

Pernille Baustad

En laboratoriestudie av styrke og stivhet i kalksementstabilisert leire

Effekten av ulik innbyggingsdensitet

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Arnfinn Emdal

Medveileder: Tonje Helle Eide, Multiconsult og Eivind Juvik, Statens Vegvesen

Juni 2022

Pernille Baustad

En laboratoriestudie av styrke og stivhet i kalksementstabilisert leire

Effekten av ulik innbyggingsdensitet

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Arnfinn Emdal

Medveileder: Tonje Helle Eide, Multiconsult og Eivind Juvik, Statens Vegvesen

Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden

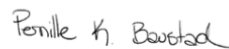
Forord

Denne oppgaven er en avsluttende del av min masterutdanning i geoteknikk ved Norges Tekniske Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), våren 2022. Masteroppgaven er en laboratoriestudie hvor det undersøkes hvordan mengden kalk og sement kan reduseres i grunnstabilisering, og er en fortsettelse av prosjektoppgaven som ble skrevet høsten 2021. Arbeidet har vært svært lærerikt, interessant og til tider noe krevende.

Oppgaven ble foreslått av Tonje Eide Helle hos Multiconsult og er skrevet i samarbeid med prosjektet KlimaGrunn. Tonje Eide Helle fra Multiconsult og Eivind Juvik fra Statens Vegvesen har vært eksterne veiledere, og samarbeidet har bestått av møter over Teams. Masteroppgaven er finansiert av Statens Vegvesen. Veileder fra NTNU er Arnfinn Emdal.

Jeg ønsker å takke veileder Arnfinn Emdal for gode råd og innspill underveis i semesteret. En stor takk til Multiconsult og Tonje Eide Helle som introduserte meg for oppgaven. Videre vil jeg også takke Karl Ivar Kvistvik fra NTNU for bistand med prøvetakning og Eivind Juvik fra Statens Vegvesen for gode diskusjoner. En takk rettes også til Norcem for å ha bidratt med bindemidler for bruk i laboratoriearbeidet. Til slutt vil jeg takke nære og kjære for støtte underveis i masterkrivingen.

Trondheim 08.06.2022



Pernille K. Baustad

Sammendrag

I Norge er vanlig å benytte kalksementpeler for å stabilisere områder med bløt og/eller sensitiv leire. Ved innblanding av bindemidler som kalk, sement, CKD eller Multisem i leirer øker styrken og stivheten slik at grunnen oppnår bedre stabilitet og bæreevne. Utfordringen med metoden er at produksjon av bindemidler medfører store klimautslipp som resulterer i at byggebransjen står for store deler av CO_2 -utslippet i Norge. Masteroppgaven omhandler en laboratoriestudie der bakgrunnen er å redusere bindemiddelmengden ved kalksementstabilisering.

I masteroppgaven benyttes det en ny prosedyre utviklet av KlimaGrunn for preparering av kalksementprøver i laboratoriet. Laboratorieprosedyren gjør det mulig å forhåndsbestemme densiteten i prøvene, i tillegg til at prøvene herder ved $20^\circ C$ og ikke $8^\circ C$ slik som i gjeldene prosedyrer. Da det i tidligere studier er observert at oppnådd densitet i laboratorieprøver har betydning for oppnådd skjærfasthet, er det i denne masteroppgaven gjennomført en kontrollert studie der effekten av ulike innbyggingsdensiteter er undersøkt. Densiteten er variert ved å tilsette ulike mengder leire og bindemiddel i et gitt volum. Ved bruk av leire fra områder der det tidligere er installert kalksementpeler gir dette grunnlag for å sammenligne laboratorieprøver med kalksementprøver fra felt. I laboratoriearbeidet er det også brukt bender element for å undersøke korrelasjoner mellom oppnådd skjærfasthet og skjærbølgehastighet i laboratorieprøvene.

Det er til sammen preparert 54 prøver med to ulike leirer fra Leinstrand sør for Trondheim og Lilleby øst i Trondheim. 36 av prøvene er tilsatt 45 og 80 kg/m^3 B80/CEMI og preparert med densitet 1,7, 1,8 og 1,9 g/cm^3 , mens 18 av prøvene er tilsatt lik mengde og type bindemiddel som kalksementpeler i felt og preparert med densitet 0-10% lavere enn in-situ densitet. Førstnevnte med fokus på å studere effekten av ulike innbyggingsdensiteter og sistnevnte for å sammenligne laboratoriepreparerte prøver med prøver fra felt. Prøvene er testet i enaksialapparat for bestemmelse av skjærfasthet og deretter i bender element for tolkning av skjærbølgehastighet. Herdetiden er satt til 28 døgn for alle prøvene.

Resultatene viser at oppnådd skjærfasthet i laboratorieprøvene i stor grad er avhengig av innbyggingsdensitet, der endring av densitet fra 1,7 g/cm^3 til 1,9 g/cm^3 kan gi 25-40% økning i skjærfasthet avhengig av type leire og bindemiddel. Effekten av ulike innbyggingsdensiteter er svært stor og en viktig parameter for å unngå over- eller underdimensjonering av styrke og stivhet i laboratorietesting. Til tross for ny laboratorieprosedyre oppnår prøver fra felt høyere skjærfastheter enn laboratorieprøver. Resultatene fra felt har imidlertid store spredninger som antas å være forårsaket av inhomogenitet på grunn av innblandingsarbeid. For å oppnå større samsvar mellom felt og laboratorieprøver bør spredningen av skjærfastheter i feltprøver reduseres. Det er ikke funnet gode korrelasjoner mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet ved bruk av bender element i denne studien. Da testing med bender element medfører usikkerheter, antas det at inputverdier eller forstyrrelser/bakgrunnsstøy er årsaken til resultatet. Det anbefales blant annet å utføre bender element-forsøk med høyere frekvenser for å oppnå gode korrelasjoner mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet slik som sett i tidligere studier.

Summary

Lime cement columns are commonly used in Norway to stabilize the ground in areas with soft and/or sensitive clay. By mixing binders such as lime, cement, CKD or Multicem with clay, the stability and bearing capacity can be significantly improved. A problem with this method is that the binder production causes large greenhouse gas emissions and the construction industry in Norway accounts for large parts of the CO_2 -emissions. In this master's thesis a laboratory study has been carried out, with the aim of reducing the amount of binder in lime cement columns.

In the master's thesis a new procedure developed by KlimaGrunn for preparation of lime cement samples in the laboratory is used. The procedure makes it possible to predetermine the density of the samples and the curing temperature is $20^\circ C$, and not $8^\circ C$ as in current procedures. Previous studies have observed that the density in laboratory samples influence the shear strength. The effect of different densities in laboratory samples has therefore been studied. The density is varied by adding different amounts of clay and binder in a given volume. Using clay from areas where lime cement columns previously have been installed, gives a basis for comparing laboratory samples with lime cement samples from the field. Bender element test is also used to investigate correlations between shear strength and shear wave velocity in the laboratory samples.

A total of 54 samples have been prepared with two different clays from Leinstrand south of Trondheim and Lilleby east in Trondheim. 36 of the samples are added 45 and 80 kg/m^3 B80/CEMI and are prepared with a density of 1,7, 1,8 and 1,9 g/cm^3 . 18 of the samples have the same amount and type of binder as lime cement columns in field and are prepared with a density 0-10% lower than in-situ density. The former with focus on the effect of different densities and the latter to compare laboratory samples with samples from fields. The curing time is set to 28 days for all samples.

The results show that shear strength in the laboratory samples highly depends on the density, where a change in density from 1,7 g/cm^3 to 1,9 g/cm^3 can give a 25-40% increase in shear strength depending on the type of clay and binder. Change in density have a big impact on the strength and is an important parameter to avoid over- or under dimensioning of strength and stiffness in laboratory testing. Despite the new laboratory procedure, samples from the field obtain higher shear strengths than laboratory samples. However, the results from the fields have large spreads that are believed to be caused by inhomogeneity due to bad interference. Correlations between shear strength and shear wave velocity is not found in this thesis. Testing with bender element entails uncertainties and it is assumed that input values or disturbances have affected the result. Among other things, it is recommended to perform bender element tests with higher frequencies to achieve better correlations between shear wave velocity and shear strength as seen in previous studies.

Innhold

Figurer	viii
Tabeller	xi
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Fremgangsmåte	2
1.4 Begrensninger	2
1.5 Disposisjon	2
I Litteratur	4
2 Leire og mineralogi	5
2.1 Leire og leirmineraler	5
2.1.1 Leirmineraler i Norge	5
2.2 Geotekniske parametere	6
2.2.1 Faserelasjoner	6
2.2.2 Plastisitetsindeks	8
2.2.3 Skjærfasthet og sensitivitet	8
2.2.4 Korngradering	9
2.3 Kvikkleire	9
2.3.1 Klassifisering av kvikkleire	9
3 Kalksementstabilisering	10
3.1 Bindemidler	10
3.1.1 Kalksement	11
3.1.2 Multicem	11
3.2 Kjemiske reaksjoner	12

3.2.1	Ionebytting og fnokkulering	12
3.2.2	Hydratisering	13
3.2.3	Pozzolane reaksjoner	13
3.2.4	Karbonatisering	14
3.3	Oppnådd fasthet i kalksementpeler	14
3.3.1	Mengde og type bindemiddel	14
3.3.2	Innblandingsforhold	15
3.3.3	Herdeforhold	16
3.3.4	Jordas egenskaper	16
3.3.5	Forhold mellom vann og bindemiddel	17
4	Densitet i kalksementpeler	19
4.1	Generelt	19
4.2	Kalksementprøver preparert i laboratorium	19
4.2.1	Skjærfasthet og densitet	19
4.2.2	Mengde og type bindemiddel	20
4.3	Kalksementpeler i felt	22
4.3.1	E6 Kvithammar-Åsen	22
4.3.2	E6 Trondheim-Melhus (Leinstrand)	22
4.3.3	Lilleby felt B4	23
5	Geotekniske parametere ved bruk av seismikk	25
5.1	Generelt	25
5.2	Skjærmodul G_{maks}/G_0	25
5.3	Seismiske bølger	26
5.3.1	Trykkbølge	26
5.3.2	Skjærbølge	26
5.3.3	Forhold mellom P-bølge og S-bølge	27
5.4	Skjærfasthet og skjærbølgehastighet	28
5.4.1	Norske leirer	28
5.4.2	Stabilisert leire	29
5.5	Bender element	30
5.6	Faktorer som kan påvirke bender element-forsøk	31
5.6.1	Nærfeltseffekt (Near-field effect)	32
5.6.2	P-bølgeutbredelse	32
5.6.3	Prøvegeometri	32

II	Laboratoriearbeid og resultater	34
6	Materialer	35
6.1	Generelt	35
6.1.1	E6 Trondheim-Melhus (Leinstrand)	36
6.1.2	Trondheim - Lilleby	37
7	Laboratoriearbeid	40
7.1	Laboratorieprosedyre	40
7.1.1	Utstyr	40
7.1.2	Fremgangsmåte	41
7.2	Laboratorieprogram	43
7.2.1	Variabler i laboratorieprogrammet	44
7.3	Bender element-forsøk	45
7.3.1	Peak-to-peak metoden	46
7.3.2	Valg av frekvens	47
7.3.3	Plassering av prøve	48
7.3.4	Kvalitetssikring av bender element	49
7.4	Enaksial trykktest	50
8	Resultater	52
8.1	Vanninnhold og densitet	52
8.2	Korrelasjoner	54
8.2.1	Enaksial skjærfasthet mot densitet	54
8.2.2	Enaksial skjærfasthet mot elastisitetsmodul E_{50}	55
8.2.3	Enaksial skjærfasthet mot skjærbølgehastighet	55
8.3	Leirer med lik mengde og type bindemiddel	56
8.3.1	Udrenert skjærfasthet	56
8.3.2	Plastisitetsindeks	56
8.3.3	Sensitivitet	57
8.3.4	Leirinnhold	58
8.4	Sammenligning av felt- og laboratorieprøver	58
8.4.1	Vanninnhold	58
8.4.2	Densitet mot oppnådd skjærfasthet	59
9	Diskusjon	60
9.1	Vanninnhold og densitet	60

9.2	Korrelasjoner	60
9.2.1	Enaksial skjærfasthet mot densitet	60
9.2.2	Enaksial skjærfasthet mot elastisitetsmodul E_{50}	61
9.2.3	Enaksial skjærfasthet mot skjærbølgehastighet	61
9.3	Leirer med lik mengde og type bindemiddel	62
9.3.1	Udrenert skjærstyrke	62
9.3.2	Plastisitetsindeks	62
9.3.3	Sensitivitet	62
9.3.4	Leirinnhold og leirmineraler	63
9.4	Sammenligning av felt- og laboratorieprøver	63
9.4.1	Vanninnhold	63
9.4.2	Densitet mot oppnådd skjærfasthet	64
9.4.3	Usikkerheter	64
III Konklusjon og videre arbeid		65
10 Konklusjon og videre arbeid		66
10.1	Konklusjon	66
10.2	Videre arbeid	67
Referanser		68
A Resultater fra laboratoriearbeidet		71
A.1	Enaksialforsøk	72
A.2	Skjærbølgehastighetsmåling	90
A.3	Bilder av laboratorieprøver	108
B Rutineundersøkelse		126
B.1	Lilleby	127
B.2	Leinstrand	128
C Produktdatablader og produktspesifikasjon		129
C.1	Sementer	130
C.2	Kalk	132
C.3	MULTICEM	133

Figurer

2.1	Tetradeder (øverst) og oktaeder (nederst). Modifisert etter (Rohstoffe, udatert). . .	6
2.2	Forhold mellom masse, vekt og volum. Modifisert etter (Sandven mfl., 2017). . . .	7
3.1	Oversikt over kalksementstabilisering i Norge, modifisert etter (Paniagua mfl., 2019).	10
3.2	Illustrasjon av effekt av ionebytte, modifisert etter (Åhnberg mfl., 1995).	12
3.3	Sammenhengen mellom oppnådd skjærstyrke og innblandingsmengde, modifisert etter (Janz & Johansson, 2002).	14
3.4	Enaksial skjærstyrke ved ulike kalkinnhold i to ulike leirer, modifisert etter (Dash & Hussain, 2012).	15
3.5	Enaksial trykkforsøk på prøver med ulikt w/c-tall, modifisert etter (Miura mfl., 2001).	18
4.1	Enaksial skjærfasthet plottet mot densitet i laboratorieprøver, modifisert etter (Baustad, 2021).	20
4.2	Enaksial skjærfasthet plottet mot densitet i laboratorieprøver, modifisert etter (Falle, 2021).	20
4.3	Innblandingsmengde mot densitet i laboratorieprøver. Kalksement til høyre og Multicem til venstre, modifisert etter (Eidsmo, 2019). Densitet i ustabilisert leire var ca 1,96 g/cm ³	21
4.4	Innblandingsmengde mot densitet i laboratorieprøver, modifisert etter (Falle, 2021). Densitet i ustabilisert leire var ca 2,08 g/cm ³	21
4.5	Variasjon i densitet i kalksementstabilisert leire i felt fra E6 Kvithamar-Åsen, Leinstrand og Lilleby, data hentet fra (Falle, 2021), (Multiconsult, 2017).	23
4.6	Oppnådd skjærfasthet mot densitet i kalksementstabilisert leire i felt fra Leinstrand og Lilleby.	24
4.7	Tydelig lag med ureagert bindemiddel i feltprøve fra Lilleby.	24
5.1	Illustrasjon av forplantning av p-bølge, modifisert etter (Kramer, 1996).	26
5.2	Illustrasjon av forplantning av s-bølge, modifisert etter (Kramer, 1996).	27
5.3	Variasjon av bølgehastigheten til trykk- og skjær-bølge som funksjon av Poisson's ratio, modifisert etter (Nordal & Eiksund, 2021).	27
5.4	In-situ skjærbølgehastighet v_s mot skjærfasthet s_u fra treksailforsøk, modifisert etter (L'Heureux & Long, 2017).	28

5.5	(a) v_s mot $s_{u,CU}$ i stabilisert leire fra Uppsala (b) v_s mot $s_{u,CU}$ i stabilisert leire fra Malaysia, modifisert etter (Chan, 2006).	29
5.6	q_u mot v_s i kalksementstabilisert leire. Resultater fra fire ulike studier, modifisert etter (Chan & Low, 2010).	30
5.7	Benderelement a) Seriekoblet b) Parallellkoblet, modifisert etter (Dyvik & Madshus, 1985).	31
5.8	Piezoelektrisk benderelement. Positiv og negativ spenning deformerer elementene i motsatt retning som resulterer i bøyning av bendeelementet, modifisert etter (Kramer, 1996).	31
5.9	Utbredelse av P- og S-bølge i bender elementet, modifisert etter (Lee & Santamarina, 2005).	32
6.1	Oversiktskart - Aktuelle områder er markert med rød ring (finn.no, 2022).	35
6.2	Oversiktskart over området på Leinstrand, plassering av prøveserier nede til høyre (finn.no, 2022).	36
6.3	Kvartærgeologisk kart over området på Leinstrand (NGU, udatert).	37
6.4	Oversiktskart over området på Lilleby, plassering av greveskuff nede til høyre (finn.no, 2022).	38
6.5	Bilde fra felt Lilleby, tatt 10.03.22.	38
6.6	Kvartærgeologisk kart over området på Lilleby (NGU, udatert).	39
7.1	Skisse over utstyr som brukes i laboratorieprosedyren.	41
7.2	Produkter og utstyr brukt i laboratorieprosedyren.	43
7.3	Skisse av benderelement-systemet, modifisert etter (Morawska, 2019).	45
7.4	(a) Topp- og bunnstykket i bender elementet (b) Kalksementprøve plassert i bender elementet.	46
7.5	Illustrasjon av peak-to-peak metoden. Δt er tiden mellom sendt og mottatt bølge.	46
7.6	Effekt av ulike bølgefrequenser i kalksementstabilisert leire.	47
7.7	(a) Plastelina som fyllmasse for å sikre kontakt med benderelementet (b) Prøve med lav densitet og svært porøs overflate.	48
7.8	Test av original leirprøve i bender elementet ved NTNU.	49
7.9	Test av original leirprøve i bender elementet hos Multiconsult.	49
7.10	Bestemmelse av E_{50} basert på enaksiat trykkforsøk.	50
7.11	a) Kalksementprøve i enaksapparat b) Nærbilde av kalksementprøve etter brudd.	51
8.1	Endring i vanninnhold for leire fra Lilleby stabilisert med B80/CEMI. Til venstre innblandingmengde 45 kg/m^3 og til høyre innblandingmengde 80 kg/m^3	52
8.2	Endring i vanninnhold for leire fra Leinstrand stabilisert med B80/CEMI. Til venstre innblandingmengde 45 kg/m^3 og til høyre innblandingmengde 80 kg/m^3	53
8.3	Endring i vanninnhold for leire stabilisert med likt bindemiddel som i felt. Til venstre leire fra Lilleby stabilisert med 100 kg/m^3 Multicem og til høyre leire fra Leinstrand stabilisert med 90 kg/m^3 B80/CEMII.	53

8.4	Densitet etter 28 herdedøgn. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI og til høyre er leire fra Lilleby stabilisert med 100 kg/m^3 Multicem og leire fra Leinstrand stabilisert med 90 kg/m^3 B80/CEMII.	54
8.5	Densitet etter 28 herdedøgn mot enaksial skjærfasthet. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI og til høyre leirer stabilisert med likt bindemiddel som i felt.	54
8.6	Enaksial skjærfasthet mot elastisitetsmodul E_{50} . Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI og til høyre leirer stabilisert med likt bindemiddel som i felt.	55
8.7	Enaksial skjærfasthet mot skjærbølgehastighet. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI og til høyre er leirer stabilisert med likt bindemiddel som i felt.	55
8.8	s_u original leire mot s_u etter 28 døgn for leire stabilisert med B80/CEMI.	56
8.9	I_P før stabilisering mot enaksial skjærfasthet etter 28 døgn for leire stabilisert med B80/CEMI.	57
8.10	S_t før stabilisering mot enaksial skjærfasthet etter 28 døgn for leire stabilisert med B80/CEMI.	57
8.11	Leirinnhold mot enaksial skjærfasthet etter 28 døgn for leire stabilisert med B80/CEMI.	58
8.12	Vanninnhold i felt- og labprøver etter endt herdetid. Til venstre er prøver fra Lilleby og til høyre er prøver fra Leinstrand.	59
8.13	Densitet mot oppnådd skjærfasthet i felt- og laboratorieprøver. Til venstre prøver er fra Lilleby og til høyre er prøver fra Leinstrand.	59

Tabeller

2.1	Betegnelse av leire etter plastisitetsindeks (SVV, 2018)	8
2.2	Klassifisering av skjærfasthet (SVV, 2018)	8
2.3	Betegnelse av sensitivitet (SVV, 2018)	8
2.4	Klassifisering etter leirinnhold (SVV, 2018)	9
3.1	Egenskaper til sement fra Norcem, hentet fra produktdatablad i vedlegg	11
3.2	Typisk innhold av klinkermineraler i portlandsement (Åhnberg mfl., 1995)	11
3.3	Egenskaper som påvirker stabiliseringsresultatet.	17
6.1	Geotekniske parametere fra rutineundersøkelse av leiren fra Leinstrand.	37
6.2	Geotekniske parametere fra rutineundersøkelse av leiren fra Lilleby.	39
7.1	Oversikt over det gjennomførte laboratorieprogrammet.	45

Symboler

λ	bølgelengde	[m]
γ	tyngdetetthet	[kN/m ³]
γ_s	spesifikk tyngdetetthet	[kN/m ³]
ρ	densitet	[g/cm ³]
ρ_s	korndensitet	[g/cm ³]
G_0	skjærmodul	[Pa]
g	tyngdeakselerasjon	[m/s ²]
f	frekvens	[Hz]
I_P	plastisitetsindeks	[%]
I_L	flyteindeks	[-]
m	masse	[kg]
m_s	masse fast stoff	[kg]
m_w	masse vann	[kg]
n	porøsitet	[%]
s_r	omrørt skjærfasthet	[Pa]
s_u	udrenert skjærfasthet	[Pa]
$s_{u,CU}$	enaksial skjærfasthet	[Pa]
$s_{u,CAUC}$	treaksial skjærfasthet	[Pa]
S_t	sensitivitet	[-]
V	volum	[m ³]
V_p	volum av porer	[m ³]
V_s	volum av fast stoff	[m ³]
v_s	skjærbølgehastighet	[m/s]
v_p	trykkbølgehastighet	[m/s]
w	naturlig vanninnhold	[%]
w_P	plastisitetsgrense	[%]
w_L	flytegrense	[%]
w/b	forhold mellom vann og bindemiddel	[-]
w/c	forhold mellom vann og sement	[-]

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Kalksementpeling benyttes ofte i områder med bløt og/eller sensitiv leire. Ved innblanding av kalk og sement, eventuelt andre bindemidler dannes peler med høy fasthet og områder oppnår bedre stabilitet og bæreevne. Kalksementpeling bedrer grunnforholdene og øker sikkerheten uten ekstreme terrenginngrep, og ved økt antall byggeprosjekter blir metoden mer og mer brukt. Utfordringen med metoden er at produksjon av bindemiddel medfører store klimagassutslipp. Med økende klimautfordringer både i verden og Norge er det derfor behov for å utvikle mer klimavennlige grunnforsterkningsmetoder. Ved å redusere mengden bindemiddel i kalksementpeler vil klimautslippene tilknyttet byggeprosjekter reduseres betraktelig og byggeprosjekter som tidligere ble sett på som for kostbare på grunn av omfanget av grunnstabiliseringen, kan i større grad realiseres.

Som grunnlag i prosjektering av kalksementstabilisering benyttes ofte fastheten som framkommer i laboratorieundersøkelser. Flere byggeprosjekter og tidligere studier viser imidlertid at oppnådd fasthet i felt er langt høyere enn i laboratoriet, som vil si at fastheten i laboratoriet underestimerer oppnådd fasthet i felt. Derfor brukes mer bindemiddel enn nødvendig, og styrken i den installerte pelen blir høyere enn det som kreves. Hovedårsaken til forskjellen mellom oppnådd fasthet i felt og i laboratorie er blant annet knyttet til ulike herdeforhold. En annen faktor som gjør det utfordrende å sammenligne felt og laboratorieprøver er at det ikke finnes en felles metodikk for innblanding av kalksementprøver i laboratoriet. I Norge benyttes Statens vegvesens "Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser" og Norsk Geoteknisk Forening sin "Veileder for grunnstabilisering med kalksementpeler", mens i Sverige benyttes en metode utviklet av Svensk Djustabilisering. Ulike prosedyrer gjør det i tillegg utfordrende å sammenligne resultater fra ulike laboratorier.

Å gjenskape forholdene i felt i laboratoriet er svært krevende og ikke minst kostbart. Likevel har KlimaGrunn utviklet en ny og forbedret laboratorieprosedyre der målet er større samsvar mellom herdeforholdene i felt og i laboratoriet, i tillegg til å sikre reproducerbare resultater uavhengig av operatør og laboratorium. Tidligere studier har vist at det er vanskelig å kontrollere oppnådd densitet i laboratorieprøver, samt at ulik innbyggingsdensitet kan gi store variasjoner i oppnådd skjærfasthet. For å unngå under- eller overestimering av styrken i den nye laboratorieprosedyren er det blant annet valgt å fastholde densiteten, slik at densiteten bestemmes før innstamping av prøvene.

En annen årsak til at kalksementpeler ofte overdimensjoneres er at skjærstyrken som måles i felt ikke gir et helhetlig bilde av styrkeutviklingen. I dag testes styrken ofte ved hjelp av FOPS, forinstallert omvendt pelsonde. Metoden kan bare brukes på peler opp til 300-400 kPa, noe som betyr at testen må utføres lenge før styrkeutviklingen er ferdig, ofte 3-7 dager etter installasjon. Også i felt arbeides det derfor med nye løsninger for å dokumentere oppnådd styrke og stivhet i stabilisert materiale. Ved bruk av seismikk og sensorteknologi vil det være mulig å kontrollere pelens styrke over lengre tid. Metoden vil også gjøre det mulig å undersøke pelen i sin helhet på en ikke-destruktiv måte. Ved å måle skjærbølgheastighet v_s , i laboratorieprøver er det grunnlag for

å utvikle korrelasjonsmodeller mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet som videre kan brukes for å estimere styrke i felt.

1.2 Problemstilling

Problemstillingen består av følgende spørsmål:

- Hvor stor er effekten av ulik innbyggingsdensitet på styrke og stivhet i kalksementstabilisert leire?
- Er det mulig å lage gode korrelasjonsmodeller mellom oppnådd skjærfasthet og skjærbølgehastighet i kalksementstabiliserte laboratorieprøver?
- Vil det være større samsvar mellom felt- og laboratorieprøver ved bruk av KlimaGrunns nye laboratorieprosedyre?

1.3 Fremgangsmåte

For å svare på problemstillingen er det utført laboratorieundersøkelser ved bruk av ny laboratorieprosedyre utviklet av KlimaGrunn. Ved å stampe inn leire og bindemiddel i sylindere med et gitt volum, er innbyggingsdensiteten til laboratorieprøvene bestemt på forhånd. I laboratoriearbeidet er det til sammen preparert 54 prøver med to ulike leirer fra Leinstrand sør for Trondheim og Lilleby øst i Trondheim. Både Leinstrand og Lilleby har områder som tidligere er stabilisert med kalksementpeler. 36 av prøvene er tilsatt 45 og 80 kg/m³ B80/CEMI og preparert med densitet 1,7, 1,8 og 1,9 g/cm³, mens 18 av prøvene er tilsatt samme mengde og type bindemiddel som kalksementpeler i felt og preparert med densitet 0-10% lavere enn in-situ densitet. Førstnevnte for å undersøke effekten av ulike innbyggingsdensiteter og sistnevnte for å sammenligne laboratoriepreparerte prøver med kalksementprøver fra felt. Etter endt herding er det målt skjærbølgehastighet, v_s og enaksial skjærfasthet, $s_{u,UC}$ av samtlige prøver. For å kunne sammenligne laboratorieprøvene med kalksementprøver fra felt, er data fra ulike kalksement-prosjekt i trøndelag sammenstilt i oppgaven.

1.4 Begrensninger

Fasthetsutviklingen i stabiliserte masser er avhengig av blant annet jordtype, mengde- og type bindemiddel, tid, temperatur, innblandingsarbeid og herdetrykk. For å begrense problemstillingen er det valgt se bort i fra noen faktorer. Det er for eksempel ikke variert herdetrykk eller temperatur i laboratoriearbeidet. Prøvene er kun herdet i 28 døgn og styrkeutviklingen over tid er ikke studert. Det er valgt å undersøke skjærfasthet fra enaksiale trykkforsøk da dette er tidseffektivt og benyttet i flere tidligere studier og byggeprosjekter. Det antas at skjærfasthet fra enaksial trykkforsøk er en konservativ tilnærming ved måling av styrke.

Bindemiddelet benyttet i studien er i hovedsak industrisement (CEMI) og brent kalk (Stabila B80) i blandingsforhold 50/50. Dette gjelder med unntak av de 18 prøvene som er stabilisert med lik mengde og type bindemiddel som i felt. Effekten av ulike bindemidler diskuteres derfor ikke i avhandlingen.

1.5 Disposisjon

Masteroppgaven er delt inn i tre deler. Del I er en litteraturdelt som baserer seg på tilgjengelig teori og tidligere studier. Del II omhandler laboratoriearbeidet i tillegg til resultater og diskusjon. Del III presenterer konklusjon og videre arbeid.

Del I består av fire kapitler som er ment å gi et innblikk i viktige faktorer ved kalksementstabilisering. Kapittel 2 tar for seg egenskaper og mineralogi tilknyttet norske leirer. I kapittel 3 presenteres ulike typer bindemidler og deres virkemåte. Videre er det sett på hvilken betydning densitet i kalksementprøver har hatt i tidligere studier i kapittel 4. Kapittel 5 viser hvordan seismikk kan brukes i geoteknisk sammenheng. Det er imidlertid valgt å ikke forklare de generelle prinsippene i forhold til installasjon av kalksementpeler da dette antas å være forkunnskap.

Del II er hoveddelen av masteroppgaven. Grunnforhold og parametere fra rutineundersøkelser presenteres i kapittel 6, og laboratoriearbeidet forklares i kapittel 7. Resultater og diskusjon blir presentert i kapittel 8 og 9.

Del III er den avsluttende delen og konkluderer arbeidet i oppgaven. I kapittel 10 oppsummeres diskusjonen i en konklusjon og det gis anbefalinger til videre arbeid.

Del I

Litteratur

Kapittel 2

Leire og mineralogi

Kapittelet tar for seg dannelse av norsk leire og mineralogi. Videre presenteres viktige egenskaper og parametere i norsk leire og karakterisering av ulike leirer. Kapittelet skal gi en forståelse av oppførselen til leire før tilsetning av bindemidler.

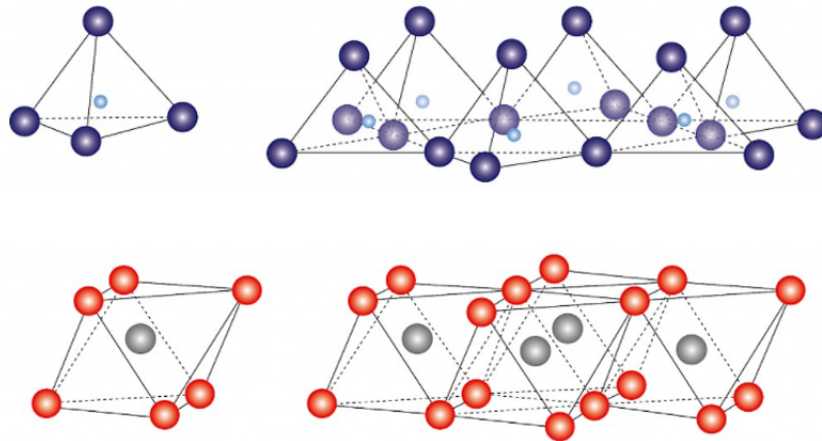
2.1 Leire og leirmineraler

For å klassifisere en jordart som leire, vurderes et utvalg av geotekniske parametere. Parametere studeres og kartlegges for å bestemme leiras egenskaper og oppbygging. Partikler med kornstørrelse mindre enn 0,002 mm betegnes som leirpartikler. Dersom en jordart inneholder mer enn 15% av leirpartikler benevnes den som leire. Med andre ord er definisjonen av leire en størrelsefraksjon, og uavhengig av hvilke mineraler materialet består av (J.Jahren, 2000).

Leirmineralene er dannet under høyt trykk og høy temperatur, og vil forvitte ved jordoverflaten. Hvilke leirmineraler som dannes vil være avhengig av temperatur, nedbør, vegetasjon og sammensetningen til det forvitrende materialet. De vanlige mineralene er kaolinit, mektitt, illitt og kloritt (J.Jahren, 2000).

2.1.1 Leirmineraler i Norge

De fleste norske leirer er dannet under den siste istiden ved nedknusing og forvitring av berggrunnen. Leirmineraler er bygget opp av tetraeder- og oktaederlag av oksygen og hydroksid slik som vist i Figur 2.1, der strukturens stabilitet avhenger hvor godt kationen passer inn mellom oksygenatomene (Rohstoffe, udatert). Tetraeder- og oktaederlagene er byggesteiner, og avhengig av hvordan disse lagene er bundet sammen bestemmes mineralet. I Norge finner vi ofte mineraler som kaolinit, illitt, smektitt, vermikulitt, montmorillonitt og kloritt (Brattli, 2020).



Figur 2.1: Tetraderer (øverst) og oktaeder (nederst). Modifisert etter (Rohstoffe, udatert).

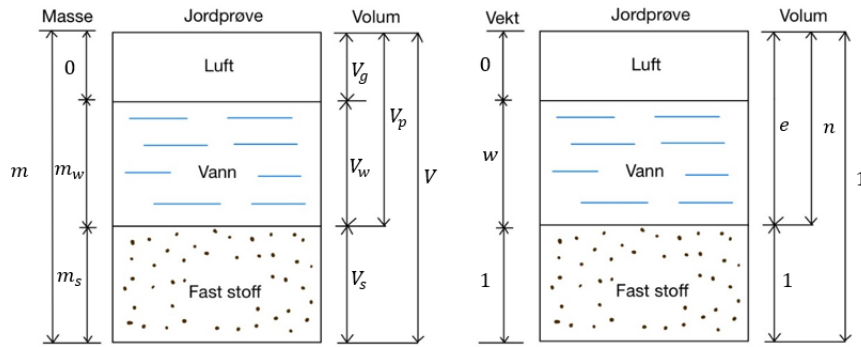
Syversen gjorde en studie av den mineralogiske sammensetningen i norske sensitive leirer (Syversen, 2013). Det ble samlet inn leirer fra 32 ulike felt, og mineralinnhold og kornfordeling ble analysert. Studien viser at både kloritt og illitt er dominerende i samtlige landsdeler. Sør- og Vestlandet skiller seg ut fra de andre regionene med et vesentlig lavere innhold av kloritt. Både Sørlandet, Midt-Norge og Nord-Norge har leirer med illittinnhold på over 30%. Også innhold av kvarts, amfibol, mikroklin og plagioklas ble registret i samtlige landsdeler.

2.2 Geotekniske parametere

De fleste geotekniske parameterne bestemmes ut fra målinger i laboratoriet, og er svært viktig for å kartlegge materialet. Ved måling av fasthets- og deformasjonsegenskaper vil det kreves uforstyrrede prøver, mens andre forsøk også kan utføres på omrørte prøver. For detaljer og arbeidsbeskrivelser av de enkelte forsøkene henvises det til "Statens Vegvesen Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser" (SVV, 2014).

2.2.1 Faserelasjoner

En jordprøve kan beskrives som et materiale med tre faser: luft, vann og fast stoff (Sandven mfl., 2017). En prinsippkisse av framstillingen til en jordprøve er vist i Figur 2.2. Forholdet mellom de tre fasene kan benyttes til å utlede grunnleggende geotekniske parametere.



Figur 2.2: Forhold mellom masse, vekt og volum. Modifisert etter (Sandven mfl., 2017).

Densitet og tyngdetetthet

Densiteten ρ , er massen til prøven dividert på volumet av prøven og er gitt ved likning 2.1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Tyngdetettheten γ , er total vekt delt på totalt volum og er gitt ved likning 2.2.

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g \quad (2.2)$$

der g er tyngdeakselerasjonen = $9,81 \text{ m/s}^2$

Korndensiteten ρ_s , er massen av fast stoff dividert på kornvolumet og er gitt ved likning 2.3.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2.3)$$

Tyngdetettheten γ befinner seg vanligvis mellom $15\text{-}22 \text{ kN/m}^3$ og kordensiteten ρ_s mellom $2,7\text{-}2,8 \text{ g/cm}^3$ avhengig av materialet.

Vanninnhold

Vanninnhold w , bestemmes ved å veie prøvens våte masse m , og deretter tørke prøven og veie den tørre massen m_s . Massen av vannet m_w , kan dermed bestemmes ved å ta differansen av den våte og den tørre massen. Vanninnhold er gitt ved ligning 2.4.

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Norsk leire har typisk vanninnhold mellom $25 - 55\%$. Høyt vanninnhold kan være en indikasjon på at materialet er setningsømfintlig og har lav skjærfasthet.

Metningsgrad og porøsitet

Metningsgrad S_r , er forholdet mellom volum av vann og porevolumet i en prøve og er gitt ved likning 2.5.

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} = \frac{w \cdot \gamma}{\gamma_w(1 + w - \frac{\gamma}{\gamma_s})} \quad (2.5)$$

For leirer under grunnvannsstand vil metningsgraden i de fleste tilfeller være 100%. Porøsiteten n , vil være forholdet mellom volum av porer og prøvens totale volum, gitt ved likning 2.6.

$$n = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s(1 + w)} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

2.2.2 Plastisitetsindeks

En leire kan være plastisk, flytende, tørr eller smuldrende i naturlig tilstand, avhengig av vanninnholdet (Sandven mfl., 2017). Vanninnholdet hvor leira går over fra plastisk til flytende form i omrørt tilstand kalles flytegrense w_L , mens plastisitetsgreisen w_P , uttrykker det laveste vanninnholdet hvor leira er plastisk i omrørt tilstand (Sandven mfl., 2017). Plastisitetsindeks I_P , er definert som differansen mellom flytegrensen og plastisitetgrensen og er gitt ved likning 2.7.

$$I_P = w_L - w_P \quad (2.7)$$

Plastisitetsindeksen forteller hvor hurtig en jordart reagerer på endring i vanninnhold. Leirer klassifiseres fra lite til meget plastisk som vist i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Betegnelse av leire etter plastisitetsindeks (SVV, 2018)

Betegnelse av leire	Plastisitetsindeks I_p [%]
Lite plastisk	<10
Middels plastisk	10-20
Meget plastisk	>20

2.2.3 Skjærfasthet og sensitivitet

Udrenert skjærstyrke eller skjærfasthet s_u er spenningen i et uomrørt udrenert materiale når det går til brudd. Omrørt skjærstyrke s_r , er spenningen i et omrørt udrenert materiale når det går til brudd. Leiren klassifiseres som bløt, middels fast eller fast etter verdiene som vist tabell 2.2.

Tabell 2.2: Klassifisering av skjærfasthet (SVV, 2018)

Leirtype	Skjærfasthet s_u [kN/m^3]
Bløt	<25
Middels fast	25-50
Fast	>50

Sensitivitet S_t , er forholdet mellom uomrørt og omrørt skjærfasthet og er gitt ved likning 2.8. Tabell 2.3 beskriver betegnelsen av leira ut fra sensitiviteten.

$$S_t = \frac{s_u}{s_r} \quad (2.8)$$

Tabell 2.3: Betegnelse av sensitivitet (SVV, 2018)

Betegnelse	Sensitivitet S_t
Lite sensitiv	<8
Middels sensitiv	8-30
Meget sensitiv	>30

2.2.4 Korngradering

Egenskapene til en jordart er i stor grad avhengig av hvilke kornstørrelser den er satt sammen av. Jordarter som inneholder mer enn 15% leirpartikler (kornstørrelse under 0,002 mm) benevnes som leirer. Tabell 2.4 viser hvordan en jordart klassifiseres etter innhold av leire.

Tabell 2.4: Klassifisering etter leirinnhold (SVV, 2018)

Leirinnhold	Klassifisering
>30%	Jordarten klassifiseres som leire
15 - 30%	Jordarten klassifiseres som leire, med andre fraksjoner i adjektivsform
5 - 15%	Jordarten angis i adjektivsform som leirig
< 5%	Angis ikke

Leira benevnes som siltig dersom den inneholder 15-45% silt. Dersom leira inneholder 20-60% sand, grus eller stein angis den som sandig, grusig eller steinig.

2.3 Kvikkleire

Kvikkleire finnes under den marine grensen, som er betegnelsen på hvor havnivået lå under siste istid. Ved smelting av isen ble leirpartikler ført med smeltevannet og sedimentert i det som den gang var strandsonen. På grunn av avlastningen av grunnen hevet landskapet seg, og det som en gang lå under havnivået ligger i dag på om lag 200-300 moh. (NGI, udatert).

Leirer har i utgangspunktet porer fylt med saltvann. Ved sterk utvasking av salt vil bindinger i kornstrukturen bli svak og en liten forstyrrelse av strukturen kan føre til kollaps. Leiren vil bli flytende og oppfylle egenskaper til kvikkleire.

2.3.1 Klassifisering av kvikkleire

Kvikkleire karakteriseres ved lav omrørt skjærfasthet og høy sensitivitet, og er en form for sprøbruddmateriale. Sprøbruddmateriale er definert som løsmasser som utviser en utpreget sprøtt oppførsel, dvs. en betydelig reduksjon i fasthet ved tøyninger ut over tøyning ved maksimal fasthet (NVE, 2019). Etter ISO 17892-6:2017 tilsvarer dette en omrørt skjærfasthet $<1,27$ kPa (gammel konusstandard <2 kPa). Kvikkleire er et av de mest ekstreme eksemplene på sprøbruddmateriale, og defineres som leire med $s_r < 0,33$ kPa (gammel konusstandard $<0,5$ kPa).

Kapittel 3

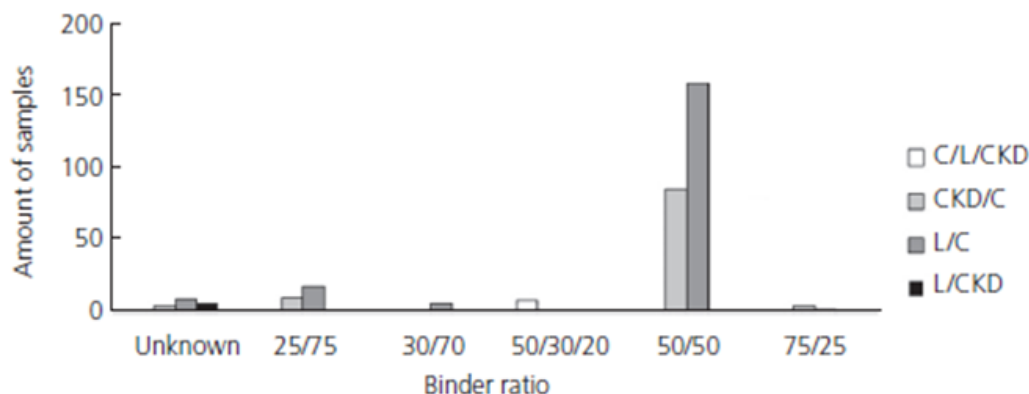
Kalksementstabilisering

Kapittelet tar for seg de vanligste bindemidlene som brukes i norsk grunnstabilisering. Først presenteres hvert enkelt bindemiddel før det redegjøres for kjemiske prosesser ved innblanding av bindemiddel i leire. Deretter diskuteres sentrale forhold som påvirker oppnådd fasthet ved kalksementstabilisering. Kapittelet skal gi en generell forståelse av hvordan geotekniske egenskaper endres ved tilsetning av bindemiddel, i tillegg til viktige faktorer som påvirker stabiliseringsresultatet. For beskrivelse av installasjon av kalksementpeler henvises det til "Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler" (NGF, 2012).

3.1 Bindemidler

For å forstå hvordan materialet endrer seg ved kalksementstabilisering, er det viktig å forstå betydningen av bindemiddelet. De ulike bindemidlene bidrar til signifikant endring i leirens struktur, temperatur, fasthet og stivhet, og vil på denne måten ha stor betydning for sluttresultatet av kalksementstabilisering.

På midten av 1970-tallet når grunnforsterkninger ble tatt i bruk, var kalk det dominerende bindemiddelet. I senere tid er en kombinasjon av kalk og sement, i tillegg til CKD ofte brukt. Figur 3.1 viser fordeling av bindemidler og blandingsforhold for grunnstabiliseringsprosjekter i Norge. Kalk og sement i et blandingsforhold 50/50 er de mest benyttede bindemidlene og grunnstabilisering i Norge blir derfor ofte kalt kalksementstabilisering.



Figur 3.1: Oversikt over kalksementstabilisering i Norge, modifisert etter (Paniagua mfl., 2019).

3.1.1 Kalksement

Kalksement inneholder sement og brent kalk. Vanligst er blandingsforholdet 50/50, men andre blandingsforhold er også anvendt. I Norge er det Norcem som leverer produktet Kalksement (KC). Brent kalk produseres av Franzefoss Minerals og leveres til Norcem som blander inn sement for det ferdige produktet. I hovedsak er det sementen som bidrar til fasthet, mens brent kalk bidrar til seighet (Norcem, udatert).

Sement

Ved kalksementstabilisering benyttes vanligvis industrisement eller standardsement FA, som begge oppfyller kravene i henhold til portlandsement CEM I 52,5 R og Portland CEM II/B-M (NS-EN 197-1:2011, 2011). Normalt er det krav til at sementen har kornstørrelse på 0-0,2 mm og flytbarhet > 40 (NGF, 2012). Flytbarheten er et mål på hvor godt pulveret flyter gjennom rør og munnstykker. Tabell 3.1 viser innholdet i de to sementtypene.

Tabell 3.1: Egenskaper til sement fra Norcem, hentet fra produktdatablad i vedlegg

Sementtype	Innhold	CO_2 -utslipp [kg/m ³]
Norcem industrisement	96% Portlandsementklinke 4% Sekundære bestanddeler	748
Norcem Standard FA	78% Portlandsementklinke 18% Flygeaske 4 %Kalkmel	604

Sement dannes ved en oppmalings- og brenningsprosess av kalkstein. Portlandsement består først og fremst av kalkstein ($CaCO_3$), men tilsettes også klinkermaterialer/korreksjonsmaterialer. Tabell 3.2 viser typisk innhold av klinkermaterialer. Råmelet blir etter oppmalingsprosessen varmet opp til 1450°C. Klinkeren avkjøles og lagres i silo før den pakkes og transporteres til kunder. Deler av klinkeren kan erstattes med flygeaske eller silicastøv, noe som kalles portlandkomposittsement.

Tabell 3.2: Typisk innhold av klinkermineraler i portlandsement (Åhnberg mfl., 1995)

Kjemisk navn	Kjemisk formel	Forenklet formel	Ca. innhold
Trikalsiumsilikat	$3CaO SiO_2$	C_3S	57
Dikalsiumsilikat	$2CaO SiO_2$	C_2S	14
Trikalsiumaluminat	$3CaO Al_2O_3$	C_3A	8
Tetrakalsiumaluminatferritt	$4CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$	C_4AF	7

Brent kalk

For å lage brent kalk (kalsiumoksid, CaO) brennes kalkstein ved høy temperatur, ca 1200° C. Franzefoss Minerals er produsent av kalkproduktet Stabilia B som brukes i kalksementstabilisering i Norge. Stabilia B60, Stabilia B80 og Stabilia B100. Forskjellen mellom produktene er andelen brent kalk eller innholdet av finstøvet LKD (Lime Klin Dust). LKD er et restprodukt som dannes ved forbrenning av kalkstein. Stabilia B100 inneholder kun brent kalk mens Stabilia B80 og Stabilia B60 inneholder henholdsvis 15-20% og 20-40% LKD. I databladet gitt i vedlegg fremkommer også tilsetningen av flytbarhetsmiddel ved produksjon av Stabilia B-produkter.

3.1.2 Multicem

Multicem er et bindemiddelprodukt produsert av Norcem bestående av sement og CKD (Cement Klin Dust). Produktet har et lavere CO_2 -utslipp per ton sammenlignet med kalksement samtidig

som det benyttes mindre ikke-fornybare materialer, og vil derfor ha en bedre miljøprofil enn kalksement. Multicem kan leveres med 25, 50 og 75 % andel CKD og leveres ferdigblandet fra terminal. Den mest benyttede blandingen er 50/50 CKD og sement.

Sement

Norcem produserer Multicem som består av både Industrisement (CEM I) og standard FA sement (CEM II). Sementene er beskrevet i kapittel 3.1.1.

CKD

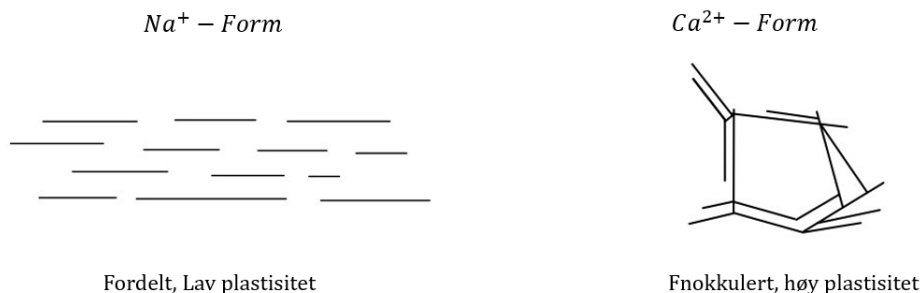
CKD er et finstøvet materiale som i hovedsak inneholder brent kalk og andre kalsinerte materialer. Produktet har i motsetning til sement ingen formelle krav til innhold eller egenskaper, og innholdsstoffene avhenger i stor grad av produksjonsmåte, hvordan støvet samles inn, råmateriale og brensler. CKD kan dermed ha noe variasjon i mineralsammensetningen.

3.2 Kjemiske reaksjoner

Den økte styrken og stivheten ved innblanding av bindemiddel er forårsaket av ulike kjemiske reaksjoner. I hovedsak kan de kjemiske reaksjonene deles i fem deler: ionebytting, fnokkulering, hydratisering, pozzolane reaksjoner og karbonisering. Ionebytting og fnokkulering oppstår direkte etter innblanding mens hydratisering, pozzolane reaksjoner og karbonisering strekker seg over måneder og år.

3.2.1 Ionebytting og fnokkulering

Leirkorn er normalt dekket av positive ioner, vanligvis kalium (K^+) eller natrium (Na^+) som har en stabil struktur. Ved innblanding av kalk byttes Na^- og K^- -ioner ut med Ca^+ -ioner fra kalken som resulterer i strukturforandring og fnokkulering (Åhnberg mfl., 1995). Ionebyttingen skjer raskt, vanligvis innen noen få timer (Prusinski & Bhattacharja, 1999). Figur 3.2 illustrerer effekten av ionebytting som resulterer i strukturendring.



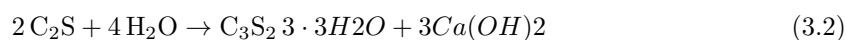
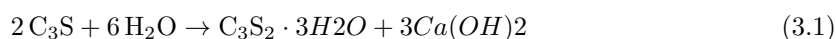
Figur 3.2: Illustrasjon av effekt av ionebytte, modifisert etter (Åhnberg mfl., 1995).

Som vist i figur 3.2 vil fnokkulering endre leirens struktur fra flat og parallell til en mer tilfeldig kantate struktur, slik at fastheten øker. Hvor stor effekt ionebytte og fnokkulering har på fastheten vil avhenge av leiras ionebyttekapasitet som henger sammen med pH-verdi, overflateareal og leiras mineralogi.

3.2.2 Hydratisering

Sement

Sement er et hydraulisk bindemiddel, dvs. at det reagerer med vann og danner en hard masse (Janz & Johansson, 2002). Som vist i tabell 3.2 inneholder sement mengder med kalsiumsilikater (C_3S og C_2S). Mineralene C_3S og C_2S gir det viktigste bidraget til fasthetsutviklingen og danner reaksjonsproduktet kalsiumsilikathydrat (CSH). I tillegg vil det dannes kalsiumaluminathydrat (CAH). CSH og CAH vil forme krystaller som fungerer som lim ved at de binder partiklene i massen sammen. Reaksjonslikningene vises i likning 3.1 og 3.2. Den raskeste fasthetsøkningen skjer i løpet av dager og måneder, men fortsettelse av hydrering kan forekomme i flere år (Prusinski & Bhattacharja, 1999). Etter 3 døgn har omtrent halvparten av sementen reagert, etter 7 døgn ca. 60% og etter 3 måneder ca. 90% (Åhnberg mfl., 1995).



Kalk

Kalk består i hovedsak av kalsiumoksid (CaO). CaO reagerer raskt med vann under sterk varme og danner $Ca(OH)_2$. Reaksjonen krever en stor mengde vann og kalk vil derfor ha en uttørkende effekt ved tilsetning i jord. Likning 3.3 viser reaksjonen.



Reaksjonen skjer umiddelbart og når sitt maksimum etter ca. 5 minutter (Åhnberg mfl., 1995). Reaksjonshastigheten avhenger i hovedsak av kalkens kornstørrelse, der finere gradering vil gi raskere reaksjon på grunn av høyere eksponert overflateareal. Kalken vil i tillegg øke pH-verdien i det naturlige vanninnholdet fra ca. 7 til 11, som er en viktig forutsetning for den påfølgende pozzolane reaksjonen.

3.2.3 Pozzolane reaksjoner

Som nevnt tidligere inneholder de fleste jordtyper aluminium og silisium-mineraler (SiO_2 og Al_2O_3). Dette innebærer at materialet kan ha pozzolane egenskaper. Jord med pozzolane egenskaper kan reagere med kalsiumhydroksid ($Ca(OH)_2$) og danne reaksjonsprodukt (CSH eller CAH) som bidrar til fasthet. Pozzolanreaksjon gjør at fastheten, stivheten og holdbarheten utvikles langsomt, gjerne over måneder og år, og kan beskrives ved likning 3.4.



Pozzolane reaksjoner er avhengig av høy temperatur i tillegg til riktig pH-verdi i porevannet. På denne måten er temperaturøkningen og økt pH-verdi ved hydratisering av kalk og sement viktige forutsetninger for at reaksjonen finner sted.

I tillegg til CSH som dannes i aluminiumfattige leirer og CHA som dannes i leirer med høyere innhold av aluminiumforbindelser, dannes også reaksjonsproduktet kalsiumaluminatsilikathydrat (CASH). Reaksjonsproduktet CASH er bare delvis krystallisert, og vil over tid gå over til de faste krystallene CSH og CAH.

3.2.4 Karbonatisering

Ved karbonatisering reagerer kalsiumhydroksid ($Ca(OH_2)$) i det kalksementstabiliserte materialet med karbondioksid i omgivelsene (luften eller jorda), slik at det dannes kalsiumkarbonat ($CaCO_3$) og vann. Karbonatisering vil starte ved overflaten og deretter forplante seg nedover og innover i det stabiliserte materialet. Reaksjonshastigheten og forplantningsdybden vil påvirkes av flere faktorer, blant annet konsentrasjon av CO_2 , temperatur og fuktighet (Xu mfl., 2020). Dybden av karbonatiseringen vil øke med tiden, mens reaksjonshastigheten vil avta.

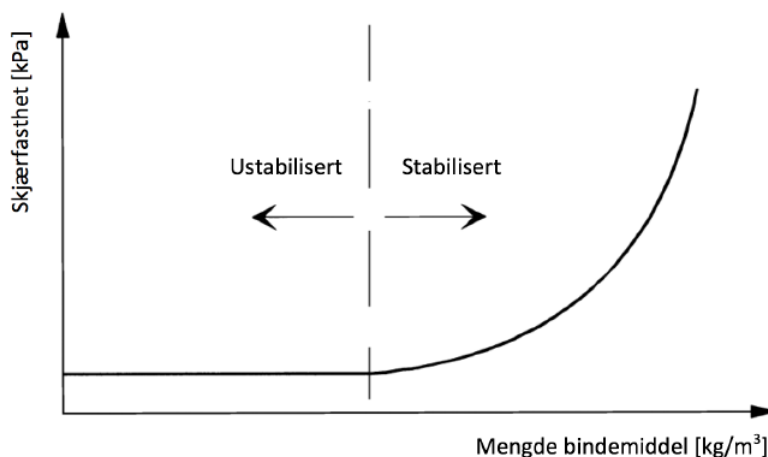
Tidligere studier har diskutert om karbonatiseringen er en ønsket reaksjon som bidrar til fasthet, eller en uønsket reaksjon som hemmer pozzolane reaksjoner ved karbonatisering av reaksjonsproduktet CSH. Likevel mener (Ho mfl., 2017) og (Xu mfl., 2020) at karbonatisering av stabilisert jord bidrar til økt fasthet ved at $Ca(OH)_2$ omdannes til det sterke reaksjonsproduktet $CaCO_3$, etterfulgt av en liten reduksjon på lang sikt.

