjen, og den andre måler normalt på samme retning i horisontalplanet. Kildesignalet repeteres 1-3 ganger hvis ikke-repeterbare forstyrrelser er ubetydelige. Deretter snus kilden 180 grader for å registrere

SH-bølgekomponenten med motsatt polaritet, og antall kilde-signal repeteres. For å måle på neste dyp festes kilde- og mottakerkablene før gassen i blærene frigis. Deretter flyttes kilde og mottaker til neste måledyp og prosedyren over gjentas. Det anbefales å måle for hver 10 cm over hele dybden som skal måles. I tillegg kontrollmåle hver 10-100 cm med å la kilde og mottaker bytte foringsrør. Denne kontrollen kan gi et estimat på usikkerheten i beregningene.

Målingene benyttes til å estimere gjennomsnittlig skjærbølgehastighet per dybdenivå mellom foringsrørene. Hastighetene benyttes til å estimere herdeforløpet i skjærstyrke etter en empirisk formel (Ligning 4). Det anbefales å måle på minst to datoer, der den første målingen utføres tidlig i forløpet og den andre ved ekvivalent herdetid 20-30 dager ved 20 °C.



Figur 3-5: Illustrasjon av partikkelbevegelse for P-bølge, SV og SH-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. Partikkelbevegelsesretningen 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.

Anbefalinger til utførelse av krysshullsseismikk i bindemiddelstabilisert peler

Installasjon av foringsrør i ribbe med bindemiddelstabiliserte peler:

- 1) To foringsrør installeres på linje i en ribbe med bindemiddelstabiliserte peler. Pelene i ribben installeres med overlapp iht. anbefalinger i NGF (2012) og Statens vegvesen (2014).
- 2) Foringsrørene installeres i forborede hull i senter av de bindemiddelstabiliserte pelene, og bør ha en senteravstand på minimum 2 m.
- 3) For å sikre tilstrekkelig plass for kilde og mottaker ved dypeste målepunkt, så må foringsrørene installeres til minimum 0,4 m (helst > 0,7 m) under dypeste målepunkt.
- 4) Det må være god kontakt (unngå luftfylte hulrom) mellom foringsrør og pel. Foringsrørene bør derfor installeres så fort som mulig etter installasjon av pel, og helst innen 8 timer etter installasjon. Bentonitt kan ev. benyttes for å tette hulrom rundt foringsrørene.
- 5) Rørene skal være tørre. For å hindre vanninntrengning så må foringsrørene tettes i topp og bunn. I topp benyttes en avtagbar propp med pakning. Gjengetape eller lignende bør benyttes på gjengene mellom de ulike seksjonene av foringsrørene.

- 6) Ideelt sett bør det utføres inklinasjonsmålinger under installasjon av pel og etter nedsetting av foringsrør. Dette for å vurdere om at pelene har overlapp over hele dybden det skal måles over, og for å beregne nøyaktig avstand mellom kilde og mottaker på de ulike måledybde.
- 7) Etter at foringsrørene har satt seg, gjennomføres inklinasjonsmålinger hver 0,5 m ned til dypeste planlagte måledybde.

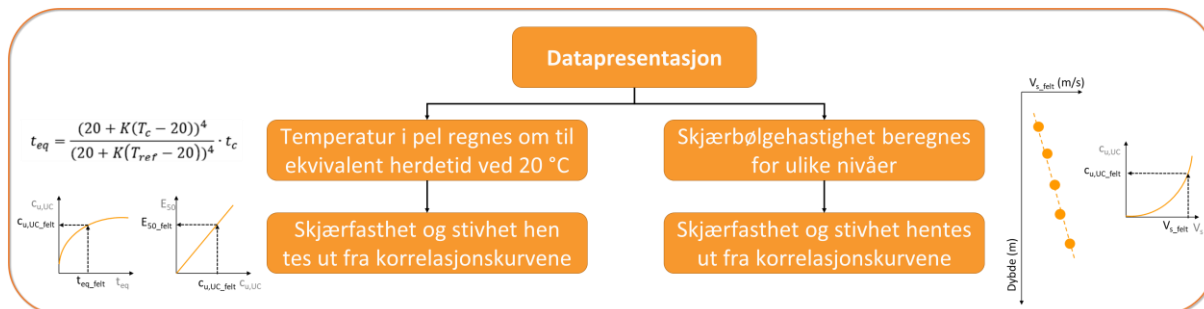
Krysshullsseismikk:

- 8) Kilden senkes ned til øverste målepunkt i rør 1. Kilden orienteres slik at støtet gis mot rørveggen i retning normalt på linjen mellom rør 1 og rør 2 i horisontalplanet (y-retning i **Error! Reference source not found.**). Kilden festes mot rørveggen ved å fylle kildeblæren med gass til 1, 5 bar.
- 9) Mottakeren senkes til samme dybde som kilden i rør 2. Mottakeren bør orienteres slik at den registrerer signal normalt på linjen mellom rør 1 og rør 2, samt parallelt med denne linjen. Mottakerblæren fylles med gass til 1,5 bar for å sikre kobling til rørveggen.
- 10) Kilden fyres og gir et støt mot rørveggen. Kilden repeterer signalet 1-3 ganger hvis det registrerte signalet ikke endrer seg nevneverdig mellom repetisjonene. Hvis mot formodning, bakgrunnsstøyen fra trafikk og lignende påvirker signalet kan en vurdere å summere opp til 10 skudd. Erfaringene så langt er at bakgrunnsstøyen er ubetydelig sammenlignet med signalstyrken.
- 11) De innsamlede dataene lagres på harddisk på registrerings-PC i felt.
- 12) Kilden holdes fast mens blæregassen frigis. Deretter snus kilden 180 grader og punktene over repeteres.
- 13) Kilden og mottakeren holdes fast mens blærene frigis for trykk, og de flyttes ned til neste dyp og punktene over repeteres.
- 14) Det anbefales å måle med 10 cm dybdeintervaller.
- 15) Etter at alle målingene er gjennomført i ønskede dybdeintervaller løftes kilde og mottaker opp av hhv. rør 1 og rør 2. Kilden senkes ned til første dyp i rør 2, og mottakeren senkes til første dyp i rør 1. Punktene over repeteres, men de kan utføres med lengre dybdeintervaller (20-100 cm). Disse målingene skal benyttes for verifikasjon av det første målesettet, samt til å estimere usikkerheten i tolkning av ankomsttider. Endringer i bl.a. kobling kan føre til ulikt signal når en bytter om kilde og mottaker posisjonen.

Prosessering for estimering av skjærbølgehastighet:

- 16) Inklinasjonsmålingene benyttes til å beregne avstander mellom kilde og mottaker ved hvert dyp. Inklinasjonsmålingene interpoleres lineært til hvert dyp. Dette kan for eksempel utføres i Excel.
- 17) Dataene tas inn i en seismisk prosesseringspakke for frekvensfiltrering, subtraksjon av signalene i de to motsatte retningene for samme kilde og mottaker posisjon, og plukking av gangtider. I KlimaGrunn er det benyttet båndbreddefiltrering hvor en beholder frekvenser i området 30-300 Hz.
- 18) SH-bølgen beregnes som beregnet avstand mellom kilde og mottaker dividert på ankomsttid.

3.4 Datapresentasjon



Figur 3-6: Temperaturmålinger og beregnet skjærbølgehastighet importeres og presenteres på Cautus Web

Temperaturmålingene som utføres i felt bør overføres og importeres automatisk i en felles skyløsning for dataforvaltning, analyse og presentasjon av måledata. Under importen må data kontrolleres og kobles til korrekt målepunkt (Figur 3-6). Dette bør være en fullstendig automatisk prosess. Tolket skjærbølgehastighet fra seismikken bør også importeres og presenteres i samme skyløsning.

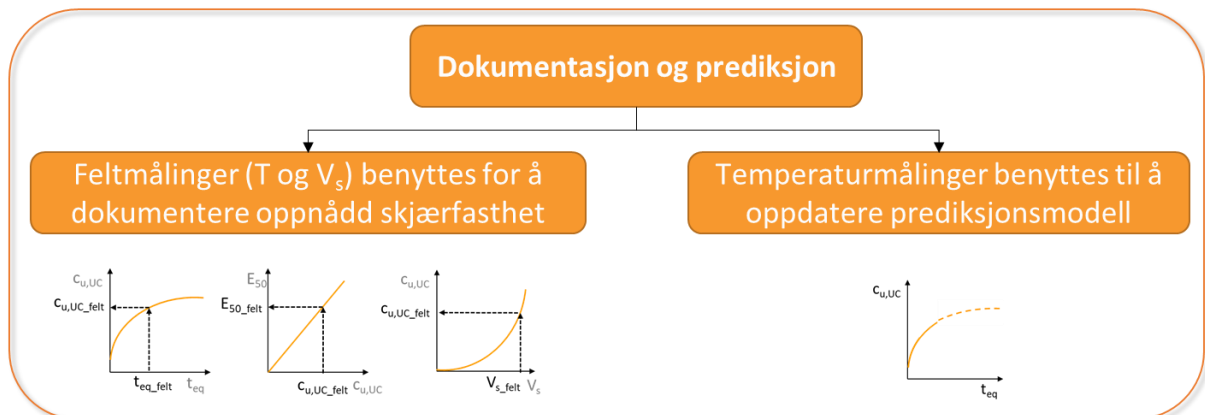
Omregningen til ekvivalent herdetid bør skje automatisk når data er kommet inn i databasen, dette blir gjort ved bruk av Ligning 1. Ekvivalent herdetid går inn i beregningen av udrenert skjærfasthet ved bruk av korrelasjonsmodellen i Ligning 2.

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 sensorenes plassering geografisk. For KlimaGrunn er det i Cautus Web laget funksjonalitet for presentasjon av følgende datatyper:

- Temperatur (sanntid og predikert)
- Udrenert skjærfasthet basert på temperaturutvikling etter installasjon og predikert temperatur
- Poretrykk
- Skjærbølgehastighet
- Retthetsmåling av borehull
- Vanninnhold
- Konduktivitet
- Relativ luftfuktighet

Det er viktig å ha en skyløsning hvor alle som har behov for å bruke dataene har tilgang til samme løsning, og at løsningen har en funksjonalitet for at flere brukere får tilgang til løsningen uavhengig av lokasjon og plattform.

3.5 Dokumentasjon og prediksjon av oppnådd fasthet og stivhet



Figur 3-7: Feltmålingene benyttes til å dokumentere oppnådd skjærfasthet i pelene og til å oppdatere prediksjonsmodellen.

3.5.1 Dokumentasjon av oppnådd skjærfasthet i bindemiddelstabiliserte peler

Både temperaturmålingene og skjærbølgehastigheten målt ved krysshullsseismikk (Figur 3-7) benyttes for å hente ut skjærfastheten fra de laboratoriebaserte korrelasjonsmodellene (Ligning 2 og Ligning 4).

Temperaturhistorien i den bindemiddelstabiliserte pelen regnes om til ekvivalent herdetid ved 20 °C (t_{eq_felt} i Figur 3-7) ved å benytte Ligning 1. Deretter hentes skjærfastheten ut fra kurven ved den oppnådde ekvivalente herdetiden i felt (c_{uUC_felt}). Skjærbølgehastighetsmålingene fra krysshullsseismikken benyttes direkte inn i korrelasjonen for skjærbølgehastighet mot skjærfasthet for å hente ut c_{uUC_felt} . Selv om korrelasjonen til Dannewitz et al. (2005) i Ligning 4 er basert på laboratorieresultater, så antas det her at den kan benyttes for tolking av skjærfasthet basert på skjærbølgehastighet målt i felt.

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 denne 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. Siden skjærbølgehastigheten øker med økende skjærfasthet, så vil dybdeeffekten til en viss grad inkluderes ved å hente ut skjærfastheten fra korrelasjonen mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet. 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 3).

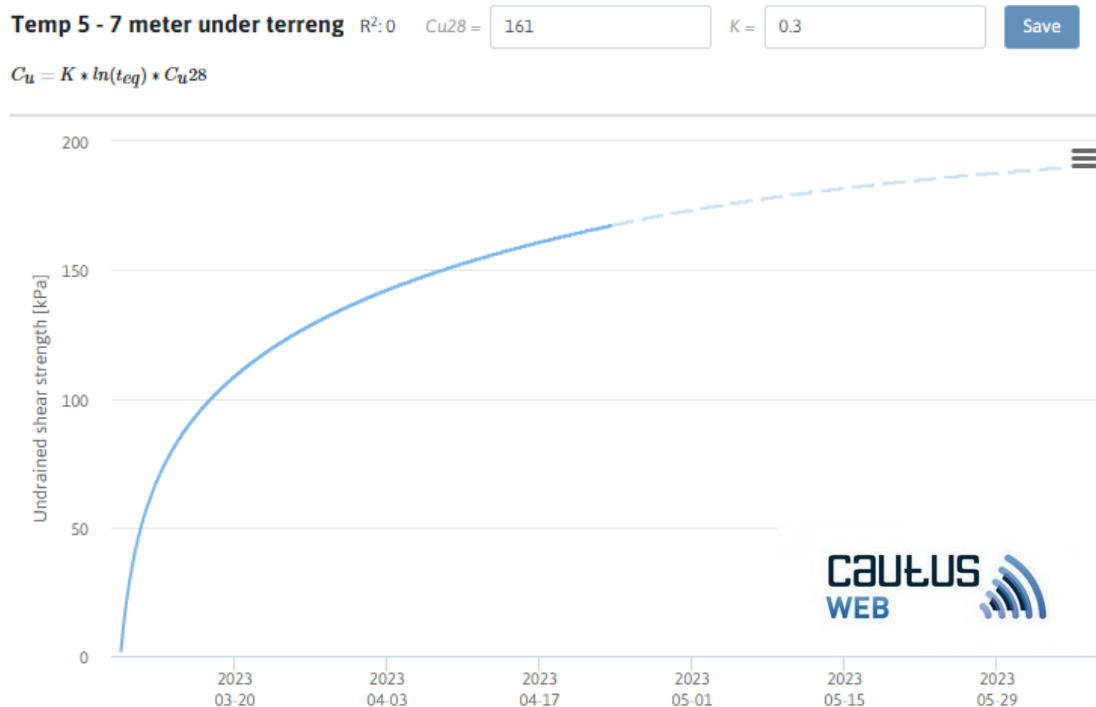
Skjærmodulen (G_0) kan beregnes fra Ligning 5 dersom densiteten i pelen er kjent. Ev. kan man følge samme prinsipp som for laboratorieprøvene og anta at densiteten er 5 % lavere enn i ustabiliserte løsmasser in-situ. Ligning 6 kan benyttes for et konservativt estimat av G_0 .

3.5.2 Prediksjon

Prediksjon av skjærfasthetsutviklingen er nyttig for framdriftsplanleggingen både i anleggsvirksomheten og for å planlegge når krysshullsseismikken skal utføres i felt. Korrelasjonen for utvikling av skjærfasthet over ekvivalent herdetid (Ligning 2) oppdateres i Cautus Web basert på de

kontinuerlige temperaturmålingene i felt. Det er også lagt inn funksjonalitet i Cautus Web der man kan legge inn antatt eller estimert temperatur i pelen fram i tid (antall døgn etter installasjon) som benyttes til å predikere styrkeutviklingen (Figur 3-8).

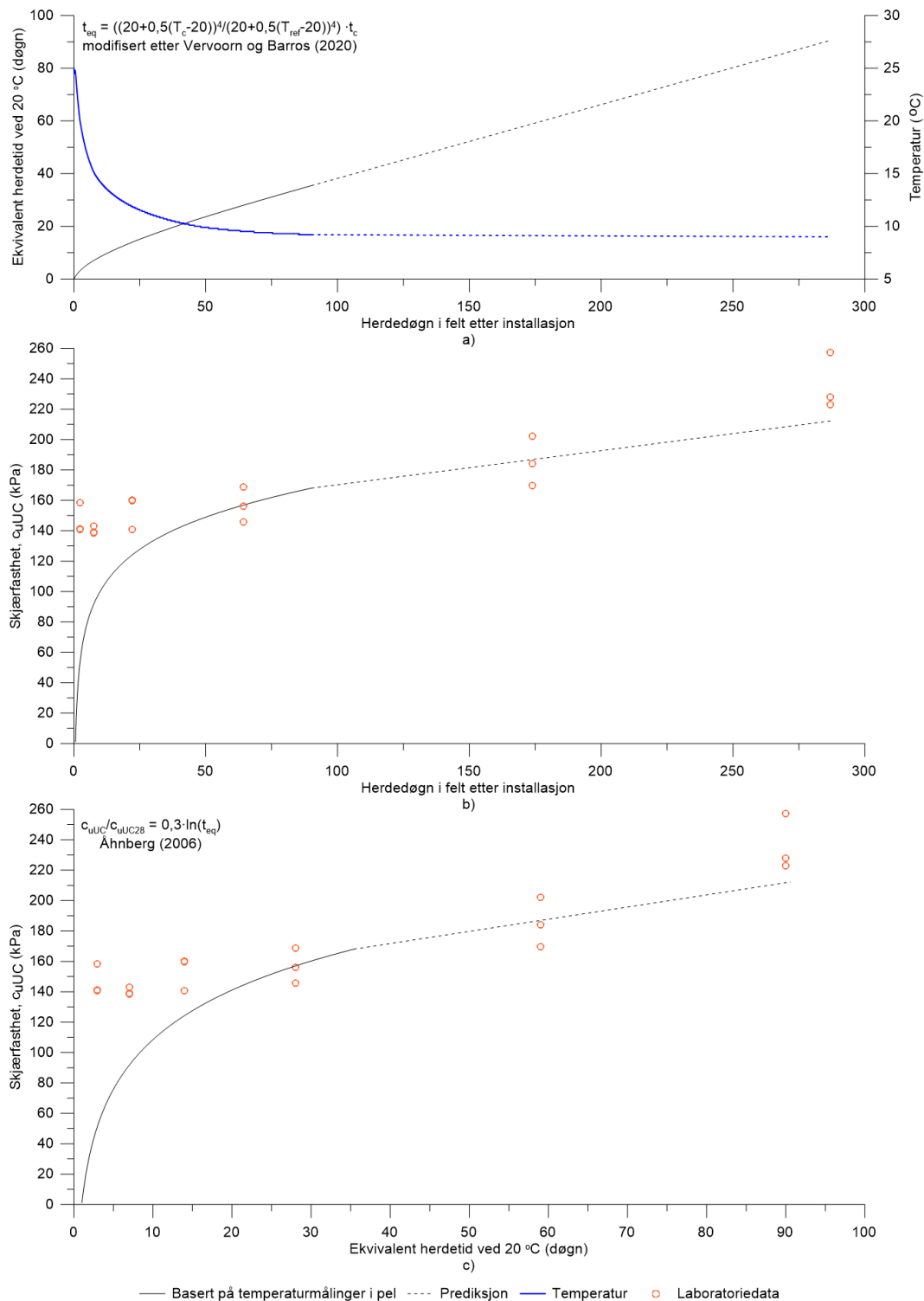
Prediksjon fram i tid kan estimeres ved å anta temperatur ved et fremtidig tidspunkt som benyttes for prediksjon av hvordan skjærfastheten utvikler seg framover i tid (Figur 3-9). For å vurdere fremtidig temperatur kan man ta utgangspunkt i foreløpig målt temperaturtrend og estimert langtidstemperatur i pel basert på Ligning 7 og Ligning 8, beskrevet i kapittel 3.2.4.



Figur 3-8: Predikert skjærfasthet vises med stiplet linje i Cautus Web.

Det anbefales å utføre krysshullsseismikk for verifikasjon av skjærfastheten før igangsettelse av utgraving eller pålasting i de grunnforsterkede områdene.

Korrelasjonen for utviklingen av skjærmodulen over tid (Ligning 6) kan benyttes for å lage en modell for hvordan G_0 utvikler seg over tid basert på laboratorieresultater. Dette kan være nyttig for å få en indikasjon på hvilke verdier man kan forvente ved utførelse av krysshullsseismikken ved ulike tidspunkt.



Figur 3-9: a) Ekvivalent herdetid ved 20 °C (t_{eq}) beregnes basert på temperaturhistorien til pelen (blå linje, T_c) og tid etter installasjon (t_c). Referansetemperaturen er lik som herdetemperaturen for laboratorieforskene (T_{ref} er 20 °C). Temperatur ved siste dato i prediksjonen (stiplet linje) er antatt å være 9 °C. b) Skjærfasthetsutvikling i tiden etter installasjon (t_c). Tidspunktene for laborieredata er regnet om slik at de samsvarer med temperaturhistorien i pelen (T_c). c) Skjærfasthetsutvikling over ekvivalent herdetid ved 20 °C (t_{eq}).

4 Usikkerheter knyttet til løsningen

4.1 Generelt

I behovsbeskrivelsen er det stilt krav til at løsningen skal kunne benyttes ned til 30 m dybde. Grunnet begrenset løsmasseoverdekning på de to forsøksområdene vi ble tildelt, så har det ikke vært mulig å teste ut funksjonaliteten på større dybder enn 17 m. Løsningen betraktes likevel som egnet da begrensninger knyttet til dybde kun relateres til installasjon av foringsrør for utførelse av seismikk da større dybder øker risikoen for større horisontalavvik både for foringsrør og bindemiddelstabilisert pel.

I det videre belyses usikkerhetsmomenter knyttet til den nyutviklede løsningen. Se også Vedlegg H for forslag til videre arbeid etter KlimaGrunn.

4.2 Forskjeller mellom laboratorium og felt

Løsmassene som benyttes i innblandingsforsøkene er homogeniserte, og har dermed mer ensartet konfordeling, mineralogi, organisk innhold etc. enn det som vil være tilfelle over lagpakens tykkelse i felt. På laboratoriet har man full kontroll på hvor mye bindemiddel som tilføres løsmassene, og det oppnås også en jevnere innblanding av bindemidler på laboratoriet enn i felt.

I felt blir ikke innblandingsmengden like nøyaktig som på laboratoriet. I tillegg kan begrensninger i utstyret som f.eks. ingen variasjonsmulighet for matetrykk, utforming av visp etc. føre til ujevn kvalitet på innblandingsarbeidet som igjen kan medføre variasjoner i fordelingen av bindemiddel over pelens dybde og tverrsnitt.

Fastheten som måles i felt med FOPS og (F)KPS gir et gjennomsnitt over pelens tverrsnitt, og vil ikke avdekke forekomst av ev. variasjoner over tverrsnittet. Det er imidlertid ingen indikasjoner på at laboratorieresultatene overestimerer fastheten sammenlignet med fastheten tolket fra trykksonderinger (CPTU) og forboret kalkpelsondering ((F)KPS) i feltstabiliserte peler.

I KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk (Vedlegg E) 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). Det bør samles inn mer data fra herdede peler i felt for å danne et bedre grunnlag for bestemmelse av hvilken densitet prøvene bør stamper inn ved. Densiteten i innstampede prøver bør ikke overstige densiteten i ustabiliserte løsmasser in-situ da dette i verste fall kan medføre overestimert fasthet.

4.3 Korrelasjonsmodellene

Korrelasjonsmodellene er basert på laboratoriefremstilte resultater. Som følge av bl.a. ulikt innblandingsarbeid i felt, inhomogeniteter i pelen og fordi prøvene på laboratoriet herder uten overlagingstrykk, så vil den beregnede fasthetsutviklingen over tid kunne avvike fra fasthetsutviklingen i felt. Korrelasjonsmodellen for utviklingen av skjærfasthet over tid danner et konservativt nedre estimat i KlimaGrunns datasett. De fleste av KlimaGrunns laboratorieprogrammer viste større fasthetsutvikling både på kort og lang sikt enn beregnede verdier ved å benytte korrelasjonsmodellen. Da det ikke er noen indikasjoner på at laboratorieresultatene overestimerer fastheten i feltstabiliserte peler, så kan korrelasjonsmodellen benyttes som et konservativt estimat av fasthetsutviklingen i pelen over tid.

Dersom fastheten fra laboratorieprogrammet overstiger fastheten i korrelasjonsmodellen, bør man i prosjekteringen utføre et sensitivitetsstudium der man også inkluderer fasthetsutviklingen basert på verdier fra den konservative korrelasjonsmodellen i Ligning 2.

Korrelasjonsmodellen for skjærbølgehastighet mot skjærfasthet er noe mer usikker. Vi har i dette arbeidet antatt at korrelasjonen til Dannewitz et al. (2005) også kan benyttes for å beregne skjærfasthet fra skjærbølgehastigheter målt i felt. Det utsendte signalet genererer både en P- og S-bølge. De utsendte bølgene påvirkes av heterogeniteter i prøvene og det kan dermed være vanskelig å skille mellom P- og S-bølger og tolke ankomsttiden til første ankomne skjærbølge (S-bølge). I laboratorieprogram 2.5 ble det sendt ut bølger med perioder 0,20, 0,40, 0,50, 0,75 og 1,00 ms på samtlige prøver. Dette gjorde det enklere å identifisere første ankomne bølge. Det ble minst spredning i resultatene ved å tolke første ankomne bølge ved å regne tiden fra topp utsendt bølge til topp mottatt bølge for bølger utsendt med perioden 0,20 ms. For å få en enda mer nøyaktig tolkning, så bør bølgeperioden reduseres ytterligere (frekvensen økes). Den minste bølgeperioden som kan sendes ut med GDS sine benderement er imidlertid 0,20 ms. Signaler med kortere bølgeperioder (høyere frekvenser) er mer sensitive for heterogeniteter i prøven, og det kan dermed være vanskeligere å tolke resultatet grunnet økt støy og mer demping av signalet.

KlimaGrunns datasett er begrenset i omfang og inneholder kun data fra innblandingsforsøk utført på kvikkleirer fra Østlandsområdet. Det har derfor ikke vært mulig å utvikle generelle korrelasjonsmodeller for ulike løsmassetyper eller bindemiddelkombinasjoner. Korrelasjonsmodeller fra publiserte studier er benyttet med enkelte modifikasjoner. Videre inneholder korrelasjonsmodellene få parametere. For herdeprosessen i felt relateres styrkeutviklingen til laboratoriemålt fasthet etter 28 herdedøgn ved 20 °C og temperaturhistorien i pelen ved å benytte Åhnberg og Holms (1987) modenhetstall. Det er antatt at ligningen for modenhetstall med tilhørende konstanter er egnet også for leirene som er benyttet i KlimaGrunns arbeider.

Kornfordelingen påvirker hvilken fasthet som oppnås i bindemiddelstabilisert materiale, og er også styrende for sammensetningen av bindemiddel (se avsnitt 3.2.2 og Vedlegg C). Kornfordeling og bindemiddeltipe er ikke inkludert som parametere i korrelasjonsmodellene.

4.4 Prediksjon av temperatur

Prediksjonen angir et grovt estimat for forventet temperatur. Usikkerhetsmomenter er angitt i kapittel 3.2.4.

4.5 Installasjon av sensorer

Instrumentoppsettet vi benyttet i den andre felttesten og i oppdragsgivers test fungerer veldig godt, og man får god kontakt mellom sensorene og massene i pelen når man installerer instrumentene umiddelbart etter at pelene er satt. Det er også stor temperaturutvikling rett etter pelen er satt, noe som også er en av grunnene til at man ønsker å få på plass instrumenteringen umiddelbart etter at pelen er installert.

Installasjonsmetoden baserer seg på samme metode som benyttes for installasjon av poretrykksmålere med slippadapter, så metoden er kjent og godt utprøvd. Usikkerhetsmomentet rundt selve installasjonen er i hovedsak knyttet til opptrekk at poretrykksrøret etter at instrumentene er satt på ønsket nivå. Det er en liten fare for at man ødelegger kabelen når man trekker poretrykksrøret. En slik skade vil man normalt oppdage med en gang fordi man ikke får god kontakt med sensorene om kabelen er skadet på en av termistorene. Ved en eventuell skade på

instrumenteringen må man instrumentere en annen pel da det er problematisk å få sensorene opp av pelen igjen.

Per i dag så må man ha en egen borerigg for å sette ned instrumentene, det hadde vært ønskelig med en metode som gjør at KS-riggen kan installere sensorene slik at man slipper koordinering av to ulike rigger på anlegget.

På et anleggsområde kan det være krevende å finne en god plass for instrumenteringen der den får stå i fred gjennom hele perioden man ønsker målinger. Det er derfor viktig at plasseringen av instrumentene planlegges godt og at man eventuelt instrumentere noe flere peler enn man hadde sett for seg slik at man har noen i reserve dersom det skulle bli problemer med en lokasjon.

Skal man bruke instrumenteringen til å optimalisere bruken av bindemidler må man sette av nok tid slik at man får nok data for å kunne si noe om hvordan herdeprosessen forløper. Det kan løses ved at man instrumenterer et testfelt før man skal stabilisere et større område. Instrumenteringen kan også benyttes for å overvåke herdeprosessen.

Installasjonsmetoden er robust og benytter sensorer som forhandles av flere leverandører. Slik sett er løsningen uavhengig av leverandør og det bør være god tilgang på sensorer som kan benyttes til dette formålet.

4.6 Seismikk

Resultatene som er oppnådd viser at vi kan få et rimelig godt estimat av gjennomsnittlig SH-bølgehastighet i bindemiddelstabiliserte-peler ved å benytte en avstand fra kilde til mottaker på ca. 2,5 m. Usikkerheten i måleresultatene øker med minkende avstand mellom kilde og mottaker. Fordelene med lengre måleavstand er at en usikkerhet i ankomsttid gir mindre usikkerhet i estimert bølgehastighet. Som et eksempel: med en hastighet på 300 m/s og en avstand på 1 m og en tolket gangtid som er 0,5 ms høyere enn riktig gangtid vil gi en estimert hastighet på 260 m/s. Ved å øke avstanden mellom kilde og mottaker, så har unøyaktigheten i tolket gangtid mindre effekt på estimert hastighet. Ved en avstand på f.eks. 2,5 m og samme feil i plukk av gangtid (0,5ms) så vil estimert hastighet være 283 m/s. Ulempene ved å benytte lenger avstand mellom kilde og mottaker er at estimert hastighet er basert på et glattet estimat av hastighetene mellom kilde og mottaker.

Hvis det ligger en svakhetszone mellom kilden og mottakeren, vil strålebanen til første ankomsttiden kunne gå over eller under svakhetssonen. Da bølgebanen som følge av dette blir lengre, vil en likevel kunne se en lavere hastighet, men ikke så lav som svakhetssonen skulle tilsi. Dette medfører at vi kan estimere en for høy hastighet for denne delen av pelen. For en mindre svakhetszone på f.eks. 10-20 cm over en utstrekning på 80 cm i diameter vil denne nedgangen i hastighet ikke være observerbar ved å kun benytte den plukkede første ankomsttiden for S-bølger. For å observere tynne lokale svakhetssoner må en benytte krysshullstomografi evt. i kombinasjon med bruk av bølgeformen i analysen. Bruk av krysshullstomografi kan være gjenstand for videre forskning og utvikling.

I første feltforsøk ble det også benyttet krysshullstomografi. Med lengre avstand mellom kilde og mottaker, vil en tomografibasert måling kreve at en må øke avstanden mellom maksimum og minimum dybde for mottakerposisjoner en måler over for hvert kildedyp. Tilstrekkelig avstand mellom maksimum og minimum dybde for mottakerposisjonene er estimert basert på modellering. Ved en avstand mellom kilde og mottaker på ca. 1,2 m kan mottaker plasseres i området +/- 0,6 m relativt til nivået kilden er plassert på. For 2,6 m horisontal avstand mellom kilde og mottaker øker avstanden mellom maksimum og minimum mottakerdyp til 2,6 m (+/-1,3m). For estimerer hvor vi

kun benytter beregnede første ankomster vil en antagelig i krysshullstomografi kunne klare seg med å flytte mottakeren 0,2 m av gangen for hver måling for samme skudd i mottakerintervallet for hvert skudd.

Vi har benyttet plukking av gangtider på data med ulik frekvensfiltrering og har konkludert med at vi får de beste estimatene med en båndbredde mellom ca. 30 – 250/300 Hz. Vi skulle gjerne sett S-bølger med høyere frekvenser for bedre oppløsning og mer nøyaktig plukk av gangtider. Uelastisk absorpsjon medfører at P-bølgen ser ut til å dominere på høyere frekvenser.

Horisontalavviket for bindemiddelstabiliserte peler og installerte foringsrør ned til ca. 10 m dybde er liten, og man er dermed sikker på at målingene går gjennom ribben. For dyp ned mot 30 m vil man kunne få større horisontalavvik både for installert pel og foringsrør. Det er dermed større usikkerhet knyttet til mediet signalet går gjennom fra kilde til mottaker. Usikkerheten kan reduseres ved at det utføres retningsmåling under installasjon av pelene. Da kan en vurdere om det er behov for å sette flere KS peler for å sikre at signalet går gjennom bindemiddelstabiliserte løsmasser og ikke delvis gjennom mellomliggende ustabiliserte løsmasser.