3.3 Oppnådd fasthet i kalksementpeler

Oppnådd fasthet i stabiliserte løsmasser er avhengig av flere forhold. De viktigste er mengde og type bindemiddel, innblandingsarbeid, herdeforhold i form av tid, temperatur og trykk og jordens egenskaper.

3.3.1 Mengde og type bindemiddel

For at jorden skal oppnå økt fasthet må det tilsettes en tilstrekkelig mengde bindemiddel (Janz & Johansson, 2002). Hva som er tilstrekkelig mengde vil være avhengig av hvilken jordtype som skal stabiliseres, men for lite bindemiddel vil ha liten eller ingen stabiliserende effekt, illustrert i Figur 3.3. For sensitiv leire brukes en innblandingmengde rundt 80-110 kg/m^3 , men for torv anbefales opp mot 300 kg/m^3 .

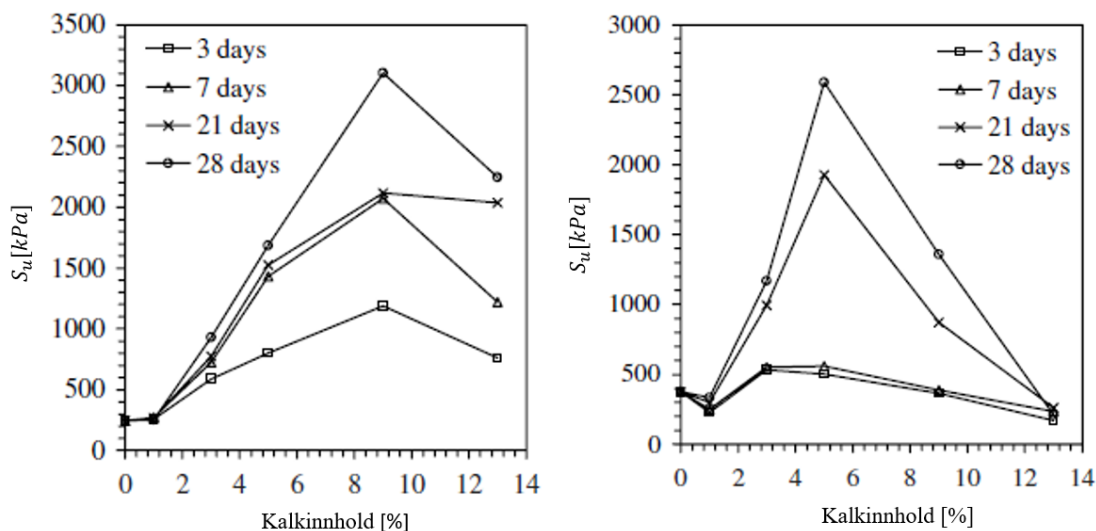


Figur 3.3: Sammenhengen mellom oppnådd skjærstyrke og innblandingmengde, modifisert etter (Janz & Johansson, 2002).

Kalk og sement vil påvirke stabiliseringsresultatet noe ulikt. Mens fastheten generelt vil øke med økt mengde sement, finnes det et "optimalt kalkinnhold" hvor økt mengde kalk ikke vil resultere i høyere fasthet (Dash & Hussain, 2012). Det optimale kalkinnholdet (OLC) defineres som mengden kalk som kreves for å tilfredsstille den umiddelbare interaksjonen mellom kalk og jord, samt gi tilstrekkelig mengde kalsium og gjenværende pH som er nødvendig for pozzolanreaksjonen (Cherian & Arnepalli, 2015). OLC vil variere for ulike leirer, men vil generelt øke med økende mengde

vanninnhold, organisk innhold og plastisitetsindeks. Flere studier, blant annet en gjort av Cherian og Arnepalli (2015), har pekt på utfordringen med å finne OLC da ulik mineralogi kan ha svært stor betydning for resultatet. Den beste metoden for å finne ”optimalt kalkinnhold” vil derfor være å studere den enkelte leira i forhold til geotekniske egenskaper og mineralogi.

Dash og Hussain (2012) viste at tilførsel av for mye kalk ville føre til redusert fasthet. Leirer med høyt innhold av kvarts (SiO_2) fikk reduksjon i fasthet ved et lavere kalkinnhold, sammenlignet med leirer med mindre innhold av kvarts. Figur 3.4 viser en ekspansiv leire med høy plastisitet og en ikke-ekspansiv leire tilsatt ulike mengder kalk. Den ekspansive leiren til høyre har montmorillonitt, kvarts og aluminiumoksid som dominerende mineraler, mens den ikke-ekspansive leira til venstre hovedsakelig inneholder kaolinit, kvarts og magnetitt. Figur 3.4 viser at OLC er ca. 9%, og 5%. Leiren med størst innhold av kvarts har et lavere optimalt kalkinnhold. Ved kalkinnhold over OLC reduseres styrken markant, spesielt for leira til høyre med høyt kvarts-innhold.



Figur 3.4: Enaksial skjærstyrke ved ulike kalkinnhold i to ulike leirer, modifisert etter (Dash & Hussain, 2012).

Som skrevet i avsnitt 3.1 finnes det flere ulike bindemidler, i tillegg til ulike blandingsforhold av bindemiddelet. Hvilket type bindemiddel som er best egnet vil variere i forhold til hvilken jord som skal stabiliseres. Brent kalk og sement gir ofte svært gode stabiliseringsresultater ved at hydratisering av sement gir rask fasthetsutvikling, mens hydratisering av kalk danner reaksjonsprodukter som deltar i den mer langsomme pozzolane reaksjonen. I Norge er kalksement mest brukt, etterfulgt av Multicem. Både kalksement og Multicem kan inneholde ulike sement- og kalktyper i tillegg til CKD (i Multicem).

3.3.2 Innblandingsforhold

For å oppnå ønsket skjærfasthet i kalksementpeler er det viktig at bindemiddelet blandes godt med omliggende masser. Innblandingen vil være avhengig av rotasjonshastighet, visptype og stige-hastighet, noe som er avgjørende faktorer for å oppnå en homogen pel (NGF, 2012).

Som nevnt tidligere vil ulike bindemidler reagere ulikt i kontakt med jord, og dermed vil bindemiddelet som velges påvirke innblandingsarbeidet. Kalk vil tørke ut leire slik at det blir grov og vanskelig å jobbe med. Sement krever generelt mer innblandingsarbeid enn kalk (NGF, 2012). På grunn av reaksjonsproduktene fra innblandingen av sement binder sammen partiklene i jorden, er det svært viktig at sementen fordeles jevnt i jordmassene. Motsetningsvis for kalken som er løselig, vil dette ikke være like avgjørende for innblanding av kalk. Høy innblandingsmengde vil også kreve mer energi for å homogenisere massene.

Videre vil egenskaper hos jorden vil påvirke innblandingsarbeidet. En fastere leire med mer innhold av silt og/eller sand vil kreve mer arbeid. Tilsvarende gjelder for middels til meget plastiske leirer. Er vanninnholdet lavt eller nærmer seg plastisitetsgrensen kan det være behov for å tilsette vann (NGF, 2012).

3.3.3 Herdeforhold

Temperatur

Både hydratisering av kalk og dannelse av reaksjonsprodukter fra sementen foregår under høy varmeutvikling. Wiersholm undersøkte temperatureffekter i stabilisert materiale (Wiersholm, 2018). Resultatene viste at stabilisert materiale som herdet ved høy temperatur oppnådde høyere fasthet og stivhet enn materiale herdet ved lav temperatur. Reaksjonshastigheten til bindemidlene vil øke ved høyere temperaturer og fasthetsutviklingen skjer raskere. Sammenhengen mellom fasthetsutvikling og temperatur er derfor en viktig faktor for forskjellen mellom stabilisering i felt og laboratorium. Varmeutviklingen ved innblanding av bindemiddel i laboratorium vil være svært liten. Dette skyldes at temperaturen i prøven først og fremst vil bli påvirket av temperaturen som omgir prøven. I felt vil volumet av en kalksementpel være betydelig større og pelen vil dermed kunne oppnå høye temperaturer. Sement kan øke temperaturen i jorda med $5 - 10^{\circ}C$, mens kalk kan øke temperaturen med $40 - 50^{\circ}C$ (Åhnberg mfl., 1995).

Tid

Fasthetsutviklingen av stabilisert materiale pågår lenge etter innblanding av bindemidler. Størst fasthetsutvikling skjer de første dagene og månedene, men studier viser at utviklingen kan fortsette i flere år. Sement vil i hovedsak ha størst fasthetsutvikling de første ukene etter innblanding, mens kalk har en mer langsom utvikling. Hydratisering av kalsiumsilikater ved innblanding av sement skjer raskt og vil gi det største bidraget for fasthetsutviklingen. Ved innblanding av kalk vil det største fasthetsbidraget komme fra pozzolane reaksjoner. Som skrevet i kapittel 3.4 er pozzolane reaksjoner langsomme, og den endelige fastheten oppnås først etter flere år.

Trykk

Jordelementer i felt er preget av trykk avhengig av densiteten på overliggende jord, dybde og hviletrykkkoeffisienten K'_0 . Sammenlignet med prøver preparert på laboratorium utgjør dette en stor forskjell. Kalksementstabilisert leire vil være spenningsavhengig og dermed oppnå høyere styrke og stivhet med dybden. (Engeset, 2018) studerte betydningen av spenningsnivå under herding. I masteroppgaven ble det observert en liten økning i fasthet for prøver utsatt for trykk under herding.

3.3.4 Jordas egenskaper

Virkingen av bindemidler varierer i ulike jordarter. Vanninnhold, plastisitet, kornstørrelse, mineralogi, pH-verdi og organisk innhold er parametere og egenskaper som i stor grad vil påvirke oppnådd fasthet og stivhet. Tabell 3.3 forkarer i korte trekk hvordan ulike parametere og egenskaper vil påvirke stabiliseringsresultatet.

Tabell 3.3: Egenskaper som påvirker stabiliseringsresultatet.

Geotekniske egenskaper	Påvirkning av styrkeutvikling
Vanninnhold	Et lavere vanninnhold vil oftest gi høyere fasthet sammenlignet med et høyt vanninnhold. For lavt vanninnhold vil på andre siden stanse fasthetsutviklingen da bindemiddelet er avhengig av vann for å reagere
Plastisitet	Stabiliseringseffekten av kalk og sement vil avta med økende plastisitetsindeks (Broms, 1991). Høy plastisitet kan gjøre innblandingsarbeid med sement utfordrene og det kan være gunstig å kombinere kalk og sement.
Kornstørrelse	Et avtagende leirinnhold vil øke effekten av sement. Er leirinnholdet over 50% kan stabilisering med sement være krevende og det bør brukes kalk i tillegg (Broms, 1991). Sement vil derimot egne seg bedre enn kalk i jordarter med høy andel silt (SVV, 2014).
Mineralogi	Sammensetning av leiras mineralogi vil ha betydning for stabiliseringsresultatet ved bruk av kalk og sement (Cherian & Arnepalli, 2015). Leirer med høyre innhold av kaolinit og illitt er i følge (Bell, 1996) mer egnet for sementstabilisering enn leirer som inneholder ekspansive leirmineraler som motmorillonitt. Monmorillonittiske og kaolinitiske jordarter vil være pozzolane reagenter og vil bidra til økt fasthet sammenlignet med leirer som inneholder illitt, kloritt eller vermikulitt.
pH-verdi	Som nevnt i kapittel 3.4 er pH-verdi en viktig forutsetning for at de pozzolane reaksjonene. pH-verdien øker ved tilsetning av kalk og opprettholdes slik at de langsomme pozzolane reaksjonene får tid til å utvikles. En pH-verdi på over 10 bør inntreffe for at reaksjonsprodukter skal dannes, og er stabile om pH-verdien holder seg over 5. pH-verdi lavere enn 4,5 vil løse opp reaksjonsproduktene (Åhnberg mfl., 1995)
Organisk innhold	Høyt organisk innhold vil gi dårlig fasthet sammenlignet med leirer med lavt eller ingen organisk innhold. Humussyrer vil danne reaksjonsprodukt som er lite løselig og inneholder lav konsentrasjon av kalsiumioner. I tillegg til at organiske stoffer hemmer pozzolane reaksjonen vil sur pH føre til at reaksjonene stopper opp.

(Skjæran, 2020) studerte innblandingsforsøk av ulike leirer i norske prosjekter. Resultatene viste blant annet at vanninnhold og plastisitetsindeksen hadde spesielt stor betydning for fasthetsutvikling i norske leirer. Leirer med høyest vanninnhold og plastisitetsindeks, oppnådde de aller laveste skjærfasthetene. Resultatene viste også hvordan kvikkleirer generelt oppnådde høyere fastheter enn leirer som var mindre sensitive.

3.3.5 Forhold mellom vann og bindemiddel

w/b-tall

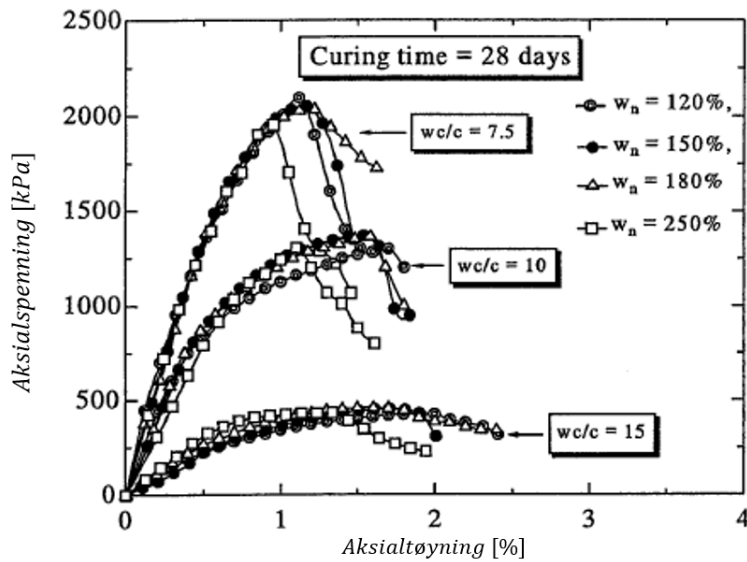
En sentral og viktig parameter for fasthetsutvikling i kalksementstabilisert leire er forholdet mellom vanninnhold og bindemiddel, w/b. Økt innblandingsmengde og synkende vanninnhold øker normalt fastheten. Som skrevet i avsnitt 3.3.1 kan likevel innblanding av for mye kalk hindre videre fasthetsutvikling.

w/c-tall

Sement er avhengig av porevann i jorda for å danne reaksjonsprodukter. Forholdet mellom vann og sement, w/c, er derfor en sentral parameter for fasthetsutvikling. I følge (Miura mfl., 2001) er w/c-tallet en av de viktigste parameterne for å analysere fasthet og deformasjon i sementstabilisert leire. Generelt vil fastheten i sementstabiliserte leirer øke når w/c-tallet synker. Lavt w/c-tall resulterer i tettere avstand mellom kornene i den stabiliserte leiren, sammenlignet med høyt w/c-tall som vil resultere i større avstand og høyere porøsitet. Ligning 3.5 viser hvordan w/c-forholde beregnes.

$$w/c = \frac{m_w}{m_c} = \frac{m - m_s}{m_c} \quad (3.5)$$

Miura mfl. (2001) undersøkte forholdet mellom vanninnhold og sement i leire med høyt vanninnhold fra Saga i Japan. Studien viste at det var mulig å opprettholde samme w/c-tall selv med ulikt vanninnhold ved å også variere sementmengden. Undersøkelsen tok for seg prøver med ulikt vanninnhold og likt w/c-tall, i tillegg til ulike w/c-tall. Figur 3.5 viser resultater fra enaksial trykkforsøk på prøver med ulikt w/c-tall herdet i 28 dager.



Figur 3.5: Enaksial trykkforsøk på prøver med ulikt w/c-tall, modifisert etter (Miura mfl., 2001).

Figur 3.5 viser at prøver med likt w/c-tall har lik oppførsel til tross for ulik mengde vann. Prøver med lavt w/c-tall oppnår høyere fasthet sammenlignet med prøver med høyt w/c-tall.

Kapittel 4

Densitet i kalksementpeler

Dette kapitlet ser på hvordan densiteten til materialet påvirkes ved preparering av kalksementprøver i laboratorium og stabilisering i felt.

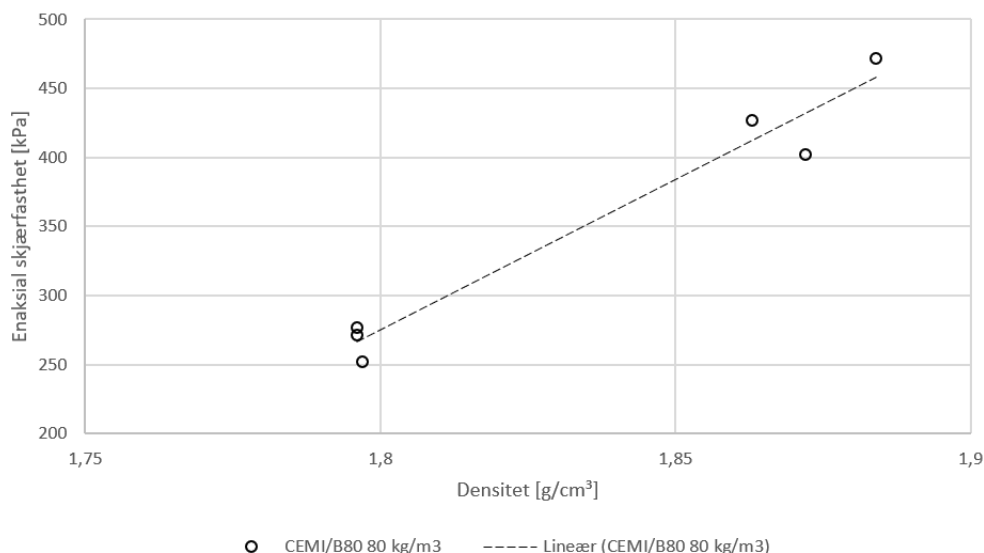
4.1 Generelt

De siste årene er det gjort flere studier av kalksementstabilisering. Prosedyrer for stabilisering i felt og laboratorium varierer mellom ulike land, men likevel er det en trend der kalksementprøver har stor variasjon i oppnådd densitet. (Paniagua mfl., 2019) viste at prøver preparert i laboratorium iht. NGFs prosedyre resulterte i en densitet $\pm 5\%$ av in-situ densitet. Variasjonen i densiteten påvirker hvilken styrke som oppnås i tillegg til å skape inhomogenitet i pelen.

4.2 Kalksementprøver preparert i laboratorium

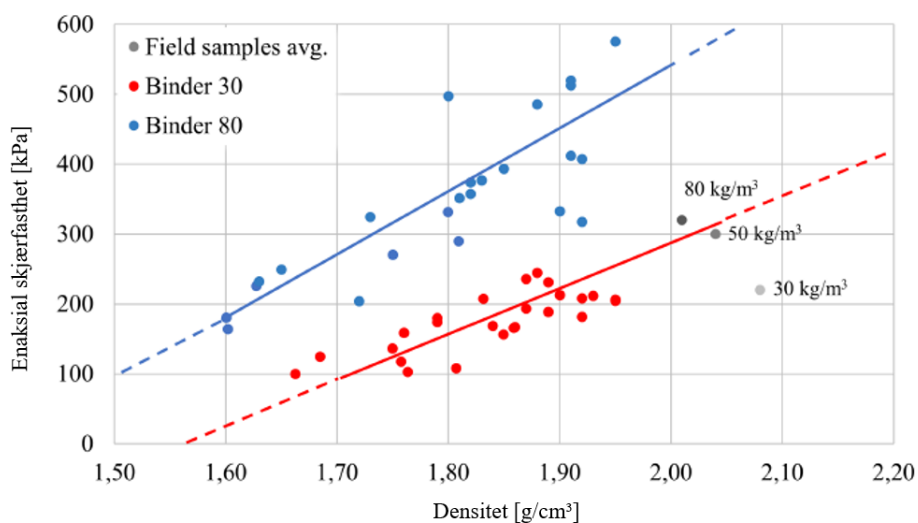
4.2.1 Skjærfasthet og densitet

Som skrevet i kapittel 2.2.1 beskriver densiteten mengde stoff delt på volumet av stoffmengden. Kalksementprøver er et porøst materiale, dvs. at det oppstår hulrom mellom partiklene i prøven og densiteten er dermed avhengig av hvor godt prøven er pakket sammen. I forstudien til masteroppgaven ble det preparert kalksementprøver med lik mengde og type bindemiddel, men med ulik densitet (Baustad, 2021). Målet var å se hvordan ulike densiteter påvirket den udrenerte skjærfastheten. Det ble brukt kvikkleire fra Flotten i Trøndelag med naturlig vanninnhold på 30-40%, udrenert skjærfasthet 60-80 kPa og in-situ densitet på 1,8-1,9 g/cm³. Det ble brukt B80 og CEMI i et blandingsforhold på 50/50 og en innblandingsmengde på 80 kg/m³. Figur 4.1 viser skjærfastheten fra enaksialforsøk plottet mot densitet etter endt herdig. Resultatene viste at økt densitet i laboratorieprøver gir økt skjærfasthet. Det understrekes at studien var svært begrenset og inneholder lite data.



Figur 4.1: Enaksial skjærfasthet plottet mot densitet i laboratorieprøver, modifisert etter (Baustad, 2021).

Også i masteroppgaven av (Falle, 2021) ble denne trenden observert. Leire fra Stjørdal ble stabilisert med kalk og sement med ulike innblandingmengder. Den ustabiliserte leira hadde et naturlig vanninnhold på ca. 30%, undrenert skjærstyrke på 50-55 kPa og densitet på 2,08 g/cm³. Leiren var middels plastisk med en plastisitetsindeks på 11% og middels sensitiv med en sensitivitet på 9. Figur 4.2 viser at laboratorieprøvene hadde tilnærmet lineær korrelasjon mellom densitet og skjærfasthet.

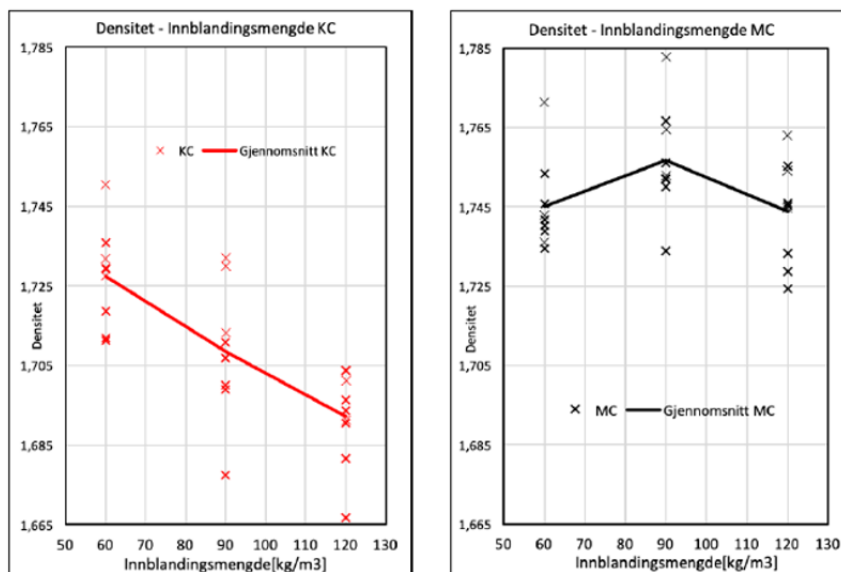


Figur 4.2: Enaksial skjærfasthet plottet mot densitet i laboratorieprøver, modifisert etter (Falle, 2021).

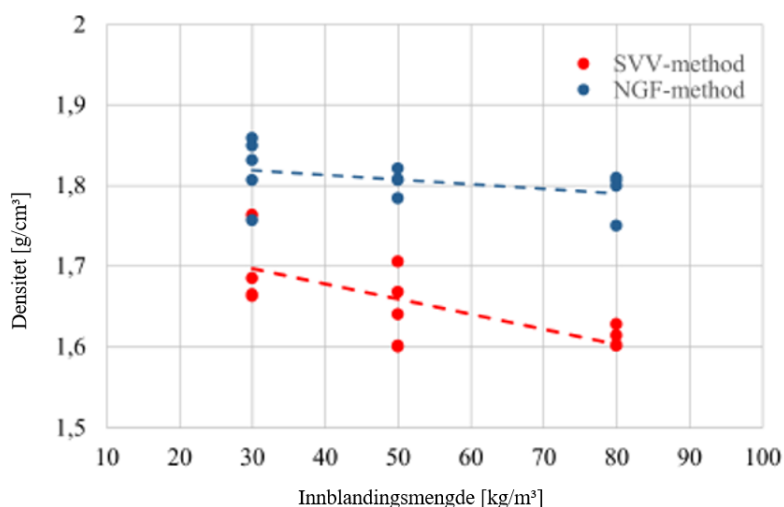
4.2.2 Mengde og type bindemiddel

I masteroppgavene av (Eidsmo, 2019) og (Falle, 2021) ble det presentert sammenhenger mellom innblandingmengde og densitet. Eidsmo benyttet seg av Statens Vegvesen (SVV, 2014) sin laboriemetode mens Falle preparerte prøvene sine i henhold til både Statens Vegvesen (SVV, 2014) og NGF (NGF, 2012) sine laborieprosedyrer. Eidsmo brukte kvikkleire fra Flotten sør for Trondheim mens Falle brukte, som nevnt tidligere, leire fra test-felt nord for Stjørdal. I begge

studiene ble det brukt kalksement i blandingsforhold 50/50 og laget prøver med flere ulike innblandingsmengder. I Eidsmos masteroppgave ble det i tillegg preparert prøver med Multicem. Figur 4.3 viser sammenhengen mellom densitet og innblandingsmengde fra (Eidsmo, 2019) og Figur 4.4 viser resultatene fra (Falle, 2021).



Figur 4.3: Innblandingsmengde mot densitet i laboratorieprøver. Kalksement til høyre og Multicem til venstre, modifisert etter (Eidsmo, 2019). Densitet i ustabilisert leire var ca $1,96 \text{ g/cm}^3$.



Figur 4.4: Innblandingsmengde mot densitet i laboratorieprøver, modifisert etter (Falle, 2021). Densitet i ustabilisert leire var ca $2,08 \text{ g/cm}^3$.

Resultatene fra (Eidsmo, 2019) og (Falle, 2021) viser at økt mengde bindemiddel resulterer i synkende densitet for innblanding med kalksement. Som skrevet i kapittel 3.2.2 vil den raske reaksjonen mellom vann og kalk bidra til uttørkning av leiren, noe som vil si at økt mengde bindemiddel vil resultere i en mer finkornet og sprø leirprøve som er vanskelig å komprimere. Resultatene til Falle i Figur 4.4 viser at prøvene preparert med NGF-metoden i gjennomsnitt oppnår 9 – 10% høyere densitet enn ved bruk av SVV-metoden.

Figur 4.3 viser også hvordan kalksement og Multicem påvirket densiteten ulikt. Blandingen med Multicem oppnådde generelt høyere densitet sammenlignet med kalksement. Ettersom Multicem

inneholder en mindre andel ren kalk, vil hydratiseringen av kalk skje saktere og blandingen kan tenkes å være lettere å homogenisere. Under forsøket til (Eidsmo, 2019) ble dette observert. Kalksement-blanding virket å tørke ut leiren i større grad enn blandingen med Multicem, og var dermed vanskeligere å komprimere. Ved innblanding av Multicem øker densiteten ved innblandingmengde mellom 60 kg/m^3 - 90 kg/m^3 før den synker ved tilsetning av 120 kg/m^3 .

Både studien til (Falle, 2021) og (Eidsmo, 2019) peker på hvordan laboratoripreparerte prøver ender opp med langt lavere densitet sammenlignet med den originale leiren. Resultatene fra masteroppgavene viser at densiteten synker med 12-19 % avhengig av leire og prosedyre. Med kunnskapen om at densitet kan ha stor betydning for oppnådd fasthet, antas det at resultatene til både (Falle, 2021) og (Eidsmo, 2019) hadde oppnådd høyere skjærfastheter gitt at prøvene hadde en høyere og mer "riktig" densitet. Det er vanskelig å gi konkrete holdepunkter på hva som utgjør "riktig" densitet, da densiteten til kalksementpeler i felt trolig vil variere i forhold til innblandingmengde, innblandingstype og jordegenskaper.

4.3 Kalksementpeler i felt

I "Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler" (NGF, 2012) foreslås det kontroll av 1% av peleantallet i byggeprosjekter. Dette delkapittelet presenteres tre ulike prosjekter i trøndelag der det er gjennomført kalksementstabilisering, herunder dokumentasjon av det stabiliserte materialet i laboratorium.

4.3.1 E6 Kvithammar-Åsen

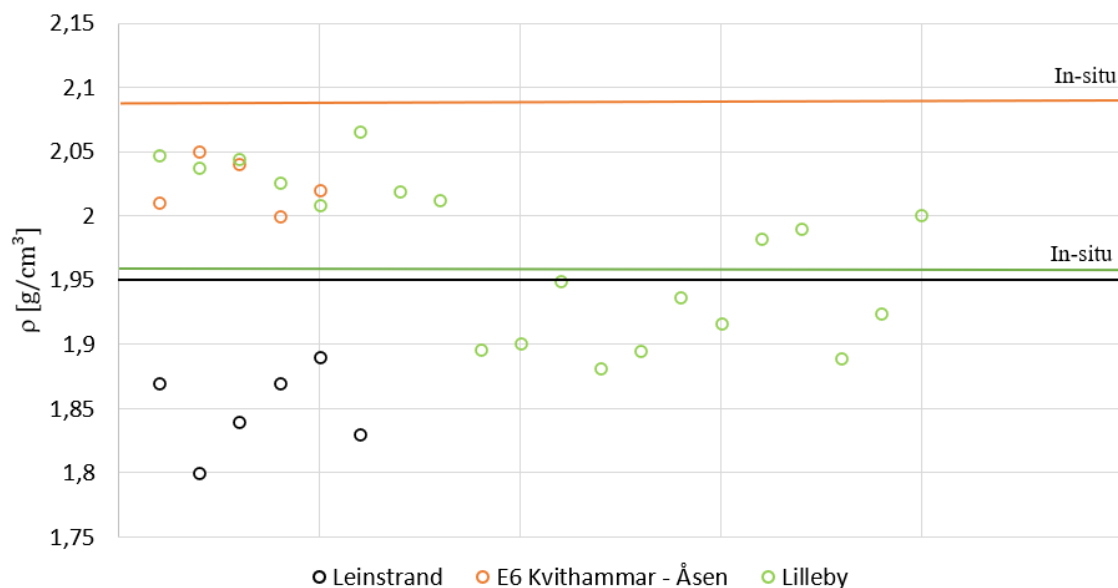
I masteroppgaven av (Falle, 2021) ble det også studert prøver fra kalksementstabilisert leire i felt. I prosjektet ble det brukt B60/CEMI i blandingsforhold 50/50 og tre ulike innblandingmengder på henholdsvis 30, 50 og 80 kg/m^3 .

Densiteten var tilnærmet lik for de ulike innblandingmengdene, med en liten trend av høyere densitet for lavere bindemiddelmengde. Den gjennomsnittlige densiteten var 2-3% lavere enn in situ densitet, og vises i Figur 4.5.

4.3.2 E6 Trondheim-Melhus (Leinstrand)

I forbindelse med veiprojektet E6 Trondheim-Melhus som ble ferdigstilt i 2019, ble store deler av området på Leinstrand kalksementstabilisert. Den ustabiliserte leiren besto av lavplastisk kvikkleire med høy sensitivitet. Leiren hadde en densitet på ca. 1.95 g/cm^3 og udrendert skjærstyrke på 20-40 kPa. Området ble stabilisert med B80/CEMII, blandingsforhold 50/50 og innblandingmengde på 90 kg/m^3 . For kontroll av det kalksementstabiliserte området ble Multiconsult engasjert for å utføre laboratorieundersøkelser av utvalgte kalksementpeler. Det ble gjennomført prøvegraving med utskjæring av leirblokker i kvotene +34, +35,5 og +37 (Multiconsult, 2017). Figur 4.5 viser at den kalksementstabiliserte leiren på Leinstrand i gjennomsnitt hadde 5% lavere densitet sammenlignet med in-situ densitet.

Som nevnt tidligere er det funnet gode korrelasjoner mellom oppnådd fasthet og densitet i laboratoriet der økende densitet gir økt fasthet. I Figur 4.6 er oppnådd skjærfasthet plottet mot densitet i kalksementstabiliserte prøver hentet i felt. Resultatene fra feltprøvene på Leinstrand viser imidlertid ingen sammenheng mellom densitet og oppnådd skjærfasthet.



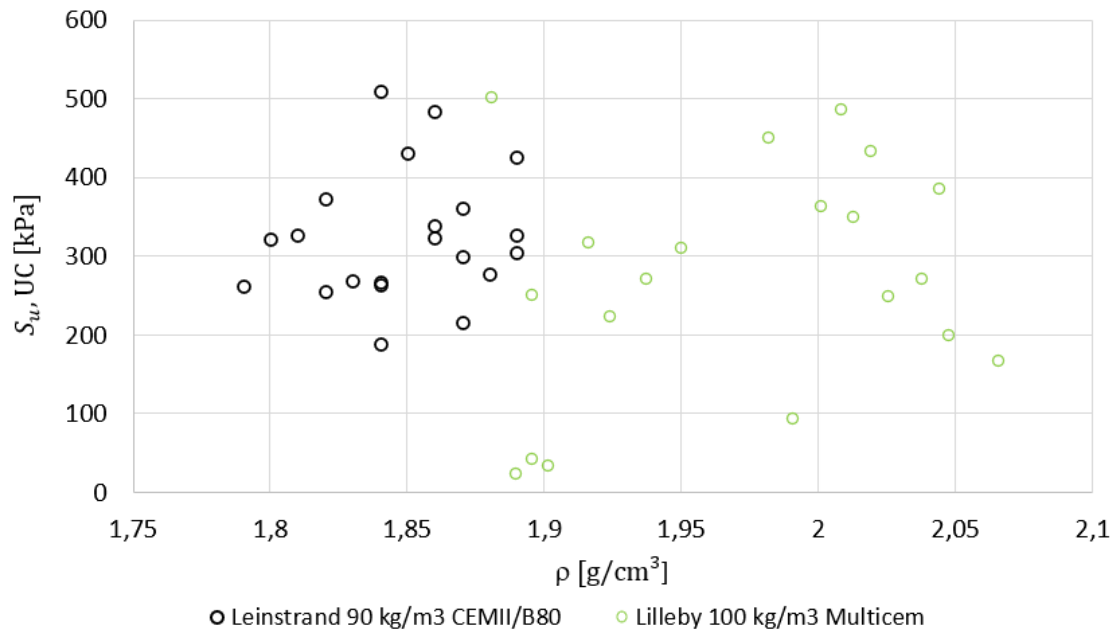
Figur 4.5: Variasjon i densitet i kalksementstabilisert leire i felt fra E6 Kvithamar-Åsen, Leinstrand og Lilleby, data hentet fra (Falle, 2021), (Multiconsult, 2017).

4.3.3 Lilleby felt B4

I dette prosjektet ble det kalksementstabilisert for å oppnå tilstrekkelig stabilitet i en nærliggende skråning i forbindelse med bygging av en boligblokk på Lilleby øst i Trondheim. Utførte grunnundersøkelser viser at leiren i område har et naturlig vanninnhold på ca. 30-35% og en densitet på 1,95 g/cm³. Leiren er middels fast til fast med udrenert skjærstyrke på 20-40 kPa, lite sensitiv med sensitivitet på 5-8 og middels plastisk med plastisitetsindeks på 17. I prosjektet ble det brukt Multicem og en innblandingmengde på 100 kg/m³. Densiteten i det kalksementstabiliserte materialet på Lilleby har mye større variasjoner sammenlignet med E6 Kvithamar-Åsen og Leinstrand. Figur 4.5 viser at densiteten i det stabiliserte materialet varierer mellom +4% og -4% sammenlignet med in-situ densitet. Det bør imidlertid poengteres at prøvene fra Lilleby ble tatt opp av ved hjelp av prøvesylinder bare noen timer etter installasjon, da materialet fortsatt var relativt mykt. Det kan spekuleres om densiteten har blitt forstyrret ved sammenpressing og/eller forlengelse av materialet ved opptak.

Figur 4.6 viser oppnådd fasthet mot densitet i de stabiliserte feltprøvene fra Lilleby. Resultatene fra feltprøvene på Lilleby viser heller ingen sammenheng mellom oppnådd fasthet og densitet. Det er i tillegg svært stor spredning i oppnådd fasthet i feltprøvene noe som gjør det utfordrende å finne karakteristiske verdier for skjærstyrken i det aktuelle området.

Figur 4.7 viser en feltprøve hentet fra stabilisert materiale fra Lilleby. Bildet viser et tydelig lag med bindemiddel som ikke har blitt homogenisert eller reagert med omliggende materiale. Slike lag med ureagert bindemiddel antas å være en av årsakene til at noen prøver oppnår dårligere skjærfasthet enn andre, og tyder på at det er utfordrende å kontrollere det som faktisk foregår nede i grunnen ved installasjon av kalksementpeler i felt. Dette diskuteres nærmere i kapittel 9.4.



Figur 4.6: Oppnådd skjærfasthet mot densitet i kalksementstabilisert leire i felt fra Leinstrand og Lilleby.



Figur 4.7: Tydelig lag med ureagert bindemiddel i feltprøve fra Lilleby.

Kapittel 5

Geotekniske parametere ved bruk av seismikk

Kapittelet beskriver hvordan seismikk kan brukes i geoteknisk sammenheng. Herunder presenteres korrelasjoner mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet i kalksementstabilisert leire. Videre gis det en kort innføring i hvordan man kan måle skjærbølgehastighet på laboratorium ved bruk av bender element.

5.1 Generelt

I dag kontrolleres styrken og homogeniteten i bindemiddelstabiliserte peler med FOPS (forinstallert omvendt pelesondering). FOPS består av en vinge med en tilknyttet wire som installeres i underkant av pelen. Wiren går gjennom pelen og opp til terrengoverflaten, og skjærfastheten i pelen bestemmes basert på målte verdier ved opptrekking av FOPSen. Som skrevet tidligere skjer styrkeutviklingen i pelen raskt og wiren kan dermed ryke under opptrekking. Testen må derfor utføres etter 3-7 dager mens skjærfastheten enda er relativt lav. Dette vil være svært tidlig i herdeforløpet noe som gjør at oppnådd fasthet ofte måles til en lavere verdi enn senere i herdeforløpet.

I løpet av de siste årene har bruken av seismikk for å måle styrke i stabiliserte masser økt. Ved bruk av seismikk vil det være mulig å undersøke pelenes fasthet over lengre tid, alt fra uker til måneder etter installasjon. Måling av skjærbølgehastighet i bender element i laboratoriet er derfor blitt nyttig for å validere og supplere innsamlet data fra felt.

5.2 Skjærmodul G_{maks}/G_0

De fleste geotekniske utfordringene knyttet til seismikk er preget av små tøyninger. Små tøyninger, typisk skjærtøyninger under 0,001% vil ikke forårsake ikke-lineær spennings-/tøyningstilstand i jorda og en lineær modell kan derfor antas (Kramer, 1996). Det er skjærmodulen G_0 eller G_{maks} som er knyttet til disse små tøyningene.

Ifølge elastisitetsteorien kan G_{maks} beregnes ut ifra skjærbølgehastigheten ved ligning 5.1:

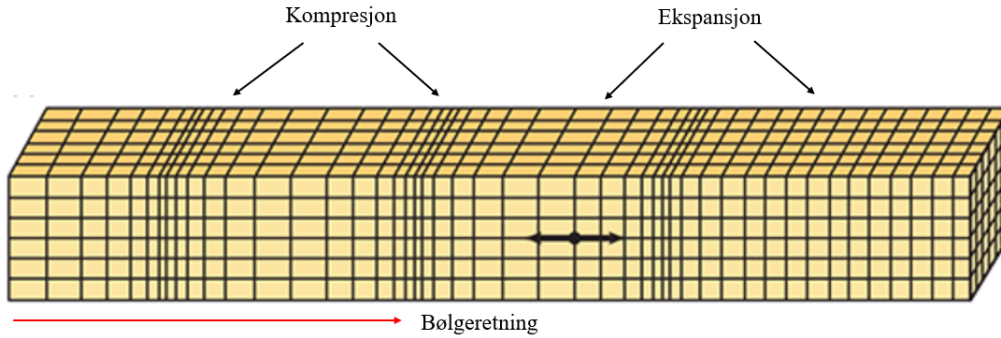
$$G_{maks} = \rho * v_s^2 \quad (5.1)$$

der G_{maks} er skjærmodulen, v_s er skjærbølgehastigheten og ρ er densiteten.

5.3 Seismiske bølger

5.3.1 Trykkbølge

Trykkbølge, også kalt primærbølge (p-bølge), har forskyvninger parallelt med bølgeretningen. Bølgen forplanter seg ved kompresjon og ekspansjon av partikler som vist på Figur 5.1.



Figur 5.1: Illustrasjon av forplantning av p-bølge, modifisert etter (Kramer, 1996).

Differensialligningen til p-bølgen er gitt ved: (Nordal & Eiksund, 2021).

$$\frac{\partial^2 \epsilon_v}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + 2G)}{\rho} \Delta^2 \epsilon_v = v_p^2 \Delta^2 \epsilon_v \quad (5.2)$$

Likningen er en funksjon av volumetrisk tøyning, ϵ_v , som beskriver deformasjon uten skjær eller rotasjon. P-bølgen vil derfor ikke skape rotasjon i materialet.

Fra Likning 5.2 kan hastigheten til p-bølgen uttrykkes som:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (5.3)$$

5.3.2 Skjærbølge

Skjærbølge, også kalt sekundærbølge (s-bølge), er tverrgående bølger. Dette betyr at partiklene beveger seg vinkelrett på bølgeutbredelsen. S-bølger kan bevege seg i horisontal retning med vertikale bevegelser (HV-bølge), i vertikal retning med horisontal bevegelse (VH-bølge) eller i horisontal retning med horisontal bevegelse (HH-bølge). Figur 5.2 illustrerer en HV-bølge.

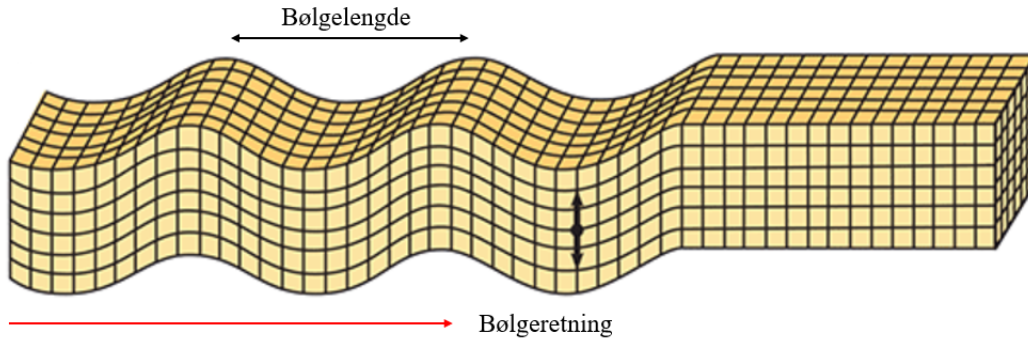
Differensialligningen til s-bølgen er gitt ved: (Nordal & Eiksund, 2021)

$$\frac{\partial^2 \omega_x}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \Delta^2 \omega_x = v_s^2 \Delta^2 \omega_x \quad (5.4)$$

der ω_x er rotasjon om x-aksen.

Fra ligning 5.4 kan hastigheten til p-bølgen uttrykkes som:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5.5)$$



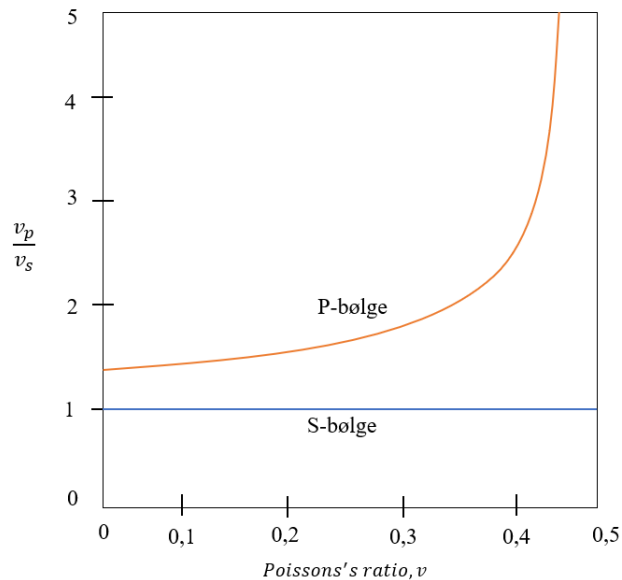
Figur 5.2: Illustrasjon av forplantning av s-bølge, modifisert etter (Kramer, 1996).

5.3.3 Forhold mellom P-bølge og S-bølge

Ligning 5.6 beskriver forholdet mellom p-bølgen og s-bølgen og er gitt ved:

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (5.6)$$

Ligning 5.6 viser at hastigheten til p-bølgen er betydelig høyere enn s-bølgen. Dette er også illustrert i Figur 5.3. Ved måling av bølgehastighet i laboratorium kan hastigheten av trykkbølgen skape forstyrrelser ved registrering av første ankomende skjærbølge. Nøyaktig identifisering av skjærbølgen er nødvendig for å bestemme den korrekte skjærbølgehastigheten, og hastighetsforskjellen på p-bølgen og s-bølgen kan i noen tilfeller gjøre målinger på laboratoriet utfordrende. Dette diskuteres også i kapittel 5.6.



Figur 5.3: Variasjon av bølgehastigheten til trykk- og skjær-bølge som funksjon av Poisson's ratio, modifisert etter (Nordal & Eiksund, 2021).

5.4 Skjærfasthet og skjærbølgehastighet

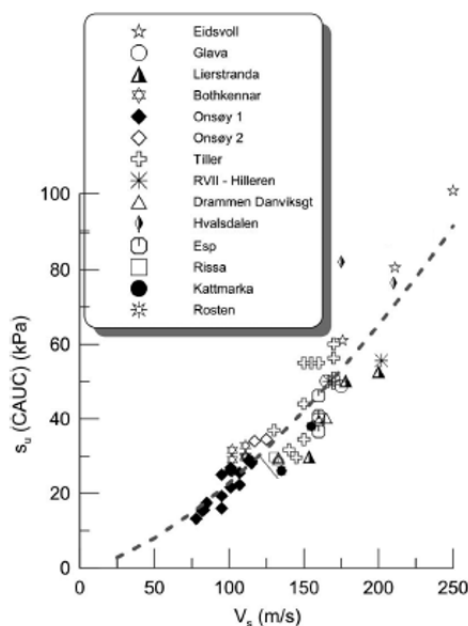
Som skrevet tidligere er både G_{maks} og v_s avhengig av felles parametere og blir ofte relatert til udrenert skjærstyrke. I kalksementstabilisert leire er skjærstyrken avhengig av sementeringen mellom kornene, og det antas at faktorer som påvirker skjærmodulen er de samme som påvirker fastheten (Dannewitz mfl., 2005). Det er utviklet flere sammenhenger mellom skjærbølgehastighet v_s , og skjærfasthet s_u , både i norske leirer og stabiliserte leirer. Utrykkene som beskriver denne sammenhengen har ofte lik form med ulike konstanter som vist i likning 5.7.

$$v_s = a * s_u^b \quad (5.7)$$

Konstantene vil være avhengig av test-metode i tillegg til type leire.

5.4.1 Norske leirer

I norske leirer er det etablert en sammenheng mellom skjærfasthet fra udrenert aktive treaksialforsøk (CAUC) og in-situ skjærbølgehastighet. (L'Heureux & Long, 2017) sammenstilte skjærfasthet og skjærbølgehastighet fra 28 ulike felt i Norge og plottet dem som vist i figur 5.4. Figur 5.4 viser økende s_u , ved økende v_s , og likning 5.8 beskriver den beste korrelasjonen mellom skjærfasthet og skjærbølgehastighet.



Figur 5.4: In-situ skjærbølgehastighet v_s mot skjærfasthet s_u fra treaksialforsøk, modifisert etter (L'Heureux & Long, 2017).

$$s_{u,CAUC} = 0,021 * v_s^{1,52} \quad (5.8)$$

Resultatene fra (L'Heureux & Long, 2017) viser en tydelig korrelasjon mellom skjærfasthet og skjærbølgehastighet i norske leirer.

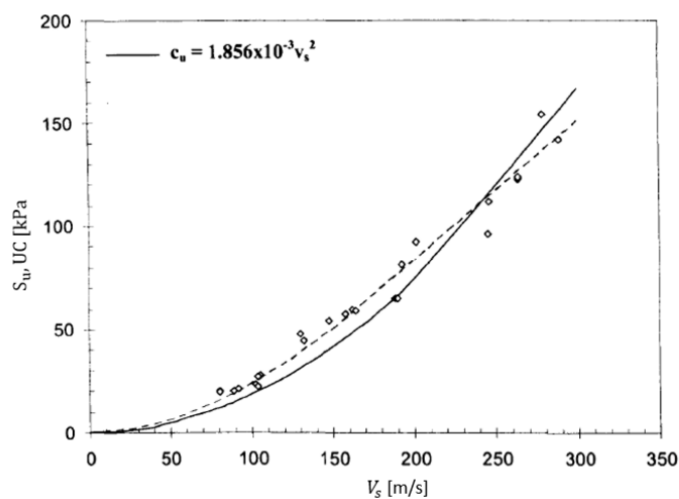
5.4.2 Stabilisert leire

(Dannewitz mfl., 2005) målte skjærbølgehastighet v_s , i kalksementstabiliserte prøver preparert for enaksialforsøk. I studien ble det brukt leire fra Uppsala i Sverige med densitet på $1,5 - 1,7 \text{ g/cm}^3$, vanninnhold w , på $50 - 85\%$, skjærstyrke på $12-20 \text{ kPa}$ og plastisitetsindeks I_P , på ca. 34% . Prøvene ble preparert med kalk og sement i blandingsforhold $50/50$, og hadde en innblandingsmengde på 80 og 120 kg/m^3 . Likning 5.9 ga god korrelasjon mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet i studien.

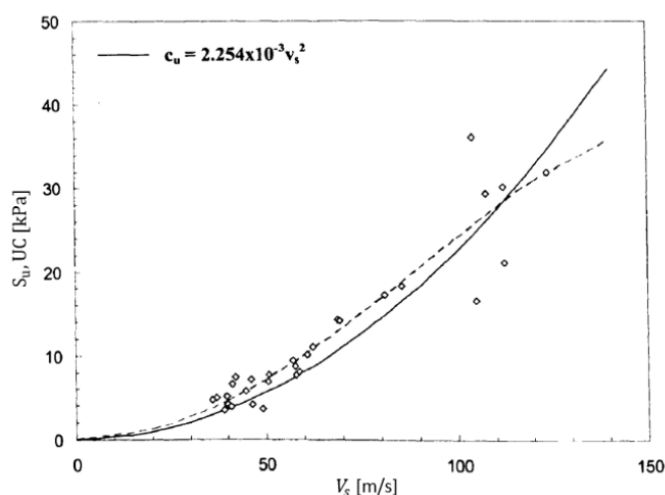
$$s_{u,UC} = 0,0424 * v_s^{1,462} \quad (5.9)$$

Også (Chan, 2006) gjorde laboratorieundersøkelser av skjærbølgehastighet i stabilisert bløt leire. Det ble brukt leire fra det samme område som (Dannewitz mfl., 2005), Uppsala i Sverige, i tillegg til leire fra Batu Paht sør i Malaysia. Leiren fra Malaysia hadde densitet på ca. $1,4 \text{ g/cm}^3$, vanninnhold w , på 74% og plastisitetsindeks I_P , på 46% . Leirene ble tilsatt $3-10\%$ sement.

På samme måte som (Dannewitz mfl., 2005) ble det observert gode korrelasjoner mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet som vist i figur 5.5. Korrelasjonene er gitt ved likning 5.10 og 5.11 for henholdsvis leiren fra Uppsala og Malaysia.



(a)



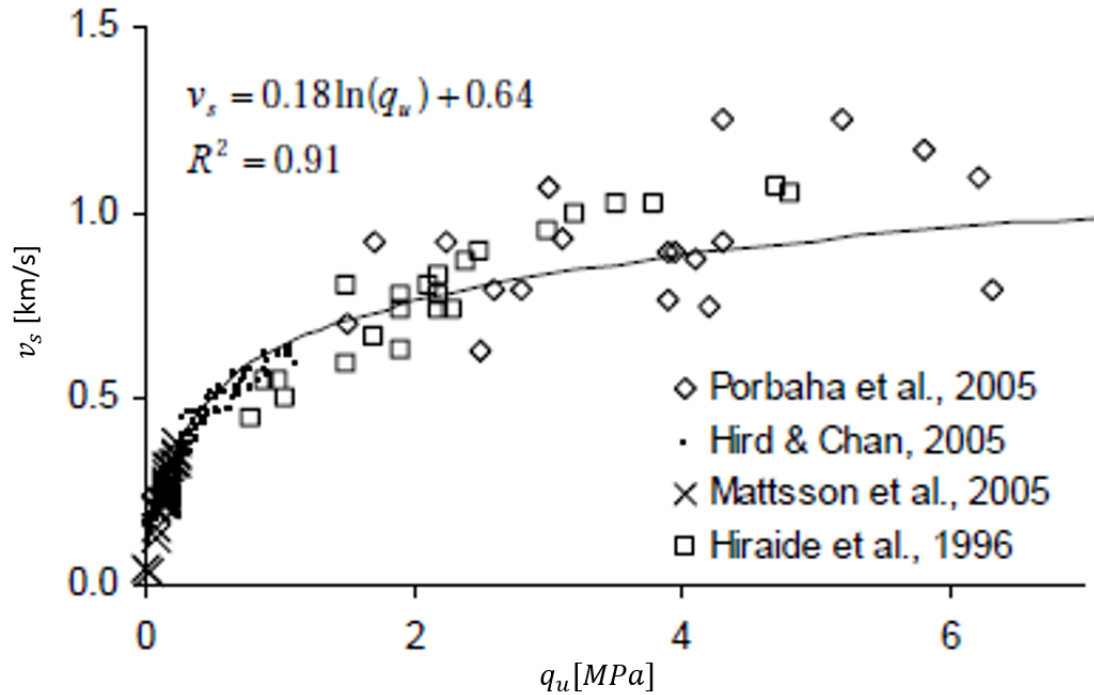
(b)

Figur 5.5: (a) v_s mot $s_{u,CU}$ i stabilisert leire fra Uppsala (b) v_s mot $s_{u,CU}$ i stabilisert leire fra Malaysia, modifisert etter (Chan, 2006).

$$s_{u,UC} = 0,001856 * v_s^2 \quad (5.10)$$

$$s_{u,UC} = 0,002254 * v_s^2 \quad (5.11)$$

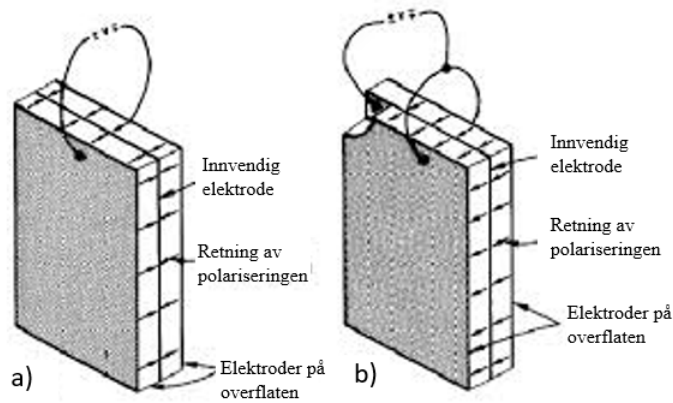
(Chan & Low, 2010) samlet resultater fra målinger av skjærbølgehastighet og enaksial trykkfasthet fra flere ulike studier. I tillegg til de presenterte laboratorieundersøkelsene ovenfor, ble resultater fra (Porbaha & Ghaheri, 2005) og (Hirai mfl., 1996) sammenlignet med hverandre. Figur 5.6 indikerer en sterk korrelasjon mellom skjærbølgehastighet og enaksial trykkfasthet selv for ulike leirer.



Figur 5.6: q_u mot v_s i kalksementstabilisert leire. Resultater fra fire ulike studier, modifisert etter (Chan & Low, 2010).

5.5 Bender element

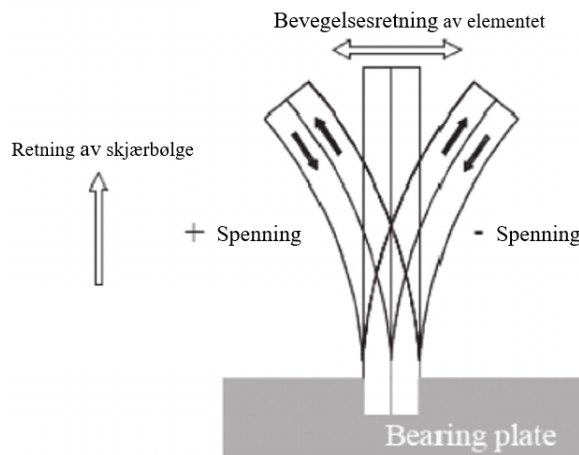
En vanlig metode for å bestemme skjærbølgehastighet v_s , og videre skjærmodulen G_{maks} , er å bruke et bender element. Bender element består av to piezokeramiske elementer montert sammen, to elektroder på overflaten og en innvendig elektrode mellom de piezokeramiske elementene som vist i Figur 5.7. Et piezokeramisk materiale vil generere elektrisk potensial når det utsettes for deformasjon, som betyr at materialet deformeres ved påføring av spenning. Bender elementet kan være parallell- eller seriekoblet. Et parallellkoblet bender element vil sende ut polarisering i elementene i samme retning, mens et seriekoblet vil sende ut polarisering i motsatt retning. Bender elementet har normalt en tykkelse på 0,5-1mm, bredde på 10-12 mm og lengde på 12-20 mm.



Figur 5.7: Benderelement a) Seriekoblet b) Parallellkoblet, modifisert etter (Dyvik & Madshus, 1985).

Påføring av spenning vil forårsake forlengelse i det ene elementet og sammentrekning av det andre elementet, som resulterer i at bender elementet bøyer seg som vist i Figur 5.8. Deformasjonen vil sende ut en bølge gjennom jordprøven som mottas og registreres av elementet på andre siden av prøven. Tiden mellom den sendte og den mottatte bølgen blir registrert, og ved en gitt lengde kan skjærbølgehastigheten beregnes.

Bender elementet gir grunnlag til å teste prøver på en ikke-destruktiv måte, slik at det i prinsipp kan utføres flere forsøk på en og samme prøve. Det kan derfor registreres en større mengde data som gir grunnlag for å bestemme egenskaper til materialet. Test-metoden er også svært tidseffektiv.



Figur 5.8: Piezoelektrisk benderelement. Positiv og negativ spenning deformerer elementene i motsatt retning som resulterer i bøyning av bendelementet, modifisert etter (Kramer, 1996).

5.6 Faktorer som kan påvirke bender element-forsøk

Bølgeutbredelsen i bender elementet er studert en rekke ganger både teoretisk og eksperimentelt. Det er flere faktorer som kan påvirke resultatet ved bender element-forsøk, der nærfeltseffekten, p-bølgeutbredelsen og prøvegeometri ofte blir diskutert.

5.6.1 Nærfeltseffekt (Near-field effect)

Ved å måle avstanden fra signalet til den sendte og mottatte bølgen, kan bølgens hastighet bestemmes for en gitt prøvehøyde. Siden signalet til den mottatte bølgen ofte kan ha en annen form enn det sendte signalet, kan det være utfordrende å tolke signalet til den første ankommende bølgen (Arroyo mfl., 2003). Nærfeltseffekten er sett på som en av kildene til denne utfordringen, og defineres som koblingen mellom bølger som har samme partikkelbevegelse men som forpantes og dempes med forskjellige hastigheter (Chan, 2006). Nærfeltseffekten ble først introdusert av (Sanchez-Salinerio mfl., 1986). Ved en systematisk studie av forplantning av sinusformet puls i et elastisk medium, ble det bevist hvordan nærfeltseffekten påvirket tolkningen av skjærbølgehastigheten. (Sanchez-Salinerio mfl., 1986) kom blant annet frem til at det var nyttig å definere en forholdstall R_d , mellom prøvehøyden og bølgelengden med tilhørende øvre og nedre grense på henholdsvis 2 og 4 for å unngå nærfeltseffekten. Likning 5.12 viser forholdstallet R_d med følgende grenser.

$$2 < R_d < 4 \quad (5.12)$$

der R_d er gitt ved likning 5.13

$$R_d = \frac{H}{\lambda} \quad (5.13)$$

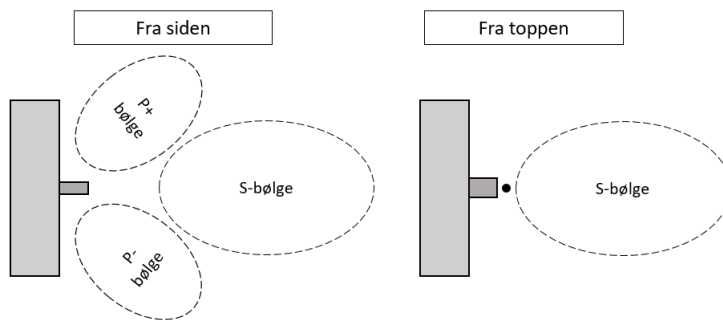
der H er prøvehøyden og λ er bølgelengden gitt ved ligning 5.14.

$$\lambda = \frac{v_s}{f} \quad (5.14)$$

der v_s er skjærbølgehastigheten i m/s og f er frekvensen i Hz.

5.6.2 P-bølgeutbredelse

Bender elementet overfører både P-bølger og S-bølger. Som tidligere beskrevet vil hastigheten til P-bølgen være betydelig høyere enn S-bølgen og kan derfor skape forstyrrelser ved å gjenkjenne ankomsten til S-bølgen. Figur 5.9 viser utbredelsen av P- og S-bølgen i bender elementet.



Figur 5.9: Utbredelse av P- og S-bølge i bender elementet, modifisert etter (Lee & Santamarina, 2005).

5.6.3 Prøvegeometri

(Rio, 2006) studerte innvirkningen av prøvegeometri ved bender element-forsøk i treksailcelle. Resultatene i studien viste at geometrien til prøven hadde stor innflytelse på bølgeforplantningen. Større prøver var preget av bølgeforplantning uten forstyrrelser fra reflekterte bølgekomponenter, mens slankere prøver ble i større grad påvirket av reflekterte bølgekomponenter. Studien viste hvordan økende slankhet av prøven resulterte i mindre dispersjon på grunn av nærfeltseffekten og økt dispersjon på grunn av bølgerrefleksjon. (Rio, 2006) foreslo å vurdere geometrien på følgende måte:

$\frac{H^2}{D} < 15mm$ - dispersjon kun påvirket av nærfeltseffekt

$\frac{H^2}{D} > 45mm$ - dispersjon påvirket av bølgerrefleksjon

der H er høyden til prøven og D er diameteren til prøven. For $15\text{ mm} < (H^2/D) < 45\text{ mm}$ ble det ikke registrert noen spesiell oppførsel. Selv om studien ble gjort på gummiprøver, ble det konkludert med at bender element-forsøk i stor grad er påvirket av prøvegeometri (Rio, 2006).

Del II

Laboratoriearbeid og resultater

Kapittel 6

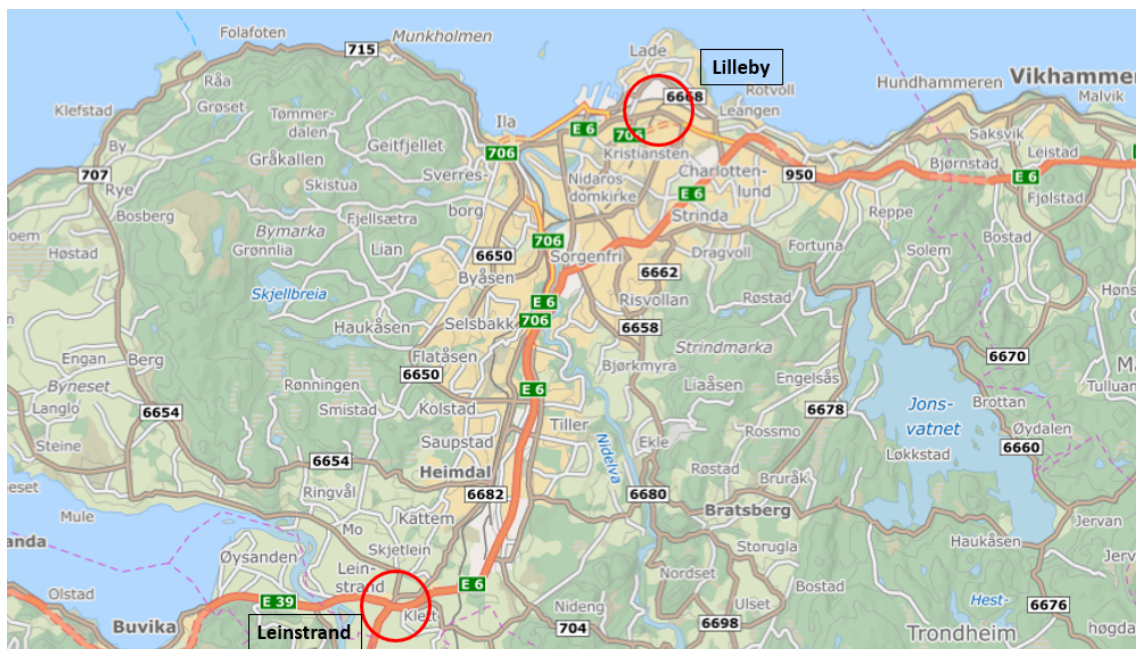
Materialer

I kapittelet beskrives de to materialene som er brukt i forsøkene. Dette innebærer en presentasjon av lokasjon, grunnforhold og geotekniske parametere.

6.1 Generelt

I laboratorieundersøkelsen er det brukt leirer fra to ulike lokasjoner rundt Trondheim, vist i figur 6.1. Leirprøvene er hentet fra Leinstrand på Klett og Lilleby i Trondheim. Områdene er kalksementstabilisert i tidligere byggeprosjekter og det finnes tilgjengelig data fra felt, som skrevet om i kapittel 4.3.

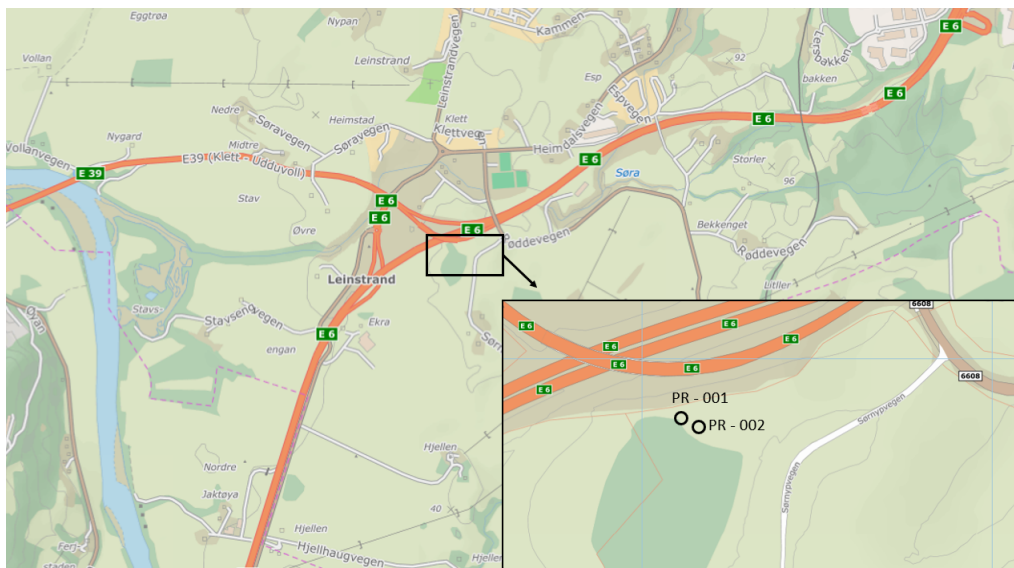
De to leirene er valgt på bakgrunn av tilgjengelig data, i tillegg til at leiren fra Leinstrand og Lilleby har ulike egenskaper som vil gjøre det gunstig å sammenligne stabiliseringsresultatet fra laboriearbeidet. Leiren fra Leinstrand er middels fast, middels/meget sensitiv og lite plastisk, mens leiren fra Lilleby er middels fast/fast, lite sensitiv og middels plastisk.



Figur 6.1: Oversiktskart - Aktuelle områder er markert med rød ring (finn.no, 2022).

6.1.1 E6 Trondheim-Melhus (Leinstrand)

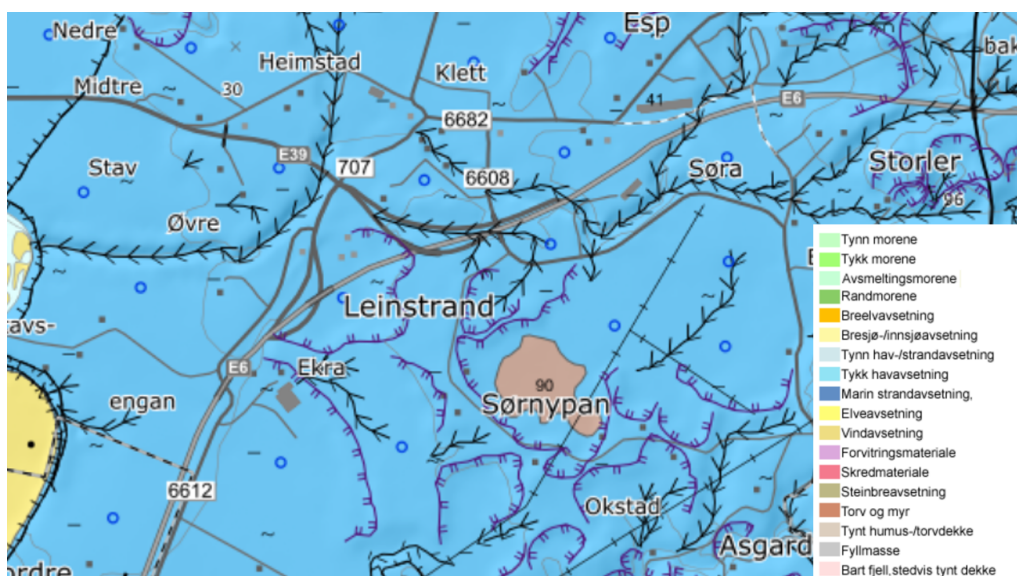
Leinstrand ligger ca. 42 moh., under den marine grensen som ligger på ca. 180 moh. Området utgjør en del av det tidligere anleggsområde på Klett i forbindelse med utbyggingen av nye E6 Trondheim-Melhus, som ble ferdigstilt i 2019. For laboratoriearbeidet i masteroppgaven ble det tatt opp leire fra dybder 7,0 - 9,0 m. Figur 6.2 viser et oversiktskart over området og plassering av prøveserier.



Figur 6.2: Oversiktskart over området på Leinstrand, plassering av prøveserier nede til høyre (finn.no, 2022).

Grunnforhold

Figur 6.3 viser kvartærgeologisk løsmassekart over det aktuelle området. Løsmassene består stort sett av hav- og fjordavsetninger. Hav- og fjordavsetninger inneholder finkornede marine avsetninger og det er få eller ingen fjellblotninger i området (NGU, udatert). De viktigste mineralogiske komponentene i bergavsetningene er kvarts, feltspat, illitt og kloritt, hvor sistnevnte utgjør hovedandelen av leirfraksjonen (Long mfl., 2019).



Figur 6.3: Kvartærgeologisk kart over området på Leinstrand (NGU, udatert).

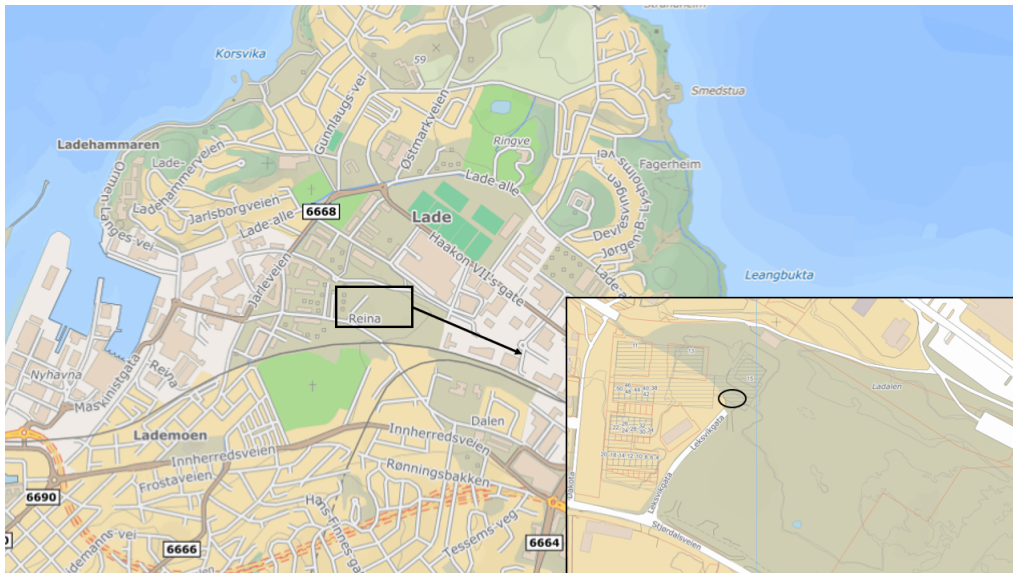
Lagdelingen i området er tilnærmet lik. De første 2 meterene består av tørrskorpe. Fra 2,0-7,5 m. finnes lav til middels sensitiv leire. Fra 7,5 meter er leiren meget sensitiv. Omrørt skjærstyrke er under 0,5 kPa og materialet karakteriseres som kvikkleire. OCR er mer eller mindre konstant med dybden og har en verdi på ca. 1,25. Området er ikke preget av tidligere overlaging (POP), og den noe overkonsoliderte tilstanden skyldes trolig kryp eller andre naturlige aldringseffekter (Long mfl., 2019). Tabell 6.1 viser geotekniske parametere fra rutineundersøkelser av leiren som brukt i laboratorieundersøkelsene.

Tabell 6.1: Geotekniske parametere fra rutineundersøkelse av leiren fra Leinstrand.

Parameter	Enhet	7,0 - 7,8 m	8,0 - 8,8 m
w	%	30-35	30-35
ρ	g/cm^3	1,94	1,95
ρ_s	g/cm^3	2,74	2,73
I_P	%	12-15	6-8
S_u	kPa	31	23
S_r	kPa	0,8	0,1
S_t	-	39	230
Leirinnhold	%	34-38	34-38
Silt + finsand	%	62-66	62-66

6.1.2 Trondheim - Lilleby

Lilleby ligger sentralt i Trondheim øst, ca. 2,5 km nordøst for Midtbyen vist i figur 6.5. Terrenget er relativt flatt med en svak helning sør-øst. Koter i det undersøkte området ligger mellom +12 til +19. Lilleby Eiendom AS planlegger oppføring av høyblokker på Lilleby felt B4 og området har i den forbindelse blitt kalkementstabilisert. Ved bistand fra Multiconult AS er det hentet ut leire fra prosjektområdet for bruk i masteroppgaven. Leiren er tatt fra ca. kote +10 med graveskuff, og lagret i tett plast før innblanding av bindemiddel.



Figur 6.4: Oversiktskart over området på Lilleby, plassering av greveskuff nede til høyre (finn.no, 2022).



Figur 6.5: Bilde fra felt Lilleby, tatt 10.03.22.

Grunnforhold

Kvartærgeologisk løsmassekart i Figur 6.6 viser at området på Lilleby består av fyllmasser. Sør i området er det avdekket elveavsetning og tykk havavsetning. Tidligere grunnundersøkelser viser at løsmassene generelt består av leire med innslag av tynne siltlag og enkelte sand- og gruskorn. Det er registrert løsmasser i boreddybder på ca. 30,0 meter under terreng, og antatt berg er ikke påvist.



Figur 6.6: Kvartærgeologisk kart over området på Lilleby (NGU, udatert).

Tabell 6.2 viser resultater fra rutineundersøkelser gjort før innblanding av bindemiddel. Leiren ble som skrevet tidligere hentet ut med graveskuff og var svært forstyrret. Datarapporter fra tidligere grunnundersøkelser er derfor brukt for å bestemme densitet og udrenert skjærstyrke (Multiconsult, 2021b).

Tabell 6.2: Geotekniske parametere fra rutineundersøkelse av leiren fra Lilleby.

Parameter	Enhet	Kote +10
w	%	30-35
ρ	g/cm^3	1,95
ρ_s	g/cm^3	2,74
I_P	%	17
S_u	kPa	20-40
S_r	kPa	3-5
S_t	-	5-8
Leirinnhold	%	42
Silt + finsand	%	58

Kapittel 7

Laboratoriearbeid

I dette kapitlet beskrives først laboratorieprosedyren for preparering av kalksementprøver. Deretter presenteres metodene som er brukt for å teste kalksementprøvene. Metodene benyttet er bender element-forsøk for måling av skjærbølgehastighet og enaksialtest for måling av skjærstyrke.

7.1 Laboratorieprosedyre

Kapitlet tar utgangspunkt i notatet Laboratorieprosedyre for innblandingsforsøk i KlimaGrunn (Multiconsult, 2021a) utviklet av Multiconsult i oppdrag for KlimaGrunn.

En kjent utfordring ved kalksementstabilisering er lite samsvar mellom styrke og stivhet målt i laboratorieforsøk og in-situ målinger. Preparering av prøver og herdemiljø i laboratorium samsvarer lite med hvordan kalksementpeler installeres og herdes in-situ. Innblandingsarbeid, herdetemperatur og trykk under herding er faktorer som gjør dette utfordrerne.

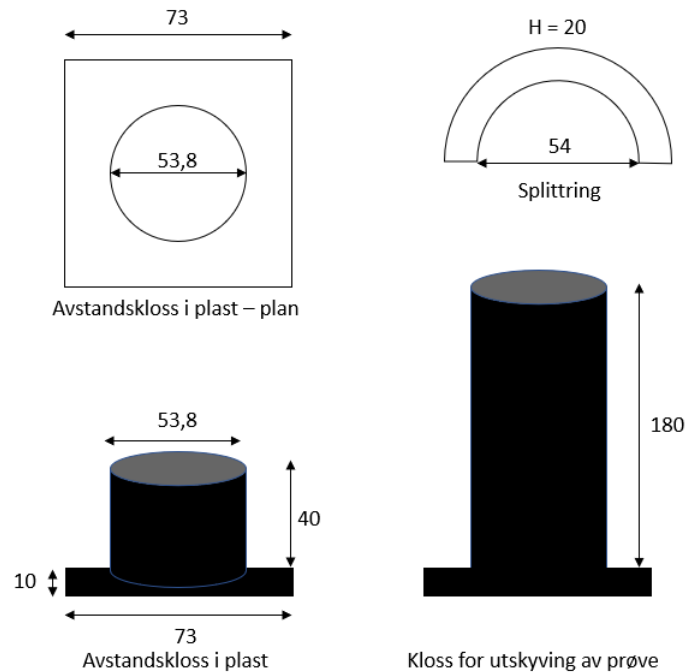
I denne masteroppgaven benyttes en ny laboratoriemetode utviklet av KlimaGrunn for stabilisering av kalksementprøver. Laboratorieprosedyren skal være minst mulig operatørvhengig i tillegg til å beskrive en metode som fører til reproducerbare resultater. Sammenlignet med foreliggende prosedyrer, (NGF, 2012) og (SVV, 2014), bestemmes densiteten på stabiliserte prøver før innstamping, prøvene herdes ved $20 \pm 2^\circ C$ grader og nytt spesiallaget utstyr brukes for preparering av prøvene.

7.1.1 Utstyr

For å kunne forhåndsbestemme densiteten i kalksementstabiliserte prøver er det brukt nytt utstyr for preparering av prøver i laboratorium. Utstyret består av:

- 180 mm sylinder av komposittprøvetakingssylindere
- 2 stk avstandsklosser/propper som stikker 40 mm inn i sylindere på hver side slik at ferdig preparert prøve høyde blir 100 mm. Topp- og bunnstykke har en 1-2 mm ventil for å slippe ut luft under sammenpressing.
- Splittring med 10-20 mm høyde på bunnproppen. Fjernes etter tilsetning av leire for å sikre deformasjon fra begge sider under sluttkomprimeringen.
- Fuktig papirfilter på toppen av prøven for å hindre at leire fra prøven skvises ut gjennom ventilen i toppstykke under sammenpressing
- Håndholdt komprimeringsstav med f.eks. vaffelmønster

- Silikon for tetting rundt propp
- Enaksial presse for å klemme på proppen i toppen
- Festeordning for å holde sylindere og topp- og bunnstykke sammen for å unngå svelling under herding



Figur 7.1: Skisse over utstyr som brukes i laboratorieprosedyren.

7.1.2 Fremgangsmåte

Prøvemateriale

I forsøkene ble det brukt leire fra sylindere og graveskuff. Materialet hentet med graveskuff ble forsøkt tatt på lik dybde for å sikre mest mulig homogent materiale. Syllindrene ble lagret kjølig og brukt på samme dag som prøveåpning. Leiren hentet med graveskuff ble pakket inn i diffusjonstett plast og lagret kjølig frem til innblanding av bindemiddel. I forsøkene ble det brukt ca. 400-500g leire per innstampet prøve, i tillegg til materiale for parameterbestemmelser.

Parameterbestemmelser

Ved prøveåpning ble følgende parameterbestemmelser utført:

- Vanninnhold
- Densitet
- Kornfordeling
- Enaksial styrke
- Konus skjærfasthet
- Flyte- og utrullingsgrense

På leiren hentet med graveskuff ble det ikke utført densitetmåling, enaksiell styrke eller uomrørt konusforsøk. Manglende parametere er bestemt ved hjelp av tidligere grunnundersøkelser i det aktuelle området.

Homogenisering av løsmasser

Materialet ble holdt kjølig helt frem til homogenisering for å ikke minste fuktighet før innblanding av bindemiddel. I innblandingen ble det brukt leire fra samme prøvesylinder for å unngå variasjon i dybden. Leiren hentet med graveskuff inneholder naturligvis større usikkerhet i forhold til plassering.

Ved tillagring ble det preparert 3 prøver fra hvert parti. For å sikre nok masse i hvert parti ble det veid opp materiale til 3,5 prøver. 1-2 kg leire ble blandet ved lav hastighet i kjøkkenmaskin i ca. 30 sekunder. Maskinen ble stoppet og materiale som hadde festet seg langs veggen i bollen ble ført ned til bunnen med slikkepott. Deretter ble massen kjørt til en homogen masse. Tiden ble notert til 30-45 sekunder. For kontroll av vanninnhold i den homogeniserte massen ble det tatt ut en prøve fra hvert parti for tørking og veiing.

Innblanding av bindemiddel

Bindemiddelet ble beregnet som kg/m^3 leire, og tilsatt i den homogeniserte massen. Kjøkkenmaskinen ble kjørt på lav hastighet i ca. 30 sekunder før maskinen ble stoppet og materiale som hadde festet seg langs veggen i bollen ble ført ned til bunnen med slikkepott. Massen ble kjørt til bindemiddelet hadde blandet seg med leiren, ca. 30-45 sekunder.

For kontroll av vanninnhold direkte etter tilsetning av bindemiddel ble det tatt ut en prøve fra hvert parti for tørking og veiing.

Tillagring av prøver

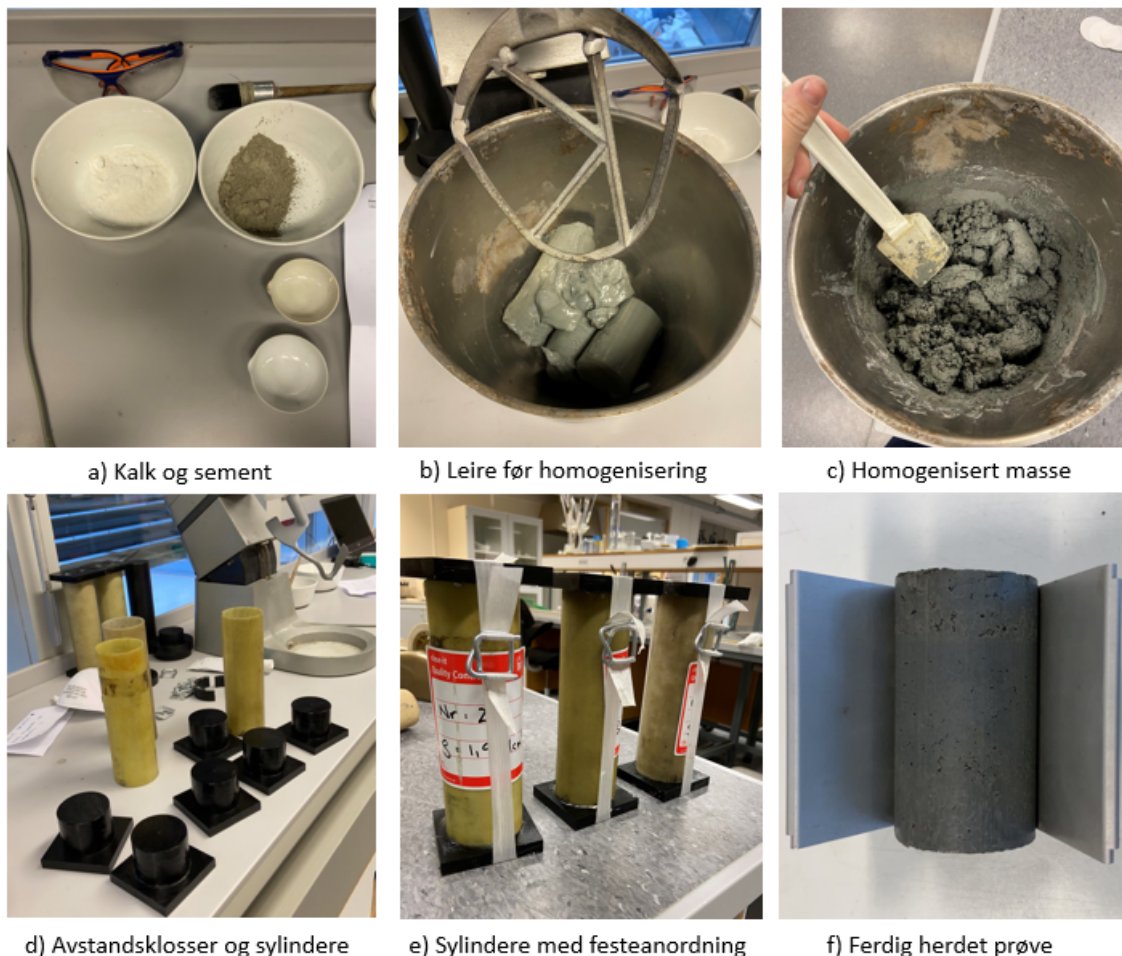
Det ble preparert prøver med flere ulike densiteter. For å sikre riktig densitet var det avgjørende at den ferdige prøven har både riktig masse og høyde.

Prøvene ble preparert på følgende måte:

1. Avstandsklosser ble smurt med silikon og splittringen ble montert på bunnstykket før påmontering av sylindren.
2. Sylindren og endeflatene på proppene ble smurt med silikon for enkel utskyvning av prøvene.
3. Fuktig papirfilter ble lagt i bunnen av sylindren.
4. Det ble tatt ut materiale tilsvarende 1 prøve fra den homogeniserte massen.
5. Det veide materialet ble delt i fire like deler med lik vekt. Sylindren ble fylt lagvis for hånd. Lagene ble målt slik at hvert lag var 2,5 cm.
6. Overflatene i de ulike lagene ble riflet med en trepinne for å sikre god kontakt med neste lag.
7. Toppen av prøven ble jevnet ut slik at den var mest mulig plan.
8. Splittringen fra bunnstykket ble fjernet.
9. Toppstykket ble smurt med silikon, plassert på sylindren og presset ned i sylindren for å oppnå riktig høyde på 10 cm.
10. Proppene ble fastholdt med festeanordning under herding.
11. Prøvene ble plassert i lufttette bokser sammen med en fuktig klut slik at 100% luftfuktighet kunne opprettholdes.

12. Prøvene ble lagret vertikalt i $20 \pm 2^\circ C$.

13. Etter 28 herdedøgn ble prøvene skjøvet ut med prøveutskyver. Prøvene ble veid og målt for å finne nøyaktig vanninnhold og densitet etter herding.



Figur 7.2: Produkter og utstyr brukt i laboratorieprosedyren.

7.2 Laborieprogram

Formålet med testingen i masteroppgaven har vært å undersøke hvordan skjærstyrken påvirkes ved endring av innbyggingsdensitet, sammenligne ulike leirer preparert med lik mengde og type bindemiddel, sammenligne prøver preparert i laboratorie og prøver fra felt, i tillegg til å finne korrelasjonsmodeller mellom styrke/stivhet og skjærbølghestighet. Laboriearbeidet er utført i henhold til metoden beskrevet i kapittel 7.1.

Laborieundersøkelsene har tatt for seg følgende tilfeller:

- Lik leire tilsatt samme type og mengde bindemiddel, men ulik innbyggingsdensitet.
- Lik leire tilsatt samme type bindemiddel, men ulik mengde bindemiddel.
- Ulike leirer tilsatt samme type og mengde bindemiddel.
- Leirer tilsatt samme type og mengde bindemiddel som i felt.

Tabell 7.1 viser en oversikt over gjennomførte det laborieprogrammet. Det er preparert totalt 54 kalksmentprøver med 18 ulike kombinasjoner der hver kombinasjon består av tre replikaer.

7.2.1 Variabler i laboratorieprogrammet

Bindemiddel

Alle blandinger tilsatt kalk og sement er preparert med blandingsforhold 50/50. For tilvirkning av prøver der målet var å undersøke ulik densitet, ble det brukt B80 og CEMI i innblandingsforhold 50/50. Innblandingsmengden ble satt til 45kg/m^3 og 80kg/m^3 . I prosjektoppgaven (Baustad, 2021) ble det også brukt B80 og CEMI med innblandingsmengde 80kg/m^3 . Resultatene fra prosjektoppgaven kan dermed brukes som sammenligningsgrunnlag i masteroppgaven.

For leirer tilsatt samme type og mengde bindemiddel som i felt, ble det brukt B80/CEM II med innblandingsmengde 90kg/m^3 for leiren fra Leinstrand og Multicem med innblandingsmengde 100kg/m^3 for leiren fra Lilleby, i samsvar med kalksementstabiliseringen i felt.

Herdeforhold

Prøvene ble preparert i tidsrommet 28.03-01.04 og testet 25.04-29.04. Dette tilsvarer en herdetid på 4 uker (28 døgn). Det er vanlig å bruke 28 dagers fasthet som karakteristisk fasthet ved dimensjonering, i tillegg til at herdeperiode på 28 døgn er sett i flere tidligere studier. Prøvene ble lagret ved 20°C i lufttette bokser med 100% luftfuktighet.

Densitet

Erfaringer fra prosjektoppgaven viste at det var utfordrene å preparere prøver med langt høyere densitet enn in-situ densitet. For leire tilsatt B80/CEMI ble det dermed valgt å preparere prøver med densitet $1,7\text{g/cm}^3$, $1,8\text{g/cm}^3$ og $1,9\text{g/cm}^3$. For prøvene som representerer de to feltområdene ble det brukt in-situ densitet, -5% av in-situ densitet og -10% av in-situ densitet.

Antall prøvereplikater

For å sikre troverdige resultater ble det laget tre replikaer av hver kombinasjon. Ved tre replikaer er det mulig å finne et mål på spredningen av prøvene, og videre vurdere kvaliteten på det utførte forsøket.

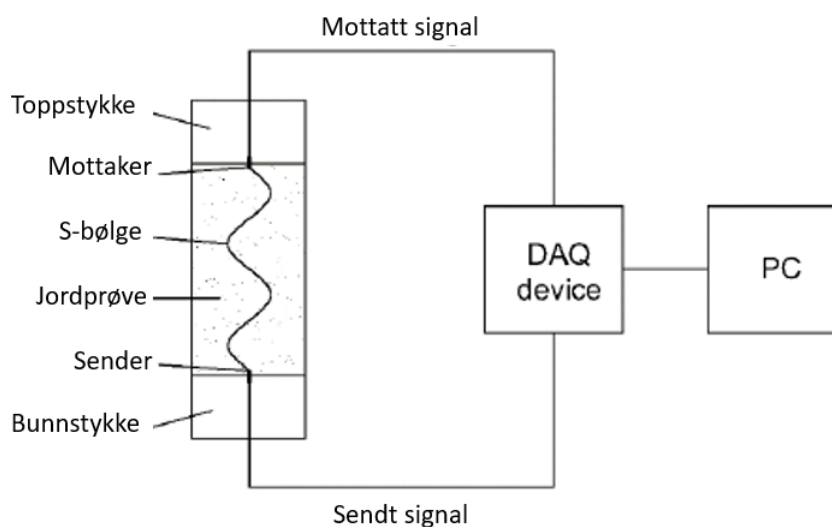
Tabell 7.1: Oversikt over det gjennomførte laboratorieprogrammet.

Leire	Bindemiddel	Mengde	Herdetid	Herdetemp.	Densitet	Antall
Leinstrand	B80/CEMI	45 kg/m ³	28 døgn	20°C	1,7 g/cm ³	3 stk.
					1,8 g/cm ³	3 stk.
					1,9 g/cm ³	3 stk.
	B80/CEMI	80 kg/m ³	28 døgn	20°C	1,7 g/cm ³	3 stk.
					1,8 g/cm ³	3 stk.
					1,9 g/cm ³	3 stk.
	B80/CEMII	90 kg/m ³	28 døgn	20°C	1,76 g/cm ³	3 stk.
					1,85 g/cm ³	3 stk.
					1,95 g/cm ³	3 stk.
Lilleby	B80/CEMI	45 kg/m ³	28 døgn	20°C	1,7 g/cm ³	3 stk.
					1,8 g/cm ³	3 stk.
					1,9 g/cm ³	3 stk.
	B80/CEMI	80 kg/m ³	28 døgn	20°C	1,7 g/cm ³	3 stk.
					1,8 g/cm ³	3 stk.
					1,9 g/cm ³	3 stk.
	Multicem	100 kg/m ³	28 døgn	20°C	1,76 g/cm ³	3 stk.
					1,85 g/cm ³	3 stk.
					1,95 g/cm ³	3 stk.

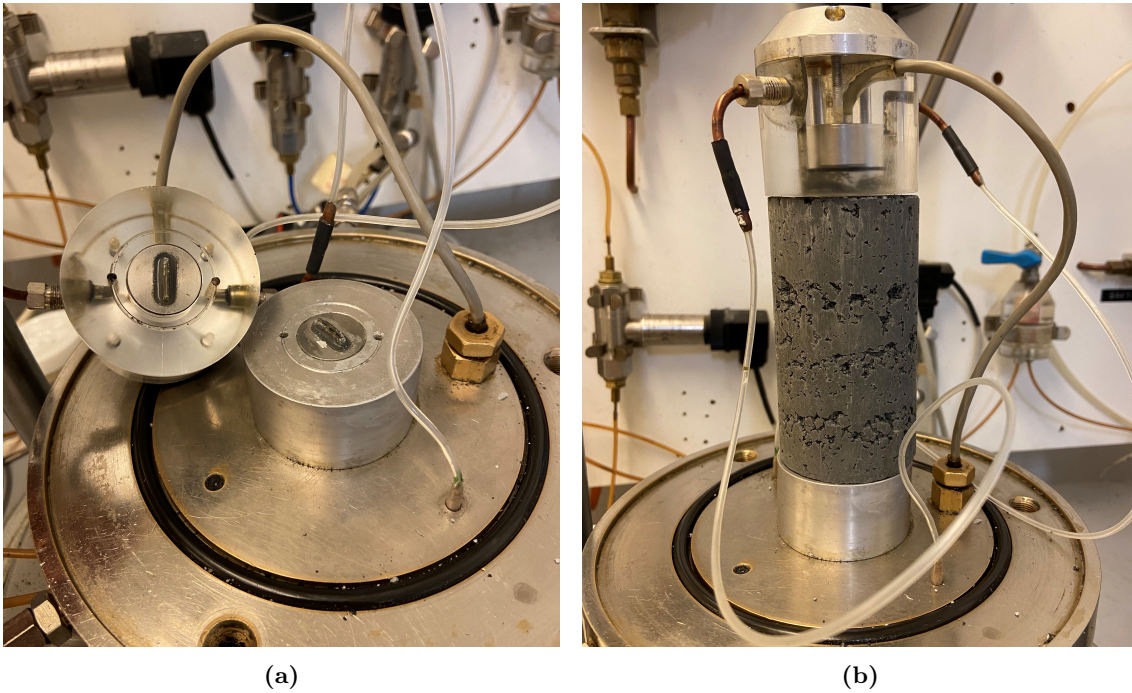
Som vist i tabell 6.1 er det kun leiren fra 8-8,8 m på Leinstrand som karakteriseres som kvikkleire. Ved tilsetning av B80/CEMI ble det brukt leire fra dypden 8 - 8,8 m, altså kvikkleire. Ved tillagring av prøver som i felt (B80/CEM II) ble det brukt leire fra 7 - 7,8 m med noe høyere omrørt skjærstyrke og plastisitetsindeks, samt lavere sensitivitet.

7.3 Bender element-forsøk

Skjærbølgehastighetsmålingene er gjort ved bruk av bruk av bender element. Systemet består av bender element, enhet for datainnsamling (DAQ), triaksialcelle og datamaskin med tilhørende programvare. Prøvene ble ikke bygget inn i triaksialcelle, men plassert rett på elementene. Prosedyren er illustrert i Figur 7.3. Figur 7.4 viser bilder fra forsøket med bender elementet.



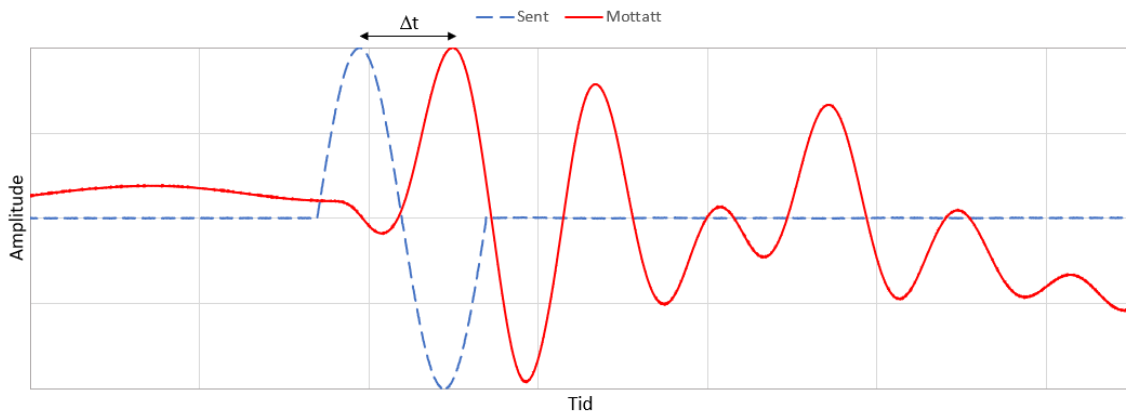
Figur 7.3: Skisse av benderelement-systemet, modifisert etter (Morawska, 2019).



Figur 7.4: (a) Topp- og bunnstykket i bender elementet (b) Kalksementprøve plassert i bender elementet.

7.3.1 Peak-to-peak metoden

Skjærbølgehastigheten ble bestemt ved hjelp av peak-to-peak metoden. Peak-to-peak metoden registrerer forsinkelsen mellom den sendte og mottatte bølgen som illustrert i figur 7.5. Skjærbølgehastigheten kan dermed beregnes ved likning 7.1.



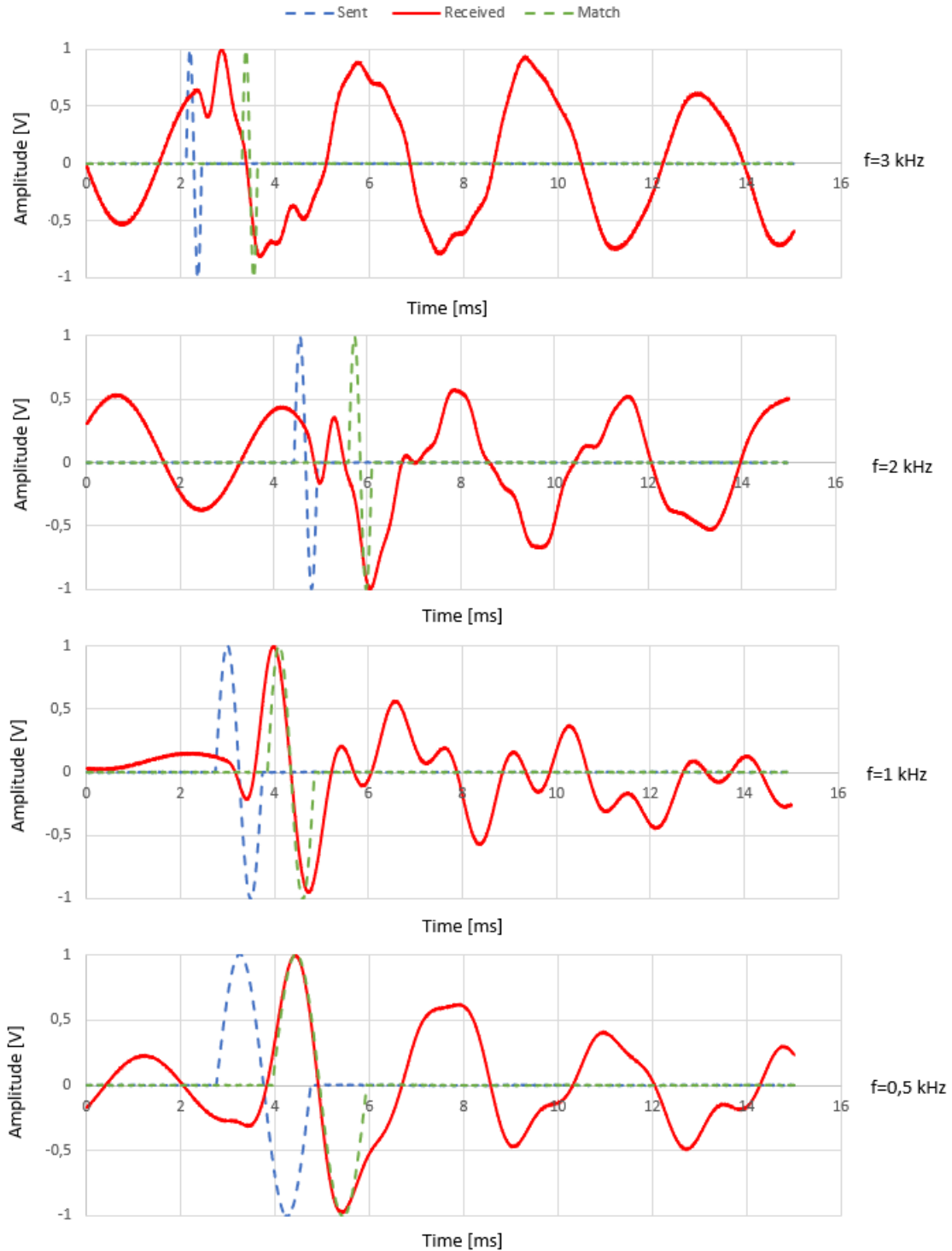
Figur 7.5: Illustrasjon av peak-to-peak metoden. Δt er tiden mellom sendt og mottatt bølge.

$$v_s = \frac{H}{\Delta t} \quad (7.1)$$

der H er den effektive høyden til prøven i mm og Δt er tiden i ms.

7.3.2 Valg av frekvens

I laboratoriearbeidet ble effekten av ulike frekvenser undersøkt. Figur 7.6 viser målte input- og output-signaler i kalksementstabilisert leire. Bølgene ble generert med ulike frekvenser på 3 kHz, 2 kHz, 1 kHz og 0,5 kHz som tilsvarer bølgeperioder på henholdsvis 0,33 ms, 0,5 ms, 1 ms og 2 ms. Målet var å finne den frekvensen hvor mottatt bølge fulgte samme frekvens som den sendte bølgen.



Figur 7.6: Effekt av ulike bølgefrequenser i kalksementstabilisert leire.

Figur 7.6 viser at bølger med frekvens på 0,5 kHz ga best samsvar mellom sendt og modtatt bølge. Det ble derfor valgt å bruke en frekvens på 0,5 kHz ved måling av skjærbølgehastighet i de kalksementstabiliserte prøvene.

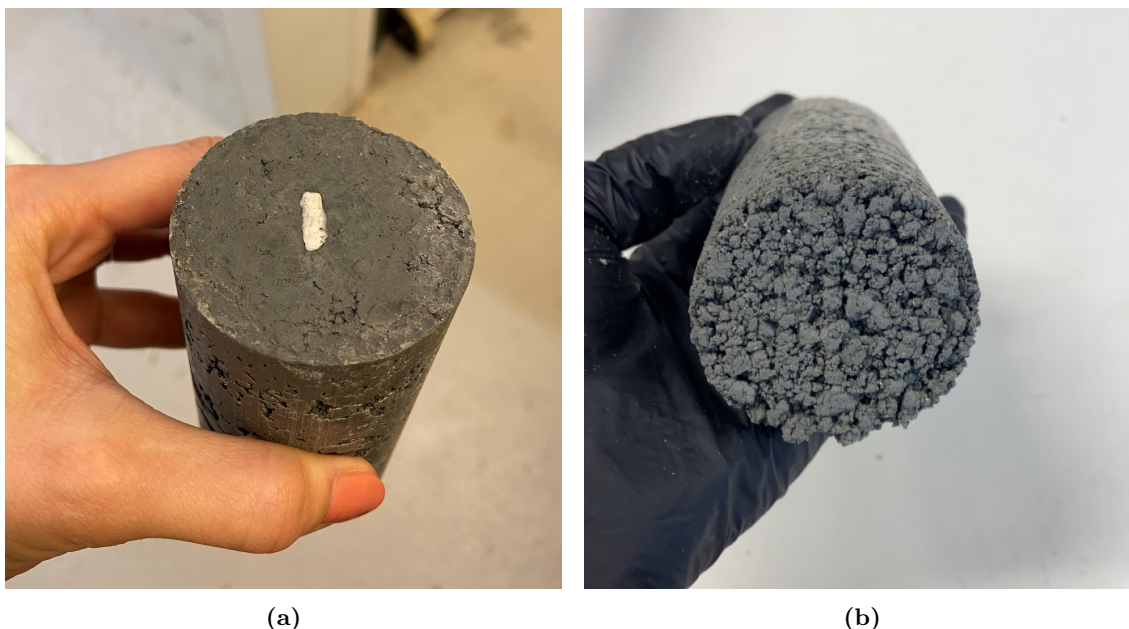
7.3.3 Plassering av prøve

På grunn av den økte fastheten i de kalksementstabiliserte prøvene oppsto det utfordringer med å plassere prøven i bender elementet. For å sikre god kontakt mellom bender elementet og prøven ble det gjort tiltak.

I kalksementprøver med lav bindemiddelmengde var det mulig å plassere benderelementet på samme måte som for vanlige leirprøver. Metoden virket å skape god kontakt mellom elementet og prøven. Prøver med høyere bindemiddelmengde (80-100 kg/m³) var så faste at det ikke var mulig å presse elementet på prøven. I disse tilfellene ble det brukt en skalpell for å lage et passende spor for plassering av bender elementet. For å sikre kontakt mellom prøven og elementet ble det brukt silikon eller plastelina som fyllmasse i sporet, vist i Figur 7.7 a). Også (Chan, 2006) brukte plastelina som fyllmasse i sitt bender element-forsøk. Bender elementet ble ført ned i sporet og fyllmassen sørget for at det ikke oppsto hulrom mellom kalksementprøven og elementet.

For å sikre at fyllmassene ikke skapte forstyrrelser i testingen, ble innvirkningen av silikon og plastelina undersøkt. En av kalksementprøvene med lav bindemiddelmengde ble på vanlig måte plassert i bender elementet og skjærbølgehastigheten ble målt. Deretter ble sporet utvidet ved hjelp av skalpellen og fylt med silikon. Prøven ble plassert i bender elementet og skjærbølgehastigheten ble målt på nytt. Til slutt ble sporet fylt med plastelina og skjærbølgehastighet ble målt én siste gang. De tre målte skjærbølgehastighetene viste svært små forskjeller, og det antas at fyllmassene ikke skapte store forstyrrelser ved testingen. Fyllmassene ble brukt videre i laboratorieprogrammet der det var nødvendig.

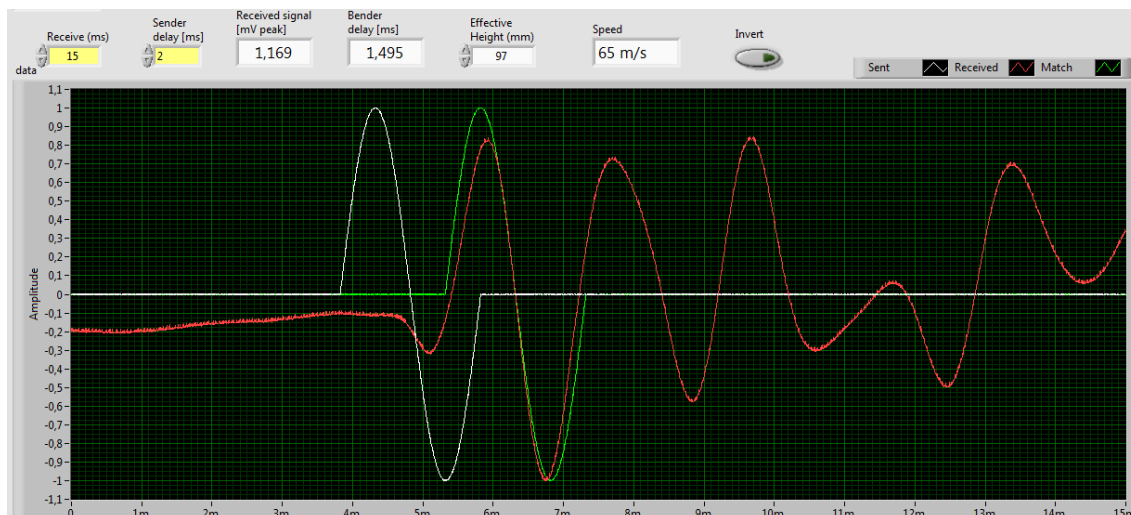
Noen av prøvene med lav densitet hadde en svært porøs overflate, som ved berøring smuldret opp. Det var derfor utfordrene å få god kontakt med bender elementet i disse prøvene, selv ved bruk av fyllmasser. Figur 7.7 b) viser et eksempel på en porøs overflate. Benderelementet ble plassert så godt som mulig og det ble notert hvilke prøver som hadde dårlig kontakt.



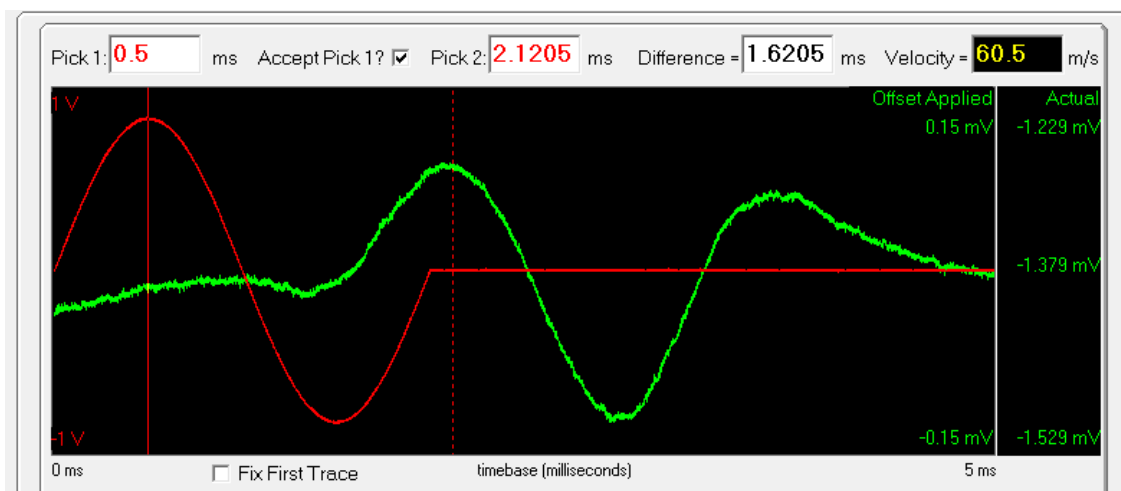
Figur 7.7: (a) Plastelina som fyllmasse for å sikre kontakt med benderelementet (b) Prøve med lav densitet og svært porøs overflate.