Det var ikke mulig å undersøke hvorvidt massene i pelen omsluttet foringsrøret i sin helhet. Foringsrørene ble imidlertid presset ned i et åpent borehull med samme diameter som foringsrøret. Installasjon av foringsrørene ble også utført i løpet av de første syv timene etter installasjon av pelen. Massene var på dette tidspunktet fortsatt bløte. Det antas derfor at det var god kontakt mellom foringsrør og pel.

Vi har estimert usikkerhetene i beregnede hastigheter til ca. 15-20 % for 2,6 m avstand mellom kilde og mottaker. Vi anser dette som et relativt konservativt estimat av usikkerheten.

4.7 Datapresentasjon

Datapresentasjonen krever at man får dataene inn i tilnærmet sanntid for at løsningen skal være oppdatert og operativ. Dette krever at man har mulighet for en eller annen form for dataoverføring fra sensorene til verktøyet man bruker for å presentere data. Løsningen i seg selv er ikke låst til ett spesielt system, men systemet man bruker må ha implementert korrelasjonsmodellen på korrekt vis for at det skal fungere. Det er således ingen spesielle usikkerheter rundt datapresentasjon.

Vedlegg A

Symboler og forkortelser

A.1 Symboler og forkortelser

A	amplitude (mV)
a	dekningsgrad (stabilisert volum/ totalt volum) (-)
b	total mengde bindemiddel (kg/m ³)
b_{eff}	effektivt bindemiddelinnhold (kg/m ³)
BRN	Blade Rotation Number
C	mengde bindemiddel (kg/m ³)
CAU _c	anisotrop konsoliderte, udrenerte aktive treaksialforsøk
CID _c	isotrop konsoliderte, drenerte aktive treaksialforsøk
CIU _c	isotrop konsoliderte, udrenerte aktive treaksialforsøk
CKD	Cement Kiln Dust
CPTU	trykksondering med poretrykksmåling
C_p	spesifikk varmekapasitet (J/kgK)
C_p^S	spesifikk varmekapasitet fast stoff (J/kgK)
C_p^W	spesifikk varmekapasitet vann (J/kgK)
c_u	udrenert skjærfasthet (kPa)
$c_{u,soil}$	udrenert skjærfasthet i naturlig leire (kPa)
$c_{u,UC}$	udrenert skjærfasthet bestemt fra enaksialforsøk (kPa)
$c_{u,UC28}$	udrenert skjærfasthet bestemt fra enaksialforsøk (kPa) etter herding i 28 døgn
$c_{u,CAUc}$	udrenert skjærfasthet bestemt fra treaksialforsøk (kPa)
$c_{uUC,felt}$	estimert udrenert skjærfasthet i felt (kPa)
D	diameter (cm)
e	poretall (-)
e	Eulers tall, Napiers konstant. Grunntallet i naturlige logaritmer.
E_{50}	sekantstivhet hentet ut ved 50% bruddspenning (MPa)
$E_{50,28}$	sekantstivhet hentet ut ved 50% bruddspenning (MPa) etter herding i 28 døgn
$E_{50,felt}$	estimert stivhet i felt (MPa)
$E_{50,UC}$	sekantstivhet hentet ut ved 50% bruddspenning i enaksialforsøk (MPa)
f	frekvens (Hz)
f_c	betongens trykkfasthet
f_{c28}	modellert trykkfasthet ved 28 døgns alder (MPa)
FOPS	forinstallert omvendt pelsonde
FKPS	forboret kalkpelsonde
$G_{0,28}$	skjærmodulen ved små tøyninger etter herding i 28 døgn (MPa)
G_0, G_{max}	skjærmodul i lineært elastisk område (skjærtøyninger < 0,001%) (MPa)
H	høyde (cm)
IL	flyteindeks
IP	plastisitetsindeks
k	kompressibilitetsmodul (Pa)
KC, KS	kalksement
L	lengden bølgen forplanter seg over (m)
L_{tt}	avstanden fra tupp til tupp av elementene der bølgen blir sendt ut og mottatt (m)
$L_{60\%}$	60 % av elementhøyden (lengden bølgen forplanter seg over) (m)
LKD	Lime Kiln Dust
m	helningen på linjen for V_{sz}
M	modenheter (timer)
M	modningstallet (-)
MASW	Multichannel Analysis of Surface Waves
m_s	masse fast stoff (g)
m_w	masse vann (g)
m_{tot}	masse vann og fast stoff (g)
OCR	overkonsolideringsgrad (-)
PET	Pulse Echo Testing
Q_u	total potensiell varmetilførsel fra bindemiddelet (kJ/kg)

q_t	udrenert enaksial trykkfasthet etter herdetid t døgn (kPa)
$q_U (q_{U,UC})$	udrenert enaksial trykkfasthet (kPa)
q_{28}	udrenert enaksial trykkfasthet etter herdetid 28 døgn (kPa)
s	funksjonsparameter
SCPTU	seismisk trykksondering med poretrykkmåling
t	tid (døgn)
T	herdetemperaturen (°C)
T	bølgeperiode (s)
T_c	faktisk herdetemperatur (°C)
T_{ref}	referansetemperatur (°C)
t_c	herdetid beregnet per tidsinkrement (døgn)
t_c	systemets kalibreringstid for benderelementene
t_{eq}	ekvivalent herdetid ved 20 °C (døgn)
t_{eq_felt}	ekvivalent herdetid ved 20 °C i felt (døgn)
t_0	starttidspunkt for fasthetsutvikling (timer)
V_p	P-bølgehastighet (m/s)
V_s	skjærbølgehastighet (m/s)
V_{sg}	skjærbølgehastighet nær terrengoverflaten
V_{s_felt}	skjærbølgehastighet målt i felt (m/s)
V_{sz}	skjærbølgehastighet ved dybde z
VTI	Vertikalt Transvers Isotrop
w	naturlig vanninnhold (% eller -)
w/b -tall	forholdet mellom vann og bindemiddel (-)
z	dybde (m)
β_0	styrkeøkingsfaktor, fastsetter langtidseffektene fra styrkeøkning av grunnstabilisert materiale som et forhold av den opprinnelige udrenerte skjærfastheten
β_1	herdefaktor avhengig av herdetemperatur og bindemiddelsammensetning.
β_2	kurvetilpasningsfaktor (kg/m ³)
β_3	kurvetilpasningsfaktor (m ³ /kg)
ΔT	temperaturendring (K)
Δt	differanse i tid mellom utsendt bølge og første ankomne bølge (s)
φ'	friksjonsvinkelen til grunnstabilisert materiale med et gjennomsnitt på 48° for det undersøkte materialet
γ	tyngdetetthet (kN/m ³)
λ	bølgelengde, avstand mellom to påfølgende bølgetopper (mm)
ρ	densitet (g/cm ³)
σ'_{v0}	vertikale effektivspenninger (kPa)
σ'_3	effektive horisontalspenninger (kPa)

Vedlegg B

Utviklingsløpet – kort oppsummert

B.1 En helhetlig løsning med tverrfaglig tilnærming

KlimaGrunns løsning går ut på å monitorere herdeforløpet over tid i bindemiddelstabiliserte peler installert i felt, og benytte korrelasjonsmodeller for dokumentasjon og predikasjon av oppnådd styrke og stivhet. I tillegg benyttes feltmålingene til å dokumentere homogenitet eller avdekke inhomogeniteter i de bindemiddelstabiliserte pelene. Måledataene presenteres på Cautus Geo sin webløsning, *Cautus Web*. I tillegg er korrelasjonsmodellen for utviklingen av skjærfasthet over tid basert på laboratoriedata implementert i webløsningen. Dermed kan man basert på feltmålingene hente ut forventet oppnådd styrke på det aktuelle tidspunktet i herdeprosessen. Korrelasjonsmodellene kan også benyttes for predikasjon av herdeforløpet fremover i tid.

Herdeprosessen monitoreres i felt ved å:

- måle temperaturutviklingen kontinuerlig ved ulike nivåer i den bindemiddelstabiliserte pelen
- benytte krysshullsseismikk for å måle skjærbølgehastigheten over hele dybden på ulike tidspunkt i herdeforløpet

Korrelasjonsmodellene er basert på laboratorieresultater der følgende korrelasjoner benyttes:

- Skjærfasthet mot ekvivalent herdetid ved 20 °C
- Skjærfasthet mot skjærbølgehastighet
- Elastisitetsmodul mot skjærfasthet
- Skjærmodul mot ekvivalent herdetid ved 20 °C

Ved å koble temperaturmålingene i felt med de laboratoriebaserte korrelasjonsmodellene, så vil man få en indikasjon på oppnådd fasthet ved ulike tidspunkt i herdeprosessen. Sensorene plasseres i ulike nivåer i pelen, og vil dermed også gi en indikasjon på eventuelle variasjoner i oppnådd skjærfasthet over dybden.

Skjærbølgehastigheten øker med økende skjærfasthet. Skjærbølgehastigheten som måles i felt benyttes til å hente ut oppnådd skjærfasthet fra den laboratoriebaserte korrelasjonsmodellen for skjærfasthet mot skjærbølgehastighet. Krysshullsseismikken vil også kunne avdekke inhomogeniteter i pelene.

Predikasjonsmodellen for utvikling av skjærfasthet frem i tid kan benyttes til å planlegge når krysshullsseismikken bør utføres i felt, og vil også være svært nyttig for framdriftsplanleggingen i anleggsfasen.

B.2 Valg av korrelasjonsmodeller

Hvilken styrke som oppnås i bindemiddelstabiliserte peler avhenger av flere faktorer som bl.a.:

- Leiras egenskaper
- Type, mengde og kombinasjon av bindemiddel
- Innblandingsarbeid (visp, rotasjonshastighet, stighøyde)
- Herdeprosess (tid, temperatur, overlagingstrykk)

Innblanding av bindemiddel utføres ulikt av de ulike entreprenørene (type visp, tilført energi etc.). I tillegg er det ikke mulig å gjenskape dette innblandingsarbeidet på laboratoriet. Gjennomgang av

litteratur viser korrelasjoner for styrke og stivhet basert på laboratorieresultater. Korrelasjonene består av relativt like formler, men med ulike konstanter avhengig av type løsmasser og bindemiddelsystemer. Ved å normalisere laboratorieresultatene på resultater etter 28 døgns herding, så er korrelasjonene trolig uavhengig av bindemiddelmengde (Åhnberg 2006; Flores et al. 2010). Laboratorieprogrammene i KlimaGrunn ble designet for å fastsette konstantene i ligningene. Datagrunnlaget fra laboratorieprogrammene var imidlertid for lite til å kunne fastsette disse konstantene med sikkerhet. Det ble derfor besluttet å benytte korrelasjonsmodeller fra publiserte studier (se **Error! Reference source not found.**). Vurdering av hvilke inngangsparametere som skulle inngå i korrelasjonsmodellene er listet opp i Vedlegg C. Hvilke korrelasjonsmodeller som er vurdert i KlimaGrunn er listet opp i Vedlegg D.

B.3 Ny laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk sikrer kvaliteten på data som inngår i korrelasjonsmodellene

Det er svært viktig at data som inngår i korrelasjonsmodellene er produsert etter samme prosedyre og er uavhengig av laborant eller laboratorium som preparer prøvene og utfører forsøkene. I dag benyttes ulike prosedyrer og disse praktiseres også noe ulikt mellom ulike laboratorier, noe som påvirker hvilken fasthet og stivhet som oppnås i de laboratoriepreparerte prøvene (Skjæran 2020, Falle 2021, Hov et al. 2022). Dette medførte at KlimaGrunn ikke ønsket å utvikle korrelasjonsmodeller basert på data fra tidligere utførte oppdrag. Det var derfor nødvendig å utvikle en laboratorieprosedyre for å redusere usikkerheten i dataene knyttet til selve utførelsen av laboratoriearbeid.

I tillegg er 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 for innblandingsforsøk gjenspeiler ikke forholdene for bindemiddelstabiliserte peler i felt.

KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk er utviklet med målsetning om å:

- forene og forbedre eksisterende laboratorieprosedyrer for innblandingsforsøk
- forbedre samsvaret mellom herdeforholdene i felt og på laboratorium
- sikre god reproduserbarhet i resultatene uavhengig av laborant og geoteknisk laboratorium
- utvikle utstyr med lave investeringskostnader

Følgende endringer fra dagens praksis er 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 som også sikrer at prøvene beholder konstant volum under herding

KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk er beskrevet i Vedlegg E.

B.4 Testing av løsningen på oppdragsgivers anlegg

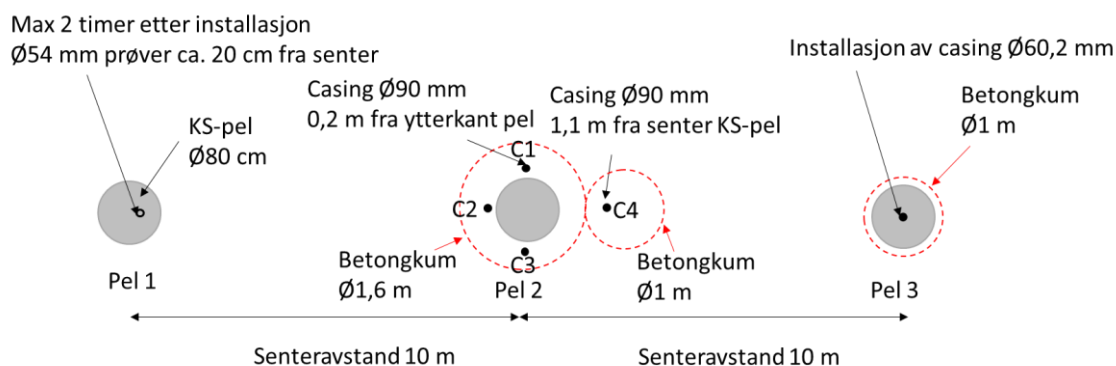
Arbeidsmetodikken er testet ut i to feltforsøk i forbindelse med Statens vegvesens anlegg *Forberedende entrepriser E101* på E18 Vestkorridoren. Oppdragsgivers test ble utført ifm. Vikingtidsmuseet på Bygdøy (se kap. D.4.5).

B.4.1 Feltforsøk nr. 1 – Eiliv Dues vei

Det første feltforsøket ble gjennomført i Eiliv Dues vei i august 2021 hvor Skanska var tildelt hovedentreprisen og Dmix AB utførte installasjon av bindemiddelstabiliserte peler. Dmix AB installerte tre stk. 800 mm enkeltpeler med 45 kg/m^3 Multicem (50/50 CKD/CEM II) (Figur B-1) for:

- Installasjon av sensorer for å måle endringer i volumetrisk vanninnhold og temperatur under herdeprosessen (Pel 3)
- Fire stk. foringsrør rundt Pel 2 for utførelse av krysshull-tomografi og -seismikk
- Opptak av prøver fra fersk pel for videre herding og forsøk på laboratoriet

I tillegg ble det utført refleksjonsseismikk fra topp pel og MASW med trekantkonfigurasjon rundt Pel 2. Det ble også utført innblandingsforsøk for ulike bindemiddelkombinasjoner med kvikkleire fra Eiliv Dues vei.



Figur B-1 Skisse over plassering av bindemiddelstabiliserte peler (Pel 1-3) i forbindelse med feltforsøket i Eiliv Dues vei. Ø54 mm prøver ble tatt opp fra Pel 1 innen to timer etter installasjon for videre herding og testing på laboratoriet. Fire stk. Ø90 mm foringsrør (casing C1-C4) ble installert rundt Pel 2 for utførelse av krysshullstomografi og -seismikk. Ø60,2 mm foringsrør ble installert i senter av Pel 3 for installasjon av sensorer for måling av endringer i volumetrisk vanninnhold og temperatur under herdeprosessen.

Erfaringene fra det første feltforsøket gav grunnlag for justeringer og forbedringer av arbeidsmetodikken, og medførte følgende valg for det videre utviklingsløpet med tanke på laboratorieforsøk, korrelasjonsmodeller, sensorteknologi, seismikk og datapresentasjon:

Laborieforsøk

- Innbyrdes reproduserbarhet i forsøk på prøver preparert iht. KlimaGrunns laborierprosedyre for innblandingsforsøk var god, og den nye laborierprosedyren benyttes videre i KlimaGrunn.
- Prøvene tatt opp fra fersk bindemiddelstabilisert pel viste at pelen var inhomogen. Det antas at inhomogeniteten skyldes utfordringer med å blande inn såpass lav bindemiddelmengde (45 kg/m^3). Det er knyttet usikkerhet til om noe av spredningen i laborierresultatene også kan skyldes effekter fra selve prøvetakingen, som f.eks. at sylindrene ikke ble helt fulle. Det ble besluttet å øke innblandingsmengden i det neste feltforsøket til 80 kg/m^3 , og bestemme nødvendig innblandingarbeid i forkant av installasjonsarbeidene. Det ble også besluttet å ikke ta opp prøver fra fersk pel i det neste feltforsøket.

Korrelasjonsmodeller

- Laboratorieforsøkene viste at vanninnholdet ble redusert i løpet av de første døgnene og at det deretter stabiliserte seg på en nedre verdi. Skjærfastheten fortsatte imidlertid å øke i lang tid etter innblanding. Ettersom det ikke ble funnet noen god sammenheng mellom endring i vanninnhold over tid og fasthetsutviklingen, hverken på laboratorium eller i felt, ble det besluttet å gå bort fra å måle vanninnholdet i felt. Det er også knyttet usikkerhet til hvorvidt herdeprosessen akselereres av å tørke prøvene i varmeskap. En del av vannet vil i så fall dermed inngå i reaksjonsproduktene.
- Temperaturhistorien i pelene gir grunnlag for å finne ekvivalent herdetid ved 20 °C (t_{eq}) i pelen. Den beregnede t_{eq} benyttes for å hente ut skjærfastheten fra korrelasjonsmodellen basert på laboratorieresultater ved samme t_{eq} . Temperaturmålinger ble utført i bindemiddelstabilisert pel også i det andre feltforsøket.
- Det framkom ingen entydig korrelasjon mellom skjærbølgehastighet målt med benderelement på laboratoriepreparerte prøver og skjærfasthet. I det videre arbeidet med KlimaGrunn ble utførelsen av benderelementforsøk på laboratoriet gjennomgått for å undersøke om man kan få til en omforent praksis og dermed en mer entydig korrelasjon mellom skjærbølgehastighet og oppnådd skjærfasthet.

Sensorteknologi

- Sensorer for måling av temperatur og volumetrisk vanninnhold ble montert inni et PVC-rør som ble satt i senter av fersk pel. Sensoren som måler vanninnhold, måler endringer i den elektriske kapasitansen til massen rundt sensorene. 99 % av målingene kommer fra massene som er innenfor 10 cm radius fra sensoren. Det er derfor meget viktig at man oppnår god kontakt mellom massene i pelen og PVC-røret som sensorene monteres i. Luftlommer rundt røret der sensoren er plassert, vil føre til at målt vanninnhold ikke blir representativt for vanninnholdet i pelen.
- Temperatursensorene er plassert inni et tett PVC-rør med bunnpropp og et topplokk. Før felttesten var det noe usikkerhet om man ville klare å måle temperaturen i pelen i det området hvor sensorene var plassert, eller om luften inni PVC-røret ville bli satt i bevegelse slik at det ble tilnærmet samme temperatur i hele røret. Felttesten viste at temperaturmålingene fungerte godt og at det var tydelige forskjeller på temperaturen i de ulike nivåene i pelen.
- Instrumenteringen var koblet til en batteridreven datalogger som trådløst kommuniserte og overførte data til Cautus Geos skyløsning Cautus Web. Her ble data prosessert, lagret og presentert. Instrumenteringen fungerte godt under hele måleperioden.
- Sensorene som var plassert nederst i pelen viste et kunstig høyt vanninnhold etter noen dager. Ved demobilisering av instrumenteringen gjorde vi noen undersøkelser i et forsøk på å finne ut årsaken til dette. Det viste seg at det var kommet vann inni PVC-røret til instrumentene som forårsaket høy fuktigheten i bunnen av røret. Dette er trolig årsaken til de høye målingene i bunnen av røret. Det ble ikke funnet sprekker i PVC-røret og heller ingen tegn til vanninntrengning i toppen. Vår antagelse er at vannet inni røret skyldes kondens som har oppstått når den varme luften inni røret blir nedkjølt.
- Korrelasjonsmodellen for skjærfasthet bruker ikke informasjonen om endring i vanninnhold. Erfaringen fra første feltforsøk var at sensorene for måling av vanninnhold er litt krevende å

installere samt at det er en del usikkerhet knyttet til dataene av grunner som er nevnt over. For temperaturmålingene så ser vi det som gunstig å få plassert temperatursensorene direkte i massen til pelen. Av disse to grunner har vi valgt å gjøre endringer på instrumenteringen for den andre felttesten. Vi vil gå over til å kun installere temperatursensorer inni pelen, og disse vil bli installert direkte i fersk pel slik at vi får god kontakt mellom temperatursensor og pel. Dette tror vi vil sikre god kvalitet på temperaturmålingene samt at selve installasjonen vil bli enklere.

Seismikk

- Av de ulike metodene gav krysshullseismikk de mest pålitelige målingene av skjærbølgehastigheten. For enklere detektering av første ankomsttid for den horisontale skjærbølgen (SH-bølgen), ble det benyttet frekvensfiltrering hvor en fjernet frekvenser utenfor området 30 – 300 Hz. Før en har oppnådd en viss skjærfasthet vil en ikke kunne detektere skjærbølgen. Deteksjonen av skjærbølgen vil bli enklere etter hvert som en oppnår høyere skjærfasthet. Det ble demonstrert at krysshullseismikken kan være et viktig verktøy for å monitorere endringene i skjærfasthet. Derfor ble det besluttet å benytte krysshullseismikk videre i det neste feltforsøket.
- Krysshulltomografi, hvor en måler signalet fra samme skuddyp på flere mottakerdyp, kan gi mer informasjon om inhomogeniteter i horisontal retning. Det ble også observert større variasjoner i skjærbølgehastigheten fra krysshulltomografien enn for krysshullseismikken. Krysshulltomografi er vurdert til å være for tidkrevende å utføre over hele dybden for en pel på 30 m, men kan benyttes i deler hvor en har behov for nærmere undersøkelser.
- Beregning av KS-pelediameter fra resonansfrekvens i krysshullseismikk var ikke mulig ut fra resultatene fra feltforsøket. Det ble ikke observert utvetydige resonansfrekvenser med tilstrekkelig nøyaktig oppløsning til å kunne danne meningsfulle konklusjoner fra denne metoden.
- MASW er ikke egnet for monitorering av en enkeltpel siden volumet av pelen er såpass lite i forhold til jordvolumet det måles over. Metoden kan muligens gi informasjon om endringer i et område hvor et grid av KS-peler er satt. Dette ble ikke testet.
- Refleksjonsmetoden fra topp av pel gav ingen informasjon i dette feltforsøket grunnet for lavt frekvensinnhold i de observerte dataene. Metoden ble ikke benyttet videre i det andre feltforsøket.

Datapresentasjon

- For prosessering av data og datapresentasjon benytter vi Cautus Web. Cautus Web er en skyløsning som kjører i Azure og er utviklet av Cautus Geo. Det at vi selv har utviklet løsningen gjør at vi kan gjøre tilpasninger og utvidelser av programvaren for å imøtekomme de behovene vi hadde i KlimaGrunn. Vi har utviklet funksjonalitet for import av data fra sensorene i pelen, omregning fra volumetrisk til gravimetrisk vanninnhold, ekvivalent herdetid og udrenert skjærfasthet. Vi vil videreføre dette arbeidet i prosjektet.
- De tre første dagene etter at sensorene var installert i pelen logget vi data hvert tiende minutt og overførte disse til Cautus Web hver time. Etter dag tre ble dette endret til å ta en måling hver time og sende data til Cautus Web to ganger i døgnet. Bakgrunnen for disse valgene var at vi forventer det de første dagene etter pelene er installert vil vi ha de raskeste endringene i

temperatur og vanninnhold. Hovedgrunnen til å senke måle- og sendefrekvens etter tre dager er å spare strøm slik at loggerne ikke går tom for batteri.

B.4.2 Feltforsøk nr. 2 – Holtet 33

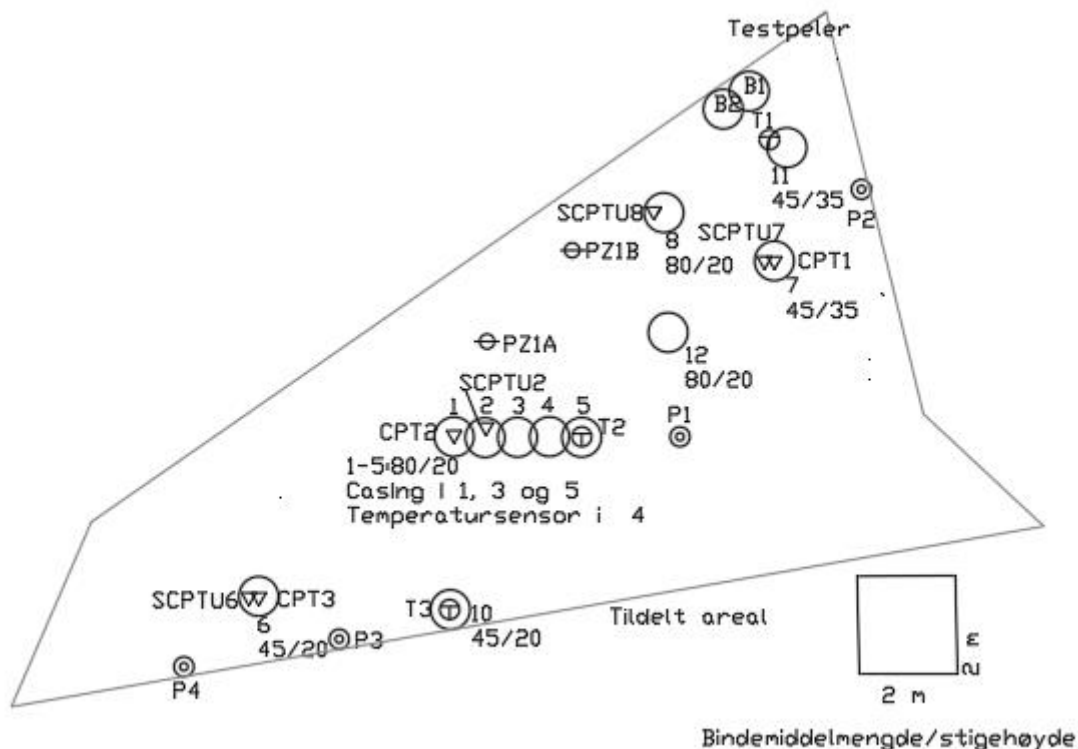
Feltforsøk nr.2 ble gjennomført ved Holtet 33 i mars 2022, ca. 350 m fra feltforsøket i Eiliv Dues vei. Dmix AB installerte 5 stk. 800 mm bindemiddelstabiliserte peler med 80 kg/m³ Multicem (50/50 CKD/CEM II) i ribbe, og 6 stk. 800 mm enkeltpeler hvorav fire stk. med 45 kg/m³ Multicem (50/50 CKD/CEM II) og to stk. med 80 kg/m³ Multicem (50/50 CKD/CEM II) (Figur B-2).

I ribben ble det installert:

- Termistorstreng med temperatursensorer i fire nivåer, samt poretrykksmålertemperatursensor i underkant av pelen (Pel 4)
- Tre stk. 90 mm foringsrør for utførelse av krysshullsseismikk (Pel 1, 3 og 5)

I tillegg ble det utført SCPTU i Pel 2 ved ekvivalent herdetid ved 20 °C ca. 6 døgn etter installasjon.

Enkeltpelene ble installert for å evaluere hvordan innblandingsenergien (tilført arbeid under innblanding) påvirket oppnådd fasthet i pelen. Oppnådd fasthet i enkeltpelene ble evaluert med SCPTU (utført av Statens vegvesen) og FKPS (utført av Dmix AB) ved ekvivalent herdetid ved 20 °C ca. 6 døgn etter installasjon. Det ble benyttet stighøyder på 20 og 35 mm/omdreining.



Figur B-2 KlimaGrunns andre feltforsøk ved Holtet 33. 800 mm peler med 80 kg/m³ CKD/CEM II ble installert i ribbe (Pel 1-5) for installasjon av temperatursensorer (Pel 4) og Ø90 mm foringsrør for krysshullsseismikk (Pel 1, 3 og 5). I tillegg ble det installert åtte stk. enkeltpeler med ulik innblandingsmengde og installert med ulik innblandingsenergi. Innblandingsmengde og stighøyde er angitt for hver pel som bindemiddelmengde/stighøyde.

Erfaringene fra det andre feltforsøket gav grunnlag for ytterligere justeringer og forslag til forbedringer av arbeidsmetodikken:

Laboratorieforsøk

- Reproduserbarheten innbyrdes i sett med tre «like» prøver preparert iht. KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk vurderes som svært god.
- Det ble stampet inn prøver med ulik densitet for å undersøke hvor stor effekt ulik innstampet densitet har på oppnådd skjærfasthet. Prosedyren har fungert godt for prøver med innstampet densitet på 1,80 og 1,90 g/cm³. I denne runden viste deg seg imidlertid at det var vanskelig å oppnå innstampet densitet på 1,70 g/cm³, og også 1,90 g/cm³, ved å bruke KlimaGrunns laboratorieprosedyre. Laboratorieprosedyren ble dermed revidert slik at anbefalinger for innstamping av prøver med lavere og høyere densitet enn 1,80 g/cm³ er inkludert. Den reviderte laboratorieprosedyren er beskrevet i Vedlegg E.
- Det foreligger lite tilgjengelig data for hvilken densitet det er i bindemiddelstabiliserte peler i felt. Tilgjengelig data indikerer imidlertid at densiteten i hovedsak reduseres noe sammenlignet med densiteten i in-situ ustabilisert leire. For å unngå å overestimere fastheten i laboratorieforsøkene, anbefales det å stampe inn prøver med 5 % lavere densitet enn densiteten i ustabilisert leire.
- Endringene i utførelsen av benderelementforsøkene medførte at resultatene gir en mer entydig korrelasjon. Det er utarbeidet en prosedyre med anbefalinger for utførelse og tolking av benderelementforsøk (Vedlegg F).
- Det ble utført spesialforsøk på laboratoriepreparerte prøver for å undersøke om det er mulig å kvantifisere effekten av dybde på laboratoriet. Det ble kjørt isotropisk konsoliderte, drenerte treaksialforsøk på umettede prøver som hadde herdet både med og uten celletrykk. For å kunne sammenligne resultatene med enaksialforsøkene, ble det valgt å kjøre skjærforsøkene med lik hastighet. Dermed er forsøkene kjørt som enaksialforsøk med sidespenninger. Den maksimale skjærspenningen var for flere av prøvene lavere eller lik maksimal skjærfasthet tolket fra enaksialforsøkene. Grunnet den høye hastigheten var responsen trolig udrenert. Det er imidlertid mer sannsynlig at en umettet bindemiddelstabilisert pel vil ha drenert materialoppførsel. Laboratoriestyret som benyttes på norske geotekniske laboratorier egner seg ikke til å kjøre forsøk på umettede prøver. Prosedyren blir ikke benyttet videre.

Korrelasjonsmodeller

Grunnet begrenset datasett ble det besluttet å benytte korrelasjonsmodeller fra publisert materiale. Det anbefales å supplere datasettet med flere innblandingsforsøk utført med ulike typer løsmasser og bindemiddelkombinasjoner og deretter revurdere konstantene i korrelasjonsmodellene.

Sensorteknologi

- Det ble satt ned poretrykksmålere i testområdet før installasjon av de bindemiddelstabiliserte pelene. Målerne ble installert tre uker før installasjon (9. mars 2022), og ble benyttet til å bestemme opprinnelig poretrykk, endring av poretrykk under installasjon av pelene og i tiden etter installasjon. Det ble installert to stk. Geosense Vibrating Wire Piezometer (VWP) 3401 drive-in poretrykksmålere med 25 m lang kabel. Det ble benyttet poretrykksrør for

nedpressing av sensorene. Poretrykksmåleren som ble benyttet (VWP-3401) har et trykkområde på 345kPa og en nøyaktighet på $\pm 0,1\%$ FS. Poretrykksmålerne ble koblet til hver sin Cautus Logger 3 for overføring av data til Cautus Web.