7.3.4 Kvalitetssikring av bender element

I løpet av testperioden ble det observert unormalt lave skjærbølgehastigheter sammenlignet med tidligere litteratur. For å kvalitetssikre bender elementet hos NTNU, ble det også målt skjærbølgehastighet i bender elementet hos Multiconsult i Trondheim. Ved testing av de to bender elementene ble det brukt original fast leire. Leirprøven ble først testet i benderelementet ved NTNU og deretter fraktet til laboratoriet til Multiconsult. Prøven var fast og ble håndtert med forsiktighet. Det antas derfor at prøven ikke skulle bli betydelig forstyrret mellom de to lokasjonene. Figur 7.8 og 7.9 viser skjærbølgehastighetene fra de to ulike bender elementene.



Figur 7.8: Test av original leirprøve i bender elementet ved NTNU.



Figur 7.9: Test av original leirprøve i bender elementet hos Multiconsult.

Figur 7.8 viser en skjærbølgehastighet på 65 m/s ved bruk av bender elementet ved NTNU. Figur 7.9 viser en skjærbølgehastighet på 60 m/s ved bruk av bender elementet hos Multiconsult. De målte hastighetene hadde en minimal forskjell og det antas derfor at de lave skjærbølgehastighetene ikke var forårsaket av feil ved utstyret. Det ble utført bender element-forsøk og tolket skjærbølgehastighet i samtlige prøver til tross for lave verdier.

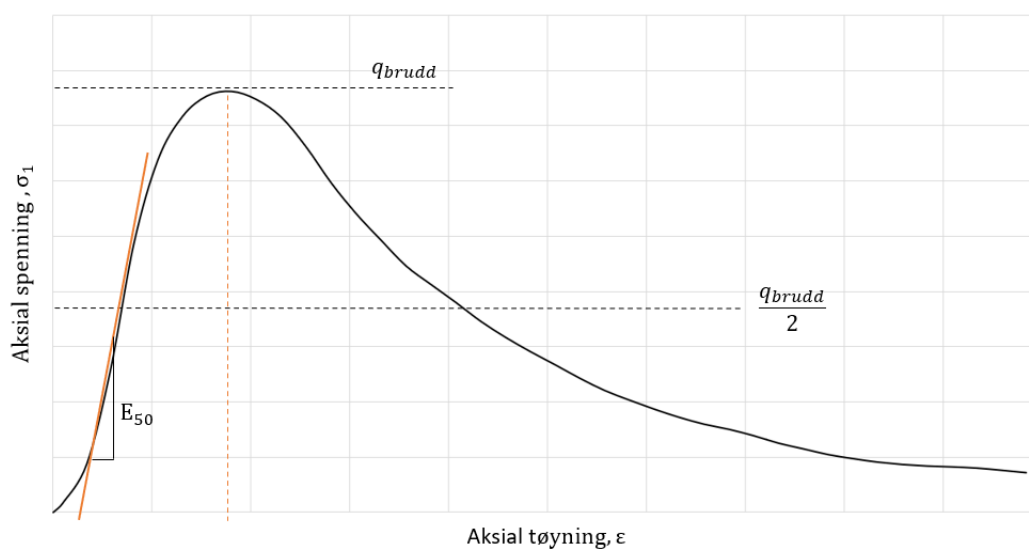
7.4 Enaksial trykktest

Direkte etter benderelementforsøk ble det utført enaksial trykkforsøk som registrerer deformasjon og kraft. I tilfeller der endeflaten ikke var plan, ble prøven pusset eller trimmet. Forsøket ble kjørt med hastighet 1,5%/min (1,5 mm/min for 10 cm høy prøve). Under forsøkene ble fullstendig spennings- tøyningkurver registrert slik at det var mulig å finne skjærfasthet, elastisitetsmodul og bruddtøyning. Figur 7.11 viser bilder fra forsøket.

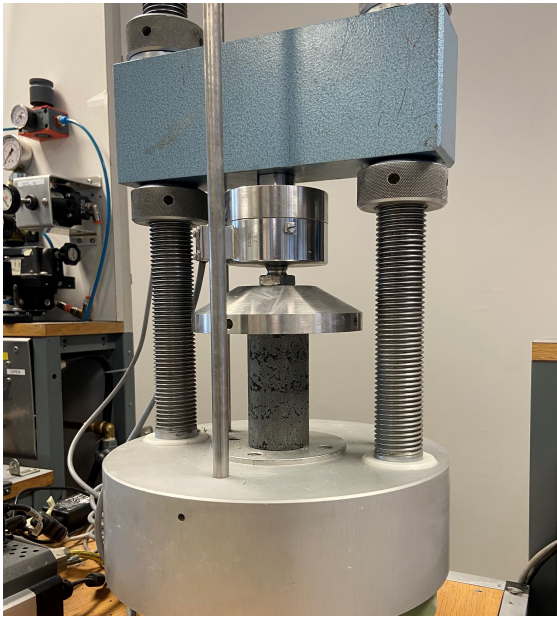
Aksialspenningen i prøven, σ_1 ved en tøyning, ε beregnes som forholdet mellom kraft og gjennomsnittlig tverrsnittsareal. Enaksial skjærspenning $s_{u,UC}$ ble beregnet ved likning 7.2.

$$s_{u,UC} = \frac{\sigma_{1,maks}}{2} \quad (7.2)$$

Elastisitetsmodulen E_{50} og bruddtøyningen er tolket iht. NGFs kalksementveileder (NGF, 2012) og er illustrert i figur 7.10.



Figur 7.10: Bestemmelse av E_{50} basert på enaksial trykkforsøk.



(a)



(b)

Figur 7.11: a) Kalksementprøve i enaksapparat b) Nærbilde av kalksementprøve etter brudd.

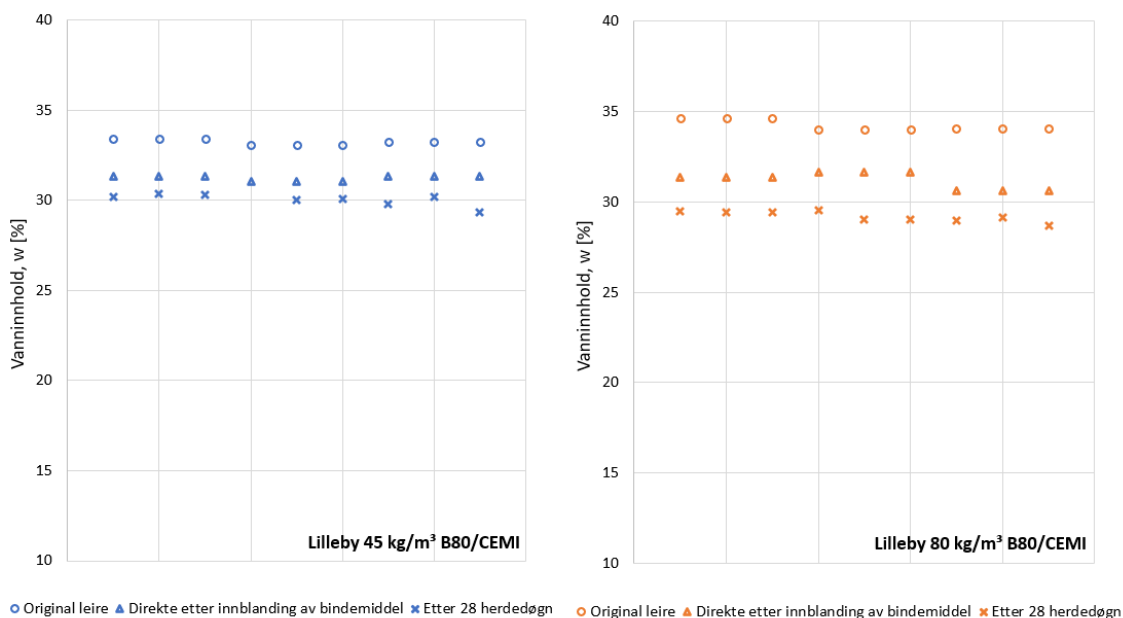
Kapittel 8

Resultater

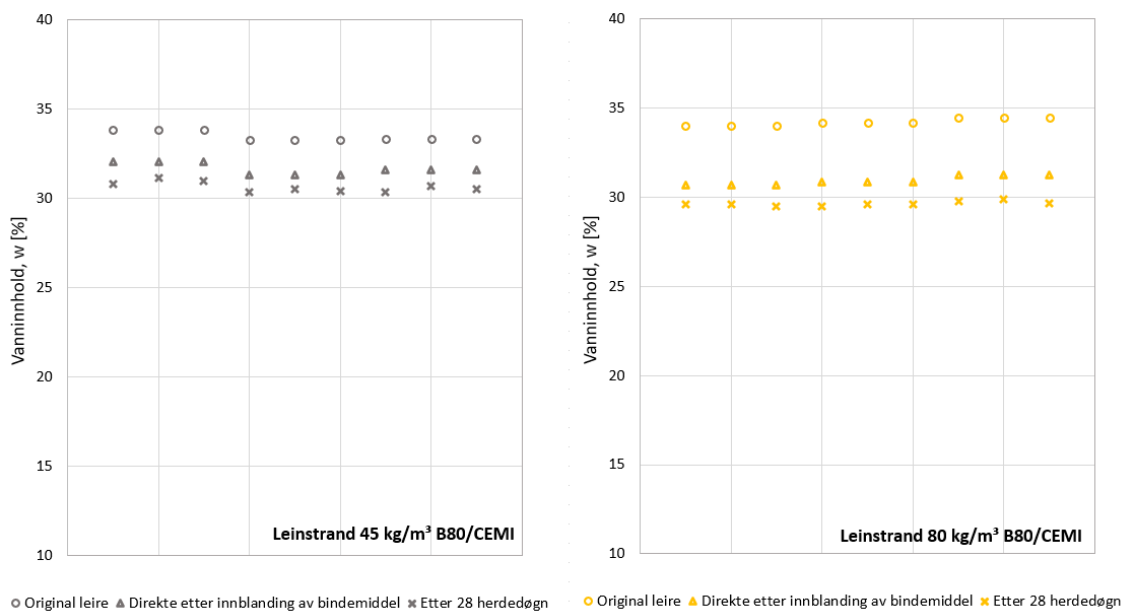
I dette kapittelet presenteres resultater fra laboratorieprogrammet. Korrelasjoner mellom oppnådd skjærfasthet, elastisitetsmodul, densitet og skjærbølgehastighet er framstilt i ulike plot. Oppnådd skjærfasthet sammenlignes med utvalgte geotekniske parametere fra den ustabiliserte leiren. Til slutt blir kalksementprøver fra felt sammenlignet med laboratorieprøver.

8.1 Vanninnhold og densitet

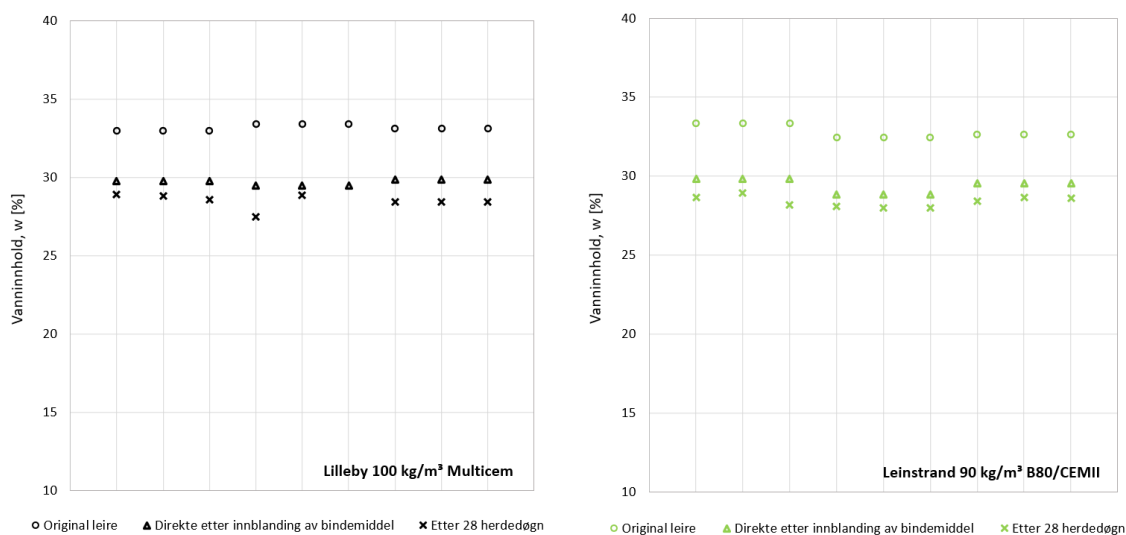
Figur 8.1, 8.2 og 8.3 viser endring i vanninnhold gjennom ulike deler av laboratorieprosessen, vanninnhold i original leire, direkte etter innblanding av bindemiddelet og etter 28 herdedøgn. Figur 8.1 viser leire fra Lilleby stabilisert med 45 kg/m³ og 80 kg/m³ B80/CEMI. Figur 8.2 viser leire fra Leinstrand stabilisert med 45 kg/m³ og 80 kg/m³ B80/CEMI. Figur 8.3 viser leire fra Lilleby og Leinstrand stabilisert med likt bindemiddel og bindemiddelmengde som i felt.



Figur 8.1: Endring i vanninnhold for leire fra Lilleby stabilisert med B80/CEMI. Til venstre innblandingmengde 45 kg/m³ og til høyre innblandingmengde 80 kg/m³.

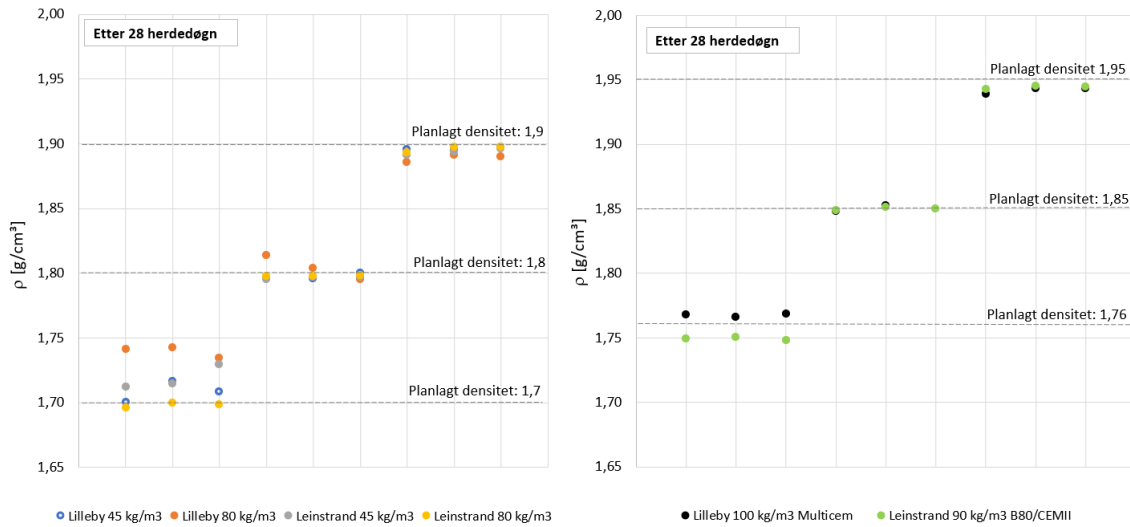


Figur 8.2: Endring i vanninnhold for leire fra Leinstrand stabilisert med B80/CEMI. Til venstre innblandingsmengde 45 kg/m³ og til høyre innblandingsmengde 80 kg/m³.



Figur 8.3: Endring i vanninnhold for leire stabilisert med likt bindemiddel som i felt. Til venstre leire fra Lilleby stabilisert med 100 kg/m³ Multicem og til høyre leire fra Leinstrand stabilisert med 90 kg/m³ B80/CEMII.

Figur 8.4 viser densitet i de stabiliserte prøvene etter 28 herdedøgn. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI. Til høyre er leirer stabilisert med likt bindemiddel som i felt. De stiplede linjene indikerer den planlagte densiteten.

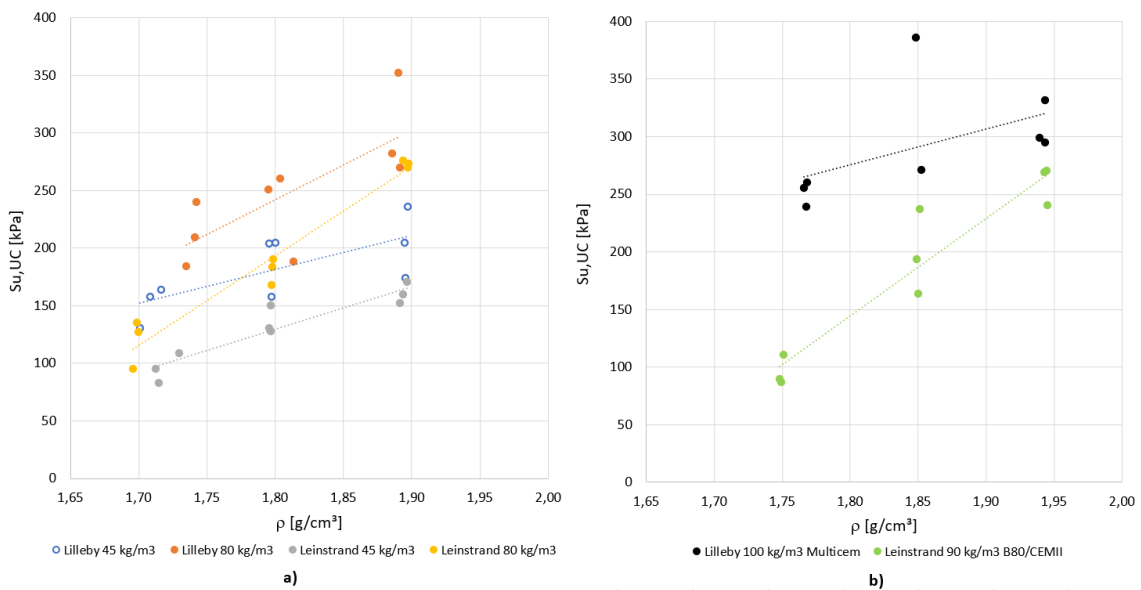


Figur 8.4: Densitet etter 28 herdedøgn. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI og til høyre er leire fra Lilleby stabilisert med 100 kg/m³ Multicem og leire fra Leinstrand stabilisert med 90 kg/m³ B80/CEMI.

8.2 Korrelasjoner

8.2.1 Enaksial skjærfasthet mot densitet

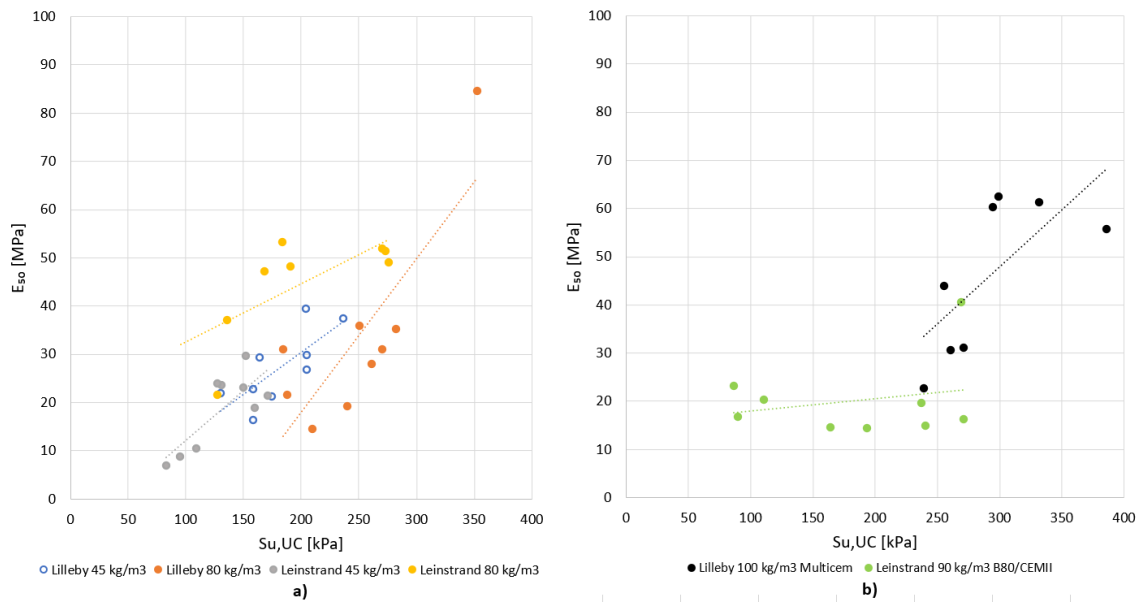
Figur 8.5 viser oppnådd skjærfasthet mot densitet etter 28 herdedøgn. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI med innblandingmengder 45 kg/m³ og 80 kg/m³, mens til høyre er leirer stabilisert med likt bindemiddel og lik mengde som i felt.



Figur 8.5: Densitet etter 28 herdedøgn mot enaksial skjærfasthet. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI og til høyre leirer stabilisert med likt bindemiddel som i felt.

8.2.2 Enaksial skjærfasthet mot elastisitetsmodul E_{50}

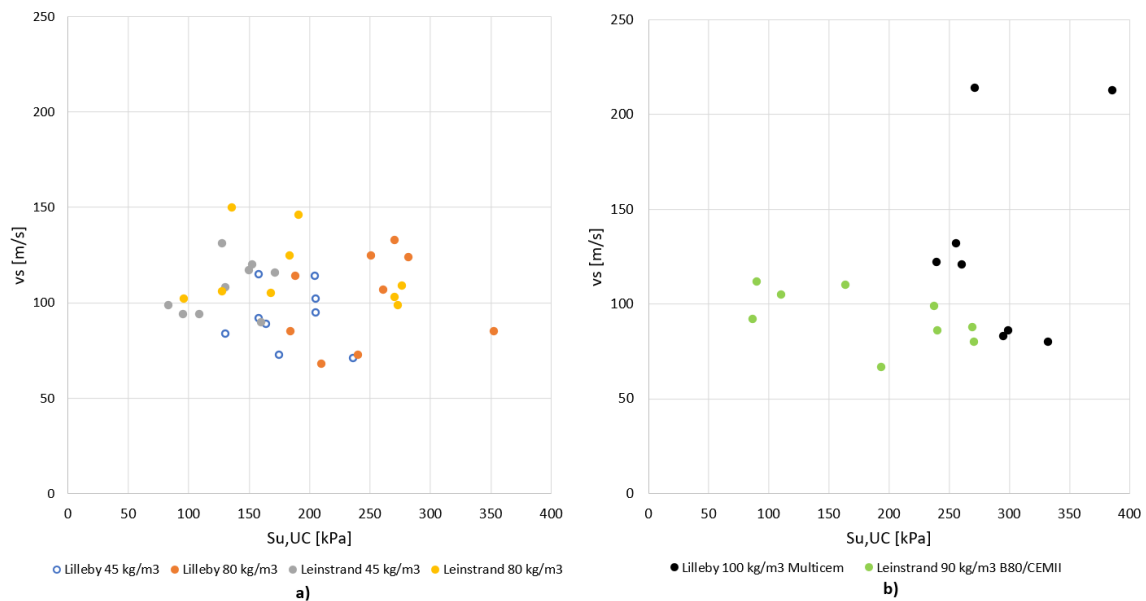
Figur 8.6 viser enaksial skjærfasthet mot elastisitetsmodul etter 28 herdedøgn. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI med innblandingmengder 45 kg/m³ og 80 kg/m³, mens til høyre er leirer stabilisert med likt bindemiddel og lik mengde som i felt.



Figur 8.6: Enaksial skjærfasthet mot elastisitetsmodul E_{50} . Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI og til høyre leirer stabilisert med likt bindemiddel som i felt.

8.2.3 Enaksial skjærfasthet mot skjærbølgehastighet

Figur 8.7 viser oppnådd skjærfasthet plottet mot skjærbølgehastighet etter 28 herdedøgn. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI med innblandingmengder 45 kg/m³ og 80 kg/m³, mens til høyre er leirer stabilisert med likt bindemiddel og lik mengde som i felt.



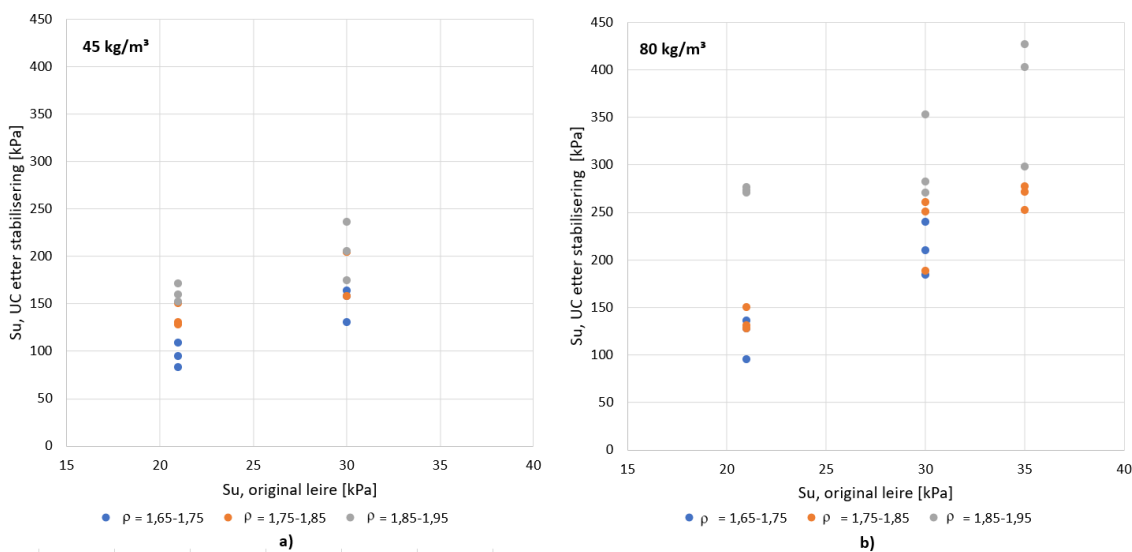
Figur 8.7: Enaksial skjærfasthet mot skjærbølgehastighet. Til venstre er leirer stabilisert med B80/CEMI og til høyre er leirer stabilisert med likt bindemiddel som i felt.

8.3 Leirer med lik mengde og type bindemiddel

Leiren fra Leinstrand og Lilleby er tilsatt lik mengde og type bindemiddel, 45 og 80 kg/m³ B80/CEMI. Forutsetningene for økt fasthet er dermed avhengig av egenskaper i det ustabiliserte materialet. Nedenfor presenteres oppnådd fasthet sammen med utvalgte geotekniske parametere. Resultater fra prosjektoppgaven er tatt med for å kunne sammenligne et større datagrunnlag. I prosjektoppgaven ble det brukt leire fra Flotten i Trøndelag. For materialeegenskaper og parametere refereres det til s. 14 i prosjektoppgaven (Baustad, 2021).

8.3.1 Udrenert skjærfasthet

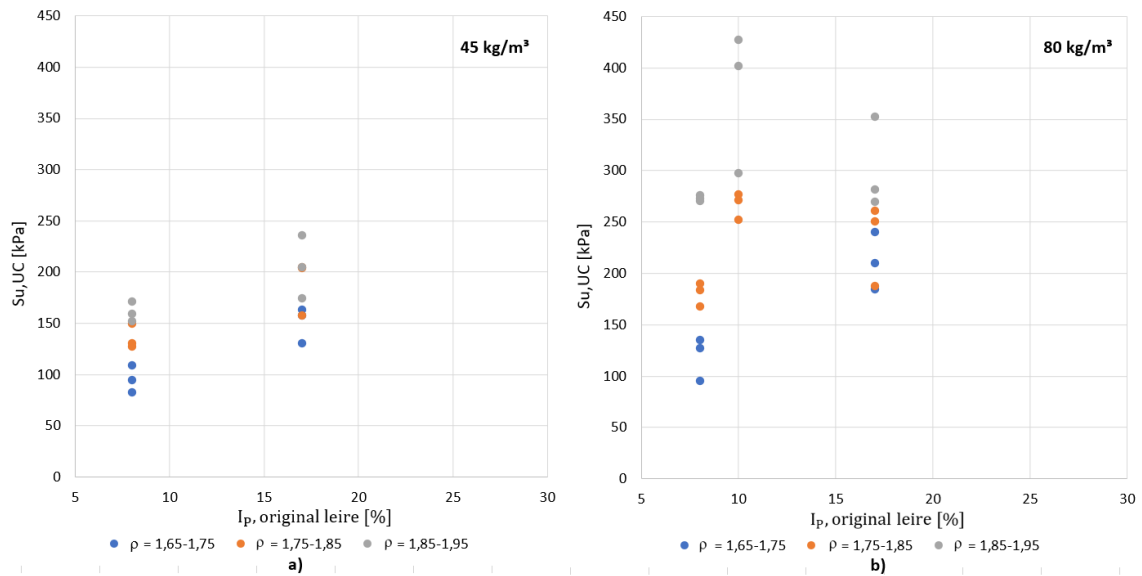
Figur 8.8 viser skjærfasthet i ustabilisert materiale mot enaksial skjærfasthet etter 28 døgn. De ulike fargene representerer ulike densiteter. Til venstre er leirer stabilisert med bindemiddelmengde 45kg/m³ og til høyre er leirer stabilisert med bindemiddelmengde 80 kg/m³.



Figur 8.8: s_u original leire mot s_u etter 28 døgn for leire stabilisert med B80/CEMI.

8.3.2 Plastisitetsindeks

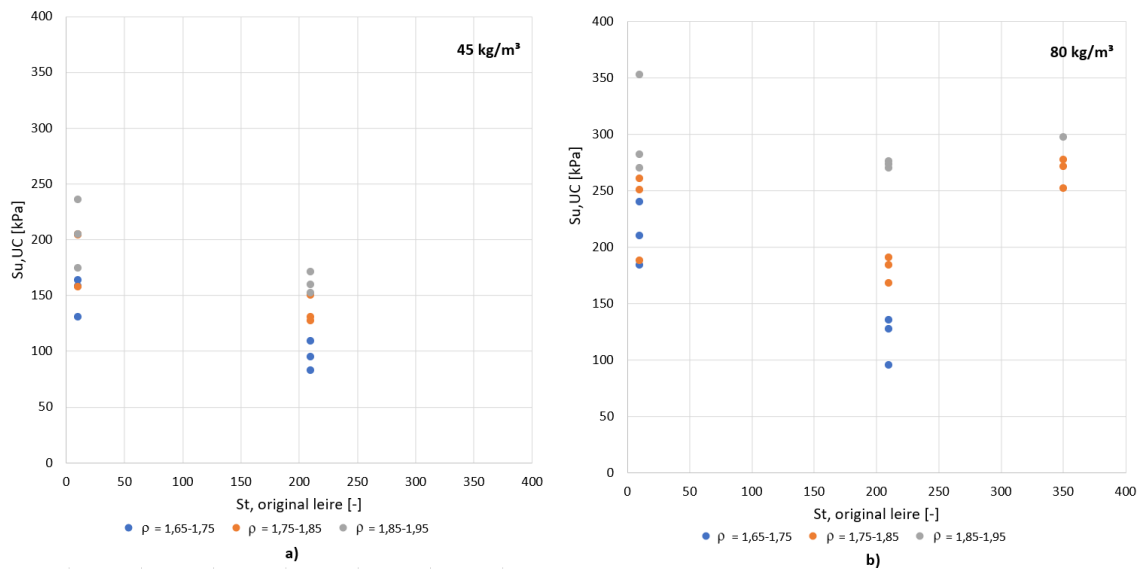
Figur 8.9 viser plastisitetsindeks i original leire mot oppnådd skjærfasthet etter 28 døgn. De ulike fargene representerer ulike densiteter. Til venstre er leirer stabilisert med bindemiddelmengde 45 kg/m³ og til høyre er leirer stabilisert med bindemiddelmengde 80 kg/m³.



Figur 8.9: I_P før stabilisering mot enaksial skjærfasthet etter 28 døgn for leire stabilisert med B80/CEMI.

8.3.3 Sensitivitet

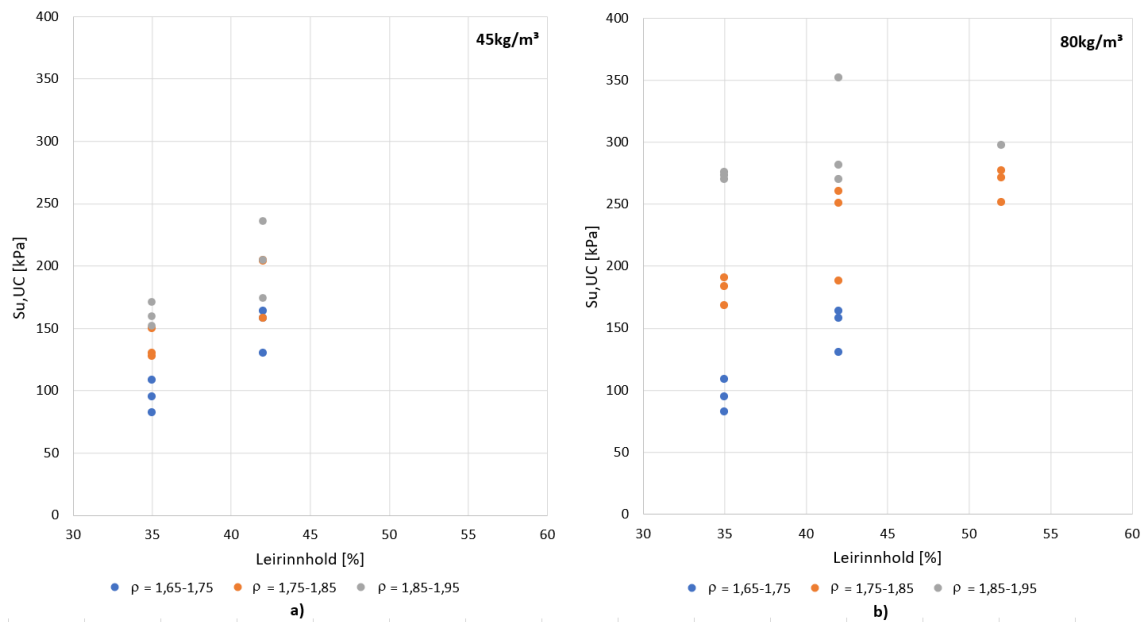
Figur 8.4 viser sensitivitet i original leire mot oppnådd skjærfasthet etter 28 døgn. De ulike fargene representerer ulike densiteter. Til venstre er leirer stabilisert med bindemiddelmengde 45 kg/m³ og til høyre er leirer stabilisert med bindemiddelmengde 80 kg/m³.



Figur 8.10: S_t før stabilisering mot enaksial skjærfasthet etter 28 døgn for leire stabilisert med B80/CEMI.

8.3.4 Leirinnhold

Figur 8.11 viser leirinnhold mot oppnådd skjærfasthet etter 28 døgn. De ulike fargene representerer ulike densiteter. Til venstre er leirer stabilisert med bindemiddelmengde 45 kg/m^3 og til høyre er leirer stabilisert med bindemiddelmengde 80 kg/m^3 .



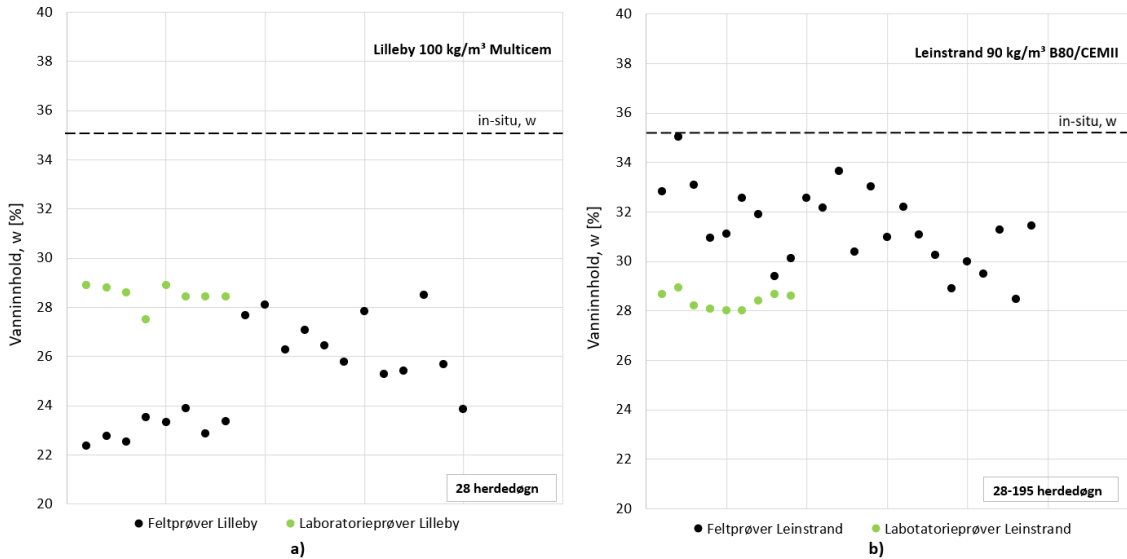
Figur 8.11: Leirinnhold mot enaksial skjærfasthet etter 28 døgn for leire stabilisert med B80/CEMI.

8.4 Sammenligning av felt- og laborieprøver

I laborieprogrammet ble leire fra Lilleby og Leinstrand stabilisert med samme type og mengde bindemiddel som kalksementpeler installert i felt. Feltprøvene fra Lilleby er tatt med prøvesylinder timer etter installasjon og herdet i laboratorium innpakket i plast i 28 døgn. Feltprøvene fra Leinstrand er tatt opp med hjelp av prøvegraving 160-195 døgn etter installasjon og skjært til for testing i laboratorium. Nedenfor sammenlignes resultatene fra laborieprøver og prøvene hentet fra felt.

8.4.1 Vanninnhold

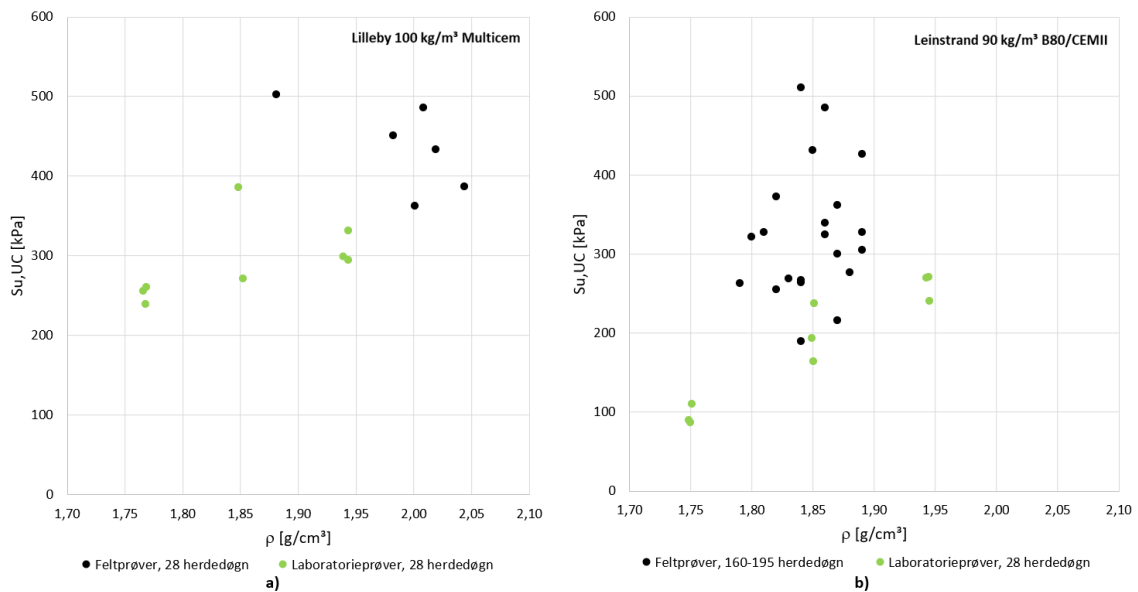
Figur 8.12 viser vanninnhold etter endt herdetid. Til venstre er felt- og laborieprøver fra Lilleby stabilisert med 100 kg/m^3 Multicem og til høyre er felt- og laborieprøver fra Leinstrand stabilisert med 90 kg/m^3 B80/CEMII.



Figur 8.12: Vanninnhold i felt- og labprøver etter endt herdetid. Til venstre er prøver fra Lilleby og til høyre er prøver fra Leinstrand.

8.4.2 Densitet mot oppnådd skjærfasthet

Figur 8.13 viser densitet mot oppnådd skjærfasthet. Til venstre er felt- og laborieprøver fra Lilleby stabilisert med 100 kg/m^3 Multicem og til høyre er felt- og laborieprøver fra Leinstrand stabilisert med 90 kg/m^3 B80/CEMII. Felt- og laborieprøvene fra Lilleby har lik herdetid på 28 døgn, mens feltprøvene fra Leinstrand har er lengere herdetid på 165-195 dager.



Figur 8.13: Densitet mot oppnådd skjærfasthet i felt- og laborieprøver. Til venstre prøver er fra Lilleby og til høyre er prøver fra Leinstrand.

Kapittel 9

Diskusjon

9.1 Vanninnhold og densitet

Leiren fra Lilleby og Leinstrand har mer eller mindre likt in-situ vanninnhold. Figur 8.1, 8.2 og 8.3 viser at den største endingen i vanninnhold skjer direkte etter tilsetning av bindemiddel. I løp av det første døgnet synker vanninnholdet ca. 6-10%, før det synker ytterligere 3-5% etter 28 herdedøgn. Figur 8.1 og 8.2 viser at innblandingsmengde på 80 kg/m^3 binder mere vann enn ved tilsetning av 45 kg/m^3 . Dette forklares ved at økt mengde kalsiumoksid (kalk) vil kreve mere vann i hydratiseringpresessen.

Tidligere studier har påpekt at innblanding med kalk/sement virker å tørke ut blandingen i større grad sammenlignet med innblanding av Multicem. Figur 8.3 viser ingen store forskjeller i ending av vanninnhold ved innblanding av Multicem sammenlignet med B80/CEMII. Dette er imidlertid ikke direkte sammenlignbart siden innblandingsmengdene ikke er de samme.

Figur 8.4 viser at planlagt densitet stemmer svært godt overrens med oppnådd densitet etter 28 herdedøgn. De fleste prøvene har et avvik på $<1\%$ i forhold til planlagt densitet. Lilleby 80 kg/m^3 merket med oransje farge har et avvik på ca. 2,3%, som i seg selv ikke er et bemerkelsesverdig avvik, men som likevell skiller seg ut i forhold til resten av prøvene. Da disse prøvene ble preparert i løpet av første dag av laboratoriearbeidet antas det at lite erfaring med innblandingsarbeidet var årsaken til avviket, ikke materialets egenskaper.

9.2 Korrelasjoner

9.2.1 Enaksial skjærfasthet mot densitet

Figur 8.5 viser en tydelig sammenheng mellom innbyggingsdensitet og oppnådd skjærfasthet i laboratorieprøvene, der økt densitet gir økt skjærfasthet. Resultatene samsvarer godt sammenlignet med tidligere erfaringer fra prosjektoppgaven (Baustad, 2021) og masteroppgaven til (Falle, 2021) som er omtalt i kapittel 4.2. Endring av densitet fra $1,7\text{-}1,9 \text{ g/cm}^3$ gir opp mot 25-40% økning i enaksial skjærfasthet avhengig av type leire og mengde bindemiddel. Ved innblanding av B80/CEMI er det leiren fra Lilleby med innblandingsmengde 80 kg/m^3 som oppnår høyest skjærfasthet, med verdier mellom 180 kPa og 350 kPa, avhengig av densitet i prøven. Leiren fra Leinstrand med innblandingsmengde 45 kg/m^3 oppnår lavest skjærstyrke, med verdier mellom 90 kPa og 160 kPa. Ved innblanding av likt bindemiddel som i felt oppnår leiren fra Lilleby med 100 kg/m^3 Multicem skjærfastheter mellom 250 kPa og 390 kPa, og leiren fra Leinstrand med 90 kg/m^3 B80/CEMII skjærfastheter mellom 90 kPa og 270 kPa.

Spredningene av oppnådd skjærfasthet innenfor samme innblandingsmengde og densitet er minimale. Figur 8.5 viser at både Lilleby 80 kg/m^3 i figur a) og Lilleby 100 kg/m^3 i figur b) har målte

verdier et godt stykke utenfor trendlinjen. Oppnådd skjærfasthet på 390 kPa i Figur 8.5 b) for Lilleby 100 kg/m³ med densitet 1,85 g/cm³ er høyere enn samtlige replikaer med densitet 1,95 g/cm³ og antas derfor å være usannsynlig høy.

Figur 8.5 a) viser at innblandingsmengde på 80 kg/m³ har en brattere økning i oppnådd skjærfasthet ved økt densitet sammenlignet med innblandingsmengde på 45 kg/m³. Dette kan tyde på at høyere innblandingsmengde er mer sensitiv for endring av densitet. Figur 8.5 b) viser stor forskjell i oppnådd skjærfasthet i prøvene fra Lilleby og Leinstrand ved lav densitet, mens ved høyere densitet blir forskjellen betydelig mindre. Ved densitet 1,75 g/cm³ er forskjellen i oppnådd skjærfasthet mellom Lilleby og Leinstrand ca. 150 kPa, mens ved densitet 1,95 kg/m³ er forskjellen bare 50 kPa.

Resultatene fra laboratoriearbeidet setter lys på viktigheten av riktig densitet i laboratorieprøver, ved at for lav densitet kan gi usannsynlig lav skjærfasthet, mens for kompakte prøver kan gi urealistisk høy skjærfasthet. Erfaringer fra kalksementstabilisering i felt viser at densiteten både kan bli høyere og lavere enn in-situ densitet. Dette gjør det utfordrende å konkludere med hva som er ”riktig” densitet ved innstamping av kalksementprøver i laboratorium, og det vil sannsynligvis variere i forhold til type leire og bindemiddel, så vel som innblandingsmengde.

9.2.2 Enaksial skjærfasthet mot elastisitetsmodul E_{50}

Figur 8.6 viser en trend der elastisitetsmodulen E_{50} øker ved økt skjærfasthet i laboratorieprøvene. Elastisitetsmodulen ligger mellom 13 og 90 MPa for leirer stabilisert med B80/CEMI og 14 og 65 MPa for leirer stabilisert med likt bindemiddel som i felt. Generelt viser laboratorieresultatene oppnådd stivhet i størrelsesorden 100-300 ganger oppnådd skjærfasthet. Selv om resultatene viser en trend der økt fasthet gir økt stivhet, er det relativt stor spredning av elastisitetsmodul innad like replikaer. Som skrevet i kapittel 7.1 ble det observert porøse og ujevne overflater i prøver med lav densitet. Dette antas å ha skapt myk respons i starten av noen av skjærforsøkene.

Leiren fra Leinstrand med innblandingsmengde 90 kg/m³ og B80/CEMII i figur 8.6 b) har tilnærmet ingen økning i stivhet ved økt skjærfasthet. Elastisitetsmodulen ligger mellom 14 og 24 Mpa for samtlige replikaer. Hva som er årsaken til den myke oppførselen er usikkert. Ingen av prøvene hadde en spesielt porøs eller ujevn overflate, og kan derfor ikke forklares basert på dette. Da prøvene fra Leinstrand med innblandingsmengde 90 kg/m³ var den eneste blandingen med B80/CEMII er det også usikkert om bindemiddelet har hatt innvirkning på stivheten.

9.2.3 Enaksial skjærfasthet mot skjærbølgehastighet

Figur 8.7 viser ingen sammenheng mellom enaksial skjærfasthet og skjærbølgehastighet. De målte skjærbølgehastighetene ligger mellom 60 og 150 m/s, med unntak av to målte verdier på over 200 m/s. Skjærbølgehastighetene er svært lav i forhold til hva som kan forventes i et stabilisert materiale. Som skrevet tidligere forventes det at skjærbølgehastigheten øker med økt stivhet. Dette er ikke tilfellet i dette laboratoriearbeidet, da skjærbølgehastigheten er tilnærmet flat sammenlignet med enaksial skjærfasthet. Korrelasjonene utviklet av blant annet (Dannewitz mfl., 2005) og (Chan, 2006), viser ingen sammenheng med resultatene i denne masteroppgaven. Som skrevet tidligere ble det satt spørsmålsteget til lave skjærbølgehastigheter tidlig i testperioden. Det ble tatt i bruk et annet benderelement for å utelukke feil med utstyret, men også her ble det målt lavere verdier enn det som forventes.

I etterkant av laboratoriearbeidet ble det gjort forsøk på å forstå årsaken til de lave skjærbølgehastighetene. En teori er at det ble brukt for lav frekvens i forsøkene og at metoden beskrevet i kapittel 7.3.2, som går ut på å sammenligne sendt og motatt bølge, ikke var den beste tilnærmingen for valg av frekvens i det aktuelle bender elementet. Ved bruk av korrelasjonen utviklet av (Dannewitz mfl., 2005) skulle en kalksementprøve med skjærstyrke 200 kPa oppnå en skjærbølgehastighet på ca. 300 m/s. Skjærbølgehastighet på 300 m/s og en frekvens på 0,5 kHz gir i følge likning 5.14 en bølgelengde på 0,6 m. Det vil si at lengden av den sendte bølgen i prinsipp var 6 ganger lengre enn kalksementprøven i det utførte laboratoriearbeidet. I følge (Stephenson, 1977) bør bølgelengden

være så liten som mulig i forhold til prøvestykket for å minimere effekten av prøvehøyden. Det kan tenkes at høyere frekvens og dermed kortere bølgelengde ville gjort det enklere å tolke skjærbølgen.

Som nevnt tidligere foreslo (Sanchez-Salineró mfl., 1986) at forholdet mellom prøvehøyden og bølgelengden R_d , skulle være mellom 2 og 4 for sikre at nærfeltseffekten unngås. Ved utgangspunkt i korrelasjonen til (Dannewitz mfl., 2005) og en skjærbølgehastighet på 300 m/s vil forholdstallet R_d i det utførte forsøket ha en verdi på 0,16. På denne måten kan det ikke utelukkes at de målte skjærbølgehastighetene har blitt påvirket av nærfeltseffekten.

Figur 7.6 viser at bender elementet registrerer signaler før den sendte bølgen. Signalene kan tyde på at systemet ble påvirket av forstyrrelser eller bakgrunnsstøy. Det er usikkert hvor denne bakgrunnsstøyen eventuelt kommer fra, men kan være en faktor som har påvirket resultatet. Et annet svakt punkt med testingen var utfordringen med å oppnå optimal kontakt mellom den stive kalksementprøven og bender elementet. Da det var forskjell på hvor hard prøvene ble, varierte det også hvor lett prøven kunne plasseres i bender elementet. Kvaliteten av målingene fra prøve til prøve var dermed vanskelig å kontrollere.

9.3 Leirer med lik mengde og type bindemiddel

9.3.1 Udrenert skjærstyrke

Figur 8.8 viser at leirer med høyest skjærfasthet før stabilisering oppnår høyest skjærfasthet etter 28 herdedøgn. Det er imidlertid liten variasjon i opprinnelig skjærfasthet i leirene som er brukt. Opprinnelig skjærfasthet ligger mellom 21 og 35 kPa og leirene karakteriseres som bløt til midtels fast. Fastheten har tidligere vist seg å ha betydning for innblandingsarbeidet. I det utførte laboratoriearbeidet ble ikke dette registrert som en utfordring.

Høyre bindemiddelmengde ser ut til å gjøre materialet mer sensitivt for endring i densitet da innblandingmengde 80 kg/m³ har større spredning i oppnådd skjærfasthet ved endring av densitet sammenlignet med innblandingmengde 45 kg/m³.

9.3.2 Plastisitetsindeks

Figur 8.9 viser ingen entydig sammenheng mellom plastisitetsindeks og oppnådd skjærfasthet. Ved innblandingmengde 45 kg/m³ oppnår leiren med I_P på 17% høyere skjærfasthet enn kvikkleiren med I_P på 8%. Ved innblanding av 80 kg/m³ er det kvikkleiren med I_P på 10% som oppnår høyest fasthet. Tidligere litteratur viser at kvikkleirer med lav plastisitetsindeks ofte oppnår høyere fasthet. Figur 8.9 b) viser imidlertid en økning i skjærfasthet ved økt plastisitetsindeks i de to kvikkleirene. Selv om plastisitetsindeksen i de to kvikkleirene er veldig like, er det opp mot 150 kPa forskjell i oppnådd skjærfasthet ved densitet 1,85-1,95 g/cm³. Det antas derfor at det er andre faktorer enn I_P som er avgjørende for fasthetsutviklingen i leirer, for eksempel sensitivitet som diskuteres i neste delkapittel.

Under laboratoriearbeidet ble det registrert at lav plastisitetsindeks gjorde det enklere å homogenisere materialet sammenlignet med høyere plastisitetsindeks. En potensiell årsak til dette kan være at leiren med I_P på 17% var middels en fast leire mens leiren med I_P på 8% var kvikkleire.

9.3.3 Sensitivitet

Figur 8.10 b) viser at kvikkleiren med høyest sensitivitet oppnår høyest skjærstyrke. Økt skjærstyrke med økende sensitivitet i kvikkleirer er sett i flere tidligere studier, blant annet i masteroppgaven til (Skjæran, 2020).

Leiren med sensitivitet på 10 oppnår høyere skjærfasthet enn kvikkleiren med sensitivitet på 210 både ved innblandingmengde 45 kg/m³ og 80 kg/m³. Dette indikerer at selv om høy sensitivitet

er gunstig for fasthetsutvikling i kvikkleirer, er det mulig å oppnå høy fasthet i leirer med lav sensitivitet. Det bør imidlertid påpekes at dette gjelder for prøver preparert i laboratorium. Leirer med høy omrørt skjærstyrke og lav sensitivitet kan skape utfordringer knyttet til innblandingsarbeid i felt, som ofte resulterer i en dårlig homogenisert pel.

9.3.4 Leirinnhold og leirmineraler

Figur 8.11 viser at økende leirinnhold (avtagende siltinnhold) gir økt skjærfasthet i laboratorieprøvene. Som nevnt tidligere vil fasthetsøkningen være avhengig av pozzolane reaksjoner mellom kalk og leirmineraler. Høyt leirinnhold vil dermed øke den pozzolane reaktiviteten, noe som gir grunnlag for høy fasthet.

Tidligere erfaringer peker på utfordringer ved bruk av kun sement når leirinnholdet er over 50%. Lik andel kalk og sement (50/50) i innblandingene gjør at materialene oppnår høy fasthet til tross for høyt leirinnhold.

Leiren som oppnår høyest skjærfasthet inneholder leirmineraler av blant annet illitt og kloritt. Illitiske leirer har tidligere vist seg å være godt egnet for kalksementstabilisering. Den høye andelen av leirfraksjoner, blandingsforholdet mellom kalk og sement i tillegg til innhold av illitt, ser ut til å gi god fasthetsutvikling.

9.4 Sammenligning av felt- og laboratorieprøver

Som skrevet tidligere er leire fra Leinstrand og Lilleby stabilisert med lik mengde og bindemiddel som peler i felt. På denne måten kan laboratorieprøvene i masteroppgaven sammenlignes med feltprøver. Sammenligningen vil først og fremst gi svar på om laboratorieprosedyren som er brukt gir bedre samsvar mellom skjærstyrke i felt og laboratorieprøver.

Sammenligningen tar for seg vanninnhold i de to leirene før og etter stabilisering i tillegg til korrelasjoner mellom densitet og oppnådd skjærfasthet.

9.4.1 Vanninnhold

Figur 8.12 a) viser at feltprøvene fra Lilleby i gjennomsnitt har lavere vanninnhold etter herding sammenlignet med laboratorieprøvene. Mens vanninnholdet til laboratorieprøvene ligger rundt 28-29% etter herding, har noen av feltprøvene vanninnhold helt nede på 22%. Feltprøvene ble tatt opp bare timer etter installasjon og herdet i laboratoriet i komposittsylindere med plast rundt. Resultatene tyder på at feltprøvene kan ha vært preget av uttørkning under herding.

Figur 8.12 b) viser at laboratorieprøvene fra Leinstrand i gjennomsnitt har lavere vanninnhold etter herding sammenlignet med feltprøvene. Det gjennomsnittlige vanninnholdet til feltprøvene etter herding ligger rundt 32%, mens laboratorieprøvene har et gjennomsnittlig vanninnhold på 28-29%. Feltprøvene fra Leinstrand er i motsetning til feltprøvene fra Lilleby herdet i felt og hentet ut ved prøvegraving og utskjæring like før testing. Herding i felt ser ut til å bevare vannet på en bedre måte sammenlignet med laboratorieprøvene. Det kan tenkes at herding i felt gir tilgang på ekstra vann ved å benytte seg av porevann fra omliggende materiale, og på denne måten klarer å oppnå et høyere vanninnhold.

Selv om herdingen av laboratorieprøvene skjer under kontrollerte forhold er det vanskelig å si hvor mye av vannet som fordampes ved innstamping av prøvesylindere. Materialet eksponeres for luft i opp til 30 minutter etter tilsetning av bindemiddel før sylindere settes til herding. Det utelukkes ikke at materialet minster noe fuktighet i løpet av denne tiden.

9.4.2 Densitet mot oppnådd skjærfasthet

Figur 8.13 viser at feltprøver generelt oppnår høyere skjærfasthet sammenlignet med laboratorieprøver i denne masteroppgaven. Trenden er ikke ukjent og har blitt diskutert i flere tidligere studier. Selv om laboratorieprøvene er herdet ved 20° C og ikke 6 – 8° C slik som i tidligere prosedyrer vil varmeutviklingen hemmes av prøvenes lave volum. Laboratorieprøvene er i tillegg herdet i vanlig atmosfæretrykk i motsetning til feltprøvene som er herdet under spenningsavhengig trykk.

Feltprøvene fra Leinstrand i Figur 8.13 b) har et stort spredningsområde med skjærfastheter fra 200 kPa til over 500 kPa på det som tilsynelatende skal være like replikaer. Feltprøvene fra Lilleby i Figur 8.13 a) har også store variasjoner i oppnådd skjærfasthet. Oppnådd fasthet i felt påvirkes av flere faktorer, som beskrevet i kapittel 3.3. Ved stabilisering av et bestemt område i felt antas det at jordegenskaper, mineralogi, herdetrykk og herdetemperatur er forholdsvis likt. Det som imidlertid kan variere fra pel til pel er innblandingsarbeidet. Harde lag, myke lag eller steiner er eksempler på faktorer som påvirker innblandingsarbeidet i felt og kan gjøre pelen inhomogen. Med andre ord er det svært vanskelig å kontrollere hva som skjer ved innblanding flere meter ned i bakken og hvor mye bindemiddel som faktisk befinner seg i pelen. Figur 4.7 i kapittel 4.5 et godt eksempel på dette: Bildet av feltprøven fra Lilleby viser et tydelig sjikt av bindemiddel som ikke har reagert med omliggende leire. Sjikt med ureagert, lite eller ingen bindemiddel resulterer i en pel med varierende w/b-tall. Flere studier viser at w/b-tallet er en svært viktig parameter for oppnådd fasthet, og det er realistisk å tro at inhomogenitet i tillegg til varierende w/b-tall i pelen forårsaker at innblandingsarbeidet er årsaken til store spredninger av oppnådd skjærfasthet i feltprøver.

Både leiren fra Lilleby og Leinstrand har in-situ densitet på ca. 1,95 g/cm³. Figur 8.13 a) viser at feltprøvene fra Lilleby har densitet i intervallet 1,85-2,05 g/cm³, mens figur 8.13 b) viser at feltprøvene fra Leinstrand har densitet i intervallet 1,80-1,90 g/cm³. Resultatene viser at oppnådd densitet i det kalksementstabiliserte materialet i liten grad blir påvirket av in-situ densitet, men heller type leire, bindemiddel og innblandingsarbeid. Også her bør det nevnes at feltprøvene fra Lilleby ble tatt opp ved hjelp av prøvesylinder bare timer etter installasjon, noe som betyr at den store variasjonen av densitet i feltprøvene kan skyldes sammenpressing og/eller forlengelse av materialet i sylinderen ved prøvetaking.

Som diskutert tidligere vil økt densitet i laboratorieprøver resultere i økt fasthet. Likevel viser feltprøvene i Figur 8.13 ingen sammenheng mellom densitet og oppnådd skjærfasthet. I dette tilfelle vil også den manglende kontrollen over bindemiddel og homogenitet i kalksementpelen i felt, som diskutert ovenfor, resultere i stor spredning av skjærfastheter for samme densitet.

9.4.3 Usikkerheter

Det er kun gjort rutineundersøkelser av leirer brukt i laboratorieprøvene og det finnes derfor usikkerheter i forhold til in-situ egenskaper i feltprøvene. Selv om tidligere grunnundersøkelser tilsier at leiren fra Lilleby og Leinstrand er et relativt homogent materiale, bør variasjoner av egenskaper innenfor samme område ikke utelukkes. Dette gjelder selv om leiren som er brukt i laboratoriearbeidet er forsøkt tatt på samme dybde som feltprøvene, nettopp for å minimere denne usikkerheten.

Del III

Konklusjon og videre arbeid

Kapittel 10

Konklusjon og videre arbeid

10.1 Konklusjon

Oppnådd fasthet i kalksementstabilisert leire er avhengig av flere faktorer. Som forventet gir økt mengde bindemiddel høyere skjærfasthet i alle prøvene. Resultatene i masteroppgaven viser at kvikkleiren med høyest in-situ skjærfasthet, sensitivitet og leirinnhold oppnår høyest skjærfasthet etter endt herding. Tilsvarende slutninger er også gjort i tidligere studier der kvikkleirer med høy sensitivitet ofte oppnår god fasthet. Det høye leirinnholdet indikerer at den pozzolane reaksjonen mellom kalk og leirminerale i stor grad har bidratt til økt fasthet. Norske erfaringer viser at plastisitetsindeks og vanninnhold er blant de viktigste egenskapene for fasthetsutvikling uavhengig av type bindemiddel, i tillegg til at synkende plastisitetsindeks i kvikkleirer gir økt skjærfasthet. Resultatene fra laboratoriearbeidet viser imidlertid ingen tydelig sammenheng mellom plastisitetsindeks og skjærfasthet. Dette skyldes trolig av at resultatene inneholder for lite data for å kunne se en helhet. Siden vanninnholdet i de stabiliserte massene er tilnærmet lik er ikke dette brukt som sammenligningsgrunnlag.

Tidligere litteratur viser til at oppnådd skjærfasthet i laboratorieprøver er avhengig av hvilken innbyggingsdensitet prøvene har. Resultatene fra laboratorieforskningene i masteroppgaven viser at både oppnådd skjærfasthet og stivhet i stor grad er avhengig av innbyggingsdensitet. Endring av densitet fra 1,7-1,9 g/cm³ gir opp mot 25-40% økning i enaksial skjærfasthet avhengig av type leire og mengde bindemiddel. Effekten av ulike innbyggingsdensiteter i laboratoriepreparerte kalksementprøver er med andre ord svært stor. Resultatene viser at innbyggingsdensitet i laboratorieprøver er en viktig faktor for å unngå å over- eller underestimere fastheten, da for høy densitet kan gi urealistiske høye skjærfastheter, mens lav densitet kan resultere i lave skjærfastheter. Samtlige prøver i laboratorieprogrammet har <2,3% avvik fra planlagt densitet og det er godt samsvar mellom resultatene for like replikaer. Laboratorieprosedyren utviklet av KlimaGrunn gir grunnlag for å produsere reproduerbare prøver med forhåndsbestemt densitet og anbefales som prosedyre ved innstamping av kalksementprøver i laboratorie.

Selv om korrelasjonen mellom innbyggingsdensitet og enaksial skjærfasthet er svært sterk i laboratorieprøvene viser imidlertid data fra felt ingen sammenheng mellom densitet og skjærfasthet i kalksementprøver. Datagrunnlaget viser videre at både oppnådd skjærfasthet og densitet i stabilisert materiale i felt har store variasjoner, trolig på grunn av inhomogenitet. Det studerte materialet viser en trend der densiteten i stabiliserte masser i felt er ca. 2-5% lavere enn in-situ densitet, men kan også være opp mot 5% høyere. På denne måten er det vanskelig å bestemme hva som er "riktig" innbyggingsdensitet ved preparering av prøver iht. den nye laboratorieprosedyren siden densiteten i felt trolig vil variere og være avhengig av jordegenskaper, bindemiddeltipe og -mengde i tillegg til innblandingsarbeid.

Resultatene fra bender element-forsøket viser ingen sammenheng mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet i de laboratoriepreparerte prøvene ved bruk av en frekvens på 0,5 kHz og amplitude 1 V. Målte skjærbølgehastigheter ligger mellom 50-150 m/s og er generelt lavere enn det som

kan forventes. Økt enaksial skjærfasthet $s_{u,UC}$, gir ikke økt skjærbølgehastighet v_s , i det utførte laboratoriearbeidet, slik som sett i andre studier. Det er imidlertid store usikkerheter knyttet til bender element-forsøket og det antas at de lave skjærbølgehastighetene kan skyldes for lav frekvens i det utførte forsøket.

Selv ved bruk av ny laboratorieprosedyre oppnår kalksementprøver fra felt generelt høyere fasthet enn prøver preparert i laboratoriet. Noen av laboratorieprøvene med innbyggingsdensitet 1,8-1,9 g/cm³ ligger i nærheten av feltprøvene. Det er likevel spredningen av skjærfastheten til feltprøvene som skaper den største utfordringen. Oppnådd skjærfasthet i felt varierer fra under 200 kPa til over 500 kPa. Dette peker på inhomogitet og variasjon av w/b-tall i pelen. Det antas at lite kontroll over hva som faktisk skjer i grunnen ved installasjon av kalksementpeler er en sentral årsak til stor spredning av oppnådd skjærfasthet i feltprøver.

Resultatene i masteroppgaven viser at laboratorieprosedyren gir gode resultater med lav spredning og god kontroll på densiteten. Med dette som utgangspunkt finnes det gode muligheter for å lage ulike korrelasjonsmodeller i laboratoriet. Det er imidlertid i felt utfordringen ligger, da kalksementstabilisering medfører store usikkerheter knyttet til oppnådd skjærfasthet. Skal det benyttes en metode som medfører så store klimagass-utslipp, bør det blant annet stilles strengere krav til innblandingsarbeid slik at usikkerheten i felt reduseres.

10.2 Videre arbeid

I laboratoriearbeidet ble det preparert prøver med lavere innbyggingsdensitet enn in-situ densitet. Som nevnt tidligere er det målt densitet høyere enn in-situ densitet i stabilisert materiale i felt. Det bør derfor vurderes om det også skal prepareres prøver med høyere innbyggingsdensiteter. Prøvene er herdet uten celletrykk og virkningen av dybde er ikke undersøkt. Da herdestrykk tidligere har vist seg å gi økt skjærfasthet bør dybdeeffekten undersøkes ved bruk av ulike celletrykk.

For å oppnå gode og entydige resultater ved måling av skjærbølgehastighet i kalksementprøver på laboratoriet bør virkningen av ulike frekvenser studeres. I en videreførelse av dette bør det undersøkes om høyere frekvenser gir bedre korrelasjon mellom skjærbølgehastighet og skjærfasthet i laboratoriet.

I dag er det stor usikkerhet knyttet til kvaliteten i de installerte pelene, hvor spredningen av skjærfastheten skaper utfordringer med å bestemme karakteristiske verdier for dimensjonering. En måte å redusere usikkerhetene på kan være å optimalisere utformingen av rigger. Leverandører og entreprenører har ulike måter å installere kalksementpeler på, noe som gjør at resultatet av stabiliseringen også varierer. En felles optimalisert innblandingsprosedyre i felt kan tenkes å redusere spredninger av skjærfastheter i framtiden.

Referanser

- Arroyo, M., Muir Wood, D. & Greening, P. D. (2003). Source near-field effects and pulse tests in soil samples. *Géotechnique*, 53(3), 337–345.
- Baustad, P. (2021). Densitet i kalksementprøver.
- Bell, F. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223–237. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Brattli, B. (2020). Ingeniørgeologi løsmasser (2. utgave 2015, med retting av mindre feil 2018.).
- Broms, B. B. (1991). Stabilization of Soil with Lime Columns. I H.-Y. Fang (Red.), *Foundation Engineering Handbook* (s. 833–855). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3928-5_24
- Chan, C.-M. (2006). *A laboratory investigation of shear wave velocity in stabilised soft soils*. (Doktoravhandling). University of Sheffield.
- Chan, C.-M. & Low, L.-P. (2010). Development of a Strength Prediction Model for” Green” Compressed Stabilised Earthbricks. *Journal of Sustainable Development*, 3(3), 140.
- Cherian, C. & Arnepalli, D. N. (2015). A Critical Appraisal of the Role of Clay Mineralogy in Lime Stabilization. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1. <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0009-3>
- Dannewitz, N., Eriksson, H., Mattsson, H., Larsson, R. & Holm, G. (2005). *Seismisk kontrollmetod för KC-pelare*. Svensk Djupstabilisering.
- Dash, S. K. & Hussain, M. (2012). Lime stabilization of soils: reappraisal. *Journal of materials in civil engineering*, 24(6), 707–714.
- Dyvik, R. & Madshus, C. (1985). Lab Measurements of G m a x Using Bender Elements. *Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, 186–196.
- Eidsmo, S. (2019). Sammenligning av ulike bindemidler for dypstabilisering av kvikkleire. <http://hdl.handle.net/11250/2624279>
- Engeset, I. (2018). Betydning av spenningsnivå under herding av kalksementstabilisert leire. - Effekter på fasthet og stivhet. <http://hdl.handle.net/11250/2566935>
- Falle, F. Å. (2021). Comparing laboratory and field stabilised clay. <https://hdl.handle.net/11250/2787267>
- Hirai, T., Ise, J., Kusakari, T., Gotou, M. & Hibi, Y. (1996). Development and application of deep mixing soil stabilization method to control displacement of adjacent ground. *Proc. of the IS-Tokyo*, 96, 485–490.

-
- Ho, L. S., Nakarai, K., Ogawa, Y., Sasaki, T. & Morioka, M. (2017). Strength development of cement-treated soil. Effects of water content, carbonation, and pozzolanic reaction under drying curing condition. *Construction and building materials*, 134, 703–712.
- Janz, M. & Johansson, S.-E. (2002). The function of different binding agents in deep stabilization. *Swedish deep stabilization research centre, report*, 9, 1–35.
- J.Jahren. (2000). *Hva er Leire? Om leirmineraler og deres spesielle egenskaper*. Institutt for geologi, Universitetet i Oslo.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Lee, J.-S. & Santamarina, J. C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(9), 1063–1070.
- L’Heureux, J.-S. & Long, M. (2017). Relationship between shear-wave velocity and geotechnical parameters for Norwegian clays. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 143(6), 04017013.
- Long, M., L’Heureux, J.-S., Bache, B. K. F., Lund, A. K., Hove, S., Sødal, K. G., Amundsen, H. A., Nordal, S. & Montafia, A. (2019). Site characterisation and some examples from large scale testing at the Klett quick clay research site.
- Miura, N., Horpibulsuk, S. & Nagaraj, T. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. *Soils and foundations*, 41(5), 33–45.
- Morawska, M. (2019). *An Experimental Study of Anisotropic Stiffness of Tiller-Flotten Quick Clay Using Bender Elements* (Masteroppgave). NTNU.
- Multiconsult. (2017). E6 Trondheim-Melhus. *Datarapport 415778-RIG-RAP-005*.
- Multiconsult. (2021a). Laboratoriereprosedyre innblandingsforsøk i KlimaGrunn.
- Multiconsult. (2021b). Lilleby felt B4. *Datarapport 10218028-RIG-RAP-001*.
- NGF. (2012). *Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler*. Norsk Geoteknisk Forening.
- NGI. (udatert). *Hva er kvikkleire?* Hentet 7. desember 2021, fra <https://www.ngi.no/Tjenester/Fagekspertise/Kvikkleireskred/Hva-er-kvikkleire>
- NGU. (udatert). *Løsmasser - Nasjonal løsmassedatabase*. Hentet 5. november 2021, fra <http://geo.ngu.no/kart/losmasse-mobil/>
- Norcem. (udatert). Kalksement KC. <https://www.norcem.no/no/kalksement>
- Nordal, S. & Eiksund, G. (2021). Geodynamics.
- NS-EN 197-1:2011. (2011). Sement - Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper. *Standard Norge*.
- NVE. (2019). Sikkerhet mot kvikkleireskred. *Norges vassdrag-og energidirektorat*.
- Paniagua, P., Bache, B. K., Karlsrud, K. & Lund, A. K. (2019). Strength and stiffness of laboratory-mixed specimens of stabilised Norwegian clays. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Ground improvement*, 1–14.

-
- Porbaha, A. & Ghaheri, F. (2005). Soil Cement Properties from Borehole Geophysics Correlated with Laboratory Tests. *Deep Mixing Best Practice and Recent Advances, Stockholm, 1*, 605–611.
- Prusinski, J. R. & Bhattacharja, S. (1999). Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation research record, 1652*(1), 215–227.
- Rio, J. F. M. E. (2006). *Advances in laboratory geophysics using bender elements*. University of London, University College London (United Kingdom).
- Rohstoffe, K. (udatert). *Clay Mineralogy?* <https://www.geo-ceramic-laboratory.com/geo-ceramic-laboratory/clay-mineralogy/>
- Sanchez-Salinerio, I., Roesset, J. M., Stokoe, I. & Kenneth, H. (1986). *Analytical studies of body wave propagation and attenuation* (tekn. rapp.). Texas Univ at Austin Geotechnical Engineering Center.
- Sandven, R., Senneset, K., Emdal, A., Nordal, S., Janbu, N. & Grande, L. (2017). *Geotechnics Field and Laboratory Investigations*. Compendium in course TBA4110 Geoteknikk, felt- og laboratorieundersøkelser.
- Skjæran, H. (2020). *Optimalisering av innblandingsmengder i ulike leirer ved kalksementpeling* (Masteroppgave). NTNU.
- Stephenson, R. (1977). Ultrasonic Testing for Determining Dynamic Soil Moduli, 179–195.
- SVV. (2014). Håndbok V221 - Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger. *Statens vegvesen*.
- SVV. (2018). Håndbok V220 - Geoteknikk i vegbygging. *Statens vegvesen*.
- Syversen, F. S. (2013). *Et studie av den mineralogiske sammensetningen i den norske sensitive leirer: med et geoteknisk perspektiv* (Masteroppgave).
- Wiersholm, P. (2018). Temperatureffekter i kalksementstabilisert leire. <http://hdl.handle.net/11250/2566943>
- Xu, L., Zha, F., Liu, C., Kang, B., Liu, J. & Yu, C. (2020). Experimental investigation on carbonation behavior in lime-stabilized expansive soil. *Advances in Civil Engineering, 2020*.
- Åhnberg, H., Johansson, S.-E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L. & Holm, G. (1995). *Cement och kalk for djupstabilisering av jord. En kemisk-fysikalisk studie av stabiliserings-effekter*.

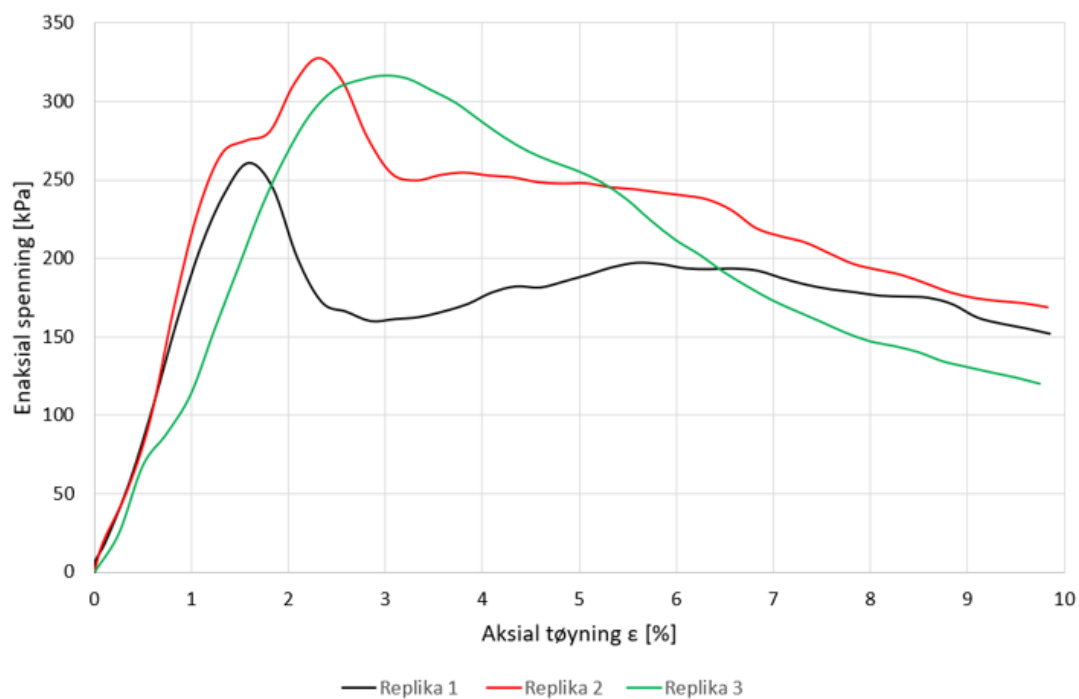
Tillegg A

Resultater fra laboratoriearbeidet

I Tillegg A presenteres resultater fra enaksial trykktest, skjærbølgehastighetsmålinger, i tillegg til bilder av samtlige laboratorieprøver. Prøvene er merket med lokasjon, innblandingsmengde og planlagt densitet.

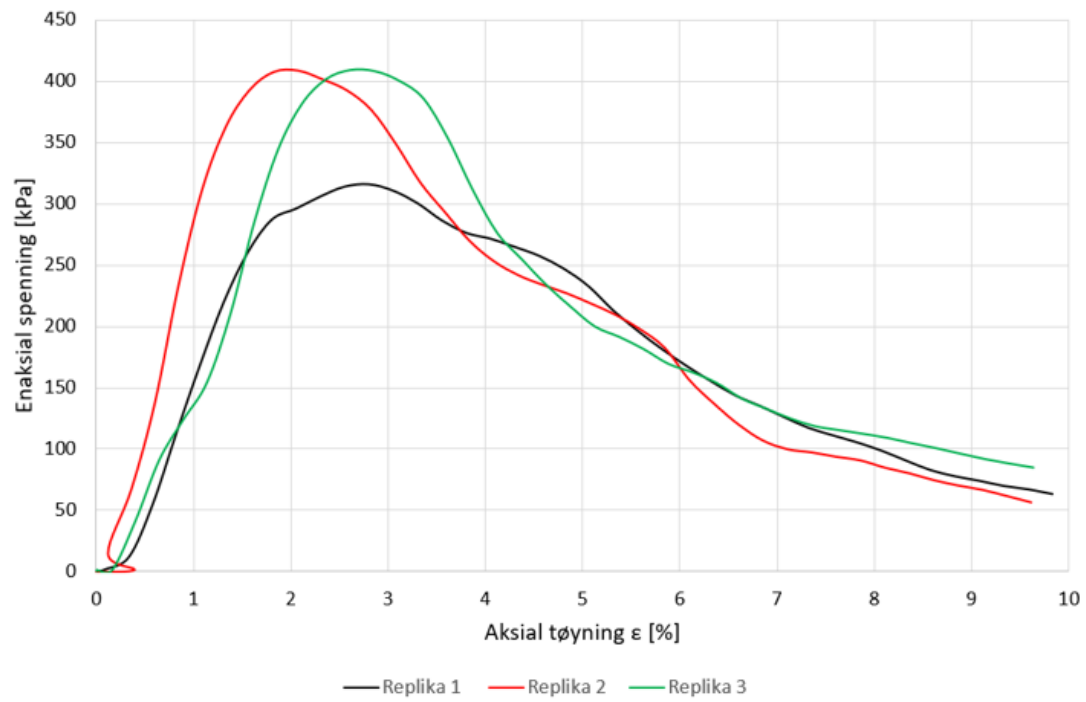
A.1 Enaksialforsøk

Lilleby 45 kg/m³ - 1,70



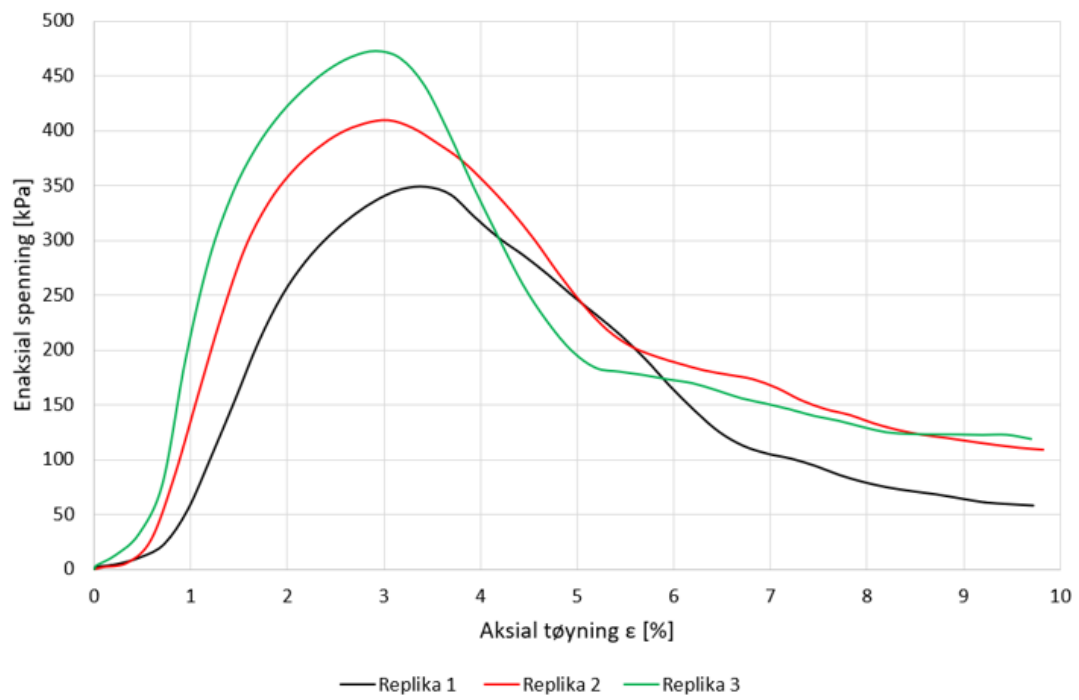
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	260,73	130,36	1,58	21,9	1,70
2	327,31	163,66	2,31	29,3	1,72
3	316,13	158,06	2,97	16,4	1,71

Lilleby 45 kg/m³ - 1,80



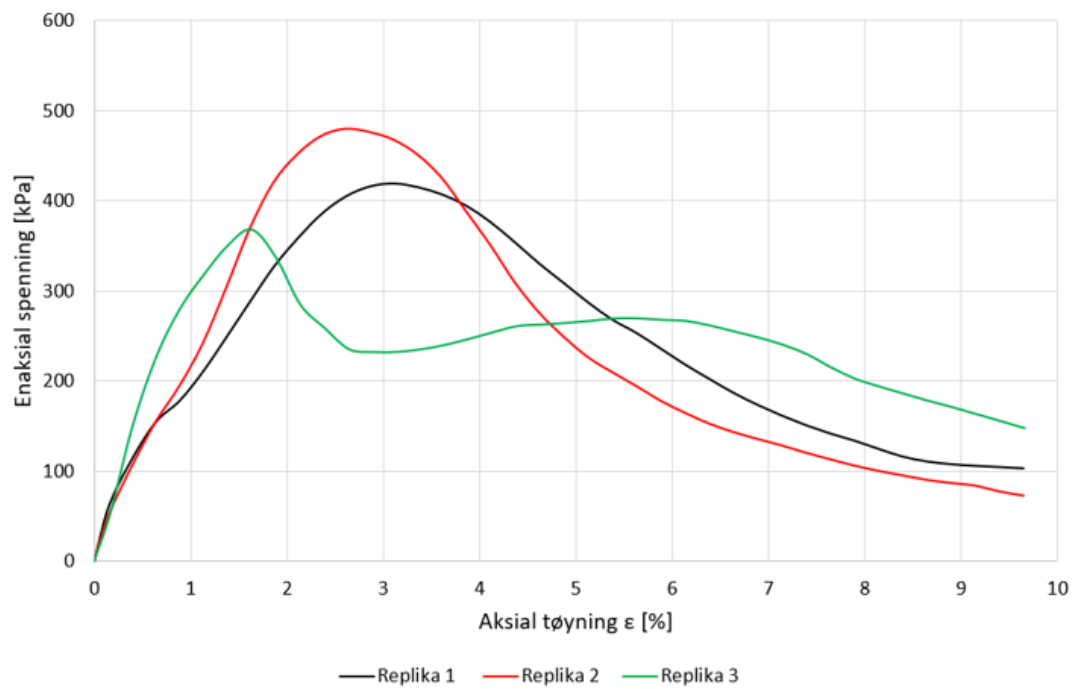
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	315,86	157,93	2,80	22,80	1,80
2	408,56	204,28	2,07	39,40	1,80
3	409,50	204,75	2,61	26,80	1,80

Lilleby 45 kg/m³ - 1,90



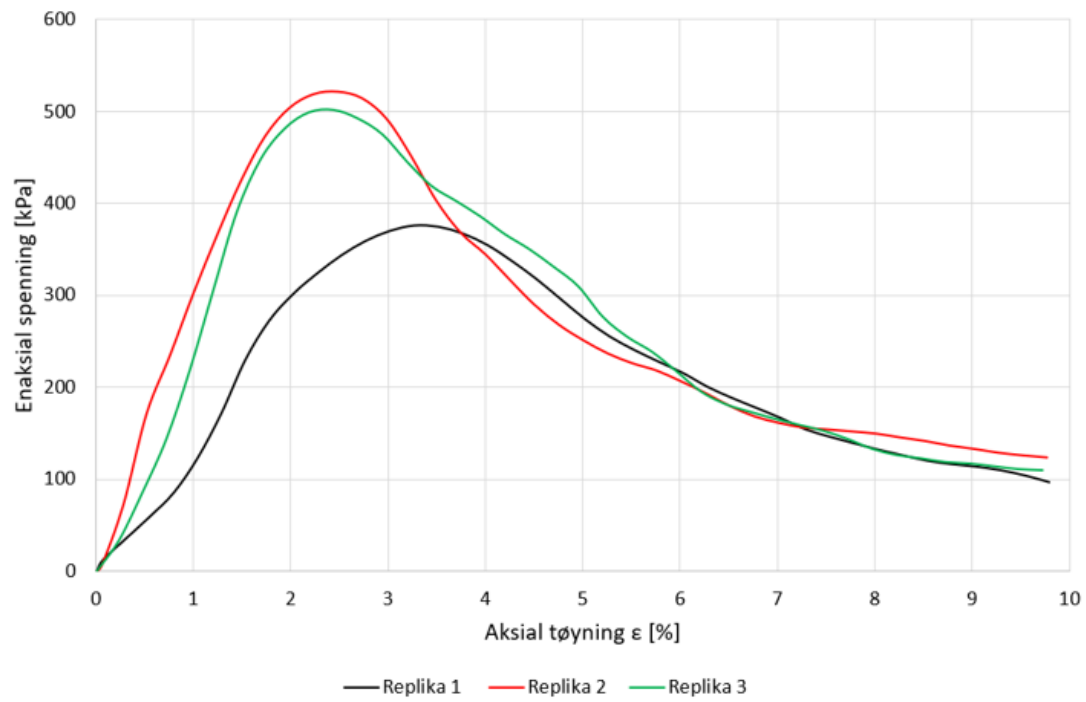
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	348,86	174,43	3,43	21,30	1,90
2	409,85	204,92	3,04	39,80	1,90
3	472,26	236,13	2,91	37,50	1,90

Lilleby 80 kg/m³ - 1,70



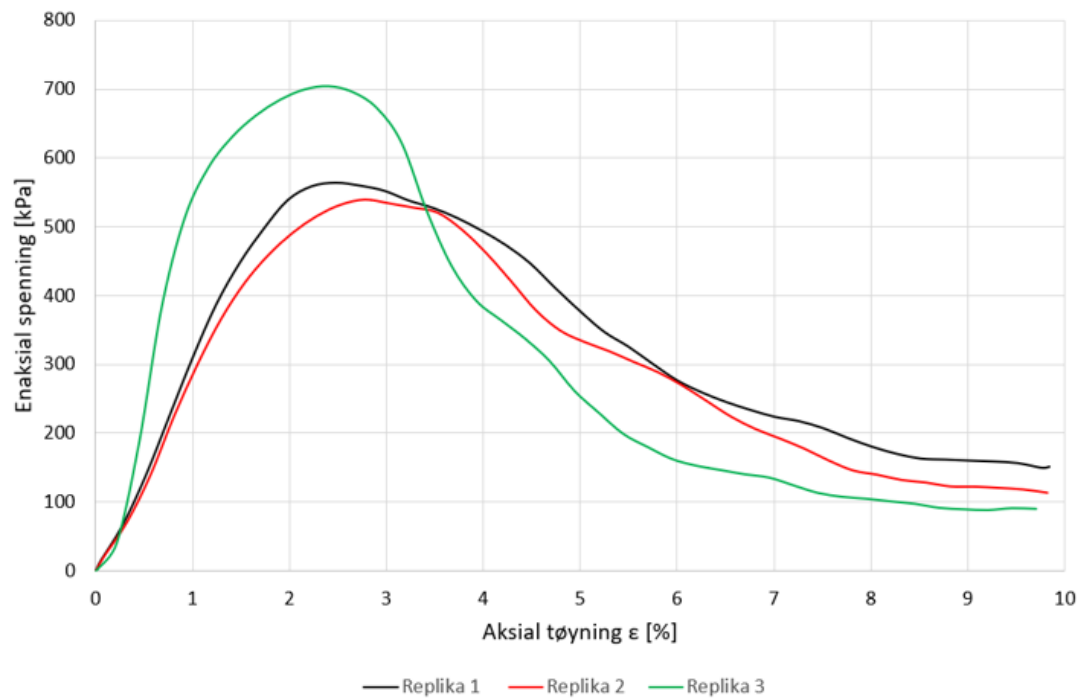
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	419,43	209,71	3,11	14,50	1,74
2	479,94	239,97	2,60	19,30	1,74
3	368,64	184,32	1,63	31,10	1,73

Lilleby 80 kg/m³ - 1,80



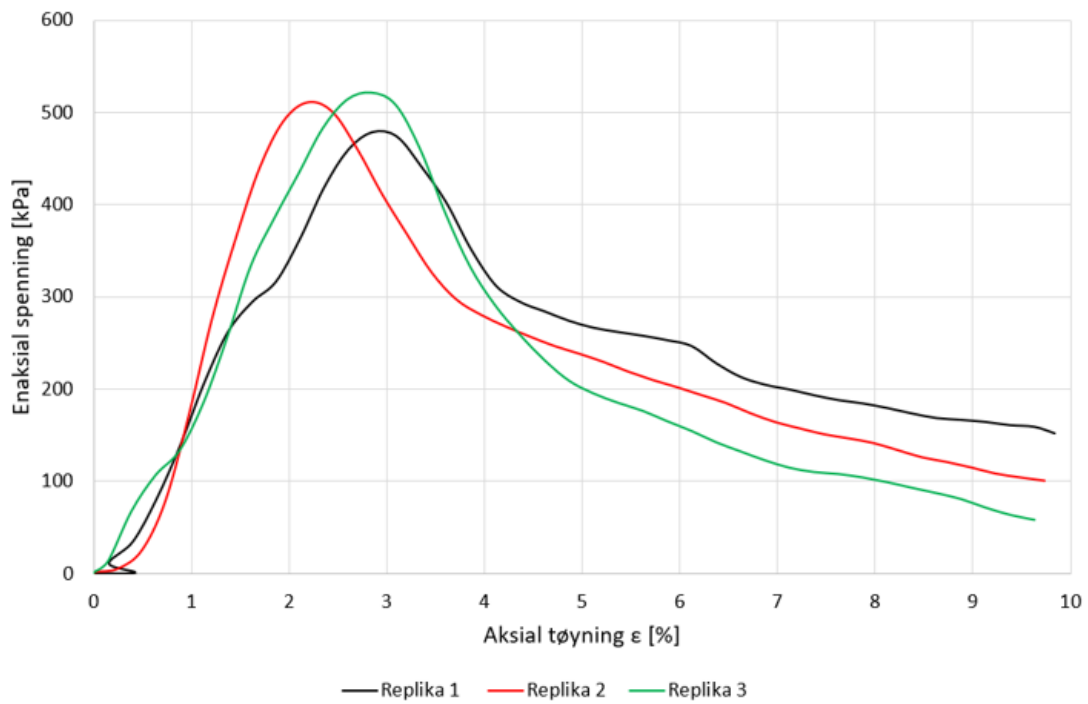
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	376,31	188,15	3,26	21,70	1,81
2	521,51	260,75	2,48	28,00	1,80
3	501,48	250,48	2,43	35,9	1,79

Lilleby 80 kg/m³ - 1,90



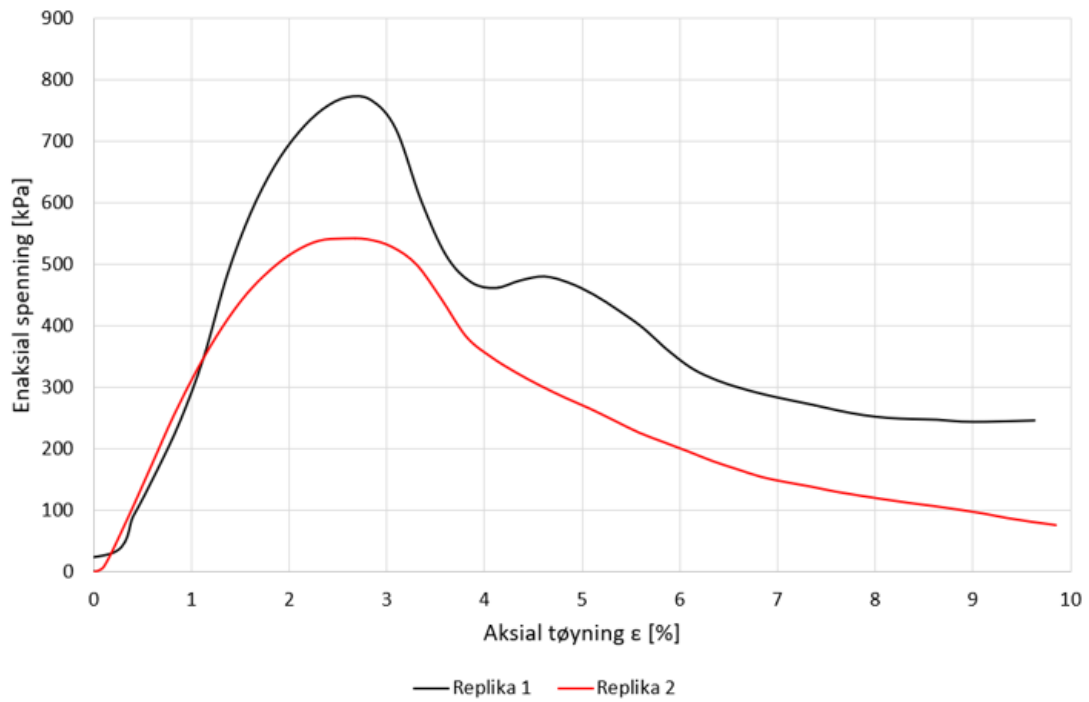
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	564,09	282,04	2,48	35,3	1,89
2	540,29	270,14	2,78	31,1	1,89
3	705,02	352,51	2,40	84,6	1,89

Lilleby 100 kg/m³ - 1,76



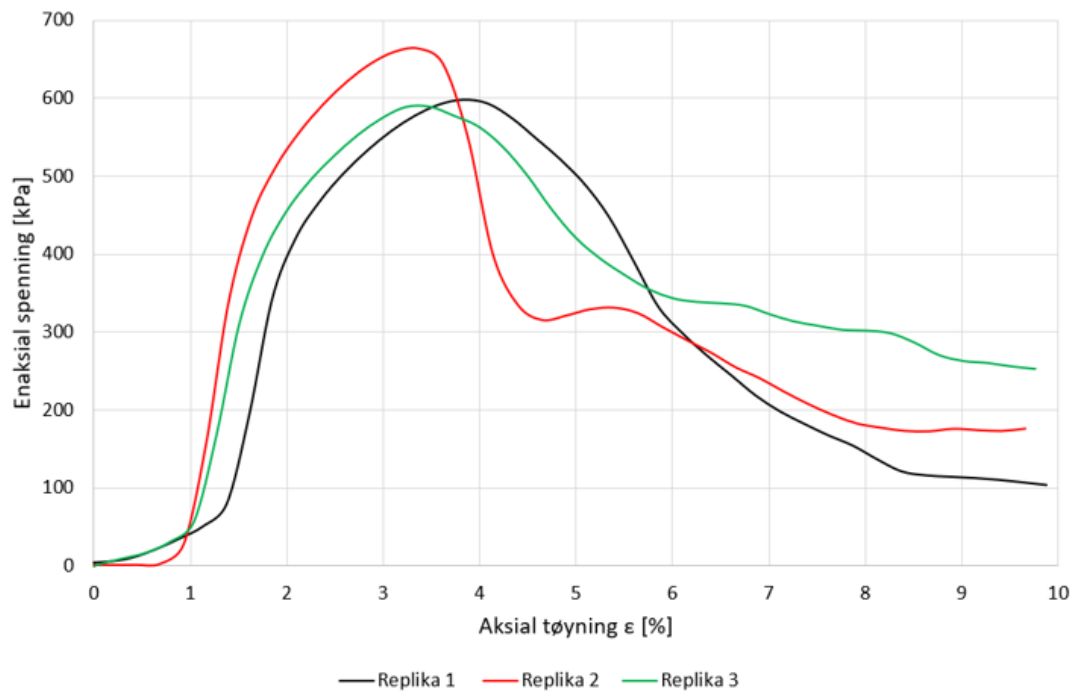
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	478,33	239,16	2,85	22,70	1,77
2	510,88	255,44	2,19	44,00	1,77
3	521,16	260,58	2,84	30,60	1,77

Lilleby 100 kg/m³ - 1,85



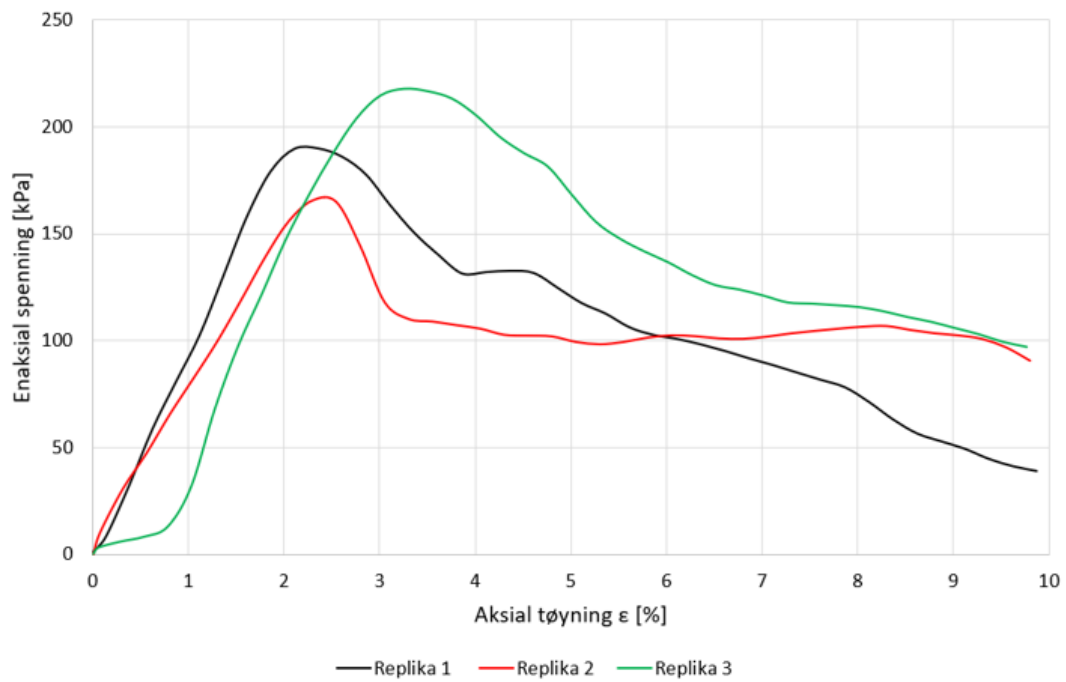
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	771,79	385,90	2,58	55,80	1,85
2	543,55	271,28	2,55	31,10	1,85
3	-	-	-	-	-

Lilleby 100 kg/m³ - 1,95



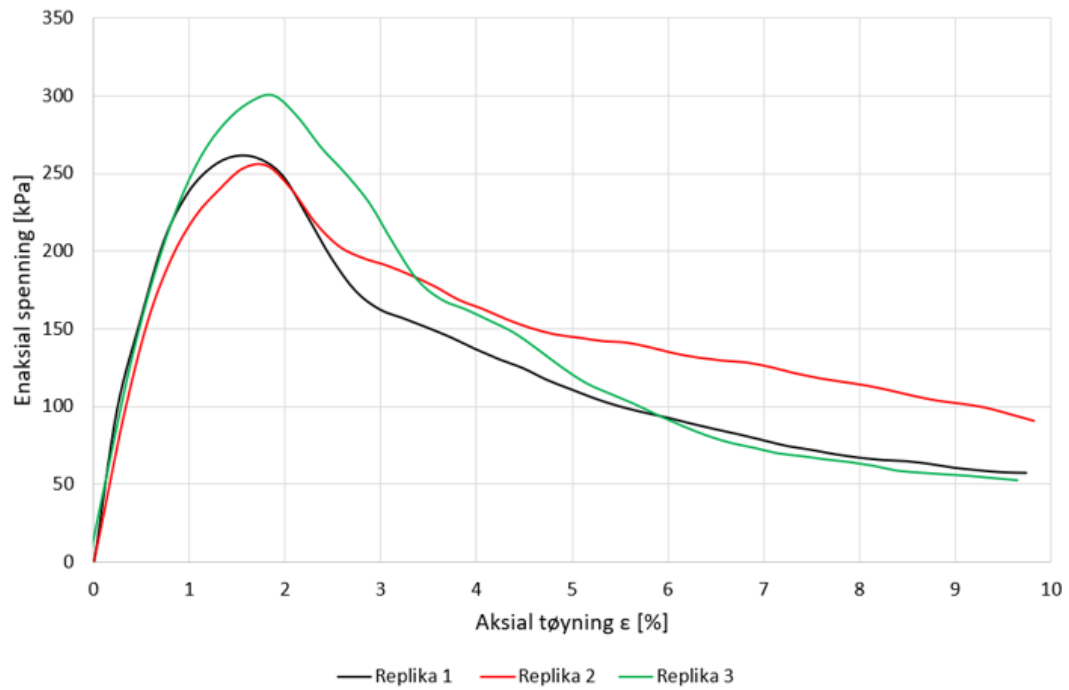
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	597,74	298,87	3,83	62,50	1,94
2	663,78	331,89	3,36	61,40	1,94
3	589,31	294,65	3,48	60,30	1,94

Leinstrand 45 kg/m³ - 1,70



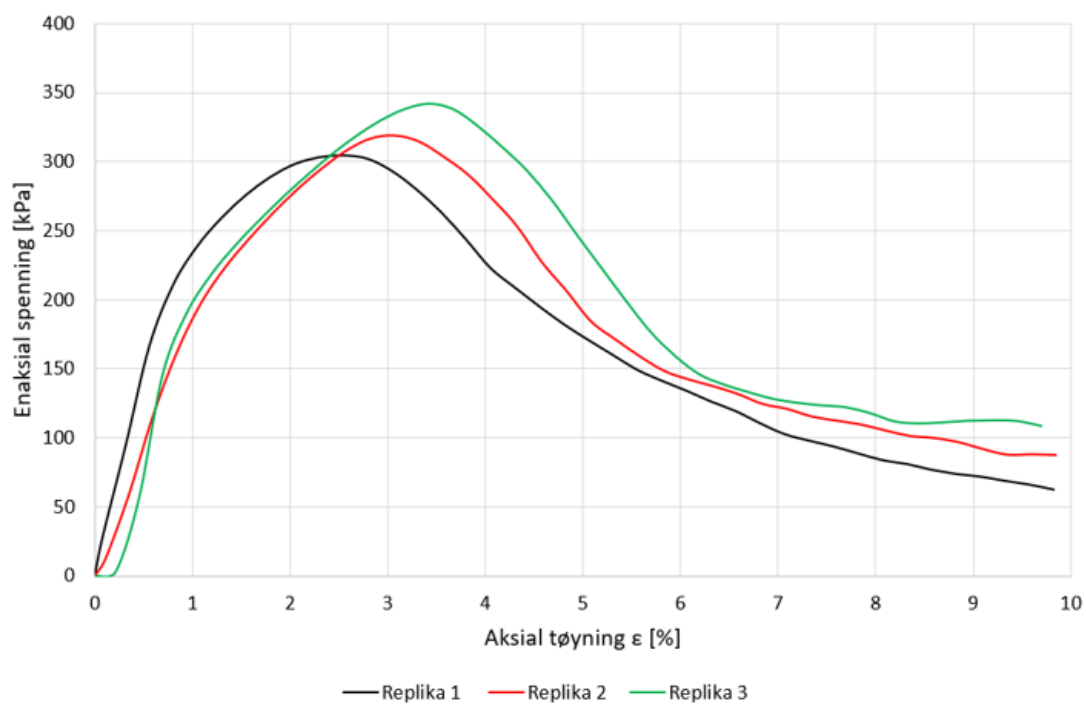
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	189,91	94,96	2,36	8,80	1,71
2	165,57	82,79	2,29	6,90	1,71
3	217,63	108,82	3,25	10,50	1,73

Leinstrand 45 kg/m³ - 1,80



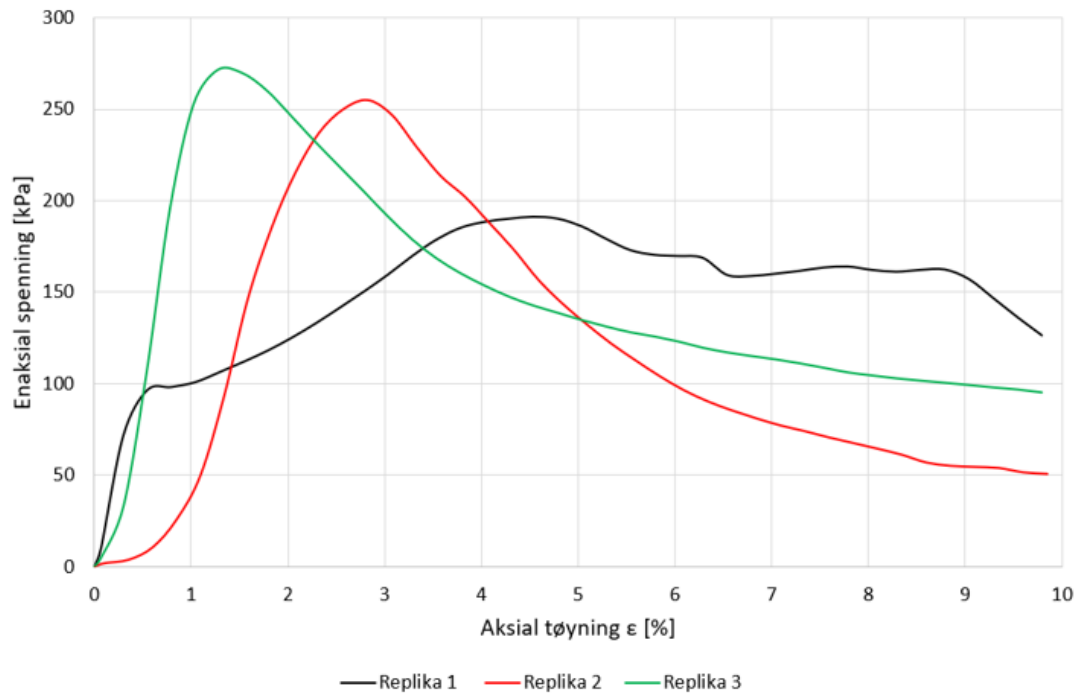
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	261,01	130,51	1,47	23,60	1,80
2	255,22	127,61	1,87	24,00	1,80
3	300,06	150,03	1,87	23,10	1,80

Leinstrand 45 kg/m³ - 1,90



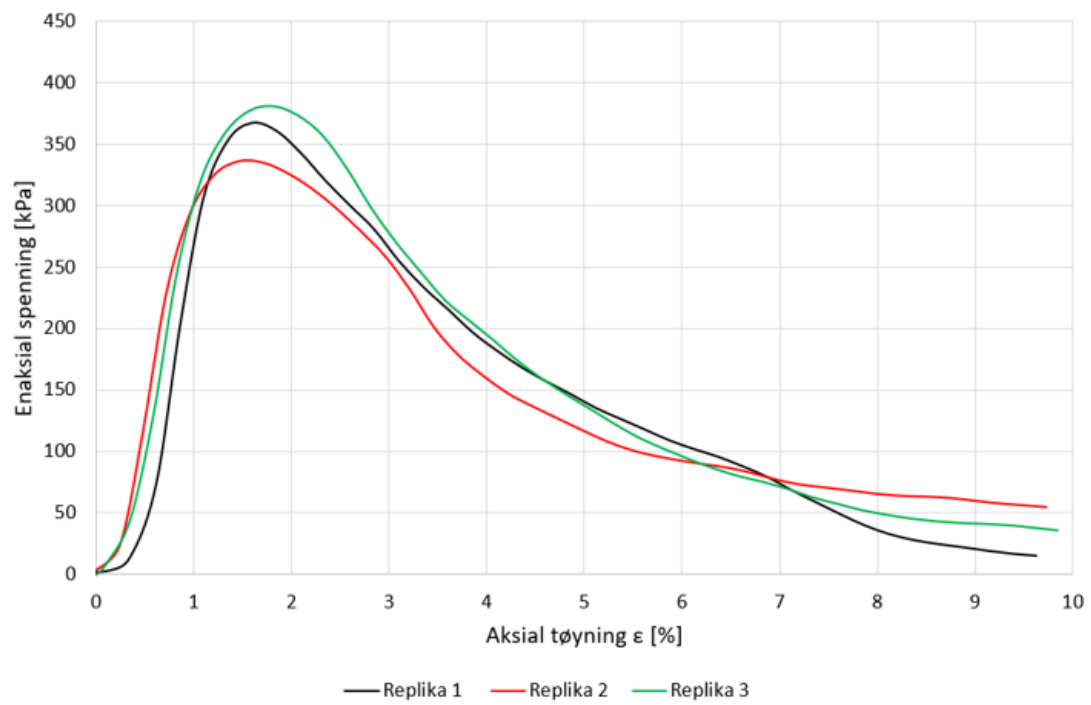
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	261,01	130,51	1,47	23,60	1,80
2	255,22	127,61	1,87	24,00	1,80
3	300,06	150,03	1,87	23,10	1,80

Leinstrand 80 kg/m³ - 1,70



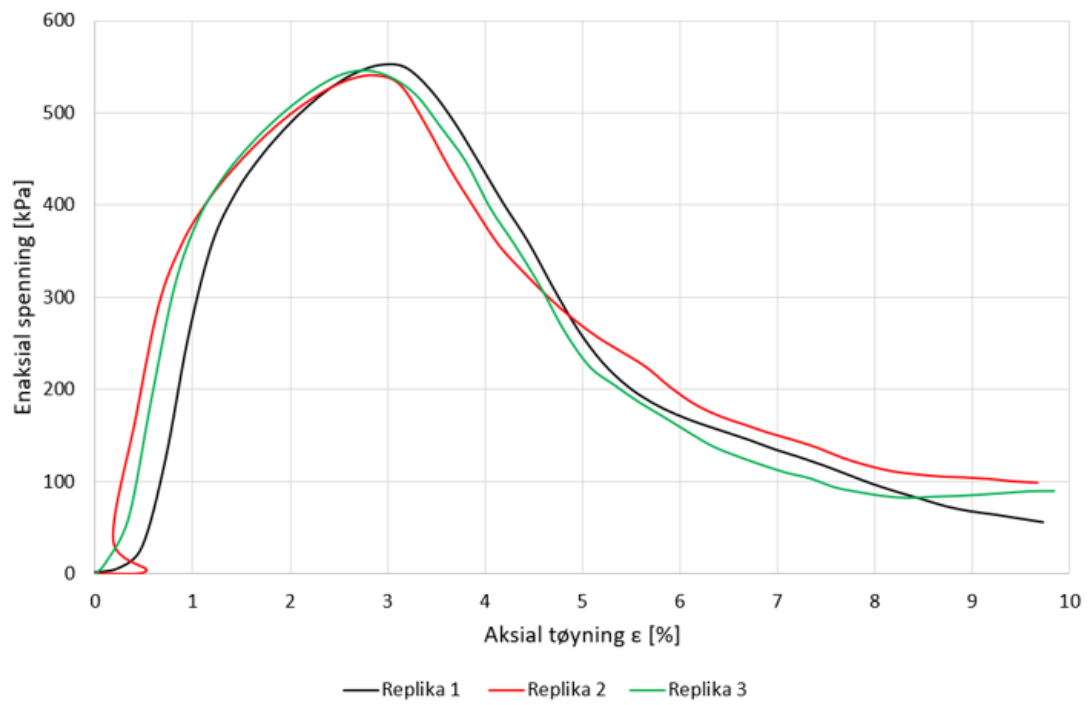
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	191,15	95,57	4,53	35,10	1,70
2	255,05	127,53	2,87	21,70	1,70
3	271,19	135,60	1,27	37,10	1,70