- Siden det ble besluttet å ikke inkludere vanninnhold i korrelasjonsmodellene, ble det valgt å optimalisere instrumentering med fokus på måling av temperatur. Valget falt på å bruke termistorer som vi festet på kabelen til en poretrykksmåler som presses ned i senter av pelen. Dette sikrer god kontakt mellom temperatursensoren og den stabiliserte leiren i pelen. I tillegg reduseres risikoen for å ødelegge termistorene under installasjon. Termistoren som ble benyttet for temperaturmåling er av typen 3 k Ω ved 25 °C. Disse har en nøyaktighet på $\pm 0,1$ °C innenfor kalibreringsområdet -10 °C til 25 °C. Sensoren har måleområde på -40°C til 105°C og er støv- og vanntette (klassifisert til IP68). Selve termistoren er en rund sylinder med diameter på 5 mm og lengde 20 mm.
- Det ble benyttet geoteknisk borerigg for installasjon av temperatursensorene. Termistorstrengene ble festet til kabelen til en poretrykksmåler (Geosense VW3400) med slippadapter. Slippadapteret er laget slik at man kan trekke opp poretrykksrørene etter at sensorene er kommet ned på ønsket dybde. Borstangen på KS-riggen etterlater seg et hulrom i senter av pelen. Poretrykksmåleren ble presset ned i dette hulrommet med poretrykksrør. Poretrykksrøret ble trukket opp igjen etter at sensoren var presset ned til ønsket dybde. I dette feltforsøket ble poretrykksmåleren installert 0,5 m under pelen, og 1,0 m under den dypeste temperatursensoren. Cautus Logger 1 ble koblet til poretrykksmåleren og termistorene for å utføre målingene og overføre måledataene til Cautus Web.
- Nedpressing av sensor og opptrekk av poretrykksrør gikk uten problemer, og sensorsystemet ble koblet opp til loggersystem umiddelbart etter nedsetting. De første dagene var systemet satt opp til å utføre målinger hvert 15. minutt og overføre disse til Cautus Web hver time. Dette ble endret til måling hver halvtime og sending hver time to døgn etter installasjon.

Seismikk

- I feltforsøk 1 måtte S-bølgehastighetene estimeres både i den bindemiddelstabiliserte pelen og i den omkringliggende leira da kilde og mottakerne var plassert utenfor pelen. Eventuelle feilestimeringer av hastigheten i den omkringliggende leira ville medføre feil i beregningen av hastigheten i pelen. Da den omkringliggende leira heller ikke er helt homogen og kan variere både over dybden og lateralt, førte dette til større usikkerheter i beregningene. De korte avstandene på ned til en meter mellom kilde og mottaker betød at mindre usikkerheter i gangtid påvirket beregningene av bølgehastighetene. For å fjerne behovet for estimering av hastigheter i omkringliggende leire, samt øke avstanden for mindre usikkerheter i beregningen av S-bølgehastigheter, ble det besluttet å utføre krysshullsseismikk inni en ribbe i det andre feltforsøket.
- Det ble installert en ribbe med fem bindemiddelstabiliserte peler hvor foringsrørene for kilde og mottakere ble satt på linje i senter av Pel 1, 3 og 5. Avstanden mellom rør 1 og 3, og 3 og 5 var ca. 1,25 m og avstanden mellom rørpar 1 og 5 var ca. 2,6 m. Det var betydelig enklere å plukke gangtider når avstanden mellom kilde og mottaker ble økt til 2,6 m, og usikkerheten i bestemmelse av S-bølgehastighet ble redusert til 10 %. For de korte avstandene målte vi usikkerheter opp mot 20 %. Usikkerhetene er estimert ved å se på forskjell i beregnet gangtid når en bytter om på kilde og mottaker posisjoner, samt ved uttesting av ulike frekvens

båndbredder i filtreringen av dataene før gangtidsplukk. Det ble utført målinger på seks ulike datoer i herdeforløpet tilsvarende ekvivalent herdetid mellom 7 og 33 døgn ved 20 °C. Det ble observert betydelig økning i skjærbølgehastighet de første 20 ekvivalente døgnene. Etter ca. 20 ekvivalente døgn økte hastighetene fortsatt, men i et lavere tempo. Utviklingen i skjærbølgehastigheten benyttes til å bestemme videre utvikling av herdeprosessen etter en empirisk formel. Derfor vil flere måledatoer gi mer informasjon om videreutvikling samt usikkerheten i utviklingen.

- S-bølgen må være observerbar for å plukke gangtider, så en bør ikke måle for tidlig i herdeprosessen. Vi kunne detektere ankomsttider for skjærbølgen etter ca. en uke etter innblanding.
- I en ribbe med bindemiddelstabiliserte peler bør avstanden mellom kilde og mottaker være 2-3 m. Det bør utføres minimum to målinger innenfor to tidsrom tilsvarende ekvivalent herdetid 8-12 døgn, og 20-30 døgn. I tillegg bør det utføres en tredje måling ved et tidspunkt tilsvarende minimum 7 ekvivalente herdedøgn før eller etter måling nr. 2 for å styrke tillitten til kurven med empirisk utvikling av skjærfasthet over tid.
- Det registrerte signalet må minimum inneholde frekvenser i området 5-500 Hz for å sikre at den dominerende del av skjærbølgesignalet blir registrert.

Fasthet og stivhet basert på feltmålinger og laboratorieresultat

- Det er ingen indikasjon på at resultater fra de laboratoriepreparerte prøvene overestimerer fastheten i bindemiddelstabiliserte peler i felt.
- Hverken SCPTU, FKPS eller krysshullsseismikk indikerer noen økning av skjærfastheten med dybden i de bindemiddelstabiliserte pelene i KlimaGrunns andre feltforsøk. Dette kan skyldes liten dybde (< 10 m).
- Det er svært godt samsvar mellom skjærfastheten tolket fra CPTU og skjærbølgehastighet tolket fra krysshullsseismikken.
- Ved å benytte skjærbølgehastigheten målt vha. krysshullsseismikk tolkes en høyere skjærfasthet enn om skjærfastheten tolkes med korrelasjonsmodellen basert på ekvivalent herdetid. Dette kan skyldes at korrelasjonsmodellene er basert på enaksialforsøk der prøvene har herdet uten overlaging. I felt herder pelene med overlaging og vil dermed trolig oppnå høyere fasthet. Ved å tolke skjærfastheten basert på skjærbølgehastighet målt i felt, så inkluderes effekten av dybde.

Datapresentasjon

- Måledata fra instrumenteringen ble overført trådløst til Cautus Web. Etter første feltforsøk har det vært jobbet med følgende funksjonalitet i Cautus Web:
 - Import og visning for den nye sensorløsningen
 - Temperaturprofil
 - Viser temperaturprofil gjennom hele pele og endring av denne over tid
 - Skjærbølgehastighet
 - Skjærbølgehastighet fra seismikkmålingene

- Ekvivalent herdetid
 - I plottene som viser udrenert skjærfasthet beregnet ut fra temperatursensorene kan man velge mellom å vise plottet med faktisk tid eller ekvivalent herdetid som tidsangivelse
- Udrenert skjærfasthet
 - Beregnet ut fra temperaturmålingene hvor brukeren kan endre på konstantene som benyttes i korrelasjonsmodellen, og umiddelbart se effektene i beregningen.
- Generell forbedring av ulike datatyper
- Funksjonalitet for å predikere temperatur- og styrkeutvikling ble implementert inn i Cautus Web like før oppdragsgivers test. Det anbefales å samle inn mer erfaringsdata fra ulike installasjonsmønstre i ulike områder med ulike grunnforhold og bindemiddelmengde og -type.

Vedlegg C

Valg av parametere som inngår i korrelasjonsmodellen for herdeprosessen

C.1 Generelt

Hvilken styrke og stivhet som oppnås i felt påvirkes av hvilke egenskaper løsmassene har, hvilken bindemiddelkombinasjon (type, sammensetning og mengde) som benyttes og innblandingsarbeidet som riggen påfører massene. Det ble på et tidlig tidspunkt i KlimaGrunn slått fast at innblandingsarbeidet i felt ikke skal inngå i korrelasjonsmodellene. Dette fordi dagens rigger ikke logger data som kan benyttes til å beregne det faktiske innblandingsarbeidet. I KlimaGrunns arbeid med korrelasjonsmodellene ble det derfor fokusert på hvordan ulike parametere i løsmassene og bindemidlene påvirker herdeprosessen.

C.2 Omrørt skjærfasthet og plastisitet

Det er enklere å blande inn bindemidler i løsmasser med lav omrørt skjærfasthet og lav plastisitetsindeks enn i leirer med høy omrørt skjærfasthet og høy plastisitetsindeks. Dette påvirker hvor godt bindemiddelet blandes inn i feltstabiliserte peler. Generelt erfarer det at fasthetsutviklingen er raskere og det er enklere å produsere homogene peler i kvikkleirer enn i mindre sensitive og mer plastiske leirer. På laboratoriet har man større kontroll på homogeniseringen av bindemidler og løsmasser. Resultatene påvirkes dermed ikke i like stor grad av disse parameterne.

C.3 Vanninnhold

I Skandinavia blåses og blandes tørt bindemiddel inn i løsmassene. Under herdeprosessen forbrukes noe av porevannet i de kjemiske reaksjonene (pozzolane, hydratisering) og noe av porevannet vil også fordampe som følge av temperaturøkningen. På laboratoriepreparerte prøver observeres det at endringen i vanninnhold er størst i løpet av de første dagene etter innblanding (Åhnberg et al. 2006; Helle et al. 2021). Fra KlimaGrunns laboratorieprogrammer observeres det at for samme type leire er endringen i vanninnhold mindre i prøver hvor det er benyttet bindemiddel med Cement Kiln Dust (CKD) enn med kalk (Terraplus B80). Ved å blande inn lik bindemiddeltype- og mengde i tre ulike leirer ble det observert variasjon i endring i vanninnhold, og det er ikke slik at leira som har størst endring i vanninnhold er den som oppnådde størst skjærfasthet.

Ved måling av vanninnhold i leire tørkes prøven i et varmeskap på 110 °C over natta. For kalksementprøver vil den høye temperaturen samtidig være med på å akselerere herdeprosessen, og dermed føre til at vann i tillegg til å fordampe bindes opp i reaksjonsprodukter. Dersom den akselererte herdeprosessen fører til at vann inngår i reaksjonsproduktene og dermed fører til økt tørr masse av prøven, så vil mindre vann fordampe fra prøven. Dette medfører at vanninnholdet kan fremstå som lavere enn reelt ved det aktuelle herdetidspunktet. Det er uvisst hvor stor del av endringen i vanninnhold som skyldes fordamping og hvor mye vann som inngår i reaksjonsproduktene og dermed gir økt tørr masse av prøven. Det er derfor knyttet en del usikkerhet til laboratoriemålt vanninnhold, og spesielt for prøvene med kort herdetid. Endringer i vanninnholdet under herdeprosessen bør derfor måles uten å tilføre varme som kan akselerere herdeprosessen.

I det første feltforsøket på E18 Vestkorridoren ble det installert sensorer som i tillegg til temperatur også målte volumetrisk vanninnhold kontinuerlig over tid. Hensikten med disse målingene var å se om man kunne finne en sammenheng mellom endring i vanninnhold og fasthetsutvikling i pelen. Vanninnholdet ble målt for hver meter nedover i pelen. Resultatet var svært varierende. På noen av dybdene ble det målt en liten nedgang i volumetrisk vanninnhold over tid og på andre dybder ble det målt en liten økning over tid. Kondens i foringsrøret kan ha påvirket disse målingene.

Siden det ikke ble funnet noen god sammenheng mellom endring i vanninnhold over tid og fasthetsutvikling, hverken på laboratorium eller i felt, ble det besluttet å ikke inkludere vanninnhold som en parameter i det videre arbeidet med korrelasjonsmodellene.

C.4 Bindemiddelmengde og type

Som forventet oppnås høyere skjærfasthet med økende mengde bindemiddel. Økningen i skjærfasthet er imidlertid ulik for de ulike leirene. Resultatene fra Laboratorieprogram 2.1.4 viser også at økt bindemiddelmengde fra 80 til 105 kg/m³ ikke gir noen stor økning i skjærfastheten. For å redusere bindemiddelbruken vil det være viktig å finne ved hvilken terskelverdi økt bindemiddelmengde ikke lenger fører til signifikant økning i skjærfastheten.

KlimaGrunns resultater viser også at ulike leirer oppnår ulik fasthet med ulike typer bindemidler. For leira benyttet i 2.1.4 er oppnådd skjærfasthet større for innblanding med B80/CEM I enn CKD/CEM I, mens det for leira fra E18-Vestkorridoren i Eiliv Dues vei (2.1.2a-a3) er liten forskjell i oppnådd skjærfasthet for prøver tilsatt B80/CEM I og CKD/CEM II. I KlimaGrunn er det så langt fokusert på 50/50 av hver komponent i bindemiddelet. I mer siltige masser vil det iht. Statens vegvesen (2014) være en fordel å øke andelen sement (f.eks. 25/75 kalk eller CKD/sement). Optimal bindemiddeltipe er avhengig av sammensetningen i løsmassene som skal stabiliseres. Det er derfor viktig å teste ulike bindemiddeltyper og -kombinasjoner for løsmassene som skal stabiliseres. Bindemiddeltypen som benyttes i felt skal alltid testes på laboratoriet.

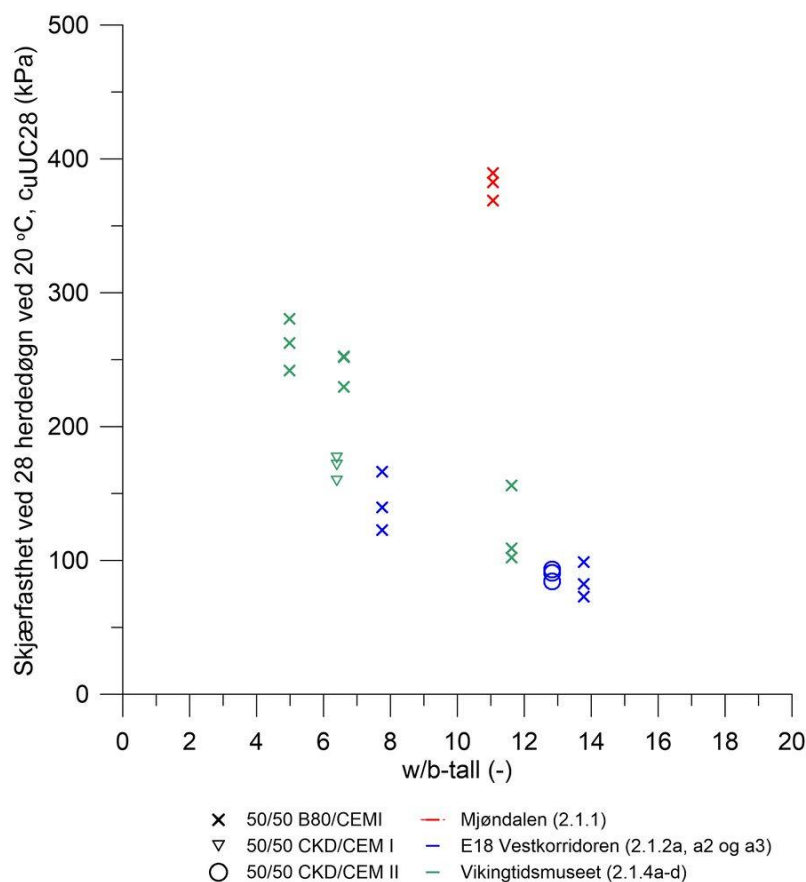
Det bør gjennomføres et studium for å finne ut hvordan leire/silt med ulik kornfordeling, kornform og mineralogi reagerer med ulike bindemiddelkombinasjoner (mengde og type) slik at det blir enklere å bestemme optimal bindemiddelkombinasjon for lokale grunnforhold.

C.5 Vann/bindemiddeltall

Ved å tilsette lik bindemiddelkombinasjon i løsmasser med ulikt vanninnhold, så vil løsmasser med lavt vanninnhold oppnå høyere fasthet enn løsmasser med høyt vanninnhold, forutsatt at alle andre parametere er like (Åhnberg et al. 1995). Det har de senere årene blitt publisert flere studier hvor det bl.a. fokuseres på korrelasjoner for forholdet mellom vann og bindemiddel (w/b) og oppnådd fasthet, og også hvor w/b-tallet korrigeres basert på aktivt CaO i bindemidler hvor det benyttes kalk (Paniagua et al. 2022; Bache et al. 2021; Hov et al. 2022). Studiene viser sammenheng mellom økende skjærfasthet og minkende w/b-tall.

Vann/bindemiddeltallet ble beregnet for KlimaGrunns laboratorieprogrammer 2.1.1, 2.1.2a-a3 og 2.1.4a-d. Sammenhengen mellom w/b-tall og fasthet ved 28 hervedøgn er vist i Figur C-1. Fra litteraturstudiet er det funnet at lavere w/b-tall normalt fører til høyere skjærfasthet dersom de andre leirparameterne er like. Som vi ser fra Figur C-1 stemmer dette også overens med våre forsøk, hvor det er en god sammenheng mellom redusert w/b-tall og økt fasthet innad i en laboratorieserie med samme type leire. Reduksjonen i w/b-tall skyldes her økende bindemiddelmengde. Mellom de ulike typene leire ser vi ikke en slik sammenheng. Ved omtrent like w/b-tall for Laboratorieprogram 2.1.1 og 2.1.4, oppnår likevel laboratorieprogram 2.1.1 langt høyere fasthet enn 2.1.4 ved å tilsette samme bindemiddelkombinasjon. Videre ses det at ved å øke bindemiddelmengden (lik type og sammensetning) for Laboratorieprogram 2.1.4, så reduseres w/b-tallet til under halvparten av w/b-tallet til Laboratorieprogram 2.1.1. Likevel er fastheten i laboratorieprogram 2.1.1 mye høyere. Det vil si at det er andre parametere ved leira enn vanninnholdet som spiller en meget stor rolle i forhold til fasthetsutviklingen.

I beregningen av w/b-tall er det ikke tatt hensyn til at ulike typer bindemiddel bl.a. har ulik mengde aktiv CaO. Ulike typer bindemiddel vil bidra ulikt til oppnådd fasthet i pelen. Dersom w/b-tallet skal brukes til å forutse styrkeutviklingen, kan det være et alternativ å bruke en «effektivitetsfaktor» for ulike typer bindemiddel, ut fra hvor mye de bidrar til slutfastheten i den aktuelle leira i forhold til sement. Dette er bl.a. gjort av Vervoorn og Barros (2020) hvor de for West Link prosjektet i Gøteborg fant at der sementen var byttet ut med kalk, var kalken bare 75 % så effektiv som sement når det kom til å forbedre udrenert skjærfasthet. Hvor mye ulike typer bindemidler bidrar til slutfastheten vil være avhengig av bl.a. leiras egenskaper, og det kan derfor ikke brukes en enkelt effektivitetsfaktor for et bindemiddel uavhengig av type leire.



Figur C-1: Skjærfasthet vs. w/b-tall ved 28 herdedøgn ved 20°C

C.6 Kornfordeling og mineralogi

Kornfordelingen har betydning for hvordan løsmassene reagerer med ulike bindemiddeltyper. I dag benyttes som oftest en kombinasjon med en andel bestående av enten kalk (Terraplast B60, B80 eller B100) eller Cement Kiln Dust (CKD) og en andel sement (CEM I eller CEM II). Fordelingen mellom andelene bør vurderes basert på kornfordelingen. Ved å benytte kun sement, vil styrken øke med avtakende leirinnhold (Bergado et al. 1996). Ifølge Croft (1967) er det krevende å stabilisere leire med sement dersom leirinnholdet er over 50 %. I leirer med høyt silitinnhold er derimot sement bedre egnet enn kalk (Statens vegvesen 2014). Styrkeutviklingen som følge av tilsatt kalk er derimot avhengig av pozzolane reaksjoner, dvs. reaksjoner mellom kalk og leirmineraler. Ved stabilisering med ren brent

kalk bør leirinnholdet være over 20 % og summen av silt- og leirfraksjonen bør være over 35 % (Broms 1991).

Videre kan mineralogien til leira ha betydning for oppnådd skjærfasthet (Åhnberg 2006). Kaolinittiske og illittiske leirer er mer egnet for stabilisering med sement enn leirer som inneholder store mengder ekspansive leirmineraler. Ekspansive leirmineraler som montmorillonitt reagerer raskere med kalk enn mindre aktive mineraler som kaolinitt og illitt (Croft 1967). Leirmineralene i norske kvikkleirer er dominert av de ikke-svellende leirmineraltypene illitt og kloritt.

KlimaGrunn utførte innblandingsforsøk med kvikkleirer fra tre ulike lokasjoner. Leira med høyeste siltinnhold oppnådde høyest skjærfasthet. Mineralogien til de tre leirene er ikke kjent.

C.7 Temperatur

I Norge er temperaturen i grunnen på ca. 6-8 °C. De kjemiske reaksjonene som følge av tilsatte bindemidler fører til at temperaturen i bindemiddelstabiliserte peler øker i starten av herdeprosessen. Dermed akselereres fasthetsutviklingen i pelen (Bell 1996). Temperaturmålinger i felt viser at temperaturen i bindemiddelstabiliserte peler ofte er høyere enn temperaturen i grunnen, og at forhøyet temperatur vedvarer i flere måneder etter installasjon (Åhnberg og Holm 1987; Wiersholm 2018; Bache et al. 2021). I Wiersholm (2018) ble det målt temperaturer på rundt 20 °C i dobbelt- og trippelribber med 80 kg/m³ 50/50 kalk og sement tre måneder etter installasjon. 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. Temperaturutviklingen 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 temperaturutvikling.
- Leiras termiske materialparametere
 - Dess høyere spesifikk varmekapasitet, dess saktere oppvarming av omkringliggende leire, og dess høyere varmeledningsevne, dess raskere temperaturutjevning med omgivelsene (Åhnberg og Holm 1987).

C.8 Valg av parametere som inngår i korrelasjonsmodellen for herdeprosessen

Basert på gjennomgang av litteratur og erfaringer fra KlimaGrunns arbeid, ble det besluttet å basere korrelasjonsmodellen for herdeprosessen på temperatur.

Vedlegg D

Valg av korrelasjonsmodeller

D.1 Generelt

I det følgende er korrelasjonsmodellene som er vurdert i KlimaGrunn beskrevet.

D.2 Modningstall og ekvivalent herdetid

Herdetemperaturen i laboratoriet burde ideelt sett være lik som i felt. Dette er vanskelig å gjenskape 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 ulik temperaturhistorie, og har senere også blitt tilpasset bindemiddelstabilisert leire (Ligning D-1) Åhnberg og Holm 1987):

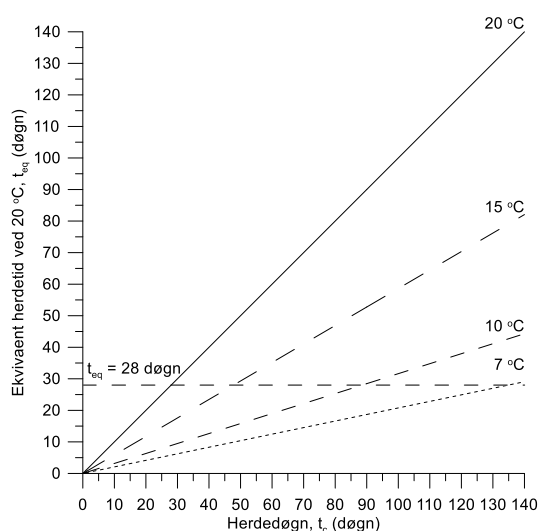
$$M(T_c, t_c) = (20 + K(T_c - 20))^2 \cdot \sqrt{t_c} \quad (\text{Åhnberg og Holm 1987}) \quad \text{Ligning D-1}$$

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 modenhetstallet i Ligning D-1 best tilpasset med en K -verdi lik 0,5 (Åhnberg og Holm 1987).

Vervoorn og Barros (2020) anbefaler å herde prøvene ved 20 °C (referansetemperatur T_{ref}), noe som også benyttes innenfor betongteknologi. Basert på Ligning D-1 kan Ligning D-2 benyttes for å finne ekvivalent herdetid (t_{eq}) ved en referansetemperatur (T_{ref}) som i KlimaGrunn er satt til 20 °C:

$$t_{eq} = \frac{(20 + K(T_c - 20))^4}{(20 + K(T_{ref} - 20))^4} \cdot t_c \quad \begin{array}{l} \text{Utledet fra Ligning D-1.} \\ \text{Modifisert etter Vervoorn} \\ \text{og Barros (2020)} \end{array} \quad \text{Ligning D-2}$$

Den ekvivalente herdetiden beregnes ved å først beregne ekvivalent tid per tidsinkrement og deretter summere verdiene for å finne akkumulert ekvivalent tid. En prøve som herder ved 7 °C må herde i ca. 140 døgn for å oppnå samme modenhetstall som om samme prøve hadde herdet ved 20 °C i 28 døgn (Figur D-1). Ved å herde prøvene på laboratoriet ved 20 ± 2 °C, sikrer man høy styrkeutvikling i løpet av kortere tid enn om prøvene herdes ved lavere temperaturer. For å kunne korrelere felt- og laboratorieresultatene anbefales det å regne om herdetiden i felt til ekvivalente herdetid ved 20 °C ved å benytte Ligning D-2.



Figur D-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}).

D.3 Korrelasjonsmodeller for fasthetsutvikling

D.3.1 Modellering av fasthetsutvikling i betong

For betong kan Ligning D-3 benyttes for å beskrive fasthetsutviklingen (Maage et al. 2018).

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{[s \cdot (1 - \sqrt{\frac{672}{M-t_0}})]} \quad (\text{Maage et al. 2018}) \quad \text{Ligning D-3}$$

Hvor f_{c28} er modellert trykkfasthet ved 28 døgns alder (MPa), M er modenhet (timer), t_0 er starttidspunkt for fasthetsutvikling (timer), s er funksjonsparameter og f_c er betongens trykkfasthet (MPa). Konstantene i funksjonen, f_{c28} , t_0 og s , kan bestemmes ved kurvetilpasning av måledata. For betong kan denne funksjonen brukes med god nøyaktighet for herdeforløpet fram til ca. 100 modenhetstimer. Etter dette må det forventes avvik, spesielt dersom herdingen har foregått ved høy temperatur (Maage et al. 2018).

D.3.2 Bindemiddelstabiliserte løsmasser

Horpibulsuk et al. (2004) konkluderer at ved å normalisere udrenert trykkfasthet etter herding i t døgn (q_t) og udrenert trykkfasthet ved 28 dager (q_{28}), finnes det en klar sammenheng mellom q_t/q_{28} og herdetid for leirer med flyteindeks på 1,0-2,5 (kvikkleirer har $IL > 1,2$) (Ligning D-4). Videre hevder de at man kan estimere styrken ved ulike herdetider, uavhengig av leirtype, vanninnhold og sementinnhold. Studien er basert på sementstabiliserte leirer fra Ariake (Japan), India og Bangkok. Leirene hadde vanninnhold over 62 %, og de ble innblandet 7,5-20,0 % sement og herdet opp mot ca. 200 døgn.

$$\frac{q_t}{q_{28}} \approx 0,038 + 0,281 \cdot \ln(t) \quad (\text{Horpibulsuk et al., 2004}) \quad \text{Ligning D-4}$$

Åhnberg (2006) sammenlignet ulike korrelasjonsmodeller for sementstabilisert leire og foreslår Ligning D-5 for å estimere enaksial trykkfasthet for sementstabiliserte prøver herdet ved 7 °C i 7-800 døgn.

$$\frac{q_t}{q_{28}} \approx 0,3 \cdot \ln(t) \quad (\text{Åhnberg 2006}) \quad \text{Ligning D-5}$$

Hvor t er tid (døgn), og q_t og q_{28} er enaksial trykkfasthet etter t og 28 døgn.

Vervoorn og Barros (2020) foreslår en modell for å kunne predikere skjærfasthet i bindemiddelstabilisert leire (Ligning D-6). De har utført forsøk på flere norske og svenske leirer, og ved å regne seg tilbake ved å benytte denne ligningen oppnådde de god overenstemmelse med feltforsøk. Vervoorn og Barros (2020) oppgir imidlertid ikke verdiene for de ulike kurvetilpasningsfaktorene (β).

$$c_u = c_{u,soil} + (c_{u,soil}\beta_0 + \tan(\phi) \sigma'_3) \frac{1 - e^{-\beta_1(\frac{t_{eq}}{day})}}{1 + e^{\beta_3(b_{eff} - \beta_2)}} \quad (\text{Vervoorn og Barros 2020}) \quad \text{Ligning D-6}$$

Hvor:

$c_{u,soil}$ Skjærfasthet i naturlig leire

β_0 Styrkeøkningfaktor, fastsetter langtidseffektene fra styrkeøkning av grunnstabilisert materiale som et forhold av den opprinnelige udrenerte skjærfastheten

β_1 Herdefaktor avhengig av herdetemperatur og bindemiddelsammensetning

β_2	Kurvtilpasningsfaktor (kg/m^3)
β_3	Kurvtilpasningsfaktor (m^3/kg)
φ'	Friksjonsvinkelen til grunnstabilisert materiale med et gjennomsnitt på 48° for det undersøkte materialet
σ'_3	horisontale effektivspenninger (kPa) tilsvarende celletrykk i aktive treaksialforsøk, horisontalt jordtrykk i FOPS tester
t_{eq}	Ekvivalent herdetid ved 20°C (dager)
b_{eff}	Effektivt bindemiddelinnhold (kg/m^3) basert på 0,75 effektivt kalkinnhold

D.3.3 Korrelasjonsmodell for stivhet (elastisitetsmodulen)

I litteraturen er det stort sprik mellom elastisitetsmodulen (E_{50}) og enaksiell trykkfasthet (q_u) eller skjærfasthet ($c_u = q_u/2$). Terashi et al. (1997) og Saitoh et al. (1985) fant følgende korrelasjoner for asiatisk:

- kalkstabilisert leire: $E_{50}/q_u = 75 - 1000$
- sementstabilisert leire: $E_{50}/q_u = 350 - 1000$

Paniagua et al. (2022) fant følgende forhold mellom E_{50} og E_{50} ved 28 døgns ($E_{50,28}$) og enaksiell udrenert skjærfasthet basert på resultater i NGIs database:

- Kalk-/sementstabilisert leire: $E_{50}/c_{uUC} = 50 - 800$, og $E_{50,28}/c_{uUC,28} = 237$
- CKD/sementstabilisert leire: $E_{50}/c_{uUC} = 55 - 660$, og $E_{50,28}/c_{uUC,28} = 290$

D.3.4 Valg av korrelasjonsmodeller for skjærfasthet og stivhet

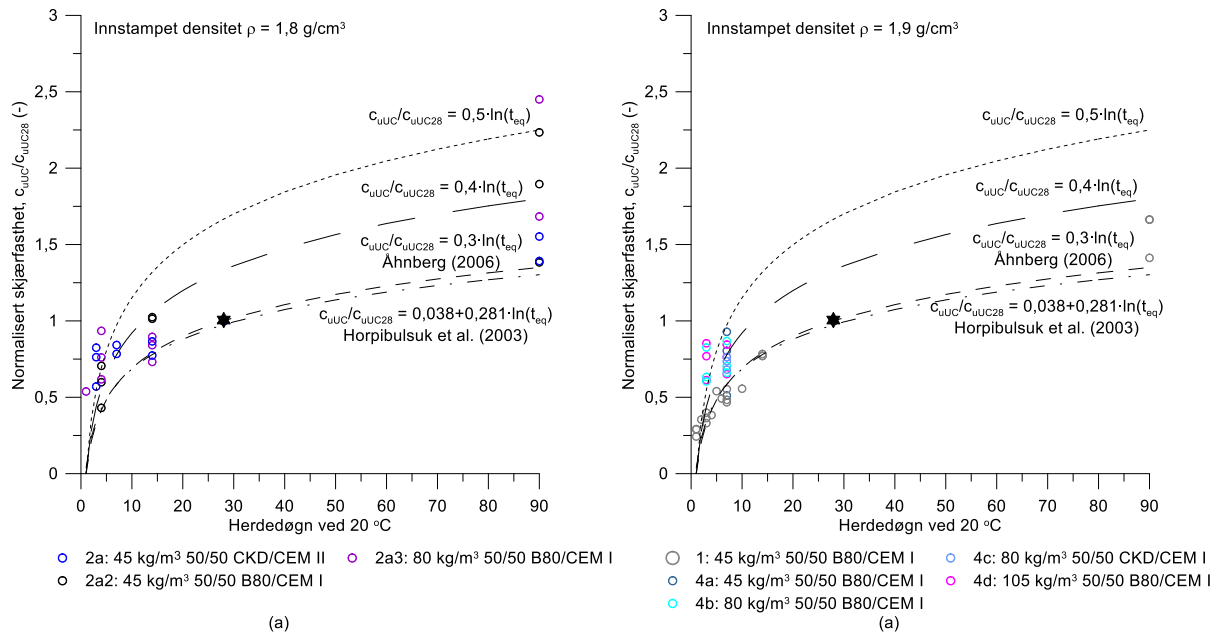
De laboratoriepreparerte prøvene i KlimaGrunns laboratorieprogrammer er herdet ved $20 \pm 2^\circ\text{C}$. I Figur D-2 og D-3 er enaksiell skjærfasthet fra laboratorieprogrammene normalisert på skjærfastheten etter ekvivalent herdetid 28 døgns (c_{uUC28}). Ved å normalisere alle skjærforsøkene på resultatet fra 28 døgns herding, så må korrelasjonskurven gå gjennom punktet $(x,y) = (28,1)$ (markert med stjerne i Figur D-2). Ved å modifisere Åhnberg (2006) sin korrelasjon slik at det benyttes ekvivalent herdetid ved 20°C istedenfor faktisk herdetid, så utgjør denne korrelasjonen et lavt estimat i KlimaGrunns datasett, og kan benyttes for en konservativ prediksjon av styrkeutviklingen i herdeforløpet.