Leinstrand 80 kg/m³ - 1,80



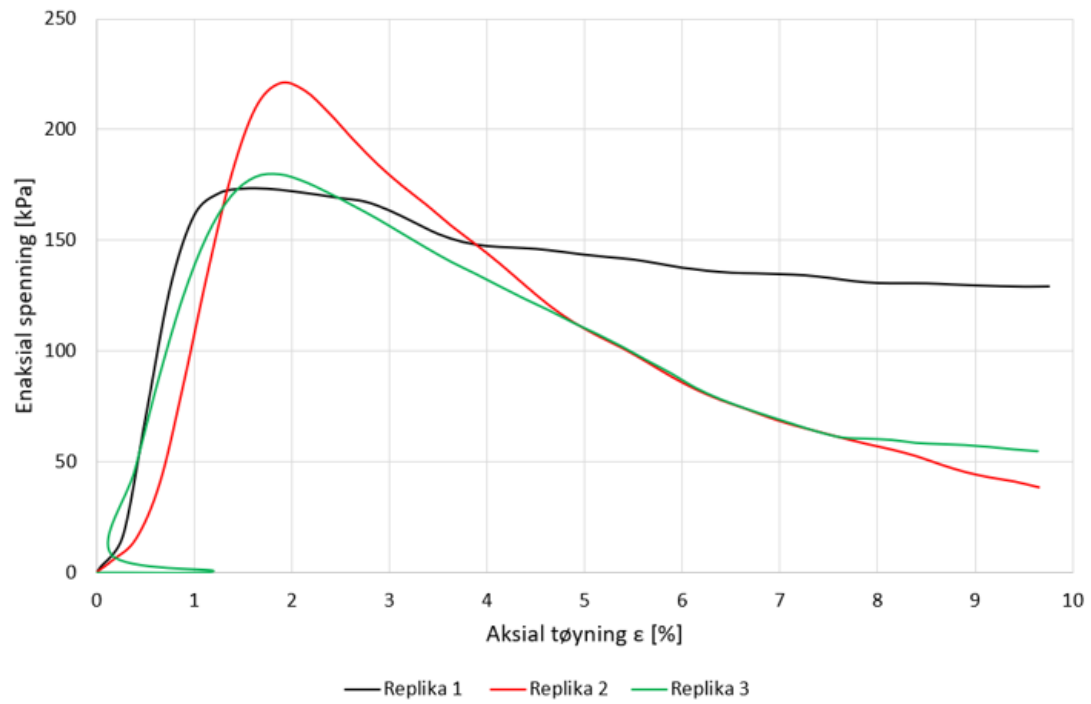
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	367,49	183,74	1,59	53,3	1,80
2	336,37	168,19	1,45	47,2	1,80
3	381,08	190,54	1,80	48,3	1,80

Leinstrand 80 kg/m³ - 1,90



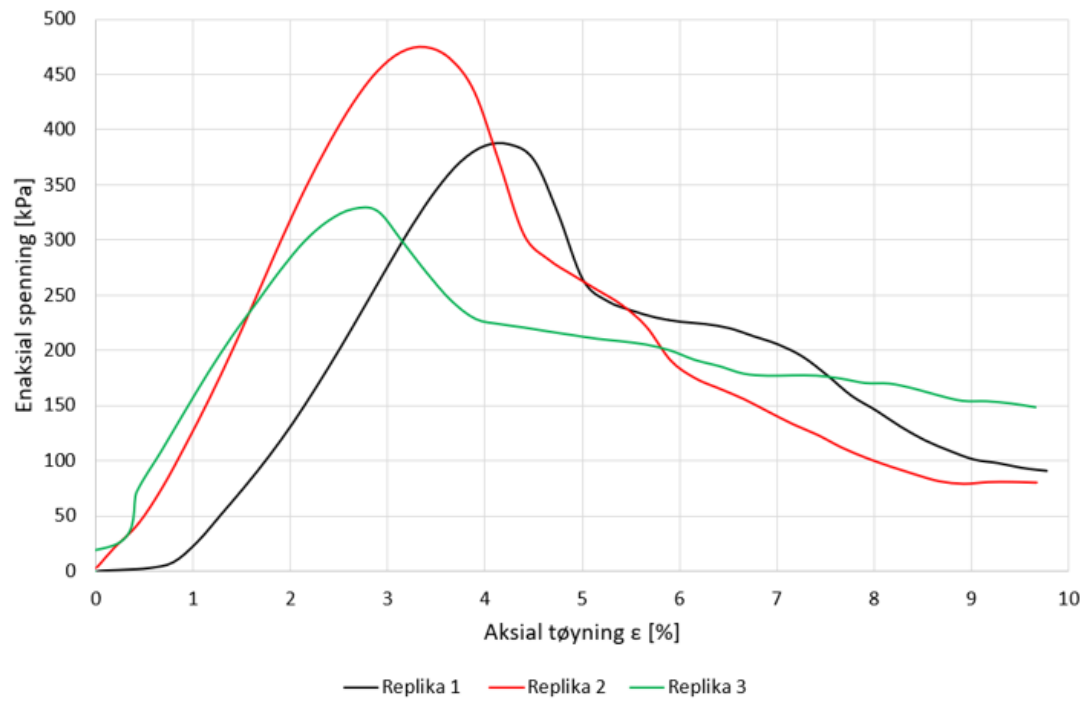
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	552,26	276,13	2,92	49,10	1,89
2	540,65	270,32	2,88	51,90	1,90
3	546,51	273,26	2,70	51,50	1,90

Leinstrand 90 kg/m³ - 1,76



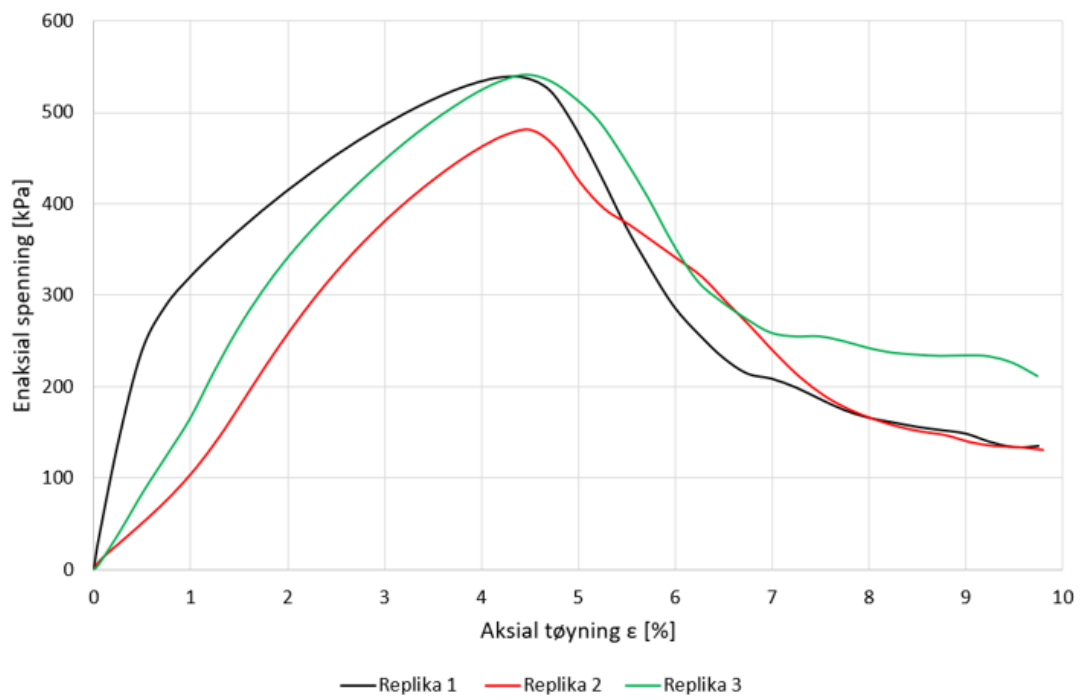
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	173,47	86,74	1,50	23,20	1,75
2	221,03	110,52	1,88	30,30	1,75
3	279,73	89,86	1,88	16,8	1,75

Leinstrand 90 kg/m³ - 1,85



Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	387,11	193,56	4,25	14,40	1,85
2	474,70	237,35	3,39	19,70	1,85
3	327,85	163,92	2,65	14,60	1,85

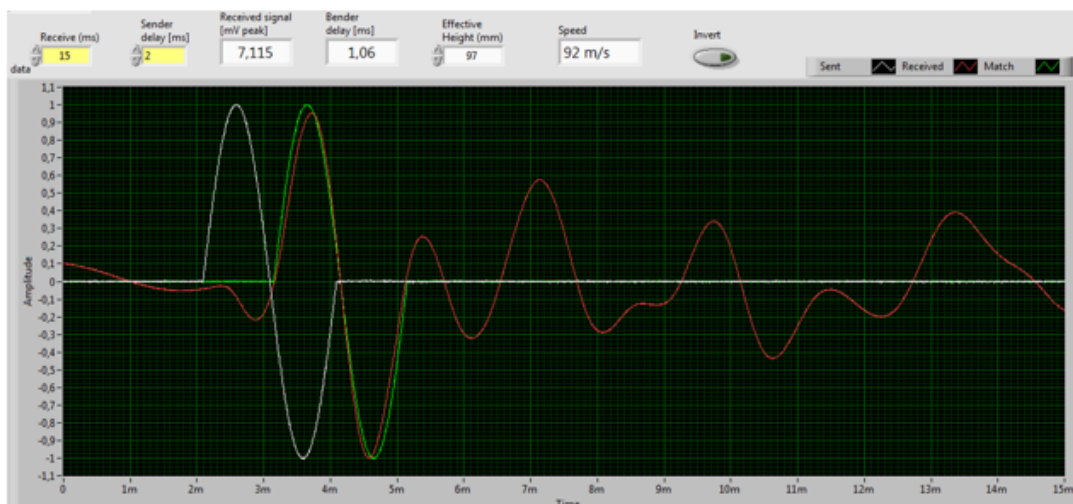
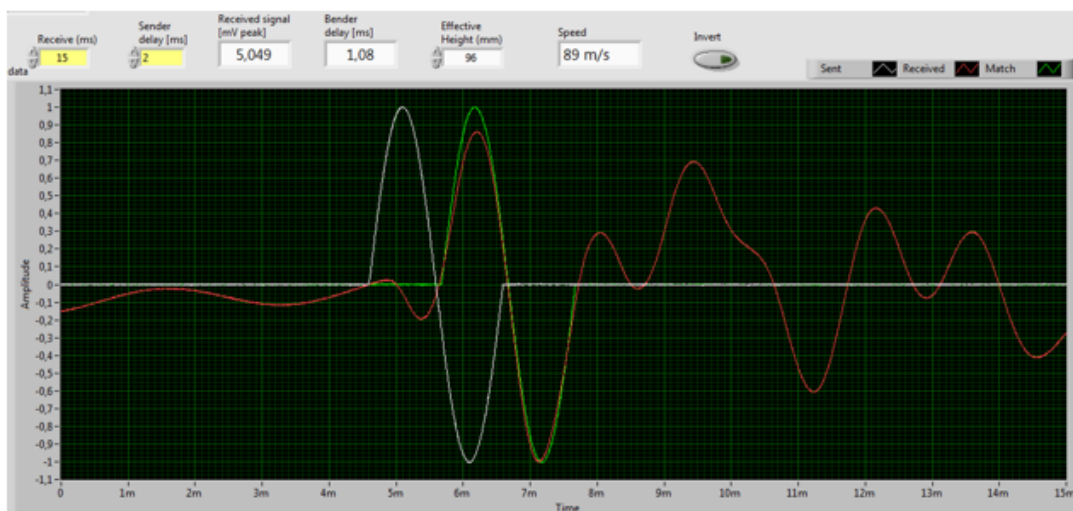
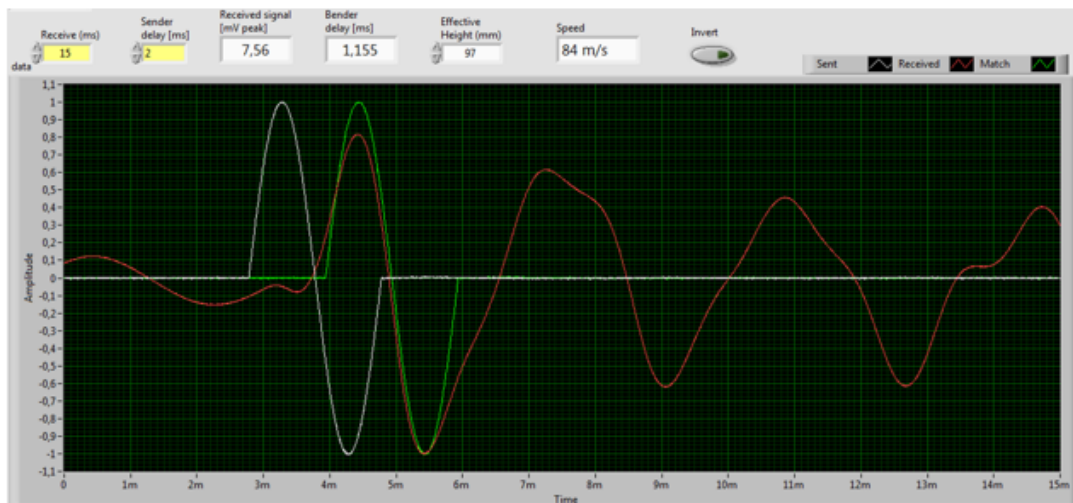
Leinstrand 90 kg/m³ - 1,95



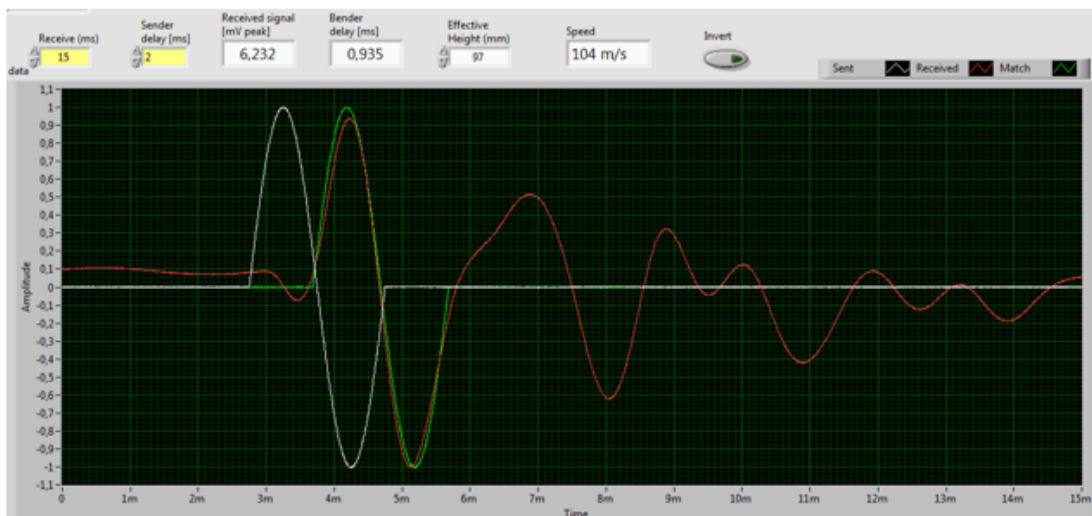
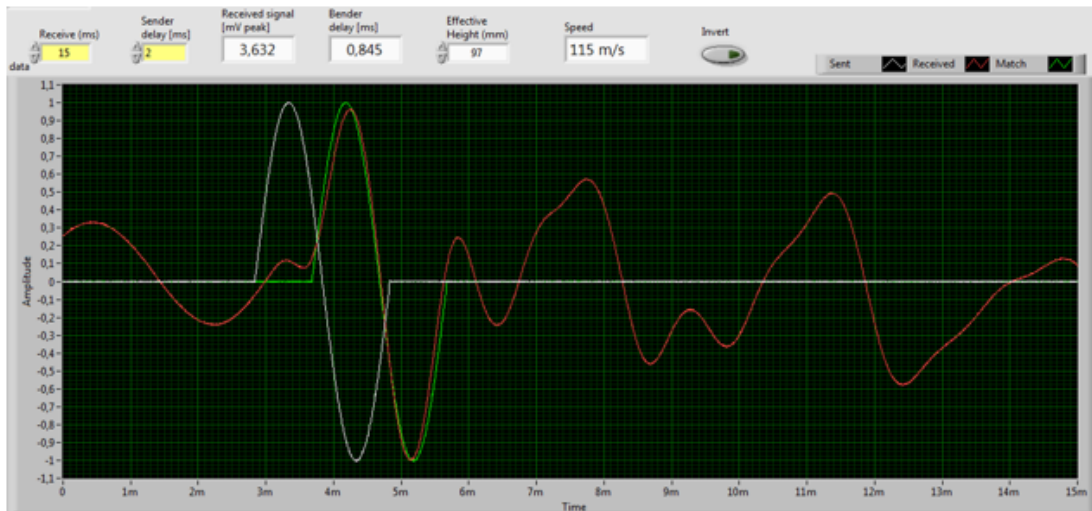
Replika	σ_{brudd} [kPa]	τ_{maks} [kPa]	ϵ_{brudd} [%]	E_{50} [MPa]	ρ [g/cm ³]
1	538,49	269,24	4,22	40,60	1,94
2	480,72	240,36	4,51	16,00	1,95
3	541,60	270,80	4,46	16,30	1,94

A.2 Skjærbølgehastighetsmåling

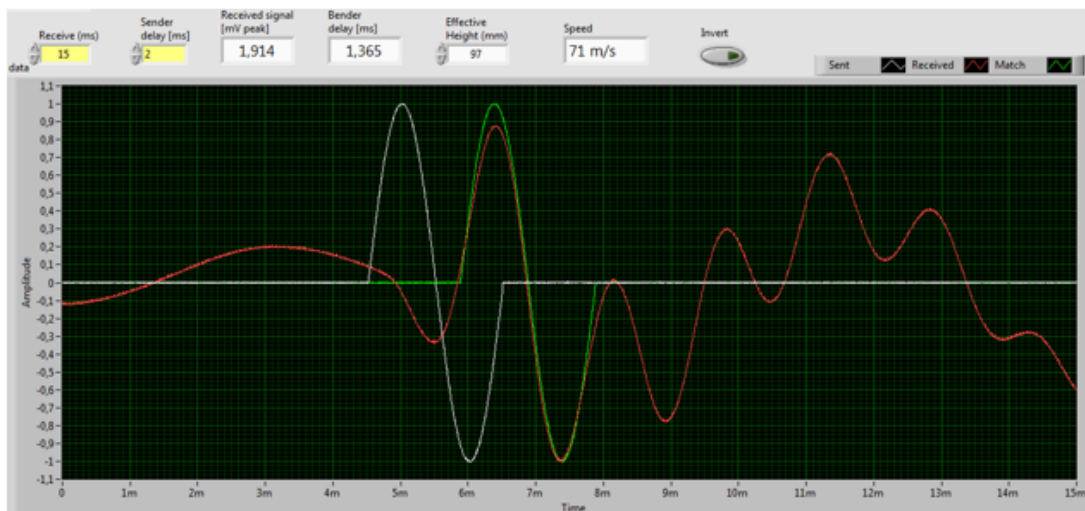
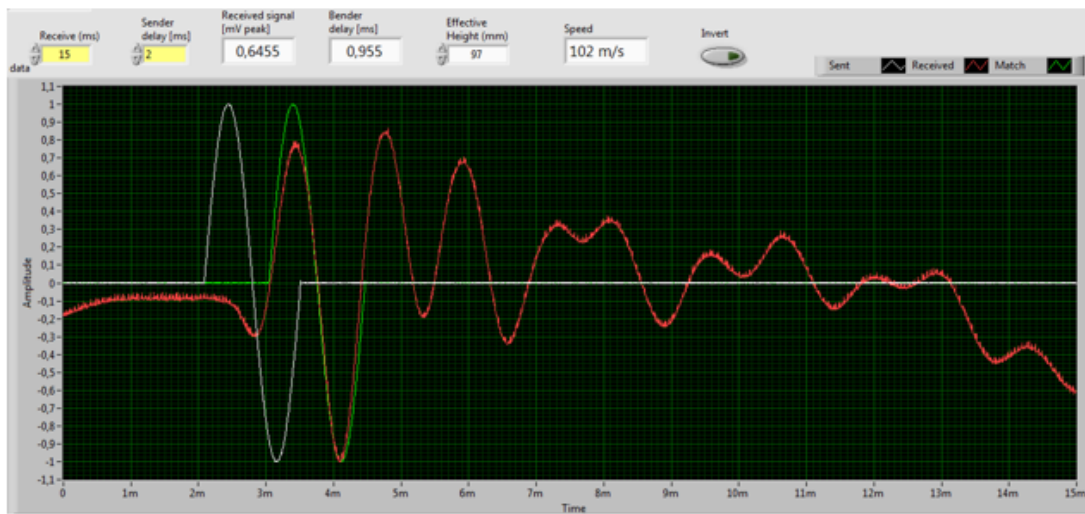
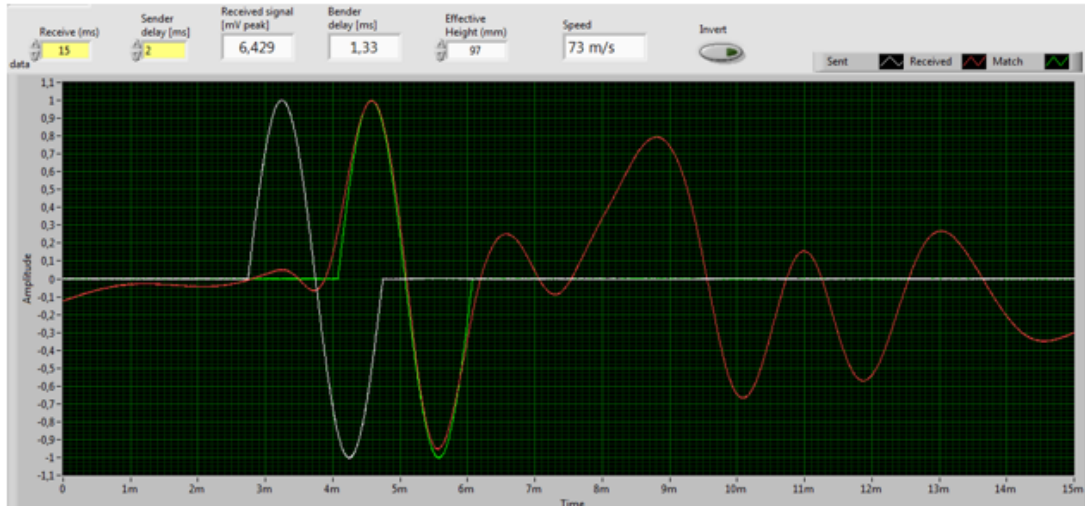
Lilleby 45 kg/m³ - 1,70



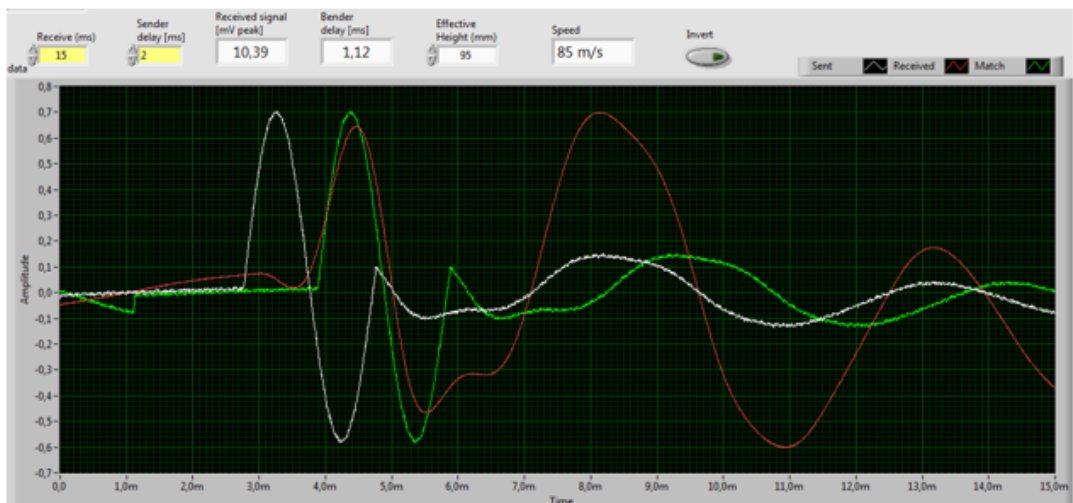
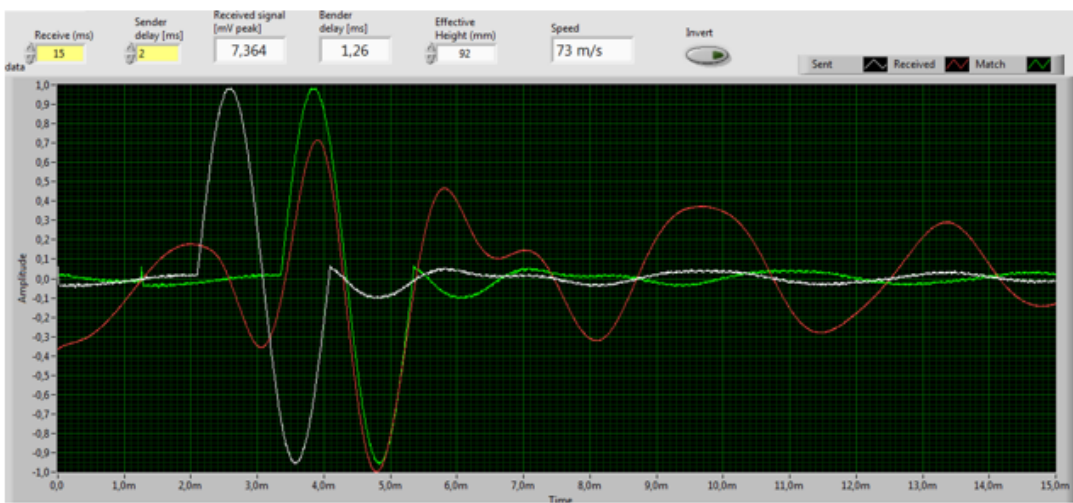
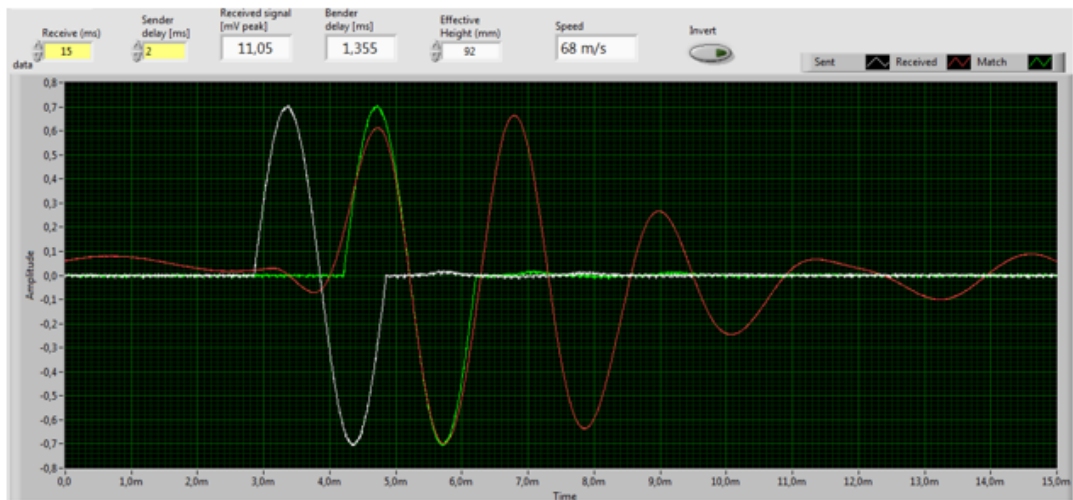
Lilleby 45 kg/m³ - 1,80



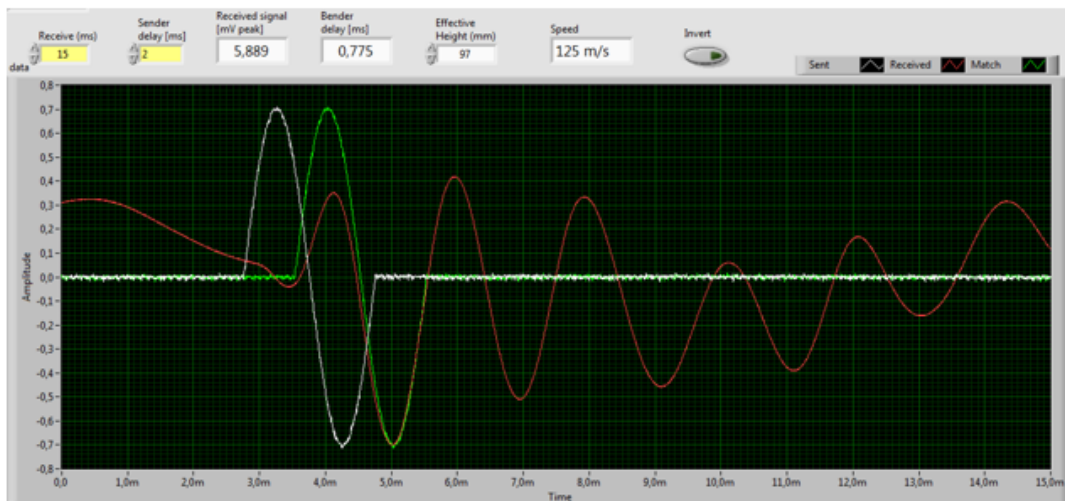
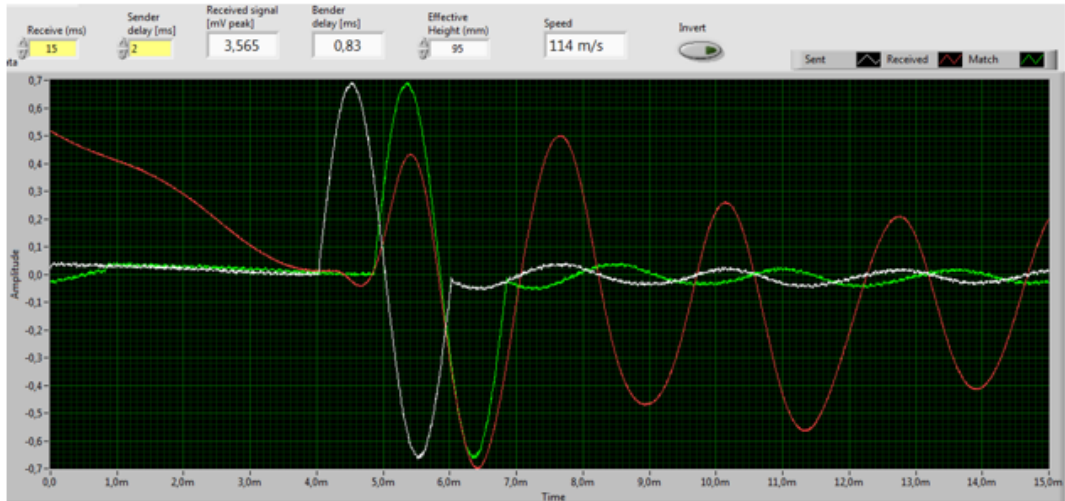
Lilleby 45 kg/m³ - 1,90



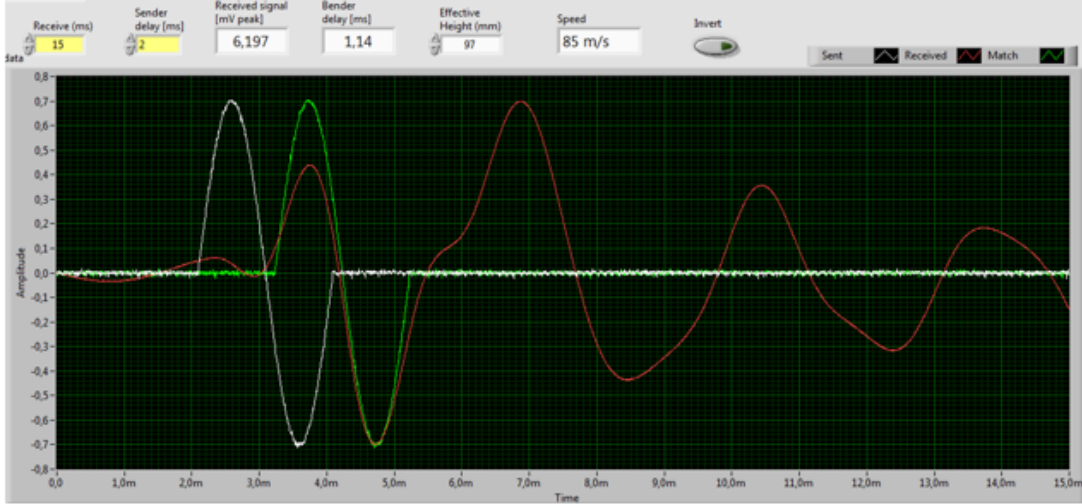
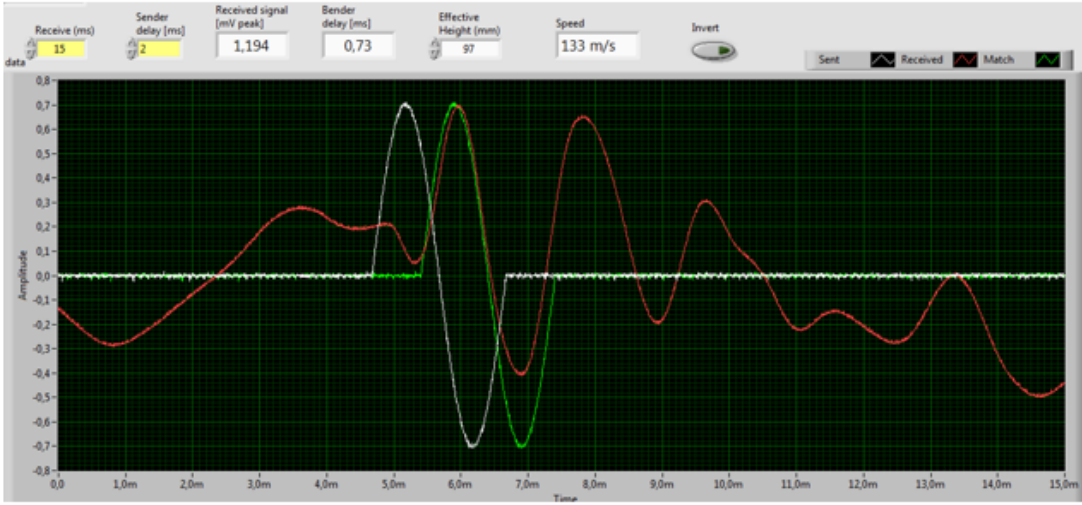
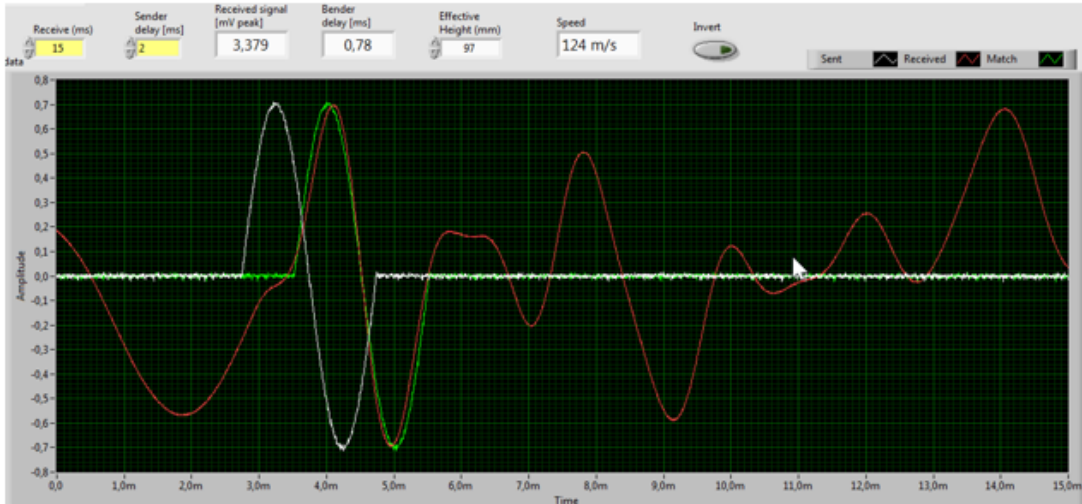
Lilleby 80 kg/m³ - 1,70



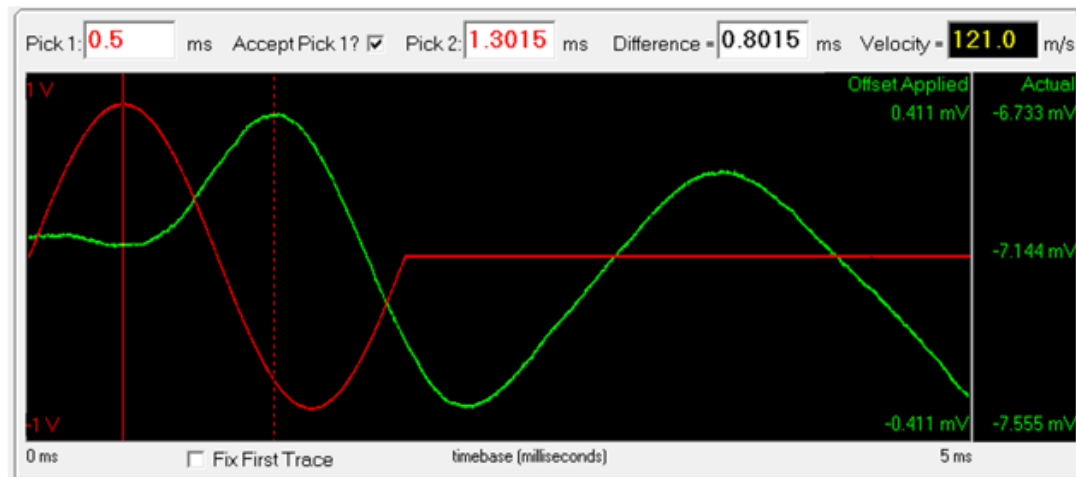
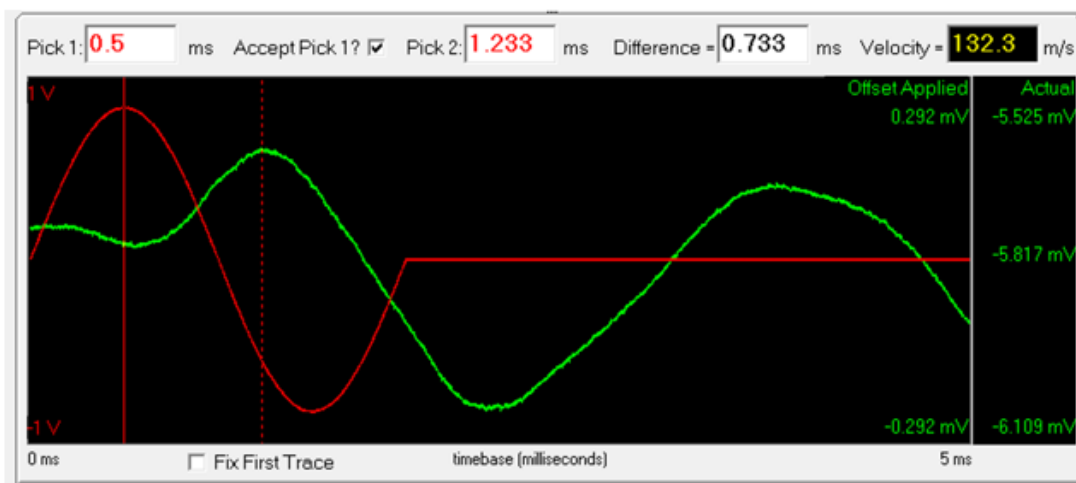
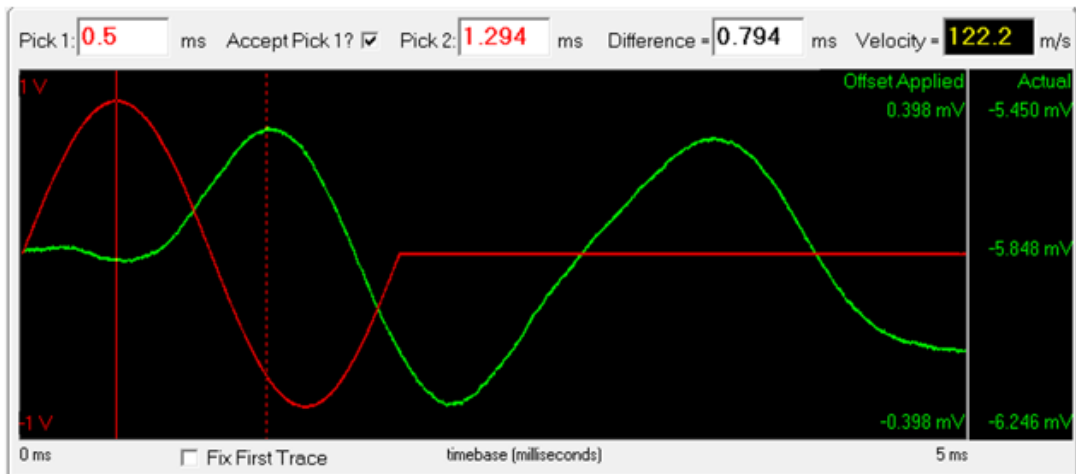
Lilleby 80 kg/m³ - 1,80



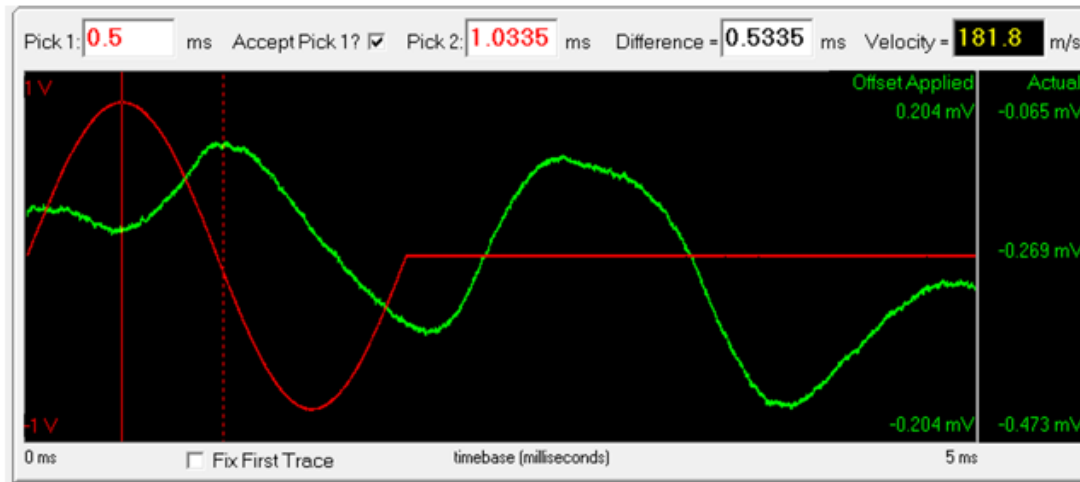
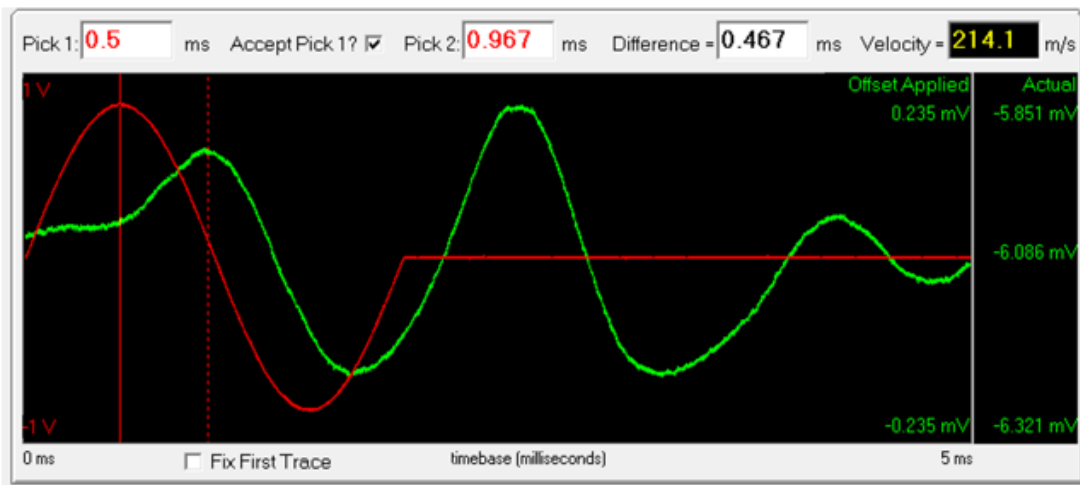
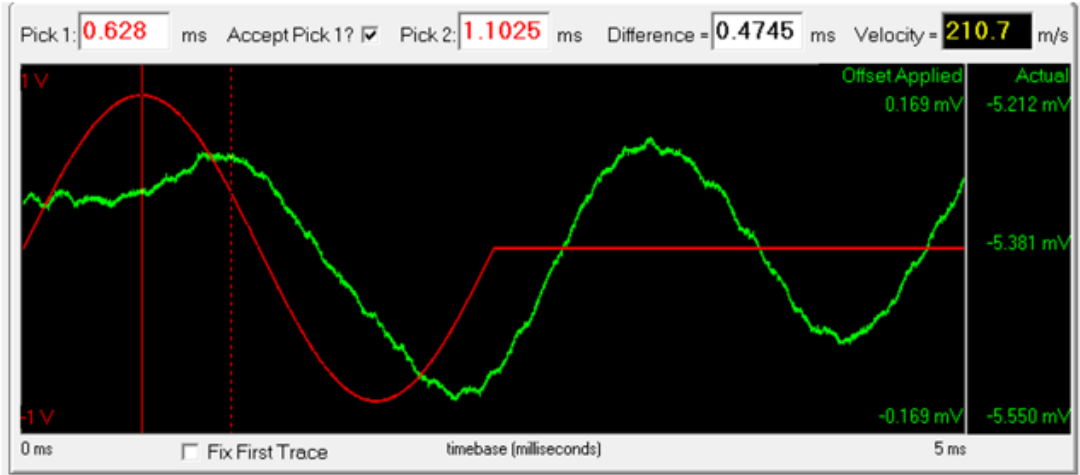
Lilleby 80 kg/m³ - 1,90



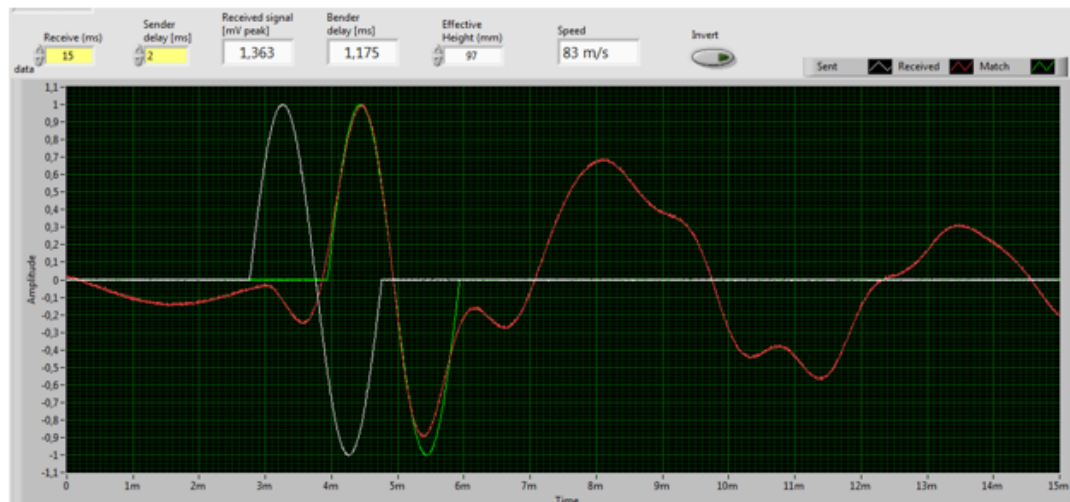
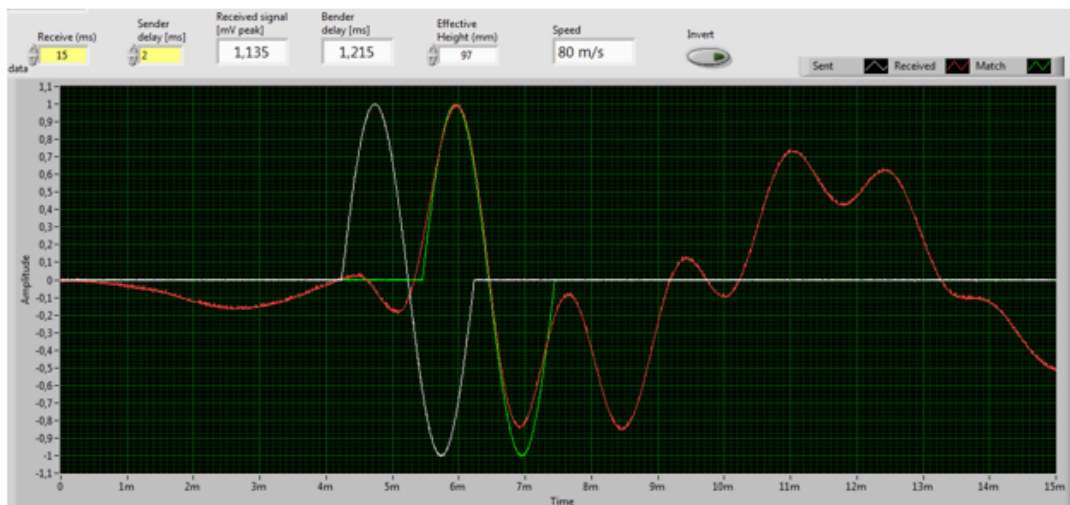
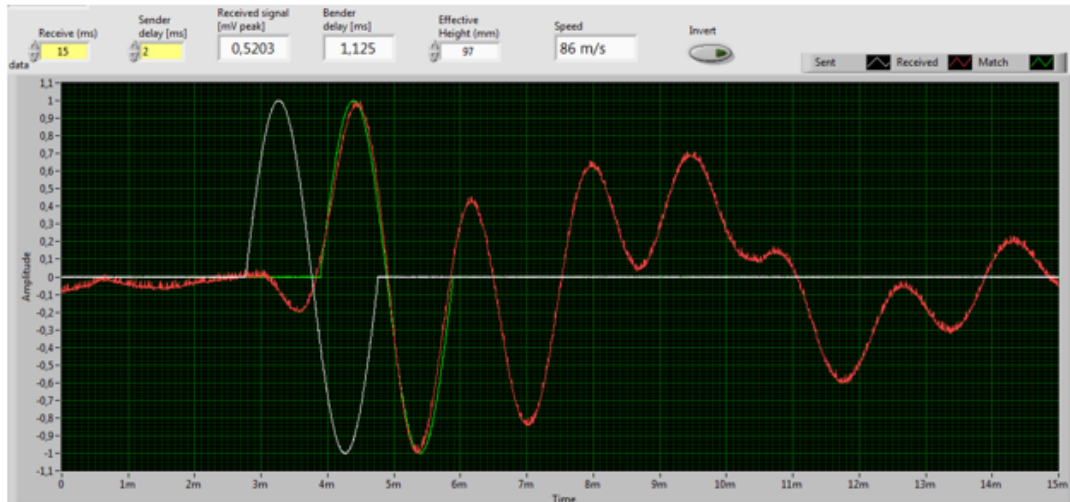
Lilleby 100 kg/m³ - 1,76



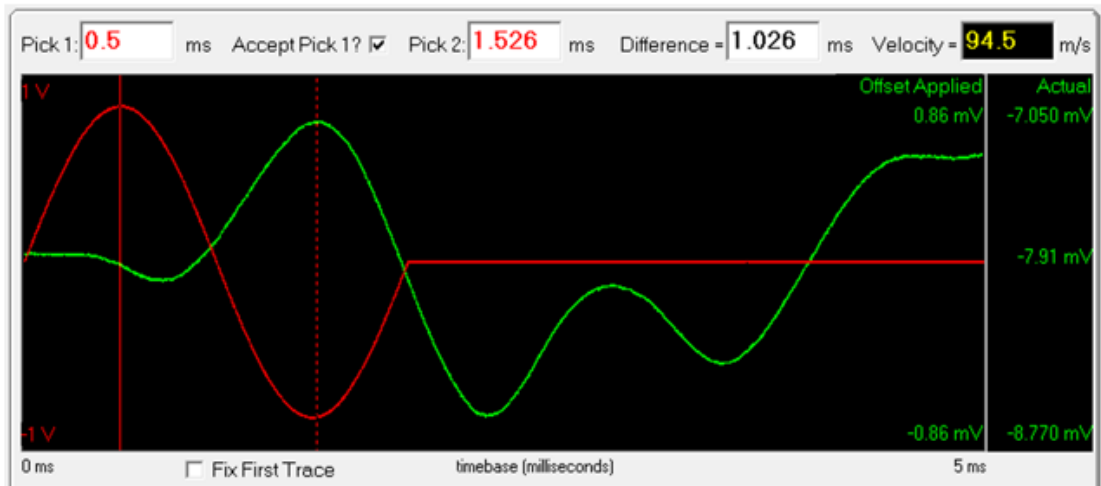
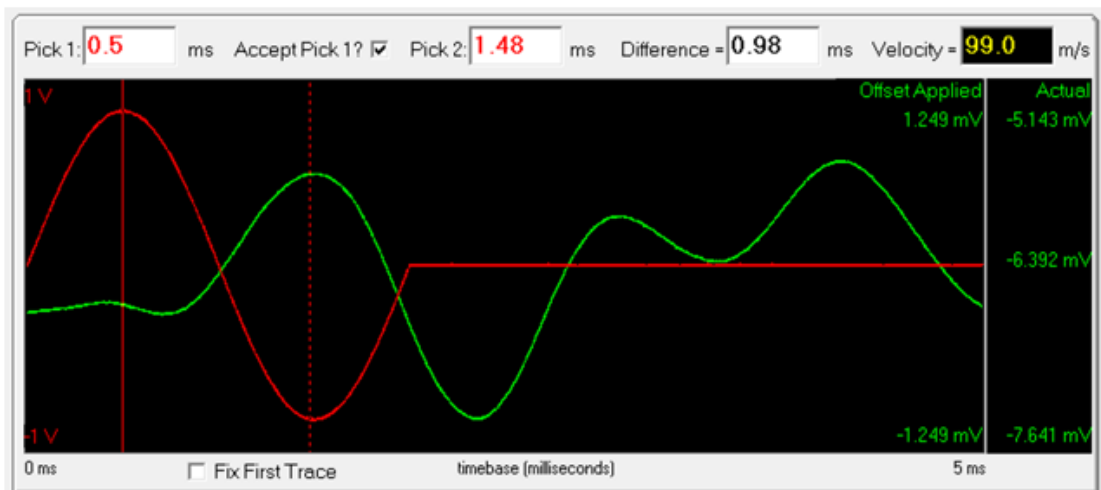
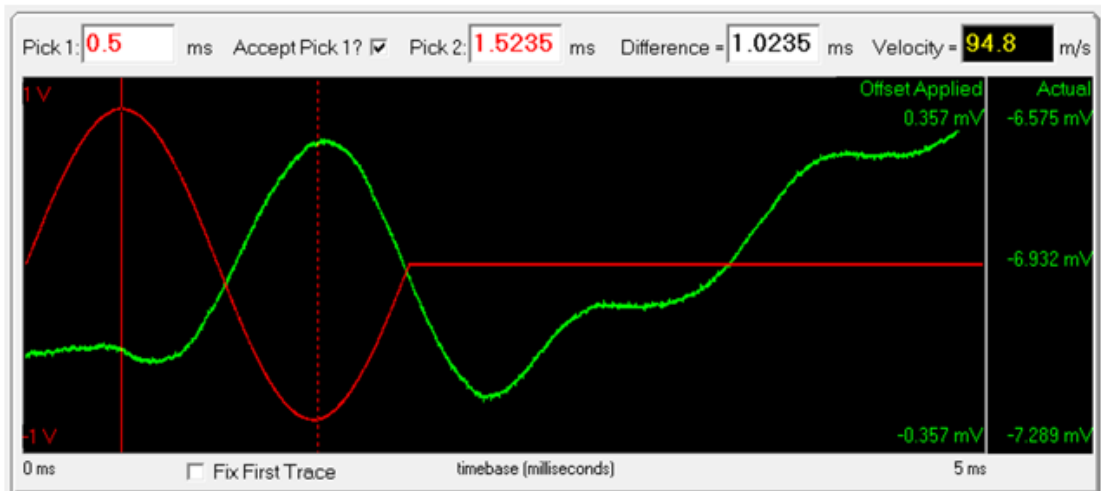
Lilleby 100 kg/m³ - 1,85



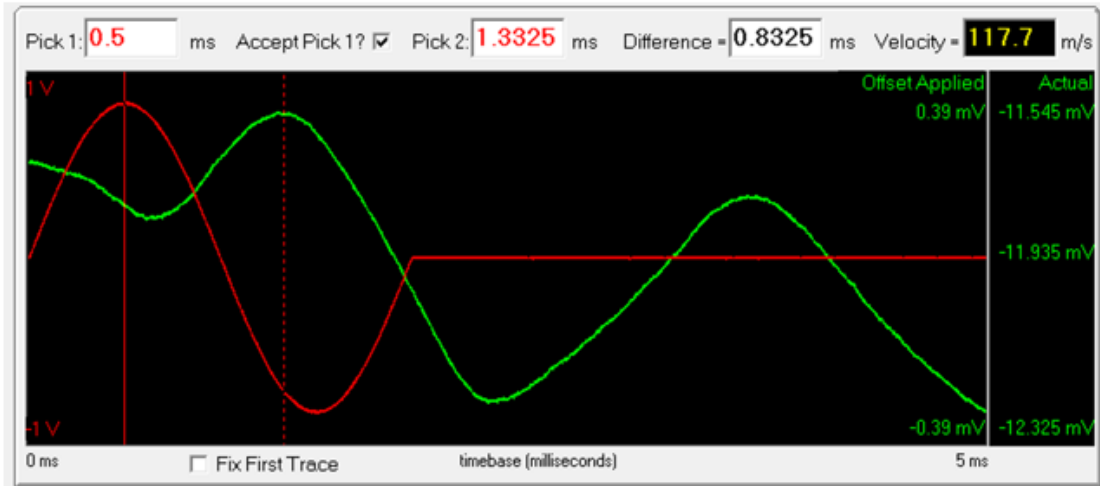
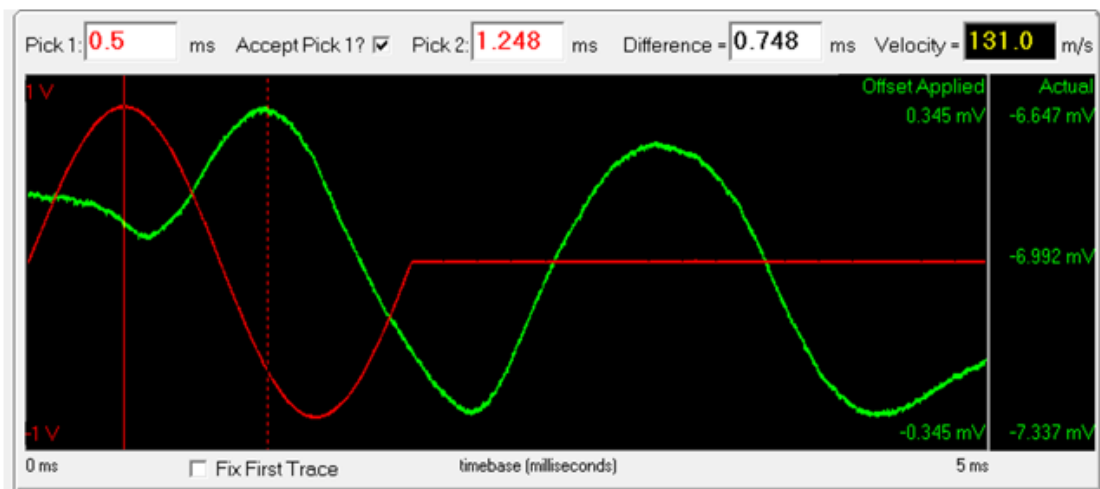
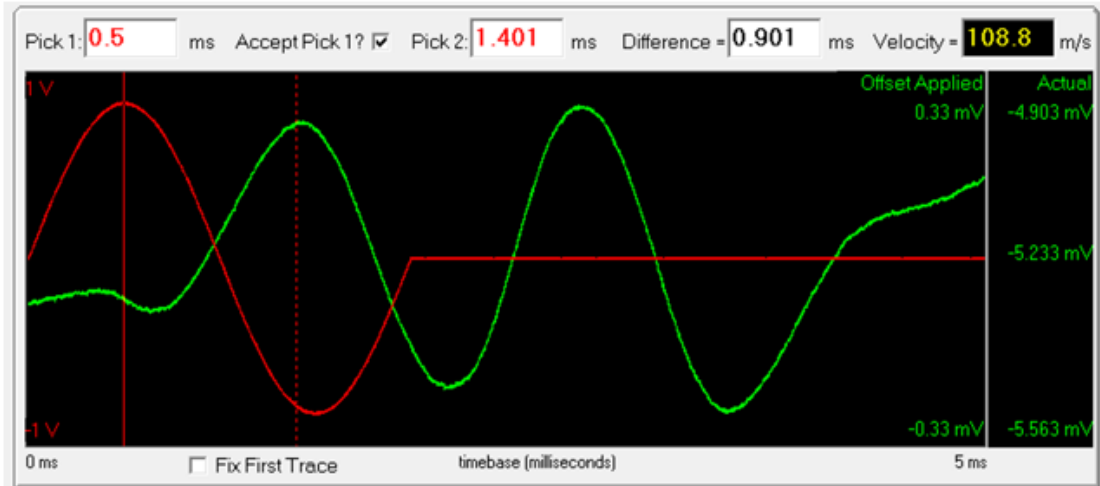
Lilleby 100 kg/m³ - 1,95



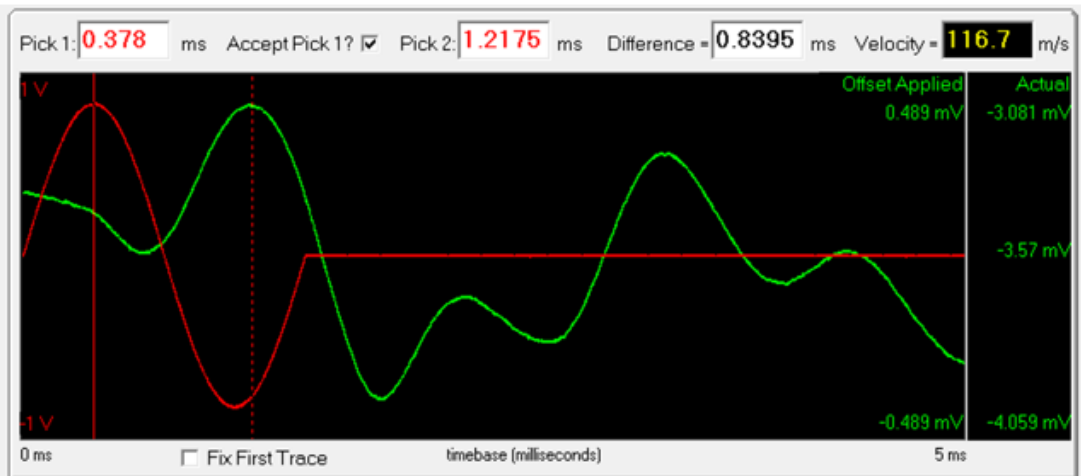
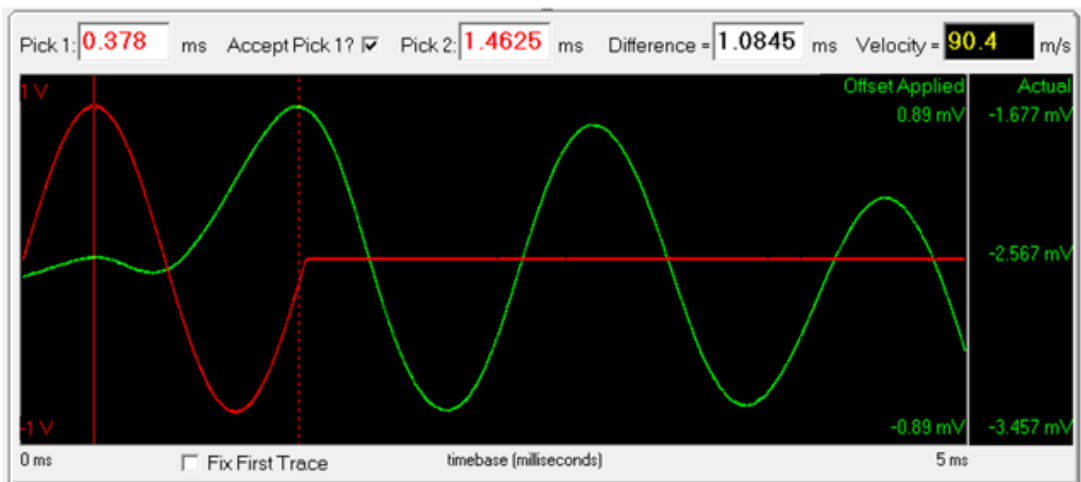
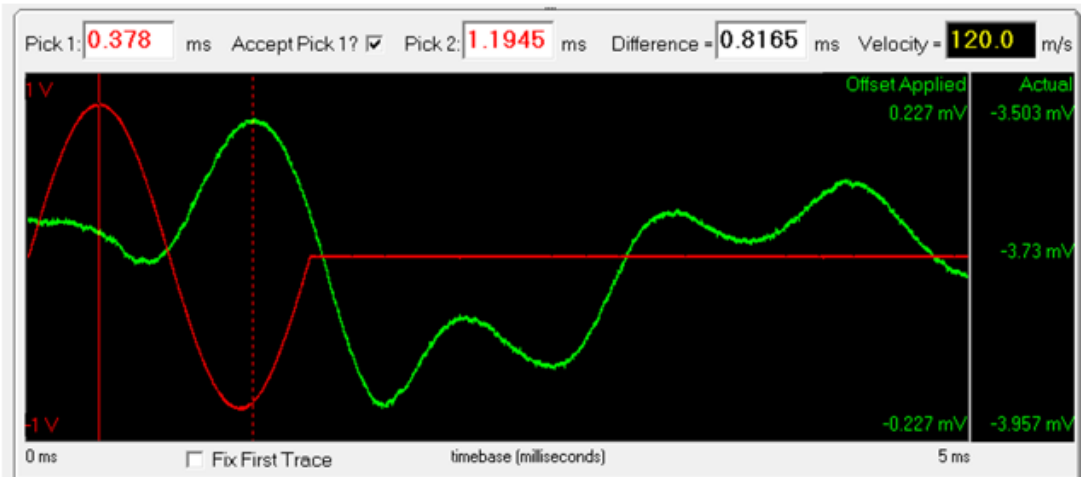
Leinstrand 45 kg/m³ - 1,70



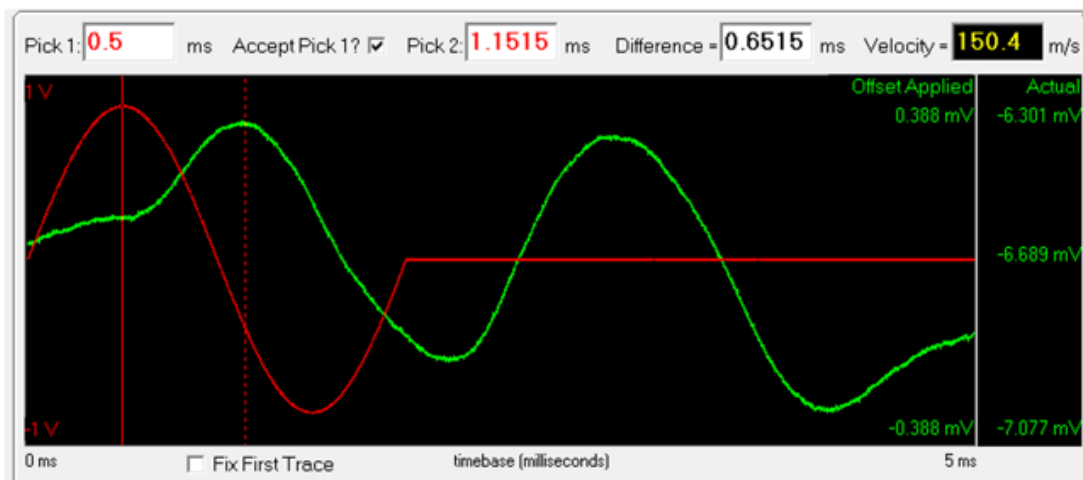
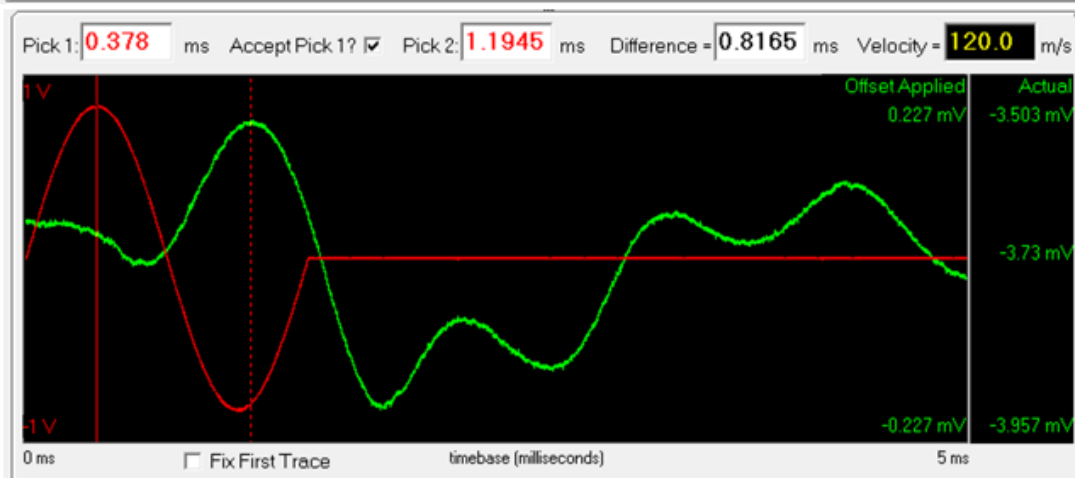
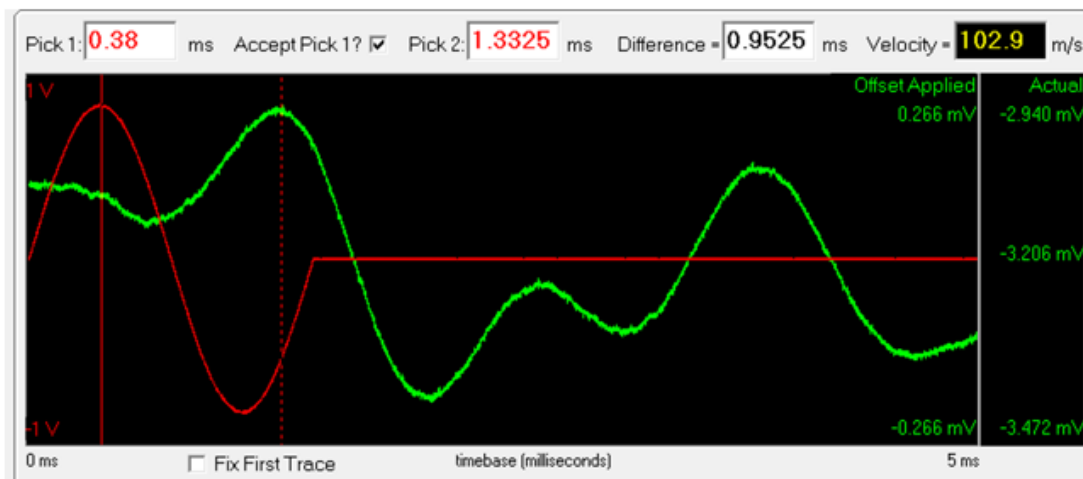
Leinstrand 45 kg/m³ - 1,80



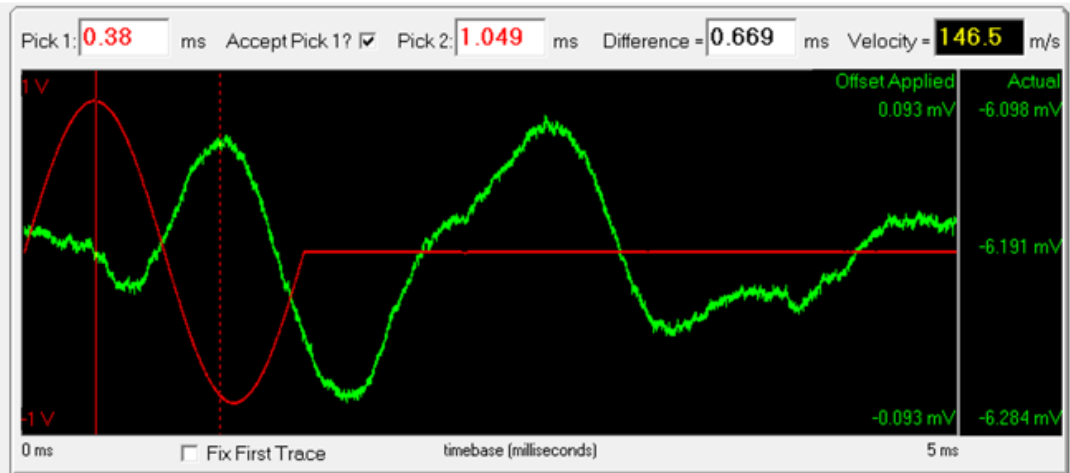
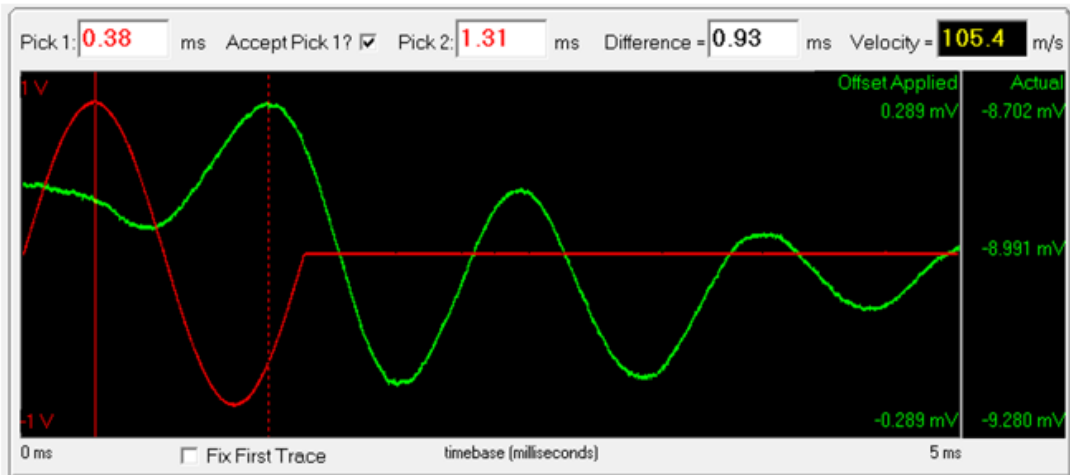
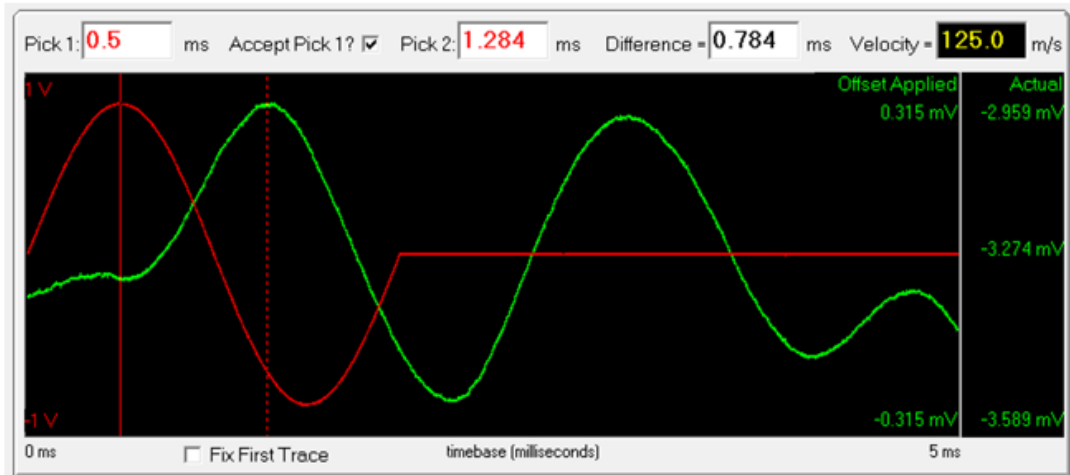
Leinstrand 45 kg/m³ - 1,90



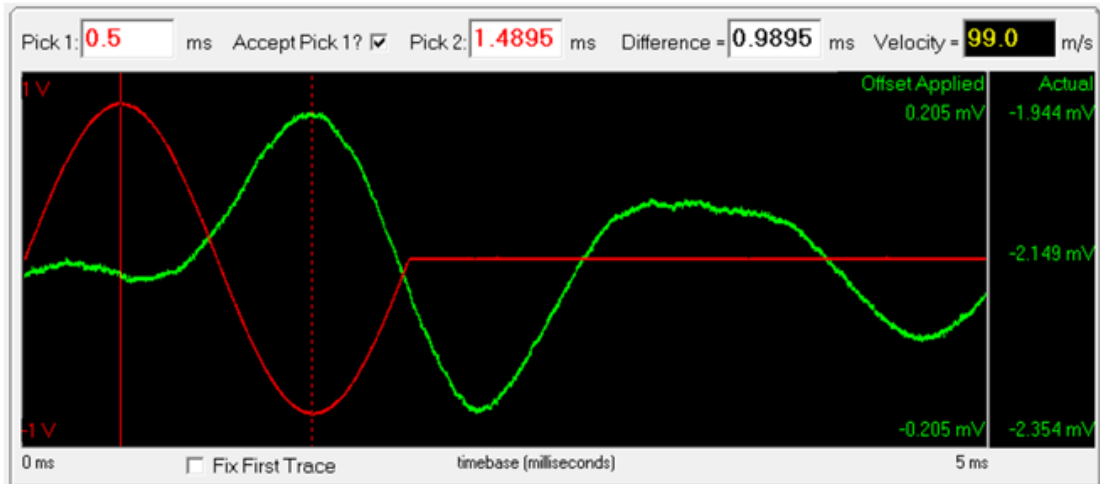
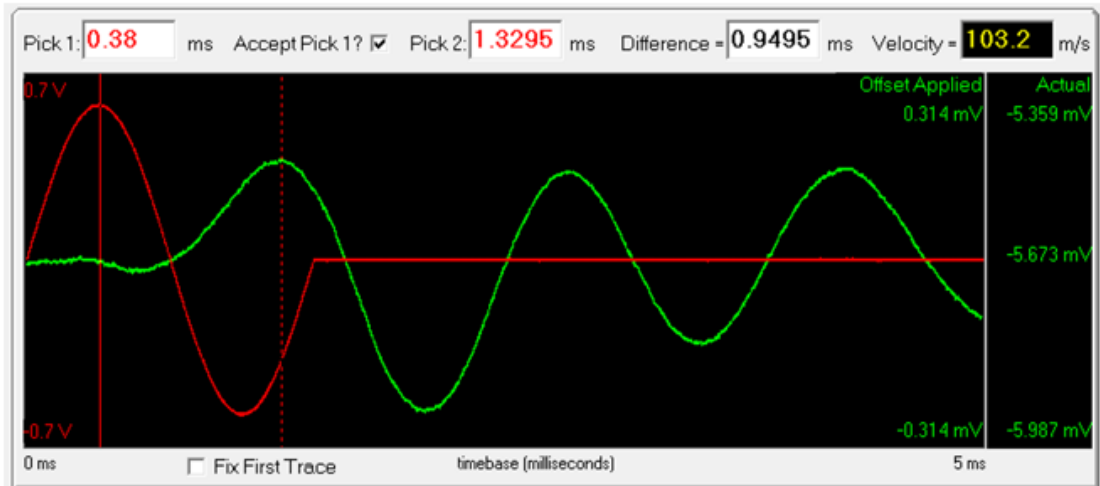
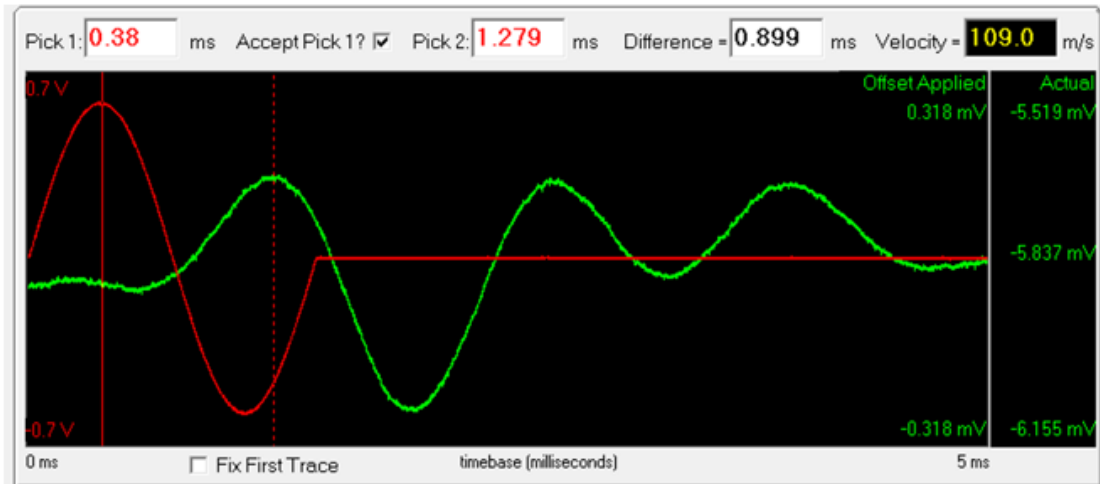
Leinstrand 80 kg/m³ - 1,70



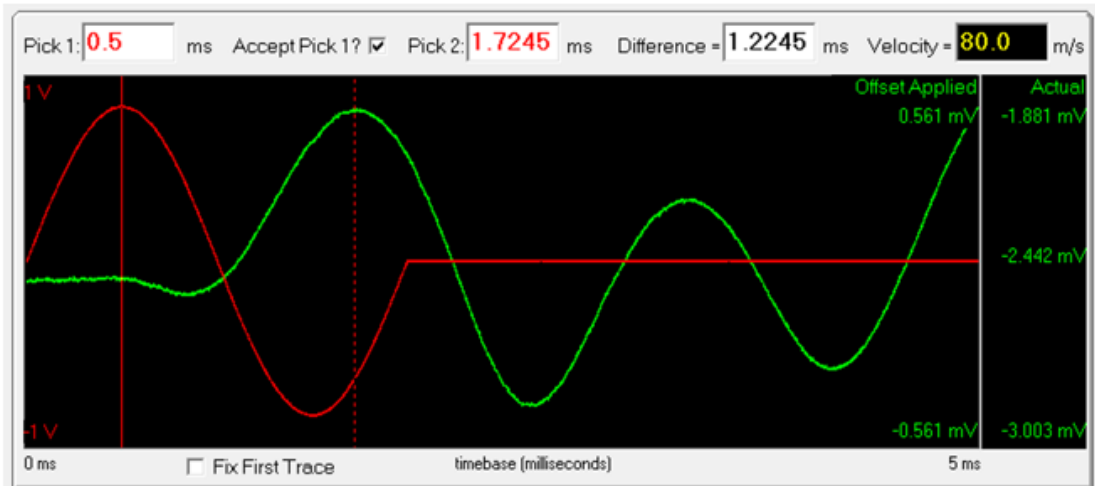
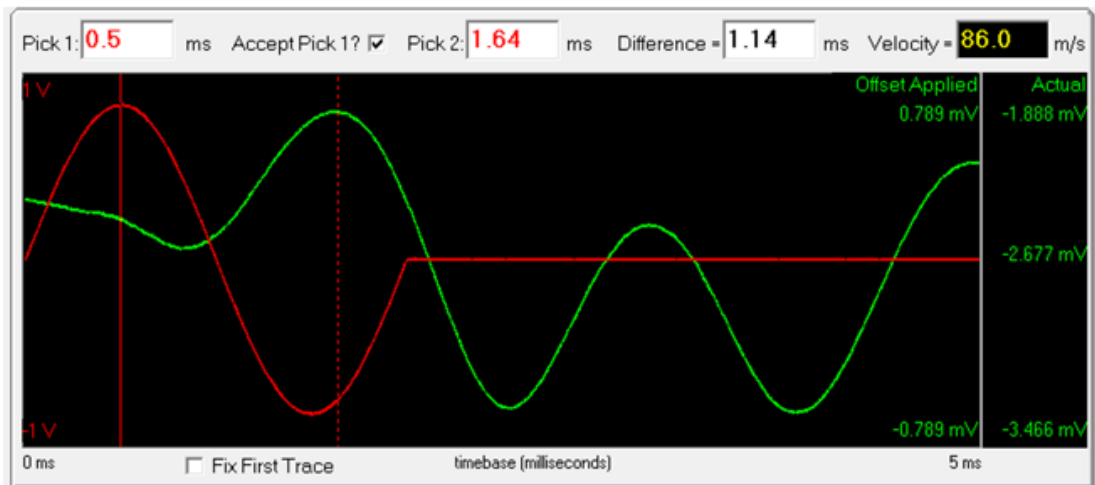
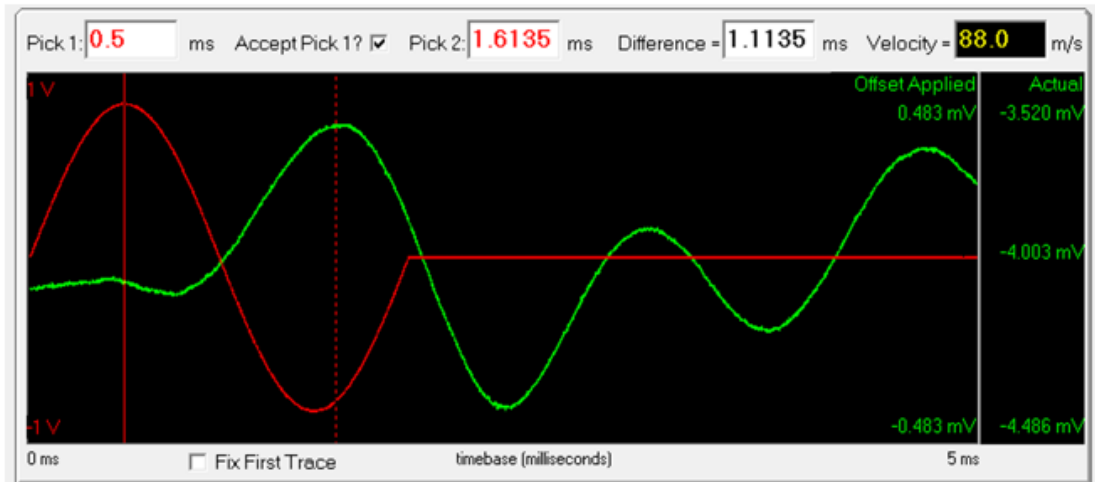
Leinstrand 80 kg/m³ - 1,80



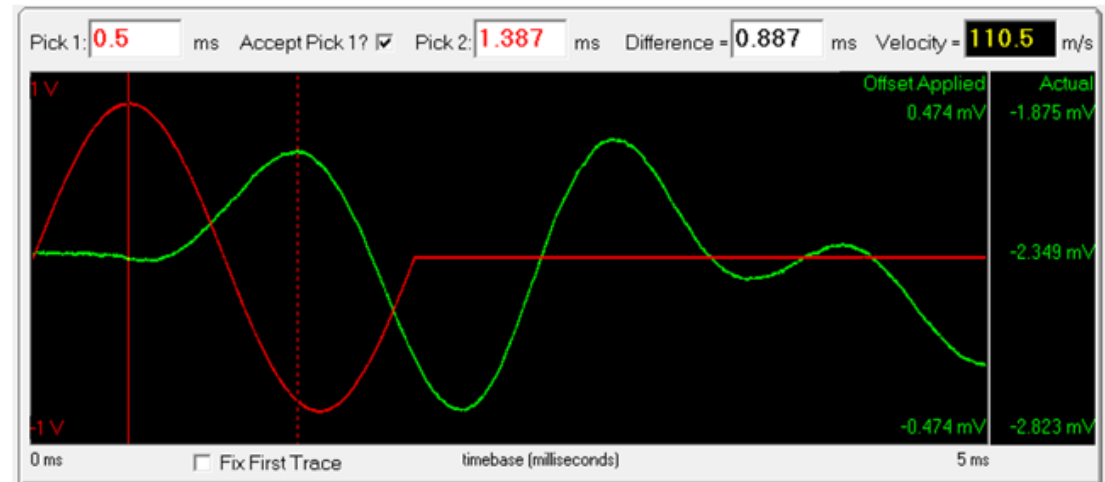
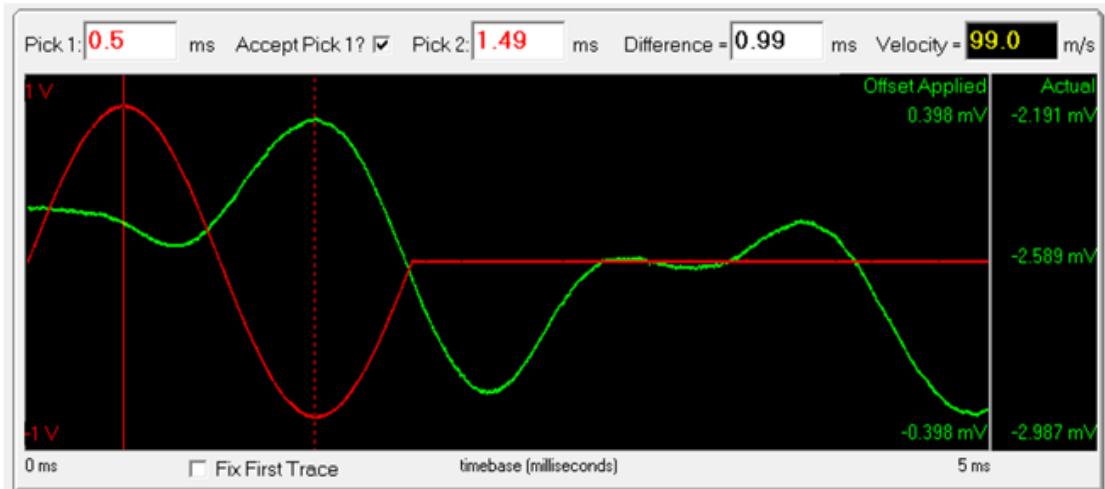
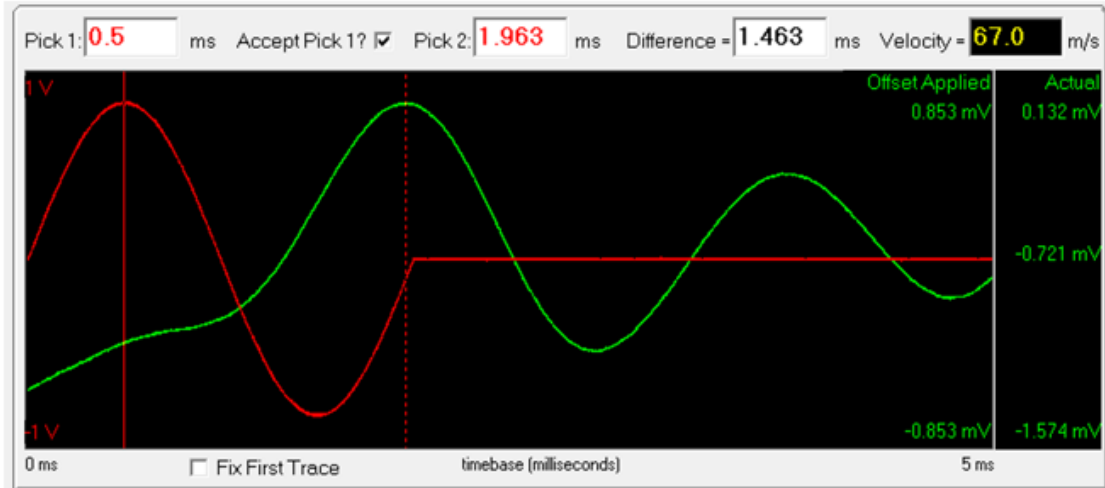
Leinstrand 80 kg/m³ - 1,90



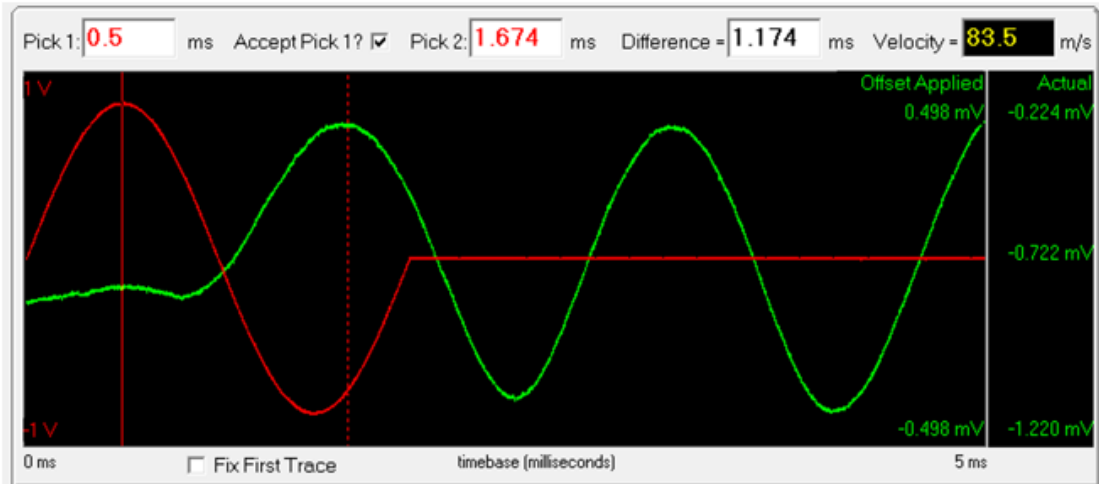
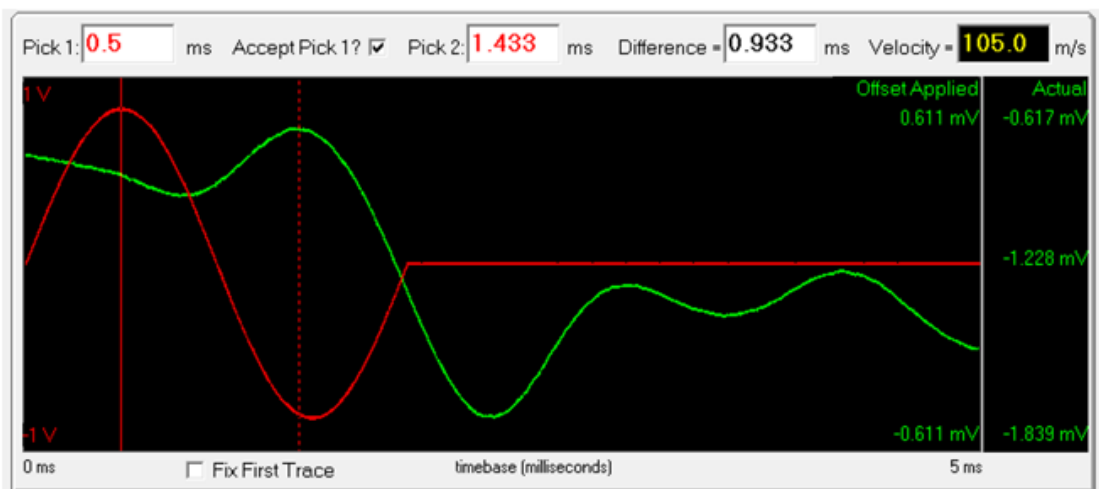
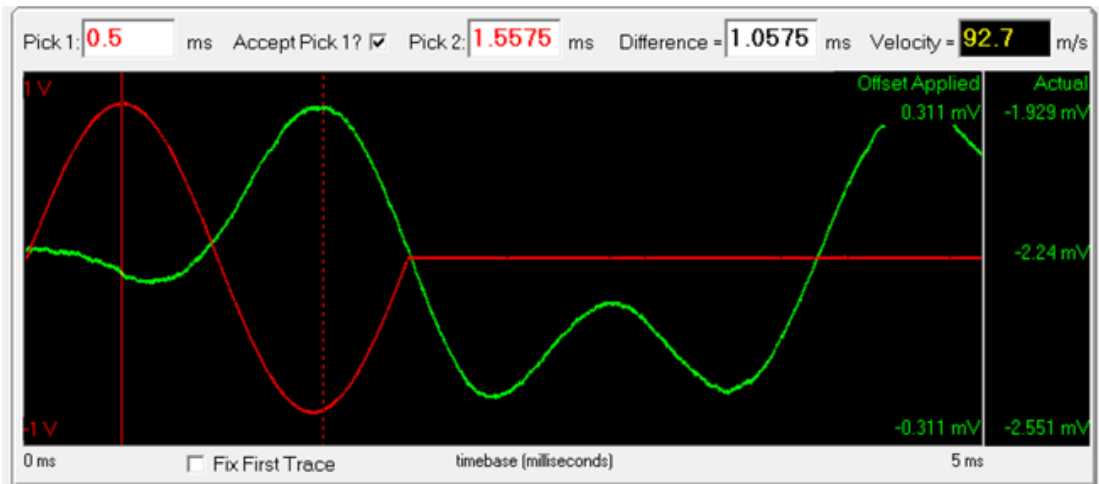
Leinstrand 90 kg/m³ - 1,76



Leinstrand 90 kg/m³ - 1,85

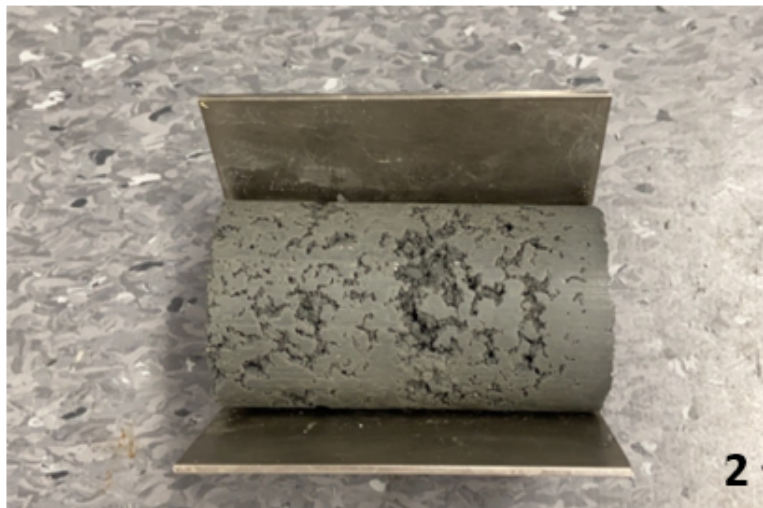
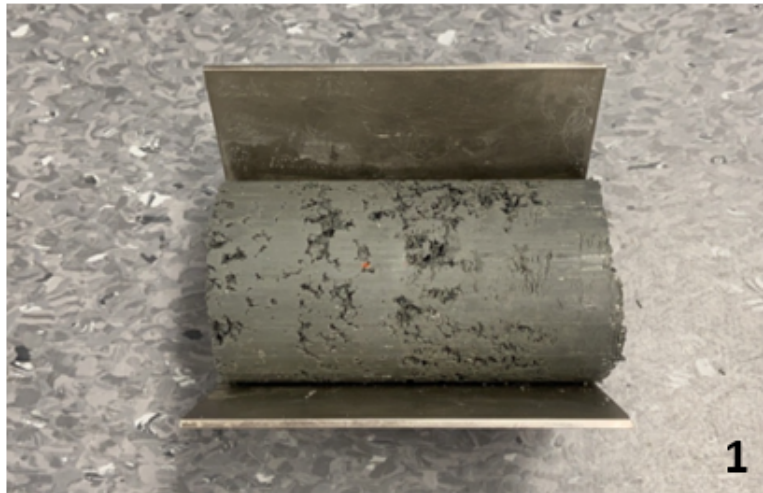


Leinstrand 90 kg/m³ - 1,95

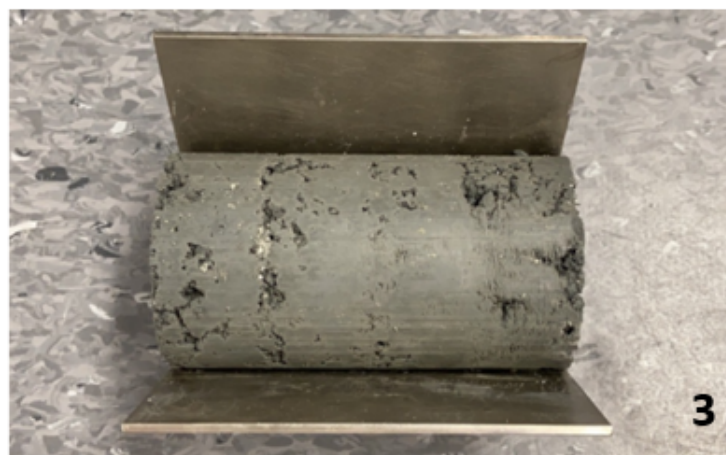
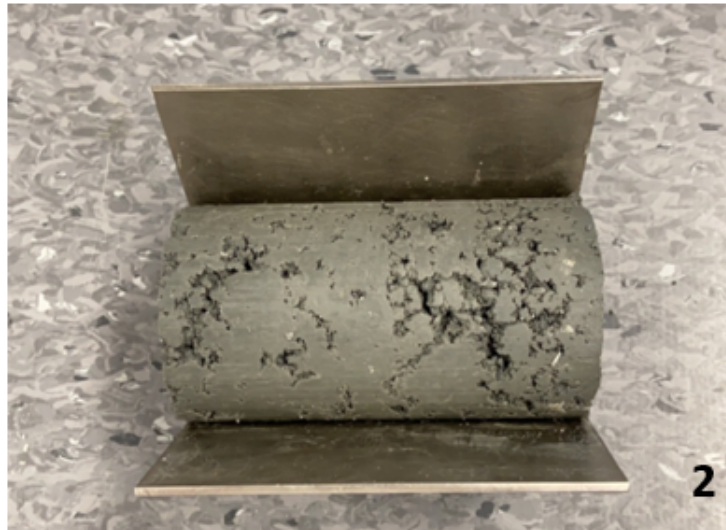
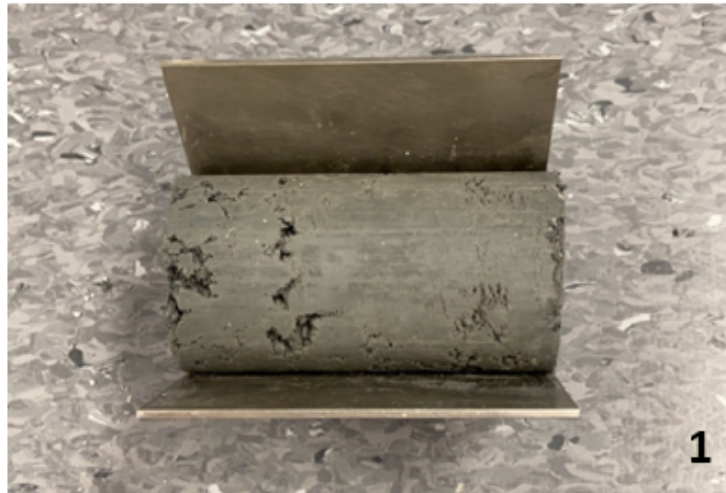


A.3 Bilder av laboratorieprøver

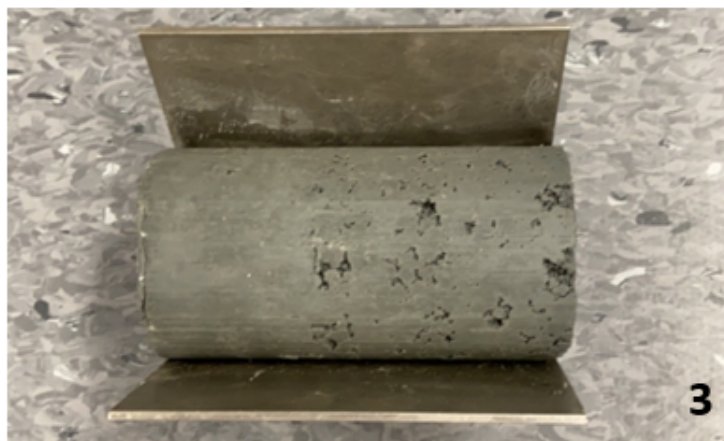
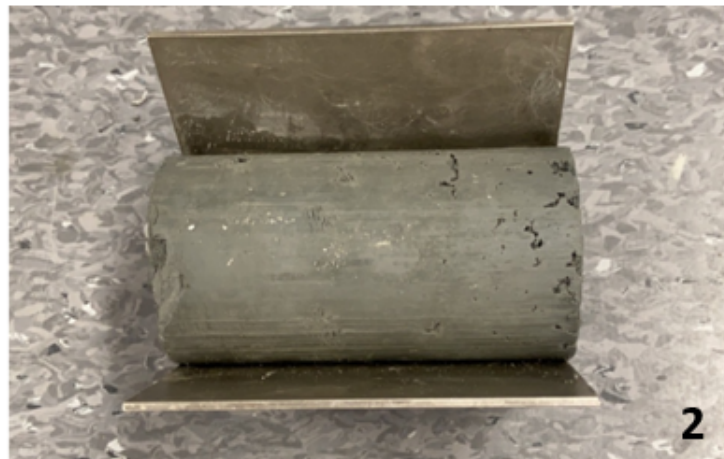
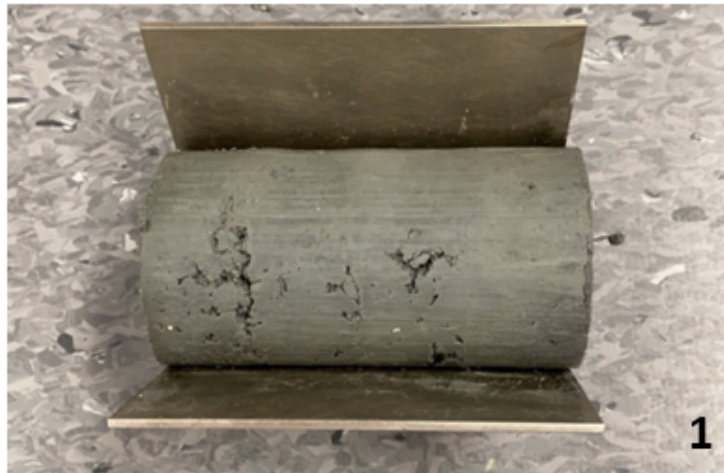
Lilleby 45 kg/m³ - 1,70



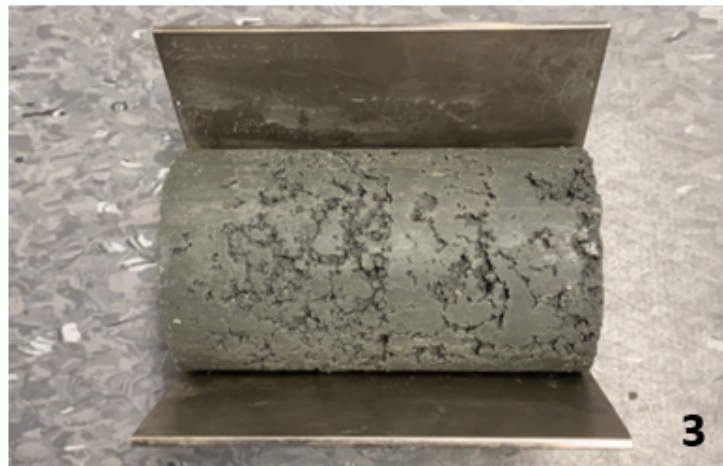
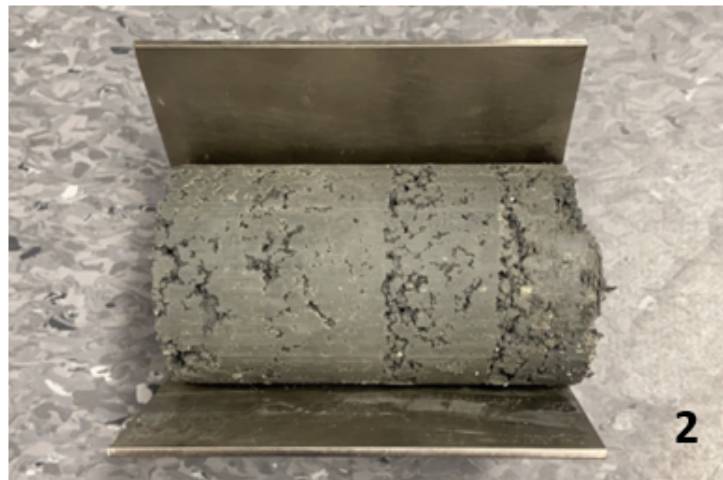
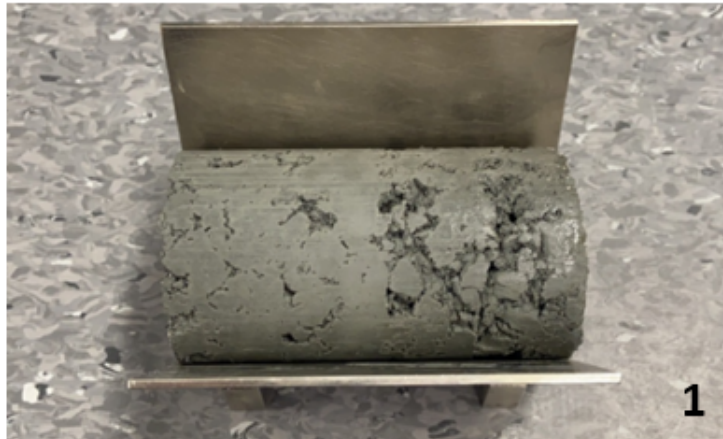
Lilleby 45 kg/m³ - 1,80