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

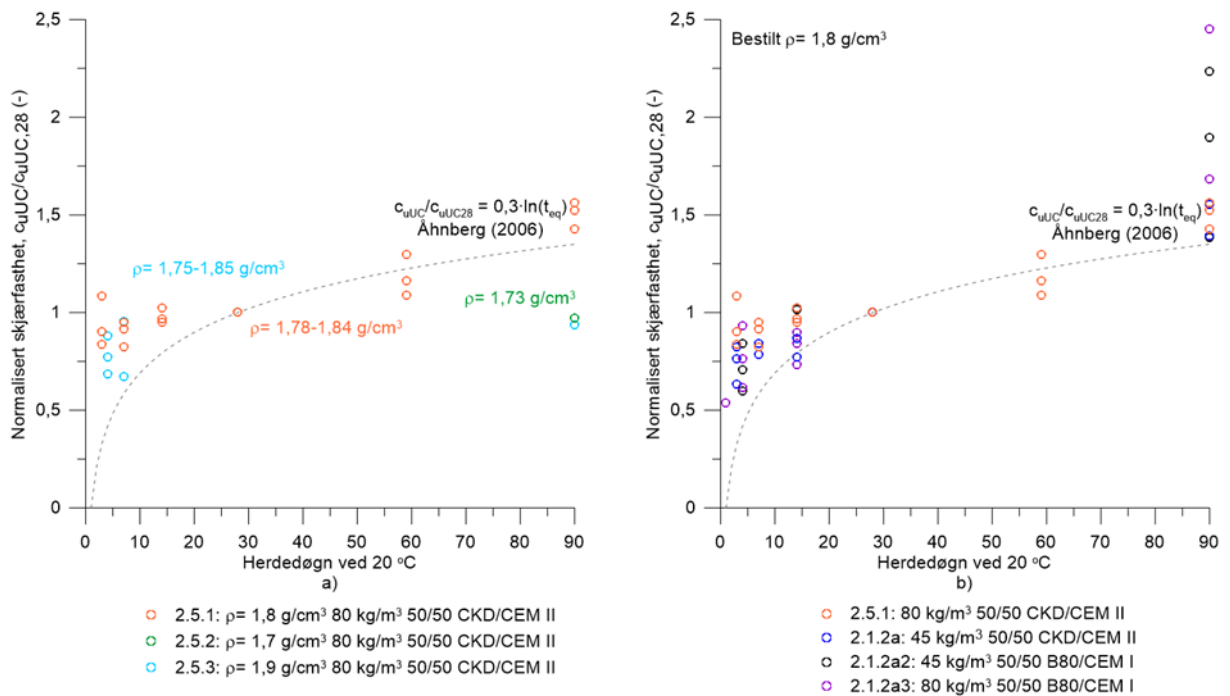
(modifisert etter Åhnberg 2006)

Ligning D-7

Skjærfastheten i de fleste laboratorieprogrammene viser imidlertid langt høyere styrkeutvikling enn ved å benytte Ligning D-7. Datagrunnlaget per nå er imidlertid for lite til å utvikle en helt ny korrelasjonsmodell. Det anbefales å revurdere korrelasjonsmodellen når det foreligger mer data produsert iht. KlimaGrunns laboratorieprosedyre for et større utvalg av løsmasser og bindemiddelkombinasjoner.



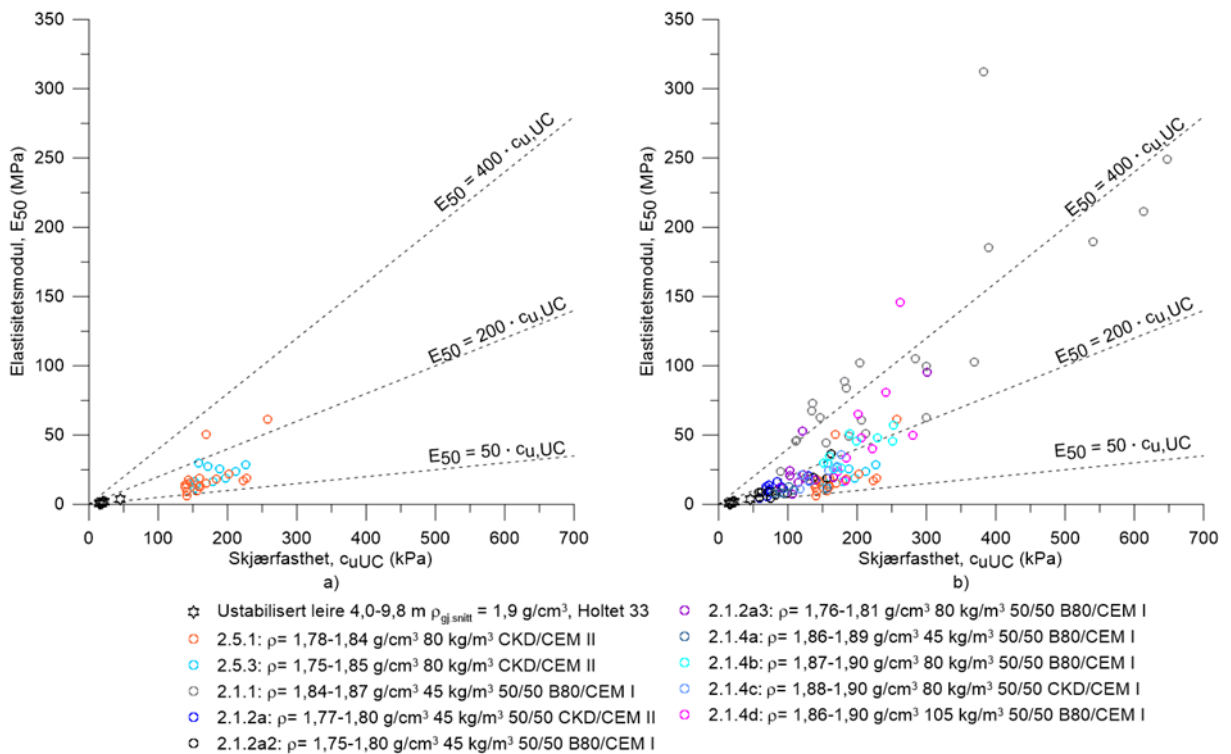
Figur D-2: a) Skjærfastheten ved ulike herdetidspunkt normalisert på skjærfastheten etter 28 herdedøgn ved 20 °C for prøver stampet inn med densitet på 1,8 g/cm³ og b) 1,9 g/cm³. $c_{uUC}/c_{uUC28} = 1$ for alle prøver herdet i 28 døgn, og dette punktet er derfor markert med stjerne. Fra Helle et al. (2021).



Figur D-3: Normalisert skjærfasthet mot ekvivalent herdetid ved 20 °C for laboratorieprogram a) i Fase 2.5 og b) innstampede prøver fra E18 leire med «bestilt» densitet 1,8 g/cm³.

Det er ingen entydig korrelasjon mellom tolket E_{50} og c_{uUC} dersom alle herdetidspunkt plottes sammen (Figur D-4). I laboratorieprogrammene med leire fra E18 Vestkorridoren så faller de aller fleste resultatene innenfor et forhold mellom E_{50}/c_{uUC} på 50-200. Det er større variasjon i datasettene fra Laboratorieprogram 2.1.1 og 2.1.4a-d. Til tross for mindre variasjon i bruddtøyningen, kom det ikke noen tydeligere trend ved å kun plote data for 28 og 90 herdedøgn. Basert på litteraturen og

KlimaGrunns datasett er det ikke mulig å finne en entydig korrelasjon mellom elastisitetsmodulen og skjærfastheten uavhengig av leiregenskaper og bindemiddelkombinasjon.



Figur D-4: Enaksiell skjærfasthet vs. elastisitetsmodulen a) Laboratorieprogram fase 2.5 (Holtet 33) b) inkl. Laboratorieprogrammene for Fase 2.1.

D.4 Korrelasjonsmodeller for skjærbølg hastighet, skjærmodul og skjærfasthet

D.4.1 Generelt

Skjærbølg hastigheten (V_s i m/s) øker med økende fasthet og stivhet i massene. Bindemiddelstabiliserte løsmasser har høyere fasthet og stivhet enn ustabiliserte masser, og V_s vil derfor være høyere i bindemiddelstabiliserte masser enn i omkringliggende løsmasser. Måling av skjærbølg hastighet for å estimere oppnådd styrke og stivhet benyttes i større grad internasjonalt der grunnforholdene er annerledes enn i Norge. Det finnes en rekke tilgjengelige korrelasjoner mellom udrenert skjærfasthet (c_u) i leirer og de dynamiske parameterne V_s og skjærmodulen ved små tøyninger (G_0 i Pa). Flere av disse korrelasjonene er sammenstilt i for eksempel L'heureux og Long (2017) og Mitchell og Soga (2005).

Dynamiske parametere i løsmasser påvirkes av løsmassenes densitet, spenningstilstand, struktur, alder, spennings- og tøyningshistorie og sementering (Kramer 1996). V_s øker med økende omslutningstrykk (overlagring), geologisk alder, sementering, overkonsolideringsgrad, (OCR) og plastisitetsindeks (IP) dersom $OCR > 1$, og minker med økende poretall (e) (Dobry og Vucetic 1987). Av disse faktorene påvirkes V_s i størst grad av densiteten i løsmassene, poretallet og effektivspenningene. Den opprinnelige strukturen i bindemiddelstabilisert leire ødelegges under innblanding og reaksjon

¹ Omtales også i litteraturen som G_{max}

(sementering) med bindemiddel, og opprinnelig struktur og overkonsolidering vil dermed ikke være relevante for korrelasjonsmodeller i bindemiddelstabiliserte leirer.

D.4.2 Korrelasjoner for å bestemme skjærbølgehastigheten

Skjærfastheten og stivheten øker normalt med dybden grunnet økte spenninger med dybden. Normalt øker derfor også V_s med dybden. Dette kan uttrykkes med Ligning D-8 hvor V_{sz} er V_s ved dybde z , V_{sg} er V_s nær terrengoverflaten og m er helningen på linjen for V_{sz} . Ligning D-9 er basert på innsamlede data for norske leirer, og inkluderer at V_s øker med dybden som følge av økte vertikale effektivspenninger (overlagringstrykk) (σ'_{v0}).

$$V_{sz} = V_{sg} + mz \quad (\text{Teachavorasinkun og Lukkunaprasit 2004}) \quad \text{Ligning D-8}$$

$$V_s = 1,11 \cdot \sigma'_{v0} + 53,24 \quad (\text{L'heureux og Long 2017}) \quad \text{Ligning D-9}$$

V_{sg} og m minker med økende vanninnhold og minkende densitet (L'heureux og Long 2017). Basert på dybdeprofil av V_s målt med MASW i norske leirer presentert i L'heureux og Long (2017) er V_{sg} og m i ca. størrelsesorden:

- Midt-Norge: $V_{sg} = 100\text{-}160$ m/s, $m = 4\text{-}16$ ($w = 25\text{-}40\%$, $\gamma = 18\text{-}20$ kN/m³)
- Sør- og Østlandet: $V_{sg} = 100\text{-}160$ m/s, $m = 4\text{-}10$ ($w = 25\text{-}60\%$, $\gamma = 17\text{-}20$ kN/m³)

Dannewitz et al. (2005) utførte målinger av V_s med down-hole seismikk i naturlig leire i Uppsala, Sverige og i kalk-/sementpeler. I naturlig Uppsala leire ble det tolket en gjennomsnittlig V_s ved 2-10 m dybde på 74 m/s, og ved 10-13 m dybde på 165 m/s. Det var noe variasjon i måledata, men generelt var V_s i kalk-/sementpelene i snitt 2-3 ganger høyere enn verdiene målt i ustabilisert leire. Basert på resultatene fra Dannewitz et al. (2005) kan det anslås en V_{sg} lik ca. 180-200 m/s og m lik 12-15, altså noe høyere verdier enn det som ble funnet av L'Heureux og Long (2017) for norske naturlige leirer.

D.4.3 Korrelasjoner for å bestemme G_0

G_0 beskriver skjærmodulen for tøyingsforhold i området hvor materialet er lineært elastisk. Løsmasser kan betraktes som lineært elastiske ved skjærtøyninger mindre enn $< 0,001\%$. De fleste seismiske testmetodene påfører lavere skjærtøyninger enn $3 \cdot 10^{-4}\%$ (Kramer 1996). Dermed kan den målte V_s fra in-situ målinger eller benderelement sammen med densiteten (ρ i kg/m³) i løsmassene benyttes til å beregne G_0 fra Ligning D-10.

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad \text{Ligning D-10}$$

Dersom man ikke har mulighet til å måle V_s og finne G_0 ved alle herdetidspunkt så kan det trolig utvikles unike kurver for ulike typer løsmasser og bindemiddelsystem. Flores et al. (2010) stabiliserte kaolin leire med standard Portlandsement (CEM I) og slaggsement (CEM III/B). V_s ble målt med benderelement ved ulike herdetidspunkt. G_0 økte naturlig nok med bindemiddelmengden. Ved å normalisere G_0 med G_0 målt ved 28 dagers herding ($G_{0,28}$) fremkom det at utviklingen av $G_0/G_{0,28}$ over tid var uavhengig av bindemiddelmengde. For prøver der det var blandet inn CEM I er Ligning D-11 foreslått.

$$\frac{G_0}{G_{0,28}} = 0,2381 \cdot \ln(t) + 0,2145 \quad \text{Flores et al. (2010)} \quad \text{Ligning D-11}$$

D.4.4 Korrelasjoner mellom skjærbølghestighet og skjærfasthet

Det finnes mange korrelasjoner for udrenert skjærfasthet i naturlig og stabilisert leire basert på enten V_s eller G_0 . De fleste korrelasjonene har formen som i Ligning D-12 hvor a og b er konstanter som varierer med løsmasseyper, bindemiddeltyper og mengder.

$$V_s = a \cdot c_u^b \quad (\text{bl.a. L'heureux og Long 2017}) \quad \text{Ligning D-12}$$

Ustabilisert leire

Skjærfastheten øker med økende V_s . Ligning D-13 er basert på udrenerte, anisotrop konsoliderte treaksialforsøk (CAU_c) på høykvalitetsprøver fra norske leirer.

$$c_{u,CAU_c} = 0,021 \cdot V_s^{1,52} \quad (\text{L'heureux og Long 2017}) \quad \text{Ligning D-13}$$

Korrelasjonen i Ligning D-13 er basert på leirer med udrenert skjærfasthet opp til 100 kPa, med V_s opptil ca. 250 m/s. I følge Subramanian (2008) har middels faste til faste leirer V_s i området 200-375 m/s. Long og Donohue (2007) målte V_s i faste norske leirer i størrelsesorden 100-350 m/s (målt med MASW).

Bindemiddelstabiliserte leirer

Bindemiddelstabiliserte leirer oppnår høy skjærfasthet (> 100 kPa), og V_s vil dermed trolig være langt høyere enn i naturlige leirer. Bindemiddelstabiliserte leirer er omrørt og partiklene sementert. Leira mister da sin opprinnelige struktur. Oppnådd skjærfasthet og stivhet i bindemiddelstabilisert leire styres dermed trolig av opprinnelig kornfordeling, bindemiddeltype og -mengde i tillegg til innblandingsarbeid (enklere å oppnå homogen pel dess lavere omrørt skjærfasthet og plastisitetsindeks). Ulike leirer reagerer ulikt med ulike typer bindemidler. Det vil derfor kunne forventes at konstantene i Ligning D-12 vil kunne variere. I det følgende er det samlet inn korrelasjoner for skjærbølghestighet og udrenert skjærfasthet (ev. enaksiell trykkfasthet) for ulike typer bindemiddelstabiliserte leirer funnet i litteraturen.

Asaka og Abe (2011) målte skjærbølghestighet og enaksiell trykkfasthet ($q_{u,UC}$) på laboratoriepreparerte prøver av fem ulike typer løsmasser (leire og sand) stabilisert med sement (50-400 kg/m³). Leirene hadde svært høyt vanninnhold (100-120 %), mens sanden hadde et vanninnhold på 40 %. Basert på resultatene foreslås Ligning D-14 ($q_{u,UC} < 2000$ kPa, $V_s < 600$ m/s).

$$q_{u,UC} = a \cdot (e^{b \cdot V_s} - 1) \quad \text{Asaka og Abe (2011)} \quad \text{Ligning D-14}$$

Hvor $q_{u,UC}$ er enaksiell trykkfasthet² i N/mm², e er det naturlige tallet $e \approx 2,718$, og a og b er kurvetilpassningsfaktorer unike for ulike typer løsmasser. For leirene er a lik 0,005-0,006 og b lik 0,015. Det ses en tydelig sammenheng mellom type løsmasser og målt V_s . Dette vil trolig også gjenspeiles i norske bindemiddelstabiliserte løsmasser med varierende kornfordelingskurver hvor f.eks. siltige leirer vil vise høyere V_s for samme skjærfasthet enn løsmasser med høyere leirinnhold.

Dannewitz et al. (2005) målte V_s med benderement på kalk-/sementstabiliserte prøver preparert for enaksialforsøk. Det ble benyttet en leire fra Uppsala ($w = 50-85$ %, $\rho = 1,5-1,7$ t/m³, $IP \approx 34$ %, $IL \approx 1,12$)

² $c_{u,UC} = 0,5 \cdot q_{u,UC}$

som ble stabilisert med 80 kg/m³ og 120 kg/m³ 50/50 kalk og sement. Bindemiddelet ble blandet inn med 15 mm/omdreining og 30 mm/omdreining. Ligning D-15 gav best samsvar med resultatene.

$$c_{u,UC} = 0,0424 \cdot V_s^{1,462} \quad \text{Dannewitz et al. (2005)} \quad \text{Ligning D-15}$$

Massarsch (2005) målte V_s både med benderelement i laboratoriet og i felt. V_s og G_0 for kalk-/sementpeler med 99 og 156 kg/m³ økte med tiden (målinger utført opp til 116 døgn). Den største økningen ble observert i løpet av de første 41 døgnene. Deretter var økningen av både V_s og G_0 mindre. Korrelasjonen er imidlertid basert på feltmålinger for herdingen i starten og benderelementtester mot slutten av måleserien.

Chan (2006) utførte en studie på kaolin (kunstig) og naturlige malaysiske og svenske leirer blandet med små mengder (<10 % av tørrvekten av leira) standard Portlandsement og brent kalk. Prøvene ble stampet inn i fire lag (40 g per lag) i former med 38 mm diameter og høyde 76 mm. Prøvene ble tatt ut av formene og pakket i plast og lagret ved romtemperatur (ca. 20 °C). Vanninnholdet i de naturlige leirene var høyere enn det som vanligvis måles i norske leirer (65-74 %). Chan (2006) kom fram til ulike korrelasjoner for de ulike bindemiddelstabiliserte leirene (Ligning D-16- Ligning D-18).

$$\text{Kaolin: } c_{u,UC} = 1,095 \cdot 10^{-3} \cdot V_s^2 \quad (\text{Chan 2006}) \quad \text{Ligning D-16}$$

$$\text{Malaysisk leire: } c_{u,UC} = 2,254 \cdot 10^{-3} \cdot V_s^2 \quad (\text{Chan 2006}) \quad \text{Ligning D-17}$$

$$\text{Svensk leire: } c_{u,UC} = 1,856 \cdot 10^{-3} \cdot V_s^2 \quad (\text{Chan 2006}) \quad \text{Ligning D-18}$$

Flores et al. (2010) plottet $G_0/G_{0,28}$ mot $c_{u,UC}/c_{u,UC28}$ for kaolin stabilisert med standard Portland sement (CEM I) og slaggsement (CEM III) herdet i opptil 60 døgn. Korrelasjonene var lineære og uavhengig av bindemiddelmengde både for kaolin stabilisert med CEM I (Ligning D-19) og CEM III (Ligning D-20).

$$\text{Kaolin + CEM I: } \frac{G_0}{G_{0,28}} = 1,0412 \cdot \frac{c_{u,UC}}{c_{u,UC28}} \quad (\text{Flores et al. 2010}) \quad \text{Ligning D-19}$$

$$\text{Kaolin + CEM III: } \frac{G_0}{G_{0,28}} = 1,023 \cdot \frac{c_{u,UC}}{c_{u,UC28}} \quad (\text{Flores et al. 2010}) \quad \text{Ligning D-20}$$

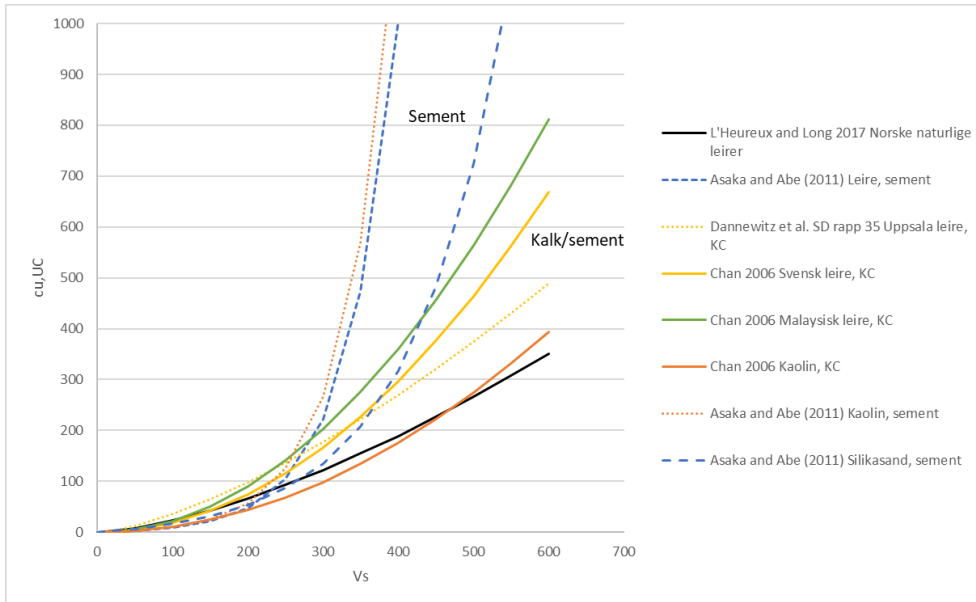
Flores et al. (2010) sammenlignet resultatene med andre publiserte data for leirer stabilisert med standard Portland sement, og fant godt samsvar mellom de ulike leirene og særlig godt samsvar i løpet av den første måneden av herdeperioden.

D.4.5 Valg av korrelasjon for skjærbølg hastighet, skjærmodul og skjærfasthet

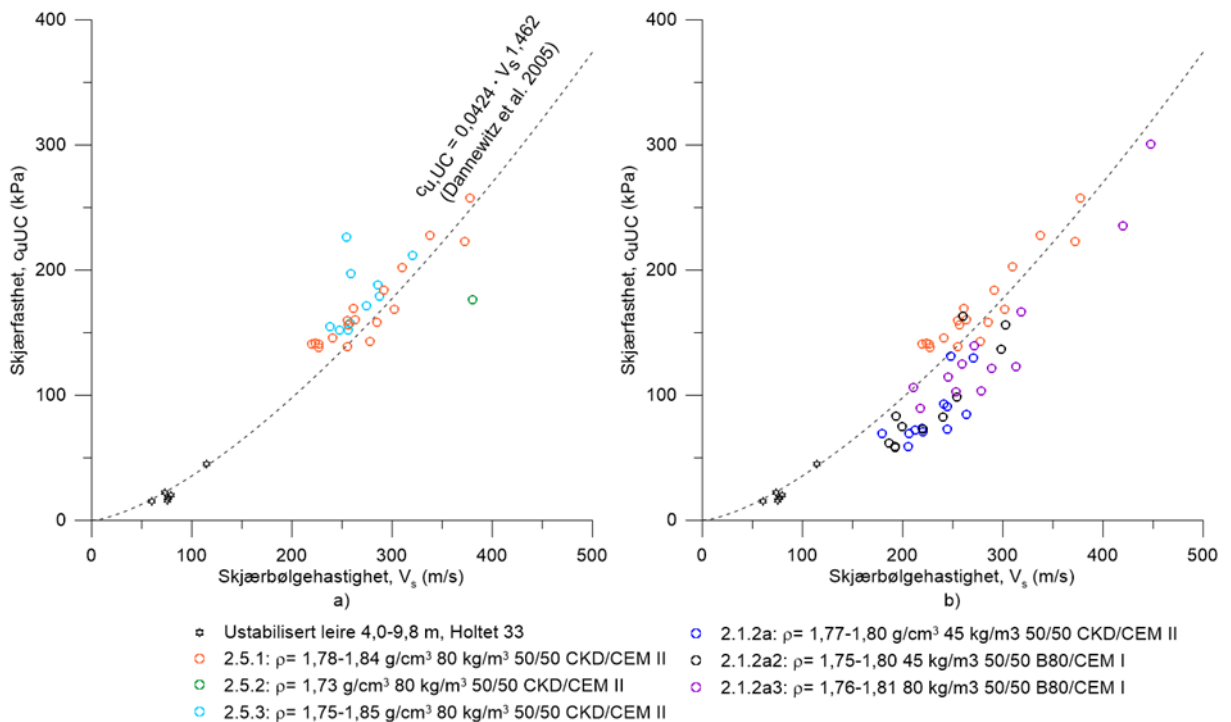
KlimaGrunns feltforsøk

Leirer iblandet kun sement oppnår høyere fasthet enn leirer stabilisert med en blanding av kalk og sement (Figur D-5). Både den svenske og malaysiske leiren hadde langt høyere vanninnhold enn det som normalt måles i norske leirer. I tillegg vil også mengde bindemiddel ha innvirkning på oppnådd skjærfasthet. Det bør derfor utvikles et sett med kurver for ulike typer leirer og ulike bindemiddeltypene og -mengder for å fastsette konstanter for ulike norske leirer og bindemiddelsystemer. KlimaGrunns datasett er per nå for lite til å kunne utvikle slike korrelasjoner. Dataene viser imidlertid relativt godt

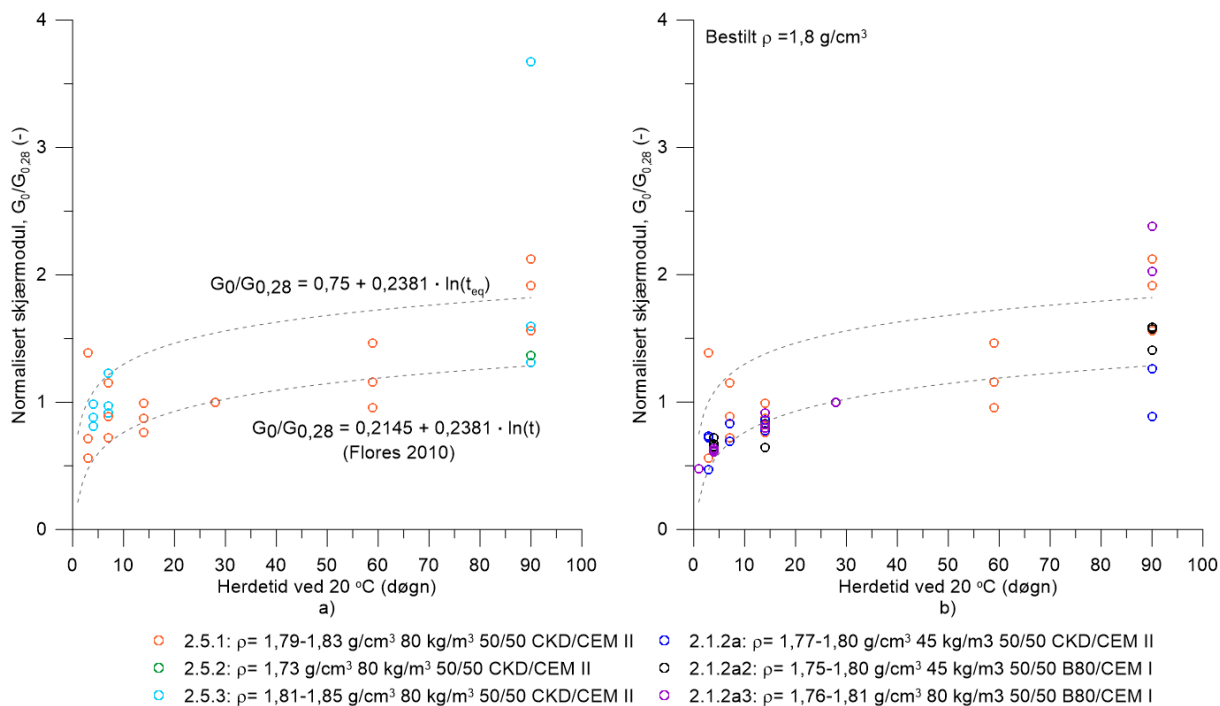
samsvar med Dannewitz et al. (2005) sin korrelasjon (Ligning D-15) for skjærbølgehastighet og skjærfasthet (Figur D-6). Det bemerkes at resultatene fra Laborieprogram 2.1.2a-a3 trolig er misvisende trolig grunnet dårlig kontakt mellom benderelement og prøve. Skjærmodulen tolket fra KlimaGrunns laborieforsøk er ikke like entydige som i Flores et al. (2010). Likevel kan denne korrelasjonen (Ligning D-11) benyttes som en nedre konservativ grense (Figur D-7).



Figur D-5: Sammenstilling av korrelasjoner for skjærbølgehastighet og udrenert skjærfasthet



Figur D-6: Skjærbølgehastighet vs. enaksial skjærfasthet a) Laborieprogram fase 2.5.1 (Holtet 33) og b) Holtet 33 og Eiliv Dues vei med innstampet densitet 1,8 g/cm³.



Figur D-7: Normalisert skjærmodul vs. ekvivalent herdetid ved 20 °C for a) Laboratorieprogram i Fase 2.5 og b) prøver stampet inn med densitet 1,8 g/cm³.

Oppdragsgivers test (akseptansetest)

Oppdragsgivers test av KlimaGrunns arbeidsmetodikk ble gjennomført i mars/april 2023 på anleggsområdet til Vikingtidsmuseet på Bygdøy. Dmix AB installerte fem bindemiddelstabiliserte peler med 60 kg/m³ 50/50 CKD/CEM II. Temperatursensorer og foringsrør for seismikk ble installert umiddelbart etter installasjon av de bindemiddelstabiliserte pelene 8. mars 2023. Temperatursensorene ble demobilisert 4. mai 2023. Krysshullsseismikk ble utført 24.-25. april 2023. Innblandingsforsøkene ble utført på Statens vegvesens Sentrallaboratorium. De laboratoriepreparerte prøvene herdet i 4, 7, 28 og 60 døgn ved 20 °C.

Gjennomsnittlige parametere fra sammenblandede sylindere er vist i Tabell D-1. Innblandingsforsøkene utført for dybdene 4-6 m og 9-11 m har høy plastisitet. Leira benyttet i forsøkene for 14-16 m er middels plastisk, sprøbruddsmateriale.

Temperaturmålingene fra den midtre pelen er presentert på Cautus Web (Figur D-8) hvor både figurer og rådata kan lastes ned. Figur D-9 viser temperaturmålingene i ulike nivåer i pelen og forholdet mellom tid etter installasjon og ekvivalent herdetid ved 20 °C. De runde symbolene viser herdetiden for de laboratoriepreparerte prøvene både på laboratoriet ved 20 °C og omregnet til tid etter installasjon i felt ved å benytte temperaturmålingene i pelen. Stjernene viser tidspunkt for utførelse av krysshullsseismikk.

Resultatene fra laboratorieforsøkene er presentert i Figur D-10. Et konservativt, nedre estimat av enaksiell skjærfasthet (Figur D-10a) og skjærmodul (Figur D-10c) kan beregnes ved å benytte de modifiserte korrelasjonsmodellene fra henholdsvis Åhnberg (2006) og Flores et al. (2010).

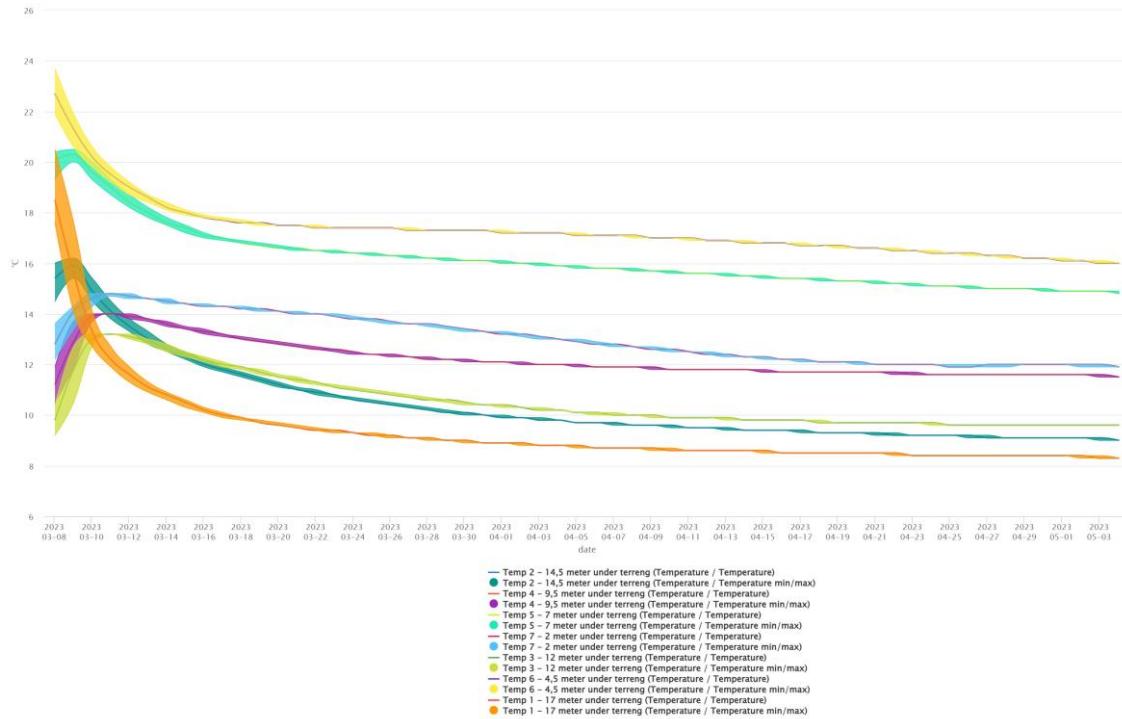
Tabell D-1: Geotekniske parametere for leira benyttet i innblandingsforsøkene.

	4-6 m	9-11 m	14-16 m
Leirinnhold (%)	43	50	46
Siltinnhold (%)	57	50	54
Organisk innhold (%)	2,5	2,4	2,0
Korndensitet (ρ_s , g/cm ³)	2,78	2,78	2,79
Densitet (ρ , g/cm ³)	1,81	1,83	1,87
Vanninnhold (%)	44,5	43,0	40,5
Omrørt skjærfasthet (c_{urf} , kPa)	3,6	3,5	0,8
Enaksiell skjærfasthet (c_{uUC} , kPa)	18,4	23,6	15,0
Plastisitetsindeks (IP, %)	25	24	16
Flyteindeks (IL, -)	0,9	0,9	1,3

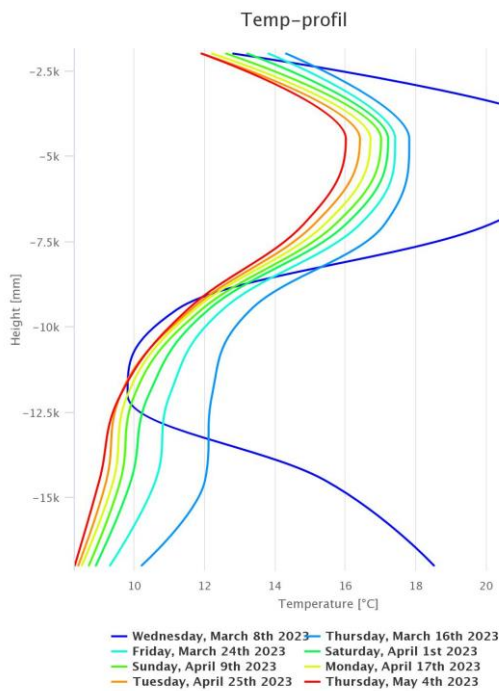
Dannewitz et al. (2005) sin korrelasjon kan benyttes for å finne et konservativt, nedre estimat av oppnådd skjærfasthet basert på skjærbølgehastighet tolket fra benderelementforsøkene (Figur D-10b). Resultatene fra Oppdragsgivers test gir imidlertid en noe brattere korrelasjon mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet enn de tidligere feltforsøkene, og en korrelasjonsmodell med bedre samsvar er derfor også vist i Figur D-10b. Tolket skjærfasthet fra skjærbølgehastigheten målt i pelene samsvarer i dette tilfellet godt med enaksiell skjærfasthet fra laboratorieforsøkene og estimert skjærfasthet basert på den modifiserte korrelasjonen til Åhnberg (2006) (Figur D-10a). Skjærbølgehastighet og tolket skjærfasthet over hele dybden er vist i Figur D-11. Temperaturforskjellene i pelen påvirker hvilken styrke som oppnås. I tillegg påvirkes resultatene av lagdelingen i grunnen.

Korrelasjonen $E_{50} = 100 \cdot c_{uUC}$ utgjør et konservativt, nedre estimat for elastisitetsmodulen (Figur D-10d).

Styrkeutvikling og predikert styrkeutvikling fram i tid basert på korrelasjonsmodellen presenteres også på Cautus Web (Figur D-12).

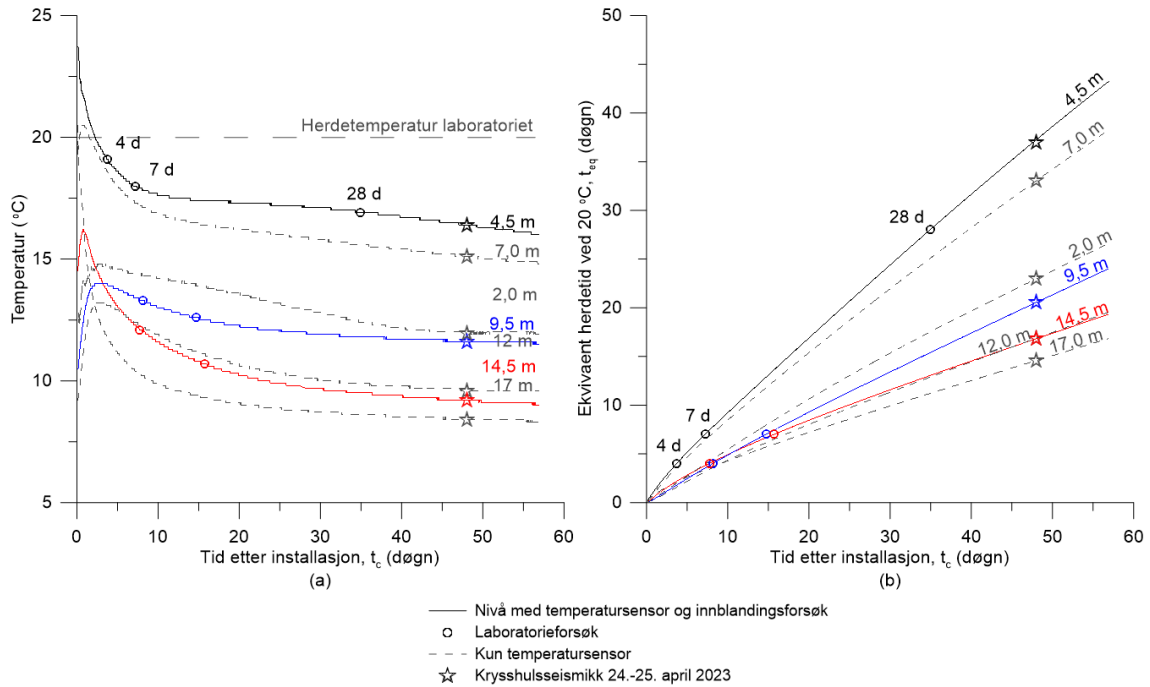


a)

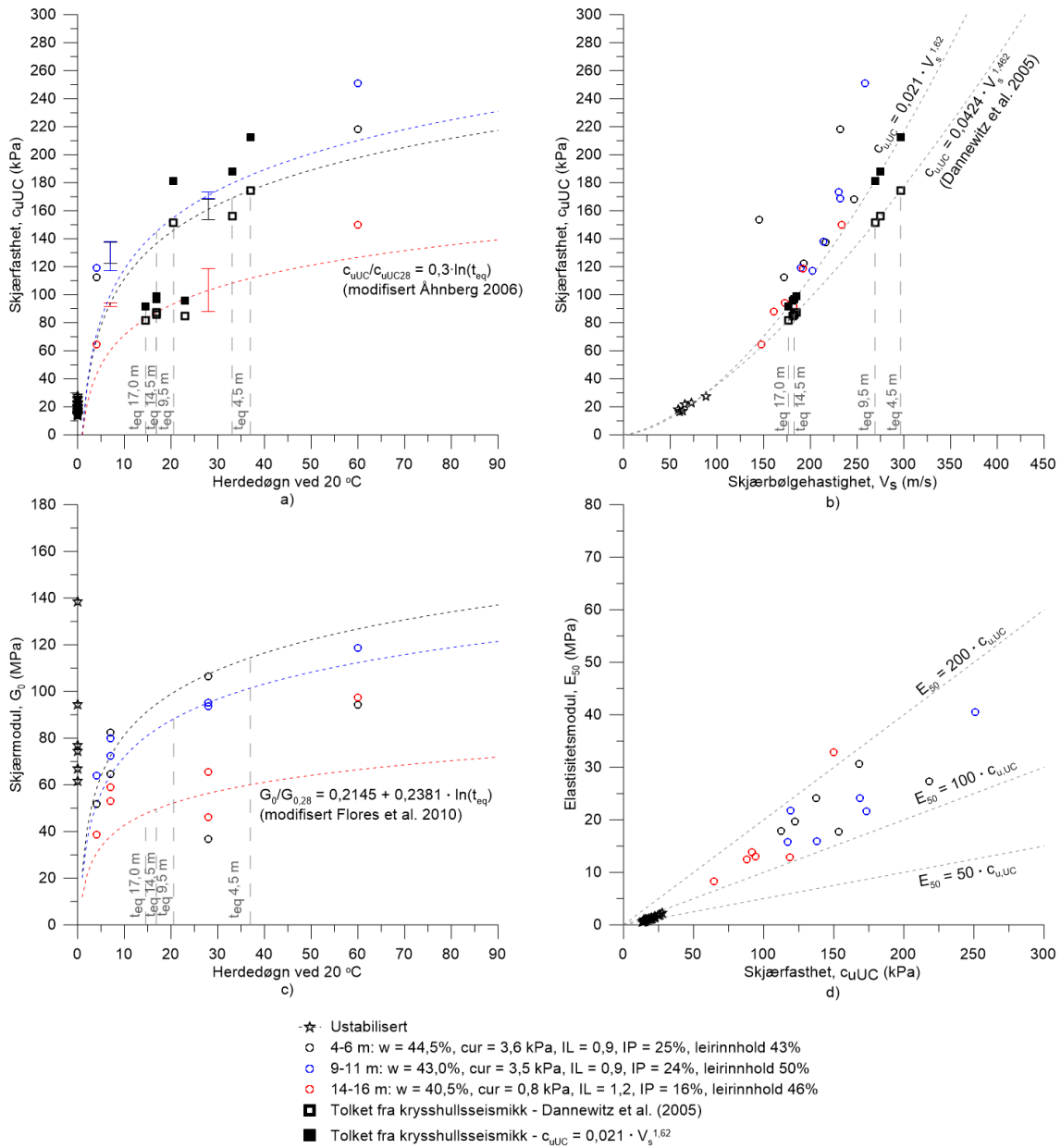


b)

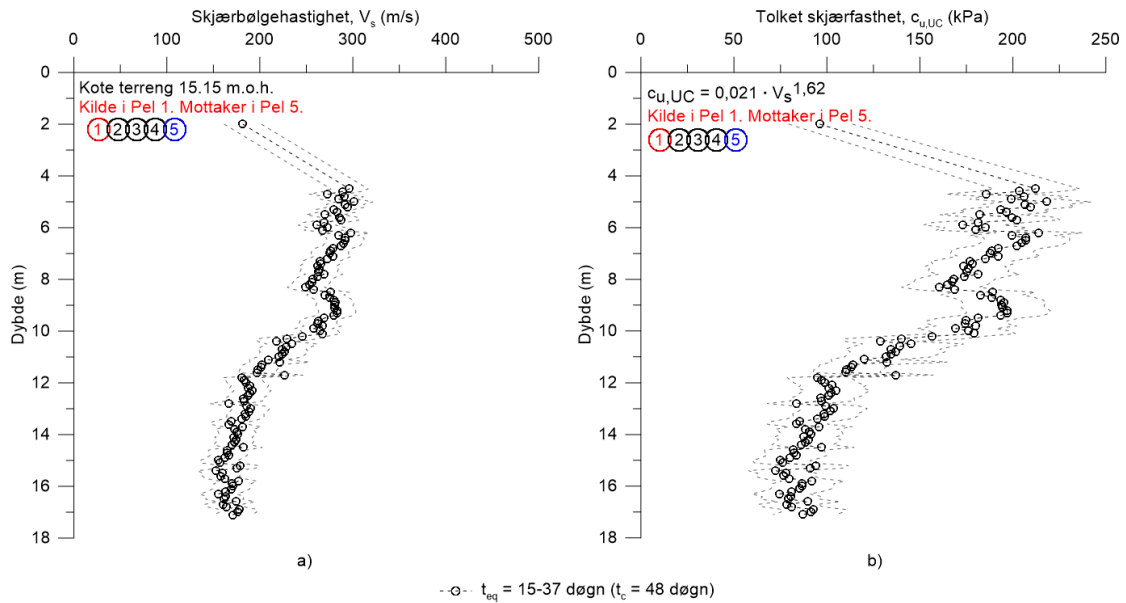
Figur D-8: a) Temperaturutvikling (inkludert usikkerhet) over tid ved ulike nivåer i pelen. b) Temperaturprofil over pelens dybde fra installasjonsdato 8. mars 2023 til demobilisering av sensorene 4. mai 2023.



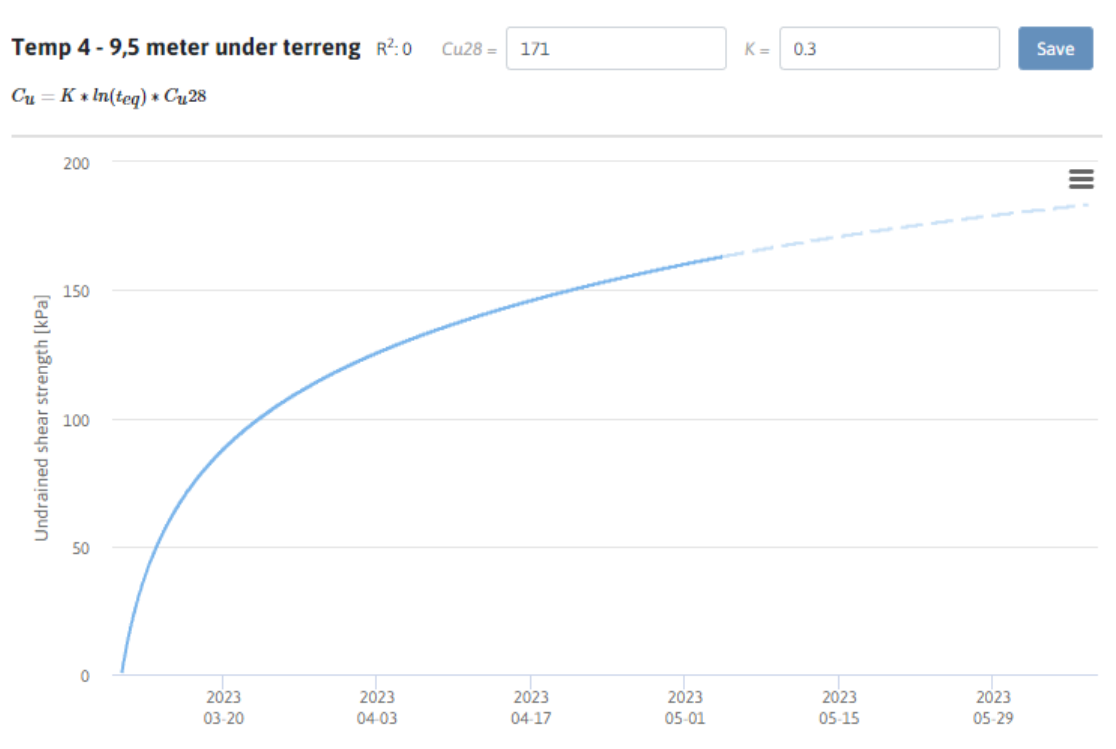
Figur D-9: a) Temperaturutvikling i ulike nivåer i pelen. Runde symboler viser herdetiden for laboratoriepreparerte prøver relatert til herdetid i felt. Stjernene viser tidspunkt for utførelse av krysshulseisemikk. b) Tid etter installasjon og ekvivalent herdetid ved 20 °C.



Figur D-10: Laboratorieresultater fra innblandingsforsøk utført ved Statens vegvesens Sentrallaboratorium. a) Enaksiell skjærfasthet (c_{uUC}) versus ekvivalent herdetid (t_{eq}) ved 20 °C sammenlignet med modifisert korrelasjonsmodell etter Åhnberg (2006). Ekvivalent herdetid ved utførelsestidspunktet av krysshullsseismikk 25. april for ulike dybder er vist med vertikale stiplede linjer. b) Enaksiell skjærfasthet versus skjærbølgeghastighet tolket fra benderelementforsøk med bølgeperiode 0,2 ms. Korrelasjonen fra Dannewitz et al. (2005) gir et konservativt estimat av skjærfastheten. Justert korrelasjonsmodell som gir bedre samsvar med laboratorieresultatene er vist i figuren. c) Skjærmodul (G_0) tolket fra benderelementforsøk versus ekvivalent herdetid ved 20 °C. Korrelasjonen fra Flores et al. (2010) kan benyttes for et konservativt estimat av G_0 . d) Elastisitetsmodul (E_{50}) versus enaksiell skjærfasthet. Korrelasjonen $E_{50} = 100 \cdot c_{uUC}$ utgjør et konservativt, nedre estimat.



Figur D-11: a) Skjærbølgehastighet tolket fra krysshullsseismikk. b) Skjærfasthet tolket med alternativ korrelasjonsmodell basert på resultater fra benderelementforsøk. Krysshullsseismikken ble utført 48 dager etter installasjon av pelene. Grunnet temperaturforskjeller i pelen, så tilsvarende dette en ekvivalent herdetid ved 20 °C på 15-37 døgn (se Figur D-9:)



Figur D-12: Eksempel på plot fra Cautus Web som viser styrkeutvikling basert på korrelasjonsmodellen og predikert styrkeutvikling fram i tid. Brukeren legger selv inn 28 dagers skjærfasthet fra innblandingsforsøkene.

Vedlegg E

KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk

NOTAT

OPPDRAAG	KlimaGrunn	DOKUMENTKODE	10222597-RIG-NOT-001 Rev. 03
EMNE	Laboratorieprosedyre innblandingsforsøk	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAAGSGIVER	Statens vegvesen, Statsbygg og Bane NOR	OPPDRAAGSLEDER	Tonje Eide Helle
KONTAKTPERSON	Eivind Juvik	SAKSBEHANDLER	Tonje Eide Helle og Pernille Wiersholm
KOPI		ANSVARLIG ENHET	Multiconsult Norge AS

SAMMENDRAG

Notatet beskriver laboratorieprosedyren som er benyttet for innblandingsforsøk i KlimaGrunn. Revisjon 04 av dokumentet inneholder oppdaterte verdier for utslippsfaktorene fra de nyeste Environmental Product Declaration (EPD) for bindemidlene.

1 Laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk i KlimaGrunn

Samsvaret mellom styrke og stivhet målt i laboratoriet og in-situ målinger er lite. Dette skyldes trolig at prepareringen av prøver og herdemiljøet i laboratorieforsøkene ikke samsvarer med hvordan bindemiddelstabiliserte peler blandes og herdes in-situ. Det er lite samsvar mellom:

- Innblandingsarbeid
- Herdetemperatur
- Trykk under herding

De foreliggende laboratorieprosedyrene ble gjennomgått i forbindelse med planlagt laboratorieprogram i KlimaGrunn. Det ble avholdt et møte den 9. februar 2021 der det ble diskutert å justere prosedyrene. Den foreslåtte prosedyren i dette dokumentet er basert på gjeldende prosedyrer og innspill under diskusjonen i og etter det første møtet. Mindre justeringer av prosedyren er utført basert på erfaringer fra de ulike laboratorieprogrammene. Arbeidsgruppen for ny laboratorieprosedyre som skal benyttes i KlimaGrunn er listet opp i Tabell 1.

Tabell 1: Arbeidsgruppe for justering av laboratorieprosedyrer for innblandingsforsøk i KlimaGrunn

	Statens vegvesen	Norcem	Multiconsult
Geoteknikk	Eivind Schnell Juvik El Hadj Nouri		Guro Brendbekken Kristian Heurlin (FLF) Pernille Wiersholm Tonje Eide Helle
Geoteknisk laboratorium	Marianne Dahl		Grete Olaussen Simon O'Rawe
Materialteknologi	Stig Henning Helgestad	Kirsten Syvertsen	Ingrid Hegseth André Schmidt

04	25.04.23	Oppdaterte utslippsfaktorer for bindemidler.	Tonje Eide Helle	Pernille Wiersholm	Tonje Eide Helle
03	31.08.22	Oppdatert prosedyre basert på erfaringer etter Laboratorieprogram 2.5	Tonje Eide Helle	Ingrid Hegseth	Tonje Eide Helle
02	01.12.21	Oppdatert prosedyre etter utførte forsøk ved laboratorieprogram 2.1.2	Tonje Eide Helle	Pernille Wiersholm	Odd Arne Fauskerud
01	21.05.21	Oppdatert prosedyre etter utførte forsøk ved laboratorieprogram 2.1.1	Pernille Wiersholm/ Tonje Eide Helle	Tonje Eide Helle	Odd Arne Fauskerud
00	08.04.21	1. utkast benyttet for laboratorieprogram 2.1.1	Tonje Eide Helle	Pernille Wiersholm	Odd Arne Fauskerud
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

2 Foreliggende 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
- NGI (2000) Jordforsterkning med kalksementpeler – Prosedyre for laboratorieforsøk. Rapport nr. 527551-2, datert 31. mai 2000
- Multiconsult (2015) Prosedyrer for geotekniske laboratorier. Prosedyre nr. GL05.02 Prosedyre for kalk-sement-forsøk. Dokumentnr. 900834.A100.GL05.02, datert 04.04.2015
- Svensk Djupestabilisering (2006) Djupestabilisering med bindemedelsstabiliserte pelare och masstabilisering. Rapport nr. 17

Norsk Geoteknisk Forenings (NGF) (2012) og NGIs (2000) prosedyrer er like, og Statens vegvesens prosedyre i R210 og Multiconsults (2015) prosedyre er like. I hovedsak er prosedyren til NGF og Statens vegvesen lik med noen forskjeller. Den svenske prosedyren ligner de norske, med noen små forskjeller.

2.1 Prosedyre før innblanding

Tabell 2: Foreliggende prosedyrer før innblanding

	NGF	NGI	R210	Multiconsult	Svensk djupestabilisering
Prøver	Uforstyrta eller pose		Uforstyrta		Uforstyrta og forstyrta
Rutineforsøk før innblanding	Beskrivelse, enaks, konus, vanninnhold, tyngdetetthet for hver prøve				
Bindemiddel	Prosjektavhengig, ikke eldre enn 1 år				Åpnet beholder < 6 mndr., eller kjemisk kontroll

2.2 Prosedyre homogenisering av løsmasser

Tabell 3: Foreliggende prosedyrer for homogenisering av materiale

	NGF	NGI	R210	Multiconsult	Svensk djupestabilisering
Utstyr	Kenwood major e.l.		Kenwood major e.l. K-visp		Kjøkkenmaskin/deigblander
Mengde leire pr. homogenisering	1-2 kg leire		Rester pr. sylindere	Alt materiale tas vare på	
Homogenisering	Hvert lag dersom lagdelte løsmasser		Pr. sylindere	Alt materiale Avhenger av bestilling	
Metode for homogenisering	-		Lav hastighet «min» (48-50 rpm) i 30 s		Blandingstiden noteres
Kontroll av vanninnhold i løsmasser			Originalt vanninnhold fra sylindere el. pose. Kan ev. bestille w fra homogenisert masse		2 vanninnhold

2.3 Prosedyre innblanding av bindemiddel

Tabell 4: Foreliggende prosedyrer for innblanding av bindemiddel

	NGF	NGI	R210	Multiconsult	Svensk djupstabilisering
Bindemiddelmengde	% av tørrvekt leire* eller som kg/m ³ leire				kg/m ³ leire
Tid	2-4 min		30 s + slikkepott + 30 s		2,5 min +slikkepott + 2,5min
Hastighet på mikser	2-3		«Min» (48-50 rpm)		-
Test etter innblanding og før innstamping	2 vanninnhold av blandingen		1 vanninnhold av blandingen		2 vanninnhold av blandingen

* Benyttes sjelden

2.4 Prosedyre innstamping

Tabell 5: Foreliggende prosedyrer for innstamping

	NGF	NGI	R210	Multiconsult	Svensk djupstabilisering
Innstampingssylinder	Ø54 mm, H 110 mm		Ø54 mm, H 100 mm*		Ø50 mm, H 170mm
Lagtykkelse	20 mm Rifle opp overflaten mellom hvert lag**				30 mm Rifle opp overfl.
Stampeutstyr	1,2 kg messingsylinder		Komprimeringsapparat (trykkluft)***		Pakningsstav for å unngå luftlommer
Filter	-		Papirfilter i bunn av prøven		
Stempeloverflate	Ø20 mm		~Ø54 mm Vaffelmønstreet		
Energitilførsel	0,2-0,25Nm/stamp		200 kPa i 10 s per lag		100 kPa i 5 s per lag
Antall stamp pr lag	Ca. 20		-		
Måling etter stamping	-		Tyngdetetthet		
Maksimal tilberedningstid	-		-		Max 30 min etter blanding

* Multiconsult benyttet tidligere sylinder Ø50 mm

** Ikke beskrevet i prosedyrene, men gjøres

*** Multiconsult benyttet tidligere pakningsstav for fylling av sylinder, og utskyverbenk til komprimering

2.5 Prosedyre herding

Tabell 6: Foreliggende prosedyrer for herding

	NGF	NGI	R210	Multiconsult	Svensk djupstabilisering
Lagring	Forsegl endeflatene etter renskjæring		Forsegl endeflatene Lagres i stampestylinder*		Forsegl endeflatene
Herdetemperatur	6-8 °C	6 °C	Kjøleskap 7 °C evt. etter bestilling		Variierer Som oftest 7 °C Romtemperatur
Herdemiljø	~100% luftfuktighet (Plastpose med fuktig papirklut i)		I sylinder med gummiheiter		Fuktrom e.l.
Herdetid (døgn)	1, 7, 14 og/eller 28 (som oftest 7 og 28)		7, 14 eller 28 ev. etter bestilling		14, 28, 91og/eller 180

* Multiconsult skjøv tidligere ut prøvene etter innstamping

I NGFs beskrivelsestekster for grunnundersøkelser er det krav til at prøvene skal lagres i plast for å unngå tap av vann, og at det går bort fra å lagre prøvene kjølig (Figur 1).

12. Kalk-sement innblandingsforsøk

Arbeidet omfatter innblanding av bindemiddel (typisk kalk, sement og/eller CKD) i sylindre for etterfølgende lagring frem til enaksial trykktesting. Bindemiddeltype, innblandingsmengde (kg/m^3), lagringstemperatur og lagringstid før testing skal angis i *spesiell beskrivelse*.

Prøvene skal lagres (avbindes) i plast for å unngå tap av vann under avbindingen. Prøvene skal aldri lagres kjølig, med mindre slikt er spesifisert i *spesiell beskrivelse*.

Figur 1: Utklipp fra NGFs beskrivelsestekster for grunnundersøkelser (2020)

2.6 Prosedyre for trykkforsøk etter herding

Tabell 7: Foreliggende prosedyre for trykkforsøk etter herding

	NGF	NGI	R210	Multiconsult	Svensk djupstabilisering
Tid fra utskyving til test	-	Maks 1 time	-		
Tyngdetetthet	Veg prøvestykket før enaks Tørking etter enaks for bestemmelse av vanninnhold				
Enaksialforsøk	1,5 %/min		2,0 %/min	4 %/min	1-2 %/min

Iht. ISO 17892-7:2017 skal enaksialforsøk kjøres med en hastighet på 1-2 %/min (dvs. 1-2 mm per min for prøvehøyder på 100 mm).

I tillegg til enaksialforsøk kan det også bestilles spesialforsøk (f.eks. treaksialforsøk). Disse blir ikke beskrevet i denne prosedyren.

3 Forslag til laboratorieprosedyre for KlimaGrunn

I det videre, er det tatt utgangspunkt i Statens vegvesens Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser kapittel 2-22-225 Kalksementstabilisering av leire i laboratoriet. Prosedyren er oppdatert med innspill fra KlimaGrunns arbeidsgruppe for laboratorieprosedyre (Tabell 1).

Laboratorieprosedyren bør være minst mulig operatørvhengig, og beskrive en metode som fører til reproducerbare resultater. Følgende endringer er innarbeidet i prosedyren:

- Densiteten på stabilisert prøve bestemmes før innstamping
- Prøvene herdes ved 20 ± 2 °C
- Nytt spesiallaget utstyr for preparering av prøver med forhåndsbestemt densitet

3.1 Definisjoner

Definisjoner:

- **Blandingsmengde:** Mengde innblandet bindemiddel angitt i form av masse kalk- og/eller sementprodukter. Angis i kg pr. m³ løsmasser.
- **Blandingsforhold:** Forholdet mellom andel kalk og sement, eller CKD (Cement Kiln Dust) og sement i blandingen er angitt i %, som for eksempel 50/50 CKD/CEM II.

3.2 Utstyr

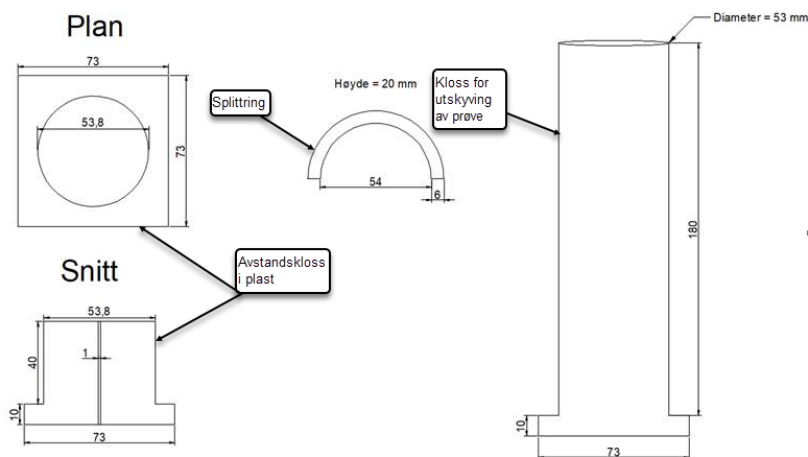
Det er utviklet og designet nytt utstyr for innstamping av prøver slik at forhåndsbestemt densitet oppnås i innstampede prøver (Figur 2).

Utstyret består av:

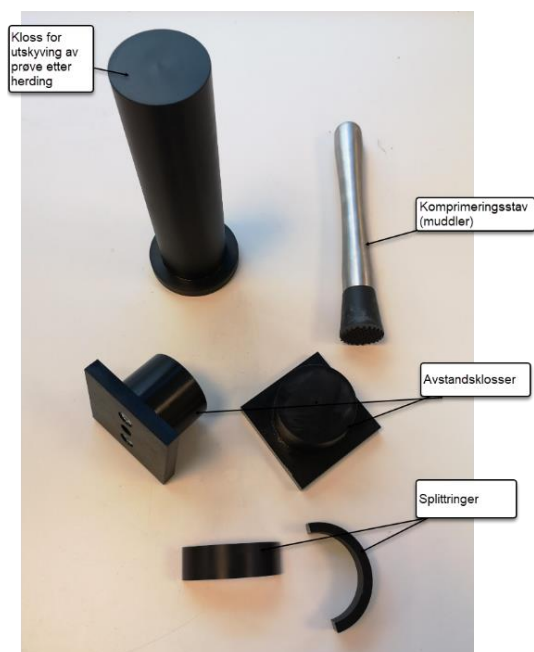
- 180 mm sylinder kappet fra komposittprøvetakingssylindere
- 2 stk. avstandsklosser/propper som stikker 40 mm inn i sylindere på hver side slik at ferdig preparert prøvehøyde blir 100 mm¹. Topp- og bunnstykket har en 1-2 mm ventil for å slippe ut luft under sammenpressing.
- Splittring med 10-20 mm høyde på bunnproppen. Fjernes etter innlegging av leire for å sikre deformasjon fra begge sider under sluttkomprimering.
- Fuktig papirfilter i bunnen og på toppen av prøven for å hindre at leire fra prøven skvises ut gjennom ventilene i endestykkene under sammenpressing.
- Håndholdt komprimeringsstav (muddler Figur 3) med f.eks. vaffelmønster
- Silikon for tetting rundt propp
- Enaksial presse for å klemme på proppen i toppen
- Festeordning for å holde sylinder, topp- og bunnstykke sammen for å unngå volumendring under herding.