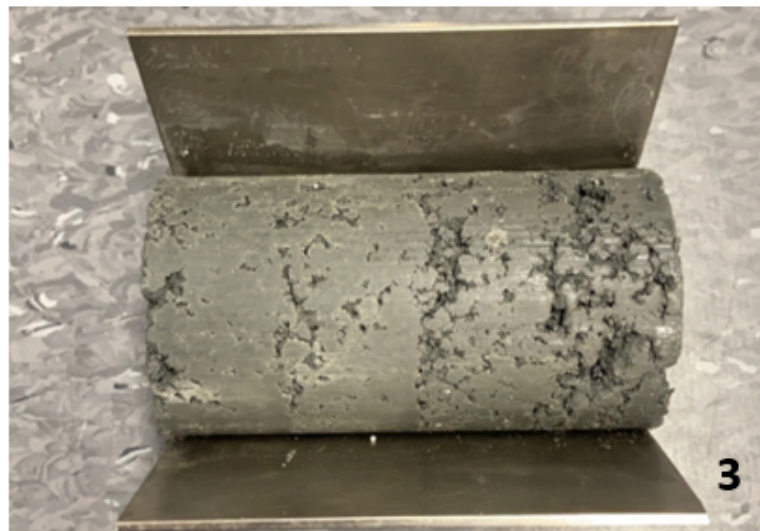
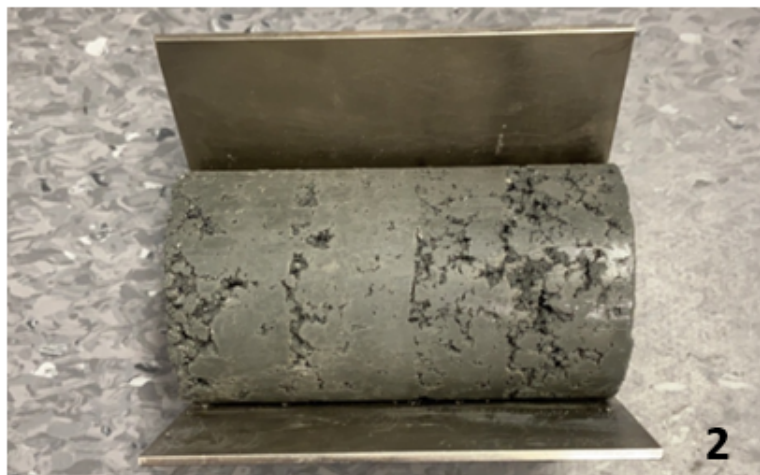
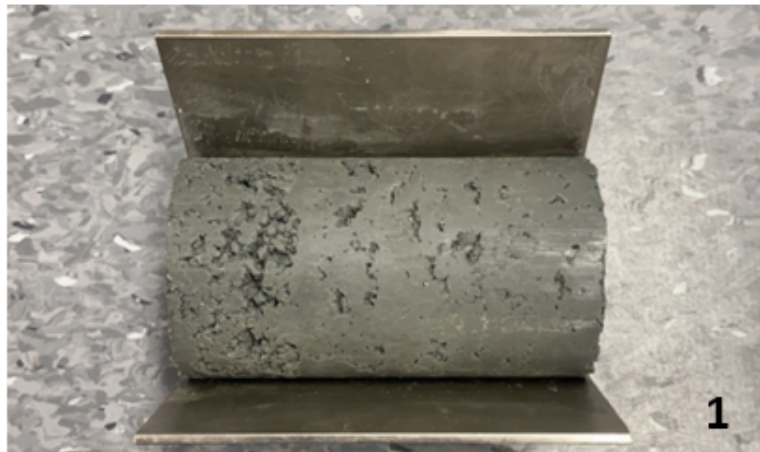
Lilleby 45 kg/m³ - 1,90



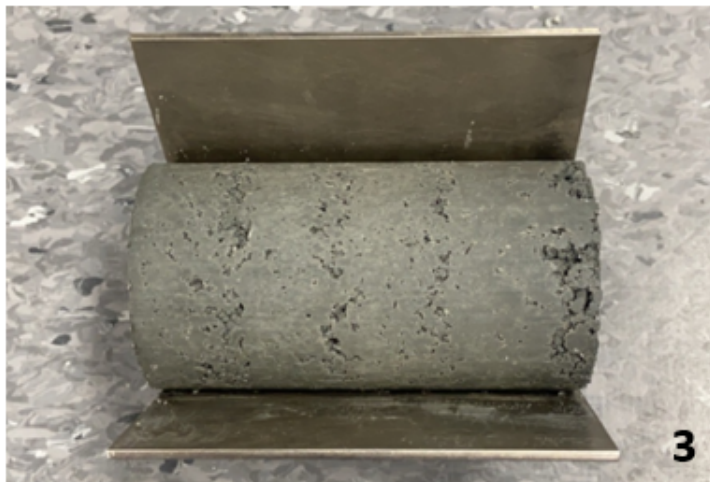
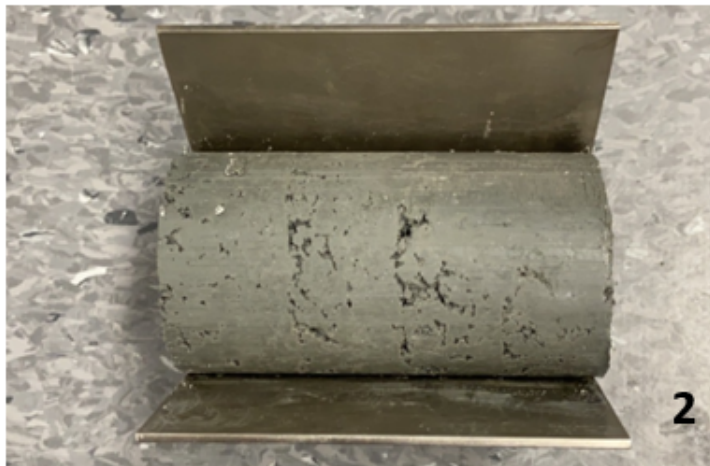
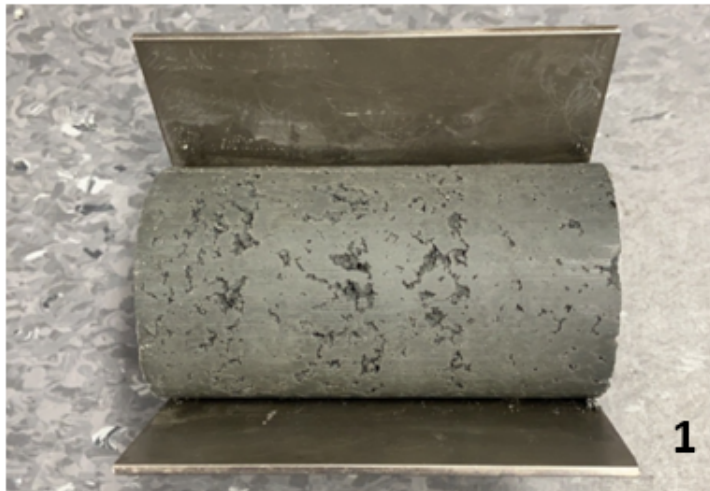
Lilleby 80 kg/m³ - 1,70



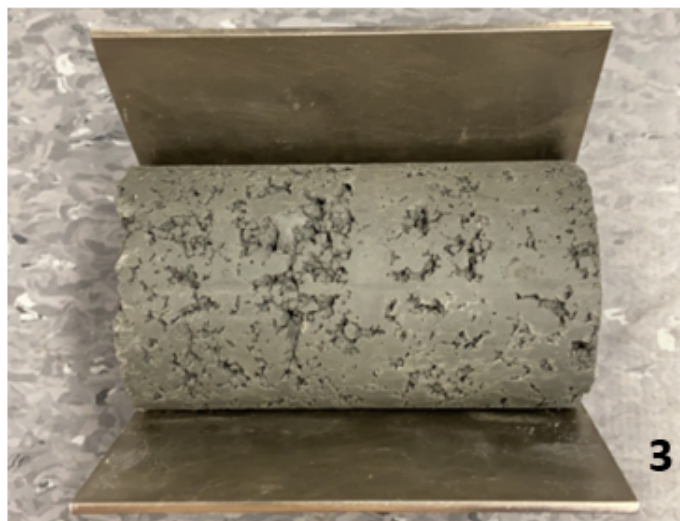
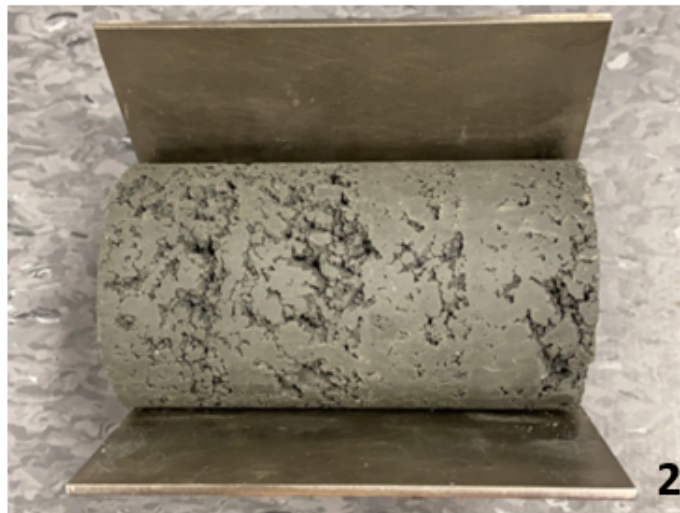
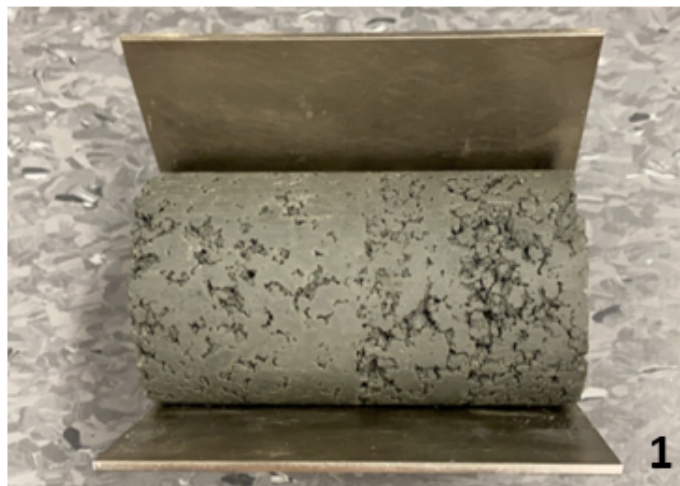
Lilleby 80 kg/m³ - 1,80



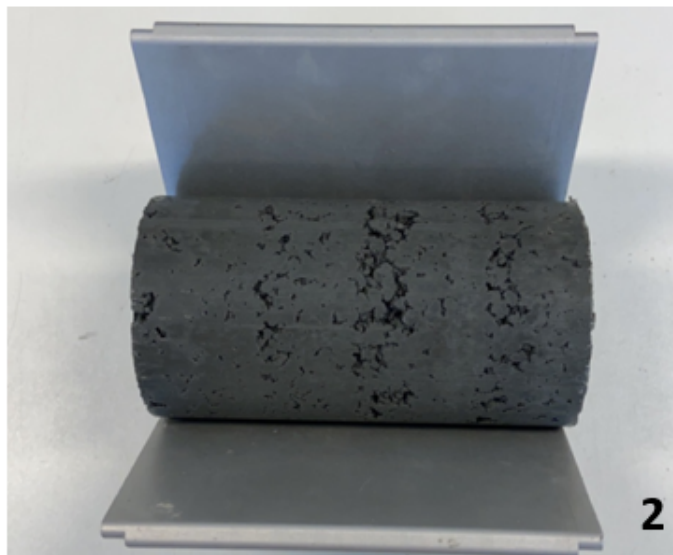
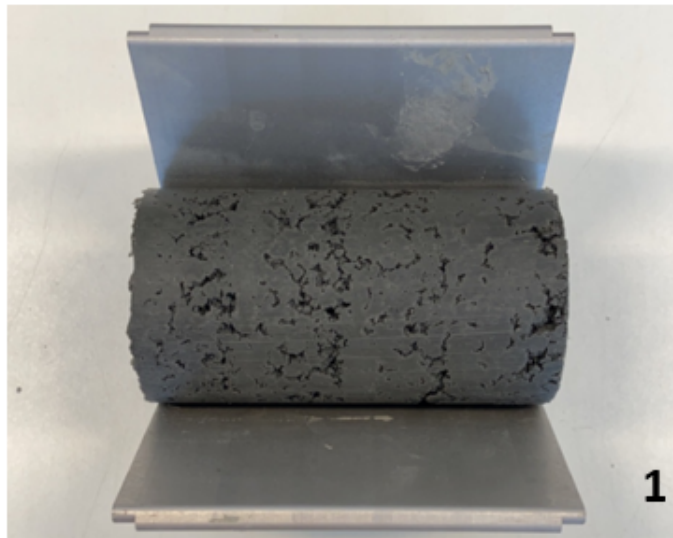
Lilleby 80 kg/m³ - 1,90



Lilleby 100 kg/m³ - 1,76

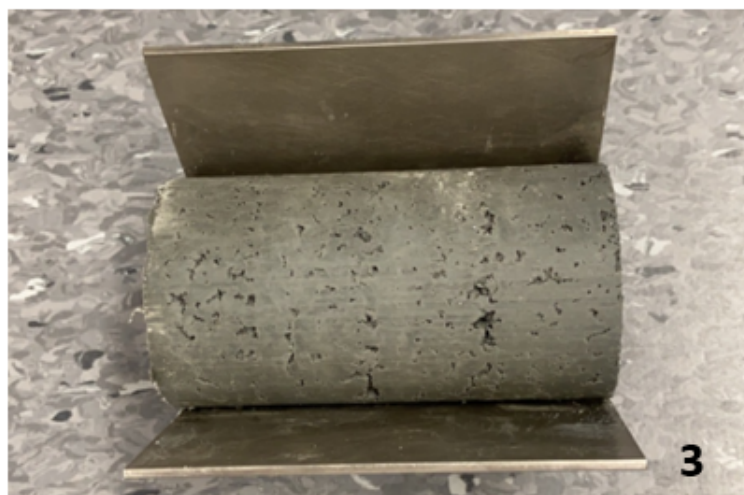
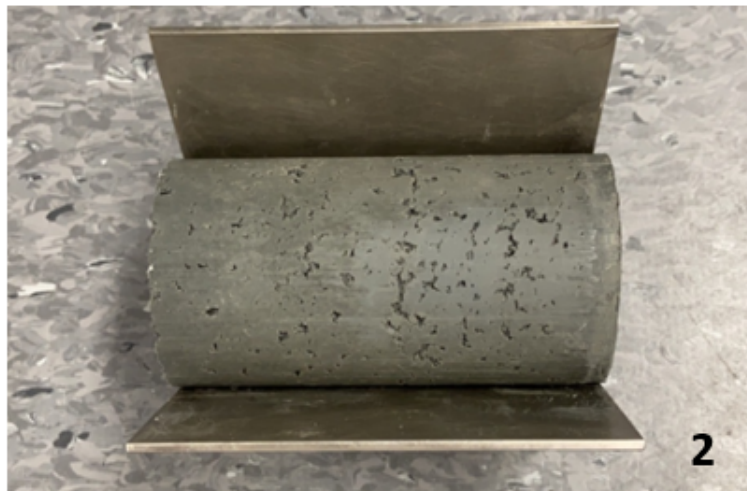
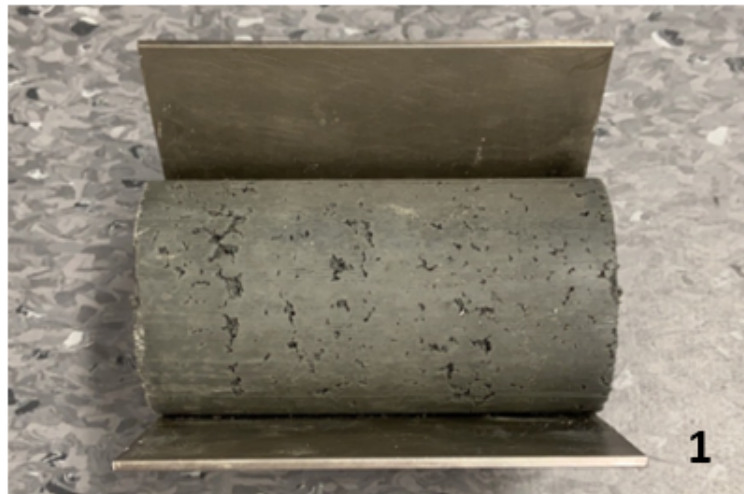


Lilleby 100 kg/m³ - 1,85

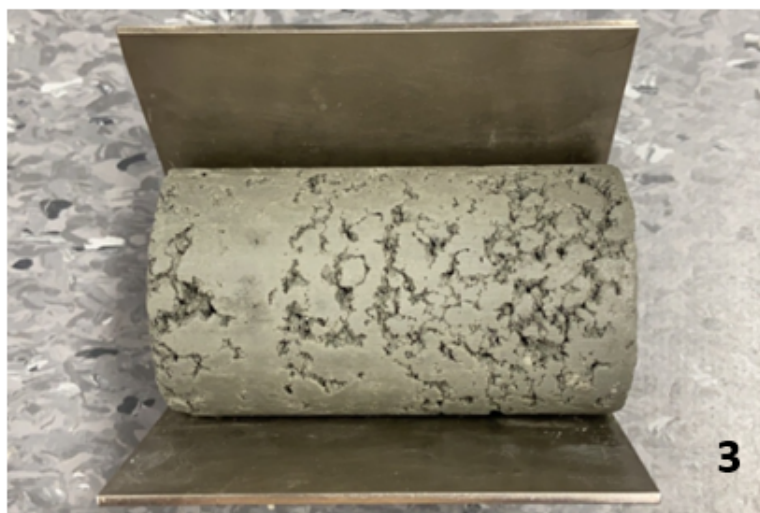
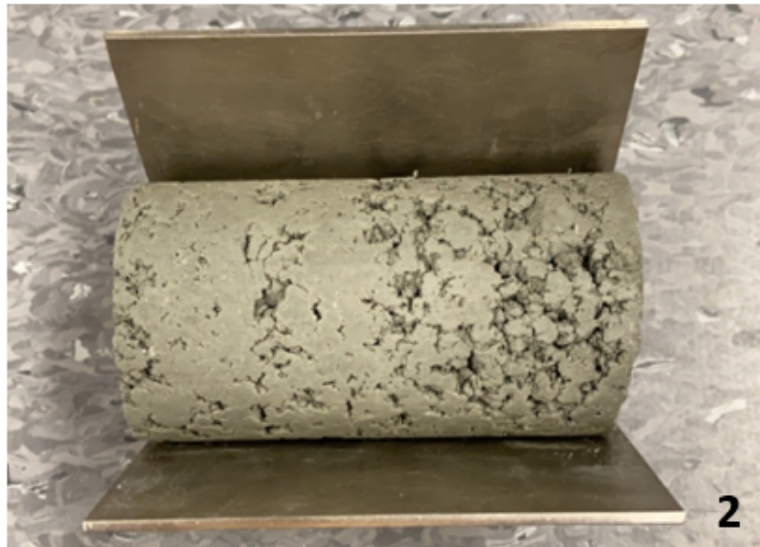
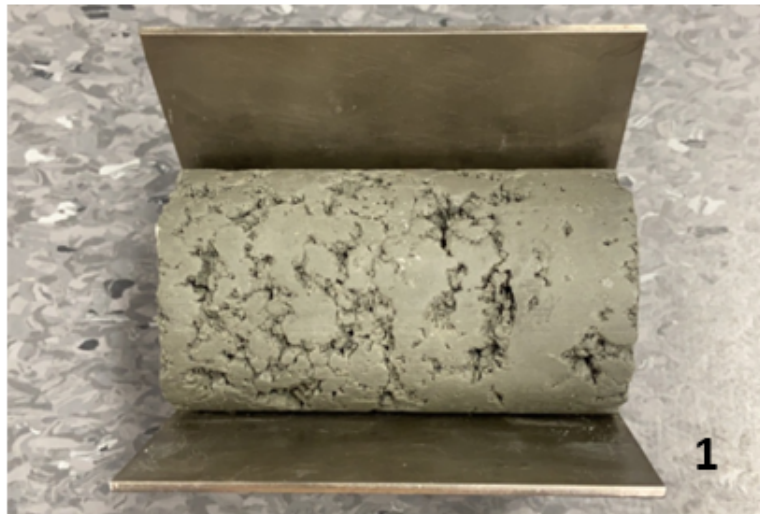


3

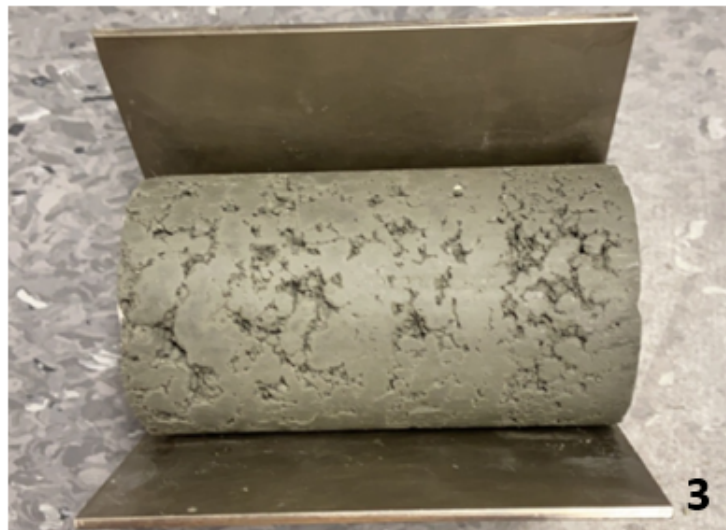
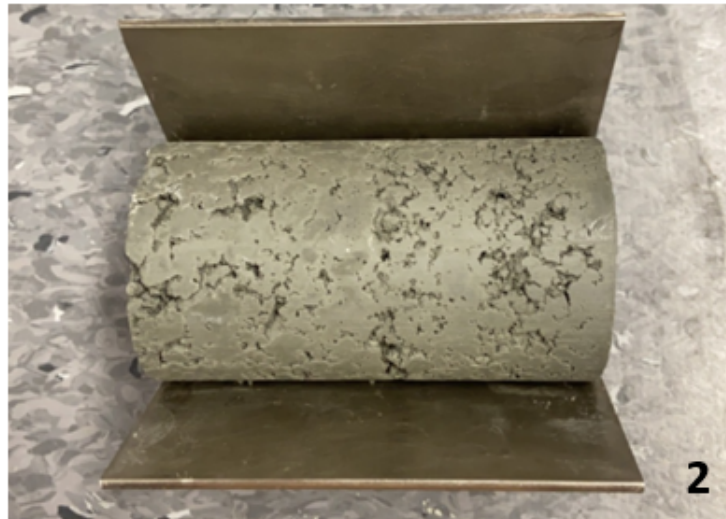
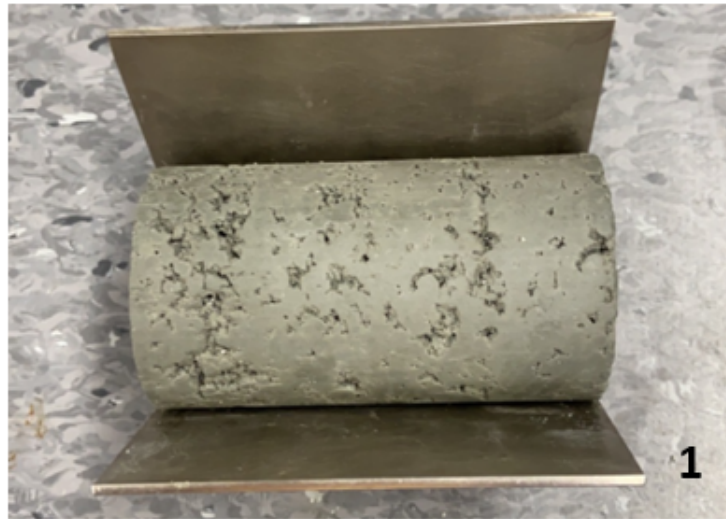
Lilleby 100 kg/m³ - 1,95



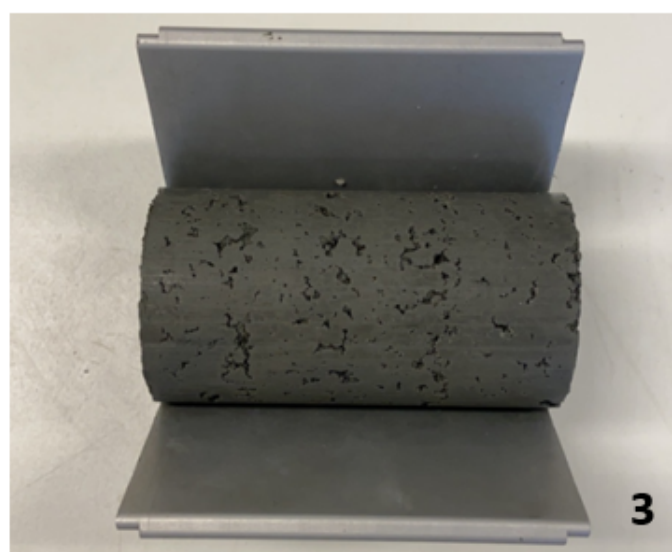
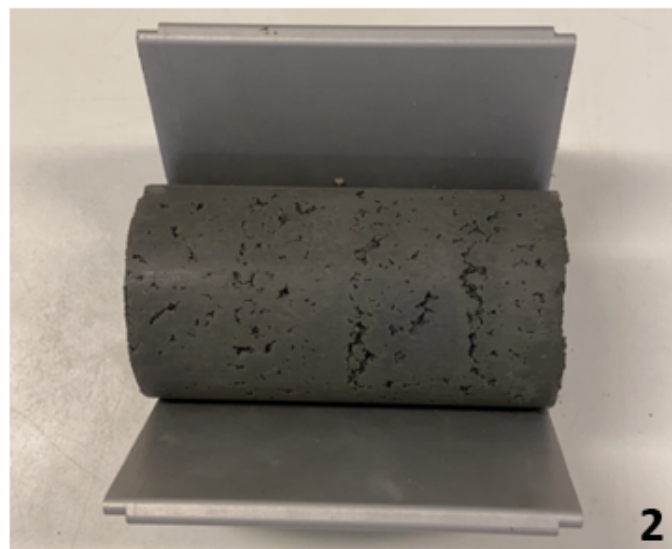
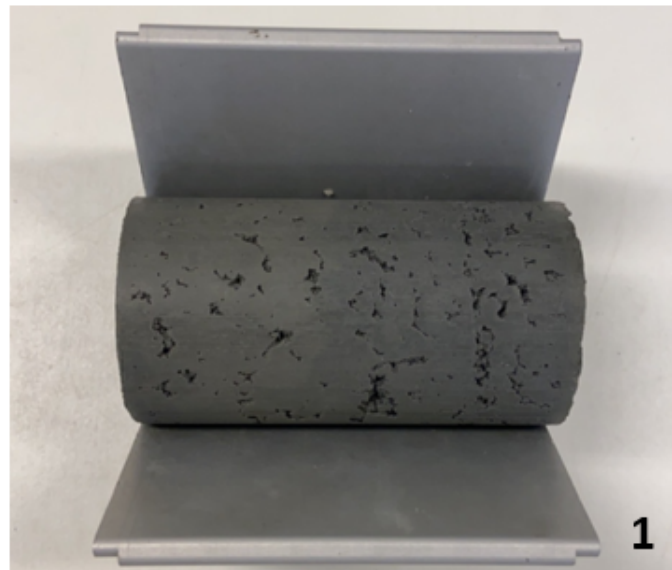
Leinstrand 45 kg/m³ - 1,70



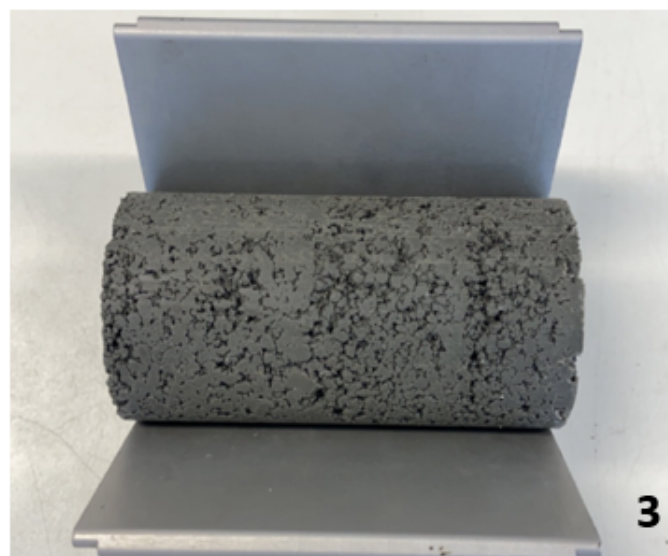
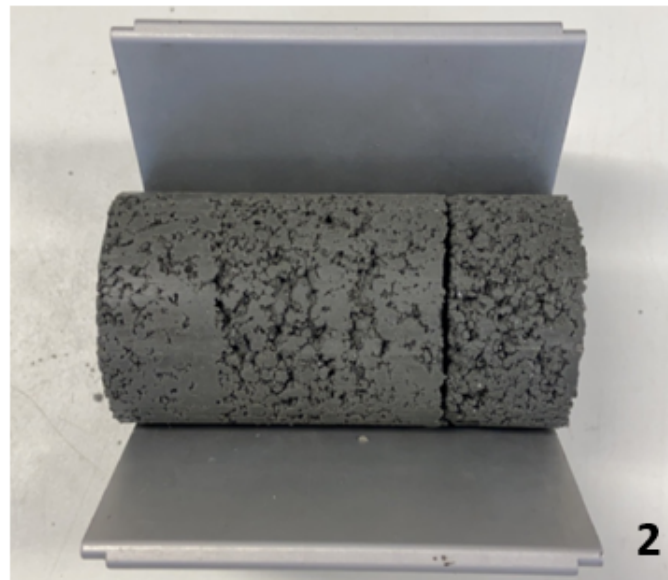
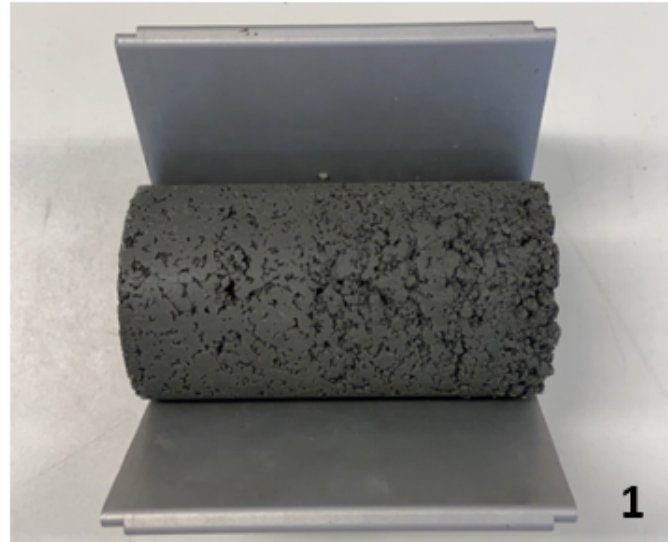
Leinstrand 45 kg/m³ - 1,80



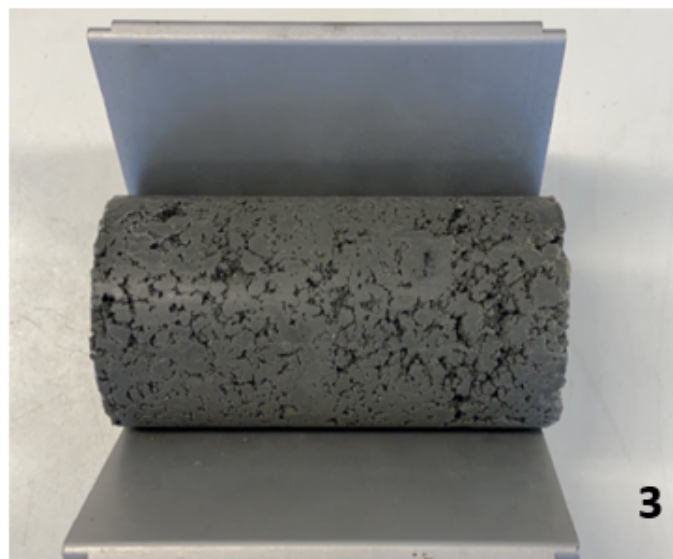
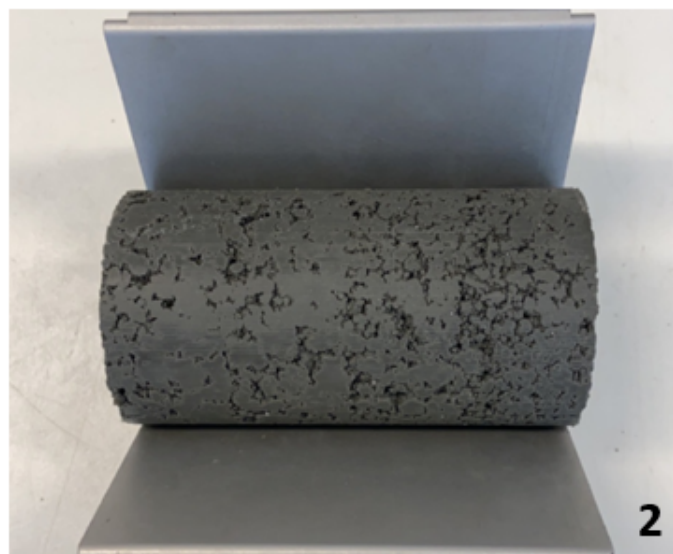
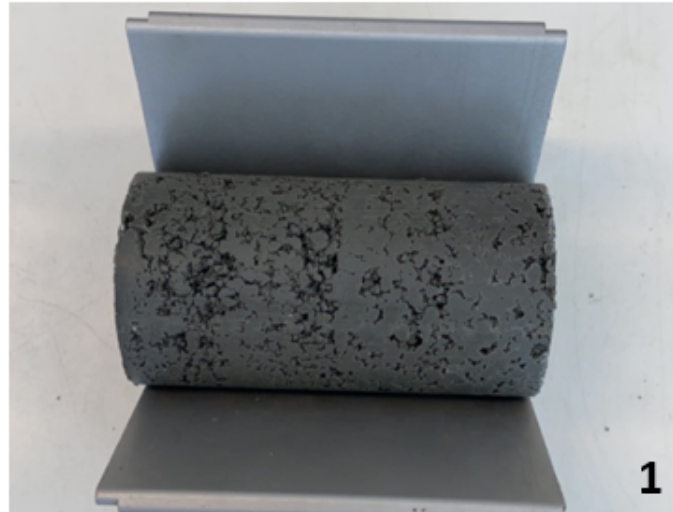
Leinstrand 45 kg/m³ - 1,90



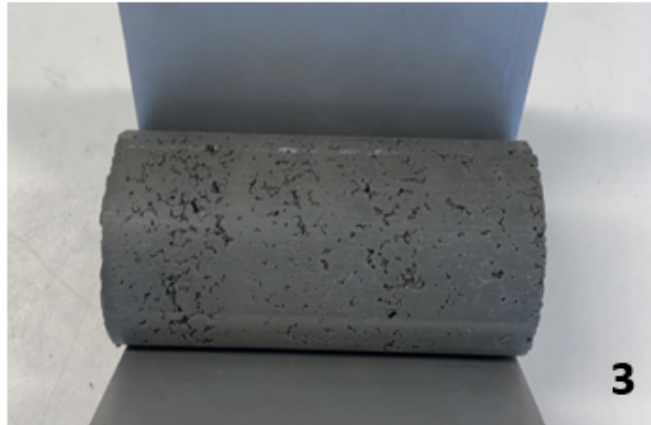
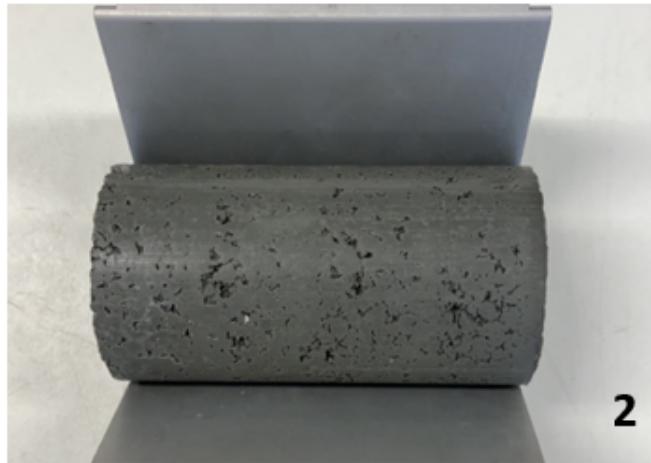
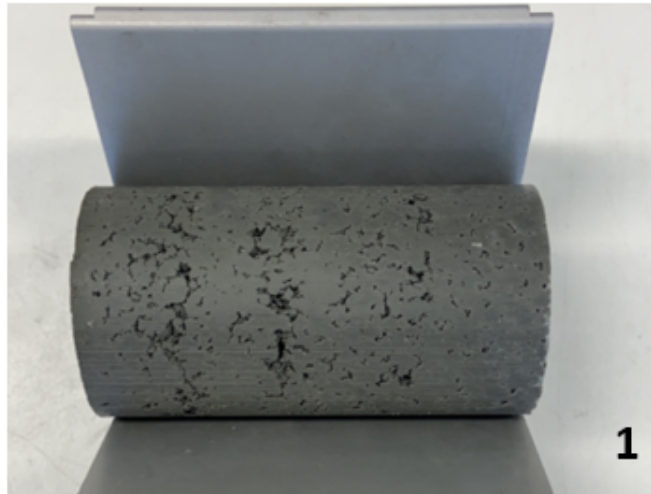
Leinstrand 80 kg/m³ - 1,70



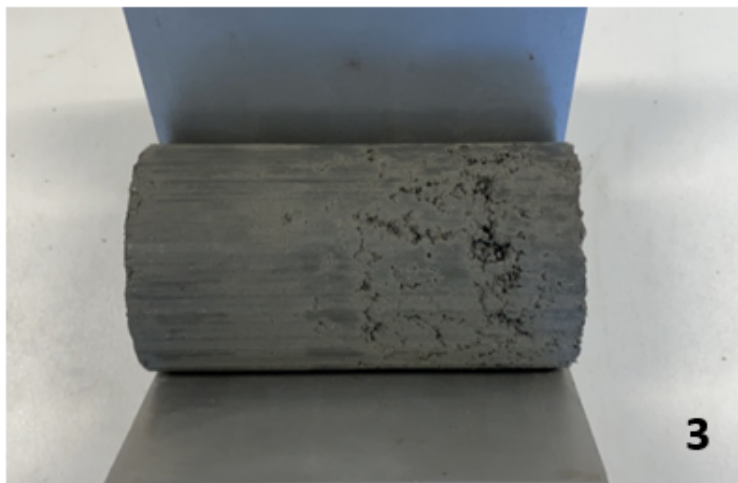
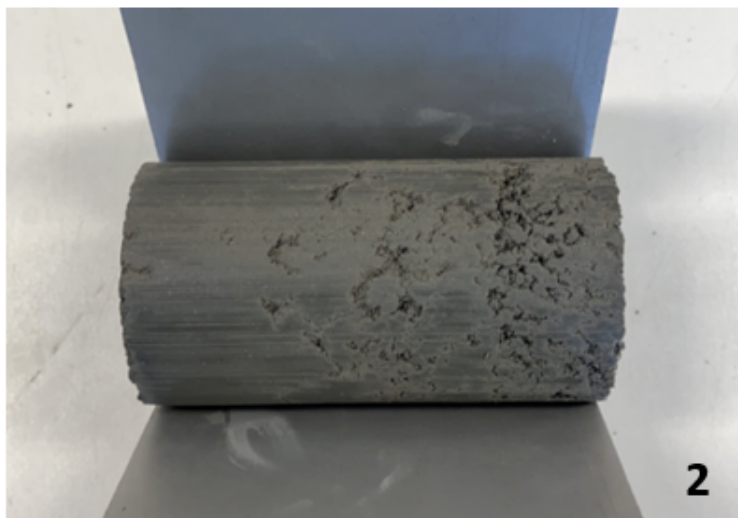
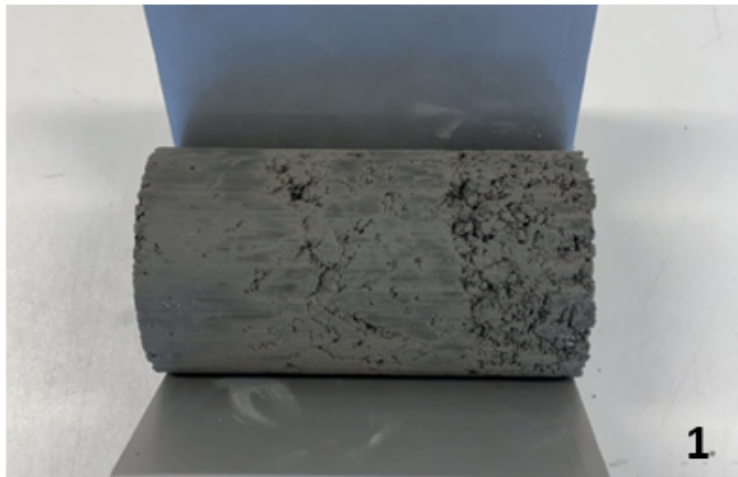
Leinstrand 80 kg/m³ - 1,80



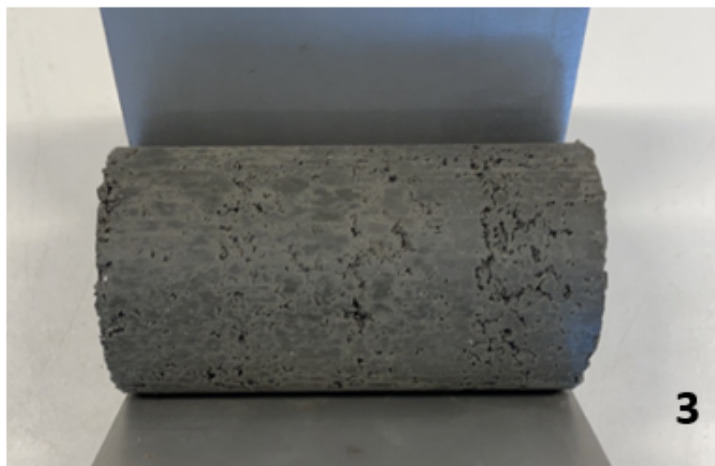
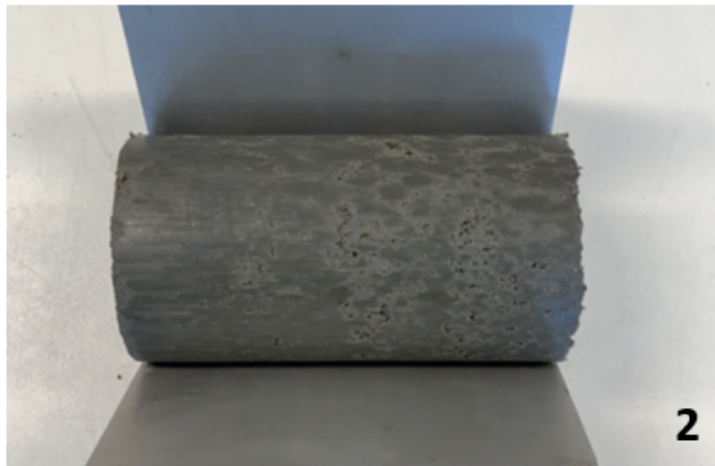
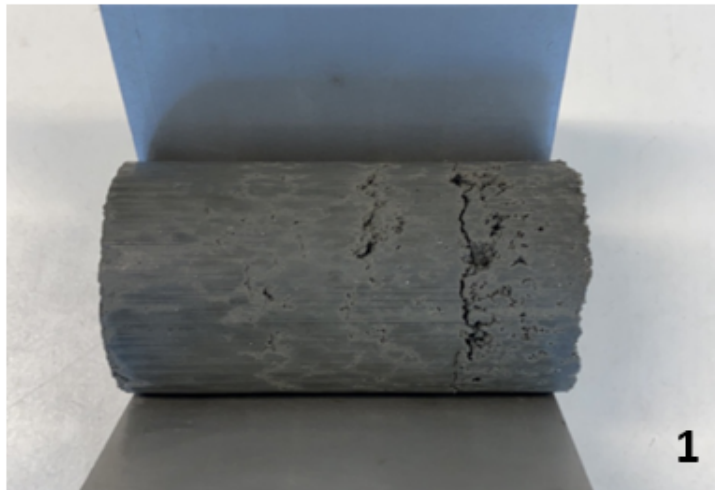
Leinstrand 80 kg/m³ - 1,90



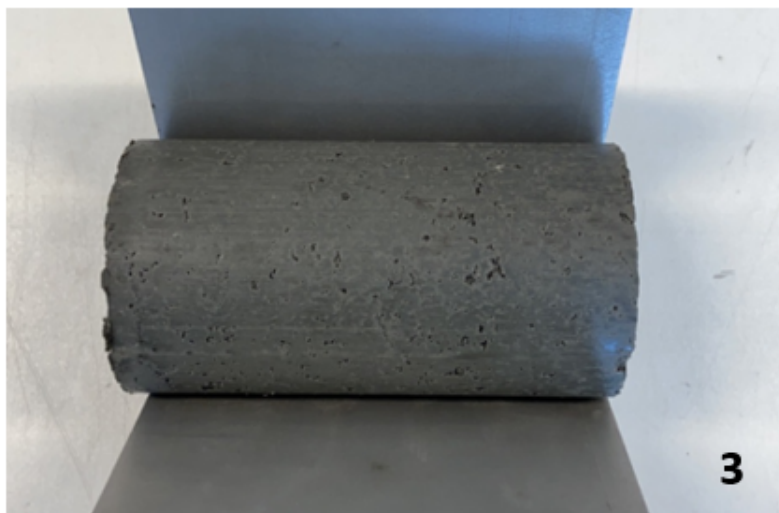
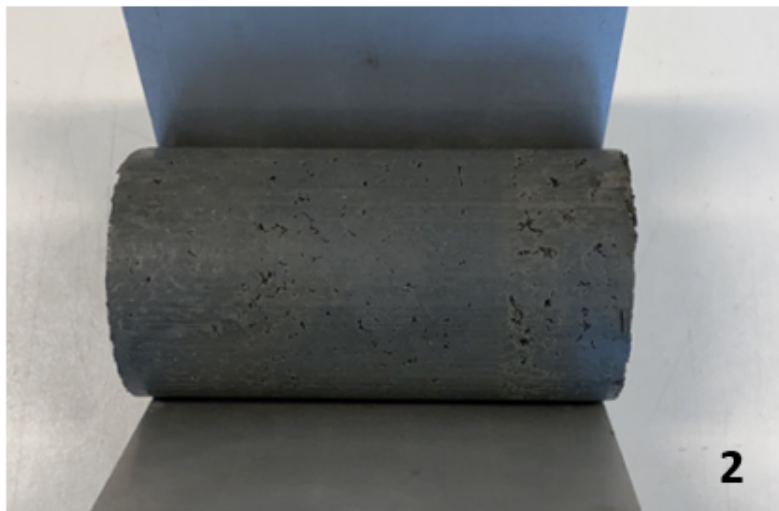
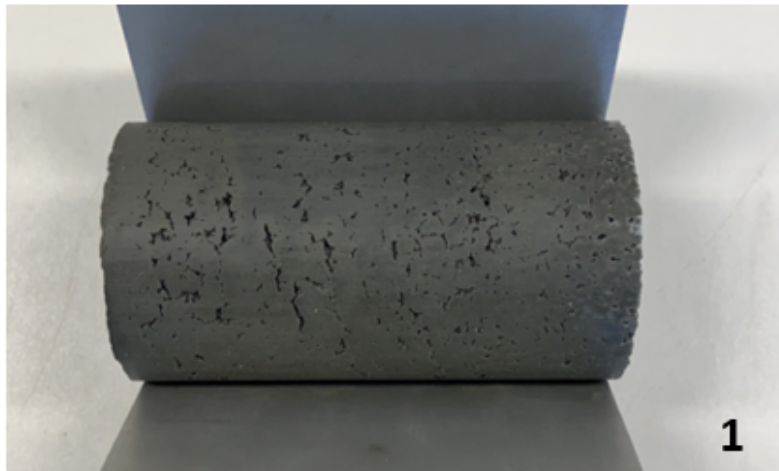
Leinstrand 90 kg/m³ - 1,76



Leinstrand 90 kg/m³ - 1,85



Leinstrand 90 kg/m³ - 1,95



Tillegg B












Rutineundersøkelse

I Tillegg B presenteres resultater fra rutineundersøkelsene av leiren på Lilleby og Leinstrand.

B.1 Lilleby

Dybde [m]	Beskrivelse kt. 12	Prøve	Test	Vanninnhold og konsistensgrenser [%]					ρ [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	Organisk [%]	Udrenert skjærstyrke [kPa]					St
				0	10	20	30	40				50	0	10	20	30	
5	Leire, enk sandkorn	K							1,95	2,74							
10																	
15																	
20																	
<p>Symboler:</p> Enaksialforsøk (strek angir aksjell tøyning (%) ved brudd) Vanninnhold Plastisitetsindeks, I_p Omrørt konus Uomrørt konus ISO 17892-6: 2017 ρ = Denstet ρ_s = Korndensitet S_t = Sensitivitet T = Treaksialforsøk Ø = Ødometerforsøk K = Korngradering Grunnvannstand: m Borbok: Digital																	
Prøveserie:		Dato:	28.03.2022	Operatør:	Pernille Baustad												
Sted:	Lilleby - Poseprøve																

B.2 Leinstrand

Dybde [m]	Beskrivelse kt. 42	Prøve	Test	Vanninnhold og konsistensgrenser [%]					ρ [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	Organisk [%]	Udrenert skjærstyrke [kPa]					St
				0	10	20	30	40				50	0	10	20	30	
5																	
	Leire, små siltlag	K						1,94	2,74	▼	0,8		▽				39
	Kvikkleire	K						1,95	2,73	▼	0,1		▽				230
10																	
15																	
20																	
<p>Symboler:</p> <p>  Enaksialforsøk (strek angir aksjell tøyning (%) ved brudd)  Vanninnhold  Plastisitetssymbol, I_p  Omrørt konus  Uomrørt konus  ρ = Densitet  ρ_s = Korndensitet  S_t = Sensitivitet  T = Treaksialforsøk  Ø = Ødometerforsøk  K = Korngradering Grunnvannstand: m Borrbok: Digital </p>																	
Prøveserie:		Dato:		01.04.2022		Operatør:		Pernille Baustad									
Sted:		Leinstrand															

Tillegg C

Produktdatablader og produktspesifikasjon

Tillegg C viser produktdatablader og produktspesifikasjoner for bindemidler brukt i masteroppgaven.

C.1 Sementer

PRODUKTDATABLAD
INDUSTRISEMENT
CEM I 52,5 R
SIST REVIDERT MARS 2021

Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portlandsement CEM I 52,5 R.

Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m ² /kg)		550	
Spesifikk vekt (kg/dm ³)		3,13	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnendestørkning (min)		110	≥ 45
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	33	
	2 døgn	41	≥ 30
	7 døgn	50	
	28 døgn	59	≥ 52,5
Sulfat (% SO ₃)		≤ 4,0	≤ 4,0
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,085 (B) / ≤ 0,05 (K)	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalier (% Na ₂ O _{ekv})		1,3	
Klinker (%)		96	95-100
Sekundærestanddeler (%)		4	0-5

1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII punkt 47 krom VI forbindelser.

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, Postboks 142, Lilleaker, 0216 Oslo
Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

PRODUKTDATABLAD

STANDARDSEMENT FA

CEM II/B-M

SIST REVIDERT FEBRUAR 2022

Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portland blandingssement CEM II/B-M 42,5 R.

Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m ² /kg)		450	
Spesifikk vekt (kg/dm ³)		3,00	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnende størkning (min)		140	≥ 60
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	20	
	2 døgn	31	≥ 20
	7 døgn	42	
	28 døgn	55	≥ 42,5 ≤ 62,5
Sulfat (% SO ₃)		≤ 4,0	≤ 4,0
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,085 (B) / ≤ 0,05 (K)	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalier (% Na ₂ O _{eq})		1,4 (B) / 1,5 (K)	
Klinker (%)		78	65-79
Flygeaske (%)		18	21-35
Kalkmel (%)		4	


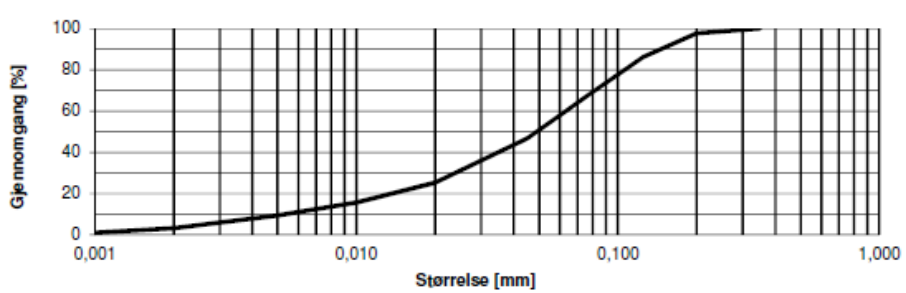
1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII point 47 krom VI forbindelser.

B = Brevik og K = Kjøpsvik

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, Postboks 142, Lilleaker, 0216 Oslo
Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

C.2 Kalk

Produktdatablad STABILA B 80									
Miljøkalk AS Postboks 53 NO-1309 Rud Telefon : +47 05255 E-post, Web: miljøkalk@kalk.no www.kalk.no									
Materiale:	Brentkalk/Filterstøv/flytmiddel		Produsent:	Verdalskalk AS, avd Hylla					
Reg.nr.:	CL 80-Q (R4, PSV)	1111 CPR-0108	Råmateriale:	Kalkstein fra Tromsdalen i Verdal					
	Sertifikat CPR		Fremstilt:	Brenning av CaCO ₃ til CaO (1000°C i sjaktovn) og tilsetning av flytmiddel					
	Produktregistrert	-	Versjon:	1/18					
	REACH nr	01-2119475325-36-0043							
Anvendelse:	Stabilisering								
Krav:	NS-EN 459: Byggningskalk								
Parameter	Metode	Enhet	Statistikk		Krav				
			Snitt	s	L	H	Toleranse +/-		
CaO + MgO	NS-EN 459	%	90	-	80	-			
MgO		%	0,65	-	-	5			
SO ₃		%	0,11	-	-	2			
CO ₂		%	4,9	-	-	7			
CaO aktiv		%	89	-	65	-			
Soundness		(mm)	13	-	-	20			
T60		(min)	2,6	-	-	10			
0,001 mm		Microtrac	%	1	0,8	-		-	ikke deklartert (PSV)
0,002 mm			%	3	1,2	-		-	
0,005 mm			%	9	1,7	-		-	
0,010 mm	%		16	2,1	-	-			
0,020 mm	%		25	2,8	-	-			
0,045 mm	%		47	4,3	-	-			
0,063 mm	%		60	4,8	-	-			
0,075 mm	%		67	5,2	-	-			
0,125 mm	%		86	5,1	-	-			
0,200 mm	%		98	1,6	-	-			
0,350 mm	%	100	0,0	-	-				
Kornfordeling									
									
Råmateriale:	Råmaterialet er et naturprodukt med variasjoner innenfor visse grenser								
Levering:	Bulk								
Volumvekt:	~1,2 [kg/dm ³]								
Lagring:	Produktet må lagres tørt								
SDS:	Se produktets sikkerhetsdatablad for informasjon angående helse, miljø og sikkerhet. Les denne informasjonen og iverksett eventuelle sikkerhetstiltak før produktet tas i bruk.								

C.3 MULTICEM

PRODUKTDATABLAD

MULTICEM

SIST REVIDERT OKTOBER 2020

Multicem er et bindemiddel som består av sement og CKD (Cement Kiln Dust), med hovedbestanddelene sement, brønt kalk og andre kalsinerte mineraler. Multicem brukes til stabilisering av leire og andre ustabile jordmasser. I Norge har produktet vært benyttet siden 2004 for dette formålet.

Multicem har en god miljøprofil, og har lavere CO₂-utslipp per tonn sammenlignet med andre tilsvarende materialer. Multicem leveres ferdigblandet fra terminal, og kan leveres med 25, 50 og 75 % andel CKD, som benevnes med en brøk etter produktnavnet der nevneren i brøken angir mengden sement. Den mest benyttede blandingen er Multicem 50/50 og består da av 50 % CKD og 50 % sement.

Egenskap		CKD / STD FA			CKD / IND		
		75/25	50/50	25/75	75/25	50/50	25/75
Typisk verdi	CaO (%) ¹⁾	>50	>50	>50	>50	>50	>50
	<24 um (%) ¹⁾	48	58	67	51	63	74
	<30 um (%) ¹⁾	57	66	75	60	70	81
	>64 um (%) ¹⁾	16	11	7	15	11	6
	>90 um (%) ¹⁾	8	6	3	8	6	3
	Spesifikk vekt (kg/dm ³) ¹⁾	3	3	3	3	3	3
EPD (A1 - A3) kg CO _{2-eq.}		145	291	436	179	358	537

1) Beregnede verdier

Oppbevaring: Multicem er et finmalt produkt som er mer reaktivt enn vanlig sement. Dette gjør at Multicem vil hydratisere raskt i fuktig miljø, og bør derfor oppbevares tørt.

Helsefare: Se sikkerhetsdatablad på www.norcem.no

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, Postboks 143, Lilleaker, NO-0216 Oslo
Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