¹ Høyde/diameter (H/D)-forholdet for enaksiale prøver må være 1,8-2,5 (ISO 17892-7:2017). Det velges å benytte samme H/D-forhold som benyttes for enaksial- og treaksialforsøk for leirprøver (1,85). NGI benytter H/D på 2, og aksepterer forsøk med H/D 1,8-2,1.

Laboratorieprosedyre innblandingsforsøk



Figur 2: Utstyr for innstamping av bindemiddelstabilisert prøve. Avstandsklosser/propper som brukes til å sikre en prøvehøyde på 100 mm. I tillegg benyttes en 180 mm høy komposittsylinder med diameter 54 mm.



Figur 3: Bilde av utstyret.



Figur 4: Komposittsylinder med avstandskloss i topp og bunn. Topp- og bunnstykket fastholdes med en stropp.

Utstyr som trengs i tillegg:

- Kjøkkenmaskin med bolle i rustfritt stål og K-visp
- Redskap for opprifling av overflaten mellom hvert lag, f.eks. gaffel (kan utelates dersom stamperen/mudleren har overflatemønstre som rifler opp lagene).
- Prøveutskyver for sylinderprøver
- Konusapparat
- Kontrollert analysevekt, nøyaktighet 0,01 g
- Kontrollert enaksial presse
- Kontrollert vekt, nøyaktighet 0,5 g (til total densitet)
- Nummererte skåler, med kjent masse
- Kniv (spatel)
- Trådsag og stållinjal
- Kontrollert varmeskap med temperatur (110 ± 5 °C)
- Bindemiddel
- Diffusjonstette plastposer
- Fuktig klut
- Tape

3.3 Valg av bindemiddel

Kalk-/sementpeler er en samlebetegnelse på grunnforsterkning ved bruk av ulike typer og blandinger av bindemidler, også bindemidler som ikke inneholder kalk som f.eks. Cement Kiln Dust (CKD)/sement². Blandingsforhold og -mengde er prosjektavhengig.

Kalk-/sement består av en prosentandel kalk og en prosentandel sement, f.eks. 25/75, 50/50 eller 75/25 brent kalk (f.eks. Terraplus B) og sement med eller uten en andel flygeaske (f.eks. Industrisement (CEM I 52,5 R) eller Standardsement FA (CEM II/B-M 42,5R)). Det er mest vanlig å benytte kalk av typen Terraplus B80 som inneholder ca. 20 % filterstøv (Lime Kiln Dust (LKD)). Dermed knyttes det lavere klimagassutslipp til Terraplus B80 enn Terraplus B100 (Tabell 8). Fasthetsutviklingen er imidlertid raskere for Terraplus B100 grunnet høyere reaktivt innhold. Standardsementen har lavere utslippsfaktor enn Industrisementen grunnet innhold av flygeaske (Tabell 8).

Det kan også benyttes bindemiddel uten brent kalk. Dette består av en del industrisement (CEM I) eller en del standardsement FA (CEM II), og en del filterstøv fra sementproduksjonen (CKD).

Både kalk, sement og CKD skal oppbevares i lufttette beholdere av plast. Lokket skal ikke være åpent mer enn høyst nødvendig for å hente ut bindemiddel. Dato for påfylling av materiale skal avmerkes på beholderen sammen med opplysninger om materialtype. Materiale eldre enn 12 måneder skal ikke anvendes til innblandingsforsøk.

Av sikkerhetsmessige hensyn skal det foreligge HMS-blad for alle produkter som benyttes i tiknytning til innblandingsforsøkene.

² Bindemiddel bestående av CKD og sement omtales ofte som Multicem som er Norcem's produkt navn på ferdigblandet produkt. Andel CKD/sement varierer etter ønske. Se produktbeskrivelser på <https://www.norcem.no/no/Multicem>.

Tabell 8: Utslippsfaktorer for ulike bindemidler.

Sementkomponent		Brent kalk/filterstøv	
Produktnavn	CO ₂ -ekvivalenter (kg CO ₂ /tonn bindemiddel)	Produktnavn	CO ₂ -ekvivalenter (kg CO ₂ /tonn bindemiddel)
Industrisement (CEM I 52,5 R)	716* (EPD datert 07.08.2020)	Terraplus B100 (Ren brent kalk)	1035* (EPD datert 31.10.2021)
Standardsement FA (CEM II/B-M 42,5R)	582* (EPD datert 07.08.2020)	Terraplus B80 (Brent kalk/LKD)	829* (EPD datert 31.10.2021)
CKD**	0***	Terraplus B60 (Brent kalk/LKD)	725* (EPD datert 31.10.2021)
		Terraplus B40 (LKD)	356* (EPD datert 13.08.2019)

* Alle CO₂-ekvivalenter er hentet fra EPDer til de respektive produktene fra Norcem og Franzefoss

** Erstatte kalk i Norcems produkt Multicem

*** CO₂-utslipp legges 100% på klinkerproduksjon

3.4 Fremgangsmåte

3.4.1 Prøvemateriale

Det benyttes løsmasser fra:

- Rester fra sylindrerprøver
- Poseprøver

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 aller helst innen en til to uker etter prøvetaking.

Det må påregnes 700-800 g materiale per innstampet prøve. Det bør derfor legges av ca. 20 cm av 54 mm prøvesylinder for hver innstampet prøve. Ved planlegging av hvor mange sylindere eller poseprøver som skal tas opp, må det også inkluderes hvor mye materiale som går med til å utføre rutine- og spesialforsøk (Tabell 9).

Materialet fra samme sylinder eller pose pakkes tett omsluttet i plast i lufttette poser med fuktig klut for å sikre 100% luftfuktighet, og lagres kjølig fram til innblanding med bindemiddel. Posene merkes med:

- Oppdragsnummer og -navn
- Borhullsnummer
- Prøvenavn
- Dybde
- Dato for prøvetaking
- Dato for prøveutskyving

Laboratorieprosedyre innblandingsforsøk

Tabell 9 Estimert materialbehov leire/silt som forbrukes i ulike forsøk. Ved grovere masser vil man trenge andre mengder.

Forsøk	Materialbehov
Saltinnhold	1* kg
Kornfordeling og korndensitet	Ca. 200 g, eller ca. 5-10 cm** av 54 mm sylinderprøve
Flyte- og utrullingsgrenser	Ca. 200 g, ca. 5 cm av 54 mm sylinderprøve
Vanninnhold	Ca. 100-150 g, eller ca. 3-4 cm av 54 mm sylinderprøve
Glødetap/humusinnhold	Ca. 150 g, benytt prøve for vanninnhold
Treaksialforsøk	12 cm
Ødometerforsøk	10 cm

* Varierer avhengig av hvilken metode som benyttes. Ved Multiconsults laboratorium i Oslo benyttes 1 kg.

** Mengde avhenger av løsmasstype. Ved grove masser behøver man større mengder.

3.4.2 Parameterbestemmelse prøveåpning

Tabell 10 lister opp parameterbestemmelse som utføres under prøveåpning.

Tabell 10: Parameterbestemmelse like etter prøveåpning

	Uforstyrret prøve	Poseprøve
Vanninnhold	x	x
Densitet	x	-
Kornfordeling	x	x
Humusinnhold	x	x
Enaksiell skjærfasthet	x	-
Konus skjærfasthet	Udrenert og omrørt	omrørt
Flyte- og utrullingsgrense	(x)	(x)

3.4.3 Homogenisering av løsmasser

Det er viktig at løsmassene er kalde ved start. Materialet som skal benyttes i innblandingsforsøk holdes kjølig fram til homogenisering. Homogenisering utføres om mulig på kjølerom, og 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, kornfordeling, rutineparametere) ofte varierer over dybden. Leiras egenskaper påvirker hvilken styrke og stivhet som oppnås i bindemiddelstabilisert materiale. Dersom det ikke er nok materiale, så kan dette avvikes og materiale med like egenskaper fra samme lag homogeniseres.

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. Ved behov tas prøve for utpressing av porevann for bestemmelse av saltinnhold. Dersom materiale fra flere sylindere eller poseprøver blandes, bestemmes også kornfordelingen av homogenisert masse.

3.4.4 Innblanding av bindemiddel

Bindemiddelmengden beregnes som kg/m^3 leire, og tilsettes den kjølige homogeniserte massen.

Bindemiddelet drysses jevnt over den homogeniserte massen. 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 til det oppnås en homogen masse. Blandingstiden noteres.

Det tas umiddelbart ut to prøver av den homogene massen tilsatt bindemiddel for bestemmelse av vanninnhold.

3.4.5 Tillaging av bindemiddelstabilisert prøve

Densiteten i innstampede prøver bør ikke overstige densiteten i bindemiddelstabilisert leire i felt. Det er høyst usikkert hvilken densitet som oppnås i de feltstabiliserte pelene, og det er lite data å hente erfaringsverdier fra. Falle (2021) rapporterte < 4 % reduksjon i densitet i prøver hentet fra feltstabilisert peler med innblandingsmengder 30, 50 og 80 kg/m^3 som hadde herdet i opptil 9 uker i felt sammenlignet med densitet i ustabilisert leire. På prøver hentet fra bindemiddelstabiliserte peler i felt etter 25 ukers herding i felt ifb. utbyggingen av E6 Trondheim – Melhus, er densiteten redusert med 5-6 % sammenlignet med omkringliggende ustabilisert leire (Multiconsult 2014 og 2017). Densiteten i bindemiddelstabiliserte peler antas derfor å være noe lavere enn ustabilisert leire. Det anbefales derfor å stampe inn prøver med 5 % lavere densitet enn løsmassene har in-situ.

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 herdes i f.eks. 3, 7 og ev. 90 døgn. Prøvene prepareres slik:

- 1) Avstandskloss/propp smøres inn med silikon. Splittring monteres på bunnstykket før påmontering av sylinder.
- 2) Sylindere 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+bindemiddel) veies opp slik at densiteten i innbygd prøve tilsvarer densiteten til leira in-situ.
- 5) Del det innveide materialet opp i fire like deler med lik vekt. Fyll sylinder lagvis for hånd med håndholdt stampeutstyr 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 sylindere. Dette for å sikre at halve massen fyller ca. halve sylindere. Når dette er oppnådd fylles lag nr. 3 og 4 slik at prøven totalt måler 10,1-10,5 cm. Dette gjøres for å oppnå lik densitet over hele prøvens høyde når prøven til slutt presses sammen til 10 cm høyde (se pkt. 9).
- 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.

Laboratorieprosedyre innblandingsforsøk

- 9) Smør silikon rundt toppstykket/proppen og press denne rett ned i toppen av sylindere. 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 eller fest med tvinge) for å unngå at prøven får mulighet til å endre volum.
- 11) Legg våt klut rundt prøvesylindere, og pakk inn prøven i diffusjonstett plast slik at den blir tett.
- 12) Prøven lagres vertikalt ved 20 ± 2 °C og 100 % luftfuktighet.

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

I KlimaGrunns laboratorieprogrammer ble det erfart at det kan være vanskelig å stampe inn prøver med lav densitet som f.eks. $1,70 \text{ g/cm}^3$. For å unngå at materialet komprimeres for mye slik at prøven blir kortere enn 100 mm under innbygging, så kan man forsøke å i stedet for å følge pkt. nr. 5 fylle massen lagvis og fordele forsiktig med en spatel. Det kan også være vanskelig å preparere prøver med høy densitet ($> 1,90 \text{ g/cm}^3$). Her kan man vurdere å dele opp massen i flere lag slik at det blir enklere å komprimere lagene.

3.4.6 Herding

Prøvene oppbevares ved 20 ± 2 °C i 100 % luftfuktighet (se avsnitt over) fram til utskyvning og testing. Temperaturen holdes konstant under hele herdeperioden. Man må påse at kluten rundt prøven ikke tørker ut i herdeperioden.

Utskyvning og enaksial testing utføres etter endt herdetid.

3.4.7 Enaksialforsøk

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

Prøven veies før kjøring av enaksialforsøk for kontroll av densitet etter endt herdeperiode. Høyden kontrollmåles med skyvelær før forsøket for rapportering av H/D-forholdet og tøyingsberegning.

Enaksialforsøk gjennomføres umiddelbart etter utskyvning. Prøven fotograferes før enaksialforsøket for å dokumentere eventuelle inhomogeniteter. Forsøket kjøres med hastighet 1,5 %/min (1,5 mm/min for 10 cm høy prøve). Prøven fotograferes på nytt etter forsøket for å dokumentere bruddmekanisme.

Prøven tørkes for bestemmelse av vanninnhold.

3.4.8 Rapportering

Forsøksrapporten skal inneholde:

- prøvingslaboratorium (navn og adresse)
- ansvarlig for prøvingen
- prøvingsmetode (denne beskrivelsens nr. og tittel)
- identifikasjon av prøven (oppdragsnummer, sted, borhull, sylindernr., dybde)
- dato for prøvetaking, prøveåpning, innblanding og testing
- bindemiddeltype og -mengde
- beskrivelse av ferdig herdet prøve etter utskyvning (visuelle observasjoner – bilde)

Laboratorieprosedyre innblandingsforsøk

- vanninnhold:
 - ved prøveåpning
 - etter homogenisering
 - etter innblanding av bindemiddel
 - etter enaksialforsøk
- i leirer/silt som ikke er kvikke, anbefales det å bestemme saltinnhold av utpresset porevann etter homogenisering
- korngradering etter homogenisering
- forsøktidspunkt for enaksialforsøk
- total densitet og poretall ved:
 - prøveåpning
 - forsøktidspunkt for enaksialforsøk
- høyde på prøve før kjøring av enaksialforsøk
- resultater fra enaksialforsøk
- bilde av enaksialprøven etter brudd
- dato og signatur

4 Forhold som bør vurderes

4.1 Herdetemperatur for ulike installasjonsmønster

Det er ulik temperaturutvikling for ulike installasjonsmønster. Den høyeste temperaturen inntreffer etter noen dager og avtar deretter. Lavest temperaturutvikling og raskest temperaturutjevning med omgivelsene observeres i enkeltpeler, og høyest temperaturutvikling i kalk-/sementpeler installert i blokk. Det bør vurderes om herdetemperatur på laboratorium skal tilpasses temperaturvariasjoner i herdeforløpet for ulike installasjonsmønster.

4.2 Valg av densitet i innblandingsforsøk

Det bør samles inn data fra bindemiddelstabiliserte peler i felt for å få et bedre grunnlag til å bestemme hvilken densitet prøvene på laboratoriet skal stemples inn med. Det bør utvikles kurver som viser utvikling av styrke og stivhet for prøver der densiteten er lik in-situ densitet i løsmassene og f.eks. 5-10 % lavere enn in-situ densitet.

4.3 Innblandingsarbeid

Leirer med lav plastisitet og omrørt skjærfasthet trenger lite innblandingsarbeid for å oppnå homogen masse. Nødvendig innblandingsarbeid øker med økende plastisitet. Det bør vurderes om innblandingsrutinen skal standardiseres basert på plastisitet og sensitivitet for å unngå at innblandingsarbeidet blir operatørvhengig.

Prøver der det oppnås bedre innblanding i laboratoriet enn i felt kan føre til overestimering av styrke. For å unngå dette må det stilles krav til innblandingsarbeidet i felt.

4.4 Herding med omslutningstrykk

Det bør vurderes å utvikle spesialceller som benyttes for herding av prøver med omslutningstrykk tilsvarende in-situ spenningsforhold.

5 Referanser

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

ISO (2017) Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 7: Unconfined compression test. ISO 17892-7:2017.

Multiconsult. (2014). E6 Klett.Datarapport 415531-RIG-RAP-003.

Multiconsult (2015) Prosedyrer for geotekniske laboratorier. Prosedyre nr. GL05.02 Prosedyre for kalk-sement forsøk. Dokumentnr. 900834.A100.GL05.02, datert 04.04.2015

Multiconsult. (2017). E6 Trondheim-Melhus.Datarapport 415778-RIG-RAP-005

NGI (2000) Jordforsterkning med kalksementpeler – Prosedyre for laboratorieforsøk. Rapport nr. 527551-2, datert 31. mai 2000

Norsk Geoteknisk Forening (2012) Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler

Norsk Geoteknisk Forening (2020) NGFs beskrivelsestekster for grunnundersøkelser

Statens vegvesen (2016) Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser

Svensk Djupstabilisering (2006) Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserte pelare och masstabilisering. Rapport nr. 17

Vedlegg F

KlimaGrunns laboratorieprosedyre for utførelse av benderelementforsøk

NOTAT

Oppdrag	KlimaGrunn	Dokumentkode	10222597-RIG-NOT-010
Emne	Prosedyre for utførelse og tolking av benderelementforsøk	Tilgjengelighet	Åpen
Oppdragsgiver	Statens vegvesen, Statsbygg og Bane NOR	Oppdragsleder	Tonje Eide Helle
Kontaktperson	Eivind Juvik	Utarbeidet av	Tonje Eide Helle, Simon O'Rawe og Marianne Dahl (Statens vegvesen)
Kopi		Ansvarlig enhet	Multiconsult Norge AS

SAMMENDRAG

Notatet beskriver KlimaGrunns anbefalinger til utførelse og tolking av benderelementforsøk. Prosedyren er utarbeidet i samarbeid med Statens vegvesen Sentrallaboratoriet.

1 Prosedyre for utførelse og tolking av benderelementforsøk

Korrelasjonsmodeller mellom skjærfasthet og skjærbølgehastighet kan utvikles basert på benderelementforsøk utført på laboratoriet. Det må sikres at data som inngår i korrelasjonsmodellene er produsert iht. samme prosedyre. Det foreligger ingen prosedyre for utførelse og tolking av benderelementforsøk i Norge. KlimaGrunn har derfor utarbeidet en prosedyre med anbefalinger til hvordan forsøkene bør utføres og resultatene tolkes basert på erfaringer fra KlimaGrunns laboratorieprogrammer.

Prosedyrer er utarbeidet i samarbeid med Marianne Dahl ved Statens vegvesens Sentrallaboratorium.

2 Utførelse

2.1 Utstyr

Både Multiconsult og Statens vegvesen benytter benderelement med tilhørende programvare fra GDS Instruments (<https://www.gdsinstruments.com/gds-products/gds-bender-element-system>).

Benderelementene monteres i GDS sine treksialceller, og kan benyttes til å sende både P- og S-bølger gjennom prøven.

2.2 Montering av benderelement på prøve

Bølgen sendes ut fra benderelementet i toppen av prøven, og mottatt signal registreres i benderelementet i bunnen av prøven. Polariteten i de to benderelementene skal være lik ved

00	31.08.2022		Tonje Eide Helle Somon O'Rawe Marianne Dahl (SVV)	Steffen Giese Thorbjørn Rekdal (Argeo)	Tonje Eide Helle
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV

montering, og dette må undersøkes før elementene påmonteres prøven. Dette undersøkes ved å plassere benderelementene direkte mot hverandre. Ved riktig polaritet så skal utsendt og mottatt signal sammenfalle. Benderelementene orienteres på prøven slik at utsendt og mottatt bølge har samme polaritet.

Dersom endeflatene ikke er plane, så trimmes disse før påmontering av benderelementene. Prøvehøyden må måles med skyvelær før montering av benderelementene.

Mottatt signal er sensitivt for støy. For å unngå at elektronikkstøy påvirker signalet, så må man sørge for at ingen ledninger i oppsettet krysser hverandre (til og fra apparatet til PC).

For å sende et best mulig signal gjennom prøven, så må det være god kontakt mellom benderelement og prøve. Det må påses at hele benderelementet stikker inn i prøven. På faste eller umettede prøver (fast leire eller bindemiddelstabiliserte løsmasser) så kan det være behov for å smøre silikon eller omrørt plastisk leire på elementene slik at alle hulrom mellom elementet og prøven tettes. Tettemassen må ha en viss stivhet for å unngå at signalet dempes før det går inn i prøven. I KlimaGrunns forsøk ble det benyttet silikon av type «Dow Corning DC4 Electrical compound». Ved svært faste prøver kan det være behov for å skave ut et volum tilsvarende størrelsen på elementene for å unngå at monteringen skader prøven og elementene. Hulrommet fylles med silikon eller omrørt plastisk leire før benderelementene påmonteres.

2.3 Utsending av signal

Definisjoner:

- Bølgelengde: avstanden mellom to påfølgende bølgetopper ($\lambda = V_s/f$ i m)
- Bølgeperiode: tiden det tar for en bølgetopp å forflytte seg en bølgelengde ($T = 1/f$ i s)
- Frekvens: antall bølgetopper som passerer et visst punkt per sekund ($f = 1/T$ i Hz)
- Bølgehastighet: her definert som skjærbølgehastigheten (V_s i m/s), ev. P-bølgehastigheten (V_p i m/s)
- Amplitude: maksimalt utslag av bølgen (A i mV)

Avstanden mellom benderelementene påmontert prøven (avstand fra tupp-til-tupp benderelement) legges i enkelte programvarer inn i brukergrensesnittet før forsøket utføres. Dette påvirker ikke selve forsøket, men benyttes for tolking av resultatet. Signalet sendes ut ved at en elektrisk puls slår ut benderelementet i toppen av prøven sideveis inni prøven. Signalet (skjærbølgen) sendes ut som en sinusbølge. Amplitude og bølgeperiode (ev. frekvens) kan bestemmes av operatør.

Selv om signalet sendes ut som en S-bølge, så genereres både P- og S-bølger. P-bølgene ankommer raskere enn S-bølgen, og har lavere amplituder enn S-bølgen.

Det velges en høy amplitude for å sikre tydelig detektering av første ankomne S-bølge til tross for demping av bølgen gjennom prøven. I KlimaGrunns arbeid er det benyttet en amplitude på 14 mV. Ved å sende ut bølger med lengre perioder (lavere frekvenser) vil det bli mindre støy i signalet siden det blir mindre påvirket av heterogeniteter i prøven, men bestemmelsen av ankomsttiden for første ankomne S-bølge blir også mindre nøyaktig. Kortere perioder (høyere frekvenser) vil medføre at signalet blir mer påvirket av heterogeniteter i prøven, og det kan bli mer støy i signalet. Likevel blir ankomsttiden for første ankomne bølge mer nøyaktig.

Den minste bølgeperioden GDS sine benderelement kan sende ut er på 0,2 ms, noe som tilsvarer en frekvens på 5 kHz (Tabell 2-1). Grunnet støy og demping av signalet så kan det være vanskelig å detektere første ankomne S-bølge. Det anbefales derfor å sende ut bølger med ulike perioder på samme prøve. Aller helst bør det også sendes ut bølger med høyere frekvenser enn det GDS sine benderelement tillater. Gao et al. (2022) fant at bølgetoppen for første ankomne S-bølge ble mer

dempet dess lavere frekvens signalet hadde og dess større prøvehøyden var. Denne dempingen av signalet førte til overestimering av ankomsttiden da andre bølgetopp ble tolket som første bølgetopp, og følgelig underestimering av skjærbølgehastigheten.

Tabell 2-1 Bølgeperioder benyttet i KlimaGrunns laboratorieprogram på bindemiddelstabiliserte prøver

Bølgeperiode (ms)	Frekvens (kHz)
0,20	5,00
0,40	2,50
0,50	2,00
0,75	1,33
1,00	1,00

2.4 Benderelementforsøk i forbindelse med skjærforsøk

Benderelementforsøk kan utføres både på prøver der det skal utføres enaksial- og treaksialforsøk. For treaksialforsøk anbefales det å utføre benderelementforsøk ved innbygging av prøven (før cellen fylles med vann, tilsvarende som for enaksprøver) og etter endt konsolidering (like før skjærforsøk).

3 Tolking

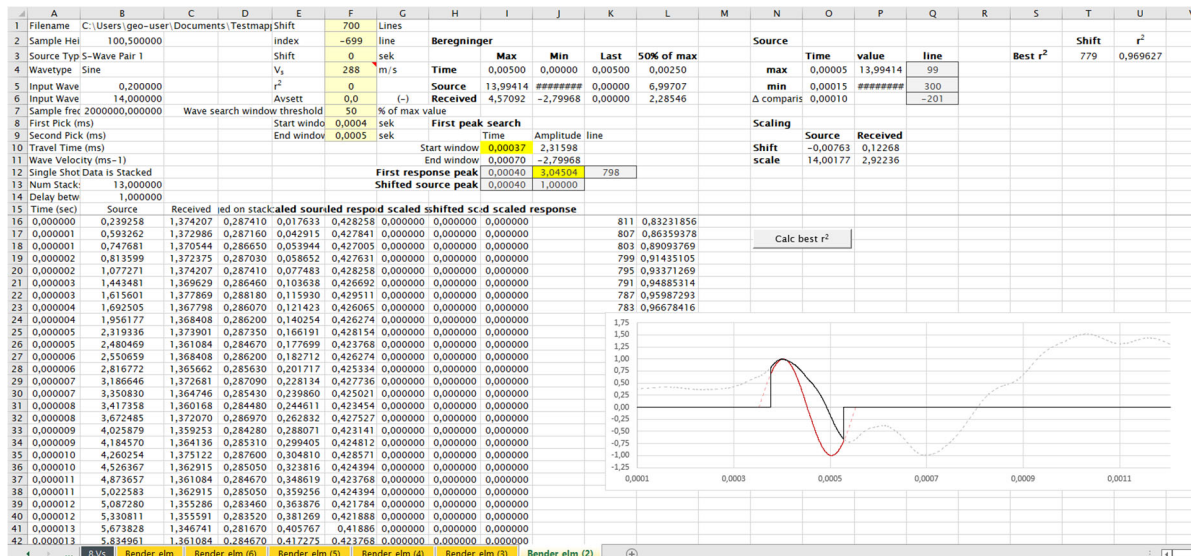
3.1 Bruk av Statens vegvesens mal for tolking av benderelementforsøk

Behandling av rådata fra benderelementforsøk utføres i Statens vegvesens Excel-mal for opptegning av treaksialforsøk (Figur 3-1). I tolkingen bør alle bølger utsendt på samme prøve sammenstilles i samme plot slik at det blir enklere å identifisere første ankomne bølge. Det kan lastes inn maksimalt fem forsøk per mal (Figur 3-2).

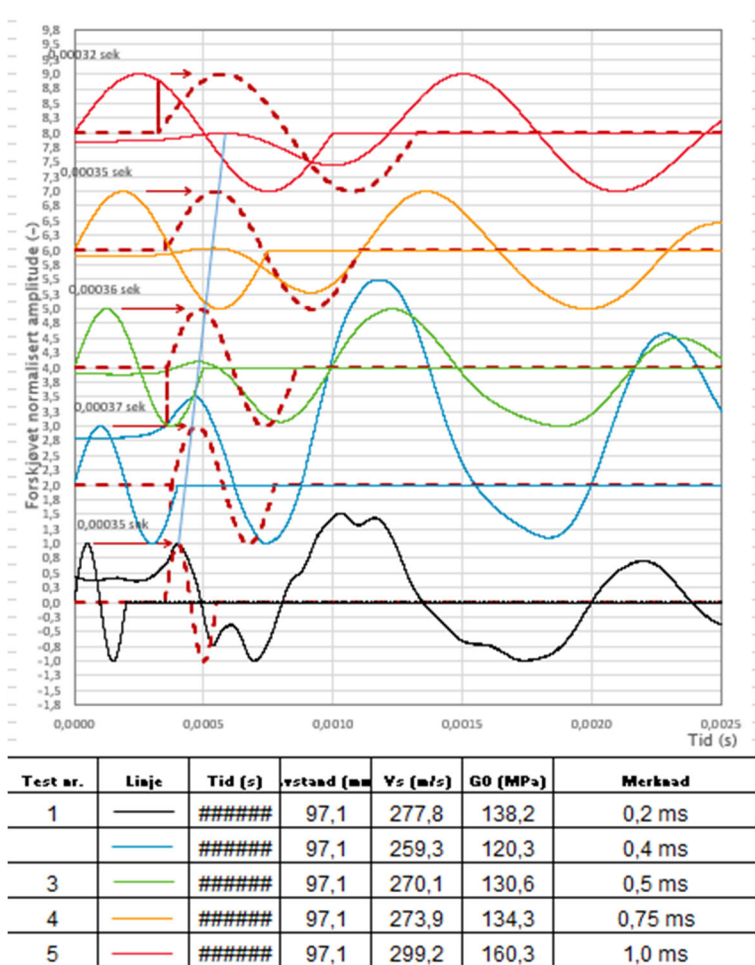
Ved innlesing av rådata-filer genereres det en ny fane med navn *Bender_elm* («nr.») hvor man utfører tolkingen av forsøket (Figur 3-1). Løpende nummereringen av arkfanene genereres automatisk av Excel. Malen genererer en automatisk tolking av forsøket ved innlesing av rådata. I den automatiske tolkingen normaliseres utsendt signal på mottatt signal slik at det er enklere å sammenligne bølgetoppene til tross for at mottatt signal har lavere amplitude enn utsendt signal. Dette gjøres ved at programmet søker etter første amplitude som har høyde større enn 50 % av amplituden til utsendt skjærbølge. Som oftest tolkes skjærbølgehastigheten ved å finne tidsforskyvningen mellom topp utsendt bølge til topp ankommet bølge. Demping av signalet gjennom prøven kan medføre at ankommet bølge har en annen form enn utsendt bølge. Det kan derfor være nyttig å evaluere flere punkt langs bølgene, f.eks. start til start. I Statens vegvesens regneark tas flere punkt langs bølgen innenfor et definert vindu med i tolkingen av ankomsttiden av første bølge (Valsson et al. 2021).

Den automatiske tolkingen bør evalueres av brukeren, og kan overstyres ved å velge et alternativt tidspunkt fra det registrerte signalet. I regnearket gjøres dette ved å flytte vinduet for tolkingen med et visst antall linjer som legges inn som "Shift" i celle F1. Det kan velges et antall linjer slik at bølgetopp i utsendt signal sammenfaller med tolket første bølgetopp i mottatt signal. Spesielt for bindemiddelstabiliserte prøver så kan det være vanskelig å bestemme hvilken bølgetopp som skal betraktes som den første ankomne bølgen. Gao et al. (2022) sendte ut signaler med bølgeperioder helt ned til 0,03 ms (frekvens på 30 kHz), og dokumenterte at ved å sende ut signalet med lange perioder så vil den første bølgetoppen kamufleres. Ved bølgeperioder på 0,2 ms, så vil man i enkelte tilfeller kunne detektere en liten topp, eller et platå før en tydeligere topp (Figur 3-3). I slike

tilfeller bør første ankomne bølgetopp tolkes på dette platået siden bølgeperioden på 0,20 ms kan være for stor til å klare å detektere den første ankomne bølgen. Amplituden på mottatt signal vil dermed kunne være lavere enn 50 % av amplituden til utsendt skjærbølge.

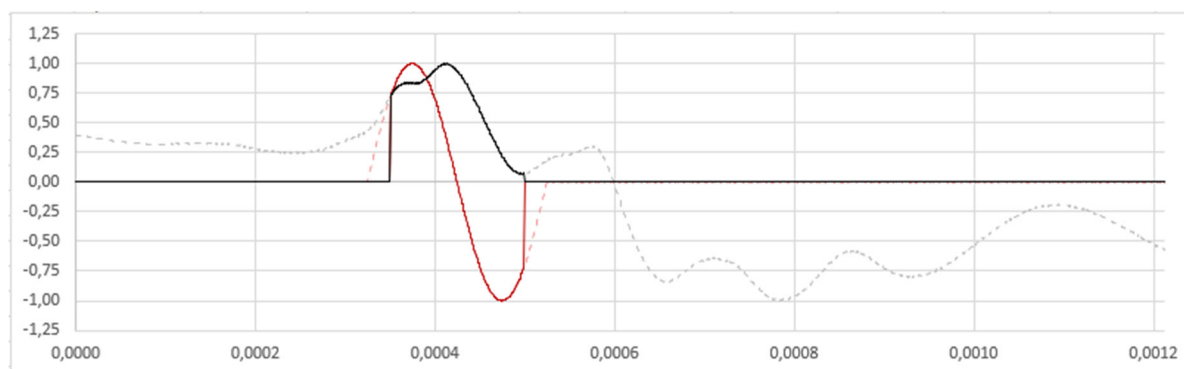


Figur 3-1 Eksempel tolket benderelementforsøk. Forsøkene lastes inn i egne arkfaner for tolking (Bender_elm («forsøksnr.»)). Den automatiske tolkingen gjøres for flere punkter på bølgen over et tolkingsvindu (rød kurve). Brukeren kan velge å tolke topp-til-topp ved å endre «Shift» i celle nr. F1.



Figur 3-2 Eksempel der benderelementforsøk med ulike perioder på samme prøve er plottet sammen. Bølgen med minste bølgeperiode (0,2 ms) benyttes for å bestemme skjærbølgehastighet og skjærmodul til korrelasjonsmodellene. Plukkingen

av første ankomne bølge blir mindre nøyaktig for bølger med større bølgeperioder. Den blå linjen mellom bølgetoppen viser hvordan bølgetoppen forskyves over x-aksen ved økende bølgeperiode.



Figur 3-3 Første ankomne bølgetopp tolkes fra platået før den største bølgetoppen da bølgeperioden på 0,20 ms kan være for lang slik at første ankomne bølge kamoufleres.

For at malen skal beregne riktig skjærbølgehastighet og skjærmodul, så må prøvehøyde og summen av høyden på begge benderelementene samt densiteten legges inn. Skjærbølgehastigheten (V_s i m/s) beregnes ved å benytte Ligning 1, hvor L (m) er lengden bølgen forplanter seg over og Δt (s) er differansen i tid mellom utsendt bølge og første ankomne bølge. I arkfanen der forsøket tolkes beregnes Δt ved at man plasserer første bølgetopp for utsendt bølge (rød bølge i Figur 3-3) på samme tidspunkt (x-aksen) som der den tolkede toppen av første ankomne bølge befinner seg (sort bølge). Regnearket regner da automatisk ut Δt ved å trekke $\frac{1}{4}$ bølgeperiode fra det tolkede tidspunktet. V_s benyttes for å finne skjærmodulen ved små tøyninger (G_0 i MPa, Ligning 2¹).

$$V_s = L/\Delta t \quad \text{Ligning 1}$$

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad \text{Ligning 2}$$

Lengden L har stor innvirkning på beregnet V_s . Som oftest er L definert som avstanden fra tupp til tupp (L_{tt}) av elementene der bølgen blir sendt ut og mottatt. Benderelementet vil imidlertid oppføre seg som en innspent bjelke, og bølgen blir dermed ikke nødvendigvis generert i tuppen av elementet. Usikkerheten kan justeres ved å trekke fra systemets kalibreringstid når $L_{tt} = 0$ (t_c i Ligning 3).

$$V_s = L_{tt}/(\Delta t - t_c) \quad \text{Ligning 3}$$

Valsson et al. (2021) utførte forsøk der de evaluerte hvilken lengde som bør benyttes i tolkingen av V_s . Ved å benytte 60 % av elementhøyden ($L_{60\%}$), viste beregnet V_s bedre samsvar med resultatene der ankomsttiden var korrigert med t_c enn ved å benytte L_{tt} .

Tabell 3-1 Total høyde på benderelementene (summen av begge) som benyttes ved Multiconsults laboratorium på Skøyen og Statens vegvesens Sentrallaboratorium

	Total høyde benderelement* (mm)	60 % av total høyde (mm)
Multiconsult	4,87**	2,92
Statens vegvesen	5,67	3,36

* summen av begge elementene som stikker inn i prøven.

¹ G_0 betegnes også som G_{max} i litteraturen

** 2,77 mm elementet i toppen, og 2,10 mm for elementet i bunnen av prøven

Selve tegningsplottet genereres i arkfanen «8.Vs». Før endelig tegning skrives ut, må man fylle inn relevant forsøksinformasjon i tabellen øverst på siden. Sjekk at elementhøyden oppgitt i celle AF5 er riktig. Hold pekeren over «Elementhøyde» for informasjon om hvordan denne beregnes. Dersom benderelementforsøkene er utført i forbindelse med et treaksialforsøk, må man velge tidspunkt for dette ved hjelp av nedtrekksmenyen i kolonne AB, «Når utført». Det er mulig å velge «Ved innbygging», «Etter konsolidering», «Etter metning» og «Etter B-sjekk». Ved utførelse etter konsolidering, vil programmet automatisk beregne gangavstand med korrigert prøvehøyde basert på deformasjonen som oppstår under konsolideringen. Dersom benderelementforsøket er utført uten konsolidering av prøvestykket (f.eks. ved enaksialforsøk), velger man «Ved innbygging».

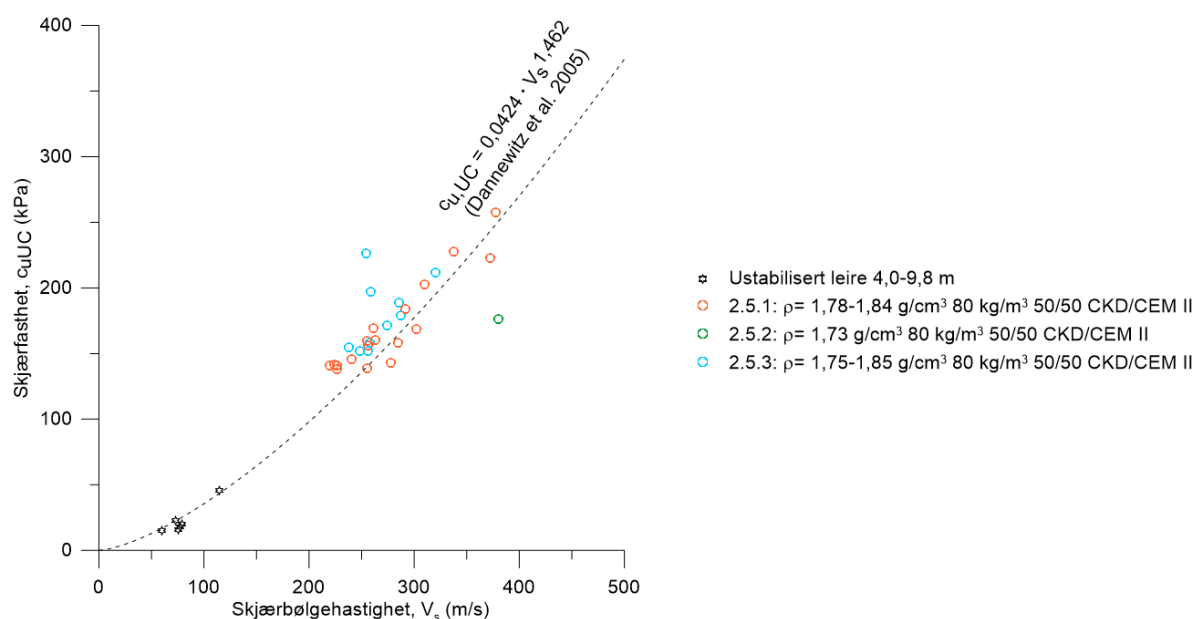
3.2 Korrelasjonsmodell skjærfasthet vs skjærbølgehastighet

I KlimaGrunns arbeid ble det sendt ut bølger med periode 0,20, 0,40, 0,50, 0,75 og 1,00 ms. Det ble størst spredning i resultatene ved å tolke V_s basert på bølger sendt ut med bølgeperiode 1,00 ms. Spredningen minket med minkende bølgeperiode. Plukkingen av første ankomne bølge er mer nøyaktig ved små bølgeperioder (høye frekvenser). Det ble derfor besluttet at V_s i korrelasjonsmodellen tolkes fra utsendt bølgetopp til mottatt bølgetopp fra signalet med bølgeperiode 0,20 ms. Resultatene gav godt samsvar med korrelasjonsmodellen til Dannewitz et al. (2005) (Ligning 4 og Figur 3-4).

Selv om 0,2 ms benyttes i endelig modell, så understøtter de andre målingene (når disse sammenstilles i samme plot som i Figur 3-2) endelig tolking av første ankomne bølge fra signalet sendt ut med bølgeperiode på 0,2 ms. For andre løsmassetyper eller prøvedimensjoner så vil det kunne være andre perioder enn 0,2 ms som resulterer i mest konsekvent tolking. For bindemiddelstabiliserte prøver er det viktig å benytte ulike perioder på utsendt signal da det på forhånd ikke er gitt hvilken periodelengde som gir best resultat etter hvert som prøven herdes.

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

Ligning 4



Figur 3-4 Resultater fra benderelementforsøk og skjærfasthet fra enaksialforsøk i KlimaGrunns laboratorieprogram 2.5.1-2.5.3. Dannewitz et al. (2005) sin korrelasjon er vist med stiplet linje.

4 Referanser

Dannewitz, N., Eriksson, H., Mattsson, H., Larsson, R., Holm, G., 2005. Seismisk kontrollmetod för KC-pelare (Arbetsrapport No. 35), Svensk Djupstabilisering. Statens Geotekniska Institut, Linköping.

Gao Y, Zheng X, Wang H og Luo W (2022). Effect of wave attenuation on shear wave velocity determination using bender element tests. *Sensors* 22, 1263. <https://doi.org/10.3390/s22031263>

Valsson SM, Dahl M, Haugen E og Degago SA (2021) Estimating shear wave velocity with the SCPTu and bender element. In Proceedings of the 18th Nordic Geotechnical Meeting, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 710 012017

Vedlegg G

Seismikk

G.1 Generelt

Vedlegget beskriver ulike seismiske målemetoder og analyser utført i prosjektet. Det omfatter både metoder som har vist seg å være nyttige, samt metoder som ble forkastet eller ikke fulgt opp videre. Følgende seismiske metoder ble testet ut i KlimaGrunns feltforsøk:

- Krysshullsseismikk og krysshullstomografi med kilde og mottaker plassert i foringsrør installert utenfor og i bindemiddelstabiliserte peler
- Vertikal refleksjonsseismikk fra topp av bindemiddelstabilisert pel utført med kilde og mottaker fra overflaten
- MASW hvor det ble benyttet overflatebølger med trafikkstøy som kilde og mottakere på overflaten
- Resonansfrekvenser fra data samlet inn med krysshullsseismikk

I kapitlene under beskrives de seismiske metodene, fordeler og ulempene, hvordan metodene ev. ble testet og hvilke erfaringer som ble gjort.

G.2 Seismiske bølger

Seismiske metoder analyserer bølgeforplantningen i mediet man ønsker å undersøke. For praktisk gjennomføring i felt finnes ulike måleoppsett og analysemetoder for måling av ulike fysiske egenskaper, og typisk ønsker man å måle P-bølge (V_p) og/eller S-bølge hastigheten (V_s) i mediet. Når det gjelder å bruke de seismiske hastighetene til å estimere skjærstyrke, er måling av skjærbølgehastigheten (S-bølge) å foretrekke. Skjærmodulen (G_0) kan beregnes fra S-bølgehastighet og densiteten i materialet. S-bølgehastigheten er ikke sensitiv til vannmetning slik som P-bølgehastigheten. Ergo, det er færre jordparametere som påvirker S-bølgehastigheten, og S-bølgen forventes å gi en direkte og pålitelig korrelasjon til skjærstyrken. Skjærbølgehastigheten settes inn i en empirisk formel utviklet av Dannewitz et al. (2005) som gir skjærstyrken i mediet. I dette kapitlet gir vi en kort introduksjon til bølgeformene vi har benyttet i prosjektet.

De seismiske metodene baserer seg på målinger av elastiske bølger i medier. Bølgehastighetene er en funksjon av skjærmodul og kompressibilitet av materialet. For å estimere styrken i bindemiddelstabiliserte peler er det tre typer seismiske bølgetyper som er relevante.

P-bølge (primærbølge)

Mediets partikkelbevegelse er sammenfallende med bølgeforplantningens retning. I et isotropt medium propagerer P-bølger med hastighet V_p i Ligning G – 1.

$$V_p = \sqrt{\frac{k + 3/4G_0}{\rho}}$$

Ligning G - 1

hvor k er kompressibilitetsmodul i Pascal, G_0 er skjærmodul i Pascal og ρ densiteten i mediet i kg/m^3 .

S-bølger (skjærbølger)

I et isotropt medium har S-bølger partikkelbevegelse normalt på bølgens forplantningsretning. S-bølger forplanter seg med hastighet V_s i Ligning G – 2.

$$V_s = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}}$$

Ligning G - 2

S-bølgene er polarisert med en SH-bølge og en SV-bølge. For SV-bølgen vil partikkelenergien bevege seg normalt på bølgens forplantingsretning og i en horisontaldelt lagmodell i vertikalplanet. Ved laggrenser vil P- og SV-bølgeenergi konverteres mellom dem som en funksjon av bølgens vinkel inn mot en laggrense. I en såkalt SH-bølge så er partikkelbevegelsen i horisontalplanet, normalt på både forplantningsretningen, og vertikalretningen. Energien vil dermed ikke konvertere til P-bølge energi ved laggrenser. Denne forenklingen med at SH-bølger ikke konverterer til P-bølge energi er ikke gyldig i en generell 3D modell, men i praksis ser antagelsen likevel ut til å kunne benyttes for å måle SH-bølgenes første ankomster. Červený og Hron (1980), blant andre, gir en teoretisk gjennomgang for P- og S-bølger i inhomogent medium.

I teorien kan en ha 21 ulike parametere i den generaliserte versjonen av Hooke's lov som gir den lineære relasjonen mellom tøyings- og spenningsmatrisene (Aki og Richard 1980). Antallet parametere kan videre reduseres til ortorombisk symmetri med ni parametere. Ved å anta symmetriske egenskaper rundt en akse kan antall parametere reduseres til fem pluss retningen på aksene. Dette mediet kalles Transvers Isotrop. Hvis en antar at mediet er vertikalt lagdelt, sier en at mediet er Vertikalt Transvers Isotrop (VTI). SH-bølge hastigheten i VTI medium er avhengig av to elastiske parametere. Hvis bølgen forplanter seg enten vertikalt eller horisontalt, vil bølgehastigheten kun være avhengig av hhv. den vertikale eller horisontale skjærmodulen på samme måte som for bølgeforplantning i isotropt medium. Berryman (1979) og Thomsen (1986) gir mer innsikt i modellering av P- og S-bølger i VTI media.

Overflatebølger (surface waves)

Rayleigh- og Lovebølger er overflatebølger som forplanter seg langs et lag, typisk i løsmassene mellom terrengoverflaten og berg. Overflatebølgene forplanter seg med lavere hastighet enn P- og S-bølgene. I et heterogent media er overflatebølgene dispersive. Det vil si at hastigheten varierer med bølgefrequensen.

G.3 Krysshullsseismikk og krysshullstomografi

For seismikk utført med kilde og mottakere nær eller på terrengoverflaten er høy oppløsning og dybdepenetrasjon faktorer som går på bekostning av hverandre. For å oppnå så detaljert informasjon som mulig om bølgehastigheter i dybden så er man derfor avhengig av å plassere seismisk utstyr på de dypene en ønsker å bestemme hastigheter. Krysshullstomografi og krysshullsseismikk anser vi som de sikreste metodene for å oppnå ønsket oppløsning langs hele den bindemiddelstabiliserte pelens dybde. Ved å benytte disse metodene vil en kunne detektere svake sjikt på alle dybder en måler på. For å kunne utføre målingene plasseres utstyret i foringsrør som installeres ned til en dybde tilsvarende pelens lengde. Foringsrørene plasseres nær (cm avstand) eller i selve pelene (f.eks. i en ribbe). Målingene utføres langs hele pelens dybde. Resultatet er en hastighetsprofil mellom foringsrørene som beskriver hastigheten i mediet. Dvs. at dersom foringsrørene plasseres på utsiden av en pel slik at det er leire mellom foringsrør og pel, så vil hastigheten påvirkes av både leira og pelen.

Ved å plassere geofoner (mottakere) og seismikkilde i foringsrør på hver sin side av en enkeltpel eller i selve pelene i en peleribbe, så kan en måle gangtiden mellom kilde og mottaker for det seismiske

bølgefeltet. Ved å benytte en skjærbølgekilde som en flytter til ulike dybder i borhullet, gir metoden et høyoppløselig bilde av skjærbølgehastigheten over hele pelens dybde

Bølgene som dannes fra kilden sprer seg i mediet og registreres av mottakeren. I krysshullsseismikk plasseres kilde og mottaker på samme dybde og en beregner bølgenes gjennomsnittshastighet mellom kilde og mottaker som avstanden mellom dem delt på tiden mellom skuddtidspunkt til ankomsttid ved mottaker (gangtid). Første ankomst som observeres er P-bølgen. S-bølgen ankommer noe senere. Skjærbølgehastigheten beregnes ved å benytte S-bølgenes ankomsttid. Målingene gjentas med et gitt dybdeintervall mellom målingene i hele eller deler av pelens dybde.

I krysshullstomografi måler en bølgefeltet for hvert kildedyp med mottaker plassert i flere dybdepunkter i et dybdeintervall som strekker seg noe over og noe under kildedypen. Dette gir en større datatetthet, med strålebaner i flere retninger som i en inversjon vil resultere i en mer detaljert beskrivelse av hastighetsmodellen i mediet. Hastighetsmodellen mellom kilden og mottakeren deles opp i celler med vertikal og horisontal utstrekning hvor en beregner hastigheten i hver enkelt celle ved å benytte bølgenes gangtider og estimerte gangavstander i cellene for hver måling i en inversjonsprosess. Denne inversjonen kalles for tomografi.

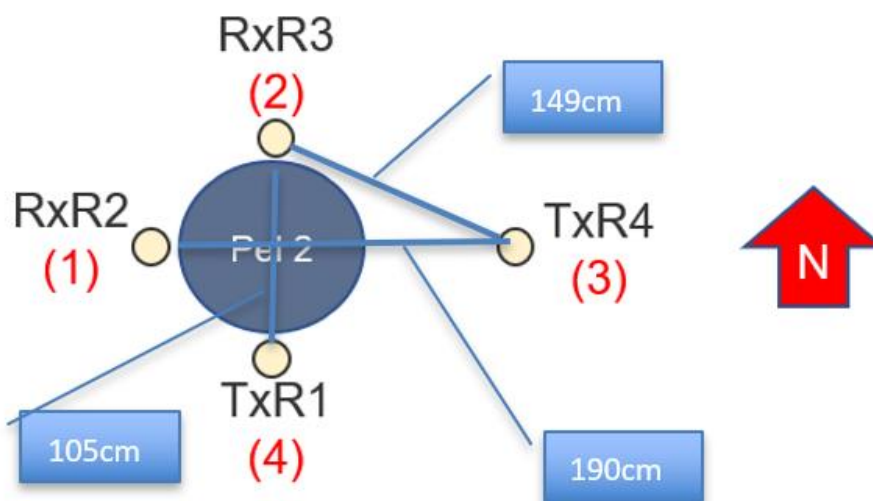
I prosjektet benyttet vi en seismikkilde, som genererer både S- og P-bølger gjennom pelen/mediet, og et 3-komponent akselerometer som måler bølgenes bevegelse i tre ortogonale retninger. Foringsrør ble presset ned i borehull for plassering av kilde og mottakere. Kilden og mottakeren ble koblet til rørveggen ved å fylle blærer som var festet til kilden og mottakeren med luft til ca. 1.5 bar trykk.

Ved å registrere det seismiske signalet ved først å sende et støt normalt på retningen mellom kilde og mottaker og deretter gjenta ved å støte i motsatt retning, vil SH-bølgekomponentene i de to signalene ha motsatt polaritet, mens P-bølgen og SV-bølgen teoretisk skal ha samme polaritet. Ved da å subtrahere de to registrerte signalene, skal en kunne fjerne energien i P-bølgen og SV-bølgen samtidig som energien i SH-bølgen dobles. Det skal da være enklere å plukke ankomsttiden for SH-bølgen. I praksis vil en ikke helt fjerne andre bølger da koblingen kan variere i ulike retninger, og polariteten og styrken til andre bølgeformer er noe ulik ved å skyte i de to retningene.

I KlimaGrunns første feltforsøket ble både krysshullstomografi og krysshullsseismikk testet i felt. Resultatene fra krysshullsseismikk og krysshullstomografi ble sammenlignet, og viste samsvarende resultater for tolket skjærbølgehastighet Resultater fra seismisk modellering av data som inverteres indikerer at for en tomografiinversjon får vi tilstrekkelig antall datapunkter når vi flytter mottakeren i 0,1-0,2 m intervaller og lar mottakerposisjonene variere opptil +/- 30 grader fra hvert kildedyp.

Med utstyret som er kommersielt tilgjengelig og metoden vi benyttet tok krysshullstomografi minst fem ganger så lang tid å gjennomføre som krysshullsseismikk. Vi anbefaler derfor å benytte denne metoden kun på utvalgte dyp der en trenger høyere oppløsning i resultatet.

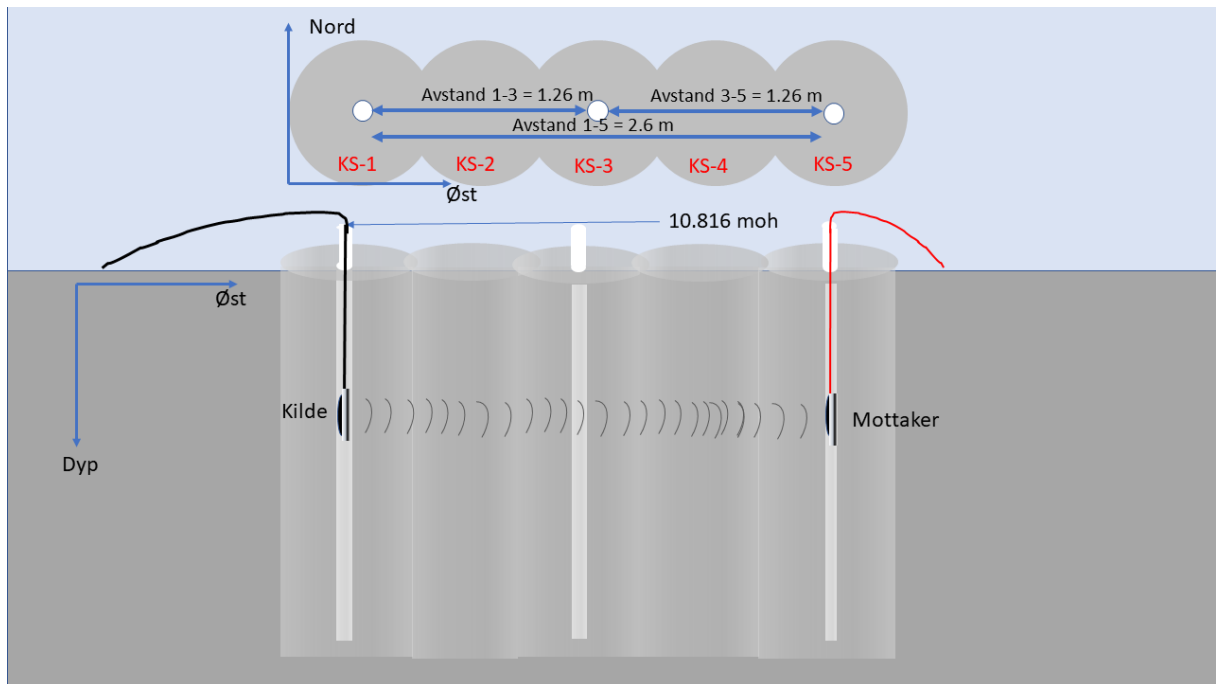
I det første feltforsøket ble det installert fire foringsrør med en rørdybde på ca. 9 m som vist i Figur G-1. Dette oppsettet medførte at bølgen forplantet seg gjennom både pel og omkringliggende leire. Tolket hastighet gjennom pelen er svært sensitiv til korrekt estimat av hastighet i leira. I senere faser ble derfor foringsrørene for kilde og mottakere plassert inne i en ribbe av bindemiddelstabiliserte peler.



Figur G- 1: Felt konfigurasjon i fase 2.2 for krysshullseismikk og krysshull tomografi sett ovenfra. Foringsrør for kilde og mottaker plassering i dyp er markert med gule sirkler og er plassert utenfor KS-pelen. KS-pelen (mørkeblå sirkel) har en diameter på 80 cm. De blå linjene angir avstand mellom rørene på overflaten. Avstand mellom rørpar (1) og (3) var 190 cm, avstand mellom rørpar (2) og (4) var 105cm og avstand mellom rørpar (2) og (3) var 149cm. Avstandene oppgitt er på overflaten og avstandene varierte med dyp.

Det kan oppstå horisontalavvik under installasjon av bindemiddelstabiliserte peler. Risikoen for store horisontalavvik øker med økende pelelengde. Derfor testet vi ut krysshullsseismikk hvor et av foringsrørene ble plassert ca. 1 m utenfor den bindemiddelstabiliserte pelen. Hvis pelen da dreiet i opptil 1 m i retning mot foringsrør (3) med dypet, vil allikevel pelen fortsatt befinne seg i området mellom rør (1) og rør (3). Ulempen med en slik konfigurasjon er at en da også må beregne eller kjenne skjærbølgehastighet utenfor pelen. **Error! Reference source not found.** Målinger mellom rør (2) og rør (4) skulle benyttes som kontroll av beregningene utført på målingene mellom rør (1) og rør (3). Målingene mellom rørpar (2) og (3) ble benyttet for å beregne skjærbølgehastighet i omkringliggende urørt leire samt for test av krysshullstomografi. Inklinasjonsmålinger ble utført i hvert foringsrør for korrigeringer i avstand mellom rørene med dybden i hastighetsberegningene.

Etter analyse av dataene ble det konkludert at vi trenger lengre avstand mellom kilde og mottaker for å redusere effekten i usikkerhet i plukket gangtid. I første feltforsøk var i tillegg hastigheten i leira utenfor pelen ukjent og måtte beregnes. For å øke avstanden mellom kilde og mottakere, samt å unngå å måtte måle gjennom omkringliggende leire, ble oppsettet i KlimaGrunns andre feltforsøk endret til å måle bølger som forplantet seg gjennom en ribbe med fem bindemiddelstabiliserte peler. Foringsrørene ble installert i senter av de to ytterste og den midtre pelen, se Figur G- 2 **Error! Reference source not found.** Avstandene ble da 2,6 m og 1,3 m mellom ulike rørparene. Målingene med 2,6 m mellom kilde og mottakere ga som ventet mindre usikkerhet i beregning av skjærbølgehastigheter, og en behøver ikke å kjenne hastigheten til omkringliggende leire. Krysshullstomografi ble ikke benyttet i det andre feltforsøket, da det heller ble prioritert å utføre krysshullsseismikk ved flere tidspunkt under herdeforløpet.

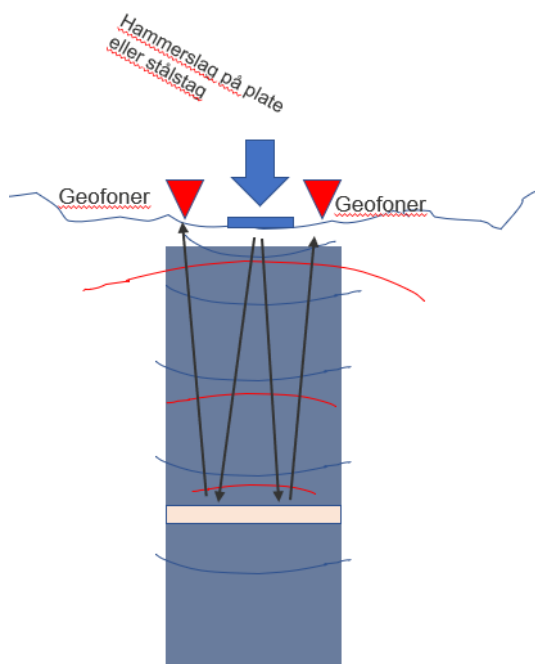


Figur G- 2: Skisse av konfigurasjon for krysshullsseismikk i KlimaGrunns andre feltforsøk. Foringsrør ble plassert - Pel nr. 1, 3, og 5 fra vest. Øvre panel viser pelene og foringsrørene i horisontalplanet. Avstandene er mellom foringsrørene i Pel 1, 3 og 5. Topp rør ble målt til 10,816 meter over havet (moh.). En kilde er plassert i foringsrør 1 (vestligste) og en mottaker i foringsrør 5 (østligste) på samme dybde.

G.4 Refleksjonsseismikk gjennom pelen (PET)

PET er en metode som benyttes på betongpeler, da det er en enkelt og rimelig metode som kan detektere brudd eller svakhetssoner i pel. Ved å benytte en hammer som kilde måles det reflekterte signalet med geofoner på toppen av pelen. Hvis det er brudd eller svakhetssoner i pelen, kan det trigge refleksjoner som kommer inn tidligere enn om pelen er homogen eller har kontinuerlig varierende P-bølgehastighet. Metoden er illustrert i Figur G- 3 under. For ytterligere informasjon om PET metoden, se f.eks. www.piletest.com.

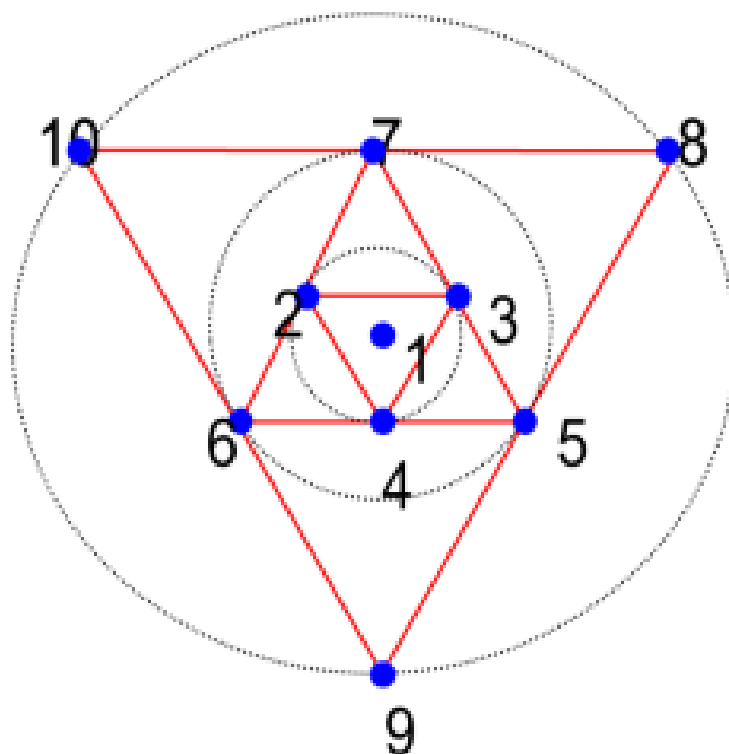
Metoden benytter P-bølgen, og for å bestemme dybden til en refleksjon, må P-bølgehastigheten i materialet være kjent fra andre typer målinger. Metoden er forholdsvis rask å utføre, og ble testet på en enkeltpel i KlimaGrunns første feltforsøk. Det ble forsøkt gravd ned til toppen av den bindemiddelstabiliserte pelen. Det viste seg at det var vanskelig å grave seg ned til fast topp av pelen. Ved hjelp av et armeringsjern ble topp pel bekreftet funnet ca. 1 m under der gravingen sluttet. En slo da på armeringsjernet i stedet for direkte på pelen. Da geofonene ikke kunne plasseres direkte i pelen, men så langt en fikk gravd ned, ble det reflekterte signalet påvirket av leira og massene rundt. Det ble oppnådd signaler med en dominant frekvens på ca. 35 Hz. Frekvensinnholdet var for lavt til at en fikk en tilstrekkelig oppløsning. For å teste metoden ordentlig må en ha mulighet til å grave seg helt ned til toppen av pelen. Da metoden er høyst usikker, og ikke gir detaljert informasjon om skjærbølgehastighet valgte vi ikke å ta kostnadene med å teste ut metoden videre i KlimaGrunns andre feltforsøk.



Figur G- 3: Illustrasjon av refleksjonsmetoden (PET).

G.5 MASW

MASW er en teknikk som benytter overflatebølger som f.eks. Rayleigh bølger. Metoden baserer seg på at i et lagdelt medium forplanter bølgen seg med en frekvensavhengig hastighet (dispersivt). Med gitte antagelser om P-bølgehastighet og densitet i mediet, bestemmer en skjærbølgehastighet som funksjon av dyp i en inversjonsprosess. Metoden kan anvendes både med aktiv seismikkilde som f.eks. droppvekt, eller passiv seismisk kilde hvor en benytter bakgrunnsstøy fra trafikk som kilde. Metoden ble testet ut med geofoner plassert ut i triangelformasjoner. Figur G- 4 viser en slik triangelkonfigurasjon for MASW målinger. Lengden på de lengste yttersidene av triangelkonfigurasjonen må være minst en halv ganger maksimalt dyp en ønsker å bestemme skjærbølgehastigheten til. Når en benytter trafikkstøy som kilde må støykilden være utenfor triangelkonfigurasjonen. Lavfrekvent kilde og geofoner (4.5 Hz eller lavere) har betydning for penetrasjon, og passiv kilde som trafikkstøy vil gi lavere frekvenser og større penetrasjon enn f.eks. aktive kilder som dropp-vekt og slegge. Utførte passiv MASW målinger gav gode V_s profiler ned til berg.



Figur G- 4: Triangel konfigurasjon for MASW målinger. Blå punkter angir geofon lokasjoner.

Vi utførte ikke flere tester med MASW etter det første feltforsøket. Det ville være interessant å teste ut metoden på et pelegridområde, hvor en får mer signifikante endringer i større deler av et område. Vi fikk ikke testet metoden på et pelegrid, men den ble testet i området med en enkeltpel. En enkeltpel har et volum som er for lite til å påvirke MASW signalet, så vi fikk kun en beregning av hastighet i omkringliggende leire. Se f.eks. Park et al. (1999) for mer informasjon om MASW metoden.

G.6 Resonansfrekvens

Ettersom styrken øker i pelen, vil det oppstå en større seismisk hastighetskontrast mellom pelen og den omkringliggende leira. For krysshullseismikk vil kontrasten sette opp bølgerrefleksjoner som går mellom «veggene» i pelen og som vil interferere med hverandre. Dette fenomenet setter opp et bølgetog hvor frekvensinnholdet og gangtiden mellom hver gang en bølge har reflektert tilbake og frem i pelen, gir informasjon om diameter og bølgehastighet i pelen. Denne metoden benyttes i andre sammenhenger, og i seismikken kalles fenomenet for «peg-legs». Da dette er en metode vi ikke tidligere har testet for dette formålet, knytter det seg større risiko til om metoden er vellykket. Men da de samme målingene som i krysshullseismikk kan benyttes, kan et vellykket resultat benyttes til å beregne variasjon i pelediameter.

I KlimaGrunns første feltforsøk så vi etter resonansfrekvenser i dataene, men vi lyktes ikke med å konstatere at denne metoden var anvendbar. Vi analyserte dataene for resonansfrekvenser for å se om vi kunne identifisere frekvenser som kunne gi et estimat av skjærbølgehastighet gitt kjent pelediameter eller omvendt: gi et estimat av pelediameter gitt kjent skjærbølgehastighet. Det ble konkludert med at tilsynelatende resonansfrekvenser og variasjon i total energi kunne skyldes faktorer

som variasjon i kobling mellom omkringliggende leire og at topper i frekvensspekteret kunne skyldes kompliserte bølgesignal. Derfor har vi ikke sett videre på denne metoden.

G.7 Prosessering og tolkning

Registreringene lagres i SEG2 format under innsamling. Etter innsamling konverteres data til SEGY format samtidig som vi legger inn informasjon om kilde- og mottakerposisjoner. Deretter leses dataene inn i en programpakke som kan filtrere dataene og vise resultatene etter filtrering. Ved å plukke gangtider på data med ulike frekvensfiltreringer kan en vurdere hvilke frekvensbånd som fungerer best for plukk av gangtider.

Det finnes flere kommersielle prosesseringspakker som kan benyttes for prosessering av seismiske data og plukking av gangtider. I denne fasen har vi benyttet Geogiga, Radexpro og egenutviklet programvare og åpen kildekode Python biblioteker for krysshullsseismikk, krysshullstomografi og refleksjonsseismikk. Geogiga ble benyttet for MASW inversjon. Radexpro og Geogiga er kommersielt tilgjengelige pakker.

Følgende stapp gjøres i prosesseringen av krysshullsseismikk:

- 1) Integrering av posisjonsdata og header informasjon.
- 2) Testing av frekvensfiltrering for best mulig deteksjon av SH-bølge ankomsttid.
- 3) Kvalitetskontroll av mottakernes retning, og eventuell rotasjon av data i horisontalplanet.
- 4) Interaktiv plukking av gangtider hvor en ser positiv og negativ polaritet på de seismiske registreringene samtidig.
- 5) Beregning av gjennomsnittlig SH-bølge hastighet med å dele avstand mellom kilde og mottaker på plukket ankomsttid.

I krysshullstomografi erstattes punkt 5 over med en tomografiinversjon hvor leira mellom kilde og mottakerrørene deles opp i celler og inversjonen estimerer skjærbølgehastigheter for hver celle.

For MASW prosessering erstattes punktene 4) og 5) med plukking av hastigheter på en dispersjonskurve. Se f.eks. MASW prosesseringsmodul fra Geogiga som er kommersielt tilgjengelig.

G.8 Konklusjon

Krysshullstomografi er vesentlig dyrere enn krysshullsseismikk, da en benytter 10-12 ganger flere målinger per dybdenivå. Derfor er metoden ikke inkludert i arbeidsmetodikken v.1.0. Videreutvikling og effektivisering av metodikken kan gjøre krysshullstomografi mer aktuell i fremtiden.

Basert på dataanalysen for de to feltforsøkene har vi anbefalt at krysshullsseismikk er primærmetoden som anbefales å inkludere i KlimaGrunns arbeidsmetodikk v.1.0. Følgende utføres:

- 1) Seismiske målinger utføres i en ribbe med bindemiddelstabiliserte-peler med 2-3 m avstand mellom kilde og mottakere.
- 2) Foringsrør for kilde og mottaker installeres i senter av en pelene i ribben, slik som vist for rør 1 og rør 5 i denne rapporten.
- 3) Krysshullsseismikk utføres ved 1-3 tidspunkt under herdeforløpet.
- 4) Kilde og mottaker forflyttes 10 cm for hvert målenivå.

- 5) En bytter mottaker og kildeposisjon og måler med større intervall mellom dypene for å estimere usikkerhet i målingene som kan skyldes kobling og lokale forhold be mottakere.
- 6) Det er kun utført målinger i luftfylte rør. Vannfylte rør bør unngås, da dette kan gi opphav til flere uønskede bølgetyper og forventes å gi økt usikkerhet i målinger og tolkning av bølgeformen.

Vedlegg H

Videre arbeid

H.1 Generelt

I dette kapittelet listes det opp flere temaer som det bør jobbes videre med for at bransjen med større sikkerhet skal kunne optimalisere bindemiddelmengden til lokale grunnforhold.

H.2 Installasjon og installasjonsutstyr

H.2.1 Installasjon

Dersom det blir stilt krav til utførelsen, baserer prosjekterende valg av rotasjonshastighet og stighøyde under installasjon som oftest på erfaring. Som oftest bestemmes utførelsen av entreprenøren. Ettersom det har blitt større fokus i bransjen på å få redusert bindemiddelmengden, må foreliggende erfaringsdata og anbefalinger anses å ikke være lenger like gyldige. Erfaringer fra KlimaGrunns feltforsøk og sammenligning med andre nyere feltforsøk indikerer at lav innblandingsmengde krever høyere Blade Rotation Number (BRN) for å oppnå et homogent resultat enn det som erfaringen med større innblandingsmengder tilsier.

Det bør jobbes systematisk med uttesting av ulike kombinasjoner for rotasjonshastighet og stighøyde for å få frem oppdaterte anbefalinger for stabiliseringsarbeidet med lave bindemiddelmengder. Effekten av rotasjonshastighet bør vektlegges i større grad da den neglisjeres i dagens praksis med fokus på BRN som funksjon av kun stighøyde.

Erfaringsdata bør samles, systematiseres og gjøres tilgjengelig for alle aktører i bransjen, slik at det også for mindre prosjekter blir lavere terskel for å ta ut potensialer ift. reduksjon av CO₂-utslipp som ligger i bindemiddelstabilisering, samtidig som man sikrer gode resultater mht. homogenitet og nødvendig styrke og stivhet.

I tillegg til styring av vispen påvirkes innblandingsarbeidet også av installasjonstrykket for utblåsing av bindemiddel. Dette velges basert på pelens lengde og lokale poretrykksforhold. Installasjonstrykket justeres sammen med hastigheten på cellemateren under innkjøring av riggen for så å holdes konstant under innblandingsarbeidet. Spesielt for lange peler opereres da med høyt trykk også på grunn dybde, og luften som blåses inn i jordsmonnet med høy hastighet påvirker innblandingsprosessen. Dette kan være gunstig mht. omrøring av jorda, men også være en ulempe ettersom det kan skape inhomogeniteter og til og med hulrom i pelen.

Det bør samles erfaringsdata og ses nærmere på effekten av installasjonstrykket, for å målrettet kunne utnytte bidraget til innblandingsarbeidet samtidig som man unngår potensielle skadelige effekter av for høyt trykk.

H.2.2 Installasjonsutstyr

I Skandinavia er det vanlig praksis å ikke tilføre bindemiddel når vispen føres ned, men kun når vispen roteres og trekkes opp av borhullet. Som oftest benyttes det derfor lav rotasjonshastighet ved nedføring av vispen for å forstyrre jordsmonnet minst mulig og ikke risikere stabilitetsproblemer i denne fasen. Dette betyr at utforming av vispen får større betydning for selve innblandingsprosessen når vispen kjøres opp igjen. Avhengig av hvor utmatingshullet for bindemiddel er plassert ift. vingene på vispen, vil omrøringsgraden i jordsmonnet variere en del når bindemiddel tilføres. Dette påvirker hvordan og hvor godt bindemiddelet spres og fordeles over hele tverrsnittet av pelen. I samspill med materialeegenskapene til løsmassene og bindemiddelkombinasjonen (type, sammensetning og mengde), vil dette være med på å avgjøre hvor homogent bindemiddelet blir fordelt i pelen før umiddelbare reaksjoner med suspensjonen av jord og vann gjør videre innblanding mere krevende.

Entreprenørene disponerer ulike typer visp med varierende utforming og velger aktuell visp for hvert prosjekt basert på erfaring. Mens effekten av antall vinger på vispen til en viss grad er hensyntatt i BRN og tilhørende erfaringsdata, foreligger det lite systematisert erfaringsdata mht. plassering av utmatingshullet og dermed på effekten av omrøringen på oppnådd resultat for stabiliseringsarbeidet.

H.2.3 Maskindata

I dagens praksis brukes maskindata fra stabiliseringsarbeidet nesten utelukkende for dokumentasjon av bindemiddelmengde, rotasjonshastighet og stighøyde. Andre data utover dette registreres sjeldent og de fleste KS-rigger i markedet har heller ikke mulighet til å registrere andre data. Dialog med ulike entreprenører ifm. KlimaGrunn bekrefter at det ville vært teknisk mulig å registrere flere data som vil være meget relevant for å dokumentere kvalitet på utførelsen og oppnådd resultat. Nødvendige tilpasninger på riggen var imidlertid for kostbare til å teste dette ut gjennom KlimaGrunn. mEksempler på slik data er:

- Posisjon av vispen, dokumentasjon av avvik fra posisjon og vertikalitet for hver pel
 - Spesielt for lengre peler vil slik dokumentasjon være veldig nyttig mtp. overlapp i ribber som oppnås i større dybde. Feltforsøk med manuelle inklinometermålinger igjennom borstangen etter at vispen er ført ned bekrefter potensialet i slik dokumentasjon.
- Hydrauliktrykk på riggen, penetrasjons- og rotasjonsmotstand på vispen under hhv. nedføring og innblanding på veg opp
 - Det er maskinføreren som har styringen av KS-riggen «i fingerspissene». Hydrauliktrykket (i tillegg til maskinlyden) varierer under innblandingsarbeidet avhengig av motstand på vispen. Ved å måle og logge hydrauliktrykket ville det vært mulig å dokumentere lokale variasjoner i grunnforhold som er årsaken til slik variasjon.
 - Hydrauliktrykket vil nok ikke kunne brukes som grunnlag for å kvantifisere jordegenskapene tilsvarende som med trykksonderinger eller vingebor. Men relative endringer i trykket samt sammenligning med referansetrykk i kjente forhold (f.eks. fra innblanding samme sted som utførte geotekniske grunnundersøkelser) vil kunne gi verdifull informasjon på lokale variasjoner i grunnforhold som vil påvirke innblandingsarbeidet og resultat i form av oppnådd styrke, stivhet og ikke minst homogenitet.

H.3 Optimal bindemiddelkombinasjon for lokale grunnforhold

H.3.1 Preparering av prøver på laboratoriet

De lokale grunnforholdene har stor innvirkning på hvilken fasthet som oppnås i bindemiddelstabiliserte peler. Det bør tilstrebes å preparere prøver med egenskaper som i størst mulig grad tilsvarer egenskapene i bindemiddelstabiliserte peler. Enkelte studier har konkludert med at fastheten som oppnås i bindemiddelstabiliserte prøver påvirkes av hvilken densitet de blir stampet inn med. Det foreligger lite tilgjengelig data som dokumenterer hvilken densitet som oppnås i bindemiddelstabiliserte peler i felt. Data fra ulike prosjekter der det er utført installasjon i ulike typer leirer bør sammenstilles for å øke kunnskapsgrunnlaget.

Hvilken densitet som oppnås i pelen vil trolig variere som følge av variasjoner i hvor homogent bindemiddelet blandes inn i løsmassene. Dermed kan det oppstå variasjoner der man har omrørte

løsmasser i deler av pelen og bindemiddelstabiliserte løsmasser i andre deler av pelen. På laboratoriet blandes bindemiddelet inn i hele leirvolumet slik at prøvene blir mest mulig homogene. Det er usikkerheter knyttet til hvor stor innvirkning variasjon av densitet over pelens tverrsnitt og dybde eventuelt har på oppnådd fasthet i pelen, og da ikke minst på fastheten som dokumenteres med f.eks. FKPS eller FOPS.

KlimaGrunns laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk er testet på kvikkleirer fra ulike lokasjoner på Østlandet. Leirer med lav plastisitet og omrørt skjærfasthet trenger lite innblandingsarbeid for å oppnå homogen masse. Nødvendig innblandingsarbeid øker med økende plastisitet. Det bør vurderes om innblandingsrutinen skal standardiseres basert på plastisitet og sensitivitet for å unngå at innblandingsarbeidet blir operatørvhengig. For å øke erfaringsgrunnlaget med bruken av den nye prosedyren for preparering av prøver bør det utføres laboratorieprogram som også inkluderer løsmasser med høyere omrørt skjærfasthet, plastisitet, vanninnhold, høyere og lavere densitet. Det kan være behov for justeringer av prosedyren for prøvepreparering når man får mer erfaring med å bruke den.

H.3.2 Materialoppførsel

Ved innblandingsforsøk er det etablert praksis å utføre enaksialforsøk på de bindemiddelstabiliserte prøvene. Prøvene har herdet uten overlagingstrykk og skjærforsøkene kjøres uten sidestøtte. Både herdeforholdene og forsøkene avviker fra forholdene i feltinstallerte bindemiddelstabiliserte peler. Normalt øker skjærfastheten i naturlige løsmasser og bindemiddelstabiliserte peler med dybden. Ved å ta høyde for at herding med overlagingstrykk i felt fører til større fasthetsutvikling med dybden, vil man kunne optimalisere bindemiddelmengden over pelens dybde, sett bort fra begrensninger som finnes i dagens innblandingsutstyr. I teorien kan denne effekten kvantifiseres på laboratoriet dersom man herder prøvene under et celletrykk tilsvarende overlagingstrykk ved ulike dybder i felt, og ved å kjøre treaksialforsøk på konsoliderte prøver.

NGFs veileder for kalk-/sementstabilisering anbefaler at spesialforsøk for å bestemme skjærfastheten utføres som udrenerte treaksialforsøk. Disse forsøkene utføres på mettede prøver. Basert på gjennomgang av litteratur og erfaring blant fagressursene involvert i KlimaGrunn så stilles det tvil til om disse forsøkene er egnet til å beskrive materialoppførselen til bindemiddelstabilisert materiale. Ved prøvetaking i bindemiddelstabiliserte peler etter herding i felt er det observert luftfylte porer av ulik størrelse som resultat av at bindemiddelet er blåst inn med luft. Materialet er dermed ikke mettet. Det er også usikkerheter knyttet til hvorvidt pelene blir mettet med tiden, eller om herdet pel er såpass tett at porene forblir luftfylte også lang tid etter installasjon.

Dersom man velger å kjøre forsøk på mettede prøver, så vil man gi prøven tilgang til mer vann enn det som opprinnelig er tilgjengelig for herdeprosessen. Dette vil kunne påvirke fasthetsutviklingen i prøven.

I litteraturen er det kjørt både udrenerte og drenerte forsøk på mettede prøver. I KlimaGrunn ble det besluttet å utføre drenerte forsøk på umettede prøver herdet ved celletrykk tilsvarende ulike dybder. Det ble benyttet lav tøyningshastighet (0,7 %/time) under skjærforsøket for å forsøke å unngå udrenert respons. Siden prøvene ikke var mettet, så kunne vi ikke benytte kriteriet om utpresset porevann for å fastslå om prøvene var ferdig konsoliderte. I tillegg kunne heller ikke målerne i treaksialcellene måle de volumetriske tøyningene og poretrykksresponsen under skjærforsøket. Dermed kunne man ikke med sikkerhet fastslå om responsen var drenert eller udrenert. Likevel kunne man basert på spenningsstiene se en betraktelig høyere maksimal skjærspenning ved brudd enn i enaksialforsøkene

utført på prøver som hadde herdet like lenge uten overlagering. I tillegg var det en markant økning av maksimal skjærspenning ved brudd med økende konsolideringsspenninger.

Det bør utføres et studie for å fastslå en prosedyre for laboratorieforsøk på umettede prøver herdet under samme forhold som i felt. I dette arbeidet bør man monitorere endringer i vanninnhold i pelen over tid og også utføre permeabilitetsmålinger ved ulike tidspunkt i herdeforløpet.

H.3.3 *Talking og bruk av laboratorieresultater*

Bruddtøyningen i bindemiddelstabilisert materiale er større enn i leirer. Det bør etableres en omforent praksis for uttak av og bruk av fasthet i beregninger basert på bindemiddelstabiliserte prøver.

H.3.4 *Kontroll av hvor mye bindemiddel som er installert*

Det kan være stor variasjon i hvor mye bindemiddel som blir blandet inn over tverrsnittet og dybden i bindemiddelstabiliserte peler. I oppdrag der det hentes ut prøver fra bindemiddelstabilisert pel, så bør det kvantifiseres hvor mye bindemiddel som faktisk er blandet inn i den aktuelle prøven for å kunne relatere oppnådd fasthet i pelen til den faktisk innblandede bindemiddelmengden. Det bør undersøkes hvilke titreringsmetoder som egner seg til å kontrollere bindemiddelmengden i løsmasser.

H.3.5 *Erfaringsdatabase*

Løsmassenes egenskaper påvirker hvordan de reagerer med bindemiddelet og følgelig hvilken fasthet som oppnås. Et bindemiddel som er svært godt egnet i en type løsmasse er ikke nødvendigvis like godt egnet i en annen type løsmasse. Det bør lages en oversikt over bindemiddelkombinasjoner (type, blandingsforhold, mengde) og egenskaper i løsmassene (kornfordeling, mineralogi, vanninnhold, plastisitetsindeks, omrørt skjærfasthet) som danner grunnlag for valg av bindemiddelkombinasjon til lokale forhold. Det anbefales at man basert på en slik database utvikler en geografisk oversikt med hvilken bindemiddelkombinasjon som er best egnet for løsmassene i de ulike geografiske områdene.

For å få et størst mulig datasett anbefales det at det utvikles et felles rapporteringssystem for laboratorie- og feltresultater for alle aktører.

Det bør undersøkes nærmere hvilken innvirkning kornfordeling, kornform og mineralogi i leire/silt har på oppnådd skjærfasthet i bindemiddelstabiliserte løsmasser. Det anbefales at det etter KlimaGrunn jobbes videre med å utarbeide anbefalinger for hvilke bindemiddelkombinasjoner som egner seg for ulike løsmassetypene.

H.4 *Prediksjon av temperaturforløp*

Bedre kjennskap til forventet temperaturforløp ved installasjon av kalksementpeler vil være avgjørende for å forbedre prediksjonen for oppnådd fasthet. For å øke erfaringsgrunnlaget anbefales det at fremtidige temperaturmålinger fra felt samles inn i et felles rapporteringssystem for alle aktører.

Det vil også kunne være nyttig å modellere temperaturforløpet for ulike ribbekonfigurasjoner og situasjoner (f.eks. grunnvannsstrømning i permeable lag). Situasjonene kan modelleres ved kjente programvarer, eller det kan utvikles egne programvarer spesielt for dette formålet.

H.5 *Sensorteknologi*

På laboratoriet bestemmes gravimetrisk vanninnhold ved å tørke prøvene over natt i varmeskap. Varmen akselerer herdeprosessen. Det er dermed knyttet stor usikkerhet til hvor stor andel av endringen i vanninnhold som kan knyttes til at porevannet forbrukes i akselererte kjemiske reaksjoner

og vann som faktisk har fordampet. Denne måten å bestemme vanninnhold i bindemiddelstabiliserte prøver kan være misvisende. Ved å måle vanninnhold under herdeprosessen i pelen vil man få innblikk i de reelle endringene i vanninnhold under herdeprosessen.

H.6 Seismikk

H.6.1 Krysshullsseismikk

Videre forskning på krysshullsseismikk med bølgeformsmodellering utført med elastisk og uelastisk endelig differanse eller endelig element metoder vil kunne si mer om muligheten for å detektere svakhetssoner. En kan benytte slik modellering sammen med tomografimålinger (dvs. flere mottakerdyp per kilde dyp) for å studere muligheter med metoden. Vi har kun anvendt tolket førsteankomst av skjærbølger. Videre forskning vil også kunne vurdere å benytte bølgeformen i tomografi-inversjon.

For den bindemiddelstabiliserte ribben i KlimaGrunns andre feltforsøk hvor pelene var kun 8 m lange, så er det rimelig å anta små horisontalavvik og at bølgen derfor forplantet seg gjennom bindemiddelstabiliserte masser og ikke gjennom omkringliggendeleire. For dypere peler er dette langt i fra sikkert da pelene kan få store horisontalavvik med økende dybde. Hvis de avviker vesentlig fra vertikal retning så vil det kunne bli mellomrom mellom de bindemiddelstabiliserte pelene. Disse mellomrommene inneholder uforstyrret, delvis forstyrret eller omrørte løsmasser. Bølgen mellom kilde og mottakerrør må da nødvendigvis delvis gå gjennom disse løsmassene. En kan vurdere å sette flere bindemiddelstabiliserte peler i testribben for å sikre at en kun måler gjennom peler på alle dyp. Hvis en kan sikre kontinuerlig bindemiddelstabilisertmateriale mellom kilde og mottaker på alle dyp vil metoden som er demonstrert fungere uavhengig av dyp så lenge kilde- og mottakerkabelen er tilstrekkelig lang.

H.6.2 MASW

MASW kan vurderes og testes ut ytterligere over et område med grid av bindemiddelstabiliserte peler, men kun hvis volumet av bindemiddelstabiliserte løsmasser over et område på minst 5 x 5 m utgjør et prosentvis signifikant volum av måleområdet. For større dyp ned mot 30 m må en enten benytte en kraftigere kilde enn slegge eller benytte passiv MASW hvor bakgrunnsstøyen fra trafikk e.l. utgjør kildesignalet, slik det ble testet ut i KlimaGrunns andre feltforsøk.

H.6.3 Benderelementforsøk

I felt sendes S-bølgen ut i to retninger. Polariteten av bølgene gjør det enklere å tolke første ankomne S-bølge, og dermed skille mellom P- og S-bølger. I benderelementforsøket er det ikke mulig å sende ut bølgen i to retninger uten å måtte demontere utstyret, dreie prøven 180 grader og bygge inn prøven på nytt. Man kan sende ut både P- og S-bølger med GDS sine benderelement. Dette bør utføres for å undersøke om man kan klare å skille P- og S-bølger bedre enn ved kun å sende ut S-bølger.

H.7 Korrelasjonsmodeller

Datsettet til KlimaGrunn er begrenset. Datsettet bør utvides for å komme opp med korrelasjonsmodeller for ulike bindemiddel- og løsmassetyper.

Gjennomgang av litteratur viser korrelasjoner for styrke og skjærmodul basert på like formler, men med ulike konstanter avhengig av type løsmasser og bindemiddelsystemer. Ved å normalisere

parameterne på oppnådde verdier ved 28 dagers herding, er korrelasjonene trolig uavhengig av bindemiddelmengde.

H.8 Datapresentasjon

Etter at andre felttest er gjennomført er det satt i gang et arbeid med testing av funksjonaliteten vi i dag har i Cautus Web. Tilbakemeldingene fra denne testen vil vi ta med oss i det videre arbeidet med å utvikle datapresentasjonsverktøyet. Det vi ser i dag er at det er naturlig å jobbe videre med funksjonalitet for prediksjon av hvordan styrke og stivhet utvikler seg fram i tid i pelene.

For seismikkmålingene er det naturlig at vi jobber videre med å få automatisert dataflyten mer slik at man unngår manuelle operasjoner.

Det er per nå ikke funksjonalitet for å ta inn data fra laboratorieforskene i Cautus Web. Det vil være nyttig å kunne plote resultatene på oppnådd udrenert skjærfasthet fra laboratorieforskene sammen med beregnet udrenert skjærfasthet basert på korrelasjonsmodellen og temperaturmålingene.

I tillegg bør det gjøres en evaluering av om det er andre typer data som bør hentes inn og presenteres sammen med dataene vi samler inn i dag.

Vedlegg I

Referanser

I.1 Referanser

- Aki, K. og Richards, P. (1980). *Quantitative Seismology. Theory and Methods*. Freeman, San Francisco.
- Andersland, O. B. og Landanyi, B. (2004). *Frozen ground engineering*. John Wiley & Sons, inc, New Jersey.
- Asaka Y., Abe T., 2011. Non-destructive technique for assessing cement-treated ground. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement* 164, 179–187. <https://doi.org/10.1680/grim.2011.164.3.179>
- Bache B.K.F., Hov, S. og Mengede, M. (2021). Erfaringer med ulike kalksementvariasjoner – Laboratorieforsøk med ulike typer kalkbaserte bindemidler med hensikt å optimalisere bindemiddeltypen, innblandingsmengde og påvirkning på klima og miljø. *Geoteknikkdagen 2021*.
- Bache B.K.F, Wiersholm, P., Paniagua, P., Emdal, A. 2021. Effect of temperature on the strength of lime-cement stabilized Norwegian clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)* 148(3).
- Baustad P. (2022) En laboratoriestudie av styrke og stivhet i kalksementstabilisert leire. Masteroppgave ved NTNU.
- Bell, F. G. 1996, Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42(4):223–237.
- Bergado D.T., Anderson L.R., Miura N., Balasubramaniam A.S., (1996) *Soft ground improvement in lowland and other environments*. ASCE, New York.
- Berryman, J.G. (1979). Long-wave elastic anisotropy in transversely isotropic media: *Geophysics*, 44, 896-917
- Boynton, R. S (1980). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. John Wiley & Sons, inc. 1980.
- Broms, B.B., 1991. Stabilization of soil with lime columns. *Foundation Engineering Handbook*.
- Chan C.M., 2006. A laboratory investigation of shear wave velocity in stabilised soft soils (Doctoral thesis). University of Technology, Malaysia.
- Červený, V. og Hron, F. (1980). The Ray Series Method and Dynamic Ray Tracing System for Three Dimensional Inhomogeneous Media. *B.S.S.A.*, 70, 47.
- Christensen, S. et al. 1998. *Grunnforsterkning med kalksementpeler*. SINTEF Bygg og Miljøteknikk, Trondheim.
- Croft, J.B., 1967. The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. *Geotechnique* 17.
- Dannewitz N., Eriksson H., Mattsson H., Larsson R., Holm G., 2005. Seismisk kontrollmetode for KC-pelare (Arbetsrapport No. 35), *Svensk Djupstabilisering*. Statens Geotekniska Institut, Linköping.
- Dobry R., Vucetic M., 1987. State of the art report: Dynamic properties and response of soft clay deposits, in: *Proceedings International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*. Mexico City, pp. 51–87.
- Falle F.Å. (2021) Comparing laboratory and field stabilised clay. Masteroppgave ved NTNU
- Flores R.D.V., Di Emidio G., Van Impe W.F., 2010. Small-Strain Shear Modulus and Strength Increase of Cement-Treated Clay. *Geotechnical Testing Journal* 33, 62–71.

- Helle et al. 2021. Ny laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk av bindemiddelstabilisert leire. Geoteknikkdagen 2021.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Bergado, D.T. (2004). Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130 (10), 1096–1105.
- Hov, S., Falle, F. og Paniagua, P. (2022). Optimization of laboratory molding techniques for Nordic dry deep mixing. *Geotechnical Testing Journal* 45(4), <https://doi.org/10.1520/GTJ20210245>
- Kitazume, M. og Terashi, M. (2013) «The deep mixing method». CRC Press.
- Kramer, Steven L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River N.J.
- L'Heureux J.S., Long M., 2017. Relationship between shear-wave velocity and geotechnical parameters for Norwegian clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 143.
- Long M., Donohue S., 2007. In situ shear wave velocity from multi-channel analysis of surface waves (MASW) tests at eight Norwegian research sites. *Canadian Geotechnical Journal* 44, 533–544.
- Løken T (1968) Kvikkleiredannelse og kjemisk forvitring i norske leirer. NGI Publication no. 75, Oslo, Norway: Norwegian Geotechnical Institute, 1–9.
- Maage, M. et al, 2018. *Betongteknologi – regelverk, teknologi og utførelse*. Byggenæringens forlag.
- Massarsch K.R., 2005. Deformation properties of stabilized soil columns, in: *Proceedings Fo the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances*. Stockholm, Sweden, pp. 129–144.
- Mitchell JK and Soga K, 2005. *Fundamentals of soil behaviour*, 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA.
- 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.
- Norges Geoteknisk Forening (NGF), 2012. *Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler*, 2012th ed. Norsk Geoteknisk Forening (NGF).
- Norsk Geoteknisk Forening (NGF), 2020. NGFs beskrivelsestekster for grunnundersøkelser. Melding nr. 10, Rev. nr. 2.
- Paniagua, P. et al. (2022) «Strength and stiffness of laboratory-mixed specimens of stabilised Norwegian clays». *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement* 175(2): 150–163. <https://doi.org/10.1680/jgrim.19.00051>
- Park, C. B., Miller, R. D. og Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves: *Geophysics*, 64, 800–808
- Rosenqvist IT (1955) *Investigations in the clay-electrolyte-water system*. NGI Publication no. 9, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway.
- Rosenqvist IT (1975) *Origin and mineralogy glacial and interglacial clays of Southern Norway*. *Clays Clay Miner* 23: 153–159.
- Saitoh et al. (1985). Korrelasjonskurver presentert i Chan (2006), men var ikke med i referanselisten.

- Skjæran H. M. S. (2020) Optimalisering av innblandingmengder i ulike leirer ved kalksementpeling. Masteroppgave ved NTNU
- Statens vegvesen, 2014. Håndbok V221 Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger. Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2016). «Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser».
- Statens vegvesen (2020). «Økning av budsjettramme til KlimaGrunn». Notat datert 07.02.2020.
- Subramanian, N, 2008. Appendix C: Properties of Soils., in: Design of Steel Structures. Oxford University Press, India.
- Teachavorasinskun S.,Lukkunaprasit P., 2004. A simple correlation for shear wave velocity of soft Bangkok clays. Geotechnique 54, 323–326.
- Terashi et al. (1997). Korrelasjonskurver presentert i Chan (2006), men var ikke med i referanselisten.
- Thomsen, L. (1986). Weak elastic anisotropy: Geophysics, 51, 1954-1966
- Vervoorn R.R.E., Santos Barros A.A, 2020. Deep soil mixing for stabilising deep excavations, in: Proceedings for the 18th Nordic Geotechnical Meeting. Helsinki, Finland.
- Wiersholm, P., 2018. Temperatureffekt er ved kalksementstabilisering. Masteroppgave, NTNU.
- Åhnberg, H., 2006. Strength of stabilised soils – A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder (Doctoral thesis). Lund University, Lund, Sweden.
- Åhnberg, H., Holm, G., 1987. Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- og cementstabiliserad jord (No. 30), SGI rapport. Statens Geotekniska Institut, Linköping.
- Åhnberg H. et al. (1995) «Cement och kalk för djupstabilisering av jord». SGI rapport no. 48. Statens Geotekniska Institut, Linköping.

Hjemmesider:

- Geogiga Technology, Acquisition of Passive Surface Wave Data, Geogiga Technology Corp
<https://www.fprimec.com/wp-content/uploads/2019/04/A-Spotlight-on-Pile-Integrity-Test-2019.pdf>
- <http://geotomographie.de/equipment/borehole-sources/>
- https://www.tleonline.org/theleadingedge/october_2018/MobilePagedArticle.action?articleId=1429575#articleId1429575
- <https://www.dmt-group.com/products/geo-measuring-systems/summit-x-one.html>
- Piletest.com Inferring Pile Shape from Pulse-Echo Test Records by Evolutionary Algorithm



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag