

Anders Magnus Sjølund Stokka

Testing av skjærstyrke i Multicem og CKD utført med treaksialt apparat

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Arnfinn Emdal

Juli 2020

Masteroppgave

Testing av skjærstyrke i Multicem og CKD utført med treaksialt apparat

Anders Magnus Sjølund Stokka

Veileder: Arnfinn Emdal

Masteroppgave: Bygg og miljøteknikk

Hovedprofil: Geoteknikk TBA4900

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet



Dette selvstendige arbeidet er gjennomført som ledd i masterstudiet på Bygg og miljøteknikk ved NTNU og godkjent som sådan.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i løpet av våren 2020. Oppaven er en avsluttende mastergrad innen geoteknikk ved NTNU i Trondheim. Jeg vil gjerne takke samarbeidet og hjelpen fra Norcem, Geovita, og min veileder Arnfinn Emdal. I tillegg vil jeg takke labopperatørene som hjalp til på NTNU-laben. Alle har vært til stor hjelp, og det hadde vært vanskelig og gjennomført dette uten deres hjelp og ekspertise.

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Trondheim, Vår 2020

Anders Stokka

Anders Magnus Sjølund Stokka

Sammendrag

Det har i mange år blitt brukt ulike bindemidler til å stabilisere undergrunnen og øke fastheten i bløt jord og leire. En relativ ny bindemiddelsform som brukes mer og mer er Multicem. Multicem selges som oftest i en blanding av 50% sement og 50% CKD. Det er gjort få tester med større andel CKD enn 50%. CKD betegnes som et biprodukt. Mer bruk av CKD vil dermed redusere CO_2 -utslippet.

I denne masteren ble tre ulike blandinger med Multicem testet for tre ulike innblandingsmengder for å se om bruk av mer CKD kan gi høy nok fasthet og skjærstyrke i bakken. For å tilrettelegge for mer realistiske resultater har prøvene blitt testet med treaksialt apparat framfor enaks som er mest vanlig. Resultatene viser at blandinger med mest sement gir høyest styrke, og prøvene med bare CKD gir lav styrke. Innblandingsmengden utgjorde ikke stor forskjell mellom prøvene. Størst styrke ble målt med en innblandingsmengde på $75Kg/m^3$ med 50/50 blanding Multicem. Prøven med $75Kg/m^3$ og 75/25 CKD/Sement gav høyest forholdstall mellom styrke og CO_2 -utslipp med en styrke på ca 130KPa ved 2% tøyning. E-modulen for prøvene viser en lineær trend mellom økende mengde sement og fasthet. Forsøkene viste lavest E-modul for prøver mye CKD og høyest fasthet for prøvene med mer sement. Benyttelse av kun CKD viste seg å ikke gi ønskelig optimal styrke, mens bruk av 75/25 CKD/ment kan benyttes ved tilfeller der kravene for styrke ikke er så høye.

Samtidig som treaksprøvene ble lagd og testet, ble en rekke temperaturmålinger av de ulike bindemidlene gjennomført. Dette ble gjort for å få en bedre indikasjon på hva forventet temperatur kan være inne i bakken når bindemidlene blandes med leire. Disse målingene ble gjort ved både $20^{\circ}C$ og $8^{\circ}C$. Ved $8^{\circ}C$ gikk reaksjonene mye langsommere enn ved $20^{\circ}C$. Ved større mengde sement gikk temperaturutviklingen langsommere. Høyest nådd temperatur ble oppnådd ved $103^{\circ}C$ med en blanding på kun CKD herdet ved $20^{\circ}C$.

For videre arbeid anbefales det å utforske flere innblandingsmengder og blandeforhold med ulikt celletrykk for å få et mer tydeligere resultat. I tillegg til dette anbefales det å sette mer lys på temperatureffekten ved herding av KS-peler.

Nøkkelord – Kalksementstabilisering, Multicem, treaksial skjærttest, temperaturutvikling

Abstract

Over several years an abundance of different binders have been used to stabilize the ground to achieve a higher strength in soft and clayey soil. A new binder that has been used more recently is Multicem. Multicem is often sold as a mixture of 50% cement and 50% CKD. There are few tests performed on samples with a share of CKD more than 50%. CKD is often listed as a biproduct. More use of this substance will reduce the CO_2 -emissions.

For this master three different binder mixtures with Multicem were tested with three different amounts to see if the use of more CKD could increase the strength of the soil. To get more realistic results, the samples were tested with a triaxial apparatus instead of a uniaxial which is most common. The results show that the mixtures with most cement give the highest strength, and the samples with only CKD gave lower. The amount of mixture did not impact the strength greatly. Highest strength measured was with an amount of $75Kg/m^3$ with a 50/50 mixture of Multicem. The sample with $75Kg/m^3$ and 75/25 CKD/Cement gave the highest ratio between strength and CO2 emission with a shear strength of 130KPa at 2% strain. The E-module for the samples showed a linear trend. Low E-module for samples with a lot of CKD, and higher for samples with more cement. The use of only CKD proved to not give sufficient strength, although use of 75/25 CKD/Cement can be useful for instances where the requirements for strength is not that high.

Simultaneously several temperature measurements for the different binders were done. These were done to give a better indication of what one could expect the temperature to be in the ground when mixed with clay. The experiments were done in both 20°C and 8°C. At 8 °C the reactions were much slower than at 20°C. With more cement the temperature development went slower. Highest achieved temperature at 103°C was achieved with a mixture of only CKD at 20°C.

It is recommended in the future to do more research with mixture content and different binders, including different cell pressure to get a more accurate result. Additionally, it seen as interesting to look further into the temperature effect during the curing process of the KS-piles.

Keywords – Limecement, Multicem, triaxial shearstrength, temperaturedevelopment

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn	1
1.1.1	Problemstilling	2
1.1.2	Litteratur	2
1.1.3	Målutforming	2
1.1.4	Laboratorieundersøkelser	2
1.2	Begrensninger	3
1.3	Master struktur	3
2	Teori	7
2.1	Grunnstabilisering	7
2.2	Bindemiddel	10
2.2.1	Sement	11
2.2.2	Ulesket kalk/brent kalk	11
2.2.3	Multicem/Cement Kiln Dust	11
2.3	Utslipp fra produksjon	12
2.4	Hydratisering og reaksjon	13
2.4.1	Kjemisk prosess	14
2.4.2	Optimalt bindemiddelandel	16
2.5	Forskjell mellom lab og felt, og oppnådd fasthet	16
2.5.1	Vanninnhold	17
2.5.2	Blandeforhold	17
2.5.3	Temperatur	18
2.5.4	Herdebetingelser	18
2.5.5	Fasthet	18
2.6	Fasthet og materialeegenskaper til Multicem	19
2.6.1	Fasthet	19
2.6.2	E-modul	19
2.7	Enaks vs Treaks	20
2.7.1	Enaks	20
2.7.2	Treaks	21
2.7.3	Oppnådd styrke	22
2.7.4	Feltmålinger	23
2.8	Varmeutvikling	24
2.8.1	Sement	24
2.8.2	Kalk	25
2.8.3	Multicem/CKD	26
2.8.4	Oppsummering	26
2.8.5	Teoretisk varmeutvikling ved adiabatisk forhold	26
2.8.6	Modningstall	28
3	Litteratur	30
3.1	Stabilisering med Multicem	30
3.2	Stabilisering med CKD	32
3.3	Treaksiale skjærttester av grunnstabilisert leire	35
3.3.1	E18 Vestkorridoren, Lysaker - Ramsdalssletta	35

3.4	Temperatureffekt	36
4	Materialer og Metode	39
4.1	Leire	39
4.2	Metode	41
4.2.1	Bindemidler	41
4.3	Prøveplan	42
4.3.1	Variabler	42
4.4	Rutineundersøkelser	43
4.4.1	Vanninnhold	44
4.4.2	Tyngdetetthet	44
4.4.3	Innblanding	44
4.4.4	Utførelse	45
4.5	Treaks	46
4.6	Temperaturutvikling	47
4.7	Behandling av treaksdata	48
4.7.1	Excel	48
5	Resultater	51
5.1	Rutineundersøkelser	51
5.1.1	Vanninnhold	51
5.1.2	Vanninnhold oppsummering	54
5.1.3	Densitet	56
5.2	Treaksialforsøk	60
5.2.1	Prøver testet med 0/100 Sement/CKD	65
5.2.2	Prøver testet med 25/75 Sement/CKD	66
5.2.3	Prøver testet med 50/50 Sement/CKD	67
5.2.4	Bruddform	68
5.2.5	E-modul	68
5.3	Temperaturutvikling	70
5.3.1	Resultat fra romtemperatur ved 20 °C	70
5.3.2	Resultat fra romtemperatur på 8 °C	71
5.3.3	Samlede resultater fra temperaturmålinger	73
6	Diskusjon	74
6.1	Rutineundersøkelser	74
6.1.1	Vanninnhold	74
6.1.2	Densitet	75
6.2	Treaks	77
6.2.1	Skjærfasthet	77
6.2.2	E-modul	78
6.2.3	Forhold mellom CO_2 -utslipp og fasthet	78
6.2.4	Treaks vs enaks	79
6.2.5	Feilkilder treaks	83
6.3	Temperaturutvikling	84
6.3.1	Feilkilder temperaturutvikling	85
7	Konklusjon	86
7.1	Oppsummering	86

8 Forsalg til videre arbeid	87
Referanser	88
Appendiks	90
A Multicem	90
A1 Multicem sikkerhetsblad	90
A2 Sement produktblad CEMI	95
A3 Sement produktblad CEMII	100
A4 Sement produktblad CEMIII	101
B Innblanding av Multicem	103
C Rutineundersøkelser	104
C1 Treacks innblandingsark	104
C2 Vanninnhold	104
C3 Densitet	104
C4 Rutineark for uttagning av prøve	108
D Treacks resultater	112
E Oppsett KS-testforsøk E18 Lysaker-Ramsdalssletta	121
E1 Sement	121
E2 Gjennomføring av testforsøk	121
E3 Rutineundersøkelser på prøvesylindere	124
E4 Nærliggende prøveserie	127
E5 Resultater del A	132
E6 Resultater del B	138
E7 Nærliggende felttester av KS-peler	143

Figurliste

2.1	Visp benyttet under grunnstabilisering	8
2.2	Prinsipp ved insallasjon av kalksemenpeler	9
2.3	Vanlig mønster for pelesetting modifisert fra NGF(Forening, 2012)	9
2.4	Sement prosessutslipp CO2 (2020)	13
2.5	Fordeling av kjemiske stoffer for ulike bindemiddeler Åhnberg, H. (2006)	15
2.6	Forenklet tøynings-spenningskrurve for en kalkpel	20
2.7	Enaksialt trykkapparat (vegvesen, 2014)	21
2.8	Treaksialt trykkapparat (vegvesen, 2014)	22
2.9	$\tau_{max} - \epsilon - plot$ av prøver herdet ved 0 KPa, og testet ved 0, 200 og 400 kPa celletrykk. Røde, blå og grønne linjer viser prøver herdet ved henholdsvis 0, 200 og 400 kPa Ingrid Engeset (2018)	23
2.10	Isotermvarmeutvikling for Portland sement ved $20 \pm C$ Taylor (1997)	24
2.11	Isoterm varmeutvikling for Portland sement ved ulike temperaturer (Jacobsen et al., 2016).	25
2.12	Modningstall med konstant temperaturer, k-verdi satt til 0,5	29
3.1	Skjærfasthet for Kalksement og Multicem 1, 7, og 28 dager herdetid, hvorav eksempelvis MC-90-28 betyr Multicem, $90Kg/m^3$, 28 dager. Sivert Eidsmo (2019)	31
3.2	Fordeling av bindetype, bindemiddelsforhold, og totalt bindemiddelinhold	32
3.3	Kjemisk komposisjon av ulik CKD, Peethamparan et al. (2008)	33
3.4	Enaksial skjærstyrke for Kalonitt innblandet med CKD og CKD alene. Alle prøvene har tilsvarende likt vanninnhold på 31% (Peethamparan et al., 2008)	34
3.5	Temperaturutvikling for CKD og 25% CKD innblandet med kaolonitt. Vanninnhold er 31% (Peethamparan et al., 2008)	34
3.6	Skjærstyrke C_u og E_{50} fra Møllenberg(Trondheim), Klett og Oslo S (Priscilla et al., 2019)	35
3.7	Temperaturutvikling i peler stabilisert med kalk og sement. kalk- sementblandingen bærer et forhold på 25/75. (Åhnberg, H. og Holm, G., 1995)	37
3.8	Skjærfasthet mot modning, alle prøver herdet i 28 dager. (Pernille Wiersholm, 2018)	38
4.1	Egenbygd lab i skribentens kjeller	39
4.2	Kvartalgeologi i området rundt Tiller-Flotten Geotekniske forskningsområdet. Hentet fra NGU (2020)	40
4.3	Gjennomsnittlig herdetemperatur i kjeller	43
4.4	45
4.5	Resultater fra (Ingrid Engeset, 2018) for prøver testet ved 0KPa celletrykk og 200KPa celletrykk. Leire stabilisert med $90Kg/m^3$ Kalksement(50/50)	47
4.6	Temperaturutviklings oppsett	48
4.7	Avlesning av plott ved sprøtt og duktil oppførsel (Ingrid Engeset, 2018).	50
5.1	Vanninnhold for prøve A før og etter innblanding	52
5.2	Vanninnhold for prøve B før og etter innblanding	53
5.3	Vanninnhold for prøve C før og etter innblanding	54
5.4	Oppsummering av vanninnhold før og etter innblanding. Det er beregnet gjennomsnitt av hver prøvevariabel. Det ble ikke utført vanninnhold måling for C3 innblandingen grunnet feil.	55

5.5	Densitet av prøvene A før og etter herding	56
5.6	Densitet av prøvene B før og etter herding	57
5.7	Densitet av prøvene C før og etter herding	58
5.8	Densitet for innblandede prøver før herding inndelt i blandeforhold	59
5.9	Densitet for innblandede prøver før herding delt inn i innblandingsmengde	60
5.10	Resultat fra treaks for prøver med $50Kg/m^3$	61
5.11	Resultat fra treaks for prøver med $75Kg/m^3$	63
5.12	Resultat fra treaks for prøver med $100Kg/m^3$	64
5.13	Sammenligning for blandeforhold 0/100	65
5.14	Sammenligning for blandeforhold 25/75	66
5.15	Sammenligning for blandeforhold 50/50	67
5.16	Bruddform	68
5.17	E-modul mot skjærfasthet inndelt i innblandingsmengde	69
5.18	E-modul mot skjærfasthet inndelt i blandeforhold	70
5.19	Temperaturutvikling ved 20 °C	71
5.20	Temperaturutvikling ved 8 °C.	72
5.21	Samlede resultat temperaturmålinger ved 8, og 20 °C.	73
6.1	Korrelasjon mellom vanninnhold og skjærfasthet	74
6.2	Korrelasjon mellom vanninnhold og skjærfasthet	75
6.3	Korrelasjon mellom vanninnhold og skjærfasthet samlet	75
6.4	Korrelasjon mellom densitet og skjærfasthet	76
6.5	Forholdstall mellom fasthet og CO_2 -utslipp per tonn bindemiddel	79
6.6	Sammenligning av prøve bygd i 2020 mot Sivert's prøve bygd i 2019. . . .	80
6.7	Utklipp fra forsøksrekke utført for Ramsdalsletta-E18 prosjektet	82
6.8	Samlede resultat temperaturmålinger ved 8, og 20 °C.	84

Tabelliste

1.1	Forsøksprogram	3
2.1	Tabell: Forkortelser av relevant oksider	10
2.2	Typiske mengder bindemiddel brukt for ulike jordtyper. Modifisert etter NGF (2011)	10
2.3	Beskrivelse av de ulike bindemiddeleenes reaksjon og oppførsel. Modifisert etter NGF (2011)	10
2.4	Sammenligning av CKD fra Brevik og Kjøpsvik, modifisert tabell Sivert Eidsmo (2019). Tall oppgitt i (%)	12
2.5	Styrketak avhengig av pelekombinasjoner Vegdirektoratet (2014)	19
2.6	Varmeutvikling og temperaturøkning	26
4.1	Tabell: Parametere for leire på Tiller-Flotten området 10-14 m under bakken	40
4.2	Egenskapert til sement benyttet	41
4.3	Utslipp for Multicem og CKD	41
4.4	Prøvesamling for treaksial forsøk våren 2020. 2 prøver per variasjon, tilsvarer 18 prøver totalt	42
4.5	Prøveplan templogging	48
5.1	Prøvesamling for treaksial forsøk våren 2020. 2 prøver per variasjon, tilsvarer 18 prøver totalt	51
5.2	Vanninnhold i utgangsmateriale og innblandet materialet før og etter treaksialforsøk	51
5.3	Vanninnhold i utgangsmateriale og innblandet materialet før og etter treaksialforsøk	52
5.4	Vanninnhold i utgangsmateriale og innblandet materialet før og etter treaksialforsøk	53
5.5	Densitet av innblandet materiale	56
5.6	Densitet av innblandet materiale	57
5.7	Densitet av innblandet materiale	58
5.8	Styrkeresultat fra treaksialforsøk A	61
5.9	Styrkeresultat fra treaksialforsøk ved 2, 5 og 10% tøyning for prøver med $50Kg/m^3$	61
5.10	Styrkeresultat fra treaksialforsøk B	62
5.11	Styrkeresultat fra treaksialforsøk ved 2, 5 og 10% tøyning for prøver med $75Kg/m^3$	62
5.12	Styrkeresultat fra treaksialforsøk C	63
5.13	Styrkeresultat fra treaksialforsøk ved 2, 5 og 10% tøyning for prøver med $100Kg/m^3$	64
5.14	Resultater fra temperaturmålinger ved 20 °C. Blandeforhold CKD/Sement	71
5.15	Resultater fra temperaturmålinger ved 8 °C. Blandeforhold CKD/Sement	71

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Temaet for denne masteroppgaven kommer fra et forslag fra NTNU/Multiconsult. Forslaget omhandler fasthets- og deformasjonsegenskaper til leire stabilisert med Multicem. Kalksementstabilisering har blitt benyttet i Norge siden 1970-tallet, og per dags dato ser vi en økende utvikling i bruk av Multicem. Bruk av Multicem anses som en mer miljøvennlig måte å stabilisere jorden på. Dette er på grunn av at biproduktet CKD ved sementproduksjon benyttes. Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i Pernille Wiersholm's (Pernille Wiersholm, 2018), Sivert Eidsmo (Sivert Eidsmo, 2019) og Ingrid Engeseth's (Ingrid Engeset, 2018) masteroppgave, og tidligere samlede resultater fra Priscilla et al. (2019)

Resultatene fra blant annet Ingrid Engeset (2018), Mike Long (2019) og Priscilla et al. (2019), viser til at treaksiale resultater viser en høyere styrke for de innblandede prøvene, enn det ved enaksial trykktest. Økt skjærstyrke ved lengre dybde, eller omringende spenninger har vanligvis ikke blitt brukt i norsk design praksis (Priscilla et al., 2019). Bedre kunnskap kan potensielt bety besparelse av kostnader og utslipp av CO_2 . Engeseth utforsket blant annet herdespenningens påvirkning for styrken på prøvene. Hennes prøver ble testet med et treaksialt apparat. Dette var gjort for prøver innblandet med kalksement. I senere tid har Multicem blitt mer benyttet, men få treaksiale tester har blitt utført med det.

Samtidig finnes det lite data på selve effekten av CKD-produktet alene sammen leire. En bedre kunnskap om dette kan bidra til at CO_2 utslippet reduserer i Norge, og vil hjelpe Norge videre til å nå klimamålene framover. Som følge av dette ønskes det å belyse, og teste ulike blandeforhold og innblandingsmengder med CKD og sement. Se problemstilling

1.1.1

1.1.1 Problemstilling

- Hva er skjærstyrken til Multicem og CKD ved treaksial skjærttest
- Er målt styrke høyere enn ved enaksial skjærttest?
- Hvilket blandeforhold gir tilstrekkelig styrke?
- Hva er et blandingsforhold som gir tilstrekkelig styrke, samtidig som CO_2 utslippet er lavest.
- Hva kan gjøres videre?

1.1.2 Litteratur

Litteratur benyttet er blant annet rapporter fra Svensk Djupestabilisering, Doktoravhandling fra universitetet i Luleå, tidligere Masteroppgaver av både Pernille Wiersholm, Ingrid Engeseth og Sivert Eidsmo, interne rapportert fra Geovita og Statens Vegvesen, Betongteknologikompendiet, Vegvesenets håndbok V221 og R210.

1.1.3 Målutforming

Hovedmålet med dette prosjektet er

- Presentere relevant teoretisk litteratur om den mekaniske effekten av kalksementpeler(KS-peler).
- Presentere relevant teoretisk litteratur om miljøpåvirkningen til Multicem.
- Presentere relevant litteratur av treaksiale forsøk med Multicem
- Utføre treaksiale tester med Multicem og CKD.
- Analysere resultater fra lab og sammenlikne med tidligere resultater.
- Diskutere resultatene, og presentere forslag til videre arbeid.

1.1.4 Laboratorieundersøkelser

Under denne masteroppgaven ble det gjennomført et forsøksprogram over 8 uker under vårsemesteret 2020. Prøvene ment for innblanding ble uthentet i uke 6 2020. Under uke

13-16 ble samtlige prøver blandet ut med CKD og Multicem tilsendt fra Norcem. Prøvene herdet ved lik temperatur og trykk for å ha større sammenlignbarhet med tidligere prøver. De treksiale forsøkene ble utført i uke 18-19 ved celletrykk tilsvarende leirens insitu historie. Innblandingen tok plass hos skribentens kjeller grunnet midlertidig nedstengelsen av NTNU-campus pga Covid-19. De treksiale testene ble utført på NTNU etter at NTNU åpnet dørene igjen 27. April for studenter med særegent behov for lab. Pga tidsbegrensning og behov for å fullføre masteren varierte herdeperioden for prøvene med 30-32 dager.

Type forsøk	Uke-	Uke
Vanninnhold	13	16
Tyngdetetthet	13	16
Treksialforsøk	18	19
Temperaturlogging	13	16

Tabell 1.1: Forsøksprogram

1.2 Begrensninger

Treksial test er en tidkrevende prosess. På grunn av manglende tilgang til fasiliteter og materiale har derfor ulike variabler blitt redusert. Flere blandingsforhold kunne blitt testet, men det hadde vært på bekostning av nøyaktighet.

På grunn av Covid-19 har forsøkene ikke blitt gjennomført under optimale forhold. Under denne masteren ble den geotekniske laben stengt. Det ble derfor nødvendig å utføre deler av labarbeidet andre steder. Ved hjelp av veileder og labpersonell ble det mulig å flytte en del av utstyret til skribentens kjeller. Resultatet av dette ble færre forsøk, og mer unøyaktighet. Det ble i tillegg ikke utført like omfattende rutineundersøkelser som ønsket. Dette bør tas hensyn til under gjennomgangen av denne masteren.

For videre beskrivelse av lab, se kapittel 4.

1.3 Master struktur

Masteren er delt i to med to ulike forsøksmetoder, treksial forsøk og temperatureffekt. Primært settes fokuset på treksial forsøk. Resultatene fra templogging begynte først som et sideprosjekt mens skribenten ventet på forsyning av fersk CKD og Sement. Det er valgt å inkludere dette i masteren fordi temperatureffekten for KS-peler betraktes som

veldig relevant i dette fagfeltet. Desverre ble det ikke mulige å gjennomføre omfattende undersøkelser. Problemstillingen regnes som høyst relevant for videre arbeid innen grunnstabilisering og geoteknikk.

Under stenging av lab fikk skribenten mulighet til å sette opp egen temperaturmålingsutstyr hjemme i kjelleren. Dermed var det mulig å utføre tester parrallelt med det andre arbeidet.

Masteren er først delt inn i innledende teori og litteratur. Dette omhandler begge temaene og ses på som forstudie før forsøkene begynte. Deretter kommer metode, resultater etterfulgt av diskusjon og konklusjon. Til slutt kommer et avsnitt av anbefalinger til videre masterarbeid.

Skribenten kommer til å være imøtekommende og engasjert skulle noe ønske å jobbe videre med tilsvarende oppgave.

Symbolliste

Norsk

a	attraksjon
A_{korr}	korrigert areal
A_{prve}	areal prøve
c'	kohesjon
E	elastisitet modul
E_{50}	elastisitet modul ved 50 % av skjærstyrken
$E_{\epsilon=0,5\%}$	elastisitet modul ved 0,5 % tøyning
g	gravitasjonskraft
h	høyde
I_p	flyteindeks
K_0	hviletrykkskoeffisient
K'_0	effektiv hviletrykkskoeffisient
m	masse
m_s	masse av faststoff
N	Newton
O	oppdrift
Pa	pascal
q	jevnt fordelt last
S_f	stigningstall for bruddlinje i NTH-plott
S_t	sensitivitet
S_u	maks skjærfasthet
$S_{u,r}$	omrørt skjærfasthet
u	poretrykk
V	volum
W	våtvekt
w	vanninnhold
z	dybde
Δz	endring i dybde

Gresk

α	vinkel
ϵ	tøyning
ϵ_f	tøyning ved brudd
γ	tyngdetetthet
γ_s	tyngdetetthet ved faststoff
γ_w	tyngdetetthet av vann
ρ	densitet
ρ_s	densitet fast stoff
σ, σ'	total og effektiv normalspenning
σ'_1	max effektiv spenning
σ'_3	min effektiv spenning
τ	skjærfasthet
τ_f	skjærfasthet ved brudd
τ_{max}	maks skjærfasthet
ϕ	friksjonsvinkel

Forkortelser

NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
KS	Kalksement
CKD	cement Kiln Dust
CAD	konsolidert anisotropt drenert forsøkt
CID	konsolidert isotropt drenert forsøkt
NGI	Norges geotekniske institutt
NGU	Norges geologiske undersøkelse
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat

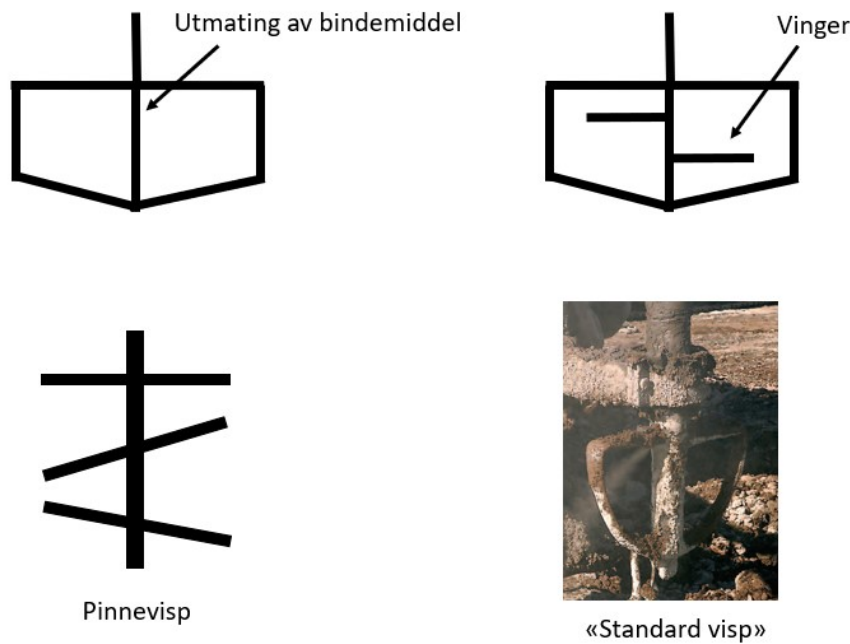
2 Teori

Dette kapitlet vil gi en innledende forståelse av historien og utførelsen av kalksementstabilisering. Videre gis det bakgrunn for hvordan en oppnår høyere styrke i jorden ved bruk av denne metoden. Dette blir så etterfulgt av en beskrivelse av de ulike bindemiddeleenes reaksjoner og fasthetsutvikling. Det er valgt å sette fokus på miljøaspektet med grunnstabilisering, og hvordan økt bruk av Multicem gir redusert klimautslipp. Avsluttende presenteres effekten av temperaturøkning for fasthet og varmeutvikling de ulike bindemiddeleene.

2.1 Grunnstabilisering

Grunnstabilisering/kalksementstabilisering eller Kalksementpeling(KS-peling) er en grunnforsterkelsesmetode som benyttes for å oppnå et materiale som egnes bedre til bebyggelse eller bruk. Det er lurt å være klar over at kalksementpeler ikke kun er peler bestående av kalk og sement. Det er en felles betydning av søyler av styrket jord i forhold til omkringliggende masse(Vegdirektoratet, 2014).

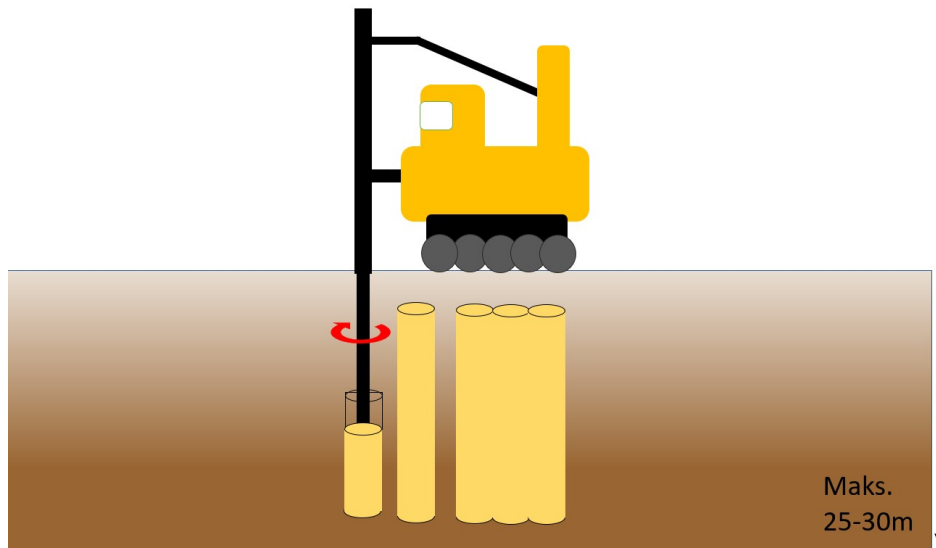
Styrken økes ved å blande inn et bindemiddel som øker både fastheten og stivheten i materialet. KS-stabilisering benyttes oftest i middels fast til bløt/kvikk leire, og har størst effekt for leire med en S_u lavere enn 30 kPa (Forening, 2012). KS-pelene blir lagd ved å plassere en rigg med en stor visp på tuppen som trykker ned og roterer mot jorden til en ønskelig dybde. Deretter blander en inn bindemiddelet under opptrekkingen av vispen, se figur 2.1. Metoden kan benyttes for dybder inntill 25-30 meter. Metoden har vært benyttet i over 50 år, og er mye brukt i Sverige.



Figur 2.1: Visp benyttet under grunnstabilisering

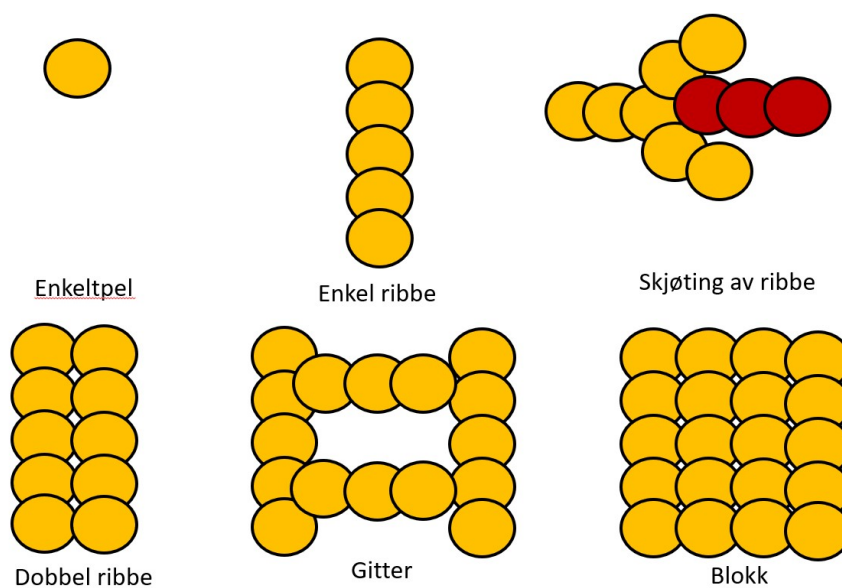
Bindemiddelet reagerer med det homogeniserte og vispete materialet, og øker skjærfastheten og stivheten. Det er blant annet viktig å vispe godt nok. En mer homogenisert prøve vil gi et bedre innblandet materialet og dermed et sterkere materiale (Vegdirektoratet, 2014). Dette er også grunnen til at KS-stabilisering fungerer best med bløt og kvikk leire med høy sensitivitet. Denne formen for leire er som regel helt flytende ved nok forstyrrelse, resulterende i et veldig lett innblandingsmateriale. Størrelsen på vispen avhenger av ønske og nytte, men ofte varierer vispens diameter mellom 0,5 m og 1 m. Oftest brukes ribbene til å stabilisere skråninger, utgravinger, stive av bygge- og spuntgroper, og redusere setninger under fyllinger.

Før det velges å benytte seg av KS-peler er det viktig å forsikre seg om at en har tilstrekkelig tid til å utføre nødvendig lab-analyse, og at det er nok tid til at pelene får herdet til en tilstrekkelig ønsket styrke før pålasting. Før installering i skråninger bør det vurderes om at installasjonsfasen ikke fører til ustabilitet og risiko for brudd.



Figur 2.2: Prinsipp ved insallasjon av kalksemenpeler

De vanligste bindemiddelen som brukes per dags dato innen dypstabilisering er kalk, sement og CKD (Cement Kiln Dust). Anbefalte mengde av bindemiddelet er varierende, men oftest for leire som regnes som mest aktuelle i Norge anbefales $80 - 110 \text{ kg/m}^3$ blandemiddel. For kritiske prosjekter med kritisk kvikk eller bløt leire anbefales det å gjennomføre tester fra området (Forening, 2012). Optimalisering av mengdeinnhold medvirker også til reduserte kostnader. Slik figur 2.3 viser er det ulike metoder å sett opp et ribbesystem. NGF sin veiledning for grunnforsterkelser samt vegvesenets håndbok V210 gir utdypende forklaring på anbefalt senteravstand mellom ribbene.



Figur 2.3: Vanlig mønster for pelesetting modifisert fra NGF (Forening, 2012)

2.2 Bindemiddel

For å oppnå de ønskede mekaniske egenskapene i den stabiliserte massen benyttes flere ulike typer materialer og kombinasjoner. I tillegg til de mekaniske egenskaper bør pris og klimatas hensyn til. Notasjon of kjemiske beskrivelser som benyttes er hentet fra kompendiet fra emnet TKT 5215 Betongteknologi (Jacobsen, 2016). Forkortelser av relevante oksider er gjengitt i 2.6. Videre er vanlige bindemiddelmengder for ulike typer leirer oppgitt i tabell 2.2, samt bindemiddelets reaksjon i jorden 2.3

Navn	Kjemisk betegnelse	Forkortelse
Kalsiumoksid	CaO	C
Silisiumdioksid	SiO_2	S
Aluminiumoksid	Al_2O_3	A
Jernoksid	Fe_2O_3	F
Vann	H_2O	H

Tabell 2.1: Tabell: Forkortelser av relevant oksider

Type jord	Bindemiddel	Mengde (kg/m^3)
Leire plastisk	Sement/Multicem	90-120
	Sement/Kalk	90-120
Siltig Leire	Sement/Multicem	75-110
	Sement/Kalk	75-110
Sensitiv Leire	Sement/Multicem	80-110
	Sement/Kalk	80-110

Tabell 2.2: Typiske mengder bindemiddel brukt for ulike jordtyper. Modifisert etter NGF (2011)

Bindemiddel	Reaksjon	Nødvendig for reaksjon	Fasthetsutvikling
Sement	Hydratisering	Vann	Timer - dager
Multicem	Hydratisering og pozzolan	Vann + pozzolan jord eller pozzolan tilsats	Dager - måneder
Brent kalk	Pozzolan	Vann + pozzolan jord eller pozzolan tilsats	Dager - måneder

Tabell 2.3: Beskrivelse av de ulike bindemiddeleenes reaksjon og oppførsel. Modifisert etter NGF (2011)

2.2.1 Sement

Sementen som benyttes er vanligvis ordinær industrisement. Dette er den vanligste benyttede sementtypen for stabilisering av leire (Forening, 2012). Industrisement er en hurtig-herdende portlandsement som gir høy varmeutvikling og rask styrkeutvikling. Den raske styrkeutviklingen gjør sementen godt egnet til grunnstabilisering (Jacobsen, 2016).

Hovedbestanddelen i industrisement er kalkstein. Sement blir dannet ved en brenning- og oppmalingsprosess hvor kalkstein er hovedråvaren. Sementen består av ulike klinkermaterialer som C_3S , C_2S , og C_3A som i forskjellig grad bidrar til fasthetsutvikling og temperaturutvikling (Jacobsen, 2016). Ved mer finmalt sement, forventes en hurtigere styrkeutvikling og fasthet. Derimot kan det stabiliserte materialet bli sprøere enn ved bruk av vanlig portlandsement.

2.2.2 Ulesket kalk/brent kalk

Ulesket kalk (CaO) fremstilles ved at kalkstein med høyt innhold av kalsiumkarbonat varmes til mellom 900-1300°C. Etter forbrenningen deles og kvernes kalken tilpasset til dens bruk. For eksempel til jordstabilisering, bruk i stålindustri eller fremstilling av hydratkalk. Ved lesking/hydrering (reaksjon med vann) dannes hydratkalk. Med tilgang på luft reagerer CO_2 med det leskede kalken. Denne prosessen betegnes som karbonatisering. For brent kalk til grunnstabilisering stilles det ofte krav til aktivitet C-innhold, finmalingsgrad/kornstørrelse og flytbarhet (Forening, 2012). Finmalt reagerer raskere enn grovkornet kalk. Dermed er det nyttig å vite finhetsgraden av produktet en benytter seg av.

2.2.3 Multicem/Cement Kiln Dust

Multicem er et produkt produsert av Norcem og er en blanding av industrisement og bypasstøv eller CKD. CKD skilles ut ved sementproduksjon, og er betraktet som et biprodukt. Støvet blir ikke benyttet i vanlig betongkonstruksjoner fordi det inneholder komponenter som kalk og salter. Disse stoffene kan blant annet medføre til korrosjon i betongkonstruksjoner med armering. Derimot kan disse produktene bidra til fasthetsøkning i jorda. CKD består av reaktive kjemiske stoffer som binder seg i kontakt med vann, i hovedsak brent kalk. Produktet inneholder mer kalk enn vanlig sement, men mindre andel brent kalk (Forening, 2012). CKD har lavere andel C og S enn vanlig portlandsement.

Dette gir mindre C-S-H-gel under hydratiseringen. Resultatet av dette er lavere fasthet. Norcems anlegg ved Brevik produserer omtrent 16000 tonn CKD hvert år(nor, 2019). I motsetning til sement settes det ingen formelle krav til innhold eller egenskaper til CKD.

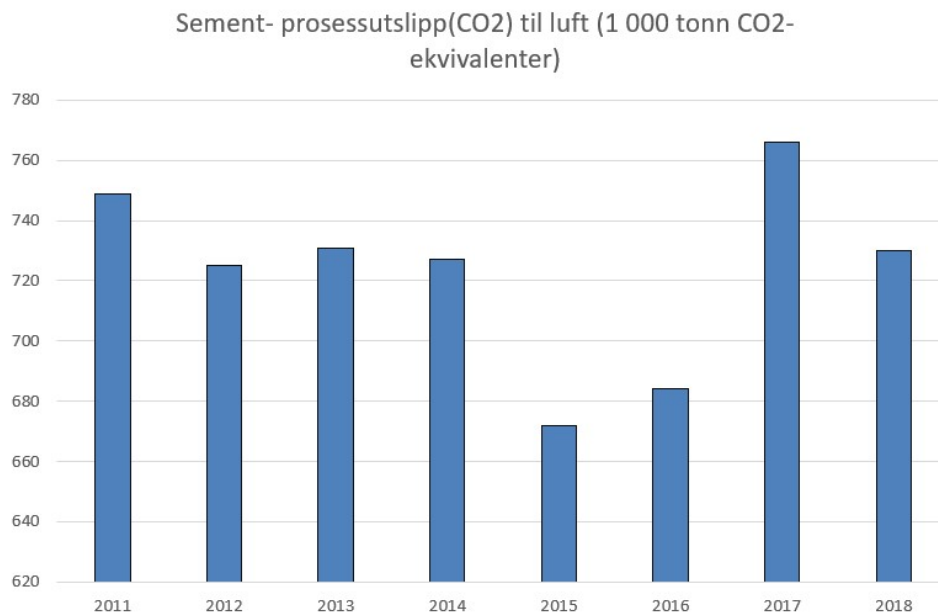
Norcem leverer vanligvis tre forskjellige blandinger med henholdvis 25,50 og 75% andel CKD og CEMI, se vedlegg A1. I tillegg til Multicems lignende egenskaper til kalk/ement er CO_2 avtrykket langt lavere og billigere. Blant annet fordi en benytter et biprodukt framfor å kaste det. Dermed kan en redusere i teorien utslippet med like mange prosent CKD andel benyttet. Multicem brukt til stabilisering av løsmasser har i følge produsenten redusert utslipp av CO_2 med 120 000 tonn siden 2006(Eriksson, S.Norcem, 2018) Figur 2.4 viser den store variasjonen av sammensetninger som kommer fra ulike anlegg. Derfor er det også vanskelig å standardisere materialet. Variasjonene kommer av ulike variasjoner som forbrenningsmaterialet, temperatur og råvaremateriale som har blitt benyttet.

Mineral	Brevik 1	Brevik 2	Brevik 3	Kjøpsvik 1	Kjøpsvik 2
CaO	55,6	56,0	56,4	58,8	60
Fri CaO	32,3	-	31,2	31,9	-
SiO ₂	16,8	16	14,6	14,1	12,0
Al ₂ O ₃	3,9	3,5	3,6	3,8	3,2
Fe ₂ O ₃	2,7	2,5	2,2	2,0	1,4
MgO	1,9	1,9	1,8	1,4	1,3
So ₃	4,8	5,0	4,4	11,6	11,0
K ₂ O	4,8	7,0	7,5	2,6	4,0
Na ₂ O	0,8	1,1	1,0	0,6	0,9
Cl	3,2	5,4	5,1	0,7	2,0

Tabell 2.4: Sammenligning av CKD fra Brevik og Kjøpsvik, modifisert tabell Sivert Eidsmo (2019). Tall oppgitt i (%)

2.3 Utslipp fra produksjon

Produksjon av sement og kalk er forbundet med svært store CO_2 -utslipp. Uten tiltak slippes ut ca 1.tonn CO_2 per tonn produsert sementklinker. Ca 60% skyldes utskilling av CO_2 ved kalsinering og 40% kommer fra forbrenning og finmaling. I 2017 var utslippet fra fabrikk i Brevik 776 kg CO_2 per tonn sementklinker(nor, 2019). Figur 2.4 viser til totalt utslipp i Norge de siste årene.



Figur 2.4: Sement prosessutslipp CO₂ (2020)

Fra 2011 ser en gradvis nedgang i utslipp fram til 2016. Dette kommer blant annet bruk av mer substituttmateriale innblandet med sementen(Per Jahren, 2008). Samtidig stiller Norge strengere krav til utslipp som næringen har måttet ta hensyn til. I fremtiden har regjeringen planlagt store samferdselsprosjekter og det er ikke utelukket at sementproduksjonen kommer til å økes, slik sett fra 2017 og 2018.

Fra et geoteknisk standpunkt utgjør bruken av grunnstabilisering en stor del av utslippet. CKD er et biprodukt av denne produksjon og betraktes i Norge som utslippsfrist. Sverige tar i motsetning til Norge hensyn til deler av utslippet fra CKD. Sementselskapet Cementa i Sverige har fått utarbeidet en egen EPD(Environmental Production Decleration). Her beskrives miljøpåvirkningen knyttet til produksjonen av bindemiddelet(Cem, 2020). Tidligere studier fra Sverige viser til at benyttelse av Multicem genererer ca 65% mindre CO₂ enn tradisjonelle KS-peler Mark Lundström (2019). I dette studiet ble i tillegg transport og arbeid tatt med i betraktning.

2.4 Hydratisering og reaksjon

Bindemiddelets virkemåte kan være komplisert i mange tilfeller, med utallige variasjoner som påvirker oppførselen til materialet. De kjemiske reaksjonene for ulike typer sement er blant annet beskrevet og diskutert i flere artikler, og tekstbøker(Taylor, 1997)(Boynton,

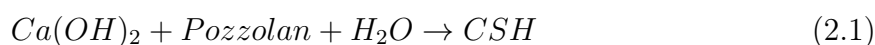
R.S, 1980). De fleste bøkene beskriver reaksjonene for kalk og sement, og ikke nødvendigvis Multicem eller CKD. En generell forståelse er at reaksjonene varierer med intensitet og lengde, men viser mye av de samme utviklingsprosessene(Åhnberg, H., 2006).

2.4.1 Kjemisk prosess

Når bindemiddelene reagerer med leiren, tar hydratasjonen plass, men ulike typer som “slag” kan trenge en aktivator fra et annet bindemiddel til å starte prosessen. Hydratisering er det som skjer når salter løses i vann og blir omgitt av vannmolekyler(Hyd, 2020). Initielt avhengig av bindemiddelet oppstår det først en reaksjon mellom vann(H_2O), Kalsium(Ca) og oksygen(O) når dette blandes inn med vann/leire. Reaksjonen er rask og det dannes $Ca(OH)_2$ under høy varmeutvikling. Reaksjonen bidrar først og fremst til at leiren blir tørr og fast på grunn av at leiren bindes opp. Fasthetsøkning kommer frem senere. Varmen fra reaksjonen hurtiggjør sementreaksjonene og pozzolanreaksjonene($Ca(OH)_2$ og H_2O som reagerer med hverandre).

Mengden med resterende fri $Ca(OH)_2$ etter den initielle fasen står fri til å reagere med S og A som befinner seg i jorda. Denne reaksjonen er betegnet pozzolanreaksjon(Jacobsen, 2016). Pozzolanreaksjon er den kjemiske reaksjonen i sement når en legger til pozolant materiale. Pozzolan er en bred beskrivelse av materiale som inneholder silisium- og aluminiumoksid. Materialet i seg selv har ikke bindende egenskaper, men i nærvær med fuktighet og vann dannes kalsium-alumina-silisium-hydroksid(CASH), eller kalsium-alumina-hydroksid(CSH) som har bindende egenskaper.

I leire og silt finnes det naturlig tilgang på Ca- og Na-ioner med positiv ladning(Janz, M. and Johansson, S.E., 2002). Etersom tiden går, oppstår det reaksjoner med ionebytte med de positive ionene som fører til fnokkulering(Janz, M. and Johansson, S.E., 2002). Disse reaksjonene kan foregå i flere måneder, men den hurtige fasthetsøkningen foregår først i starten for å så avta.

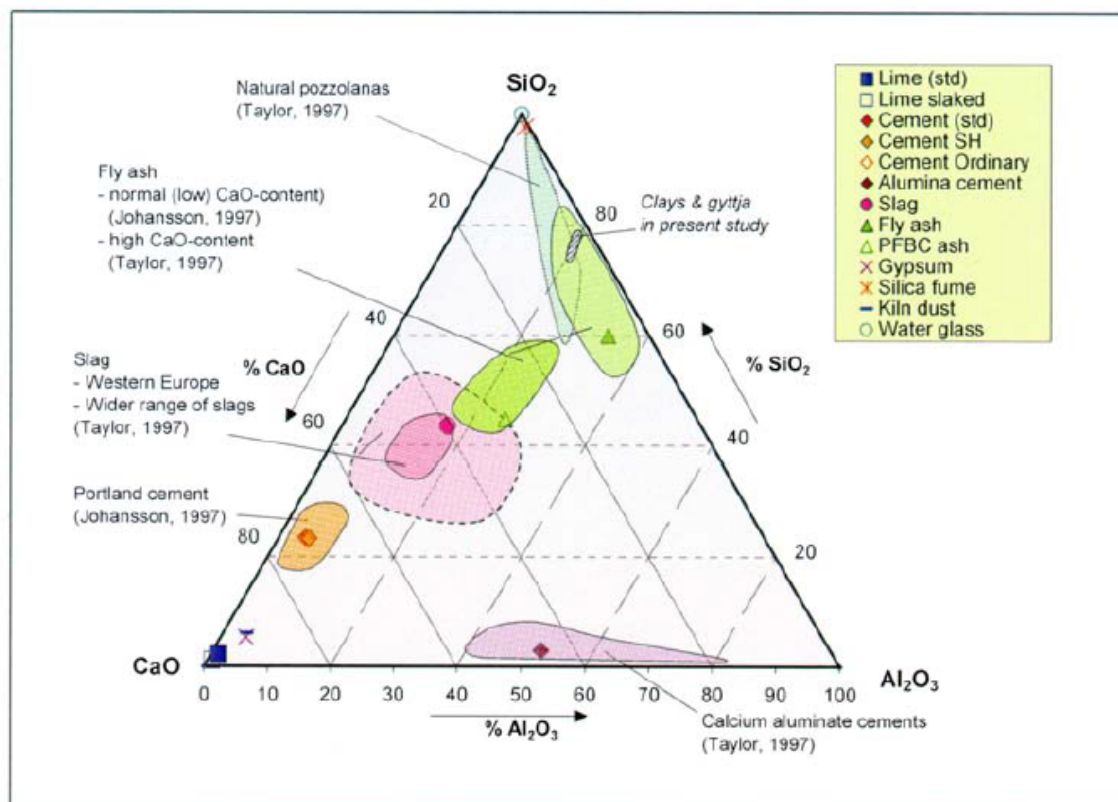


CKD oppfører seg som et pozzolan materiale. Det reagerer med kalsium hydroksid tilføyd eller generert av hydratiseringen.

Reaksjonene er avhengig av innholdet av CKD, og hva jorden består av. CKD med høy andel av C har stort potensiale for å reagere med blandet leire. Pozzolanske reaksjoner med jord er vanligvis relativt lav, pga restriktiv tilgang til S og A i jorden. CKD inneholder nesten eksklusivt C. Hvis jorden/leiren inneholder mye aluminium vil reaksjonen gå videre til å danne kalsium aluminium silisium hydrat. Dette er en sementerende komponent lik betong.

Tidligere studier Peethamparan et al. (2008) viser til at ved økt andel fri kalk C i CKD oppnår en større skjærstyrke. Dette kan være fordi en oppnår større andel etringitt og sekundær C-S-H-gel under hydratiseringen. CKD og kalk har et høyt potensial til å produsere stor mengde reaksjonsprodukt mikset med jord. I CKD er silisium og alumina lettere tilgjengelig for reaksjon med bindere som inneholder kalsium-hydroksid. Reaksjonene som former CSH under hydratisering av sement involverer mineraler i som eksisterer i bindemiddelet selv. Derfor som en regel hurtigere pozzolanreaksjon.

Nedefor i figur 2.5 er det vedlagt oversikt av bestandandelen for ulike typer reaktive bindemidler som kan, og har blitt benyttet til grunnstabilisering.



Figur 2.5: Fordeling av kjemiske stoffer for ulike bindemidler Åhnberg, H. (2006)

2.4.2 Optimalt bindemiddelandel

Den kjemiske komposisjonen har betraktelig virkning på reaktiviteten av bindemiddelet. Det er dermed blitt definert et hydratiseringsnummer, beskrevet i ligning 2.2 som forholdet mellom mengeden CaO i prosent og summen av SiO_2 , Al_2O_3 , og Fe_2O_3 beskrevet med prosent (Kamon, M. and Nontananandh, S, 1991).

$$HM = \frac{(CaO)\%}{(SiO_2)\% + (Al_2O_3)\% + (Fe_2O_3)\%} \quad (2.2)$$

Kamon og Nontananandh(1991) forslår at for ulike biprodukter av materialer bør HM-tallet være over 1,7 for at reaksjonen skal ta plass. Jo høyere C/S forhold, desto raskere reaksjonsevne.

En grov beregning for CKD fra Brevik 12.4 som er benyttet i prosjektet gir

$$HM = \frac{55,6\%}{16,8\% + 3,9\% + 2,7\%} = 2,37 > 1,7 \quad (2.3)$$

Dette ligger godt over 1,7 og dermed er det rimelig å forvente at reaksjonene skal ta plass. Lignende beregning ble gjort for Multicem med antatt kjemisk komposisjon i sementen. En oppnår fullstendig reaksjon ved alle tilfellene tiltenkt ved utblanding (50/50 og 75/25 blandingsforhold av CKD og Sement).

2.5 Forskjell mellom lab og felt, og oppnådd fasthet

Fra tidligere undersøkelser vet vi at det er flere forskjellige faktorer som påvirker styrken på materialet. Dette er blant annet:

- Vanninnhold
- Blandeforhold
- Temperatur
- Herdebetingelser

2.5.1 Vanninnhold

Åhnberg, H. (2006) viser til at vanninnhold er av betydning for styrken. Leire med høyt vanninnhold vil vanligvis oppnå en lavere fasthet enn leire med lavere vanninnhold. Det skjer blant annet fordi ved lavere vanninnhold er avstanden mellom kornene fra bindemiddelet mindre og vi får dermed flere bindinger. En kan dermed også argumentere at ved større trykk under herdingen vil gi flere bindinger og sterkere materialet. Dette ble tatt opp videre under masteren til Ingrid Engeseth (Ingrid Engeset, 2018), men effekten av trykket påført gir lite utslag for styrken til materialet. Et for lavt vanninnhold vil i imidlertid føre til lave styrke fordi det ikke er tilstrekkelig med vann slik at vi ikke får en fullstendig reaksjon. En kan ofte være nødt til å tilpasse mengde bindemiddel iforhold til vanninnholdet i jorda. Eventuet kan en tilsette vann med bindemiddelet.

NGF veiledning anbefaler å ha spesielt fokus på innblandingsarbeidet når vanninnholdet er lavt (ca under 30%), lav sensitivitet og høy fasthet (Forening, 2012).

Samlede resultater fra Priscilla et al. (2019) tilsier derimot at optimalt vanninnhold ligger ved 25-30%. Fra 35% og oppover fremstår skjærstyrken som svakere.

I lab oppnår en ikke den samme effekten som insitu fordi prøvene vil ikke ha konstant vanntrykk og vanntilførsel rundt seg. En oppnår dermed ikke like høy metningsgrad. En måte å få høyere metningsgrad er å utføre udrenerte triaksiale forsøk med høy baktrykk under konsolideringen. Ulik baktrykk har innvirkning på resultatene til prøvene (Åhnberg, H., 2006)

2.5.2 Blandeforhold

En markant forskjell er utstyr benyttet. I felt benyttes en visp med opptil 6 pinner. Dette gir god innblanding av bindemiddelet. I lab benyttes en standard kenwood-maskin med k-visp. Maskinen kjøres i flere runder. Dette kan bety en mindre god innblandet leire. Derimot er du mer kontroll under innblanding, fordi du kan blant annet observere innblandingen i motsetning på anlegg under bakken.

2.5.3 Temperatur

Under innblanding genereres det stor varmeutvikling og temperaturøkning. Pernille Wiersholm tok for seg ulike herdetemperaturer og dets utslag (Pernille Wiersholm, 2018). Dette gav positiv effekt på styrken, og derfor utgjør også herdetemperaturen en viktig faktor under utførelse og hvordan styrken i materialet oppnås. Resultatene viste at temperaturen fra de initielle reaksjonene holdt seg stabil i flere måneder med en gjennomsnittlig temperatur opptil 8 °C høyere enn hva som lå i bakken før innblanding. I lab oppnår en ikke den samme effekten fordi herdetemperaturen er konstant. Videre avtar temperaturen mye raskere i lab fordi prøvene blir utsatt mer for omgivelsene. En høyere initiell og påliggende temperatur i felt framfor lab, medfører at labforsøkene tar lengre tid å herde og oppnår en lavere fasthet. Se kapittel 2.8 for mer utdypende forklaring av temperaturutviklingen i forbindelse med grunnstabilisering.

2.5.4 Herdebetingelser

I felt komprimeres prøvene momentant av vertikal- og horisontalspenninger under innblanding. I et laboratorium må prøven blandes inn og deretter stemples inn i en sylinder. Pga bindemiddelets raske reaksjon blir prøven mindre komprimerbar, mer porøs og dermed vanskeligere å presse sammen. En oppnår dermed ikke en tilsvarende høy densitet i lab i forhold til felt (Ingrid Engeset, 2018). Samtidig herdes ikke prøvene i lab under samme spenninger som i felt.

2.5.5 Fasthet

Erfaring viser til at det er betydelige forskjeller mellom insitu styrke og styrke i lab. Sammenhengen er lite dokumentert for norske leirer, men erfaring viser at oppnådd fasthet i felt er høyere. Ofte fremkommer styrken målte med apparater på felt opptill 4-5 ganger så høy som det målt i lab (Åhnberg, H., 2006). Alle punktene nevnt ovenfor er med på å påvirke at styrken i felt er høyere enn i lab. Lab er ofte bedre til å finne ut av optimale blandeforhold og innblandingsmengder, men reel styrke er bedre å måle i felt.

2.6 Fasthet og materialegenskaper til Multicem

2.6.1 Fasthet

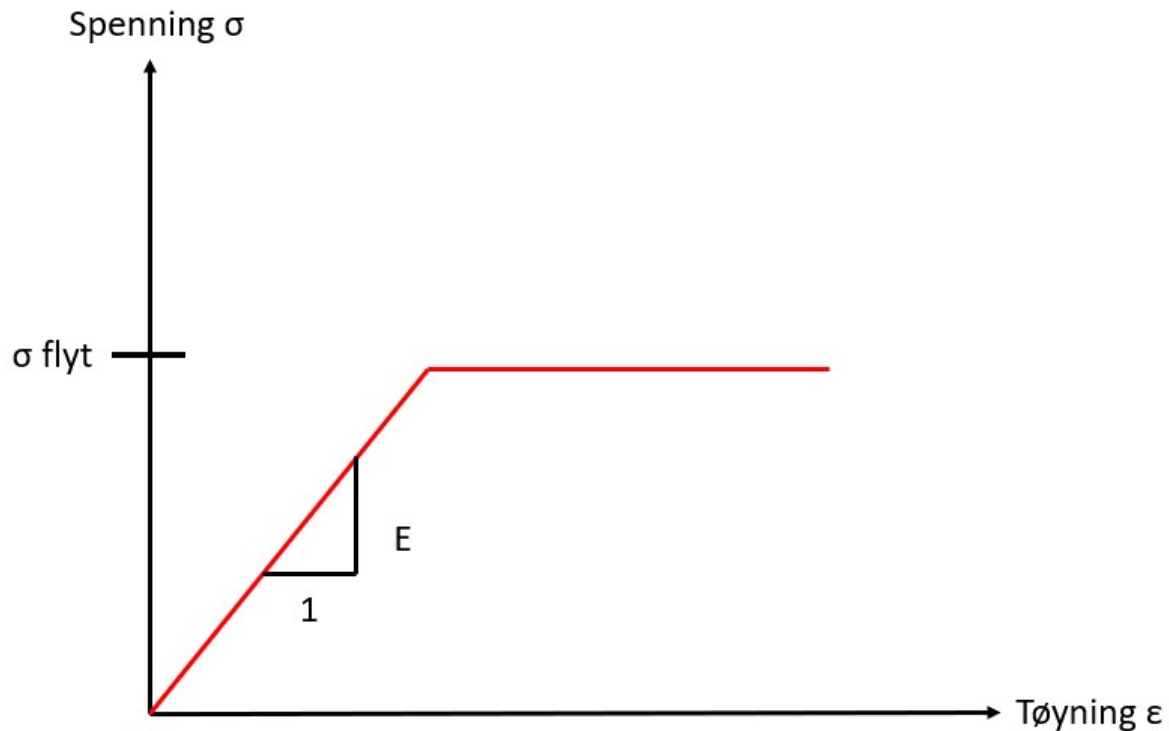
Det meste av fasthetsøkningen oppstår de første ukene etter innblanding (Åhnberg, H., 2006). Ønsket fasthet ligger mellom 150-300Kpa, men er avhengig av hva for en problemstilling en har. For prosjekter i regi av Statens Vegvesen benyttes styrketak for skjærfast vist i tabell 2.5. Dette må vurderes fra prosjekt til prosjekt og eventuelt reduseres hvis lab-tester visere lavere verdier.

Pelekombinasjoner	Styrketak for skjærfasthet τ_p KPa
Enkeltpel	100
Enkel ribbe	150
Dobbel ribbe	175
Gitter enkle/doble ribber	150/175
Blokk	200

Tabell 2.5: Styrketak avhengig av pelekombinasjoner Vegdirektoratet (2014)

2.6.2 E-modul

Etter en innblanding av bindemiddel øker stivhet i materialet tydelig. Spenning-tøyningskurven antas å være lineær opptil et nivå for pelens flytespenning, se figur 2.6. E-modulen er kurvens stigningstall i det lineære området. Det antas at pelen ikke kan ta opp større last utover det området. Stivhet E_{50} kan bestemmes fra enkelt trykkforsøk, men det skiller seg ved at det ikke simulerer de faktiske forholdene som drenering og omliggende horisontaltrykk.



Figur 2.6: Forenklet tøyings-spenningskrurve for en kalkpel

Ut fra forsøk antas flytespenningen til å være mellom 65% og 80% av pelens bruddlast (Vegdirektoratet, 2014).

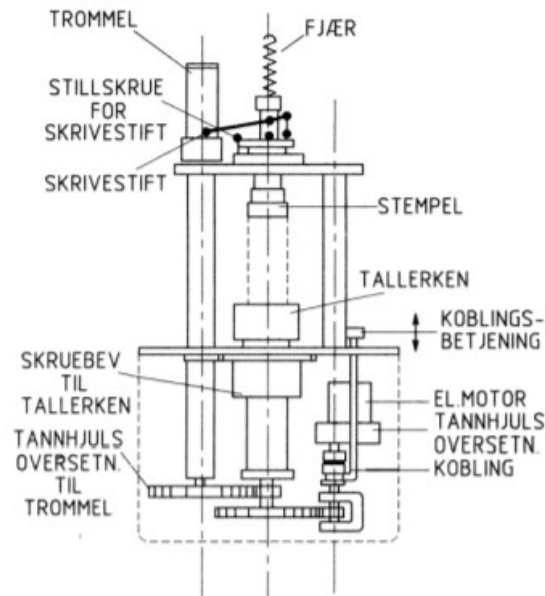
2.7 Enaks vs Treaks

For denne masteren er det valgt å sette mer lys under treaksial skjærttest. For å forstå hensikten med det presenteres en kort sammenligning av de to mest aktuelle måtene å teste skjærstyrken i lab på.

2.7.1 Enaks

Standard prosedyre for å teste udrenert skjærstyrke (S_u) for leireprøver innblandet med stabiliserende bindemiddel. Forsøket utføres på sylindriske prøver med høyde 100mm og diameter 54mm .

Prinsippet er at en prøve med bestemte dimensjoner påføres en økende kraft, i stående stilling inntill brudd. Halve aksialspenningen ved brudd angir prøvens skjærfasthet (Vegdirektoratet, 2014). Se figur 2.7

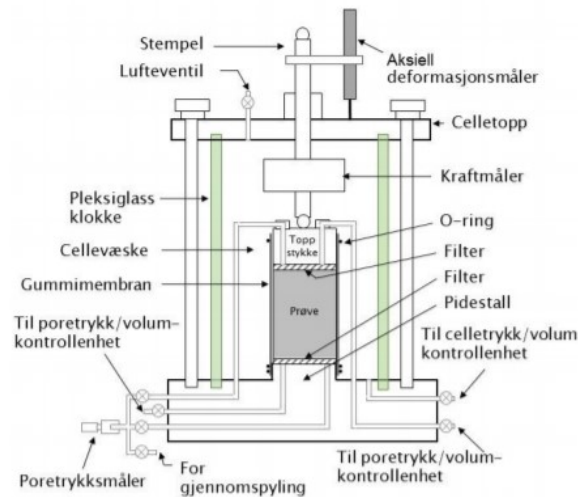


Figur 2.7: Enaksialt trykkapparat (vegvesen, 2014)

Ulempen med denne prøven er at det ikke utføres allsidig trykk på prøven. Dermed må prøven i fleste tilfeller anses som lite nøyaktig for bestemmelsen av jordartens skjærfasthet in-situ. Til tross for dette er dette den meste anvendte metoden for bestemmelse av styrken for KS-peler på grunn av dens enkle form og prosedyre. I tillegg er det mulig å utføre mange etterfølgende tester hurtig. Treaksial test kan maksimum utføres 2-3 ganger for et apparat iløpet av en dag. For at det skal gjennomføres neglisjeres en rekke prosedyrer for vanlig standard treaksial test.

2.7.2 Treaks

Prøven er tilsvarende lik som for enaksialt skjærforsøk. Derimot bygges prøven inn i en gummimembran og plasseres i en trykkcelle. Den påføres etterfølgende en isotrop eller anisotrop spenning tilsvarende spenningen forventet i bakken under drenert forhold. Celletrykket kommer fra omkringliggende væske (gummimembran for å unngå innlekking). Deretter belastes/avlastes prøven til brudd. Se figur 2.8.

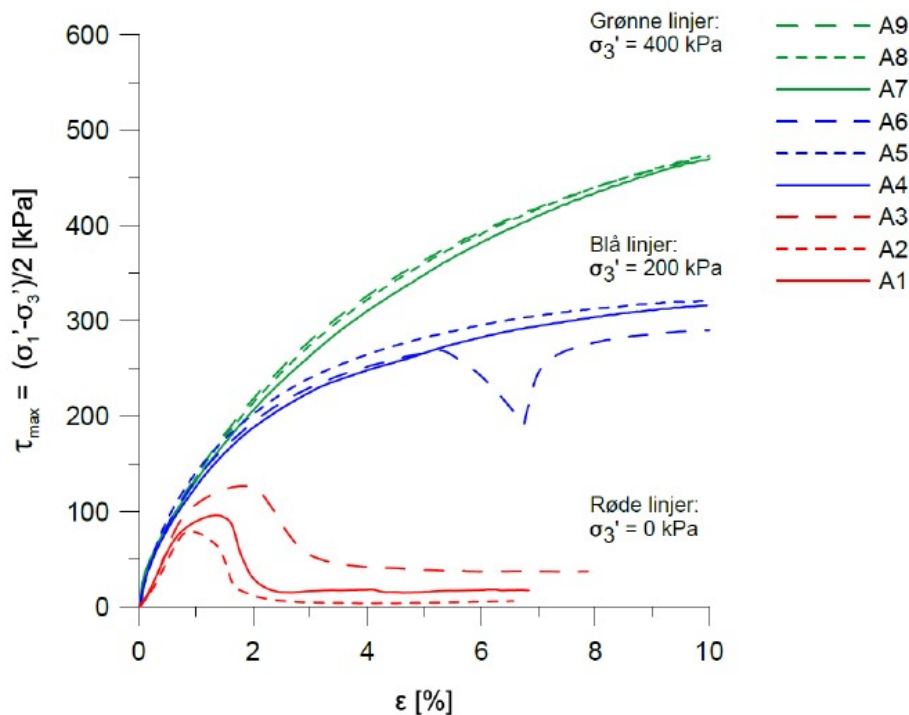


Figur 2.8: Treaksialt trykkapparat (vegvesen, 2014)

Fordelen med dette er som nevnt nøyaktig simulering in-situ spenningene. I tillegg kan en velge å teste prøver på dybder der det er mest relevant. For KS-peler er relevante testdybder fra 0-20m. Dypere innblandinger betyr større friksjon for vispen, og derav større påkjenning for maskinene.

2.7.3 Oppnådd styrke

Data viser at treaksiale tester gir en økt oppnådd labstyrke en enaksial (Ingrid Engeset, 2018). Spesielt for tilfeller der treaksen simulerer trykket påført insitu i bakken. Blant annet på grunn av det omgivende celletrykket blir resultatet et seigere brudd en for enaksial trykktest. Enaks vil alltid gi verdi for sidespenning $\sigma_3 = 0$. Ulempen med enaks er at materialets geologiske integritet og historie forsvinner med engang prøven vispes og blandes. En treaks kan en gjenskape dette igjen å dermed få en mer realistisk verdig av styrken insitu. Belastningstilfellet i treaks er bedre til å simulere en reel pålastning i byggeprosessen.



Figur 2.9: $\tau_{max} - \epsilon - plot$ av prøver herdet ved 0 kPa, og testet ved 0, 200 og 400 kPa celletrykk. Røde, blå og grønne linjer viser prøver herdet ved henholdsvis 0, 200 og 400 kPa Ingrid Engeset (2018)

2.7.4 Feltnmålinger

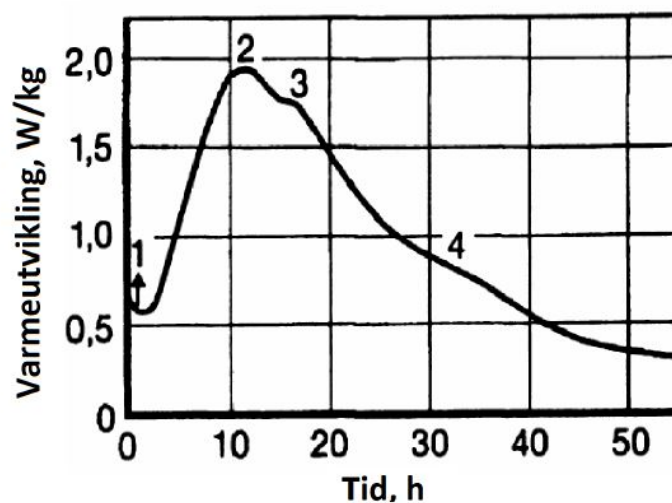
Det finnes en rekke andre metoder for å teste insitu styrke i felt. Blant annet FOPS(forinnstallert omvendt pelsondering), KPS(kalksementpel sondering), CPT/CPTU og prøvetaking. Grunnen for at disse metodene sjeldent benyttes er som oftest på grunn av tid og penger. Metodene er tidkrevende og har stort rom for feil. Ofte kan blant annet den grunnstabiliserte grunnen være så hard at CPTU'en ikke trenger igjennom. Sonderingen har itilleg en tendens til å gå minst motstandsvei. Dette kan ende med at sonderingen trenger ut av pelen og inn i omkringliggende leire. Derfor regnes enaksial og treaksial som mer pålitelig for sammenligning av prøver, til tross for at de oppnår erfaringsmessige en lavere styrke enn felttestene.

2.8 Varmeutvikling

Når sement hydratiseres produseres det betraktelig varme. I de fleste betongtyper øker temperaturen de første dagene etter innblanding. Dette gir hurtigere reaksjoner, men kan likvel ikke være helt gunstig heller. For hurtig reaksjon gir økt sannsynlighet for sprekker, som er ugunstig i betongkonstruksjoner. Om dette er betydelig for KS-konstruksjoner er uvisst. Tidligere resultater viser at høy temperatur resulterer i raskere hydratisering, hurtigere styrkeutvikling og tilstrekkelig styrke etter 28 dager.

2.8.1 Sement

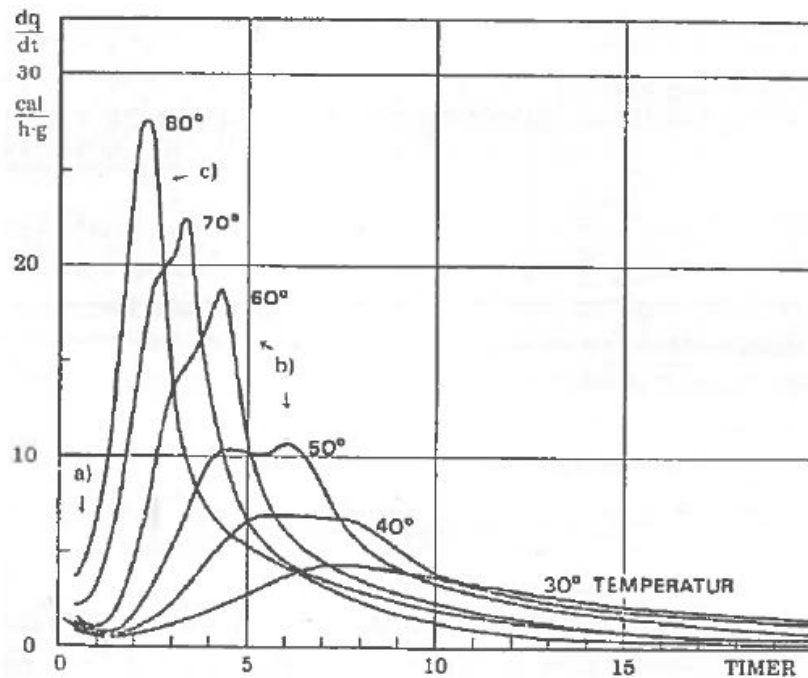
Sement avgir varme ved at lettløslige salter løses opp, og totalt gis ut omtrent 450 kJ/kg varme ut til omgivelsene. Varmeutviklingen er avhengig av sammensetningen og kornstørrelsen til sementen. Blandes dette sammen med leire har også leirens materialegenskaper påvirkning på varmeutviklingen (Jacobsen, 2016)



Figur 2.10: Isotermvarmeutvikling for Portland sement ved $20 \pm \text{C}$ Taylor (1997)

Figur 2.10 viser varmetuiviklingen for sement ved $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Momentant etter innblanding reagerer de lettløslige saltene og løses opp. Derimot oppstår vi stort varmeutvikling etter noen timer. Etter ca 10 timer når varmeutviklingen sitt maksimum på ca $1,9\text{ W/kg}$. Reaksjonen vil deretter synke etterfølgende maksimumet er nådd. Hydratiseringen av sement gir en temperaturøkning på ca $5 \text{ }^\circ\text{C}$ - $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (Åhnberg, H. og Holm, G., 1995).

Reaksjonshastigheten er avhengig av initiell temperatur vist i figur 2.11



Figur 2.11: Isoterm varmeutvikling for Portland sement ved ulike temperaturer (Jacobsen et al., 2016).

Økt herdetemperatur fører til økt hastighet for varmeutviklingen og dermed økt reaksjonshastighet (Jacobsen).

2.8.2 Kalk

Kalk i motsetning til sement utgir mye større varme, omtrent 1163kJ/kg (Boynton, R.S, 1980). Reaksjonen skjer hurtig og for en medium reaktiv kalk når vanligvis reaksjonen sitt maksimum etter 5-10 minutter (Hassibi, M, 1999). Løsbrent gir større temperaturøkning enn hardbrent kalk, fordi høy forbrenningsgrad gir større krystallkorn av C , og dermed lavere reaktivitet (Åhnberg, H, 1995). Reaktiviteten/temperaturøkningen er også avhengig av kornstørrelsen, hvorav finmalt kalk gir større temperaturøkning enn grovmalt kalk. Vist i figur 2.11 ser en at ved økt temperatur går pozzolanreaksjonene raskere (Åhnberg, H, 1995).

2.8.3 Multicem/CKD

CKD inneholder for det meste ulesket kalk, sementklinker og aske fra forbrenning. Siden det er ingen formelle krav til innhold eller egenskaper er det rimelig å anta variasjoner i varmeutviklingen. Derimot kan en forvente å oppnå en varmeutvikling mellom kalk og sement, siden det er en blanding av de to. Men det er blant annet ikke rimelig å anta et gjennomsnitt av de to, siden CKD inneholder en god variasjon av ulike stoffer og ikke rent ulesket kalk. Tidligere studier til peker på at blant annet CKD med høyere C har en raskere varmeutvikling (Peethamparan et al., 2008). På grunn av at CKD varierer mye fra anlegg til anlegg er det vanskelig å definere akkurat forventet utvikling. En bedre forståelse av de kjemiske komponentene kan gi et bedre anslag av forventet temperatur- og varmeutvikling.

For denne masteren har det blitt utført forsøk for å måle temperaturutviklingen for CKD og Multicem se kapittel 4.6. Bestemmelse av varmeutvikling ble derimot ikke utført, grunnet mangel på ressurser og utstyr i den geotekniske laben.

2.8.4 Oppsummering

Tabell 2.6 oppsummerer varmeegenskapene til kalk og sement. Verdier for Multicem er ukjent, og trengs å utforskes nærmere.

Bindemiddel	Total varmeutvikling	Initiell maks reaksjonshastighet	Temperaturøkning
Kalk	1164kj/kg	ca. 5 minutter	40°C - 60°C
Sement	450kj/kg	ca. 10 minutter	5°C - 10°C
CKD	-	-	75-85°C
Multicem (50/50)	-	-	40-50°C

Tabell 2.6: Varmeutvikling og temperaturøkning

2.8.5 Teoretisk varmeutvikling ved adiabatisk forhold

Adiabatisk prosess betyr ingen varmeutvikling mellom et system og omgivelsene. Denne teoretiske formelen gir et anslag av forventet temperaturøkning i prøven. Formelen tar i betraktning at varmeutviklingen, densitet, varmekapasitet og mengde bindemiddel er kjent.

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty} \cdot C}{\rho_r \cdot c_b}$$

$\Delta\theta = \text{temperaturkning, } ^{\circ}\text{C}$

$Q_{\infty} = \text{Varmeutvikling per enhet (Kj/kg)}$

$C = \text{Bindemiddel(kg/m}^3\text{)}$

$C_p = \text{spesifikk varmekapasitet i stabilisert leire(kj/kg)} \cdot ^{\circ}\text{C.}$

$\rho_r = \text{Denisitet leire(kg/m}^3\text{)}$

(2.4)

Denne formelen antar adabatisk prosess som i prinsippet er umulig og dermed må en anta formelen har usikkerhet hvis en sammeligner det med faktisk temperaturutvikling. Ved å benytte varmeutviklingen og varmekapasiteten for Multicem fra lab kan en sammenligne dette med den teoretiske varmeutviklingen i senere forsøk. Dette vil gi et bedre grunnlag til forventet temperaturøkning og fasthet. Med dette kan en kalkulere en maksimal herdetemperatur, slik at det ikke herdes prøver på en høyere temperatur enn dette.

Ved å benytte denne formelen kan en eksempelvis regne ut maksimal adiabatisk temperaturøkning for leireprøvene. Dersom varmekapasiteten til leire antas å være $1,5 \text{ kJ/kgK}$ (var, 2019) og densiten på leira er $1900 / \text{m}^3$ vil en ved en tilsetning av 80kg kalk per m^3 oppnå en maksimal temperaturøkning på 33°C . Eventuelt ved å benytte en blanding av 50/50 kalk og sement får vi en maksimal temperaturøkning på 22°C . På grunn av CKD tilnærmede likhet med Kalk, er det ikke urimelig å anta at maksimal temperaturøkning er rimelig likt.

Sammenlignet med resultatene fra temperaturmålingene insitu felt i Pernilles masteroppgave korresponderer de rimelig bra. Maksimal temperaturøkning er noen grader høyere, men i andre tilfeller er temperaturøkningen høyere enn hva som er teoretisk mulig. Grunn til variasjon pekes på ujevn innblanding, i tillegg til overlapp mellom pelene som kan medføre til høyere gjennomsnittlig mengde med bindemiddel. Senorene til noen av felt testene ble også plassert senere enn planlagt. Observert skjer den største varmeutviklingen de første timene og dagene, dermed var det uheldig at sensorene ikke ble satt inn før.

2.8.6 Modningstall

Fra betongteknologi benyttes modningstall. Modningenstall er et tall basert på sammenhengen mellom herdetid, temperatur, oppnådd fasthet og stivhet. Modningstall kan også benyttes for grunnstabilisert leire (Åhnberg, H. Håkan Pihl, 1997). Åhnberg, H. Ljungkrantz, C. Johansson, SE. Holmqvist, L. Retelius, A. Holm, G (1995) foreslo en empirisk formel 2.5 for modningstallet. Denne formelen er sterkt basert på temperaturen, hvor temperaturen har stor innvirkning på kortsikt, men mindre på langt sikt.

$$M_T = [20 + (T - 20)K]^2 \cdot \sqrt{t} \quad (2.5)$$

hvor

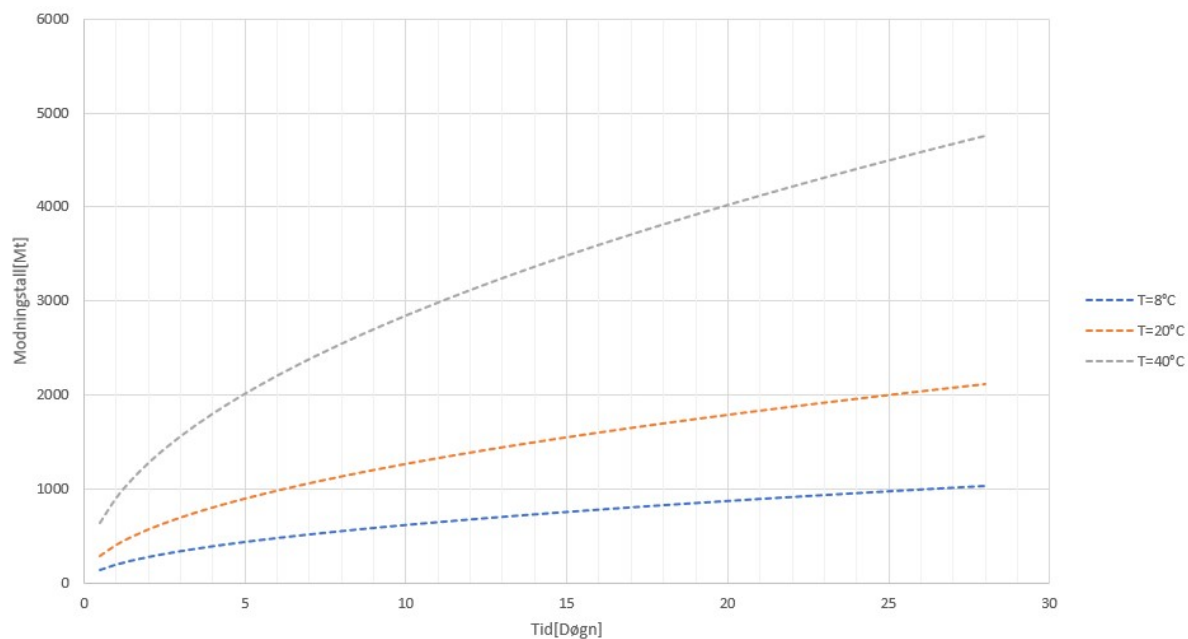
T = Herdetemperatur

t = herdetid

K = konstant basert på jordtype, temperatur og bindemiddel

Formelen er utviklet gjennom empirisk data ved testeting av skjærfasthet på kalkstabilisert svensk leire i laboratorium. Formelen har deretter blitt modifisert til å passe for andre typer leirer og bindemidler. K-verdien bestemmes ut ifra ulike typer jordarter og bindemidler. For svensk leire stabilisert med sement stemmer en k-verdi på 0,5 godt. Dette gjelder både svensk leire og leire fra andre områder i verdenen. K-verdien for kalk kan derimot variere mer fra 0,5-1,1 for ulike leirer. For svenske og siltige leirer ligger dette tallet best på 0,5. Det blir dermed også antatt CKD ligger rundt det samme. Verdiene er generaliserte.

Sammenhengen mellom skjærfasthet og modningstallet avhenger av hvilken jordart og bindemiddel en har, og må beregnes for hvert tilfelle.



Figur 2.12: Modningstall med konstant temperaturer, k-verdi satt til 0,5

Figur 2.12 viser utviklingen av modningstallet basert på tid og temperatur basert på formel 2.5. En observerer betydelig variasjon av modningstallet basert på temperaturen. En hurtigere utvikling av modningstallet tilsvarer også en hurtigere styrkeutvikling. Ved å vite sammenhengen mellom modning og skjærfasthet kan en estimere skjærfastheten etter 28 dager. Etter 28 dager observeres det at modningstallet er dobbelt så stort for 20°C enn for 8°C.

Bedre kunnskap om reaksjonene under de ulike bindemiddelene vil gjøre det mulig å estimere fasthetsutvikling, skjærfasthet, temperatur og modningstall. For å finne et forhold mellom skjærfast og modningstall må en først starte med å herde prøver under ulik temperatur. Dette ble ikke gjennomført for denne masteroppgaven.

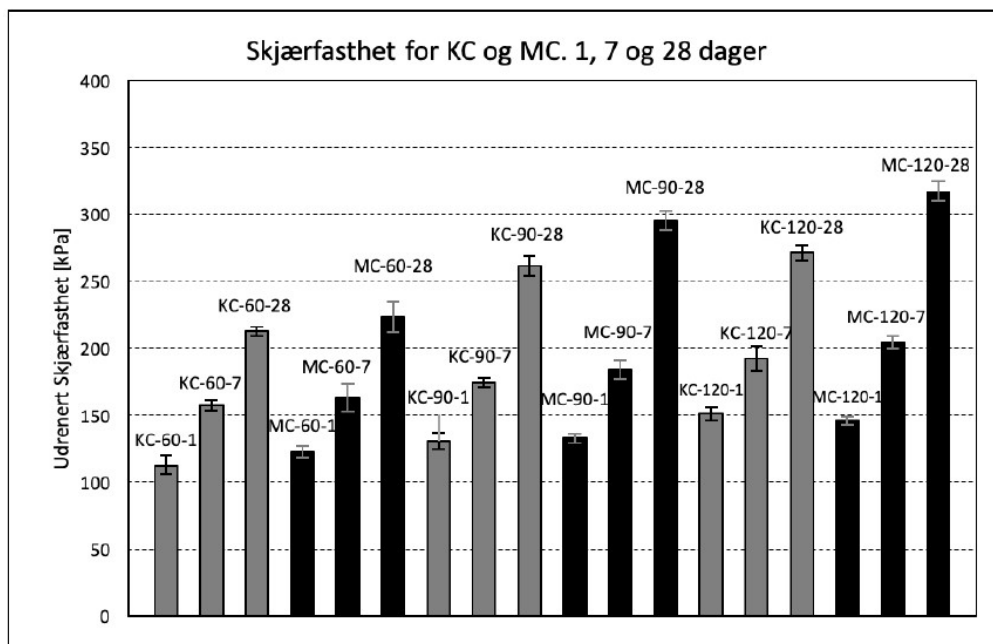
3 Litteratur

Dette kapittelet omhandler litteratur og resultateter for materialer stabilisert med Multicem, og CKD. Litteraturene dreier seg om tidligere tester i felt og lab. En bedre kunnskap om tidligere forsøk sørger for at prøvene presentert senere er unike og nyttige for videre forskning.

3.1 Stabilisering med Multicem

Det er blitt utført en rekke forsøk av stabilisering med Multicem. Sivert Eidsmo(Sivert Eidsmo, 2019) skrev en omfattende masteroppgave 2018 der 126 prøver med Multicem og Kalksement ble testet. Prøvene omfattet flere variasjoner av bindemiddelskomposisjoner. En av hensiktene var å finne det optimale blandeforholdet for høy styrke og lavt CO_2 utslipp. Alle prøvene ble testet med enaksial skjærttest. Alle testene viste til at Multicem oppnådde en tilsvarende eller høyere skjærstyrke enn Kalksement etter å ha herdet i 28 døgn. Størst skjærstyrke og minst CO_2 utslipp ble oppnådd med en blandingsmengde på $90kg/m^3$ med 70/30 CKD/Mikrosement(og 0,5% kalsiumklorid). Dette ga en skjærstyrke ved rundt 230KPa. Sivert sikter tillegg til at innblandingsmengder så lavt som $60kg/m^3$ gav tilstrekkelig god stabiliseringseffekt for leiren benyttet. Leiren benyttet for denne masteroppgaven er tatt opp fra samme område(Flotten-Tiller) og dybde. Dette bidrar til bedre sammenligning i ettertid.

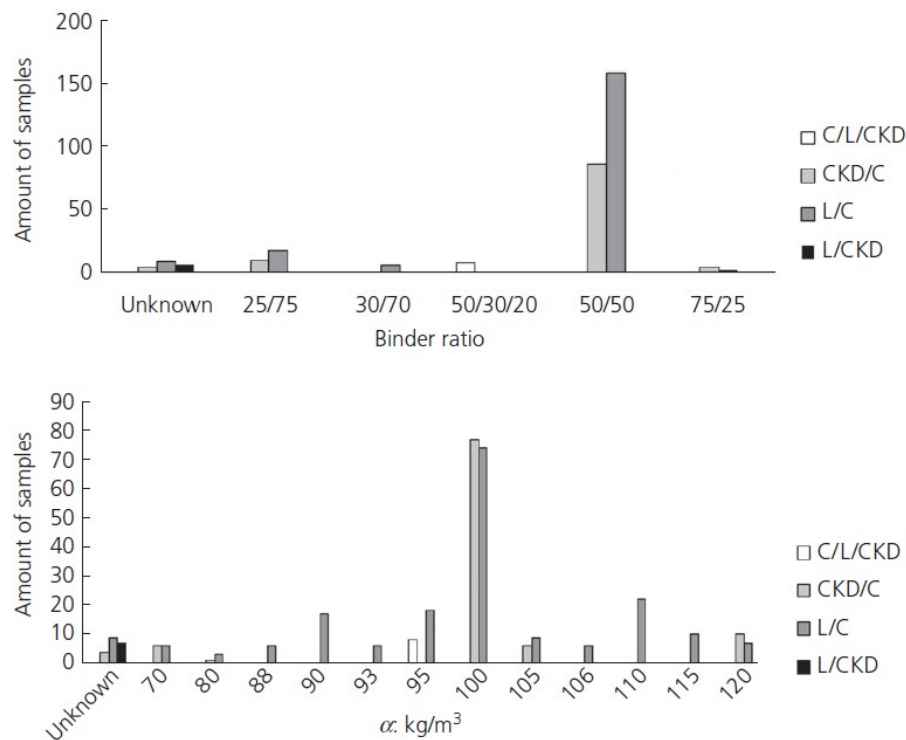
Doktorgraden til Al-Jabban (2019) omfatter prøver med Multicem med 2, 4, og 7% 50/50 CKD/Sement, som er generelt lavere enn tidligere forsøk. Al-Jabban (2019) resultater viser til at for bindemiddelmengde under 4%(ca $70kg/m^3$) er styrken det samme for Multicem og ren sement. Mens sement er bedre for å oppnå styrke når mengden er over 4%.



Figur 3.1: Skjærfasthet for Kalksement og Multicem 1, 7, og 28 dager herdetid, hvorav eksempelvis MC-90-28 betyr Multicem, $90\text{Kg}/\text{m}^3$, 28 dager. Sivert Eidsmo (2019)

I tillegg til masteroppgaver utfører entreprenører og konsulentfirmaer egne tester med Multicem. Et problem med slike resultater er at ikke når offentlig lys eller fremstår like tilgjengelige som for eksempel en doktoravhandling etc. Oftest fordi kunnskap om områder bidrar til at bedriftene kan være mer konkurransedyktige.

Priscilla et al. (2019) har samlet inn data fra mange prosjekter, se figur 3.2. Her illustreres det de ulike kombinasjonene benyttet i prosjekter og forskning. Det er åpenbart mangel av variasjon forsøk og testing av bindemiddelforhold og mengde bindemiddel. Dette kan dermed benyttes videre til å bestemme plan for forsøkene se prøveplan 4.3



Figur 3.2: Fordeling av bindetype, bindemiddelsforhold, og totalt bindemiddelinnhold

Resultaten fra Priscilla et al. (2019) påpeker også at vann/bindemiddels-forholdet(w/b) har relativ stor påvirkning på styrken. I visse tilfeller for Multicem er det en forskjell på 400KPa i styrken med et w/b forhold fra 4 til 5. Derimot for kalksement utgjør forskjellen 200KPa i det samme intervallet.

3.2 Stabilisering med CKD

I likhet med Multicem har en rekke forsøk med CKD blitt utført. Omfattende studier med CKD som stabiliserende bindemiddel har blitt utført av (Zaman et al. (1999); Miller og Azad (2000); Adaska, P.E. og Taubert (2008); Solanki et al.). Testene har blitt utført med en bindemiddelsmengde på over 7%. I tradisjonell norsk leire tilsvarer dette ca $125\text{kg}/\text{m}^3$. Gjennomgående viser prøvene økt styrke og fasthet av jorden.

Peethamparan et al. (2008) valgte heller å teste ulike CKD typer alene, og sammen med kaolonitt-leire. Denne leiren er ofte sterkere enn klassisk norsk leire, men effekten blir tilsvarende det samme. Resultatene viste til at CKD med høy andel C ga høyere skjærstyrke og temperatursvingninger. Se figur 4.6, 3.4. Her ble CKD testet med tilsvarende

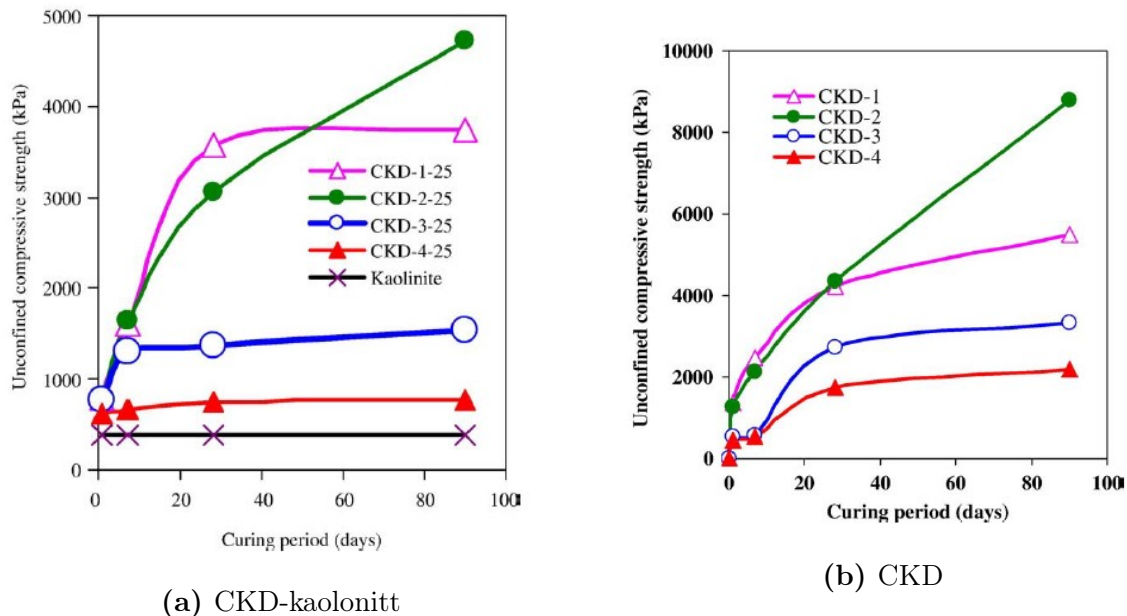
likt fuktighetsinnhold som i jorda. Resultatene viser til at et argument for høyere initiell temperaturøkning gir økt styrke. Se figur 3.4a og 4.6, hvorav CKD-2-25 inneholder mest C, etterfulgt av CKD-1-25 og CKD-3-25 og CKD-4-25. Se figur 3.3. Dette støttes også av Miller og Zaman (2000), der CKD med høyest prosentandel med CaO gir høyest styrke.

Chemical composition of the materials used						
Chemical composition by XRF	CKD-1	CKD-2	CKD-3	CKD-4	Type 1 cement	Kaolinite clay
	Weight (%)					
SiO ₂	12.18	16.42	11.91	15.39	20.48	45.73
Al ₂ O ₃	4.24	3.62	2.17	4.66	4.21	37.36
TiO ₂	0.22	0.23	0.15	0.57	0.36	–
P ₂ O ₅	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	–
Fe ₂ O ₃	1.71	2.31	2.08	2.34	2.41	0.79
CaO	46.24	55.00	46.05	37.35	63.19	0.18
MgO	1.24	2.68	2.2	2.10	4	0.098
Na ₂ O	0.51	0.17	0.33	0.81	0.19	0.059
K ₂ O	4.89	2.89	1.43	7.0	0.28	0.33
Na ₂ O equiv.	3.72	2.05	1.27	5.36	0.37	–
Mn ₂ O ₃	0.05	0.44	0.04	0.07	0.14	–
SrO	0.04	0.03	0.07	0.02	0.04	–
SO ₃	14.62	12.69	4.21	5.80	2.76	–
Cl	0.59	0.74	0.35	3.26	–	–
LOI@ 750	14.22	3.92	29.63	27.65	1.76	–
Free CaO **	13.85	29.14	5.32	3.26	1.58	–
Water-soluble Na ₂ O *	0.28	0.06	0.12	0.59	0.04	–
Water-soluble K ₂ O *	2.95	1.68	0.93	6.33	0.16	–

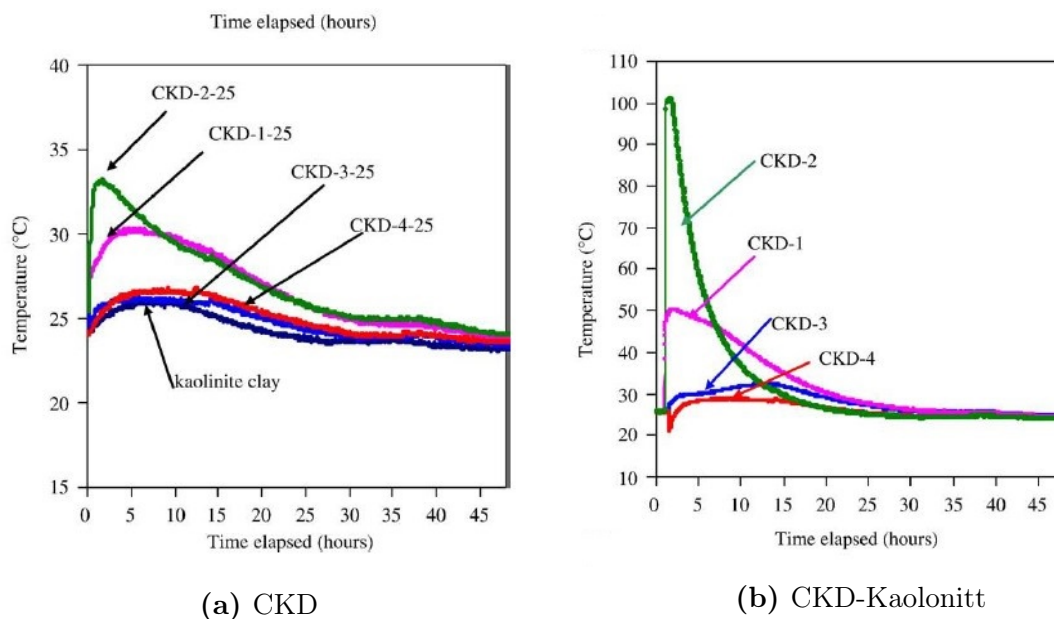
**chemical analysis, *photo flame method.

Figur 3.3: Kjemisk komposisjon av ulike CKD, Peethamparan et al. (2008)

Videre kan det observeres at CKD-1 og CKD-2 viser veldig lik styrkeutvikling de første 28 dagene til tross for rimelig stor forskjell i brent kalk (Free CaO) andel. Hvorav CKD-1 hadde bare 14% av brent kalk, sammenlignet med 29% i CKD-2. Årsaken til lik styrke kan være at CKD-1 har en høyere finhetsgrad som er med på å øke reaktiviteten slik at den oppfører seg likt som CKD-2. Den lavere styrken etter 28 dager i CKD-1 kan være for eksempel fordi det er relativt høyere andel SiO₂ i CKD-2. Andelen med SiO₂ kan ha resultert i en pågående utvikling av C-S-H struktur i materialet sammenlignet med CKD-1.



Figur 3.4: Enaksial skjærstyrke for Kalonitt innblandet med CKD og CKD alene. Alle prøvene har tilsvarende likt vanninnhold på 31% (Peethamparan et al., 2008)

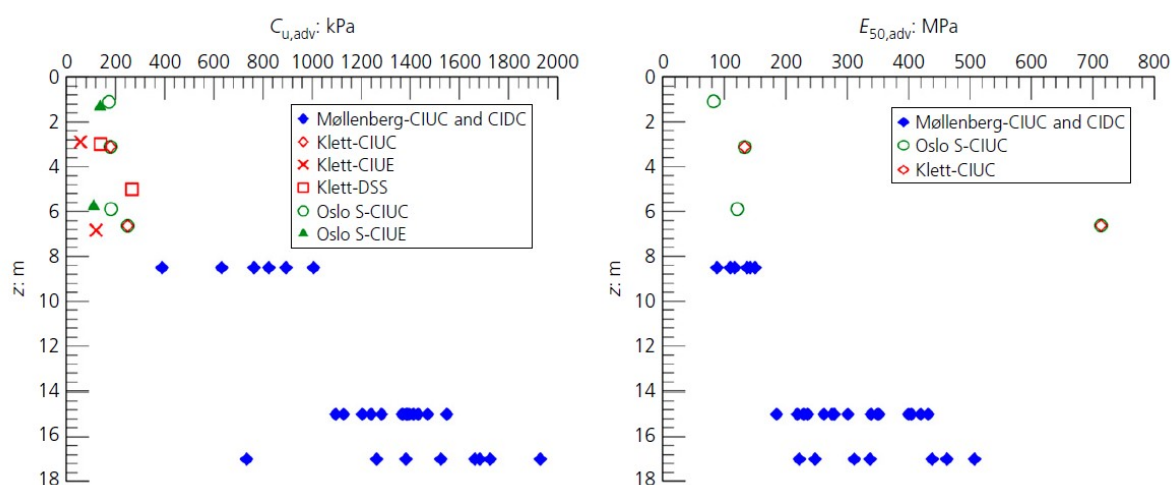


Figur 3.5: Temperaturutvikling for CKD og 25% CKD innblandet med kaolinite. Vanninnhold er 31% (Peethamparan et al., 2008)

At skjærstyrken for innblandet leire er i langt høyere enn for lignende forsøk i Norge skyldes at 25% av leiren består av CKD. Tradisjonelt i Norge utgjør ikke innblandingen mer enn 7%. I tillegg til dette har kaolinittleiren en svært høy styrke i seg selv på over 200KPa. Dette er leire som ofte benyttes til blant annet å lage porselen. Prosedyren for innblandinger er i tillegg helt annerledes enn hva vi gjør i Norge.

3.3 Treksiale skjærtester av grunnstabilisert leire

I senere tid har dett blitt gjort flere omfattende strukturerte forsøk med treksialt apparat. En av fordelene som påpekes med dette er muligheten til å simulere insitu effekt på prøven. Ingrid Engeset (2018) utførte en omfattende forsøksrundt med kalksement, men det er tidligere ikke blitt gjort omfattende forsøk for Multicem eller CKD. Det utført treksiale forsøk fra område Klett og Oslo S. Klett ligger kun et lite stykke unna Tiller-Flotten området. Dataen fra dette viser en økende skjærstyrke med dybden (Mike Long, 2019), se figur 3.6.



Figur 3.6: Skjærstyrke C_u og E_{50} fra Møllenberg(Trondheim), Klett og Oslo S (Priscilla et al., 2019)

Resultatene fra Oslo S viser omtrentlig samme skjærstyrke for de to dybdene. Derimot kan det argumenteres for at pga dybden er så relativt lav at effekten fra treaksen/insitu spenningen ikke slår ordentlig til. For å måle påvirkningen av spenningen bør en ta opp prøver fra større dybder, slik at spenningspåvirkningen ikke er forkledd av naturlige variasjoner i leiren. Priscilla et al. (2019) referer til at blant annet treksiale forsøk er lite utforsket, og spesielt blant norske leirer. Effekten kan potensielt spare penger og ytterligere større klimaavtrykk.

3.3.1 E18 Vestkorridoren, Lysaker - Ramsdalsletta

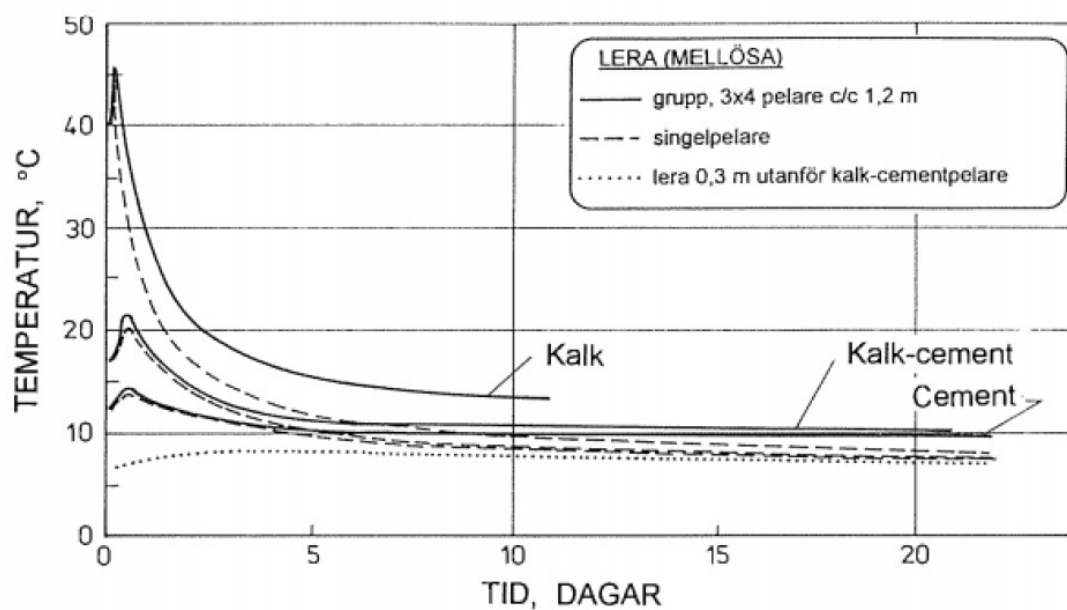
I forbindelse med E18 Vestkorridoren, Lysaker - Ramsdalsletta prosjektet har Statens vegvesen og Geovita samarbeidet og utført både enaks og treaks med Multicem. Disse

resultatene er presentert helhetlig i vedlegg E, og vil bli blant annet benyttet til sammenligning med resultatene fra denne oppgaven. I dette tilfelle har det blitt gjennomført omfattende enaksforsøk, og et mindre antall treaksforsøk. Under dette prosjektet har det blitt valgt å teste både vanlig portlandssement med CKD, definert som CEMI, og sement FA(Flygeaske) med CKD, definert som CEMII. Alle forsøkene gjennomført gir entydig indikasjon på at skjærstyrken øker med treaks. Alle prøvene har blitt herdet ved 21 °C framfor 8 °C som er vanlig standard. Treaksen ble utført udrenert, som adskiller seg fra tiltenkt testmetode for denne masteroppgaven.

Rapporten tilgitt synliggjør også resultater fra feltmålinger fra Tjernsmyr(nærhet til E18) og Granfosstunnellen. Resultatene derfra viser fasthet i felt på størrelsesordenen 4-6 ganger sammenlignet med fasthett oppnådd i enaksialforsøk E7. Foreløpig er øvre grense for prosjektering av grunnstabilisert leire satt til en grense på 150 – 200 KPa (Vegdirektoratet, 2014). Dette er betraktet som konservativt, og kan økes med 2-3 ganger i fremtidige prosjekt påpekes det i NGI's samlingsrapport av enaksiale og triaksiale forsøk(Priscilla et al., 2019). Gitt at innmiksing av bindemiddelet kontrolleres godt nok.

3.4 Temperatureffekt

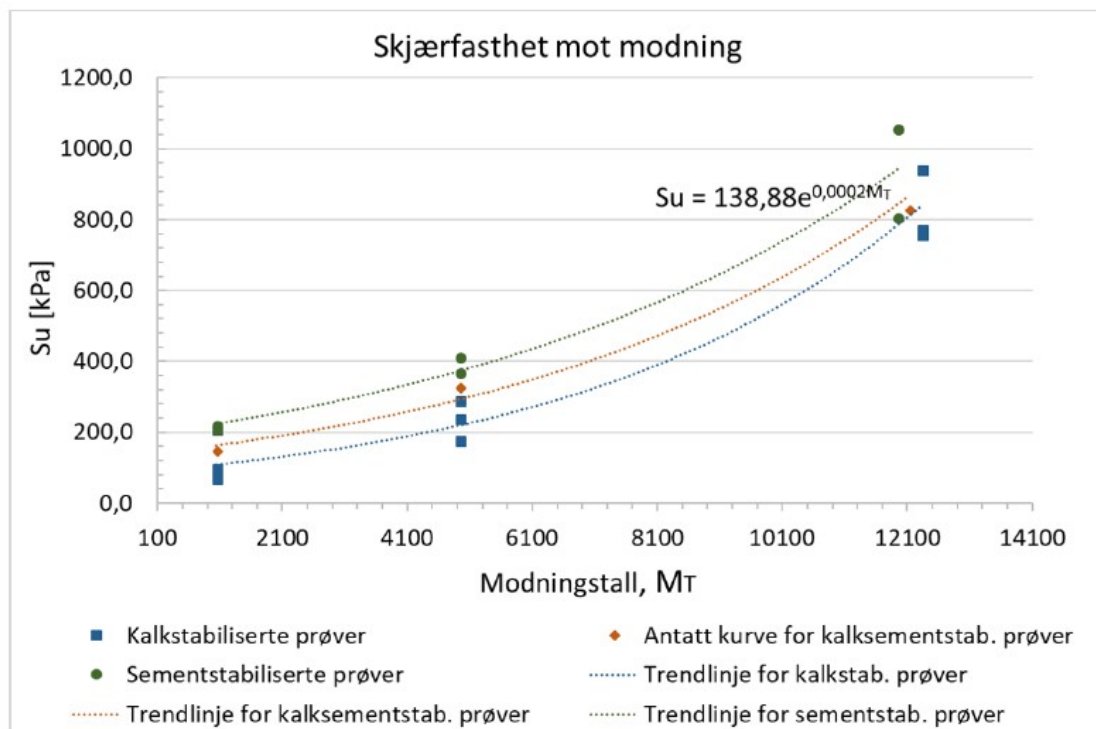
Som nevnt tidligere fra kapittel 2.8 er forsøk der herdetemperaturen spiller inn utført for kalksement, men ikke for Multicem(Pernille Wiersholm, 2018). Det er også gjort tidligere studier for kalksement fra Sverige (Åhnberg, H. og Holm, G., 1995) og CKD Peethamparan et al. (2008), se figur 4.6. Åhnberg, H. og Holm, G. (1995) utførte blant annet templogging av peler stabilisert med kalk og sement, se figur 3.7



Figur 3.7: Temperaturutvikling i peler stabilisert med kalk og sement. kalk-sementblandingen bærer et forhold på 25/75. (Åhnberg, H. og Holm, G., 1995)

Ut fra resultatene til Pernille og Åhnberg har dekningsgraden effekt, der høyere dekningsgrad bidrar til vedvarende høyere temperatur over lengre tid (Pernille Wiersholm, 2018).

Pernille Wiersholm (2018)'s resultater gir utslag for at en høyere herdetemperatur gir økt styrke. Forsøkene er tatt til de ekstreme ved å velge å herde prøver opptil 75°C. Forsøket viser til at skjærstyrken opptil tredobles i forhold til en prøve herdet i 8°C. Tilsvarende observeres det samme trend for modningstallet. Økt herdetemperatur betyr økt modningstall se figur 3.8.



Figur 3.8: Skjærfasthet mot modning, alle prøver herdet i 28 dager. (Pernille Wiersholm, 2018)

Ved å å benytte resultatene presenteres en empirisk skjærstyrke basert på modningstallet 3.1

$$Su = 138,88e^{0,0002Mt} \quad (3.1)$$

Tar en deretter i betraktning temperaturforløpet målt i bakken framfor lab oppnår en et mye høyere modningstall. Benyttes modningstallet insitu i formel 3.1 observeres det en økt skjærstyrke på 38%(tall benyttet fra temperaturmåling ved Belluve Fredrikstad)(Pernille Wiersholm, 2018).

Et slikt prøvesett ville vært nyttig å utføre, men ble desverre ikke gjennomført pga mangel på ressurser og tid.

4 Materialer og Metode

Ulike undersøkelser er gjennomført for å undersøke egenskapene til Multicem og CKD innblandet med Leire fra Tiller-Flotten området. I dette kapittelet presenteres nyttig informasjon om området materialet er tatt ut fra, og selve materialet. I tillegg til metoder ved utførelse av forsøkene. Analyse av data er også beskrevet i dette kapittelet. Pga nedstegning av NTNU-campus har alle prøvene blitt innblandet og lagret i en hjemmelagd lab hos skribentens kjeller, Se figur 4.1.

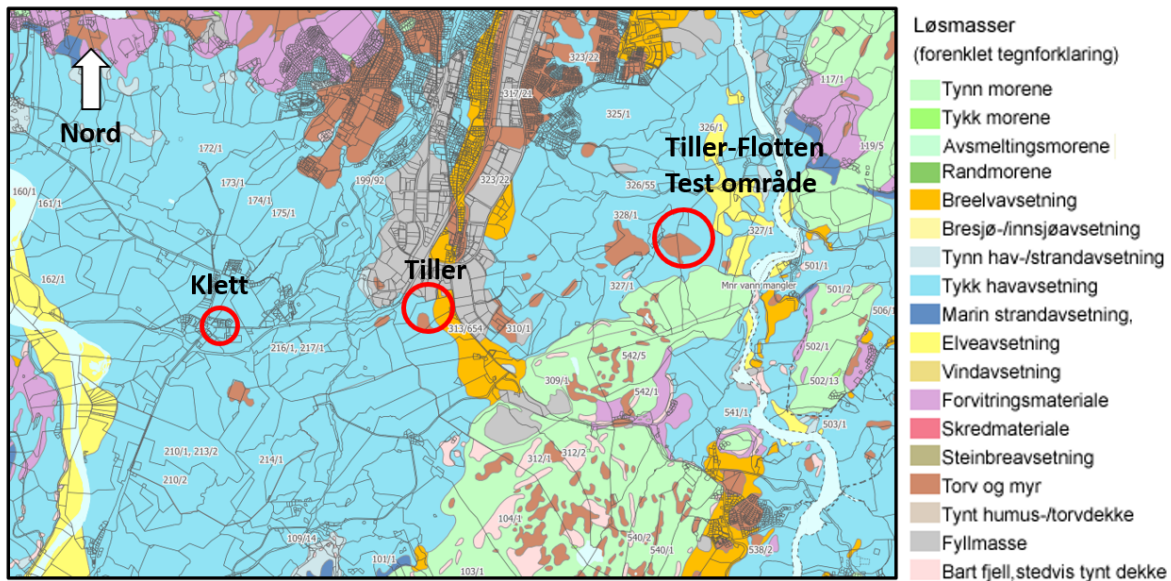


Figur 4.1: Egenbygd lab i skribentens kjeller

4.1 Leire

Utgangsmaterialet benyttet for labforsøkene stammer fra Tiller-Flotten forsknings området. Området ligger ca. 10 km sør for Trondheim i midt-Norge 4.2. Området benyttes hovedsaklig som jordbruksområdet. Setningene i området består av marin og glasiiale sedimenter som oppstod som følge av at et fall av sjø-nivået rundt Trondheimsregionen under Holocene-perioden (Jean-Sebastien L'Heureux, Anders Lindgård, Arnfinn Emdal., 2019). Forskningsområdet ligger på 125 moh, og drenerer mot Nidelva lokalisert 72 moh.

In situ målinger påviser at setningene har en total tykkelse på over 50 m. Leiren benyttet er tatt fra 10m og dypere og klassifiseres som meget kvikk leire.



Figur 4.2: Kvartalgeologi i området rundt Tiller-Flotten Geotekniske forskningsområdet. Hentet fra NGU (2020)

En sammenfatning av forsøk tidligere har blant annet blitt presentert av Norwegian GeoTest Sites(NGTS). Relevante parameterere fra dybden 10-13 m er gjengitt i tabell 4.1. Data fra NGTS rapport(Jean-Sebastien L'Heureux, Anders Lindgård, Arnfinn Emdal., 2019) viser til at leiren ikke er sensitiv fram til 7,5 m under bakken. Utover denne dybden faller den remodulerte styrken under 0,5 KPa og sensitiviteten til leiren er høy. Dette er som forventet grunnet setningsforløpet mange år tidligere der saltinnholdet av porevannet ble vasket ut.

Parametere	Tegn	Enhet	Verdi
Vanninnhold	w	%	30 - 45
Plastisitetsgrense	w_p	%	21
Flytegrense	w_l	%	30 - 35
Densitet	ρ	g/cm^3	18 - 19
Skjærfasthet	S_u	KPa	60 - 80
Omrørt skjærfasthet	S_r	KPa	0,2
Sensitivitet	S_t	-	150 -200
Leirinnhold	-	%	52
Saltinnhold	-	g/l	30-35
Temperatur	-	$^{\circ}\text{C}$	4

Tabell 4.1: Tabell: Parametere for leire på Tiller-Flotten området 10-14 m under bakken

4.2 Metode

4.2.1 Bindemidler

Sementer

Sementtypen benyttet er Norcem Industrisement. Vedlegg A2

Sementtype	Innhold	CO_2 - utslipp per kg/tonn sement
Norcem industrisement	96% sementklinker	748

Tabell 4.2: Egenskapert til sement benyttet

Cement Kiln Dust

CKD er forsynt fra Norcems industrianlegg i Brevik. Dokumentasjon av bindemiddelet ble tilsendt fra Norcem gjennom excel og publiseres ikke for denne masteren. Se tabell 2.4 for beskrivelse av CKD.

Sammensetning

Sammensetning benyttet er en blanding av CKD og industrisement fra Norcem. Andre tilførseler av annet finmaterialet er ikke benyttet. Sikkerhetsblad er referert i vedlegg A1.

Miljøpåvirkning

Et estimat av CO_2 utslippet for de ulike bindemiddelskomposisjonene er gitt i tabell 4.3. CKD fra Brevik betraktes som utslippsfritt. Utslipp fra finmalingen av Industrisement er ikke medregnet. For svensk Multicem er det utarbeidet en egen EPD (Environmental production declaration) for utslipp av produksjon. I Sverige ville medberegnet utslipp vært høyere

Blandeforhold	Utslipp, kg CO_2 per tonn bindemiddel
0/100	-
25/75	187
50/50	374

Tabell 4.3: Utslipp for Multicem og CKD

4.3 Prøveplan

Prøve	no.	Mengde	Blandeforhold(Sement/CKD)
A	1	50 Kg/m ³	0/100
	2		25/75
	3		50/50
B	1	75 Kg/m ³	0/100
	2		25/75
	3		50/50
C	1	100 Kg/m ³	0/100
	2		25/75
	3		50/50

Tabell 4.4: Prøvesamling for treaksial forsøk våren 2020. 2 prøver per variasjon, tilsvarer 18 prøver totalt

4.3.1 Variabler

Herdeperiode

Vegvesenets håndbok R210(vegvesen, 2014) anbefaler lagring i 7, 14 eller 28 dager. For denne masteroppgaven ble det bestemt å herde 28 dager. Dette ble sett på som mest hensiktsmessig pga dette er den vanligste karakteristiske verdien i dimensjonering. Pga av stengt lab ble ikke de første prøvene testet før 30 dager etter innblanding. Utslaget skal ikke ha betydelig utslag på prøvene basert på data fra tidligere tester(Åhnberg, H., 2006).

Mengde bindemiddel

Det har blitt benyttet 3 ulike bindemiddelmengder. 50, 75 og 100 Kg/m³. Denne mengden er ofte variabel fra forsøk til forsøk og prosjekt til prosjekt. Enkelte foretrekker å benytte seg av prosentandel framfor Kg/m³. Kg/m³ er vanligst å benytte i Norge.

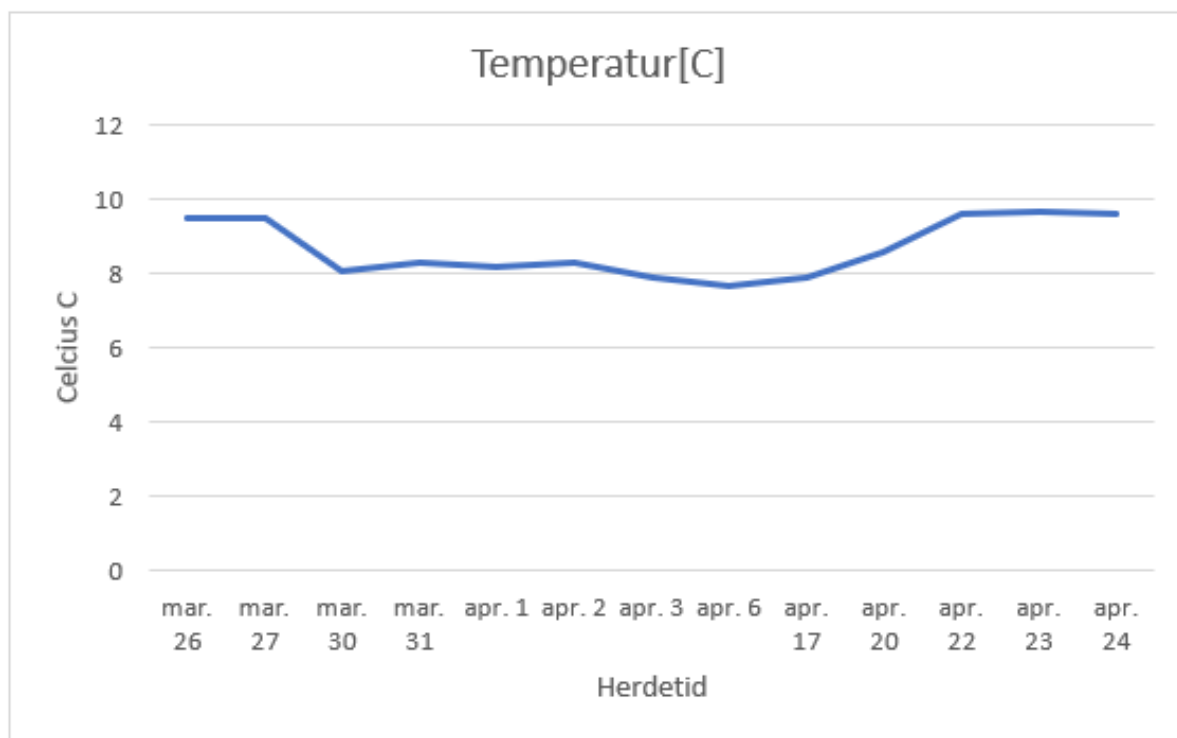
Antall prøver per sammensetning

For å sikre pålitelighet er det valgt å utføre 2 replikater per kombinasjon. Ønskelig var tre replikater per prøve. Tre prøver gjør det mulig å finne mål for spredningen og dermed vurdere om kvalitet på metoden har vært god nok. Dette ble desverre ikke gjennomført pga begrenset tilgang til utstyr, leire og tid pga Covid-19.

Herdeforhold

Alle prøven har blitt lagret i et rom i med ca 8 °C. Dette er standardisert og valgt for å ha et bedre sammenligningsutgangspunkt med tidligere forsøk. Prøvene ble lagret i kjelleren

til skribenten. Dette medførte selvfølgelig variasjon i temperatur og luftfuktighet avhengig av været. Derimot viser logging at kjelleren opprettholdte en temperatur gjennomsnittlig på 8,7 °C, se figur 4.3. En positiv effekt av dette var at prøvene ble blandet inn med lik temperaturen insitu i bakken framfor en romtemperatur på 20 °C som har vært benyttet tidligere.



Figur 4.3: Gjennomsnittlig herdetemperatur i kjeller

Resultater fra målinger gjort på Tiller-Flotten viser at temperaturen ligger på konstant 4 °C (Jean-Sebastien L'Heureux, Anders Lindgård, Arnfinn Emdal., 2019). Isåfall kan det argumenteres at prøvene burde heller blitt herdet ved 4 °C og ikke 8°C

4.4 Rutineundersøkelser

I forbindelse med forsøkene er det utført rutineundersøkelser. Dette ble gjort for å kontrollere leirens egenskaper og sammenligne. For hver innblanding ble vanninnholdet av leiren målt, og tyngetetthet/densiteten av de innblandede prøvene.

4.4.1 Vanninnhold

Vanninnhold før og etter innblanding med bindemiddel for leiren blir funnet etter standard prosedyre gitt i NS-EN ISO 7892-1:2014. Formel 4.1 er benyttet.

$$w = \frac{m - m_s}{m_s} \cdot 100[\%] \quad (4.1)$$

Vanninnhold blir målt for både før og etter innblanding.

4.4.2 Tyngdetetthet

Tyngdetett beregnes ved å fylle en beholder med kjent volum og vekt. Beholder fylles og veies. Formel 4.3 for tyngdetetthet er benyttet. Dette ble desverre ikke benyttet for fersk leire grunnet mangel på utstyr. Under uttakingen av prøvene ble prøvene desverre så forstyrret at beregning av tyngdetetthet ble umulig.

$$Tyngdetetthet = \frac{m_{leire} \cdot g}{V_{beholder}} \cdot \frac{1}{1000} \frac{KN}{m^3} \quad (4.2)$$

Tyngdetetthet benyttet til utregning av volumforhold er fra tidligere resultater. En tyngdetetthet på $1,85 \text{ KN}/m^3$ ble valgt. Dette samsvarer godt med resultatene fra Jean-Sebastien L'Heureux, Anders Lindgård, Arnfinn Emdal. (2019)

4.4.3 Innblanding

Innblanding og tilvirkning av prøvene er utført i henhold til beskrivelsen gitt i Håndbok R210, kapittel 225 fra Statens Vegvesen (vegvesen, 2014). Det er benyttet volumforhold for å regne ut bindemiddelmengden. Denne metoden tar utgangspunkt ut ifra materialets densitet.

Utstyr:

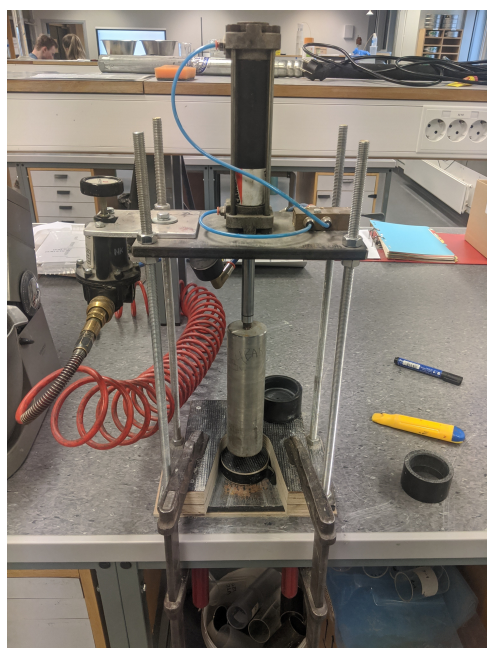
- Kjøkkenmaskin utrustet med bolle og K-visp
- Komprimeringsapparat
- Kalibrert vekt, med 0,01 g nøyaktighet

- Porselensskål

4.4.4 Utførelse

- Ca 1 Kg materiale ble samlet inn i bollen og veid (tilsvarer ca 2 prøver).
- Leiren ble så vispet i rundt 30 sekunder til den er flytende
- Beregnet mengde bindemiddel ble tilsatt og blandet i 30 sekunder
- Eventuelt 30 sekunder til hvis ikke alt ble blandet inn.

Prøvene ble bygd inn i plastsylindere med standard diameter 54mm og høyde 100mm. Prøvene ble fylt med det stabiliserte materiale i 5 omganger (lag). Hvert lag ble i henhold til prosedyre komprimert med 200KPa i 10 sekunder. Til slutt ble sylindrene veid, og pakket inn med plast i bunn og topp. For hver innblanding blir en liten mengde innblandet leire tatt ut for å finne vanninnholdet i innblandingen.



(a) Kompresjonsapparat



(b) Kenwoodmaskin til innblanding

Figur 4.4

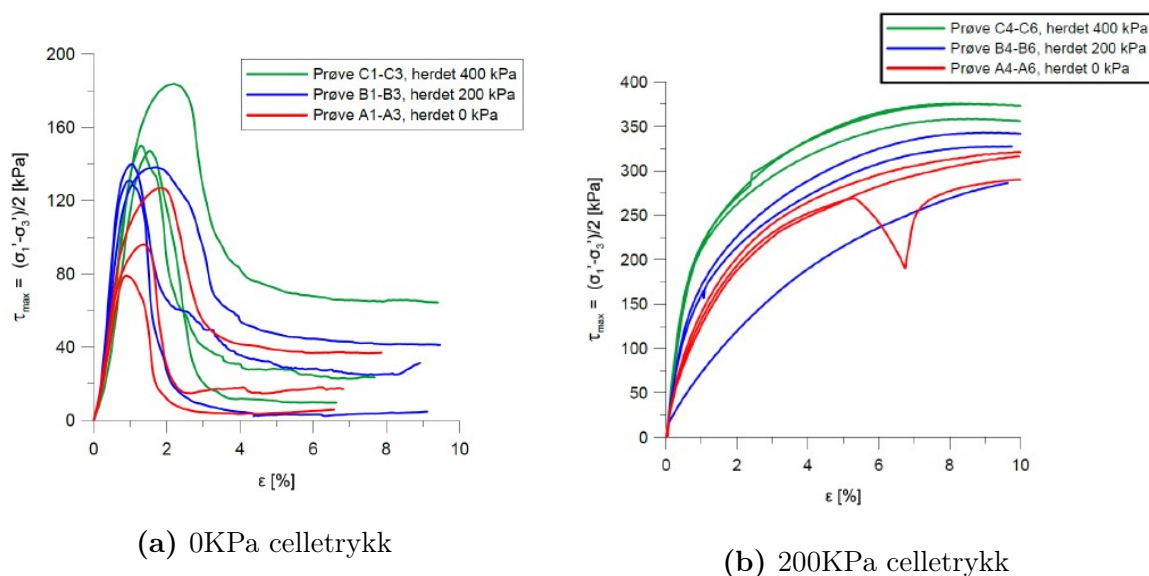
Sylindren med ferdig komprimert materiale blir veid etter innblanding for å beregne våt tyngdetetthet. Se formel 4.3.

$$\gamma = \frac{m_{sylinder} - tara}{V_{sylinder}} \quad (4.3)$$

Det er flere svakheter med denne metoden. For det første er metoden veldig tidsavhengig. På grunn av bindemiddelets raske reaksjonsevne, kan en prøve komprimert 5 minutter etter og 15 minutter etter innblanding påvirke evnen til å komprimeres. Dette kan videre gi eventuelle utslag på resultatene. For det andre er ikke metoden tilpasningsdyktig for ulike densiteter som ønskes å oppnås (Sivert Eidsmo, 2019). På grunn av de ulike variasjonene fra materialet og bindemiddelet er det vanskelig å oppnå den samme densiteten som kan sammenlignes med andre resultater.

4.5 Treaks

Forsøkene for treaksial gjennomføres etter henvisning gitt i NS-EN 1997-2:2007+NA:2008. Unntaket er at alle prøvene er forstyrret som følge av innblanding. Statens vegvesen anbefaler en tøyningshastighet på 2% per time (vegvesen, 2014) til 15% tøyning er oppnådd. Det er valgt kjøre testene til 10% tøyning ved 3% tøyning per time basert på erfaringer fra (Ingrid Engeset, 2018). Fra tidligere resultater (Ingrid Engeset, 2018) ser en at en ofte oppnår bruddstyrken mellom 0,8 – 2,2% ved 0KPa celletrykk. Ved 200KPa celletrykk får vi en utflatning fra og med 7% tøyning. Det er valgt å ikke konsolidere prøven før skjærttest settes igang pga mesteparten av vannet er allerede bundet opp i bindemiddelet. Slik reduseres også prøvetiden. Celletrykket benyttet tilsvarer insitu effektiv spenning. For forsøkene blir det benyttet 100KPa celletrykk. Dette celletrykket tilsvarer ca 10m dybde med GV på 0,5m. Det benyttes ikke baktrykk. Resultatet fra Åhnberg, H. (2006) viser til at dette gir ingen utslag for den målte styrken. Derimot hvis en skulle ønske å gjennomføre udrenert treaks måtte dette bli tatt med i betraktning.



Figur 4.5: Resultater fra (Ingrid Engeset, 2018) for prøver testet ved 0kPa celletrykk og 200kPa celletrykk. Leire stabilisert med $90\text{Kg}/\text{m}^3$ Kalksement(50/50)

Prøvene ble bygd inn i henhold til standard prosedyre med gummihud, o-ringer, og steinfilter. Prøvene blir skjært til riktig høyde ved hjelp av en diamantsag.

4.6 Temperaturutvikling

Parrallelt med forsøkene for treacks, måles semi adiabatisk temperaturutvikling for isolerte tilfeller med CKD, Sement og Multicem. Dette var for å få en bedre indikasjon for hvor varmt det kan potensielt bli inne i prøven under herdefasen. Det er i tillegg testet temperaturutviklingen for ulike sementtyper.

Prøvene av ren sementpasta ble blandet inn med et V/C tall på 0,5. Dette tallet er basert på tidligere undersøkelser med Multicem/CKD og leire som viser hvor mye av bindemiddelet som binder seg til vannet i leiren(Ingrid Engeset, 2018)(Peethamparan et al., 2008). Innblandingen av sementpasteen ble både gjort for hånd, og med visp. Videre ble prøvene plassert i en plastkopp som ble videre plassert i en isolasjonsboks for temperaturlogging, se figur 4.6a. Prøvene blir logget fram til de når romtemperatur. Pga Covid-19 ble instrumentene flyttet til skribentens kjeller. Det gjorde det mulig å logge temperaturøkningen ved en omgivende romtemperatur på ca $8\text{ }^\circ\text{C}$. Vannet benyttet holdt også en temperatur lik romtemperaturen. Slik får en mer realistiske målinger enn ved $20\text{ }^\circ\text{C}$.

Isolasjonsmaterialet består av Sundolitt XPS-plater. Temperaturen logges ved en temperaturmåler kalt Pico-TC-08. Den ene måleren plasseres inne i prøven, mens den andre plasseres utenfor som referansetemperatur.



(a) isolasjonsboks med beholder for innblanding



(b) Data oppsett

Figur 4.6: Temperaturutviklings oppsett

Prøve	V/C-tall	Blandeforhold(Sement/CKD)
CKD	0,5	0/100
Multicem-industrisement	0,5	27/75
Multicem-industrisement	0,5	50/50
Multicem-portlandsement-FA	0,5	50/50

Tabell 4.5: Prøveplan templogging

4.7 Behandling av treaksdata

4.7.1 Excel

Data er hentet ut fra programvaren til treaksapparatet ved bruk av Notepad. Informasjonen overføres deretter til excel. Verdiene medbrakt er deformasjon, celltrykk og kraft. Høyden og diameter måles for hver prøve.

Kraften er gitt i N og deformasjonen i mm. Der prøven ikke viser tydelig kontakt ved første måling, settes kraft og deformasjon lik null til det fremkommer tydelig kontakt.

Deformasjon ϵ er utregnet ved bruk av formel

$$\epsilon = \frac{Deformasjon[mm]}{h_{prve}[mm]} \cdot 100[\%] \quad (4.4)$$

Jevnt fordelt last regnes ut ifra formel 4.5, der A_{korr} er gitt i formel 4.6. Maks skjærstyrke er gitt (τ_{max}) ved formel 4.8.

$$q = \frac{Kraft}{A_{korr}} \quad (4.5)$$

$$A_{korr} = \frac{A_{prve}}{1 - \epsilon} \quad (4.6)$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + q \quad (4.7)$$

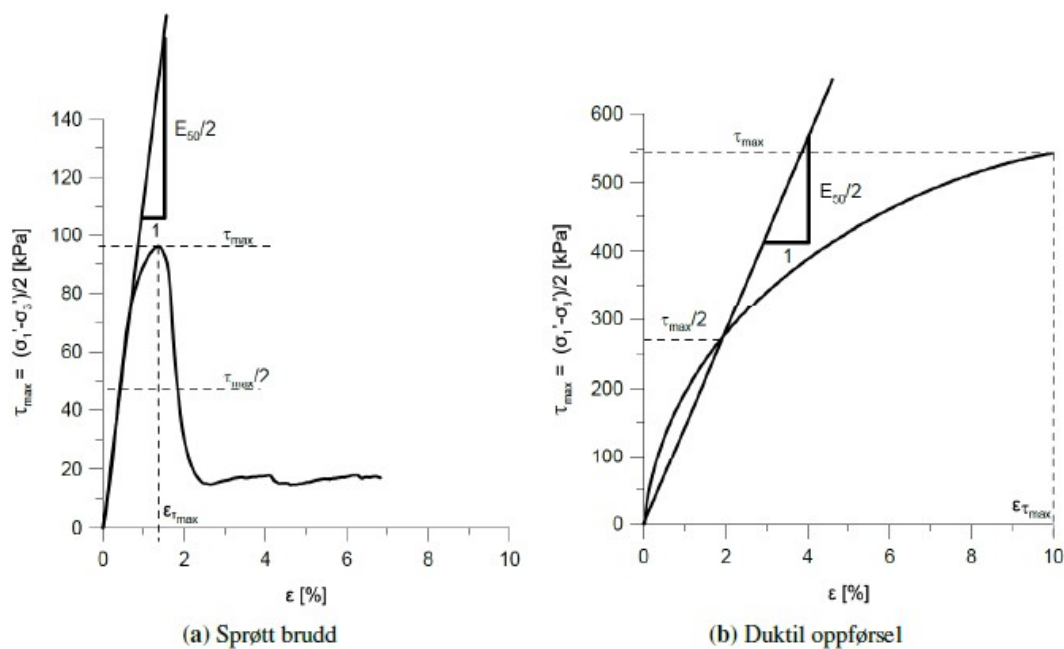
$$\tau_{max} = \frac{q}{2} \quad (4.8)$$

Tolkning av plot

Fremstilling av verdiene er presentert i figure 1 og 2. Tøyning ved maks skjærfasthet hentes ved samme punkt som τ_{max} fra x-aksen. Ved prøver med duktil oppførsel hentes maks skjærfasthet ved toppunktet, se figur 4.7.

E-modulen er hentet fra τ_{max} - ϵ -plot. Det betyr at verdien som tas ut er $E_{50}/2$ se figur 4.7. Utregning er gitt ved formel 4.9. Avlesning fra plot blir kun $\Delta\sigma'_1$, siden σ'_3 er konstant.

$$E = \frac{\Delta\sigma'_1}{\Delta\epsilon} \quad (4.9)$$



Figur 4.7: Avlesning av plott ved sprøtt og duktil oppførsel (Ingrid Engeset, 2018).

5 Resultater

5.1 Rutineundersøkelser

For lettere oversikt presenteres prøveplanen på nytt. Prøvene er klassifisert med to tall. Første beskriver blandeforholdet, dvs A1 er blandeforholdet 0/100 sement/CKD. Bokstaven definerer mengdeinnholdet. A1-1 betyr 50Kg/m³ 0/100 Sement/CKD. Tallet etter bindestreken beskriver om det er prøve en eller to av samme type.

Prøve	no.	Mengde	Blandeforhold(Sement/CKD)
A	1	50 Kg/m ³	0/100
	2		25/75
	3		50/50
B	1	75 Kg/m ³	0/100
	2		25/75
	3		50/50
C	1	100 Kg/m ³	0/100
	2		25/75
	3		50/50

Tabell 5.1: Prøvesamling for treaksial forsøk våren 2020. 2 prøver per variasjon, tilsvarer 18 prøver totalt

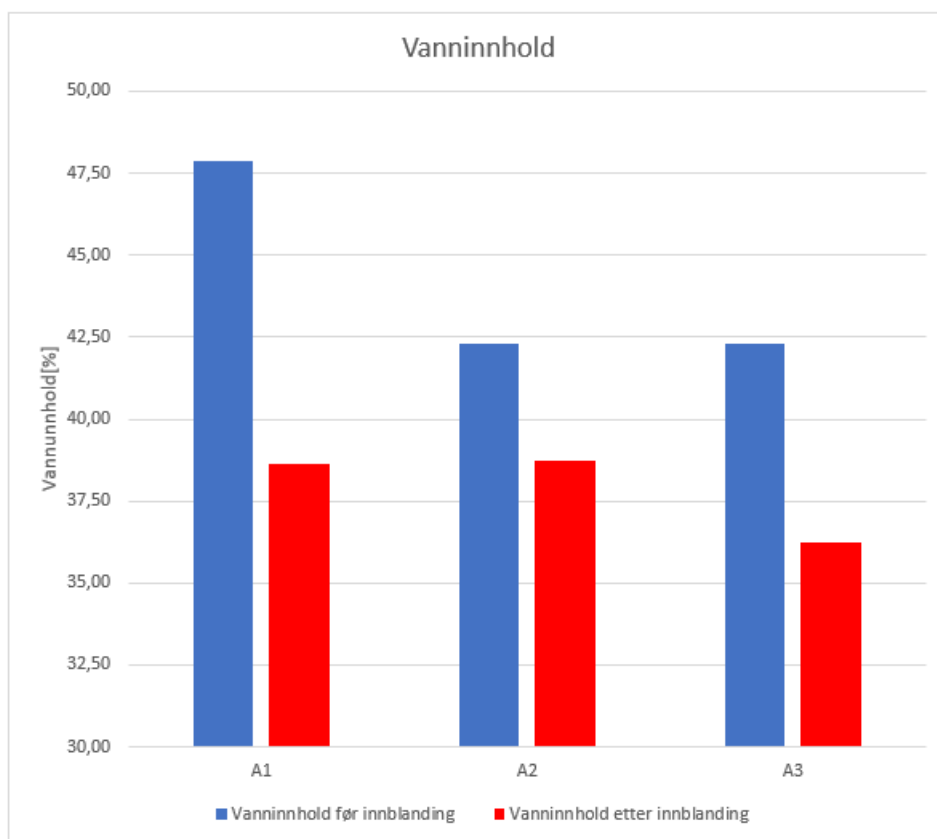
5.1.1 Vanninnhold

Prøve A

Relativt høyt vanninnhold i A1 iforhold til resten. Derimot er vanninnholdet av de stabiliserte prøvene veldig like.

Vanninnhold A		
Prøve	Utgangsmateriale[%]	Stabilisert materiale[%]
A1-1	47,9	38,6
A1-2	47,9	38,6
A2-1	42,3	38,7
A2-2	42,3	38,7
A3-1	42,3	36,2
A3-2	42,3	36,2

Tabell 5.2: Vanninnhold i utgangsmateriale og innblandet materialet før og etter treaksialforsøk



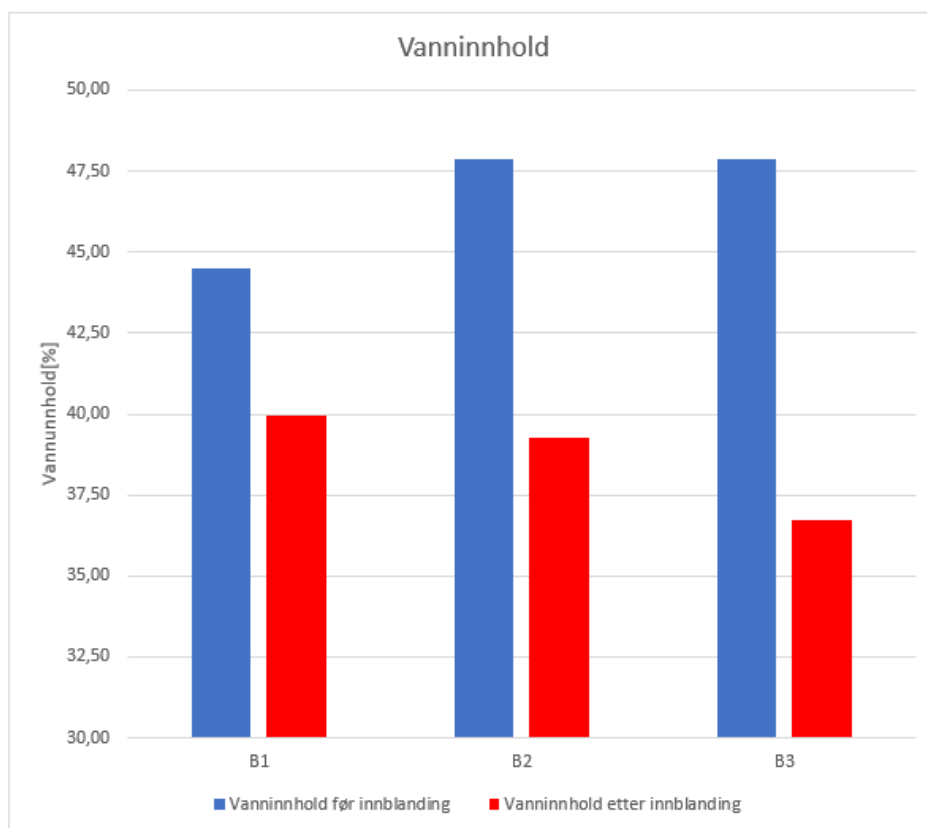
Figur 5.1: Vanninnhold for prøve A før og etter innblanding

Prøve B

Høyt vanninnhold i B3 før innblanding, men relativt mye lavere etter innblanding. Lavest vanninnhold av B-klassen til tross for at materialet har høyest vanninnhold.

Vanninnhold B		
Prøve	Utgangsmateriale[%]	Stabilisert materiale[%]
B1-1	44,5	40,0
B1-2	44,5	40,0
B2-1	44,5	39,3
B2-2	44,5	39,3
B3-1	47,9	36,7
B3-2	47,9	36,7

Tabell 5.3: Vanninnhold i utgangsmateriale og innblandet materialet før og etter treaksialforsøk



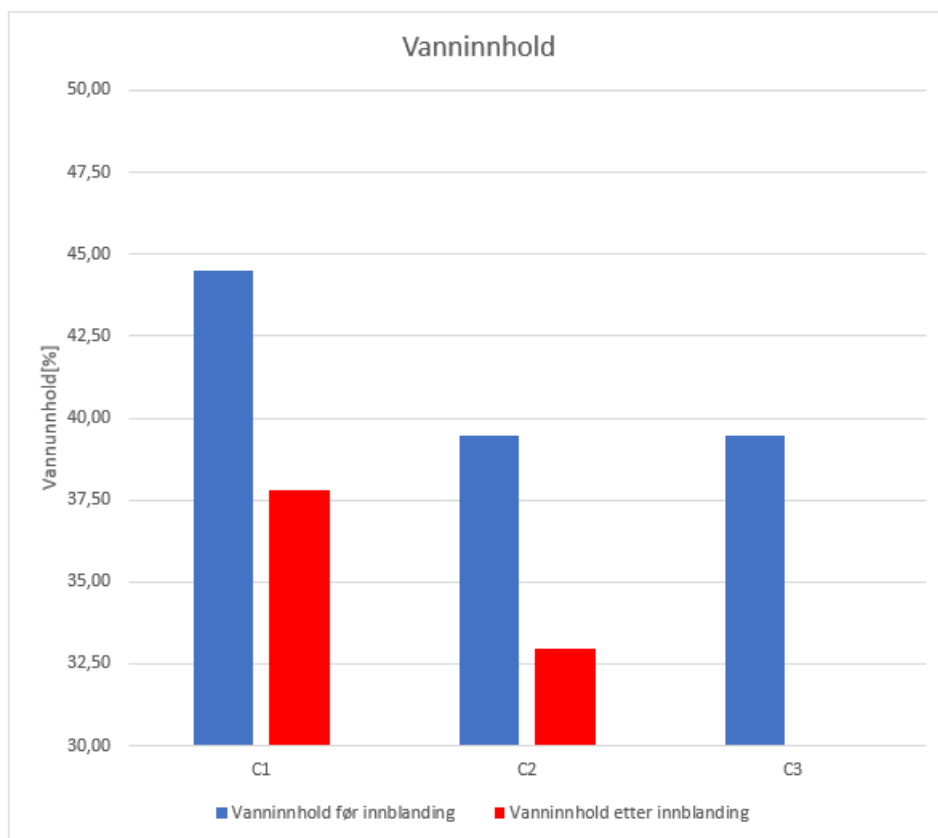
Figur 5.2: Vanninnhold for prøve B før og etter innblanding

Prøve C

Lavest vanninnhold av utgangsmateriale i forhold til serie A og B. C3 vanninnholdet av stabilisert materiale ble desverre mistet i testeprosessen. Det lavere vanninnholdet av utgangsmateriale kan skyldes uttørking av prøven før innblanding.

Vanninnhold C		
Prøve	Utgangsmateriale[%]	Stabilisert materiale[%]
C1-1	44,5	37,8
C1-2	44,5	37,8
C2-1	39,5	33
C2-2	39,5	33
C3-1	39,5	-
C3-2	39,5	-

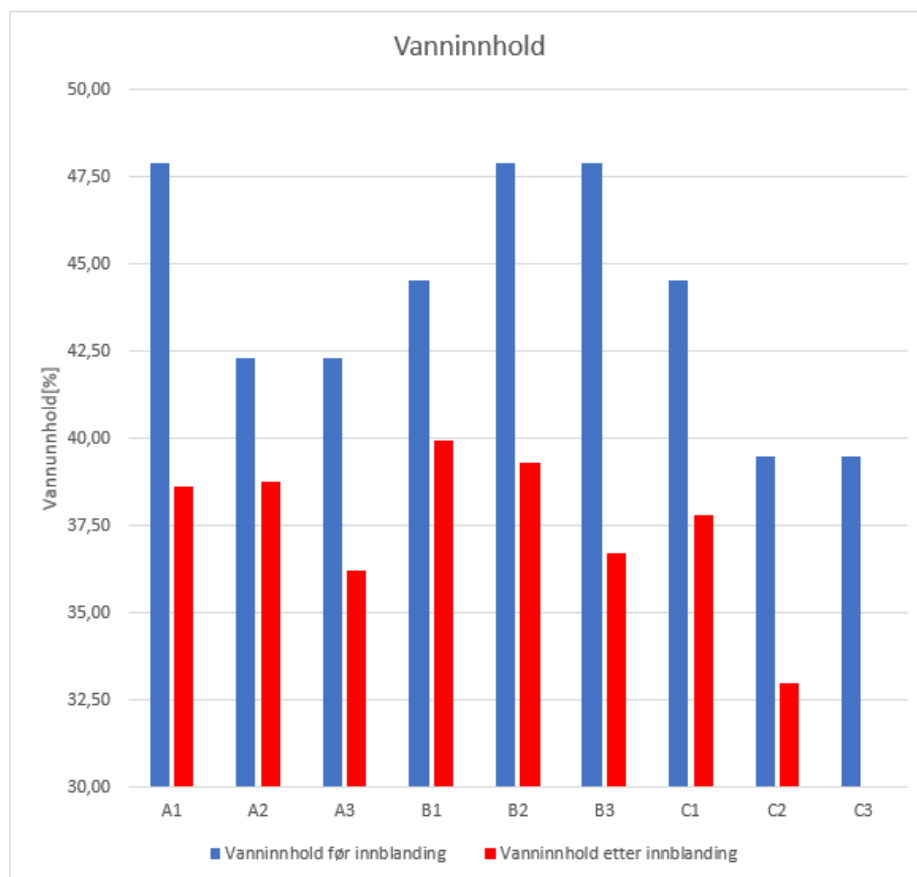
Tabell 5.4: Vanninnhold i utgangsmateriale og innblandet materialet før og etter treksialforsøk



Figur 5.3: Vanninnhold for prøve C før og etter innblanding

5.1.2 Vanninnhold oppsummering

Nedenfor presenteres vanninnholdet grafisk. En observerer at vanninnholdet blir er lavere for alle prøvene med innblanding. Resultatene viser en svak trend ved at CKD-prøvene(klasse 1) tok opp mindre vann enn klasse 3(50/50 ckd/sement). Erfaring ved innblanding av CKD var at materialet var vanskeligere å blande ut og komprimere. Dette kan ha betydd at leiren og CKD'en ikke har blitt blandet godt inn og bundet seg med hverandre, slik vi ser i klasse 3.



Figur 5.4: Oppsummering av vanninnhold før og etter innblanding. Det er beregnet gjennomsnitt av hver prøvevariabel. Det ble ikke utført vanninnhold måling for C3 innblandingen grunnet feil.

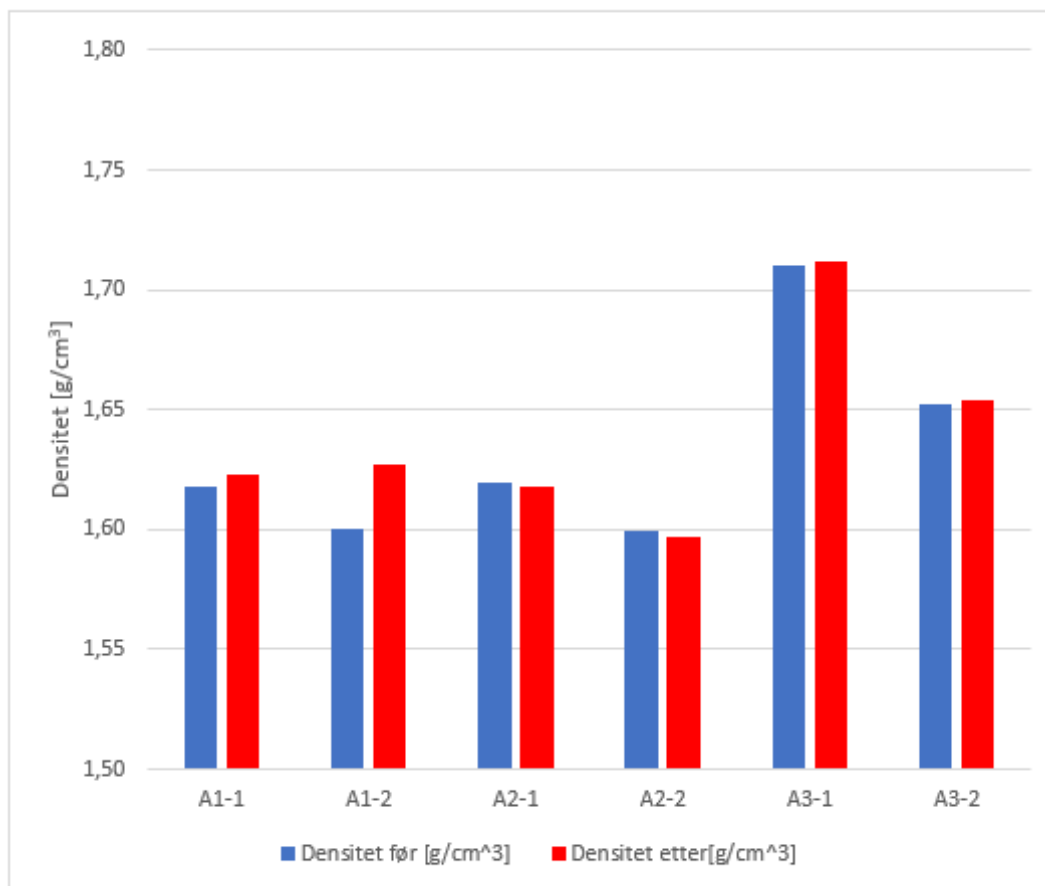
5.1.3 Densitet

Prøve A

Neglesjerbar endring i densiteten. Kun en liten økning for A1-2 under herdeprosessen.

Prøve	Densitet før [g/cm^3]	Densitet etter [g/cm^3]	% Endring
A1-1	1,62	1,62	-
A1-2	1,60	1,63	1,8
A2-1	1,62	1,62	-
A2-2	1,60	1,60	-
A3-1	1,71	1,71	-
A3-2	1,65	1,65	-

Tabell 5.5: Densitet av innblandet materiale



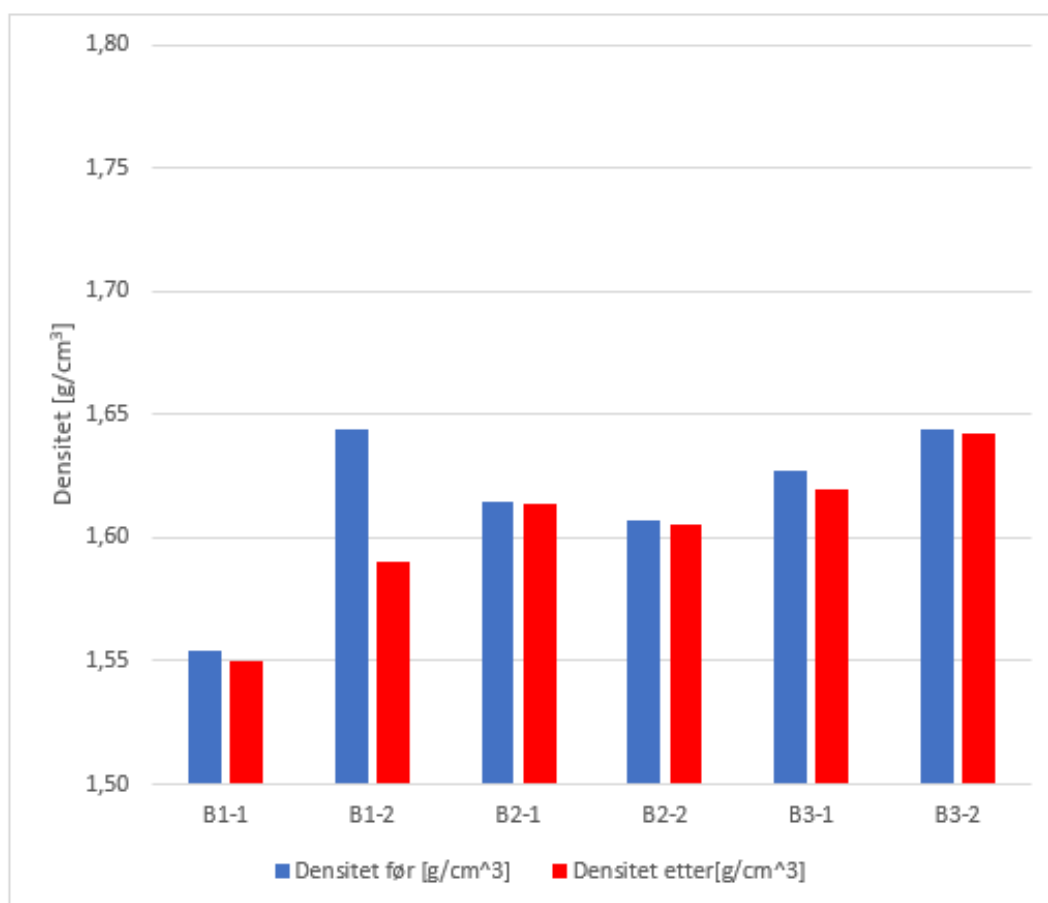
Figur 5.5: Densitet av prøvene A før og etter herding

Prøve B

I likhet med prøveserie A. Liten forskjell mellom densiteten før og etter herding.

Prøve	Densitet før [g/cm^3]	Densitet etter [g/cm^3]	% Endring
B1-1	1,55	1,55	-
B1-2	1,64	1,59	-3,1
B2-1	1,61	1,61	-
B2-2	1,61	1,61	-
B3-1	1,63	1,62	-0,6
B3-2	1,64	1,64	-

Tabell 5.6: Densitet av innblandet materiale



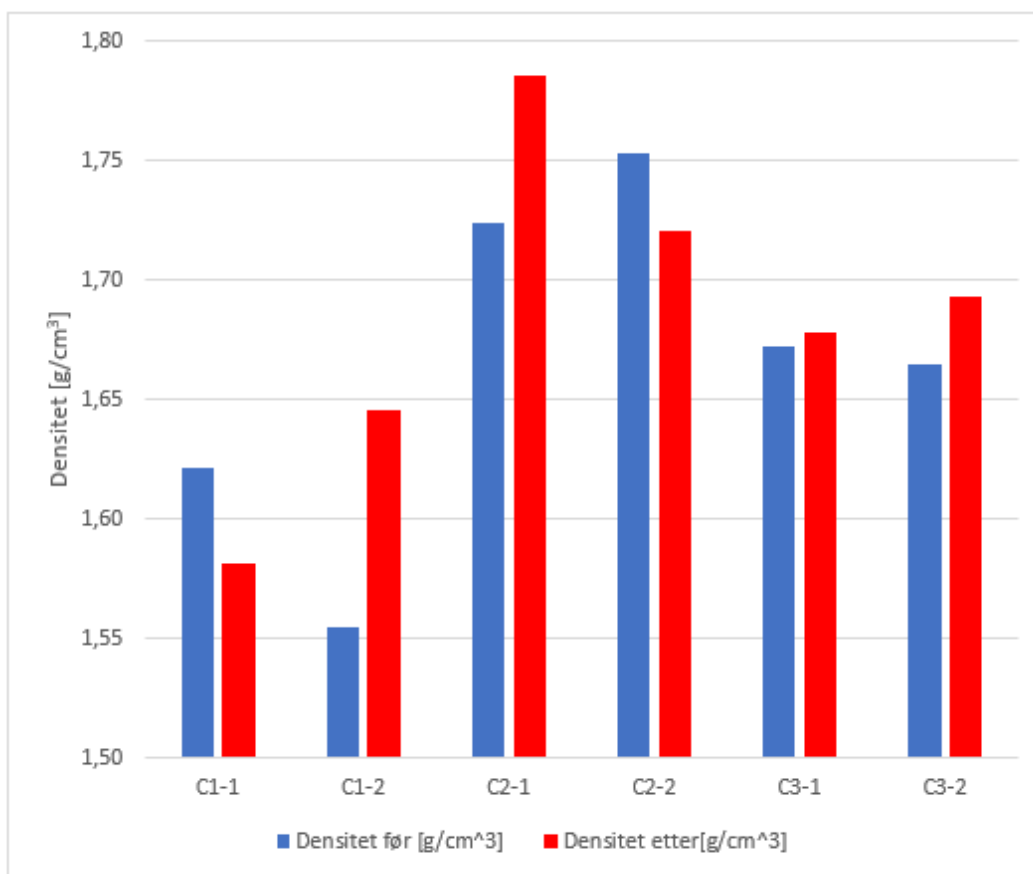
Figur 5.6: Densitet av prøvene B før og etter herding

Prøve C

Prøveserie C har en del forskjeller mellom densiteten før og etter herding. Derimot utgjør endringen ikke en stor forskjell.

Prøve	Densitet før [g/cm^3]	Densitet etter [g/cm^3]	% Endring
C1-1	1,64	1,62	-1,2
C1-2	1,62	1,58	-2,4
C2-1	1,72	1,72	-
C2-2	1,74	1,79	2,8
C3-1	1,67	1,68	0,5
C3-2	1,66	1,69	1,8

Tabell 5.7: Densitet av innblandet materiale



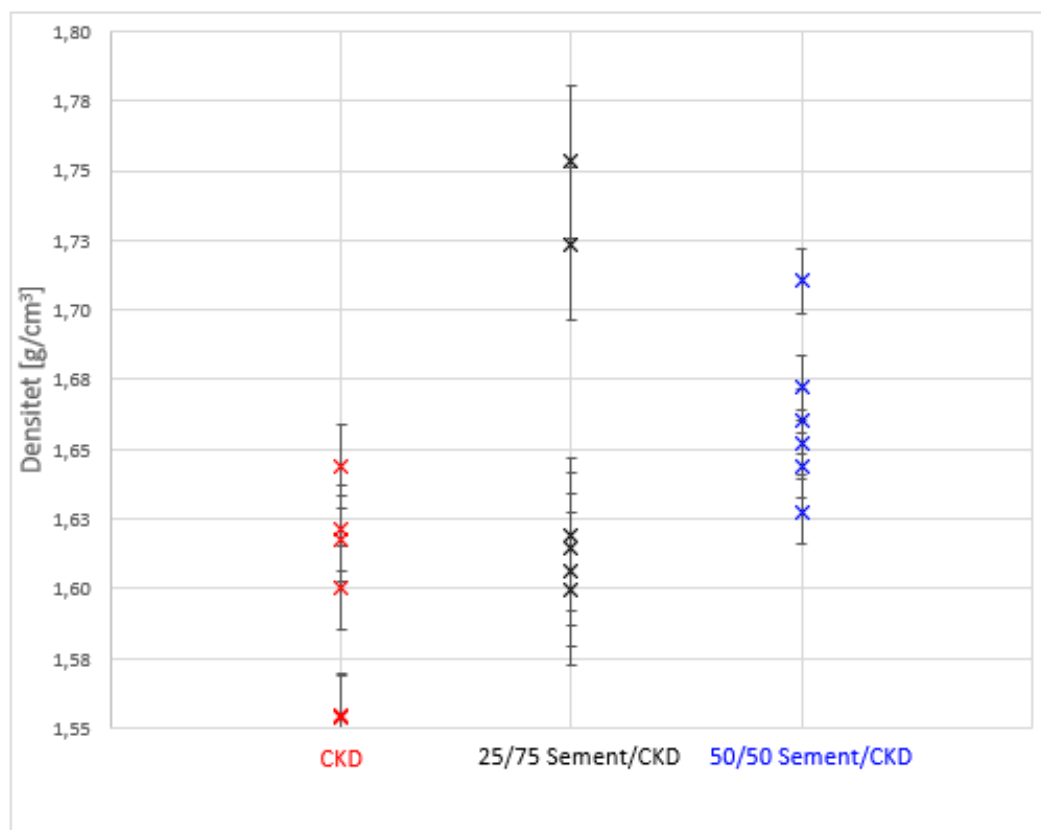
Figur 5.7: Densitet av prøvene C før og etter herding

Densitet oppsummering

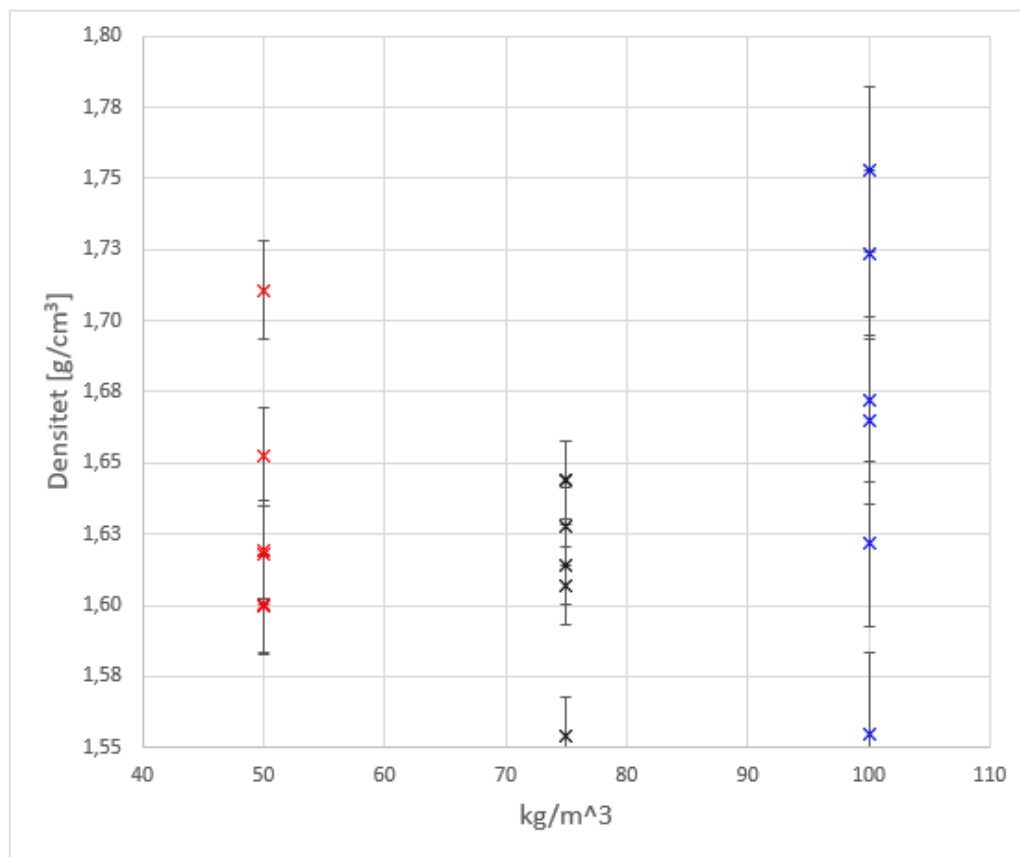
Resultatene fra densiteten til materialene før og etter gir indikasjon på at en fikk høyere densitet for prøver med mer innblanding av sement. Etterfulgt ser en tendens til at prøver

med ren CKD(1-klassen) har en betydelig lavere densitet enn 3-klassen. Prøvene med ren CKD var betydelige vanskeligere å blande inn, samt vanskeligere å komprimere. Figur 5.8 viser at densiteten er lavere ved prøver med ren CKD, og høyest for prøver med 50/50 Multicem.

Figur 5.9 viser at en oppnår høyest densitet ved $100Kg/m^3$ og lavest ved $75Kg/m^3$.



Figur 5.8: Densitet for innblandede prøver før herding inndelt i blandeforhold



Figur 5.9: Densitet for innblandede prøver før herding delt inn i innblandingsmengde

5.2 Treaksialforsøk

Det er utført 18 treaksiale forsøk på stabiliserte prøver. Resultatene er presentert med plot som viser skjærfasthet mot tøyning. Prøvene presenteres samlet for lik innblandingsmengde. Videre sammelignes resultatene mot hverandre plotvis i form av innblandingsmengde, og blandeforhold mot skjærstyrken. Det satt opp en tabell for maks skjærstyrke ved 2, 5, og 10% tøyningen.

Prøve A

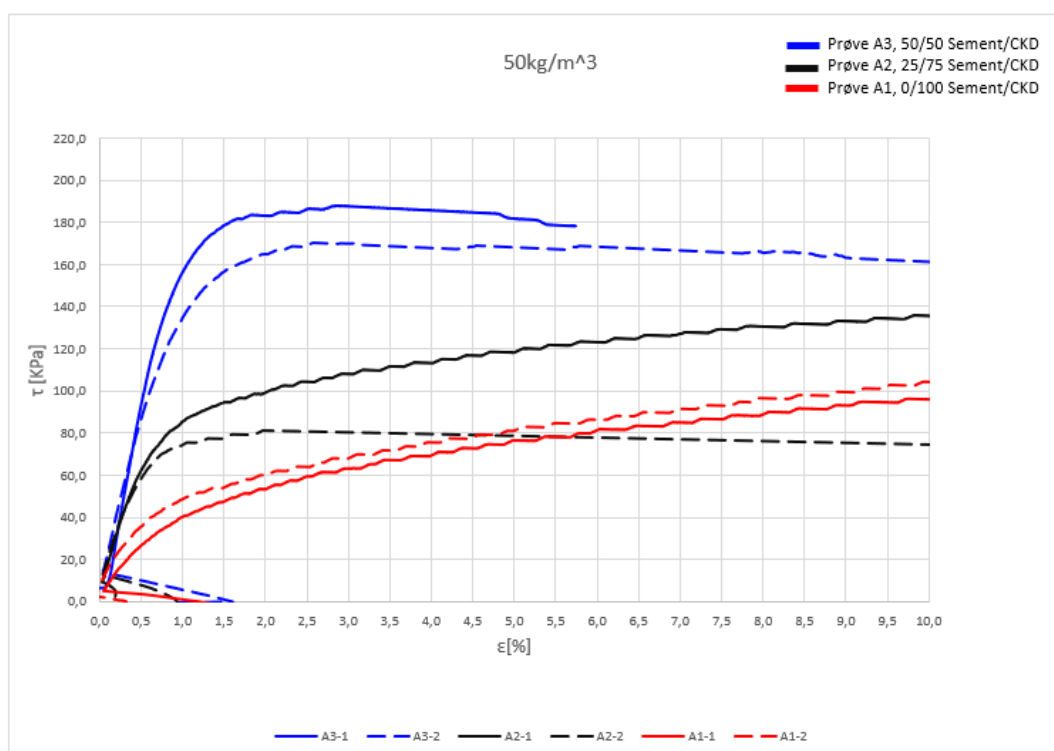
Resultatene for prøveserien A er presentert i tabell 5.8, 5.9, og figur 5.10. Prøve A3-1 og A3-2 viser en tendens til utflating ved 1,5% tøyning. Mens A2 og A1, gir ingen tegn til brudd og øker ved økende tøyning. Det bemerkes at A2-2 gir rimelig uventede resultater. Kan skyldes et spesielt svakt lag ved komprimering av prøven, eller skade på prøven når prøven ble skjøvet ut. Denne prøven tas ikke hensyn til i videre sammenligning.

Prøve	γ [KN/m ³]	w [%]	τ_{max} [KPa]	$\epsilon_{\tau_{max}}$ [%]	E50[MPa]
A1-1	16,2	38,6	105,3	10	2,8
A1-2	16,3	38,6	117,5	10	3,1
A2-1	16,2	38,7	142,0	10	11,1
A2-2	16,0	38,7	81,4	1,5	15,0
A3-1	17,1	36,2	188,4	3,1	18,8
A3-2	16,5	36,2	171,7	3,5	17,2

Tabell 5.8: Styrkeresultat fra treksialforsøk A

Prøve	$\tau_{2\%}$ [KPa]	$\tau_{5\%}$ [KPa]	$\tau_{10\%}$ [KPa]
A1-1	53,5	81,1	104,4
A1-2	59,9	38,6	117,5
A2-1	99,4	118,4	135,5
A2-2	81,2	78,8	74,0
A3-1	183,4	181,9	188,4
A3-2	164,8	168,0	161,0

Tabell 5.9: Styrkeresultat fra treksialforsøk ved 2, 5 og 10% tøyning for prøver med 50Kg/m³



Figur 5.10: Resultat fra treks for prøver med 50Kg/m³

Prøve B

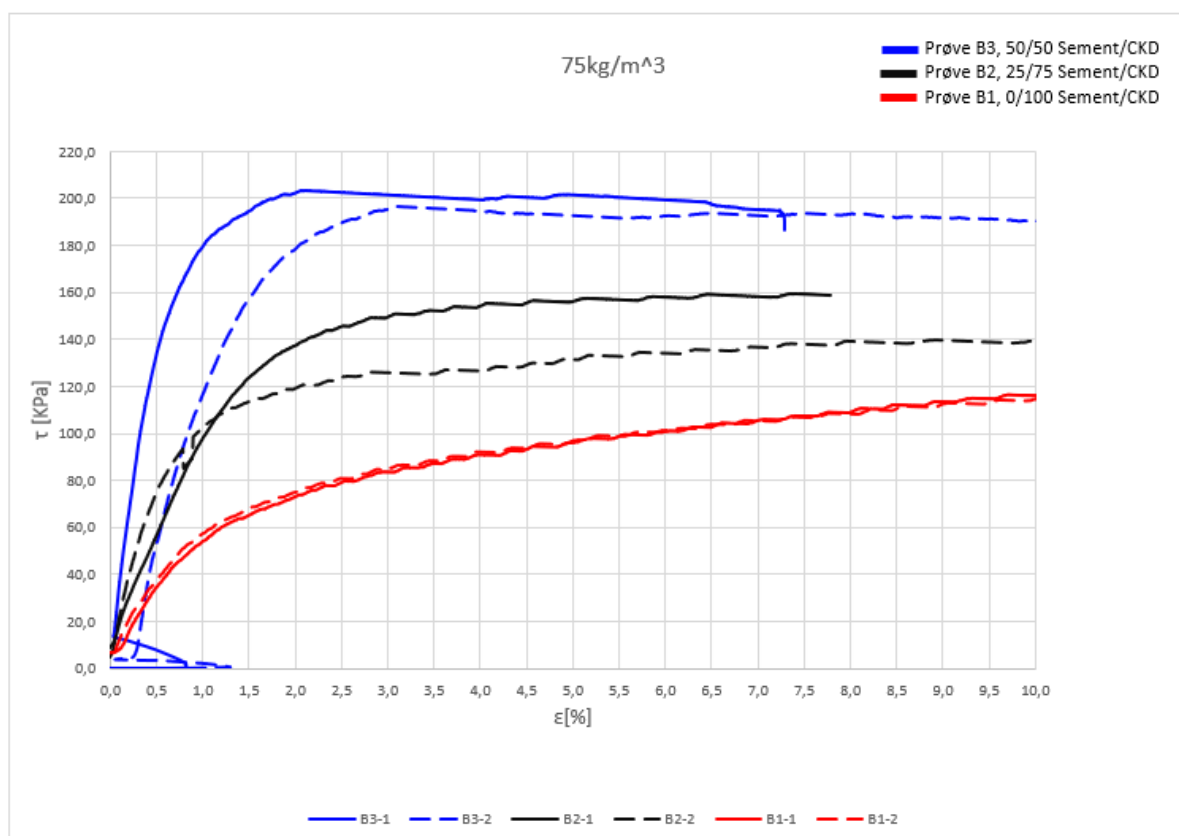
Resultatene for prøveserien B er presentert i tabell 5.10, 5.11, og figur 5.11. Resultatene tenderer likt som prøveserie A. B3-1 og B3-2 når sin bryddstyrke relativt fort for deretter å flate ut. B2-1 og B2-2 ligner på B3-serien men oppfører seg seigere og når ikke sin maksstyrke før 5% tøyning og utover. B1-serien oppfører seg veldig likt med hverandre, og når ikke sin toppstyrke før testen avsluttes ved 10% tøyning.

Prøve	γ [KN/m ³]	w [%]	τ_{max} [KPa]	$\epsilon_{\tau_{max}}$ [%]	E50[MPa]
B1-1	15,5	40,0	125,4	10	4,8
B1-2	15,9	40,0	119,3	10	6,0
B2-1	16,1	39,3	160,1	7,0	10,3
B2-2	16,1	39,3	141,6	11,2	14,2
B3-1	16,2	36,7	203,3	2,0	30,8
B3-2	16,4	36,7	200,0	3,0	16,3

Tabell 5.10: Styrkeresultat fra treksialforsøk B

Prøve	$\tau_{2\%}$ [KPa]	$\tau_{5\%}$ [KPa]	$\tau_{10\%}$ [KPa]
B1-1	73,0	96,2	116,1
B1-2	75,8	97,4	115,1
B2-1	139,0	156,5	159,0
B2-2	119,2	130,6	140,2
B3-1	202,1	201,1	190,3
B3-2	180,2	193	190,7

Tabell 5.11: Styrkeresultat fra treksialforsøk ved 2, 5 og 10% tøyning for prøver med 75Kg/m³



Figur 5.11: Resultat fra treaks for prøver med 75 Kg/m^3

Prøve C

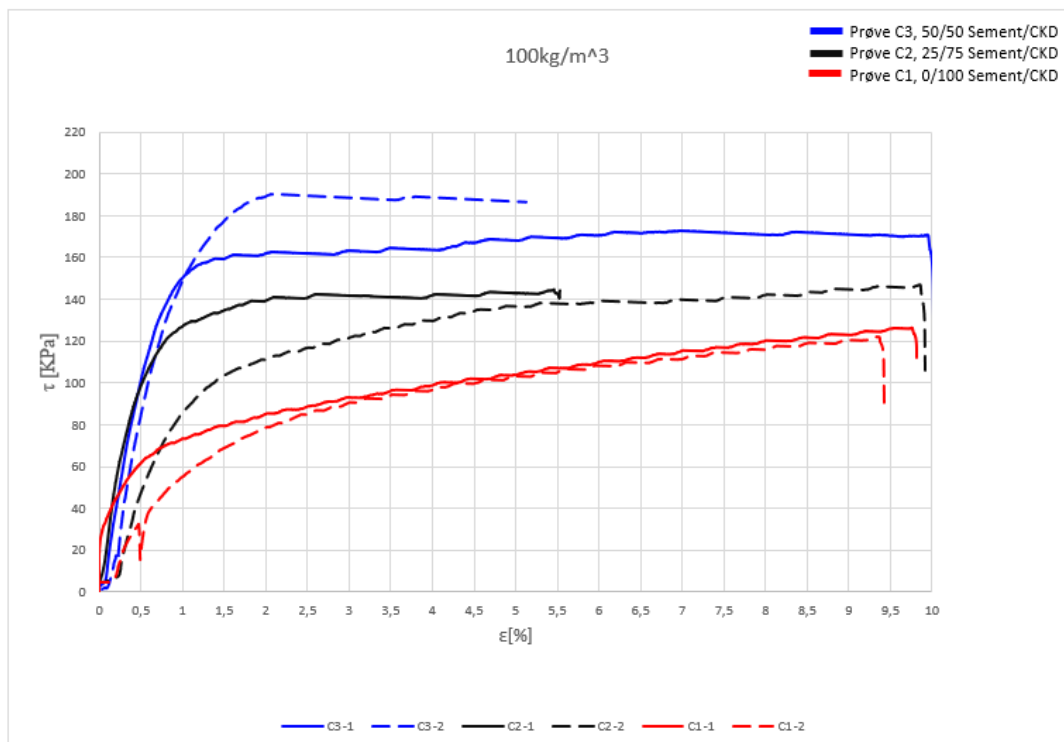
Resultatene for prøveserien C er presentert i tabell 5.12, 5.13, og figur 5.12. I likhet med de tidligere prøvene gir 3-serien høyest styrke. Det svake resultatet fra C3-serien iforhold til B3-serien skyldes blant annet at skribenten ikke hadde det nødvendige utstyret på plass på dette tidspunktet. Dette førte til en mindre tilfredsstillende komprimering av prøven. Oppførselen for serie-3 er derimot lik som for de andre. En når relativt raskt høyest bruddstyrken ved 0,5-1,5% tøyning. Litt senere for C2-serien. C1-serien når ikke sin bruddstyrke før testen avsluttes ved 10%.

Prøve	$\gamma [\text{KN/m}^3]$	$w [\%]$	$\tau_{max} [\text{KPa}]$	$\epsilon_{\tau_{max}} [\%]$	E50 [MPa]
C1-1	16,4	37,8	128,0	10	11,4
C1-2	16,2	37,8	122,2	10	6,0
C2-1	17,2	33,0	144,2	6	23,3
C2-2	17,4	33,0	140,3	10	10,4
C3-1	1,67	-	173,4	10	21,4
C3-2	1,66	-	190,4	5	17,6

Tabell 5.12: Styrkeresultat fra treaksialforsøk C

Prøve	$\tau_{2\%}$ [KPa]	$\tau_{5\%}$ [KPa]	$\tau_{10\%}$ [KPa]
C1-1	85,3	104,0	124,1
C1-2	78,4	103,2	115,2
C2-1	139,0	142,7	143,9
C2-2	111,3	136,8	145,6
C3-1	162,0	168,0	160,7
C3-2	189,1	186,7	186,4

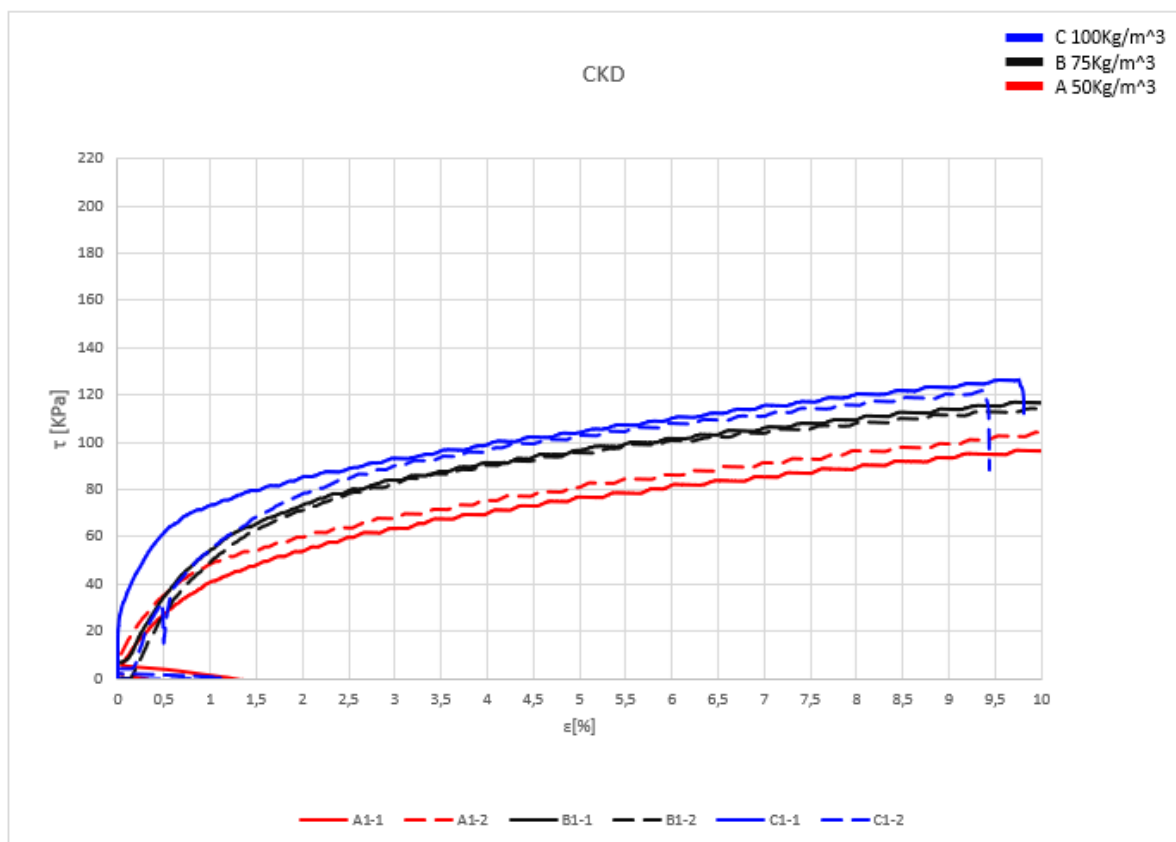
Tabell 5.13: Styrkeresultat fra treaksialforsøk ved 2, 5 og 10% tøyning for prøver med $100\text{Kg}/\text{m}^3$



Figur 5.12: Resultat fra treaks for prøver med $100\text{Kg}/\text{m}^3$

5.2.1 Prøver testet med 0/100 Sement/CKD

Liten spredning av skjærstyrken. Ingen av prøvene gikk til brudd før testen ble avsluttet.

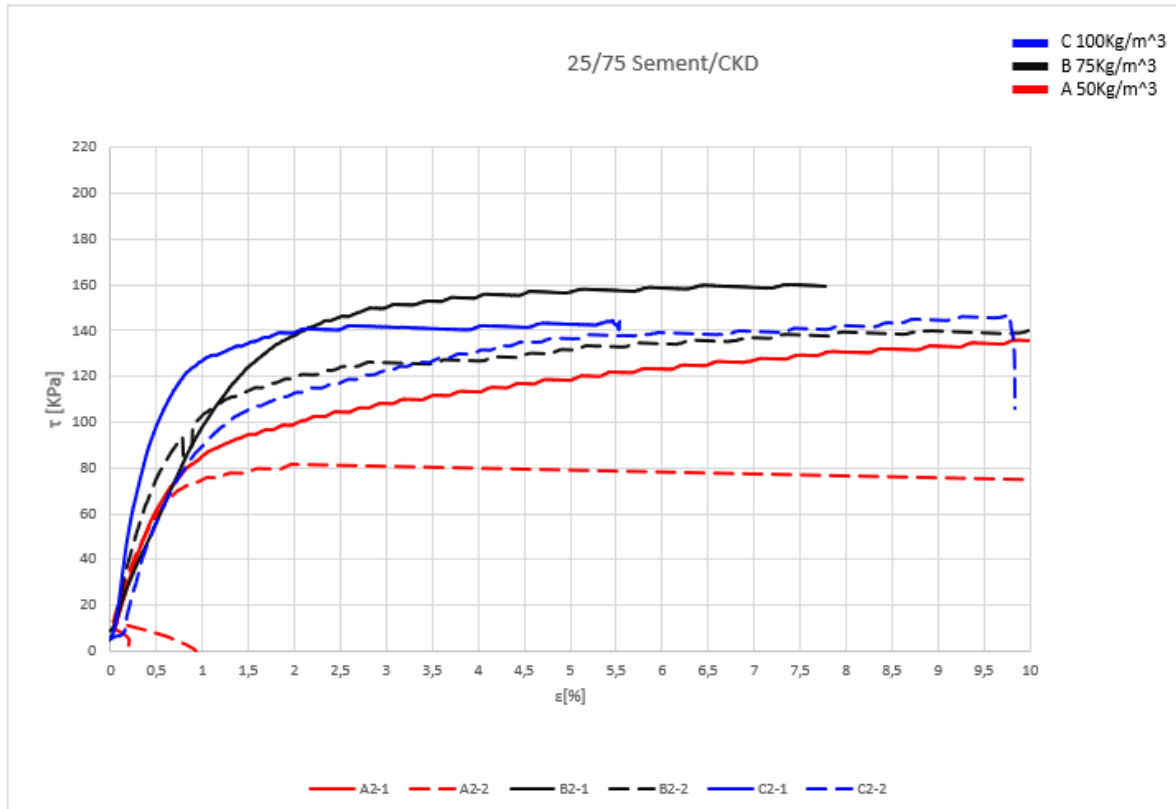


Figur 5.13: Sammenligning for blandeforhold 0/100

5.2.2 Prøver testet med 25/75 Sement/CKD

Større spredning. Prøve A2 avviker fra resten av resultatene og betraktes ikke videre.

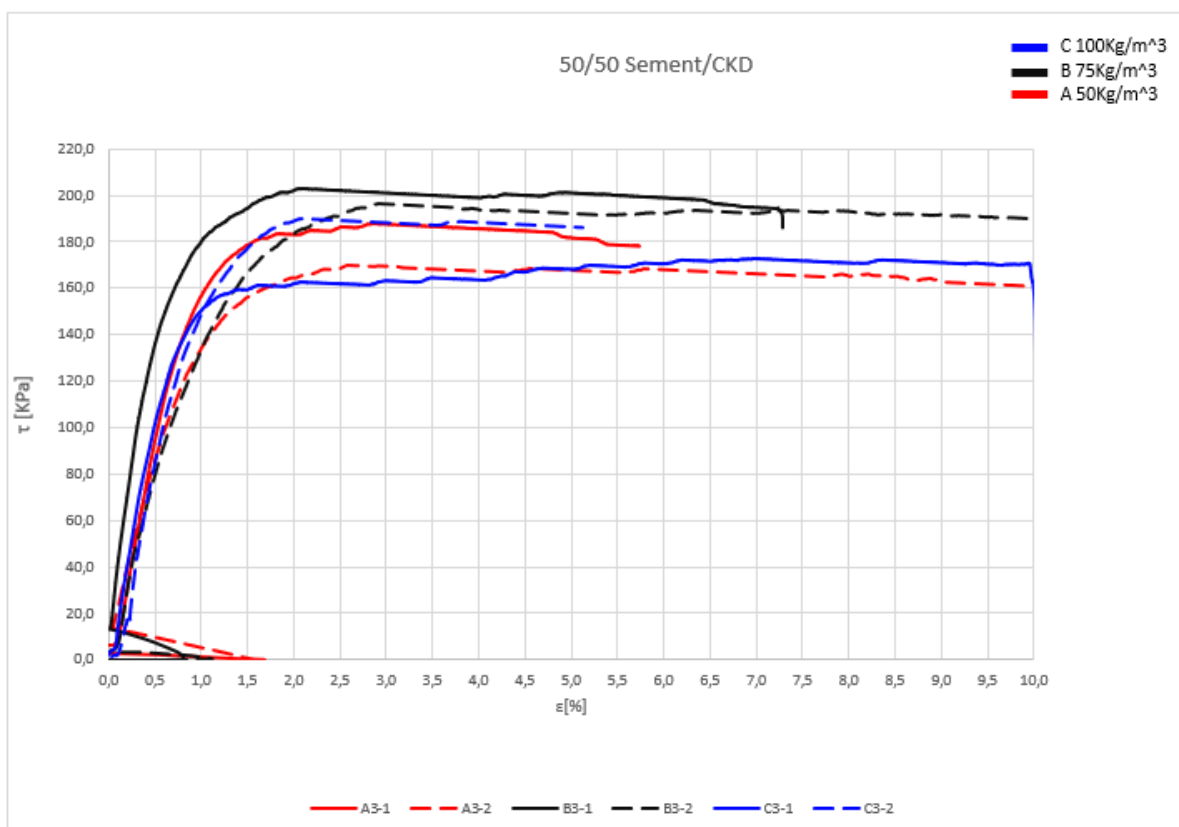
Relativ stort avvik mellom B2-1 og B2-2 på 20KPa.



Figur 5.14: Sammenligning for blandeforhold 25/75

5.2.3 Prøver testet med 50/50 Sement/CKD

Størst spredning av resultatene. B3 gir størst styrke. Alle prøvene oppnår høy styrke ved 2% tøyning. Størst forskjell mellom serie A og B med en forskjell på 40KPa.



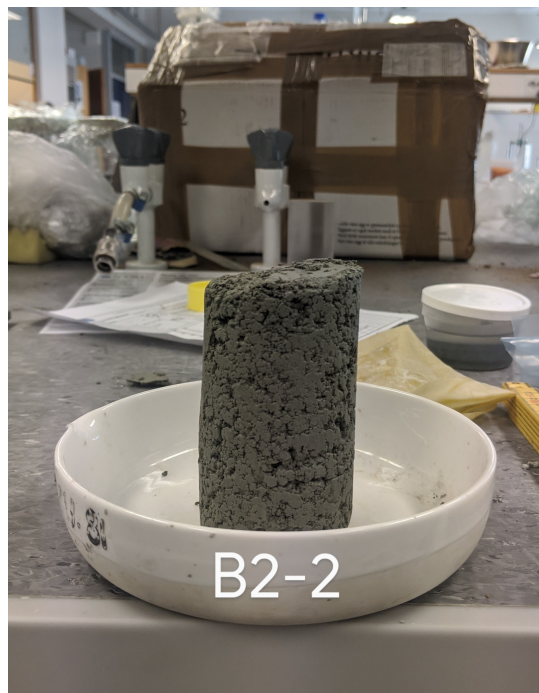
Figur 5.15: Sammenligning for blandeforhold 50/50

5.2.4 Bruddform

Alle prøvene som ble testet viste duktil oppførsel ved et celletrykk på 100KPa. Dette stemmer godt overens med resultatene fra Ingrid Engeset (2018). Ingen av prøvene viste synlig bruddform, se figur 5.16.



(a) Prøve før test

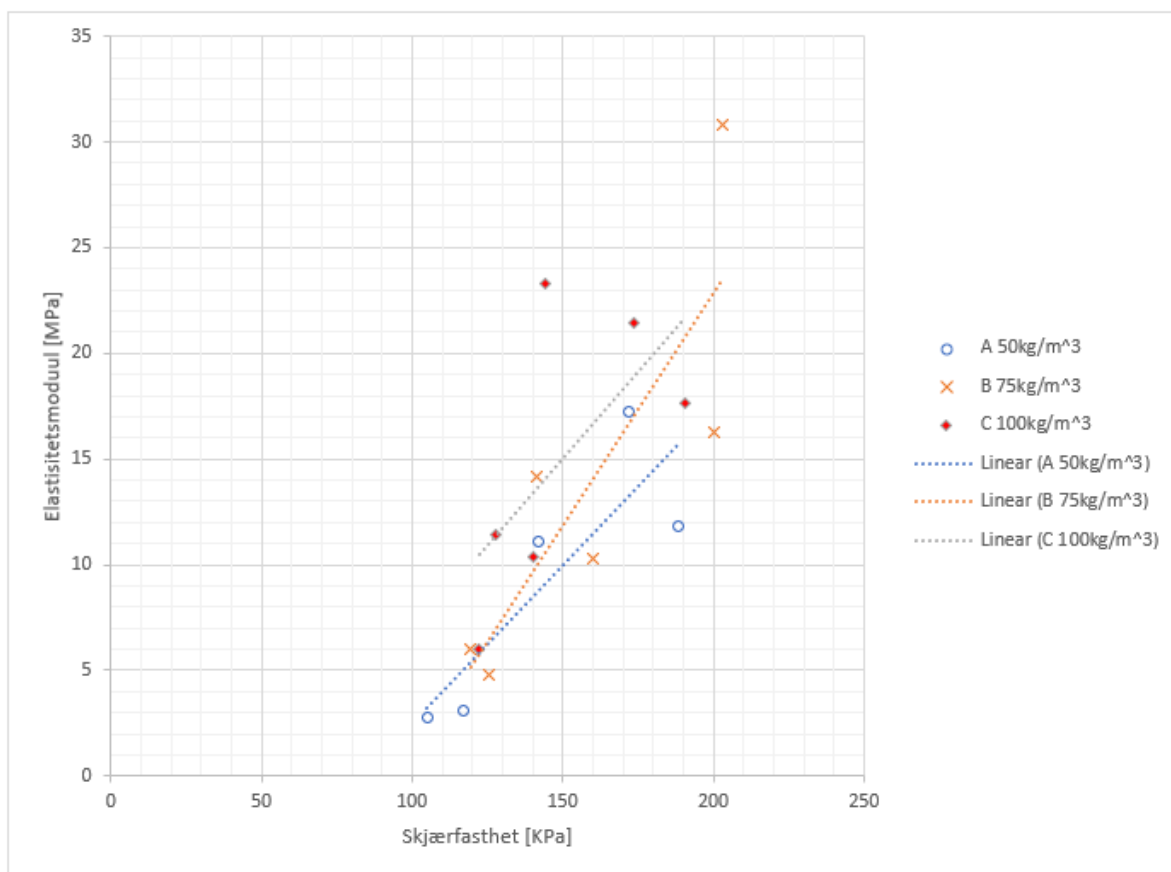


(b) Prøve etter test

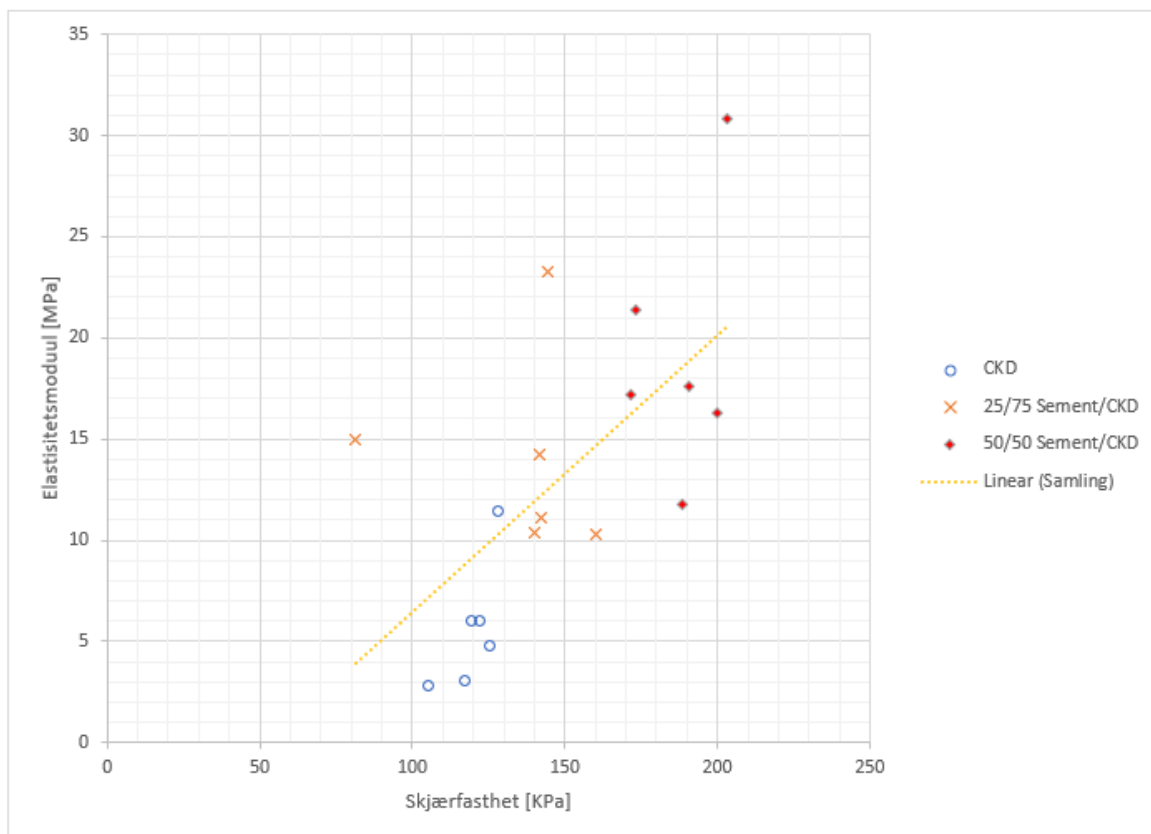
Figur 5.16: Bruddform

5.2.5 E-modul

Resultatene for E-modulen er presentert i tabellene ovenfor. Det er valgt å beregne E-modulen ut i fra max skjærstyrke. Observert for prøvene kun innblandet med CKD er E-modulen betydelig lavere. Her oppfører kurven seg duktil. Figur 5.17 viser en lineær trend mellom E-modulen og skjærfastheten. Verdien fra A2-2 er ikke tatt med. Det er valgt å inkludere to forskjellige figurer. Figur 5.17 illustrer sammenhengen for innblandingsmengden, mens figur 5.18 illustrerer sammenheng for blandeforhold.



Figur 5.17: E-modul mot skjærfasthet inndelt i innblandingsmengde



Figur 5.18: E-modul mot skjærfasthet inndelt i blandeforhold

5.3 Temperaturutvikling

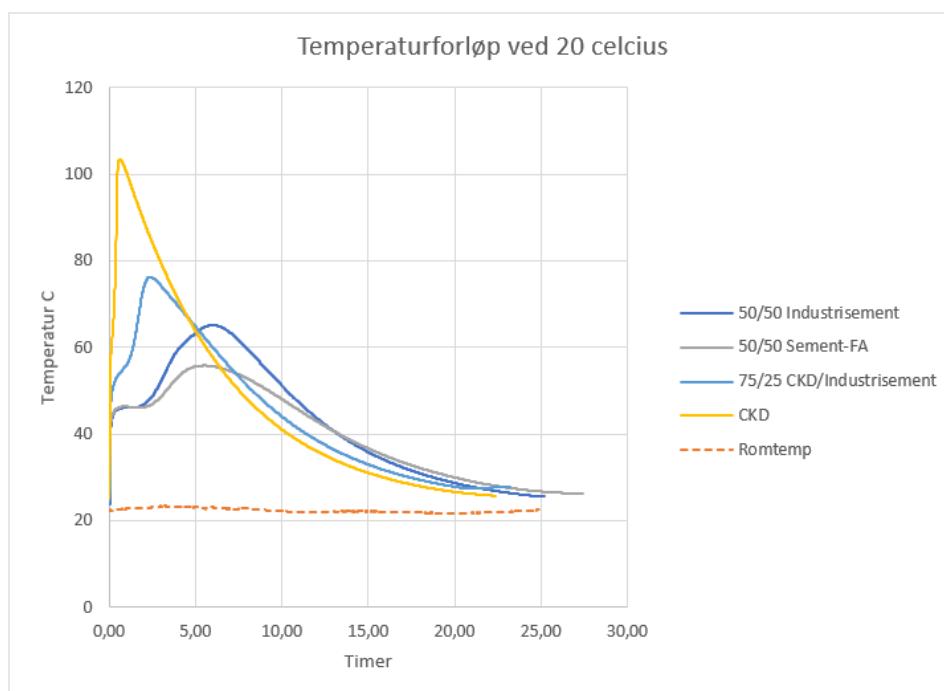
Nedenunder presenteres temperaturutviklingen for sementblandinger ved 8 °C og 20 °C. Alle prøve er blandet inn med et V/C-tall på 0,5.

5.3.1 Resultat fra romtemperatur ved 20 °C

MC-ind og MC-FA oppfører seg ganske likt. Grunnen for at FA har en lavere max-temp skyldes Flygeasken. CKD-blandingen får en bemerkelsesverdig høy temperatur på over 100 °C. Dette var rimelig interessant, og understreker den enorme varmen som produseres når dette materialet reagerer med vann.

Prøve	Max temp[celcius]	Tid til max temp nådd[timer]
MC-Ind(50/50)	65	5
MC-FA(50/50)	55	5
MC-Ind(75/25)	72	3
CKD	103	1

Tabell 5.14: Resultater fra temperaturmålinger ved 20 °C. Blandeforhold CKD/Sement



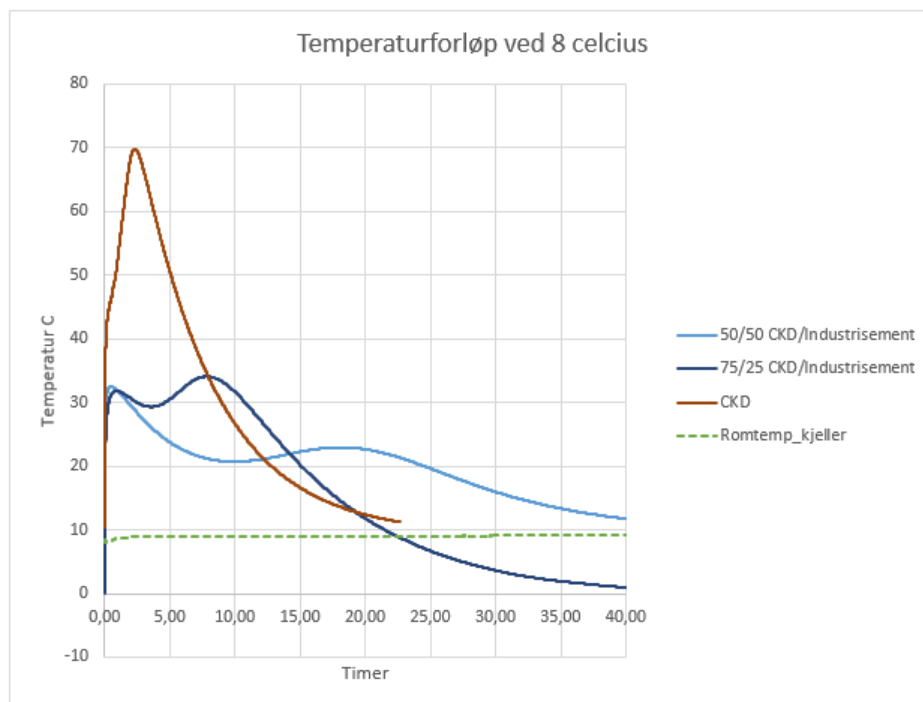
Figur 5.19: Temperaturutvikling ved 20 °C

5.3.2 Resultat fra romtemperatur på 8 °C

Som følge av en lavere temperatur oppstår alle reaksjonene og utviklingen av temperatur mye saktere. I tillegg ser det ut til temperaturen ikke oppnår like høy ΔT som for 20 °C.

Prøve	Max temp[celcius]	Tid til max temp nådd[timer]
MC-Ind(50/50)	33	1
MC-Ind(75/25)	44	8
CKD	70	2

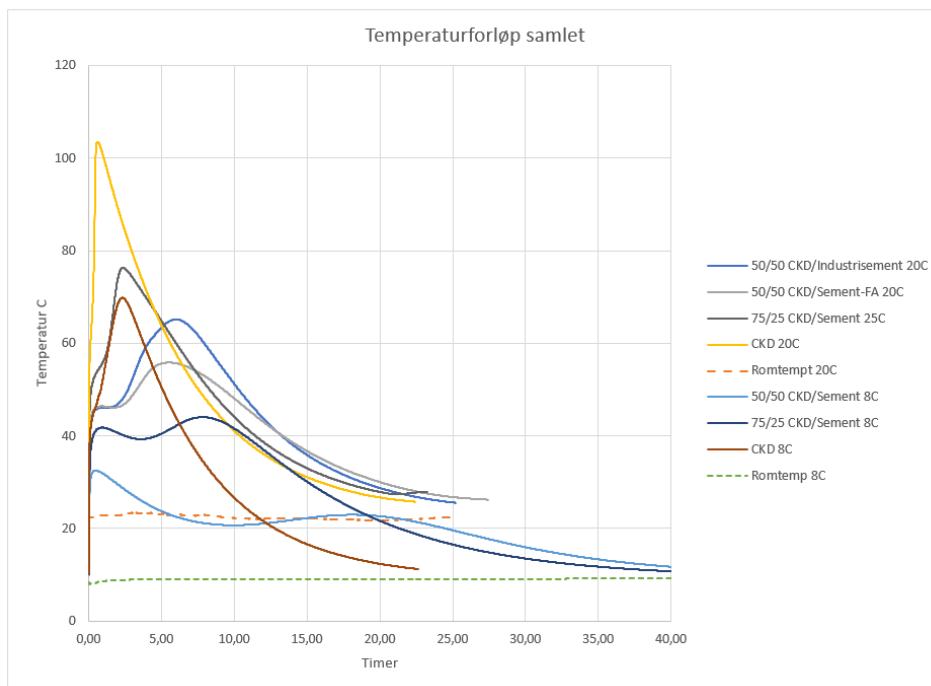
Tabell 5.15: Resultater fra temperaturmålinger ved 8 °C. Blandeforhold CKD/Sement



Figur 5.20: Temperaturutvikling ved 8 °C.

5.3.3 Samlede resultater fra temperaturmålinger

Lavere temperaturøkning og dempet reaksjon for prøver testet ved 8°C. Det tok ca 20 timer lengre før temperaturen når romtemperatur for prøver testet ved 8 °C enn for 20°C. 50/50 blanding med sement-FA ble ikke testet ved 8°C.



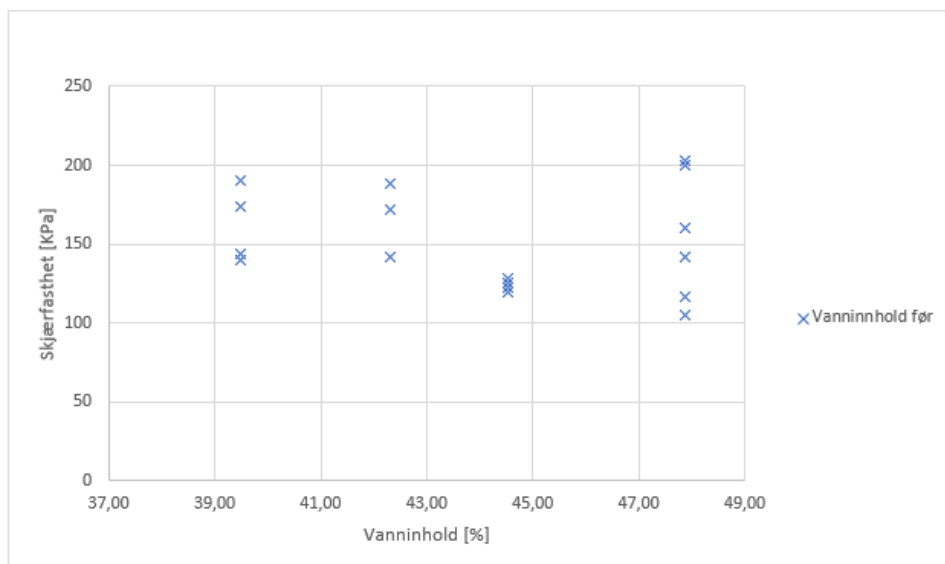
Figur 5.21: Samlede resultat temperaturmålinger ved 8, og 20 °C.

6 Diskusjon

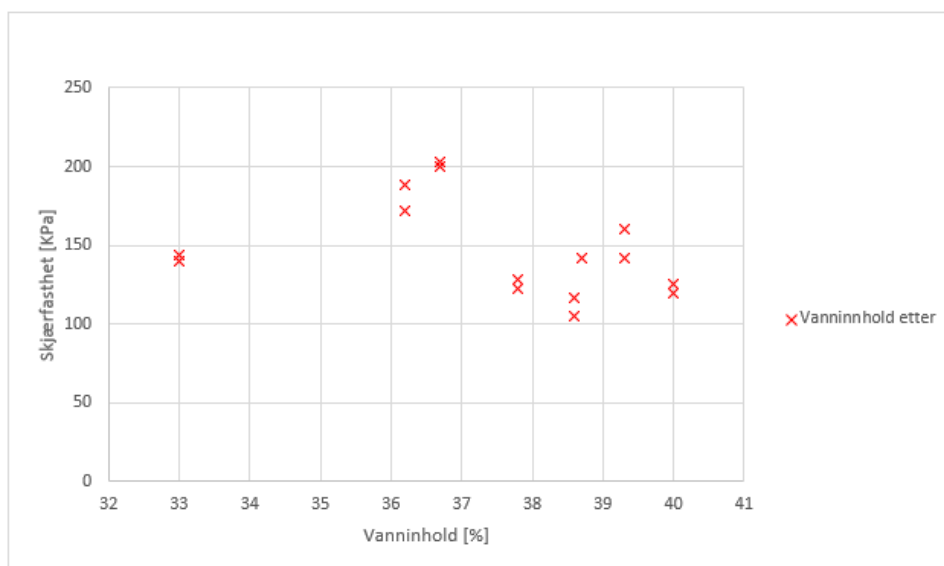
6.1 Rutineundersøkelser

6.1.1 Vanninnhold

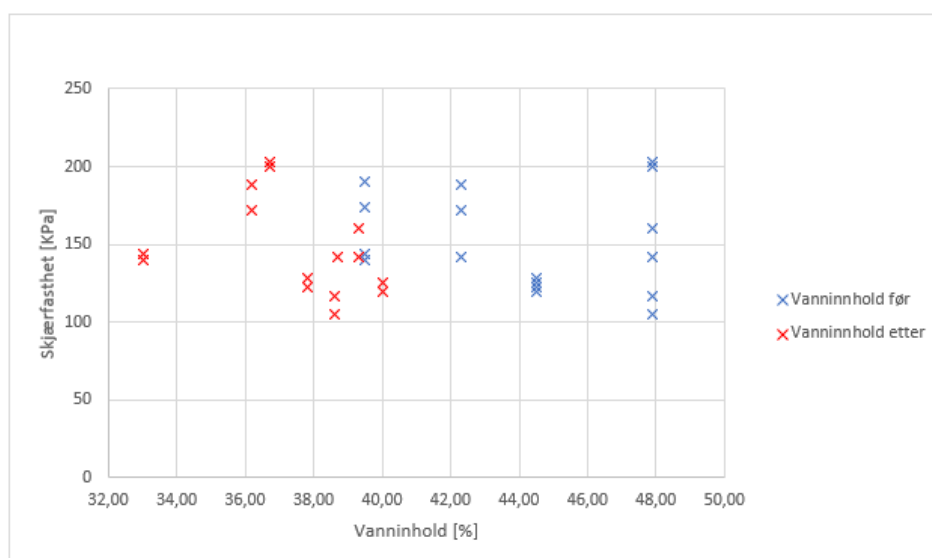
Vanninnholdet i leiren varierte med ca 8%. Fra 39,5% i prøve C3 til 47,9% i prøve A1. Det er tidligere nevnt at vanninnhold har utslag på prøvens styrke, og bør tas i betraktning når en ser på resultatene. Observert for C3 og C2 var vanninnholdet lavt, og vanninnholdet etter innblanding lå på det laveste. Forsøk fra tidligere tester indikerer at ideelt vanninnhold ligger på 35%, og styrken blir svakere ved økende vanninnhold. Leiren benyttet har et høyere vanninnhold enn det som regnes som ideelt. For lavt vanninnhold kan også påvirke styrken og innblandingen. Figur 6.1 og 6.2 viser sammenhengen mellom skjærfasthet og vanninnhold både før og etter innblanding, men gir ingen tydelig indikasjon på sammenhenget mellom vanninnholdet og skjærstyrken. Dette skyldes blant annet forskjellen mellom blandeforholdet som påvirker vanninnholdet. Figur 6.2, indikerer svakt at skjærstyrken minker med økende vanninnhold i prøven. For en bedre indikasjon om sammenhengen mellom vanninnhold og skjærstyrke trengs det å utføres flere tester med færre variabler enn det som har blitt gjort for denne oppgaven.



Figur 6.1: Korrelasjon mellom vanninnhold og skjærfasthet



Figur 6.2: Korrelasjon mellom vanninnhold og skjærfasthet



Figur 6.3: Korrelasjon mellom vanninnhold og skjærfasthet samlet

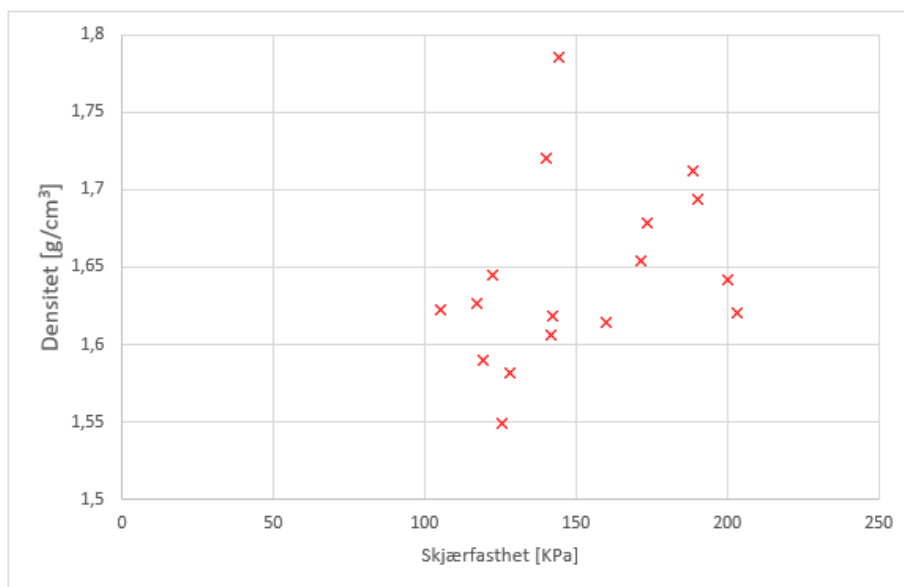
6.1.2 Densitet

Metoden benyttet for innblanding og innbygging har vært varierende. Det er generelt mindre spredning mellom prøver av likt blandeforhold og innblandingsmengde. C3 sin lave densitet skyldes blant annet mangel på riktig komprimeringsutstyr. Og det ville vært forventet en høyere densitet for C3 enn C2 i dette tilfelle. serie-1 med ren CKD oppnår lavest densitet etterfulgt av 2 og så 3. Dette påvirker også styrken til materialet. En mer kompakt prøve vil gi en høyere skjærstyrke. Med kun CKD er det desverre ikke mulig å

oppnå like kompakte prøver som for 50/50 CKD/Sement.

I tillegg ble det utført målinger før og etter herdeperioden på 30-32 dager. Her er forskjellen fra før og etter nesten minimal. Dette gir en god indikasjon på at prøvene ikke har tørket ut, men heller bevart mye av vannet. Største endring er for C2-2 der prøven faktisk øker densitet med 2,8%. Årsaken til dette kan være så enkelt som feil avlesning, eller dårlig innpakning.

I sammenheng med skjærfasthet ser en på figur 6.4 at det er en korrelasjon mellom densiteten og skjærfasthet. Høyere densitet resulterte ved disse forsøkene høyere skjærstyrke. Dette kommer blant annet som følge av at prøver med mer CKD var vanskeligere å komprimere, samt CKD representerer et materiale som i seg selv er svakere enn sement. At densiteten for CKD var lavere på lab trenger ikke å bety lavere i felt. Forholdene for komprimering og innblanding er veldig annerledes, og bør tas høyde for i fremtidige eksperimenter. I felt vil prøvene ha samme densitet som resten av massen i bakken. Dette kan utgjøre stor forskjell på styrken målt i lab. Densitet en fikk i lab på ca $1,6g/cm^3$ er mye lavere iforhold til det en får insitu på $1,8 - 1,9g/cm^3$. Se også kapittel 6.2.4



Figur 6.4: Korrelasjon mellom densitet og skjærfasthet

6.2 Treaks

6.2.1 Skjærfasthet

Resultatene fra treaksforsøkene viser entydig at en blanding med 50/50 sement/CKD gir høyest skjærstyrke. Mer overraskende er det at B3($75\text{Kg}/\text{m}^3$) gir høyest skjærstyrke framfor C3($100\text{Kg}/\text{m}^3$), se figur 5.15. Det er blitt tidligere nevnt at C3 ble litt dårligere innblandet. Uansett til tross for det ser en ved alle tilfeller at serie B enten gir lik eller høyere skjærstyrke enn serie C. Dette kommer fram i figur 5.14. Grunnen til den høyere skjærfastheten til serie B skyldes muligens dens evne til å blandes inn og komprimeres. Med større innblandingsmengde som serie C har, kan prøvene blir mer klumpet og porøs. Dette gjør det dermed vanskeligere å oppnå en optimal kompaksjon av prøven.

Ser en nærmere på figur 5.14(25/75 Sement/CKD) ser en relativt liten forskjell mellom styrken basert på innblandingsmengde, med unntak av B2-1 som har en skjærstyrke på 20KPa mer enn resten, se figur 5.15. Det er derimot en betydelig forskjell på styrken fra 50/50 til 25/75, og enda større hopp til serie 1(0/100). Forskjellen mellom serie 3 og serie 2 er på ca 40-50 KPa. Dette indikerer blant annet at styrkefaktoren som sement medbringer er viktig for materialets evne til å komprimeres.

Serie 1(0/100 sement/CKD) figur 5.13 viser en tydelig duktil kurve for alle testene. Ingen av prøvene gikk til brudd eller viste tendens til å flate ut. I tillegg er det tilsynelatende rimelig svak skjærstyrke ved 2% tøyning iforhold til serie 2, og 3. Sammenlignet blir det tydelig at sement har en stor effekt på styrken. Selv med 25% sement blir styrken fremhevet med 30-40KPa mer, enn for kun CKD alene. Dessuten oppnår prøvene en høyere skjærstyrke ved lavere deformasjon. Til tross for dette trengs ikke bruk av CKD utelukkes fullstendig. For mange prosjekter relatert til f.eks utgravinger kan styrken CKD bidrar til være tilstrekkelig nok til å unngå ras/utglidning. I tillegg er fastheten en del lavere, som bidrar faktisk til lettere håndterbarhet av materialet for gravemaskiner og personell.

En positivt indikasjon fra disse resultatene er at innblandingsmengden ikke nødvendigvis trenger å være $100\text{Kg}/\text{m}^3$ for å oppnå den høyeste styrken. Resultatene fra figur 5.15 og 5.14 indikerer at innblandingsmengden har mindre å si for styrken enn antatt. Innblandingsmengden på $75\text{Kg}/\text{m}^3$ fremstår som bedre enn $100\text{Kg}/\text{m}^3$. Ved å benytte isåfall $75\text{Kg}/\text{m}^3$ reduseres utslippet med 25%. Dette utgjør en stor forskjell i det store

bildet og bør testets grundigere. Ser en også grundigere på feltresultatene fra E18(E7) er det ikke urimelig at normen for anbefalt innblandingmengde bør ligge nærmere $75Kg/m^3$ og $50Kg/m^3$ for kvikkleire med høy sensitivitet.

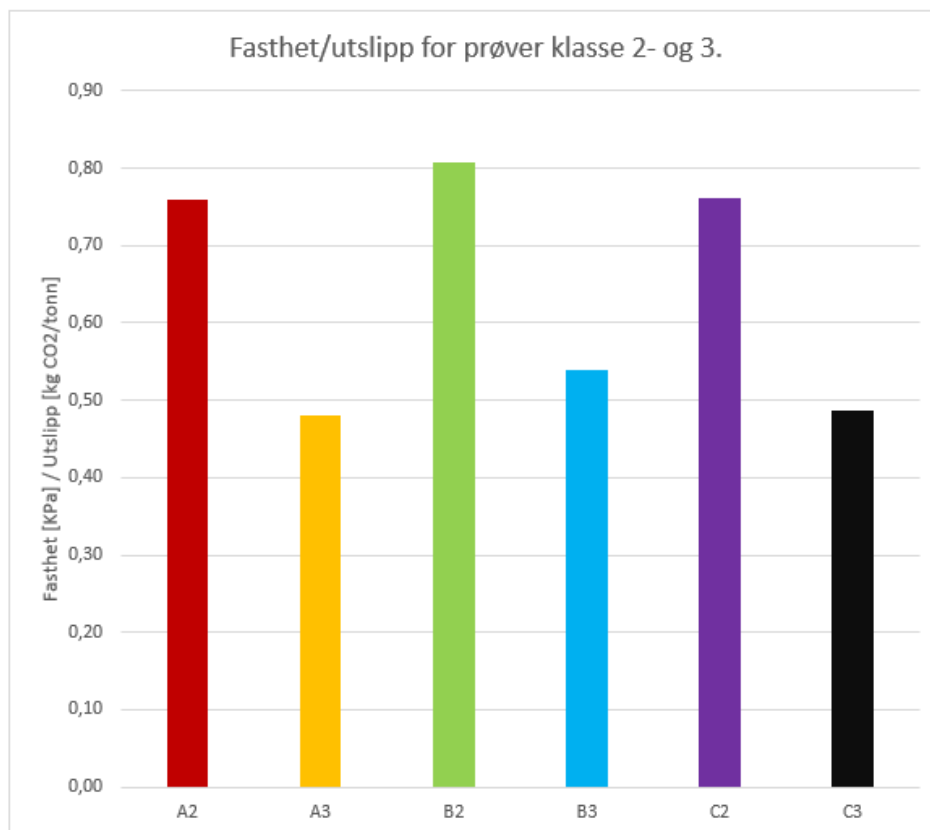
6.2.2 E-modul

Resultatene fra E-moudul beregningen indikerer sammenheng med blandeforholdet og E-modulen. Prøvene med mest sement hadde høyest E-modul5.18. Figur 5.17 illustrerer videre at de høyeste tallene for E-modul kommer fra innblandinger for prøver med $100Kg/m^3$. For noen av prøvene er det stor spredning, f.eks B3-1 og B3-2 der forskjellen er på 14,5MPa. Likevel indikerer resultatene at Sement/CKD forholdet går lineært med E-modulen.

Ikke overraskende viser prøvene med ren CKD lavest fasthet. En av grunnen for at dette benyttes sammen med sement er at det bidrar til mer seige, og mindre porøst materiale. Dette er hensiktsmessig hvis en konstruere utgravinger eller byggegroper etterpå.

6.2.3 Forhold mellom CO_2 -utslipp og fasthet

Miljøpåvirkningen dette materialet har er sett på som veldig viktig under denne masteroppgaven. Det er derfor valgt å beregne et forholdstall mellom fasthet og utslipp. Max skjærfasthet deles på CO_2 -utslippet per tonn bindemiddel. Resultatet er vist på figur 6.5. Prøvene med kun CKD er ikke inkludert, fordi det ville gitt uendelig høyt forholdstall. Prøve B2 framtsår som det mest miljøvennlige alternativet, med A2 og C2 ikke langt unna. Denne klassen har som kjennetegn at de alle er av blandeforholdet 25/75 sement/CKD. Gjennomsnittlig hadde A2,B2 og C2 en maks skjærstyrke på 140KPa ved 10% tøyning, og rundt 110-120KPa ved 2% tøyning. Hvis detter er tilstrekkelig styrke for et byggeprosjekt kan en reduserer en CO_2 utslippet med 50%. 25% mindre utslipp ved å benytte 25/75 sement/CKD, og 25% mindre utslipp ved å benytte $75Kg/m^3$ framfor $100Kg/m^3$.



Figur 6.5: Forholdstall mellom fasthet og CO_2 -utslipp per tonn bindemiddel

B3($75Kg/m^3$) gav høyest forholdtall for prøver blandet inn med 50/50 Sement/CKD. B3 og C3 gav begge tilsvarende lik styrke. En reduserer imidlertid utslippet med 25% ved å benytte B3. Dette bør tas med i betraktning for videre prosjektering og testing.

6.2.4 Treaks vs enaks

Tiller-Flotten

Det ble i oppstarten lenge lurt på om treaks gav større styrke enn enaks. Mye teori indikerer det for leirprøver. Derimot indikerte blant annet ikke resultatene at det var slik sammenlignet med Sivert Eidsmo (2019). Sivert Eidsmo (2019) resultater ligger på over 100KPa for nesten samme prøvesett med Treaks. Dette gjelder blant annet for prøve C3 og C2. Forskjellen kan ligge i innblanding, herdeforhold eller komprimering. Forskjellen kan også ligge i deformasjonshastigheten. For (Sivert Eidsmo, 2019) sine prøver var deformasjonshastigheten for enaks satt på 1,5mm/min. Dette er stor forskjell fra en treaks som ble satt til 0,05mm/min. Generelt for sprø materialer som KS-stabilisert leire øker

fastheten og flytekurven med høyere tøyningshastighet framfor lav (Oset, 2014)(Hao og Tarasov, 2008). Det bemerkes at det er mulighet for at disse prøvene har tørket betraktelig mer ut enn de for treaks. Dette har mye å si for oppnådd styrke. Se figur 6.6.



(a) Prøve B3-2 før skjærttest



(b) Prøve fra Sivert, $60\text{Kg}/\text{m}^3$ med 50/50 Multicem etter enaks skjærttest

Figur 6.6: Sammenligning av prøve bygd i 2020 mot Sivert's prøve bygd i 2019.

Sammenligner en disse prøvene ser en rimelig stor forskjell. Prøve B3-2 framstår som mer porøs og mindre solid. Alle prøvene for skribenten framstår slik, i motsetning til Sivert's som framstår som mer komprimert og solide. I tillegg oppnådde Sivert en rimelig større densitet for hans prøver. Med ca $0,1 - 0,15\text{g}/\text{cm}^3$ høyere densitet for prøver med nesten tilsvarende likt blandeforhold og innblandingsmengde.

Hvorfor forskjellen er så stor er uvisst. Innblandingsprosedyren er fulgt etter standard og skal være lik for begge tilfellene. Forskjellen kan ligge i f.eks mengde leire innblandet per sesjon. Skribententent benyttet seg av 1Kg leire for å to prøver. Men i Sivert's tilfelle var 1,5kg benyttet for å lage tre prøver. Feilen kan også ligge i at skribenten mulig har tatt for store klumper av materialet per innstamping. En annen årsak kan være at trykket for maskinene benyttet for innstamping kan ha vist feil. Enten for lavt for skribenten, eller for høyt for Sivert.

Enaksiale trykkforsøk er en rask og enkel metode, som avdekker fort forskjell på styrken for ulike bindemidler, men er kanskje ikke like treffsikker når det gjelder å determinere faktisk skjærstyrke insitu. Dette gjør det vanskelig å sammenligne med tidligere enaksresultater.

E18 Vestkorridoren, Lysaker -Ramsdalsletta

Resultater fra blant annet forsøk fra NGI-lab utført med leire fra Ramsdalssletta på vegne av Geovita og Statens Vegvesen viser til at styrken ved treaks er større enn for enaks ved alle tilfeller av innblandingsmateriale og innblandingsmengde. Se vedlegg E.

Under sammenligning tas det hensyn til blant annet jordparametere og celletrykket for treaks. Leiren testet er i likhet med leiren på Tiller-Flotten klassifisert som kvikk, med høy sensitivitet. I tillegg er tyngdetettheten rimelig lik ($18\text{KN}/\text{m}^3$). Leiren fra E18 fremstår som mindre fast, ser en på Su-profilet mot dybde for de to type leirene. Videre har prøvene blitt testet ved to forskjellige celletrykk, 70KPa og 130Kpa, som er ment å simulere 7,5m og 15m insitu. Prøvene for E18 testet med 1,5% tøyningshastighet. Halvparten av hva som ble testet på NTNU. Prøvene fra E18 er herdet ved 21 grader. Resultatet er presentert i figur 6.7 nedenfor.

$\sigma_{p,brudd}$	$= 2 \cdot \tau_p + K_p \cdot \sigma_H$		
$\gamma_{materiale}$	18 kN/m ³	ca gjennomsnitt fra V_520	
GV nivå	1 m	meter under terreng	
K_p	3,5	Antatt, basert på anbefaling fra KS veilederen fra NGF 4.5.1.2	
τ_p	175 kPa	Antatt maksimalverdi for ribber, SVV HB 221	
E-modul	$= X \cdot \tau_p$		
X	200		
X	400		
X	600		

Dybde [m]	σ_H [kPa]	σ_H' [kPa]	$\sigma_{p,brudd}$ [kPa]	SGI anbefalt		
				200* τ_p E-modul [MPa]	400* τ_p E-modul [MPa]	600* τ_p E-modul [MPa]
0	0	0	350	35	70	105
7,5	135	70	823	35	70	105
15	270	130	1295	35	70	105

SEMI										
Forsøk	innblanding 50/50 SEM I [kg]	konsoliderin gstid [dager]	p0 [kPa]	Dybde [m]	Skjærspennin g ved brudd [kPa]	Vertikal spennin g ved brudd [kPa]	Aksiel tøyning ved brudd [%]	Aksiel tøyning ved halv brudd [%]	skjærspennin g [kPa]	E50 [Mpa]
enaks	75	28	0,0	0,0	149,5	299,1	5,6	1,5	20,4	
treaks	75	28	127,6	7,5	189,1	505,9	5,0	0,4	88,0	
treaks	75	28	265,5	15	198,0	661,5	4,1	0,3	157,9	
enaks	75	60	0	0	208,8	417,6	3,8	1,2	36,2	
treaks	75	60	127,6	7,5	316,1	759,8	5,0	0,5	130,2	
enaks	40	28	0,0	0,0	110,8	221,5	3,4	1,0	22,5	
treaks	40	28	127,6	7,5	119,5	366,7	5,1	0,4	54,1	

Figur 6.7: Utklipp fra forsøksrekke utført for Ramsdalsletta-E18 prosjektet

Det er et fåtall blandinger som kan sammenlignes med E18-prosjektet. Dette gjelder blant annet B3 og A3. B3 og blandingen fra SEM1 er helt identisk i innblandingmengde, bindemiddel og blandeforhold. Resultatene for SEMI (Portlandsement/CKD) oppfører seg veldig likt som B3 testet på NTNU. B3 oppnår en litt høyere styrke med ca 10 kPa. Dette er trolig fordi prøven på NTNU ble testet med et høyere celletrykk. Dette gir god indikasjon på at prøvene testet ved NTNU er godt innblandet og testet riktig. Enaksprøvene fra E18 viser også lavere skjærstyrke for prøvene enn det utført av (Sivert Eidsmo, 2019). Enaksresultatene gir en styrke som ligger rundt 150 kPa. 50 kPa lavere enn det som er oppnådd ved treks.

I tillegg utførte Statens Vegvesen et fåtall tester med 40 kg/m³ Multicem(50/50) for enaks og treaks 6.7. Her er resultatene rimelig lave i forhold til A3 som hadde en skjærstyrke på 50 kPa mer. 10 kg/m³ bør ikke utgjøre så stor forskjell på styrken, men det kan være

mange andre faktorer som spiller inn.

Under sammenligningen oppstod det klare forskjeller som ikke var forventet mellom de ulike prøvene fra 2019 og 2020. Ideelt skulle skribentent selv ønsket å utføre egne enaksforsøk, men desverre strakk tiden og forholdene seg ikke til.

6.2.5 Feilkilder treaks

Temperatur og innblanding:

Herdetemperatur som beskrevet har påvirkning på styrkeresultatet. Siden herdeprosessen tok plass i en kjeller oppstår det variasjoner i kjellertemperatur avhengig av temperaturen ute. Det har dermed blitt logget temperatur hver dag i kjelleren når det har vært mulig. Overraskende nok har temperaturen holdt seg veldig stabil rundt 8,7 °C, se figur 4.3

En annen feilkilde som kan forekomme er innblandingen. Innblandingen skjedde ved 8 °C som er mer realistisk, men resultatet avviker mulig mer fra Sivert Eidsmo (2019) fordi hans innblandinger skjedde ved romtemperatur på ca 20 °C. Derimot er prøvemethoden helt forskjellig så en indikasjon på at noe er galt er umulig å se. Det bemerkes blant annet prøvene hadde en tendens til tydeligere lagdeling enn tidligere prøver. Dette kan være med på minke styrken til prøvene. Ideelt hadde vært å ha lik densitet for alle prøvene, dette er derimot vanskelig. Samtidig vil prøver med ulikt blandeforhold og innblandingsmengde gi forskjellig densitet.

Rutineundersøkelser:

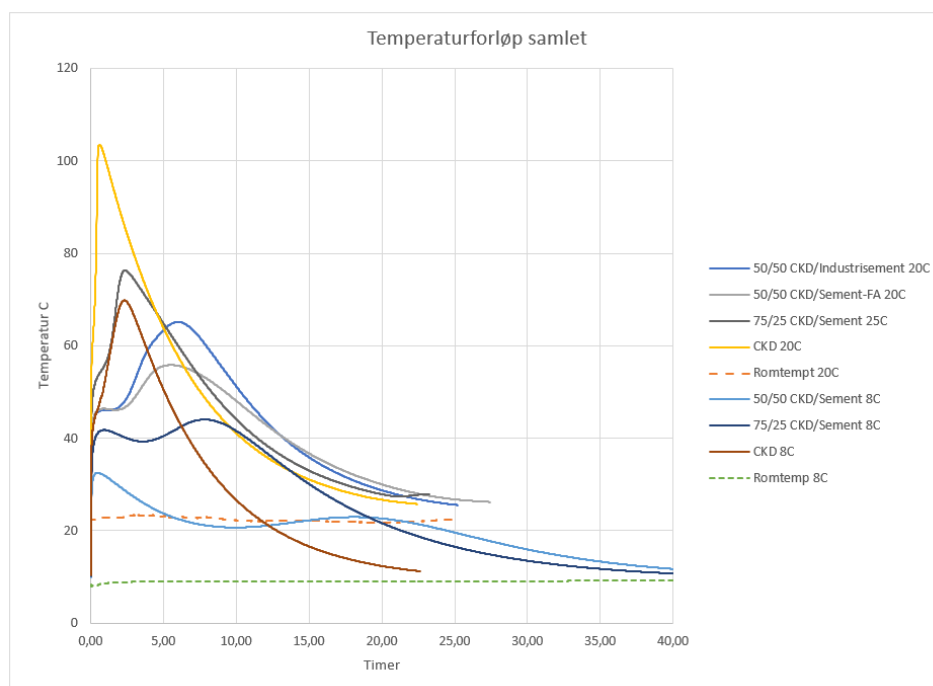
Det ble ikke gjennomført standard rutineundersøkelser. Tyngetettheten ble blant annet antatt til å være rundt $1,85 \text{KN}/\text{m}^3$ basert på tidligere forsøk fra samme dybde og området. Av rutineundersøkelser, så var det kun vanninnholdet som var mulig å beregne på den tiden. Mangel på utstyr til å skyve leiren ut fra sylindere medførte til at en var nødt til å manuelt presse ut leiren selv. Dette førte til at leiren ble helt kvikk. Derfor kunne blant annet tester som konustest og tyngdetetthet ikke gjennomføres. Leiren ble benyttet utover et par dag per sylinder. Imellomtiden stod forstyrret leire i en lukket bølge med plast over før den ble benyttet.

Treaks

Det kan være mange underliggende feil under utførelse av treakstestene. Det ble ikke

observert noe uvanlig oppførsel blant prøvene testet, bortsett fra A2-2. Prøvene ble blant annet ikke konsolidert før testing. Dette kan ha effekt på prøvenes styrke, men anses ikke om betydelig nok til å ha utslag på resultatene. Resultatene fra E18-prosjektet oppnår tilsvarende lik styrke som forsøkene gjort på NTNU. Dette kan tyde på at forsøkene på NTNU er gjort riktig.

6.3 Temperaturutvikling



Figur 6.8: Samlede resultat temperaturmålinger ved 8, og 20 °C.

Resultatene fra 20 og 8 °C indikerer at ved lavere temperatur blir reaksjonene dempet. En oppnår blant annet ikke en like høy temperaturøkning ved 8 °C. Samtidig forekommer reaksjonene mye langsommere. Spesielt for testene som inneholder sement. Det observeres blant annet for 50/50 CKD/Sement 8C at retardasjonsfasen tar form mye senere ved 8°C enn ved 20. Dette stemmer godt overens med kjent litteratur (Jacobsen, 2016) hvorav reaksjoner går tregere ved lavere temp. Ved alle tilfeller øker temperaturen i startfasen. Interessante her er at den høyeste temperaturen for 50/50 blandingen ved 8°C blir målt ved starten og ikke ved akselerasjonsfasen og retardasjonsfasen slik vi ser ved 20°C. Samtidig er endringen i initiell temperatur lik ved begge tilfeller, ca 20°C økning ved starten.

Disse resultatene er ikke 100 prosent realistiske fordi de er semi-adiabatiske, men de gir en indikasjon på hvor lenge en har vedvarende temperatur insitu ved lavere innblaningstemperatur. Videre gir testene indikasjon på at ved bruk av kun CKD får en mye mindre vedvarende temperatur, fordi den høyeste temperaturutviklingen skjer ved starten. Skal en så se på effekten av herdetemperatur, er det mulig at ved ren CKD får en et mye høyere temperaturfall enn med bruk av Multicem over en lengre periode.

Veldig interessant er forskjellen mellom 50/50 CKD/sement og 75/25 CKD/sement ved 8 °C. For 50/50 blandingen starter ikke akselerasjonsfasen ikke før enn ved 10 timer, og når sitt toppunkt etter 20 timer. Selv da i beskjeden form i forhold til 75/25 blandingen. En teori kan være at den økte mengden med CKD er med på framskynde prosessen, og sørge for at den går hurtigere og faktisk skjer fullstendig. For 50/50 blandingen virker det som om den lave temperaturen har vært med på å stoppe den interne prosessen av sementen, slik at reaksjonen enten skjer veldig langsomt eller ikke i det hele tatt. For blandingen 75/25 ved 20°C er det ingen synlig akselerasjons- og retardasjonsfase slik vi så ved 8°C og for 50/50 blandingene ved 20°C.

6.3.1 Feilkilder temperaturutvikling

Tatt i betraktning av tempforsøkene er rimelig enkle så betyr det også at det er mindre rom for feilkilder. Men en feilkilde som kan ha stort utslag er innblandingen. Innblandingen ble gjort for hånd. Dette var problemfritt for Multicem(50/50). For blandinger med ren CKD var innblandingen mer krevende. Innblandingen ble gjennomført for hånd. Dette kan ha utslag på nøyaktigheten og påliteligheten til innblandingen. Det ble derfor utført et par parallelle tester med visp for prøver med høyere andel CKD. Resultatet var minimal forskjell for temperaturforløpet.

Det må merkes at disse testene ikke kan relateres 100% til det som skjer insitu i bakken. Dette er kun tester for bindemiddelet. Ideelt sett skulle temperaturen blitt målt for bindemiddelet blandet inn med leire. Videre er målingene gjort i en isoporboks som til tross for forbehold slipper en del varme ut. Det ideelle ville vært å gjort noe lignende som Pernille Wiersholm (2018), der kalksementpeler ble instalert i bakken for å se ha en temperaturlogger i kjernen av pelen.

7 Konklusjon

Basert på resultatene i masteroppgaven kan det konkluderes med at ren form for CKD i leire ikke bidrar til nok styrke sammenlignet med 50/50 sement/CKD, og 25/75 sement/CKD. Bladingen 50/50 sement/CKD gav størst skjærstyrke. Resultatene av eksperimentene tydet det på at blandingen på $75\text{Kg}/\text{m}^3$ gav høyest styrke og ikke $100\text{Kg}/\text{m}^3$ som en kunne forventet i begynnelsen av prosjektet. Blandingene med mer CKD oppnådde maks skjærstyrke ved høy tøyning, i motsetning til prøvene med mer sement. På grunn av CKD's lave evne til å øke styrke, anses det ikke som et aktuelt materiale for stabilisering av kritiske prosjekter med vanskelig grunnforhold. Til tross for dette kan det være aktuelt til bruk i andre prosjekter der det ikke stilles like høye krav til sikkerhet, eller der formbarhet av materiale er en viktigere faktor.

Det var forventet at Treksresultatene fra lab 2020 og enaksresultatene fra Sivert Eidsmo (2019) skulle være sammenlignbare, noe de ikke var. Prøvene hadde flere ulikheter i kompaksjon og densitet. Resultater fra E18-prosjektet tilsier økt styrke med dybde, og at treks gir høyere målt styrke enn enaks.

Fra figur 6.5 kommer det fram at prøve B2, 25/75 Sement/CKD gir høyest fasthet i forhold til CO_2 -utslipp med en styrke på 130-150KPa. Under visse prosjekter kan dette være tilstrekkelig. Benyttelse av $75\text{Kg}/\text{m}^3$ med 25/75 Sement/CKD vil redusere CO_2 -utslippet med 50% iforhold til 50/50 Sement/CKD med $100\text{Kg}/\text{m}^3$.

7.1 Oppsummering

- 50/50 Sement/CKD oppnådde høyest styrke, med $75\text{Kg}/\text{m}^3$.
- CKD bidrar til styrkeøkning, men ikke i stor nok grad til at det kan anses som aktuelt for kvikkleire med høy sensitivitet.
- Prøve B2 var det mest optimal med hensyn til høy fasthet og lavt CO_2 -utslipp.
- Skillet mellom $100\text{Kg}/\text{m}^3$, $75\text{Kg}/\text{m}^3$, og $50\text{Kg}/\text{m}^3$ gav mindre utslag på styrken enn forventet, med $75\text{Kg}/\text{m}^3$ som mest optimal innblandingmengde.
- Treksiale tester gir høyere skjærstyrke enn enaks.

8 Forsalg til videre arbeid

På grunn av Covid-19 ble prøvesettet for denne masteren redusert betraktelig. For en videre masteroppgave bør det gjøres flere tester i det samme området. Samtidig også et ønske om å optimalisere blandeforholdet og innblandingsmengden bedre. Prøveserien B2 bidro til mest optimalt forhold mellom styrke og CO_2 -utslipp. For videre masterstudier anbefales det å utforske dette nærmere. Videre ble alle prøvene testet på 28 dager. I fremtiden ville det vært interessant å utført testing av prøver etter 1, 7 og 14 dager.

I tillegg til treaks har skribenten skrevet mye om varmeutvikling og temperatur for herding. Her finnes det flerfoldige temaer som er interessante å utforske videre. Dette gjelder blant annet:

- Herdetemperatur 20 °C vs 8 °C
- Vedvarende temperatur insitu over 28 dager.
- Forhold mellom temperatur og styrke.
- Varmeutvikling i CKD og Multicem

En interessant løsning for herdetemperatur kunne blant annet vært å simulere faktisk herdetemperatur i bakken på lab. Dette kan blant annet gjøres ved å lage prøver for å så sette det i et kontrollert varmeskap som simulerer temperaturforløpet en får i bakken. Hvis temperaturforløpet har merkverdig påvirkning for disse prøvene kan en spekulere hva som gir høyest herdetemperatur og styrke. Da må en også ta høyde for at blandeforholdet påvirker temperatur og styrke.

Varmeutviklingen til CKD og Multicem er også nyttig å finne ut av. Dette en kan finne med riktig utstyr. Mer kunnskap om disse bindemiddelene gjør det mulig å simulere temperaturutviklingen bedre (Pernille Wiersholm, 2018), og dermed også anslå styrke.

En annen problemstilling som ikke er tatt opp i denne masteren, men som ofte fremkommer mer hos problemer med betong er karbonatisering. Når betong herder så absorberer det igjen CO_2 fra luften og binder seg til materialet. Karbonatiseringseffekten hos KS-peler er ikke utforsket, og kan være relevant å utforske mtp på de aktuelle klimautfordringene vi står ovenfor.

Referanser

- (2019). Sementproduksjon og co2. <https://www.norcem.no/no/ementproduksjon-co2>. Accessed: 18.11.2019.
- (2019). Specific heat of some common substances. <https://www.om-verden.com/hvor-mye-drivhusgass-slipper-ut-na-vi-kjorer-bil/>. Accessed: 18.11.2019.
- (2020,). Hydratisering. <https://snl.no/hydratisering>. Accessed: 3.2.2020.
- (2020). Klimagasser, etter utslippskilde, energiprodukt og komponent 1990 - 2018. <https://www.ssb.no/statbank/table/08940/?rxid=dd7e04b6-3c29-465b-a7b6-34303c82f733>. Accessed: 15.4.2020.
- (2020). Multicem. <https://www.cementa.se/sv/Multicem>. Accessed: 19.2.2020.
- (2020). Ngu. <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>. Accessed: 20.5.2020.
- Adaska, P.E., W. S. og Taubert, D. H. (2008). Beneficial uses of cement kiln dust. I *2008 IEEE Cement Industry Technical Conference Record*, sider 210–228.
- Al-Jabban, W. J. (2019). *Soil Modification by adding small amounts of binders : A laboratory study*. PhD thesis, Luleå University of Technology, Mining and Geotechnical Engineering.
- Boynton, R.S (1980). Chemistry and technology of lime and limestone.
- Eriksson, S.Norcem (2018). Dialogkonferanse 2018.
- Forening, N. G. (2012). *Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler*. Norges Geotekniske Forening.
- Hao, H. og Tarasov, B. (2008). Experimental study of dynamic material properties of clay brick and mortar at different strain rates. *Australian Journal of Structural Engineering*, 8(2):117–132.
- Hassibi, M (1999). An overview of lime slaking and factors the affect the process.
- Ingrid Engeset (2018). Temperatureffekter i kalksementstabilisert leire.
- Jacobsen, S. (2016). *Concrete Technology*. NTNU.
- Janz, M. and Johansson, S.E. (2002). The function of different binding agents in deep stabilization.
- Jean-Sebastien L’Heureux, Anders Lindgård, Arnfinn Emdal. (2019). The tiller-flotten research site: Geotechnical characterization of a very sensitive clay deposit.
- Kamon, M. and Nontananandh, S (1991). Combining industrial wastes with lime for soil stabilization.
- Mark Lundström (2019). Comparative analysis of three different binders for subsoil pillars with focus on co2-emissions.
- Mike Long, Jean Sebastien L’Heureux, B. K. F. B. A. K. L. S. H. K. G. S. H. A. A. S. N. A. M. (2019). Site characterisation and some examples from large scale testing at the klett quick clay research site. *AIMS Geosciences*, 5(geosci-05-03-344):344.

- Miller, G. A. og Azad, S. (2000). Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. *Construction and Building Materials*, 14(2):89 – 97.
- Miller, G. A. og Zaman, M. (2000). Field and laboratory evaluation of cement kiln dust as a soil stabilizer. *Transportation Research Record*, 1714(1):25–32.
- NGF (2011). *Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler*. NGF.
- Oset, Frode; Viklund, M. F. O. A. C. S. N. S. S. S.-A. G. V. T. V. (2014). Valg av karakteristisk cua – profil basert på felt- og laboratorieundersøkelser.
- Peethamparan, S., Olek, J., og Lovell, J. (2008). Influence of chemical and physical characteristics of cement kiln dusts (ckds) on their hydration behavior and potential suitability for soil stabilization. *Cement and Concrete Research*, 38(6):803 – 815.
- Per Jahren (2008). Co2-utslipp – sement og betong utfordringer og perspektiver.
- Pernille Wiersholm (2018). Betydning av spenningsnivå under herding av kalksementstabilisert leire.
- Priscilla, Bache, Paniagua, B. K., Karlsrud, K., og Lund, A. K. (2019). Strength and stiffness of laboratory-mixed specimens of stabilised norwegian clays. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 0(0):1–14.
- Sivert Eidsmo (2019). Sammenligning av ulike bindemidler for dypstabilisering av kvikkleire.
- Solanki, P., Khoury, N., og Zaman, M. *Engineering Behavior and Microstructure of Soil Stabilized with Cement Kiln Dust*, sider 1–10.
- Taylor, H. (1997). *Cement Chemistry*, volume 2. Thomas telford.
- Vegdirektoratet (2014). *Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger*. Vegdirektoratet.
- vegvesen, S. (2014). *Laboratorieundersøkelser*. Vegvesenet.
- Zaman, M. M., Zhu, J.-H., og Laguros, J. G. (1999). Durability effects on resilient moduli of stabilized aggregate base. *Transportation Research Record*, 1687(1):29–38.
- Åhnberg, H. (1995). Cement och kalk för djupstabilisering av jord, en kemisk-fysikalisk studie av stabiliseringseffekter. (sgi rapport, 48).
- Åhnberg, H. (2006). Strength of stabilized soils: A laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder.
- Åhnberg, H. Håkan Pihl (1997). Kalktypens inverkan på stabiliseringsresultatet.
- Åhnberg, H. Ljungkrantz, C. Johansson, SE. Holmqvist, L. Retelius, A. Holm, G (1995). Cement och kalk for djupstabilisering av jord.
- Åhnberg, H. og Holm, G. (1995). Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk-och cementstabiliserad jord.

Appendiks

A Multicem

A1 Multicem sikkerhetsblad

KC-/MC-mix for deep soil stabilisation

Side 1 av 5

SIKKERHETSDATBLAD KC-/MC-mix for deep soil stabilisation

1. Identifikasjon av stoffet / produktet og av selskapet / foretaket

Utgitt dato	03.11.2008
Kjemikaliets navn	KC-/MC-mix for deep soil stabilisation
Synonymer	Bypasstøv, Multicem, røykgass støv, kalk, sement
Kjemikaliets bruksområde	Binde-/stabiliseringsmiddel.
Firmanavn	NORCEM A.S
Besøksadresse	Lilleakerveien 2b
Postadresse	Postboks 143 Lilleaker
Postnr.	0216
Poststed	OSLO
Land	NORGE
Telefon	+4722878400
Telefaks	+4722878402
E-post	jorunn.gundersen@norcem.no
Hjemmeside	http://www.norcem.no/
Org. nr.	934949145
Utarbeidet av	Norcem AS
Nødtelefon	GIFTINFORMASJONSSENTRALEN:22 59 13 00

2. Fareidentifikasjon

Farebeskrivelse	<p>Irriterer luftveiene og huden. Fare for alvorlig øyeskade. Fare for allergi ved hudkontakt Ved tilsetning av vann vil stoffet virke etsende på hud og øyne. Oppbevares utilgjengelig for barn</p> <p>Eksponeringsrisiko: Inhalering: Jevnlig inhalering av større mengder støv over lengre tid, kan gi økt risiko ofor å utvikle lungesykdommer.</p> <p>Øyekontakt: Stoffet kan forårsake alvorlige og varige skader på øyet.</p> <p>Hudkontakt: Stoffet har en irriterende effekt på fuktig hud. Langvarig hudkontakt kan gi etseskader, uten smertefølelse. Jevnlig hudkontakt kan gi eksem.</p> <p>Svelging: Kan gi irritasjon i svelg og spiserør. Det er liten risiko for svelging av større mengder støv, kun i spesielle tilfeller.</p>
Andre farer	Ved normal bruk forventer man ikke at stoffet kan ha noen skadelige virkninger på miljøet

3. Sammensetning /opplysning om innholdsstoffer

Komponentnavn	Identifikasjon	Klassifisering	Innhold
Røykgass støv, Portland Sement	CAS-nr.: 68475-76-3	Xi; R37/38, R41, R43	0 - 50 %

Dette Sikkerhetsdatablad er utarbeidet i Eco Publisher (EcoOnline)

KC-/MC-mix for deep soil stabilisation Side 2 av 5

	EC-nr.: 270-659-9		
Portland Sement Klinker	CAS-nr.: 65997-15-1	Xi; R37/38, R41, R43	50 - 75 %
	EC-nr.: 266-043-4		
Kalsiumoksid	CAS-nr.: 1305-78-8	Xi; R37/38, R41	0 - 50 %
	EC-nr.: 215-138-9		
Kolonneforklaring	CAS-nr. = Chemical Abstracts Service; EU (Einecs- eller Elincsnnummer) = European inventory of Existing Commercial Chemical Substances; Ingrediensnavn = Navn iflg. stoffliste (stoffer som ikke står i stofflisten må oversettes hvis mulig). Innhold oppgitt i; %, %vkt/vkt, %vol/vol, %vol/vol, mg/m3, ppb, ppm, vekt%, vol%		
FH/FB/FM	T+ = Meget giftig, T = Giftig, C = Etsende, Xn = Helsekadelig, Xi = Irriterende, E = Eksplosiv, O = Oksiderende, F+ = Ekstremt brannfarlig, F = Meget brannfarlig, N = Miljøskadelig.		
Komponentkommentarer	Se under utfyllende opplysninger i punkt 16.		

4. Førstehjelpstiltak

Generelt	Ta alltid dette databladet med når du kontakter lege eller ambulanse
Innånding	Flytt den skadede slik at han får frisk luft. Fjern støv fra munn og nese. Kontakt helsepersonell dersom irritasjonen vedvarer eller dersom han/hun seinere får plager i form av kvalme, hoste eller andre symptomer som kan skyldes eksponeringen.
Hudkontakt	Ta av tilsølt arbeidstøy og vask huden godt med vann. Tilsølte klær vaskes før gjenbruk. Dersom det har oppstått kraftig irritasjon eller brannskade, kontakt helsepersonell.
Øyekontakt	Ikke gni øyet, det kan føre til en mekanisk skade på hornhinna pga. Fjern eventuelle kontaktlinser, åpne øyelokkene så mye som mulig og skylld øyet umiddelbart med rennende vann i minst 45 minutter for å fjerne alle partikler. Hvis mulig, bruk isotont saltvann (0,9% NaCl). Kontakt arbeidsmedisiner, bedriftslege eller øyelege.
Svelging	Fremkall ikke brekninger. Dersom personene er ved bevissthet, skylld munnen med vann og gi rikelig vann å drikke. Ta kontakt med helsepersonell eller kontakt giftinformasjons sentralen: tlf. 22 59 13 00
Annen informasjon	Stoffet reagerer med vann under varmeutvikling til kalsiumhydroksid, som er sterkt alkalisk og gir etseskader og kjemiske brannskader. Skylld derfor godt med rikelig mengder vann for å fortynne og fjerne stoffet. Etseskader på øyet kan medføre blindhet. Snarlig og vedvarende skylling er viktig, også under transport til lege/sykehus.

5. Tiltak ved brannslukking

Passende brannslukningsmidler	Ikke relevant
Uegnete brannslukningsmidler	Ikke relevant
Brann- og eksplosjonsfarer	Stoffet er ikke brennbar.

6. Tiltak ved utilsiktet utslipp

Sikkerhetstiltak for å beskytte personell	Bruk verneutstyr som beskrevet i avsnitt 8 og følg anbefalingene for sikker håndtering i avsnitt 7. Ytterligere beredskapstiltak er ikke påkrevet.
Sikkerhetstiltak for å beskytte ytre miljø	Spylld ikke stoffet ned i kloakken, avløpssystemer, vannreservoar, bekker o.l.
Metoder for opprydding og rengjøring	Samle opp spilt materiale og bruk dette. Benytt oppsamlingsmetoder som ikke støver. Sjekk at arbeiderne har riktig verneutstyr. Unngå støvende aktiviteter. Unngå innånding av støv og unngå hudkontakt.

Dette Sikkerhetsdatablad er utarbeidet i Eco Publisher (EcoOnline)

Tørt støv kan samles opp og benyttes igjen.

7. Håndtering og lagring

Håndtering	Håndteres forsiktig slik at man unngår direkte kontakt med stoffet. Bruk personlig verneutstyr se kap. 8. Sørg for god ventilasjon. Unngå innånding av støv. Unngå kontakt med øynene, huden og klærne. Øyespyler bør være tilgjengelig på arbeidsplassen.
Oppbevaring	Lagres tørt i lukkede beholdere. Stålbeholdere anbefales. Unngå galvaniserte beholdere og lettmetall. Oppbevares atskilt fra sterke syrer og letantennelige materialer. Ved lagring på silo/tank, skal disse bare entres etter en grundig sikkerhetsvurdering med tanke på ras fra vegger og frisklufttilgang.
Spesielle egenskaper og farer	Stoffet inneholder fri kalk som reagerer med galvaniserte materialer og lettmetaller under dannelse av hydrogengass, som igjen kan gi trykkøkning i lukkede beholdere. Hydrogen danner eksplosive blandinger med oksygen i luft. Stoffet reagerer med vann og syrer under varmeutvikling. Varmeutviklingen kan være så høy at lett antennelige materialer (papir, flis) begynner å brenne. Lagres utilgjengelig for barn.

8. Eksponeringskontroll / personlig verneutstyr

Administrative normer

Komponentnavn	Identifikasjon	Verdi	Norm år
Portland Sement Klinker	CAS-nr.: 65997-15-1 EC-nr.: 266-043-4	8 t.: 5resp/10tot mg/m ³	
Kalsiumoksid	CAS-nr.: 1305-78-8 EC-nr.: 215-138-9	8 t.: 2 mg/m ³ , T	2003

Eksponeringskontroll

Annen informasjon om grenseverdier	Reduser støvdannelsen til et minimum. Sørg for god ventilasjon. Skift arbeidstøy ofte og dusj etter arbeidets slutt. Personer med hudallergi bør ikke jobbe med produktet.
Begrensning av eksponering på arbeidsplassen	Unngå å spise, drikke eller røyke når du arbeider med stoffet, slik at du ikke får det på huden eller i munnen. Det anbefales å smøre utildekket hud med barriere krem før arbeidet påbegynnes. Fjern tilsølte klær, sko, klokker osv. og vask huden godt med vann. Tilsølt arbeidstøy/tilbehør må vaskes godt før det benyttes på ny.
Åndedrettsvern	Bruk støvmaske klasse P3 eller bedre (friskluftmaske).
Håndvern	Ved kontakt med tørt stoff brukes vanlige arbeidshansker. Ved arbeid med fuktig blanding må vanntette hansker benyttes. Nitril-hansker anbefales.
Øyevern	Bruk øyevern som dekker tett rundt øynene eller friskluftmaske.
Annet hudvern enn håndvern	Bruk heldekkende dress eller tette arbeidsklær ved håndtering av tørt stoff. Ved behandling i våt tilstand bør vanntette bukser og gummistøvler anvendes for å unngå hudkontakt. Det anbefales å beskytte utildekket hud med fettbasert barriere krem.

9. Fysiske og kjemiske egenskaper

Tilstandsform	Pulver
Lukt	Luktfritt
Farge	Grå
pH (bruksløsning)	Verdi: 12-13
Kommentarer, pH (bruksløsning)	Vandig løsning

Dette Sikkerhetsdatablad er utarbeidet i Eco Publisher (EcoOnline)

10. Stabilitet og reaktivitet

Materialer som skal unngås	Stoffet inneholder fri kalk (CaO) som angriper lettmetaller (Al, Sn, Zn) i nærvær av fuktighet under dannelse av hydrogengass. Hydrogen kan danne eksplosive blandinger med oksygen i luft. Stoffet reagerer med vann og syrer under varmeutvikling. Varmeutviklingen kan være så høy at lett antenkelige materialer (papir, flis) begynner å brenne.
Farlige spaltningsprodukter	Kan gi dannelse av hydrogengass i reaksjon med lettmetaller.
Stabilitet	Stabilt under anbefalte vilkår for oppbevaring og håndtering (se kapittel 7). Unngå fuktighet.

11. Toksikologisk informasjon

Øvrige helsefareopplysninger

Innånding	Støv kan medføre irritasjon og betennelse på slimhinnene. Innånding av store mengder kan medføre lungeskade som må behandles av lege.
Hudkontakt	I tørr tilstand og i enhver fuktig blanding kan stoffet føre til hudirritasjon og eksem. Lengre tids hudkontakt kan gi alvorlige etseskader.
Øyekontakt	Direkte kontakt med stoffet kan forårsake skade på hornhinna spesielt dersom den samtidig utsettes for mekanisk belastning. Det kan oppstå en akutt eller en mer langsomt innsettende betennelse. Kan føre til alt fra irritasjon (conjunctivitt, blefaritt etc.) til alvorlige sår på hornhinna og i verste fall blindhet.
Svelging	Irritasjon av fordøyelsessystemet kan oppstå dersom man svelger store mengder av stoffet.
Kroniske effekter	<ul style="list-style-type: none"> • Effekter på luftveier: Langvarig eksponering for respirabelt støv i mengder over administrativ norm kan forårsake hoste, pustebevis og kan forårsake kronisk obstruktiv lungesykdom (KOLS). • Effekter på hud: Noen personer kan utvikle eksem som et resultat av langvarig kontakt med stoffet. • Medisinske tilstander som kan forverres ved eksponering for stoffet: Kan forsterke eksisterende lidelser slik som KOLS, astma, emfysem, øyesykdommer og hudsykdommer.
Allergi	Kan utvikle varige allergiske reaksjoner i huden ved jevnlig og langvarig hudkontakt hos disponerte personer. Risikoen for å utvikle allergisk eksem er høyere ved gjentakende hudkontakt med fuktig stoff enn ved kontakt med tørt.

12. Miljøopplysninger

Øvrige miljøopplysninger

Økotoksisitet	Stoffet har ingen direkte effekt på miljøet, men kan i kontakt med vann ha en viss toksisk effekt som følge av høy alkalinitet (pH).
Mobilitet	Størkner over tid i vann.
Persistens og nedbrytbarhet	Produktet er ikke biologisk nedbrytbar.
Bioakkumulasjonspotensial	Produktet har ikke potensiale for bioakkumulering.

13. Fjerning av kjemikalieavfall

Produktet er klassifisert som farlig avfall	Ja
Egnede metoder til fjerning av kjemikaliene	<p>Rester eller spill skal håndteres som farlig avfall, ihht pkt. 7 og 8. Tørt stoff kan samles opp og benyttes på nytt. Mindre mengder fortynnes forsiktig med store mengder vann og nøytraliseres med fortynnet saltsyre og skylles vekk. Rester av herdet materiale er inert og kan håndteres som bygningsavfall.</p> <p>EAL 1013 Avfall fra produksjon av sement etc.</p>

KC-/MC-mix for deep soil stabilisation

Side 5 av 5

EAL 101304 Avfall fra kalsinering og lesking av kalk.
 EAL 101306 Partikler og støv
 EAL 101314 Betongavfall og betongslam.
 EAL 170101 Avfall fra bygge- og rivningsarbeid - betong

14. Transportinformasjon

Farlig gods ADR Status: Nei
 Farlig gods IMDG Status: Nei
 Andre relevante opplysninger Ikke farlig gods ihht ADR/RID.

15. Opplysninger om lover og forskrifter

Faresymbol



Irriterende

Sammensetning på merkeetiketten Røygass støv, Portland Sement:0 - 50 %, Portland Sement Klinker:50 - 75 %, Kalsiumoksid:0 - 50 %

R-setninger R37/R38 Irriterer luftveiene og huden.
 R41 Fare for alvorlig øyeskade.
 R43 Kan gi allergi ved hudkontakt.
 VED TILSETNING AV VANN VIL STOFFET VIRKE ETSENDE PÅ HUD OG ØYNE.

S-setninger S2 Oppbevares utilgjengelig for barn
 S22 Unngå innånding av støv.
 S24/S25 Unngå kontakt med huden og øynene.
 S26 Får man stoffet i øynene; skylk straks grundig med store mengder vann og kontakt lege.
 S37/S39 Bruk egnede vernehansker og vernebriller/ansiktsskjerm.

Referanser (Lover/Forskrifter) Forskrift om klassifisering, merking m.v. av farlige kjemikalier (2002). Forskrift om utarbeidelse og distribusjon m.v. av helse-, miljø- og sikkerhetsdatablader (2004). Norsk stoffliste av 2002. Administrative normer, best.nr. 361 (2003). Avfallsforskriften (2004). Landtransportforskriften (ADR, RID, 2006).

16. Andre opplysninger

Liste over relevante R-setninger (i seksjon 2 og 3). R37/38 Irriterer luftveiene og huden.
 R41 Fare for alvorlig øyeskade.
 R43 Kan gi allergi ved hudkontakt.

Utfyllende opplysninger Blandingen vil variere etter ønske og anvendelsesmåte hos den enkelte kunde, men HMS-databladet skal ivareta alle blandingsforhold.

Leverandørens anmerkninger Opplysningene som er gitt i dette HMS-databladet er basert på den kunnskap og erfaring vi som produsent har om produktet. De gitte opplysninger er ment å være retningsgivende for sikker håndtering, anvending, bearbeidning, lagring, transport, avhending og utslipp, og må ikke ansees å være en garanti eller kvalitetsspesifikasjon.
 Stoffet selges kun i bulk for profesjonell anvendelse og er ikke ment for det private markedet.

Ansvarlig for Sikkerhetsdatablad NORCEM A.S

Dette Sikkerhetsdatablad er utarbeidet i Eco Publisher (EcoOnline)

A2 Sement produktblad CEMI



NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

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

PRODUKTINFORMASJON
INDUSTRISEMENT
CEM I 52,5 R

Norcem Industrisement er en spesialsement med rask fasthetsutvikling og er velegnet for bruk ved produksjon av betongelementer og betongvarer. I tillegg er den velegnet til støpearbeider vinterstid i Norge.

PRODUCT DATA SHEET

INDUSTRISEMENT
CEM I 52,5 R

LAST VERSION JULY 2016

The cement satisfies the requirements according to NS-EN 197-1:2011 for Portland cement CEM I 52.5 R.

Properties		Declared values	Requirements according to NS-EN 197-1:2011
Fineness (Blaine m ² /kg)		550	
Specific weight (kg/dm ³)		3.13	
Soundness (mm)		1	≤ 10
Initial setting time (min)		110	≥ 45
Compressive strenght (MPa)	24 hrs	33	
	48 hrs	41	≥ 30
	7 days	50	
	28 days	59	≥ 52.5
Sulfate (% SO ₃)		≤ 4.0	≤ 4.0
Chloride (% Cl ⁻)		≤ 0.085	≤ 0.10
Water soluble chromium (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalies (% Na ₂ O _{ekv})		1,3	
Clinker (%)		96	95-100
Minor additional components (%)		4	0-5

1. According to EU regulation REACH Annex XVII point 47 Chromium VI compounds.

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, P.O.Box 142, Lilleaker, NO-0216 Oslo
Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

Norcem Industrisement tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portlandsement CEM I 52,5 R. Ytelsesdeklarasjon nr.: 1111-DoP-NO11-0415 (Brevik) og 1111-DoP-NO12-0419 (Kjøpssvik). Sertifikat-Konstant ytelse nr.: 1111-CPR-0415 (Brevik) og 1111-CPR-0419 (Kjøpssvik).
Sist revidert: 2016

DISTRIBUSJON OG LAGRING

Sementen leveres i sekk, big bag og bulk. Semen ten skal lagres i tørr og tett silo da fukt skader sementen. Lagringstiden bør begrenses til 6 måneder. Effekten av kromatreduseringen av sementen er effektiv i 6 måneder etter produksjonsdato, dersom sementen lagres tørt og tett.

SIKKERHET VED BRUK

All sement skal oppbevares utilgjengelig for barn og er farlig å spise. Sement i øynene kan gi alvorlige øyeskader. Fuktig sement danner kalsiumhydroksid som virker irriterende på hud og åndedretsorgan. Sikkerhetsdatablad med fullstendig informasjon finnes på Norcems hjemmeside www.norcem.no under «Våre produkter».

PRODUKTDATA

Produktdata med deklarete verdier finnes på Norcems hjemmeside www.norcem.no under «Våre produkter».

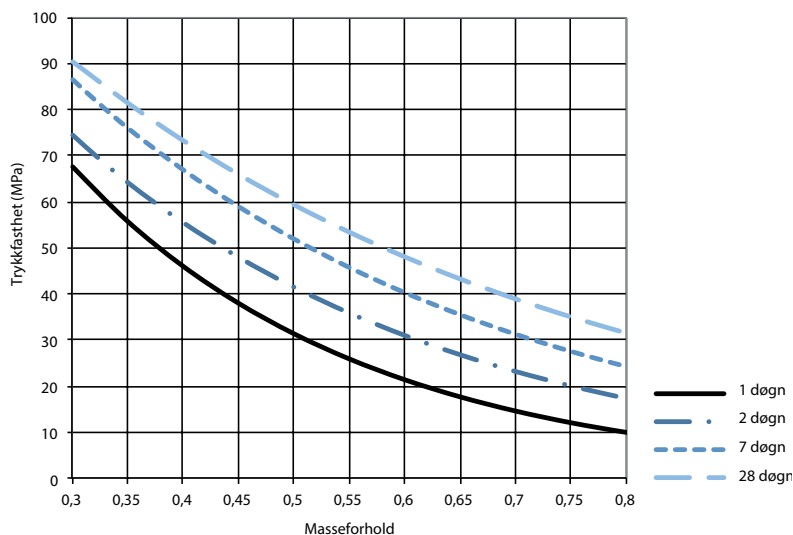
FASTHETSUTVIKLING

Fasthetsutvikling er en sentral egenskap for planlegging, styring og utførelse av alle betongarbeider. Fasthetsutviklingen er avhengig av sementtype, tilslag, masseforhold, innhold av luft, herdeforhold (temperatur, tid og fuktighet) og eventuell bruk av tilsetningsmaterialer eller -stoffer. I figur 1 er vist eksempel på trykkfasthetsutviklingen som funksjon av masseforhold og alder ved 20°C vannlagring for betong uten tilsetningsstoff og med Norcem Industrisement.

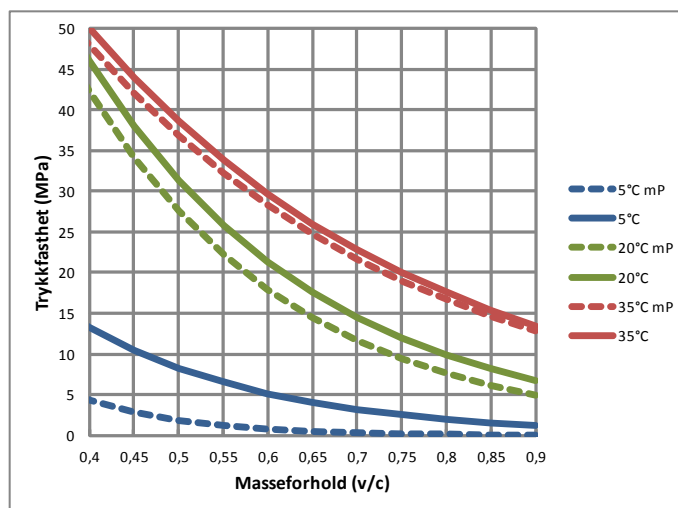
TIDLIGFASTHET

Tidligfastheten i betong er meget avhengig av temperatur og eventuell dosering av tilsetningsstoff med retarderende effekt. I figur 2 er vist trykkfasthet i betong etter 1 døgn med forskjellige masseforhold med og uten plastiserende tilsetningsstoff (1 % Pstoff) med Norcem Industrisement. Prøvene er vannlagret ved varierende temperatur.

FASTHETSUTVIKLING - fig. 1



TIDLIGFASTHET - fig. 2



FASTHETSKLASSE – MASSEFORHOLD

Med normal god styring av betongproduksjonen er det behov for en overhøyde på ca 7 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Tabell 1

gir følgende retningsgivende verdier for minste og største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring og med Norcem Industrisement.

FASTHETSKLASSE – MASSEFORHOLD						
Fasthetsklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55
Masseforhold minste - største	0.70-0.79	0.63-0.70	0.55-0.63	0.47-0.55	0.40-0.47	0.32-0.40

Tabell 1

BESTANDIGHETSKLASSE

NS-EN 206:2013+NA:2014 klassifiserer betongens miljøpåvirkninger i eksponeringsklasser. I nasjonalt tillegg til denne standarden er de ulike eksponeringsklassene gruppert i bestandighetsklasser med krav til betongens største masseforhold (tabell 2). Tabell 3 viser anbefalte kombinasjoner av bestan

dighet og fasthetsklasser. I figur 3 er vist sammenhengen mellom bestandighet og fasthetsklasse, i et variasjonsbelte forårsaket av ulike produksjonsforutsetninger (bl.a. tilslag). Figur 3 gjelder for betong uten luftinnføring med Norcem Industrisement vannlagret i 20°C i 28 døgn.

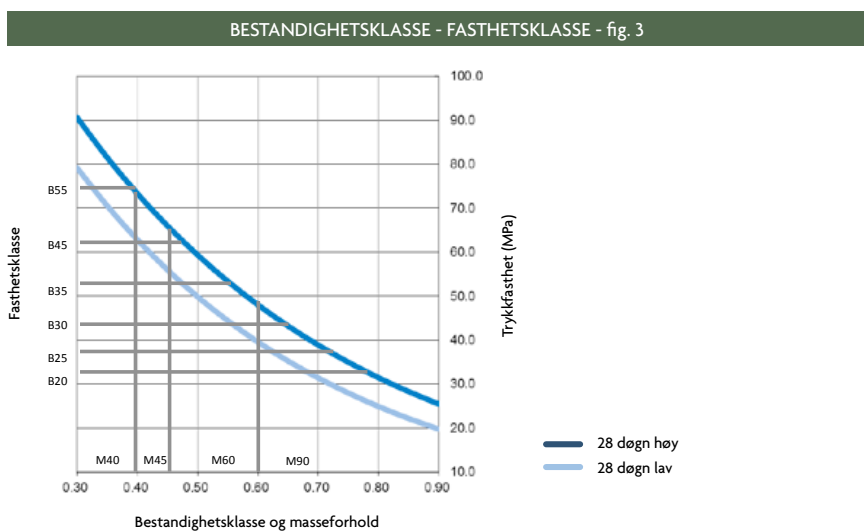
INDUSTRISEMENT		www.norcem.no				
VALG AV BESTANDIGHETSKLASSE (NASJONALE KRAV)						
Eksponeeringsklasse	M90	M60	M45	MF45*	M40	MF40*
X0	•	•	•	•	•	•
XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		•	•	•	•	•
XD1, XS1, XA1, XA2, XA4			•	•	•	•
XF2, XF3, XF4				•		•
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3					•	•
XSA	Betongsammensetning og beskyttelsestiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstille kravene til M40.					
Største masseforhold	0.90	0.60	0.45	0.45	0.40	0.40

* Spesielle krav, se NS-EN 206:2013+NA:2014

Tabell 2

ANBEFALTE KOMBINASJONER	
Bestandighetsklasse	Fasthetsklasse
M90	B20 eller høyere
M60	B30 eller høyere
M45	B45 eller høyere
M40	B55 eller høyere

Tabell 3



A3 Sement produktblad CEMII

PRODUCT DATA SHEET

STANDARDSEMENT FA

CEM II/B-M

LAST REVISION AUGUST 2017

Norcem Standardsement FA satisfies the requirements according to NS-EN 197-1:2011 for the Portland-composite cement CEM II/B-M 42,5 R.

Properties		Declared values	Requirements according to NS-EN 197-1:2011
Fineness (Blaine m ² /kg)		450	
Specific weight (kg/dm ³)		3.00	
Soundness (mm)		1	≤ 10
Initial setting time (min)		140	≥ 60
Compressive strength (MPa)	1 day	20	
	2 days	31	≥ 20
	7 days	42	
	28 days	55	≥ 42.5 ≤ 62.5
Sulfate (% SO ₃)		≤ 4.0	≤ 4.0
Chloride (% Cl ⁻)		≤ 0.085	≤ 0.10
Water soluble chromium (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalies (% Na ₂ O _{ekv})		1.4 (B) / 1.5 (K)	
Clinker (%)		78	65-79
Fly ash (%)		18	21-35
Limestone (%)		4	

1. According to EU regulation REACH Annex XVII point 47 Chromium VI compounds.

B = Brevik and K = Kjoepsvik

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

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

A4 Sement produktblad CEMIII

Blast Furnace Cement

CEM III/B 42,5 N-LH/SR

CEM III

March 2015

IJMUIDEN

ENCI

Technical Advise

Postbus 3233

5203 DE 's-Hertogenbosch

Tel: +31(0)73 640 12 20

Fax: +31(0)73 640 12 18

tv@enci.nl

www.enci.nl

CBR Cementbedrijven

Technical Advise

Terhulpesteenweg 185

1170 BRUSSEL

Tel: +32(0)2 678 35 10

Fax: +32(0)2 675 23 91

communications@cbr.be

www.cbr.be

1. Standards and certificates

Cement type	Certificate	Standard	Certificate N°
CEM III/B 42,5 N-LH/SR	CE	EN 197-1	0956-CPR-1102.1067
CEM III/B 42,5 N-LH/SR	KOMO	BRL 2601	1102-15-1067
CEM III/B 42,5 N-LH/SR	Benor	NBN B12	15/09/331/1

2. Declared composition

	Units	Average Values	Requirements	
			Min	Max
<i>Constituents in % of the sum of the principal and secondary constituents</i>				
Clinker (K)	%	29	20	34
Slag (S)	%	68	66	80
Filler	%	3	-	5
<i>Additions in % of the cement</i>				
Setting regulator	%	5,0	-	-
Grinding agent	%	0,035	-	-
Reducing agent*	%	0	-	-

3. Chemical properties

The chemical characteristics are determined in accordance with EN 196-2.

	Units	Average Values	Requirements	
			Min.	Max.
CaO	%	44	-	-
SiO ₂	%	28	-	-
Al ₂ O ₃	%	11	-	-
Fe ₂ O ₃	%	1	-	-
Sulfate SO ₃	%	2,8	-	4,0
Insoluble residue	%	2,9	-	5,0
Loss on ignition	%	1,47	-	5,0
Chlorides	%	0,08	-	0,10
Chromium (VI)*	%	< 0,0002	-	0,0002
Na ₂ O equivalent	%	0,77	-	-

* In accordance with the Regulation EC 1907/2006 (Reach), the soluble chromium (VI) content is limited to a maximum of 0.0002%. The chromium (VI) content is determined in accordance with EN 196-10.

IJMUIDEN

4. Physical characteristics

The physical characteristics are determined according to the standardised testing methods stated in the second column.

	Test method	Units	Average Values	Requirements	
				min	max
Normal consistency with water	EN 196-3	%	30,9	-	-
Begin setting	EN 196-3	minuten	240	60	-
End setting	EN 196-3	uren	280	-	-
Stability	EN 196-3	mm	1	-	10
Specific surface (Blaine)	EN 196-6	cm ² /gr	4500	-	-
Sieving oversize of 200 µm	EN 196-6	%	0	-	-
Heat of hydration - 7d	-	J/g	229	-	-
Mass density					
Absolute	-	kg/m ³	2950	-	-
Apparent	-	kg/m ³	1030	-	-
C-Waarde	-		1,50	-	-

5. Mechanical characteristics

The cement's compressive strength, measured on of standardised mortar, is determined in accordance with EN 196-1.

Compressive strength	Units	Average Values	Requirements	
			min.	max.
At 1 day	MPa		-	-
At 2 days	MPa	12	10,0	-
At 7 days	MPa	33	-	-
At 28 days	MPa	56	42,5	62,5

6. Production and packaging

This cement is available in the following packaging :

Ship bulk	Lorry bulk	Bag
x	x	-

7. The management system of the plant is certified



8. Declaration of performance compliant to CPR(EU) n° 305/2011

Identification : 0956-CPR-1102.1067

Website www.enci.nl

The values given above are average values provided as a guideline. The guaranteed limits are shown in the requirement column.

B Innblanding av Multicem

Innblandingsmenden med sement og CKD i leiren oppgis oftest kg/m^3 . Hvis vi ønsker et blandingsforhold av 50% Sement og 50% CKD så tilsvarer det:

$$Sement = \psi_s = 0,5 * 100 = 50kg/m^3 = \frac{50}{1000}g/cm^3 \quad (B.1)$$

og

$$CKD = \psi_k = 0,5 * 100 = 50kg/m^3 = \frac{50}{1000}g/cm^3 \quad (B.2)$$

Hvis tyngdetettheten til materialet er gitt, og vi vet våt vekten så kan vi regne ut mengden med nødvendig materiale. For blandingene i disse eksperimentene vil 500gram leire bli brukt. Gitt tyngdetettheten $\gamma = 19KN/m^3$ og våt vekt $W = 500gram$

$$V = \frac{Q}{\rho} = \frac{500}{1,9} = 263 \quad (B.3)$$

Da blir innblandingen i laboratoriet:

$$Sement = \psi_s = \frac{50}{1000} \cdot 263 = 13,15gram \quad (B.4)$$

Tilsvarende samme for CKD

$$CKD = \psi_s = \frac{50}{1000} \cdot 263 = 13,15gram \quad (B.5)$$

Vanligvis får en leireprøver på ca 3kg, så mengde med Sement og CKD seksdobles.

C Rutineundersøkelser

C1 Treaks innblandingsark

C2 Vanninnhold

C3 Densitet

Multicem innblanding STATENS VEGVESEN, Vegteknisk avdeling				Oppdragsnr.				Antatt/målt w%							
				Profil/Hullnr.				Operator				Dato:			
Blandedato	Lab.br.	Inngblanding sement og ckd						Densitet			Skjærstyrke			Vanninnhold	
		Våttvekt	Tyngdetetthet	Sement	CKD	Sement/ckd	Sylinder tara	Syl. Vekt fersk	Syl. Vekt herdet	Herdetid	Hette	τmax	def	Stabilisert masse	
		g	kN/m ³	%	%	g	g	g	g	døgn	nr.	Kpa	%	w%	
26. Mars	C3-1	1140,4	18,55	50	50	61,42	64,49	447,65	448,8	32		173,37	4,2	skål nr.	C3-1
	C3-2						62	443,24	449,8			våttvekt (g)			
												tørrvekt (g)			
												w			
27. Mars	C2-1	1092	18,55	25	75	58,81	64,2	458,27	458,6	32		144,22	5,75	skål nr.	C2
	C2-2						64,7	465	473,6			våttvekt (g)	19,63		
												tørrvekt (g)	14,76		
												w	37,8		
30. Mars	C1-1	1187,53	18,55	0	100	63,95	69,9	446,37	446,7	30		128,04	10	skål nr.	C1
	C1-2						62,24	430,93	431,3			våttvekt (g)	16,89		
												tørrvekt (g)	12,26		
												w	37,8		
31. Mars	B1-1	1023,52	18,55	0	100	41,34	64,8	476,25	477,2	30		125,42	10	skål nr.	B1
	B1-2						62,9	461,96	462			våttvekt (g)	31,19		
												tørrvekt (g)	22,286		
												w	40		
1. April	B2-1	976,62	18,55	25	75	39,44	62,8	462,71	462,8	30		160,06	7	skål nr.	B2
	B2-2						63,8	469,92	471			våttvekt (g)	16,93		
												tørrvekt (g)	12,384		
												w	39,3		
2. April	B3-1	991,07	18,55	50	50	40,03	64,5	483,3	482	32		203,27	2	skål nr.	B3
	B3-2						64,5	480,25	480,2			våttvekt (g)	16,93		
												tørrvekt (g)	12,384		
												w	36,7		
3. April	A1-1		18,55	0	100	32,93	63,5	440,37	447,8	32		105,3	10	skål nr.	A1
	A1-2						63,78	460,69	467,5			våttvekt (g)	15,82		
												tørrvekt (g)	11,412		
												w	38,6		
6. April	A2-1	1140,4	18,55	50	50	61,42	63,7	462,12	462,2	30		141,96	10	skål nr.	A2
	A2-2						64,1	470,3	470,5			våttvekt (g)	30,9		
												tørrvekt (g)	22,273		
												w	38,7		
7. April	A3-1	1092	18,55	25	75	58,81	64,12	485,75	486,7	30		188,39	3	skål nr.	A3
	A3-2						64,15	484,82	485,7			våttvekt (g)	30,25		
												tørrvekt (g)	22,206		
												w	36,2		

Vanninnhold						
	Vekt skål[g]	Vekt tot masse[g]	Vekt masse[g]	Vekt tørket totmasse[g]	vekt masse tørr	Vanninnhold før innblanding
C1	27,02	43,91	16,89	39,276	12,256	44,51
C2	27,15	46,78	19,63	41,913	14,763	39,49
C3						39,49
B1	5,86	37,05	31,19	48,016	22,286	44,51
B2	24,07	41,82	17,75	36,814	12,744	47,89
B3	26,7	43,63	16,93	39,084	12,384	47,89
A1	22,92	38,74	15,82	34,332	11,412	47,89
A2	5,85	36,75	30,9	46,028	22,273	42,30
A3	5,85	36,1	30,25	39,906	22,206	42,30

Densitet før og etter herding				Kommentar:			
Prøve	Høyde[mm]	Diameter[mm]	Volum prøve[cm ³]	Masse før herding[g]	Masse etter herding[g]	Densitet før [g/cm ³]	Densitet etter[g/cm ³]
A1-1	100	54	229	370,52	371,6	1,62	1,62
A1-2	105	54	240	384,89	391,2	1,60	1,63
A2-1	104	54	238	385,72	385,4	1,62	1,62
A2-2	108	54	247	395,7	394,9	1,60	1,60
A3-1	105	54	240	411,35	411,7	1,71	1,71
A3-2	108	54	247	408,72	409	1,65	1,65
B1-1	112	54	257	398,55	397,5	1,55	1,55
B1-2	106	54	243	399,06	386	1,64	1,59
B2-1	105	54	240	388,21	388,1	1,61	1,61
B2-2	107	54	245	393,72	393,5	1,61	1,61
B3-1	109	54	250	406,3	404,4	1,63	1,62
B3-2	107	54	245	402,85	402,4	1,64	1,64
C1-1	98	54	224	363,97	354,9	1,62	1,58
C1-2	100	54	229	356,03	376,8	1,55	1,65
C2-1	100	54	229	394,77	408,9	1,72	1,79
C2-2	100	54	229	401,5	394	1,75	1,72
C3-1	100	54	229	383,00	384,31	1,67	1,68
C3-2	100	54	229	381,24	387,8	1,66	1,69

C4 Rutineark for uttagning av prøve

Rutineundersøkelser						
Prosjekt: Masteroppgave Multicem/CKD						
Prøve						
Borsted	Flotten	Dato, prøvetaking	11.2.2020			
Hull nr.	GG20#7	Dato, prøveåpning	20.3.2020			
Prøve nr.	NTH82					
Dybde, z	10-10,8m					
Generell klassifisering						
Geologisk betegnelse:			Jordart:	Kvikkleire		
Beskrivelse:			Merknader:			
Konusforsøk						
Prøve	Su	Sr	St	Vanninnhold		
nr	Kpa	Kpa	-	Skål nr	w1	w2
1				Tot. Masse våt	42,64	50,34
2				Tot. Masse tørr	38,414	43,635
3				Masse skål, g	28	26,17
4				Masse vann, g	4,23	6,71
5				Masse tørr prøve	10,41	17,47
6				Vanninnhold	40,58	38,39
Snitt				Gjennomsnitt vanninnhold:		39,49
Ringdensitet						
Ring nr.	I	II		Enaks. Trykkforsøk		
Masse ring				Prøve	Su	ϵ
Masse prøve + ring				nr	Kpa	%
Masse prøve				1		
Volum ring						
Densitet						

Rutineundersøkelser						
Prosjekt: Masteroppgave Multicem/CKD						
Prøve						
Borsted	Flotten	Dato, prøvetaking	11.2.2020			
Hull nr.	GG20#7	Dato, prøveåpning	20.3.2020			
Prøve nr.	NTH82					
Dybde, z	11-11,8m					
Generell klassifisering						
Geologisk betegnelse:			Jordart:	Kvikkleire		
Beskrivelse:			Merknader:			
Konusforsøk						
Prøve nr	Su	Sr	St	Vanninnhold		
	Kpa	Kpa	-	Skål nr	w1	w2
1				Tot. Masse våt	47,85	59,24
2				Tot. Masse tørr	41,489	49,279
3				Masse skål, g	27,09	27,07
4				Masse vann, g	6,36	9,96
5				Masse tørr prøve	14,40	22,21
6				Vanninnhold	44,18	44,85
Snitt				Gjennomsnitt vanninnhold:		44,51
Ringdensitet						
Ring nr.	I	II		Enaks. Trykkforsøk		
Masse ring				Prøve nr	Su	ε
Masse prøve + ring					Kpa	%
Masse prøve					1	
Volum ring						
Densitet						

Rutineundersøkelser						
Prosjekt: Masteroppgave Multicem/CKD						
Prøve						
Borsted	Flotten	Dato, prøvetaking	7.2.2020			
Hull nr.	GG20#6	Dato, prøveåpning	2.4.2020			
Prøve nr.	B54					
Dybde, z	10-10,8m					
Generell klassifisering						
Geologisk betegnelse:			Jordart:	Kvikkleire		
Beskrivelse:			Merknader:			
Konusforsøk						
Prøve	Su	Sr	St	Vanninnhold		
nr	Kpa	Kpa	-	Skål nr	w1	w2
1				Tot. Masse våt	41,32	57,38
2				Tot. Masse tørr	36,133	46,893
3				Masse skål, g	24,1	26,98
4				Masse vann, g	5,19	10,49
5				Masse tørr prøve	12,03	19,91
6				Vanninnhold	43,11	52,66
Snitt				Gjennomsnitt vanninnhold:		47,89
Ringdensitet						
Ring nr.	I	II		Enaks. Trykkforsøk		
Masse ring				Prøve	Su	ϵ
Masse prøve + ring				nr	Kpa	%
Masse prøve					1	
Volum ring						
Densitet						

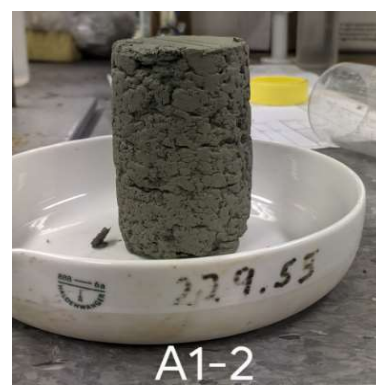
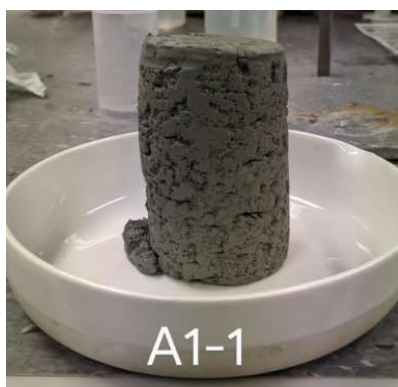
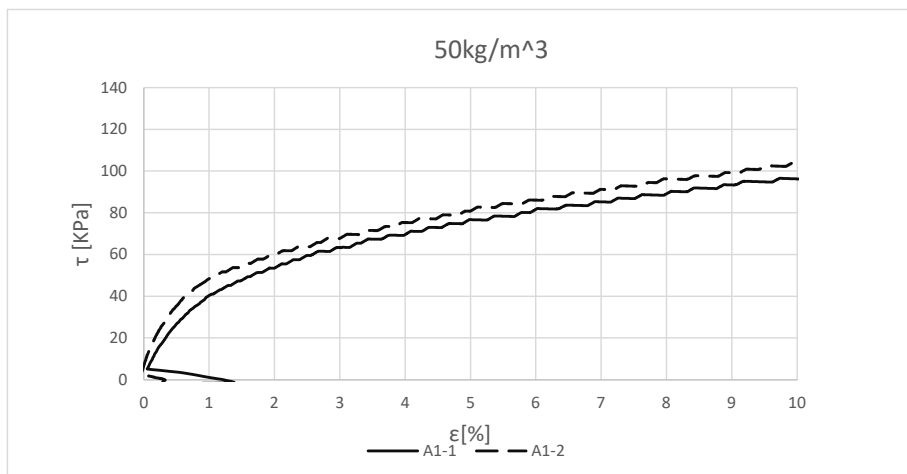
Rutineundersøkelser						
Prosjekt: Masteroppgave Multicem/CKD						
Prøve						
Borsted	Flotten	Dato, prøvetaking	11.2.2020			
Hull nr.	GG20#7	Dato, prøveåpning	6.4.2020			
Prøve nr.	NTH86					
Dybde, z	12-12,8m					
Generell klassifisering						
Geologisk betegnelse:			Jordart:	Kvikkleire		
Beskrivelse:			Merknader:			
Konusforsøk						
Prøve	Su	Sr	St	Vanninnhold		
nr	Kpa	Kpa	-	Skål nr	w1	w2
1				Tot. Masse våt	63,77	45,8
2				Tot. Masse tørr	52,79	
3				Masse skål, g	26,83	5,86
4				Masse vann, g	10,98	
5				Masse tørr prøve	25,96	
6				Vanninnhold	42,30	
Snitt				Gjennomsnitt vanninnhold:		42,30
Ringdensitet						
Ring nr.	I	II		Enaks. Trykkforsøk		
Masse ring				Prøve	Su	ϵ
Masse prøve + ring				nr	Kpa	%
Masse prøve					1	
Volum ring						
Densitet						

D Treaks resultater

Flotten Prøve A1

Test:	CID	Material hentet i felt:	Flotten
Leire i felt fra dybde	10-10,8m	Dato innblanding:	3.4.2020
Innblandingsmengde	75kg/m ³	Dato testet:	5.5.2020
Blandeforhold CKD/Sement	100/0	Dim etter lagring	
Herdetid	32 dager	h=100mm	
Celletrykk	100KPa	d=54mm	
Tøyningshastighet	3%/h		

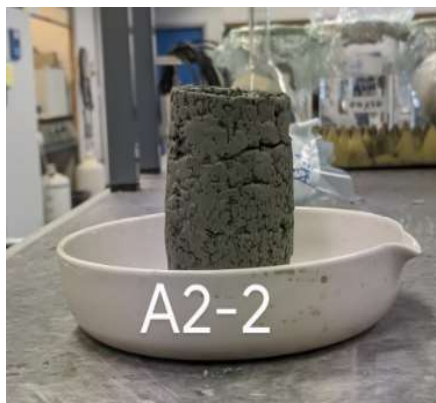
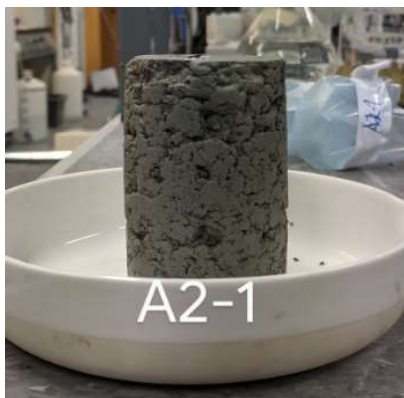
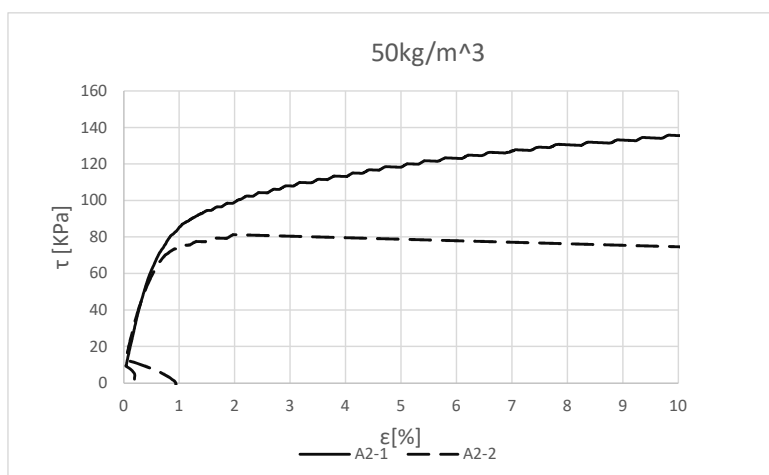
	τ_{\max}	$\epsilon_{\tau_{\max}}$	E_{50}	γ [KN/m ³]	w
A1-1	105,3	10	2,8	16,2	38,60%
A1-2	117,5	10	3,1	16,3	38,60%



Flotten Prøve A2

Material hentet i felt: Flotten
 Test: CID Dato innblanding: 6.4.2020
 Leire i felt fra dybde 12-12,8m Dato testet: 6.5.2020
 Innblandingsmengde 75kg/m³ Dim etter lagring
 Blandeforhold CKD/Sement 75/25 h=100mm
 Herdetid 30 dager d=54mm
 Celletrykk 100KPa
 Tøyningshastighet 3%/h

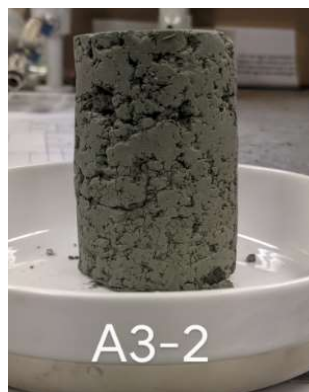
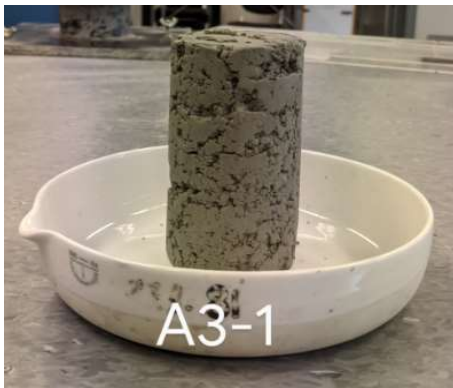
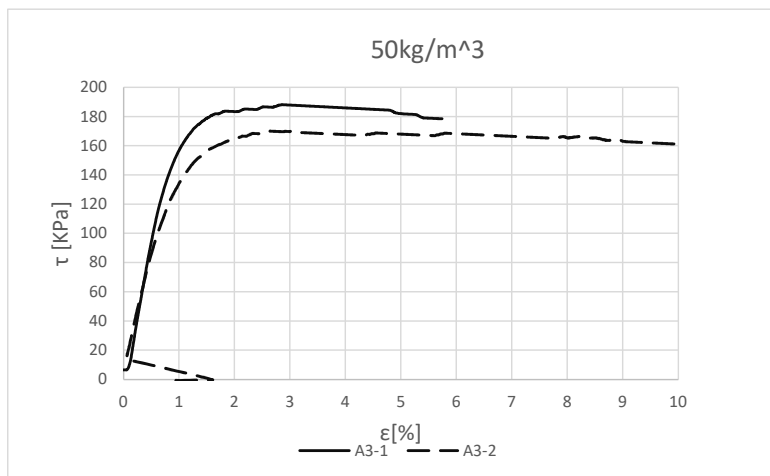
	τ_{\max}	$\epsilon_{\tau\max}$	E_{50}	γ [KN/m ³]	w
A2-1	142	10	11,1	16,2	38,70%
A2-2	81,4	1,5	15	16	38,70%



Flotten Prøve A3

Test:	CID	Meterial hentet i felt: Flotten	Dato innblanding: 7.4.2020
Leire i felt fra dybde	12-12,8m	Dato testet: 7.5.2020	
Innblandingsmengde	75kg/m ³	Dim etter lagring	
Blandeforhold CKD/Sement	50/50	h=100mm	
Herdetid	30 dager	d=54mm	
Celletrykk	100KPa		
Tøyningshastighet	3%/h		

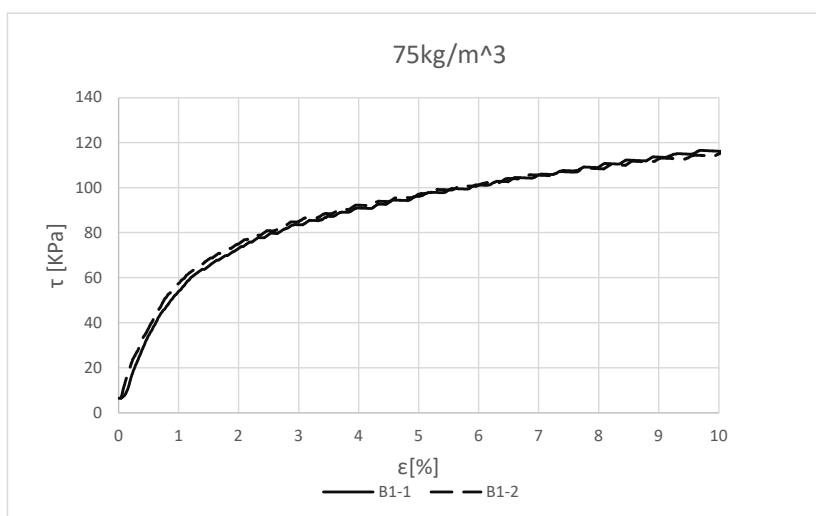
	τ_{\max}	$\epsilon_{\tau_{\max}}$	E_{50}	γ [KN/m ³]	w
A3-1	188,4	3,1	18,8	17,1	36,20%
A3-2	171,7	3,5	17,2	16,5	36,20%



Flotten Prøve B1

Test:	CID	Meterial hentet i felt:	Flotten
Leire i felt fra dybde	11-11,8	Dato innblanding:	31.3.2020
Innblandingsmengde	100kg/m ³	Dato testet:	30.4.2020
Blandeforhold CKD/Sement	100/0	Dim etter lagring	
Herdetid	30 dager	h=100mm	
Celletrykk	100KPa	d=54mm	
Tøyningshastighet	3%/h		

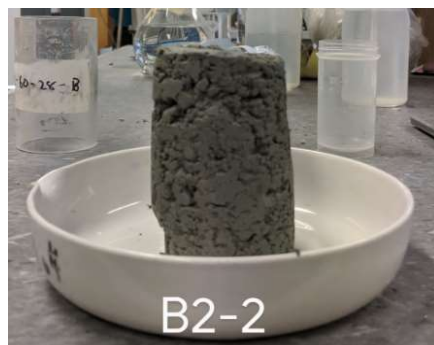
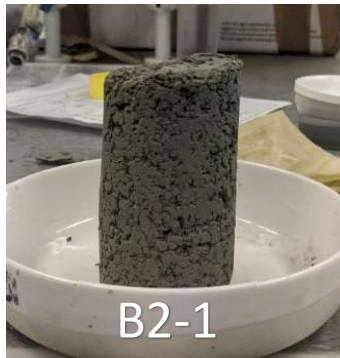
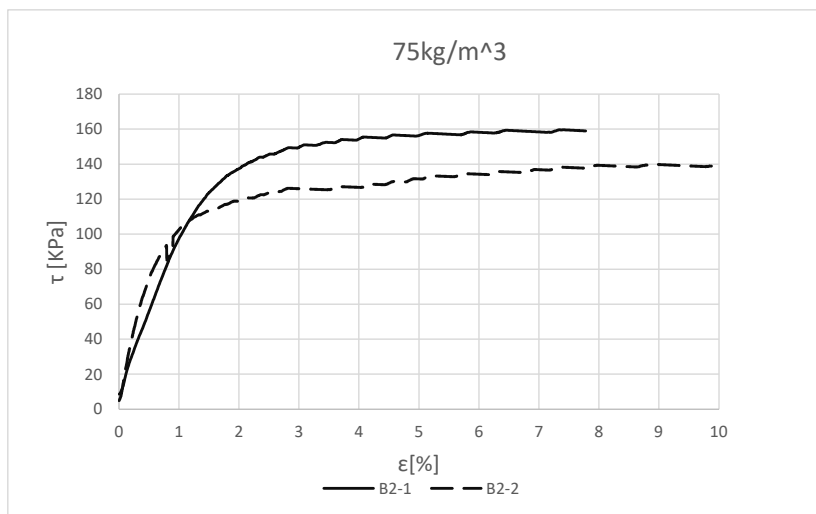
	τ_{\max}	$\epsilon_{\tau_{\max}}$	E_{50}	γ [KN/m ³]	w
B1-1	125,4	10	4,8	15,5	40,00%
B1-1	119,3	10	6	15,9	40,00%



Flotten Prøve B2

Test:	CID	Meterial hentet i felt:	Flotten
Leire i felt fra dybde	11-11,8	Dato innblanding:	1.4.2020
Innblandingsmengde	100kg/m ³	Dato testet:	1.5.2020
Blandeforhold CKD/Sement	75/25	Dim etter lagring	
Herdetid	30 dager	h=100mm	
Celletrykk	100KPa	d=54mm	
Tøyningshastighet	3%/h		

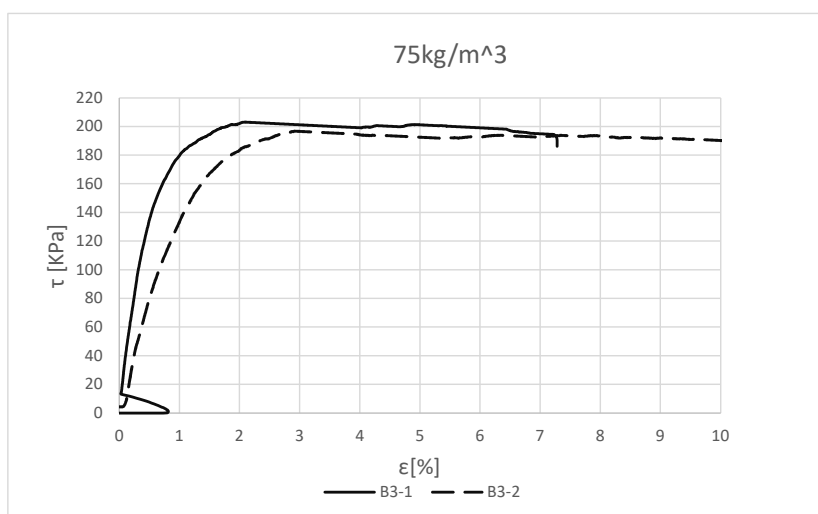
	τ_{\max}	$\epsilon_{\tau_{\max}}$	E_{50}	γ [KN/m ³]	w
B2-1	160,1	7	10,3	16,1	39,30%
B2-2	141,6	11,2	14,2	16,1	39,30%



Flotten Prøve B3

Test:	CID	Materiale hentet i felt:	Flotten
Leire i felt fra dybde	10-10,8	Dato innblanding:	2.4.2020
Innblandingsmengde	75kg/m ³	Dato testet:	4.5.2020
Blandeforhold CKD/Sement	50/50	Dim etter lagring	
Herdetid	32 dager	h=100mm	
Celletrykk	100KPa	d=54mm	
Tøyningshastighet	3%/h		

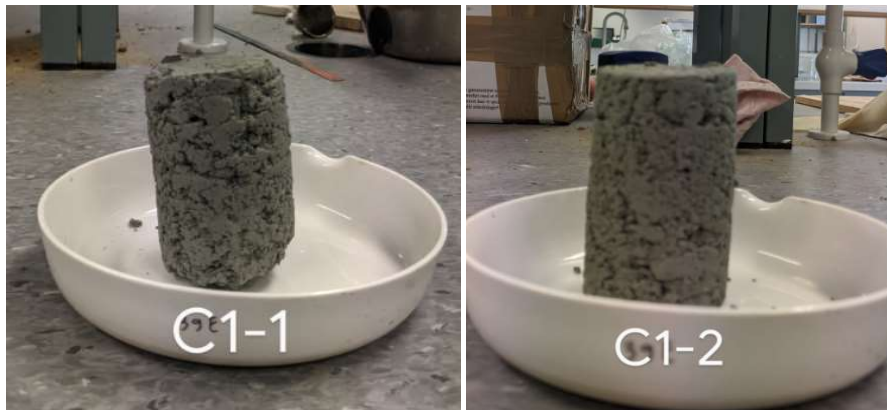
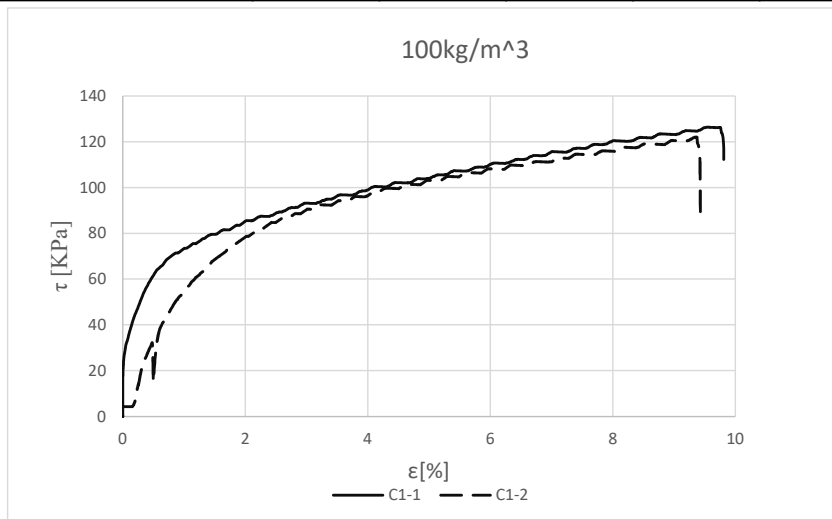
	τ_{\max}	$\epsilon_{\tau_{\max}}$	E_{50}	γ [KN/m ³]	w
B3-1	203,3	2	30,8	16,2	36,70%
B3-2	200	3	16,3	16,4	36,70%



Flotten Prøve C1

Test:	CID	Material hentet i felt:	Flotten
Leire i felt fra dybde	11-11,8m	Dato innblanding:	30.3.2020
Innblandingsmengde	100kg/m ³	Dato testet:	29.4.2020
Blandeforhold CKD/Sement	100/0	Dim etter lagring	
Herdetid	30 dager	h=100mm	
Celletrykk	100KPa	d=54mm	
Tøyningshastighet	3%/h		

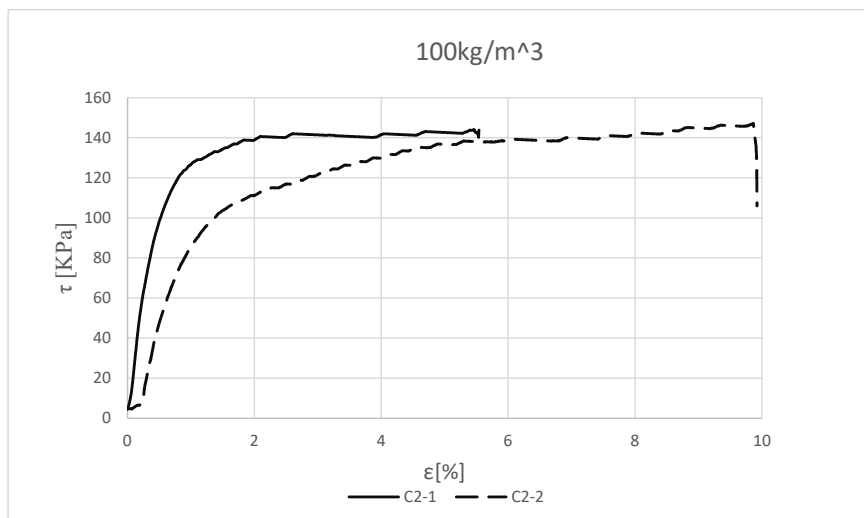
	τ_{\max}	$\epsilon_{\tau_{\max}}$	E_{50}	γ	w
C1-1	128	10	11,4	16,4	37,80%
C1-2	122,2	10	6	16,2	37,80%



Flotten Prøve C2

Test:	CID	Material hentet i felt:	Flotten
Leire i felt fra dybde	10-10,8m	Dato innblanding:	27.3.2020
Innblandingsmengde	100kg/m ³	Dato testet:	28.4.2020
Blandeforhold CKD/Sement	75/25	Dim etter lagring	
Herdetid	32 dager	h=100mm	
Celletrykk	100KPa	d=54mm	
Tøyningshastighet	3%/h		

	τ_{\max}	$\epsilon_{\tau_{\max}}$	E_{50}	γ	w
C2-1	144,2	6	23,3	17,2	33,00%
C2-2	140,3	10	10,4	17,4	33,00%

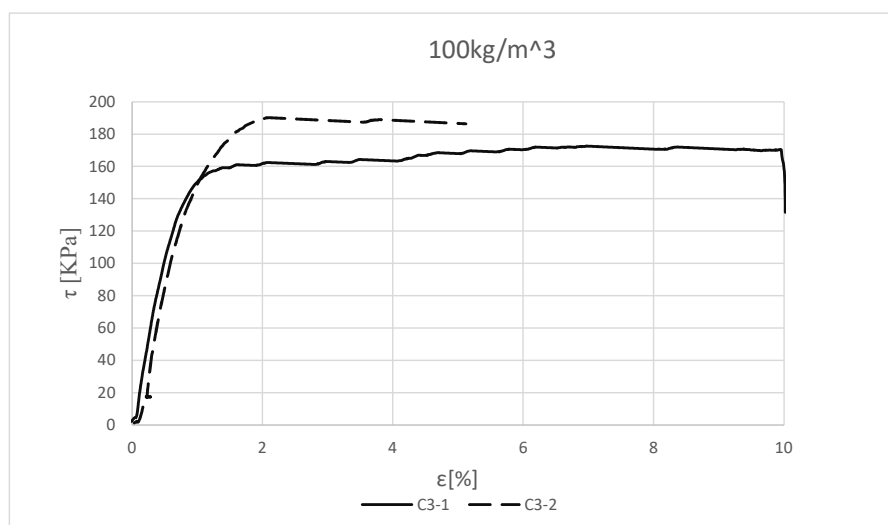


mangler bildet

Flotten Prøve C3

Test:	CID	Material hentet i felt:	Flotten
Leire i felt fra dybde	10-10,8m	Dato innblanding:	26.3.2020
Innblandingsmengde	100kg/m ³	Dato testet:	27.4.2020
Blandeforhold CKD/Sement	50/50	Dim etter lagring	
Herdetid	32 dager	h=100mm	
Celletrykk	100KPa	d=54mm	
Tøyningshastighet	3%/h		

	τ_{\max}	$\epsilon_{\tau\max}$	E_{50}	γ	w
C3-1	173,4	10	21,4	16,7KN/m ³	
C3-2	190,4	5	17,6	190,4	



Mangler bildet

E Oppsett KS-testforsøk E18 Lysaker- Ramsdalssletta

E1 Sement

- CEM I omtales som standardsement uten innhold av flyveaske eller Portlandssement. Innholdet skal iht. NS-EN 197-1:2011 bestå av 95-100 % sementklinker og 0-5 % mindre komponenter. Vedlegg A2 viser eksempel på et produktdatablad fra Norcem
- CEM II omtales som standardsement FA eller flyveaskesement. Innholdet skal iht. 197-1:2011 bestå av 65-79 % sementklinker og 21-35 Vedlegg A3 viser eksempel på et produktdatablad fra Norcem.
- CEM III omtales som slaggsement. Innholdet skal iht. NS-EN 197-1:2011 bestå av 20- 34 % sementklinker og 66-80 % slagg. Vedlegg A4 viser eksempel på et produktdatablad fra Norcem.

E2 Gjennomføring av testforsøk

Testforsøket gjennomføres i to deler, A og B. Vedlegg B viser forsøksoppsettet. Del A gjennomføres først. Det gjøres enaksforsøk med fire innblandingsvarianter

- 50/50 CKD og CEM I
- 50/50 CKD og CEM III
- CKD og CEM II
- 50/50 Kalk og CEM I

Del A har som formål å undersøke om variasjon av bindemiddel (sementtype) påvirker resultatene. I tillegg gjøres det forsøk med tradisjonell kalk og sement (CEM I). Alle tester gjøres 3 ganger for å fange opp eventuell variasjon i prøveresultatene. Det testes etter 14, 28 og 60 dager. Testen etter 60 dager gjøres for å undersøke langtidsutvikling da det er kjent at innblanding av CKD gir noe tregere fasthetsutvikling. Del A utføres med 75 kg/m³ innblanding i alle prøver.

Del B har som formål å studere effekten av ulike innblandingsmengder. Dette gjøres ved at nye enaksforsøk gjøres på to innblandingsvarianter med lavere innblandingsmengde.

I tillegg skal det gjøres treaksialforsøk på to innblandingsvarianter med to forskjellige innspenninger (dybder). I tillegg gjøres det supplerende triaksialforsøk med annen herdetide og innblandingsmengde. Resultatene fra enaksialforsøk og treaksialforsøk gir grunnlag for å vurdere bruddspenning og stivhetsmodul med dybden for KS-stabilisert materiale.

Del B hvor lavere innblandingsmengde er benyttet er utført med innblandingsmengde 40 kg/m³. Innblandingsvariantene valgt fra del A er utført med CKD-CEM I og CKD-CEM II. Det ble valgt å ikke inkludere CKD-CEM III i del B på grunn av vanskelighetene med å få levert CEM III til testforsøket.

Alle laboratorieforsøk foregår med herding av prøvematerialet i romtemperatur, ca 21 grader.

Del A - forsøksoppsett				
Innblandingprodukt:	50/50 Multicem (CEM I)	50/50 Multicem (CEM II)	50/50 Multicem (CEM III)	50/50 kalk/sement (CEM I)
14 dager	3 stk (enaks)	3 stk (enaks)	3 stk (enaks)	3 stk (enaks)
28 dager	3 stk (enaks)	3 stk (enaks)	3 stk (enaks)	3 stk (enaks)
60 dager	3 stk (enaks)	3 stk (enaks)	3 stk (enaks)	3 stk (enaks)

Del B - forsøksoppsett				
Innblandingprodukt:	50/50 Multicem (CEM I)		50/50 Multicem (CEM II)	
Innblandingsmengde:	40 kg/m ³	75 kg/m ³	40 kg/m ³	75 kg/m ³
14 dager	3 stk (enaks)	(utført i del A)	3 stk (enaks)	(utført i del A)
28 dager	3 stk (enaks)	(utført i del A)	3 stk (enaks)	(utført i del A)
	1 stk treaks (7,5 m)*	1 stk treaks (7,5 m)*	1 stk treaks (7,5 m)*	1 stk treaks (7,5 m)*
	-	1 stk treaks (15,0 m)**	-	1 stk treaks (15,0 m)**
60 dager	3 stk (enaks)	(utført i del A)	3 stk (enaks)	(utført i del A)
		1 stk treaks (7,5 m)*		1 stk treaks (7,5 m)*

Etter innblanding av KS-materialet i prøver så skal prøvene oppbevares/holdes på ca 21 grader (romtemperatur)

* σ_3' er satt til antatt verdi ved 7,5 m dybde (~127,6kPa)

** σ_3' er satt til antatt verdi ved 15,0 m dybde (~265,5kPa)

E3 Rutineundersøkelser på prøvesylindere

Vanninnhold - resultater

Generell info: Bestemmelse av vanninnhold utført i henhold til NS-EN ISO 17892-1:2014.
Laboratorieprosedyre LLP001.

Mal: H:\regneark\INDEX\vanninnhold.xlsm

Ansvarlig: FP

Dato/Rev.nr.: 2016-01-13/08

Kontrollert av: EB

Boring	Tube	Part	Test	Dybde [m]	Vekt vann [g]	Vekt tørr materiale [g]	Vanninnhold [%]
	A			7.11	18.6	47.5	39.1
	A			7.45	21.6	52.8	40.9
	A			7.79	21.1	50.6	41.8
	B			7.11	20.7	47.7	43.5
	B			7.45	36.0	81.7	44.1
	B			7.79	14.9	31.6	47.0
	C			7.15	45.9	90.4	50.7
	C			7.24	120.6	241	50.0
	C			7.69	43.9	103	42.6
	D			7.11	24.2	48.2	50.3
	D			7.45	49.9	114	43.9
	D			7.79	20.6	58.4	35.3

KS-innblandingsforsøk

Dokumentnr.
20170837-01-R

Figurnr.
XXX

Dato
2018.01.31

beregnet/kontrollert
KNK/JRO




Humusinnhold

iht. Statens Vegvesen nr. 14.445 Humusinnhold ved gløding

Mal: H:\Regneark\INDEX\Humus.xltx
 Ansvarlig: EB
 Dato/Rev.nr.: 2015-03-17/05
 Kontrollert av: GS

Generell info: Kvantitativ bestemmelse av innhold av humus i løsmasse bestemt ved gløding av tørket prøve. Massetapet settes lik innholdet av humus, og angis i prosent av tørket prøve < 500µm før gløding (0-100%). Mengdeangivelsen relaterer seg til materiale som passerer sikt med maskevidde mindre enn 500µm, og representerer derfor ikke nødvendigvis den total prøven. Det blir gjort dobbeltanalyser, og resultatet oppgis i prosent og som ett gjennomsnitt av de to analysene. Frasiktet masse blir også oppgitt i prosent av total prøve, - hvis aktuelt.

Boring	Tube	Part	Test	Dybde [m]	Frasiktet masse %	Humus test 1 [%]	Humus test 2 [%]	Humus gjennomsnitt [%]
A	A			7.5	4.6	2.0	1.6	1.8
B	B			7.5	32.5	1.6	1.5	1.6
C	C			7.2		2.0	1.9	1.9
D	D			7.5		1.6	1.6	1.6

KS-innblandingsforsøk	Dokumentnr. 20180162	
	Figurnr. XX.XX	
	Dato 2018-02-05	Tegnet av JRO
		

#VALUE!

E4 Nærliggende prøveserie

Dybde (m)	Beskrivelse	Prøve Forsøk	Vanninnhold (%)							Tyngdetetthet (kN/m ³)					Porøsitet (%)	Humus (%)	Skjærfasthet (kN/m ²)										S _t Konus															
			10	20	30	40	50	60	70	16	17	18	19	20			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100																
5	LEIRE, tørrskorpe litt org.mat., få gruskorn få teglstein, glasskår, mørk gråbrun	1																																								
	LEIRE, tørrskorpe mørk brungrå	2	K																																							
	LEIRE få tørrskorpeflekker, mørk grå	3	K																																							
	LEIRE bløt til middels fast, meget plastisk humusholdig, noe tørrskorpeflekker, mørk grå	4	T												X				2																					4		
	LEIRE bløt, middels plastisk, humusholdig enkelte sandlommer og skjellfragmenter mørk grå	5	T												X				2.1																					6		
	LEIRE middels fast til bløt, humusholdig meget plastisk, enkelte sillag, mørk grå	6	Ø												X				2.3																					20		
	LEIRE, KVIKK bløt, enkelte skjellfragm. litt org.mat., mørk grå	7													X																										18	
	LEIRE, KVIKK bløt, middels plastisk mørk grå	8	T												X																										24	
	LEIRE, KVIKK veldig bløt til bløt middels plastisk, mørk grå	9	Ø												X																										11	
	LEIRE, KVIKK bløt, lite plastisk enkelte skjellfragm., sandkorn og fine gruskorn, mørk grå	10													X																										36	
	LEIRE, KVIKK veldig bløt til bløt, lite plastisk noen sandkorn og sandlommer, mørk grå	11													X																									30		
10	LEIRE, KVIKK veldig bløt til bløt, lite plastisk lite plastisk, mørk grå	12												X																										53		
	LEIRE, KVIKK bløt, lite plastisk enkelte fingruskorn og finsandlag, mørk grå	13	Ø											X																										43		
																																							60			
15																																								75		
																																								125		
20																																								80		
																																								140		
																																								170		
																																							190			

TEGNFORKLARING:

- Plastisitetsgrense/Vanninnhold/Flytegrense
- Ø = Ødometer forsøk
- 15—○—5 Enaks. trykkforsøk/def.ved brudd
- 10
- ▽ Konus forsøk, uforstyrret
- ▼ Konus forsøk, omrørt
- + Vinge boring
- Treksial forsøk, aktiv
- ⊙ Treksial forsøk, passiv
- ⊠ Direkte skjærforsøk
- S_t Sensitivitet
- P = Permeabilitetsforsøk
- K = Korngraderingsanalyse
- T = Treksial forsøk
- K/S = Kalk-/Sement stabilisering

E18 - Vestkorridoren

Borprofil
 Borpunkt nr.: GAW-169
 Prøve nr. 1 - 3 er poseprøver

Prøvetype: pose/72 mm
 Terrengekote: 11.4 moh
 Grunnvannst. dybde: m
 Dato boret: 2015-11-19

Dokument nr. 20150078-09-R
 Figur nr. E4
 Dato 2016-01-18 Tegnet av / kontr. RCH / ThV



Dybde (m)	Beskrivelse	Forsøk	Vanninnhold (%)		Tyngdetetthet (kN/m ³)		Porøsitet (%)	Humus (%)	Skjærfasthet (kN/m ²)		S _t Konus	
			10	20	30	40			50	60		70
5	1	LEIRE tørrskorpeflekker, enkelte gruskorn brun grå										
	2	LEIRE enkelte trerester, noe silt, mørk grå										
	3	LEIRE meget plastisk, homogen, bløt humusholdig, mørk grå	T	40	17	X	2.1		20		6	
	4	LEIRE humusholdig, veldig bløt til bløt middels plastisk, homogen, mørk grå	T	40	17	X	2		20		7	
	5	LEIRE bløt, noen skjellfragm, meget plastisk, mørk grå	Ø	40	17	X			20		9	
	6	LEIRE bløt til middels fast bløt til middels fast	T	40	17	X			20		11	
	7	LEIRE middels plastisk, homogen noen skjellfragmenter og gruskorn, mørk grå	T	40	17	X			20		11	
	8	LEIRE middels fast til veldig bløt middels plastisk, homogen enkelte skjellfragmenter og gruskorn	Ø	40	17	X			20		10	
	9	LEIRE veldig bløt, middels plastisk noe organisk, få skjellrester, svarte flekker	Ø	40	17	X			20		20	
	10	LEIRE, kvikk middels plastisk, homogen, noe organisk svarte flekker, mørk grå	Ø	40	17	X			20		20	
15											19	
											24	
20											14	
											13	
											22	
											16	
											88	
											57	

TEGNFORKLARING:

- Plastisitetstegnelse/Vanninnhold/Flytegrense
- Enaks. trykkforsøk/def. ved brudd
- Trealsial forsøk, aktiv
- Trealsial forsøk, passiv
- ⊞ Konus forsøk, uforstyrret
- ⊞ Konus forsøk, omrørt
- ⊞ Vingeboring
- = Ødometer forsøk
- P = Permeabilitetsforsøk
- K = Korngraderingsanalyse
- T = Trealsial forsøk
- K/S = Kalk-/Sement stabilisering
- S_t Sensitivitet


E18 - Vestkorridoren

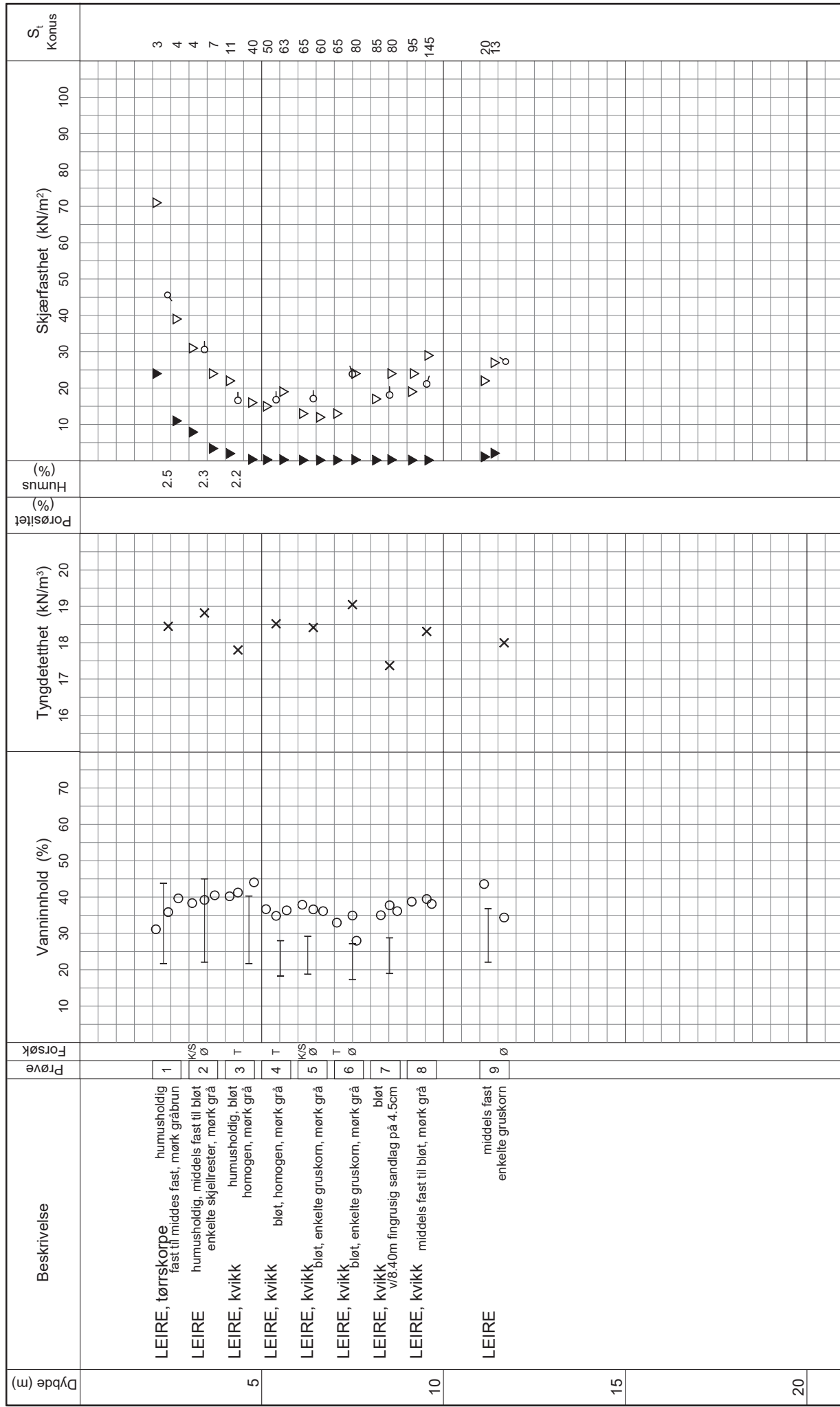
Document nr. 20150078-09-R
 Figur nr. E1
 Dato 2016-01-21
 Tegnet av / Amtr. FI / JRo

Borprofil
 Borpunkt nr.: GAW-109
 Prøve nr. 1-2 er poseprøver

Prøvetype: poser/72 mm
 Terrengkote: 13.7 moh
 Grunnvannt. dybde: - m
 Dato boret: 2015-11-25

Date/Rev. 2014-12-22/2





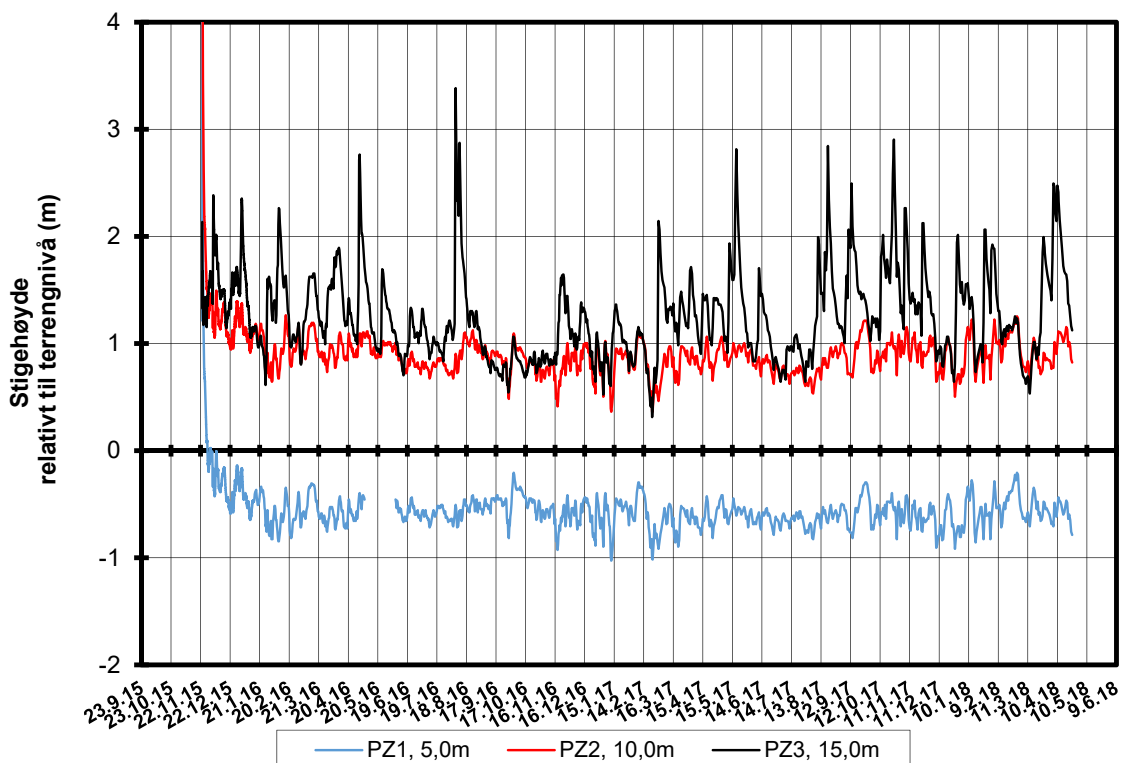
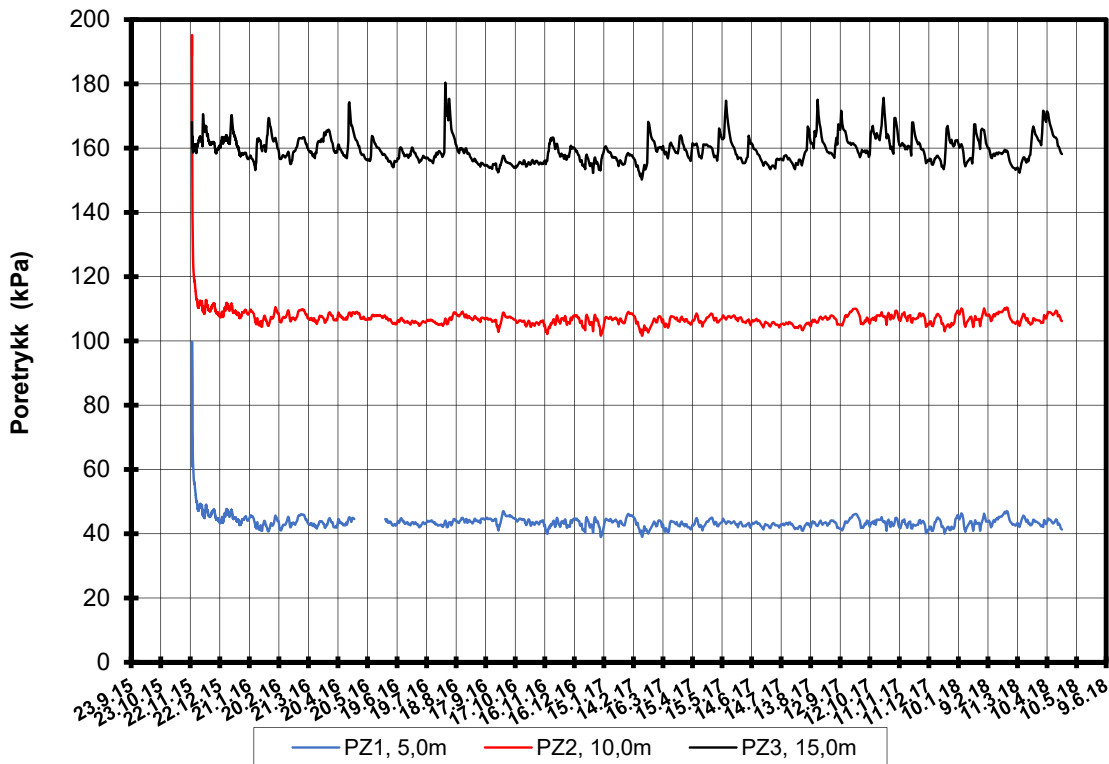
TEGNFORKLARING:

- Plastisitetsgrense/Vanninnhold/Flytegrense
- Enaks. trykkforsøk/def. ved brudd
- Konus forsøk, uforstyrret
- Konus forsøk, omrørt
- Vingeboring
- Trealsial forsøk, aktiv
- Trealsial forsøk, passiv
- ⊞ Direkte skjærforsøk
- S_t Sensitivitet
- Ø = Ødometer forsøk
- P = Permeabilitetsforsøk
- K = Korngraderingsanalyse
- T = Trealsial forsøk
- K/S = Kalk-/Sement stabilisering

E18 - Vestkorridoren

Dokument nr. 20150078-09-R	Date/Rev. 2014-12-22/2	
Figur nr. E6	Tegnet av / Amdr. FI / Thv	
Dato 2016-02-22	Prøvetype: 72 mm	
	Terrengkote: 10.8 moh	
	Grunnvannst. dybde: - m	
	Dato boret: 2015-12-02	





\\aajosifs01.aaj.no\odisk\Data\Grunnundersøkelser\Geosuite\AKERSHUS\ - Poretrykksmålere samlebase\STACK\GAW_169P\GAW_169P_a

E18 Lysaker Ramstadsletta

Resultater fra elektriske poretrykksmålere (PVT)

Borhull: GAW_169

Terrengekote målere: 11,36 moh

Dato for installasjon: 2015-11-23

Rapport nr.
20150078-09-R

Figur nr.

Tegner

AMW

Kontrollert

KrK

Godkjent

KrK

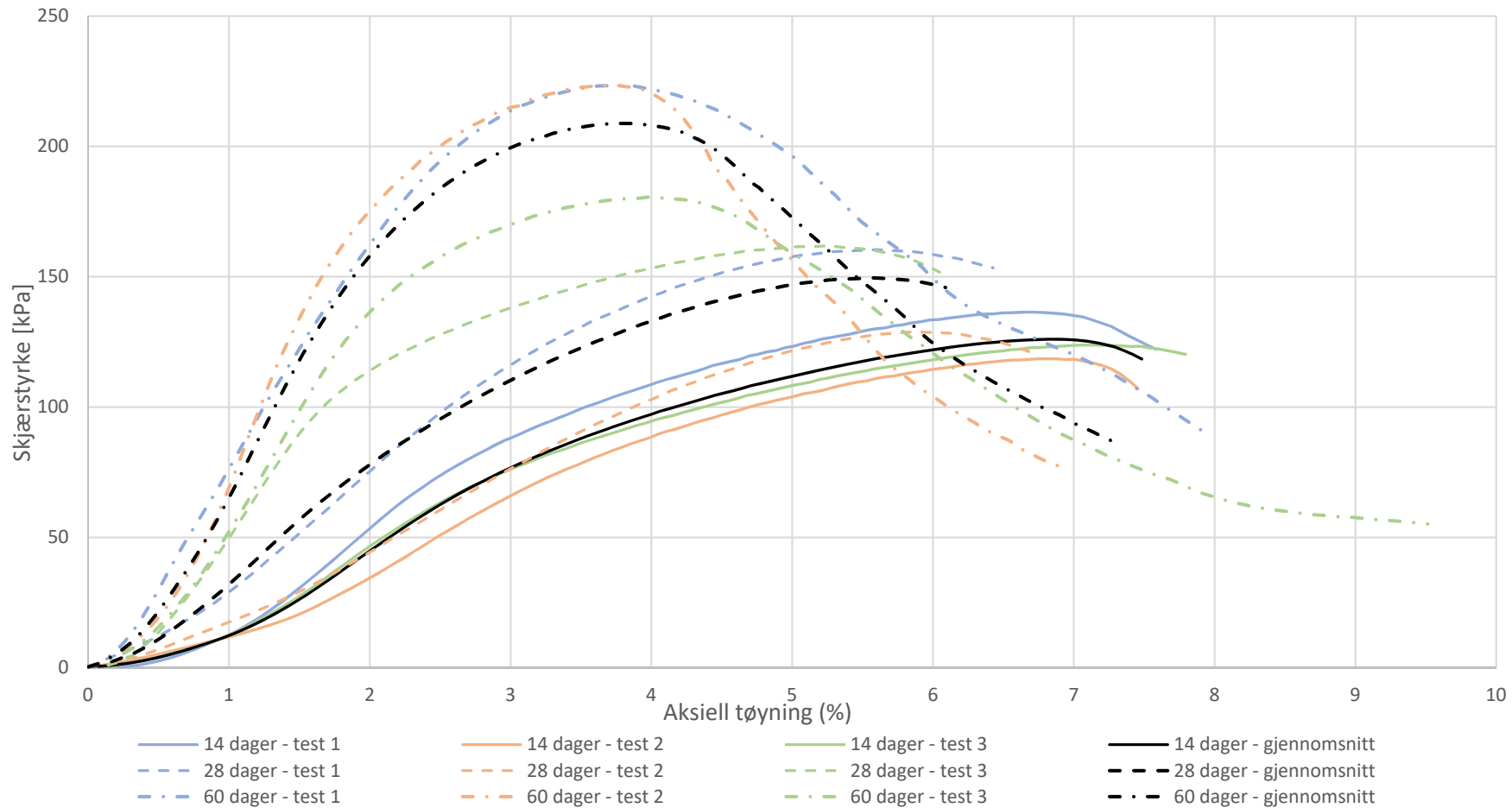
Dato

2016-11-14

NGI

E5 Resultater del A

KS-stabilisering testforsøk
CKD-CEM I Sammenstilling



E18 Lysaker - Ramstadsletta

Dok. Nr: V_107

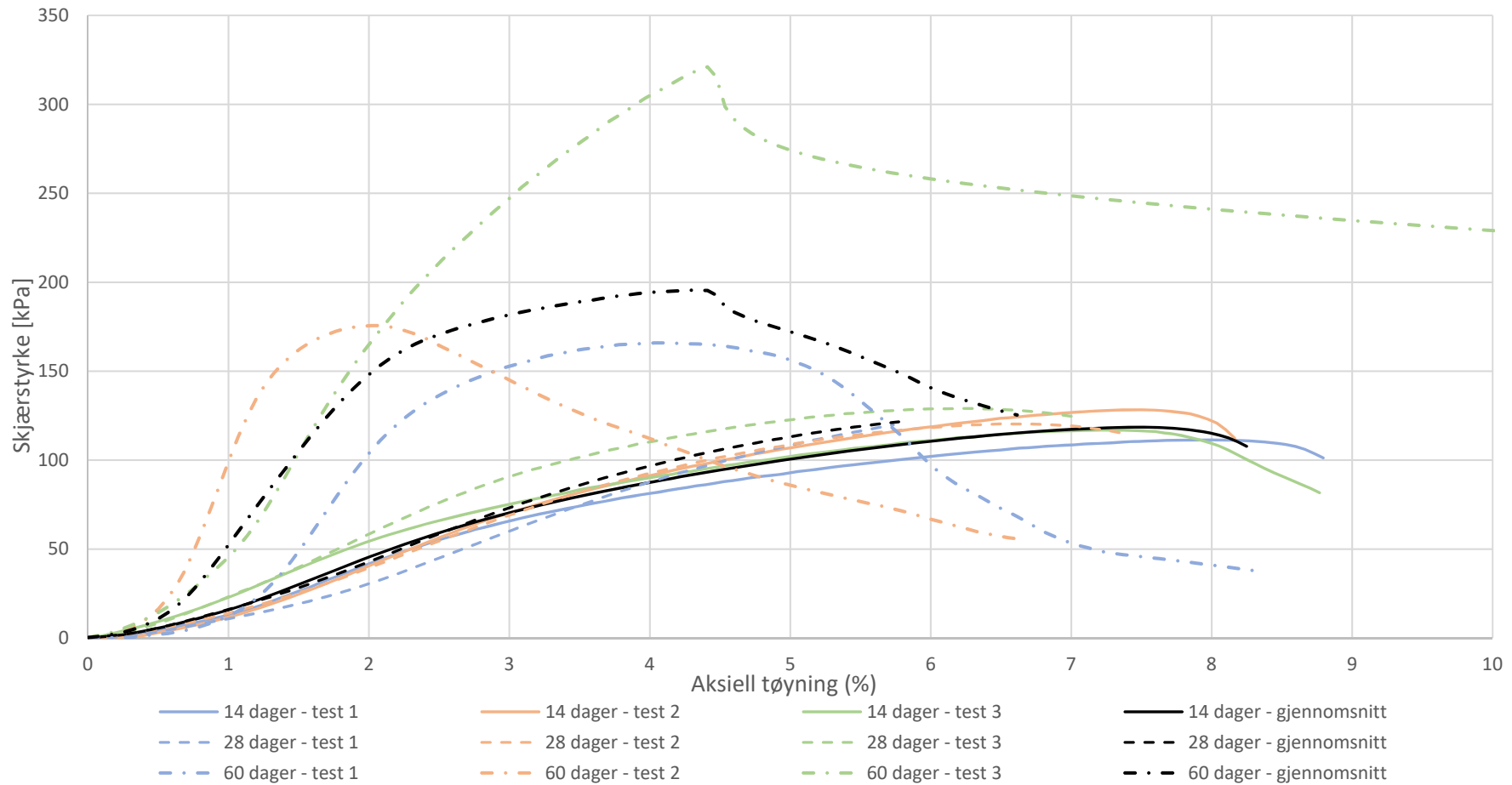
Dato: 13.06.2018

Sammenstilling innblandingsforsøk 75 kg/m³

Bindemiddel: CEM I

Tilsetningsstoff: CKD

KS-stabilisering testforsøk
CKD-CEM II Sammenstilling



E18 Lysaker - Ramstadsletta

Dok. Nr: V_107

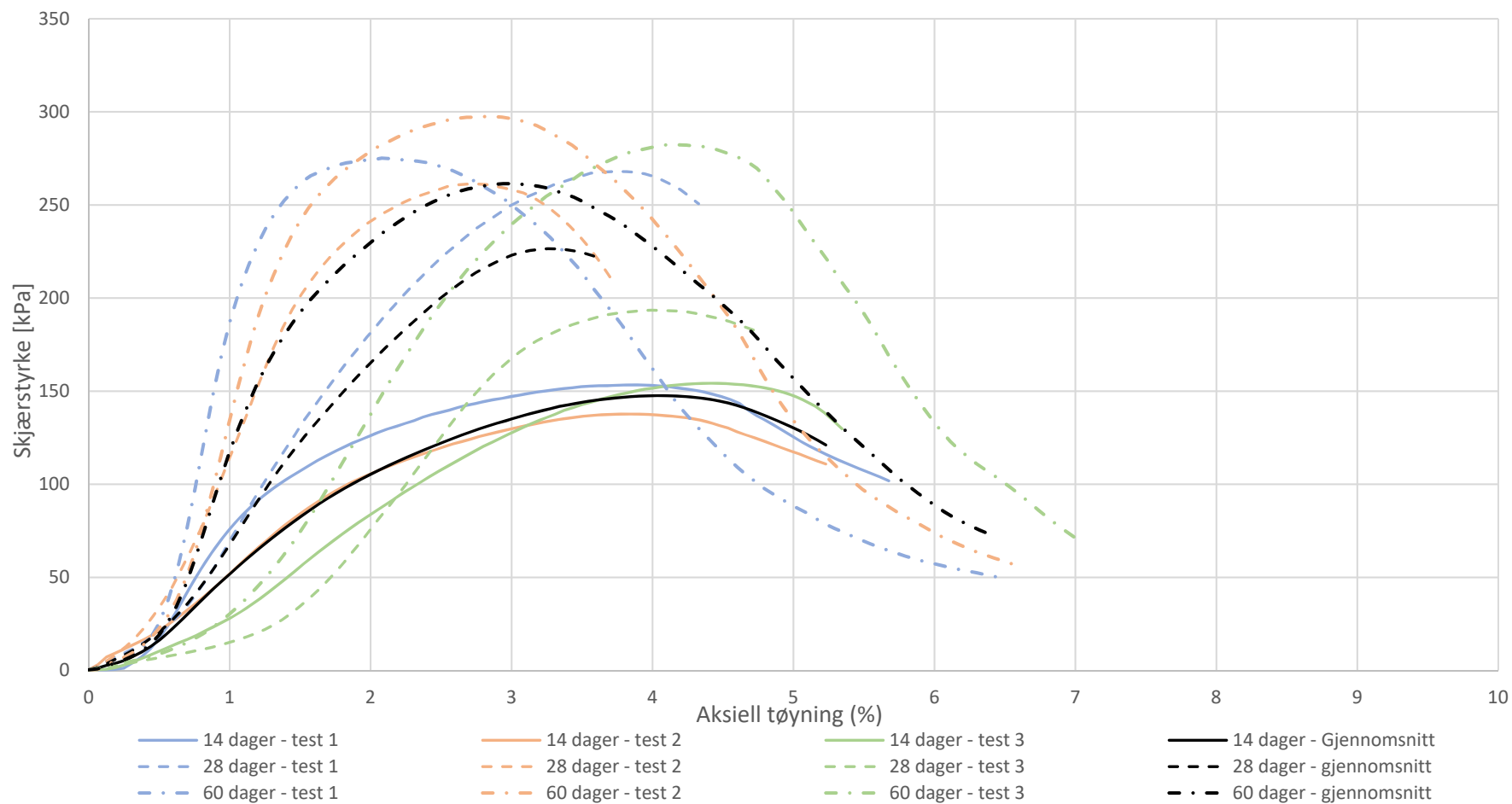
Dato: 13.06.2018

Sammenstilling innblandingsforsøk 75 kg/m³

Bindemiddel: CEM II

Tilsetningsstoff: CKD

KS-stabilisering testforsøk
CKD-CEM III Sammenstilling



E18 Lysaker - Ramstadsletta

Dok. Nr: V_107

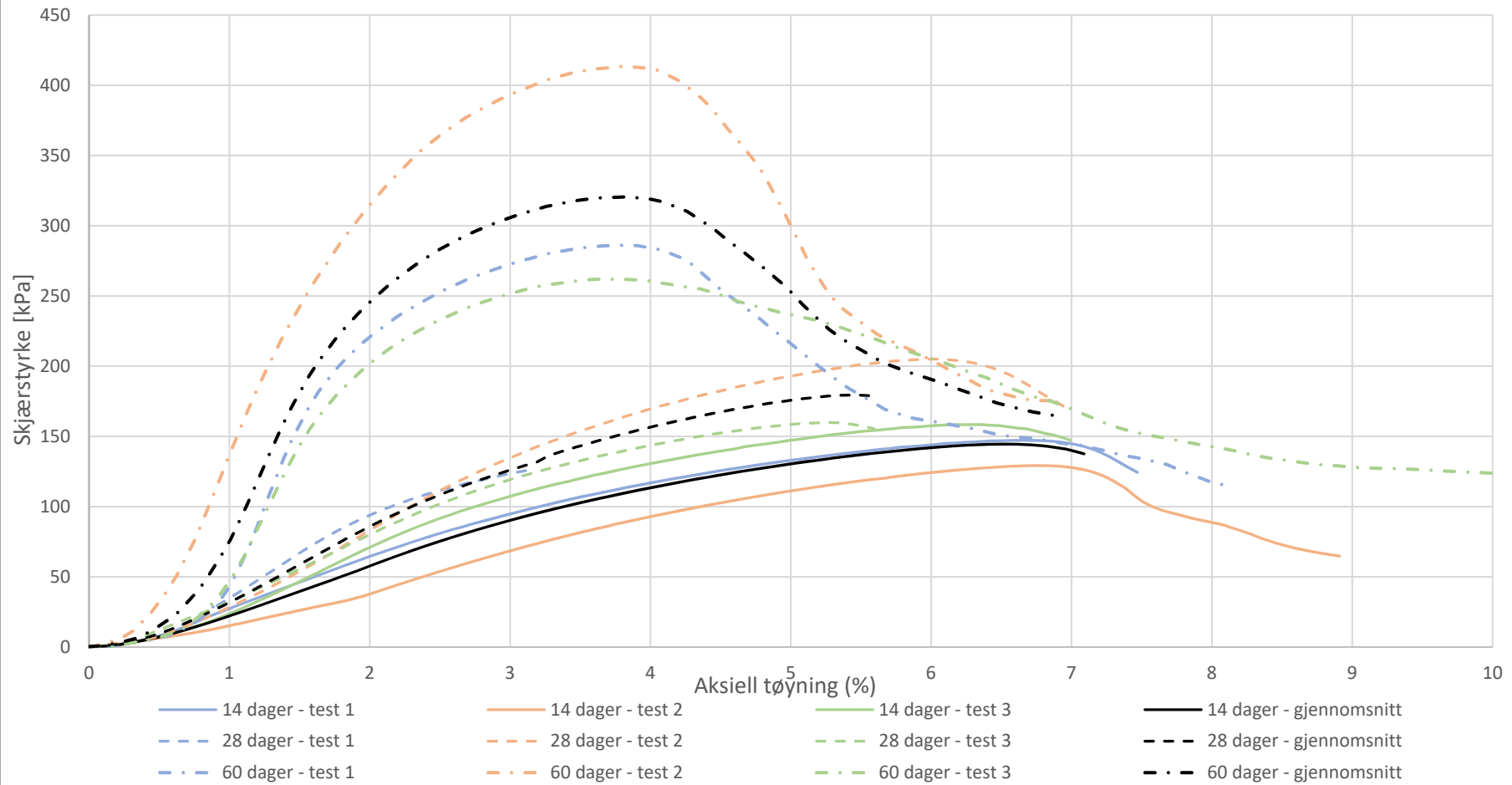
Dato: 13.06.2018

Sammenstilling innblandingsforsøk 75 kg/m³

Bindemiddel: CEM III

Tilsetningsstoff: CKD

KS-stabilisering testforsøk
Kalk-CEM I Sammenstilling



E18 Lysaker - Ramstadsletta

Dok. Nr: V_107

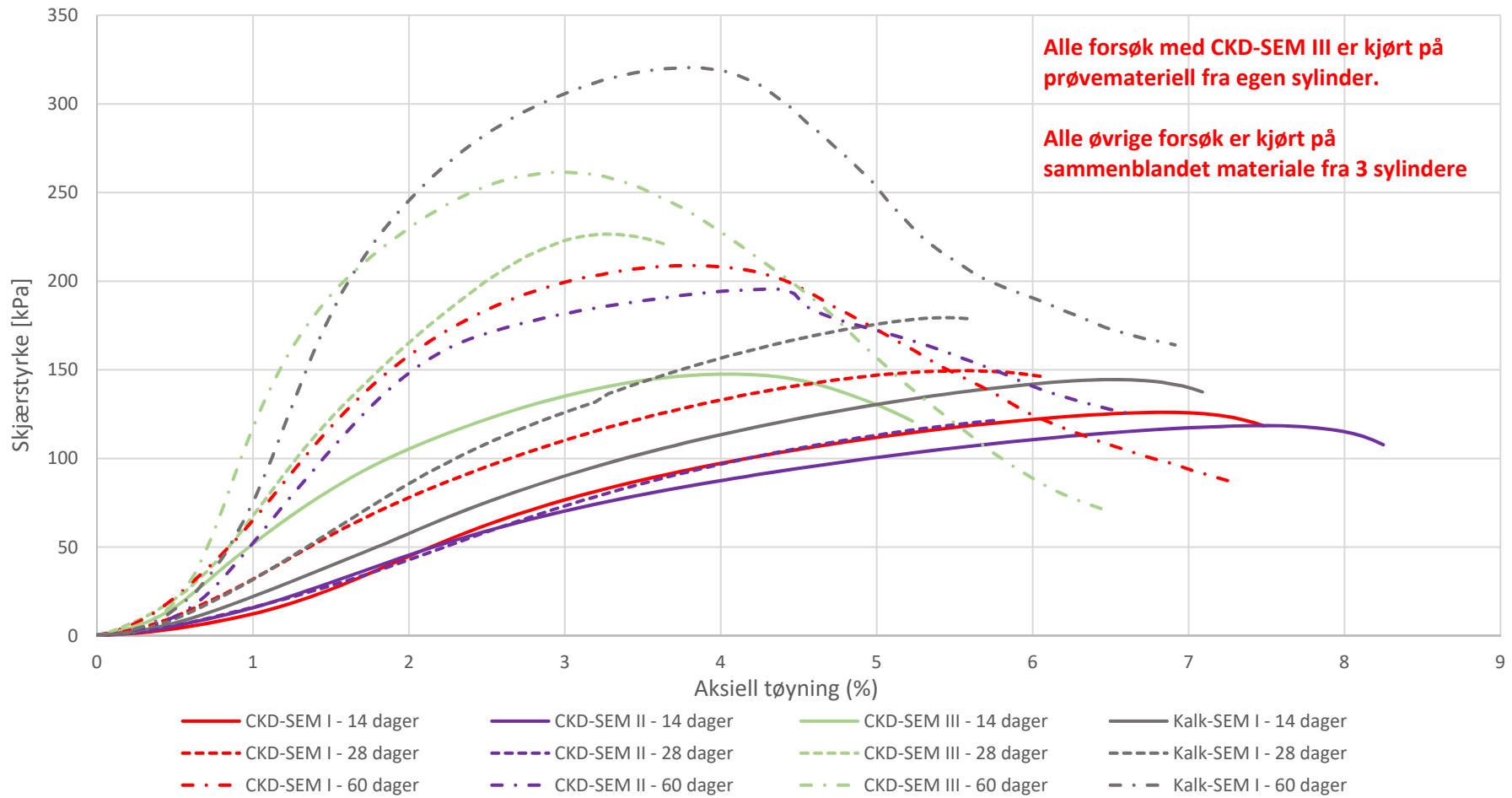
Dato: 13.06.2018

Sammenstilling innblandingsforsøk 75 kg/m³

Bindemiddel: CEM I

Tilsetningsstoff: Kalk

KS-stabilisering testforsøk
Sammenstilling av gjennomsnitt



E18 Lysaker - Ramstadsletta

Dok. Nr: V_107

Dato: 13.06.2018

Sammenstilling innblandingsforsøk 75 kg/m³

Bindemiddel: Var.

Tilsetningsstoff: Var.

E6 Resultater del B

$$\sigma_{p,brudd} = 2 \cdot \tau_p + K_p \cdot \sigma_H$$

$\gamma_{materiale}$	18 kN/m ³	ca gjennomsnitt fra V_520
GV nivå	1 m	meter under terreng
K_p	3,5 -	Antatt, basert på anbefaling fra KS veilederen fra NGF 4.5.1.2
τ_p	175 kPa	Antatt maksimalverdi for ribber, SVV HB 221

$$E\text{-modul} = X \cdot \tau_p$$

X	200
X	400
X	600

Dybde [m]	σ_H [kPa]	σ_H' [kPa]	$\sigma_{p,brudd}$ [kPa]
0	0	0	350
7,5	135	70	823
15	270	130	1295

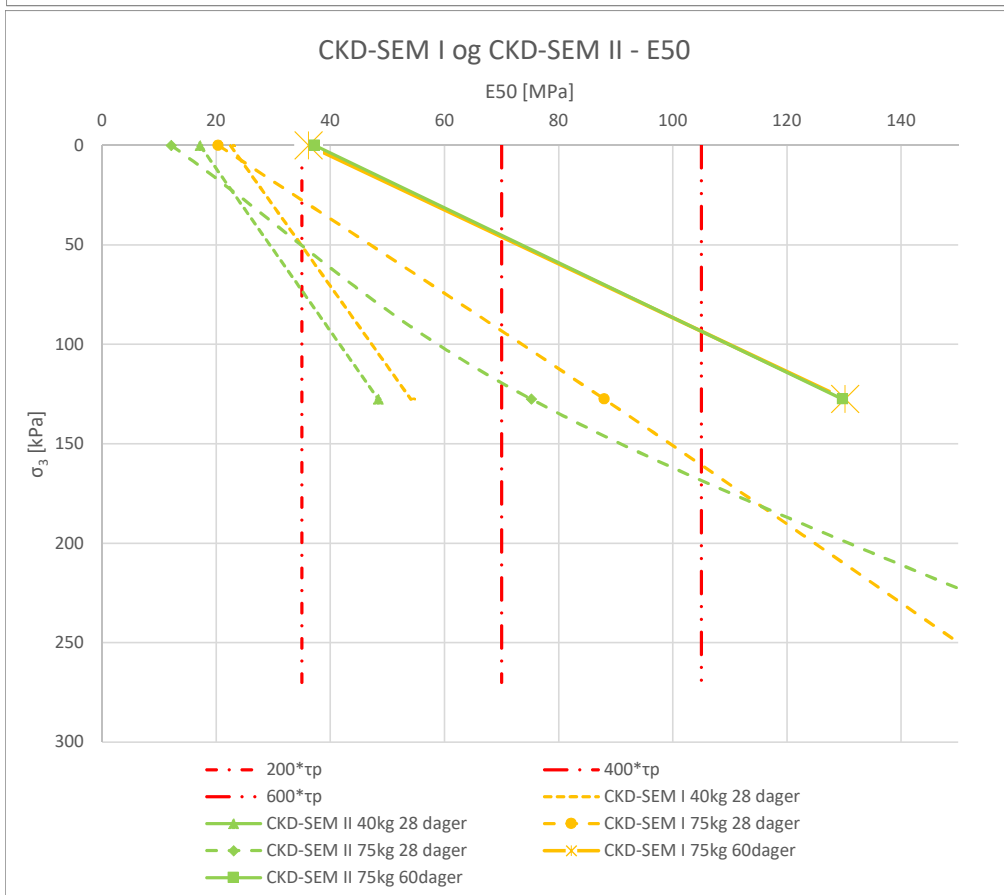
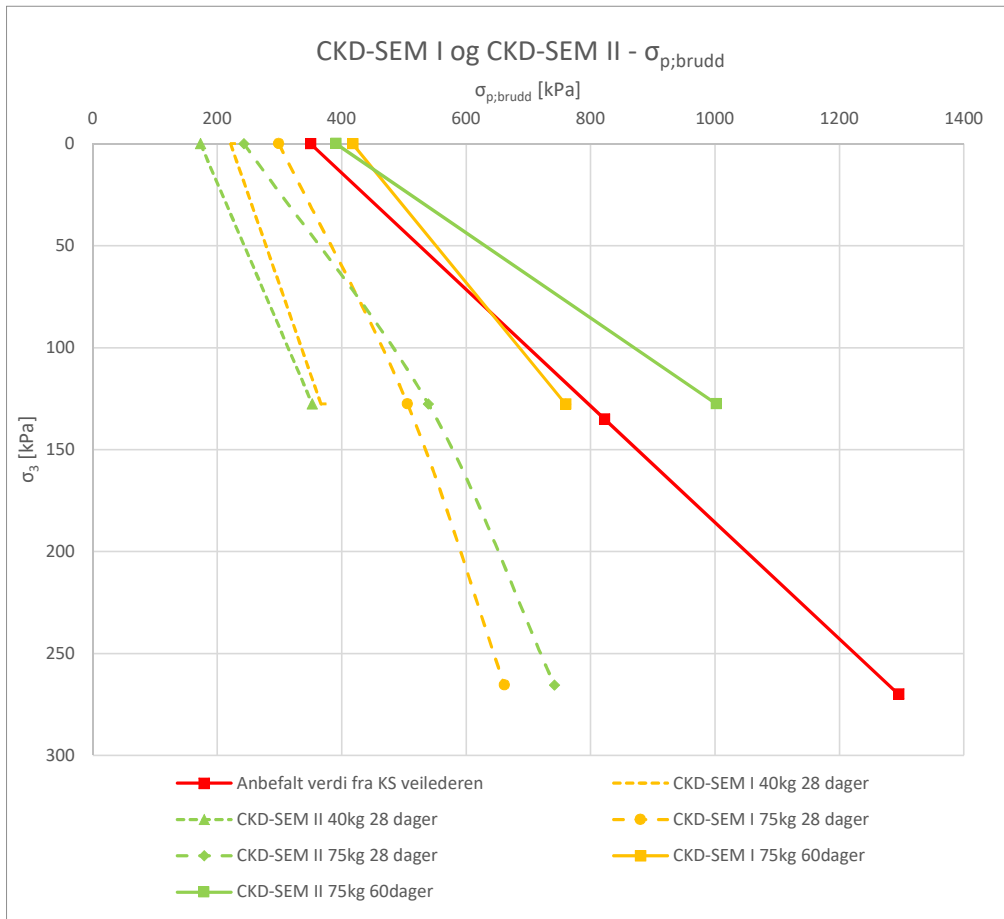
SGI anbefalt		
200* τ_p	400* τ_p	600* τ_p
E-modul [MPa]	E-modul [MPa]	E-modul [MPa]
35	70	105
35	70	105
35	70	105

SEMI

Forsøk	innblanding 50/50 SEM I [kg]	konsoliderin gstid [dager]	p0 [kPa]	Dybde [m]	Skjærspenning ved brudd [kPa]	Vertikal spenning ved brudd [kPa]	Aksiel tøyning ved brudd [%]	Aksiel tøyning ved halv brudd [kPa]	E50 [Mpa]
enaks	75	28	0,0	0,0	149,5	299,1	5,6	1,5	20,4
treaks	75	28	127,6	7,5	189,1	505,9	5,0	0,4	88,0
treaks	75	28	265,5	15	198,0	661,5	4,1	0,3	157,9
enaks	75	60	0	0	208,8	417,6	3,8	1,2	36,2
treaks	75	60	127,6	7,5	316,1	759,8	5,0	0,5	130,2
enaks	40	28	0,0	0,0	110,8	221,5	3,4	1,0	22,5
treaks	40	28	127,6	7,5	119,5	366,7	5,1	0,4	54,1

SEMII

Forsøk	innblanding 50/50 SEM I [kg]	konsoliderin gstid [dager]	p0 [kPa]	Dybde [m]	Skjærspenning ved brudd [kPa]	Vertikal spenning ved brudd [kPa]	Aksiel tøyning ved brudd [%]	Aksiel tøyning ved halv brudd [kPa]	E50 [Mpa]
enaks	75	28	0,0	0,0	121,5	243,1	5,8	2,0	12,2
treaks	75	28	127,6	7,5	205,8	539,3	5,0	0,5	75,2
treaks	75	28	265,5	15	238,1	741,8	4,0	0,3	185,5
enaks	75	60	0	0	195,5	391,0	4,3	1,0	37,3
treaks	75	60	127,6	7,5	437,2	1002,2	5,1	0,7	129,8
enaks	40	28	0,0	0,0	86,6	173,1	3,7	1,0	17,2
treaks	40	28	127,6	7,5	112,5	352,7	5,0	0,5	48,4



$$\sigma_{p,brudd} = 2 \cdot \tau_p + K_p \cdot \sigma_H$$

$\gamma_{materiale}$	18 kN/m ³	ca gjennomsnitt fra V_520
GV nivå	1 m	meter under terreng
K_p	3,5 -	Antatt, basert på anbefaling fra KS veilederen fra NGF 4.5.1.2
τ_p	175 kPa	Antatt maksimalverdi for ribber, SVV HB 221

$$E\text{-modul} = X \cdot \tau_p$$

X	200
X	400
X	600

Dybde [m]	σ_H [kPa]	σ_H' [kPa]	$\sigma_{p,brudd}$ [kPa]
0	0	0	350
7,5	135	70	823
15	270	130	1295

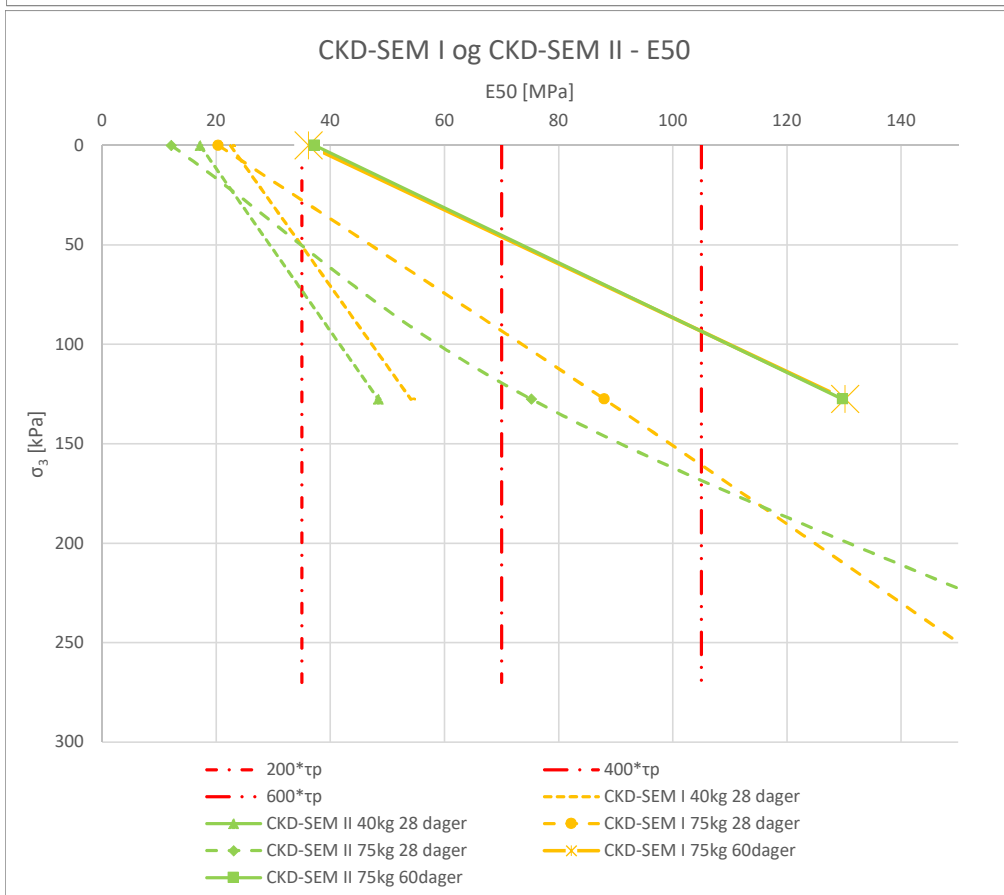
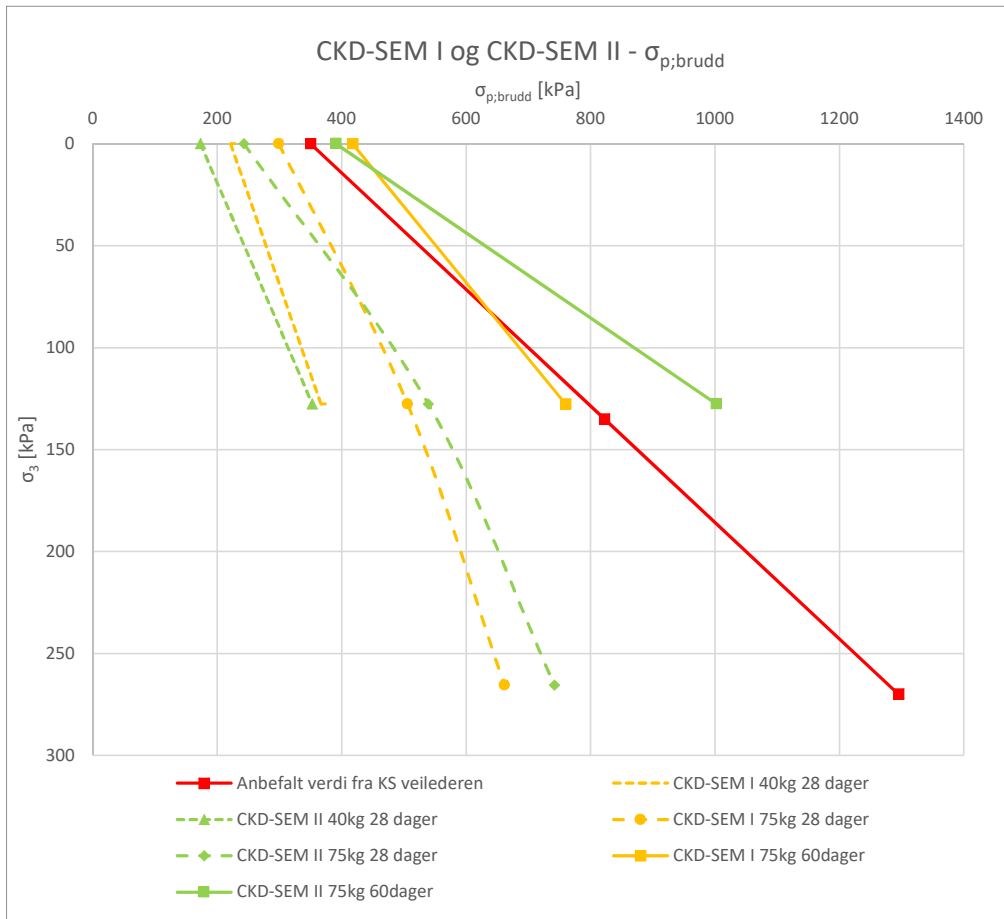
SGI anbefalt		
200* τ_p	400* τ_p	600* τ_p
E-modul [MPa]	E-modul [MPa]	E-modul [MPa]
35	70	105
35	70	105
35	70	105

SEMI

Forsøk	innblanding 50/50 SEM I [kg]	konsoliderin gstid [dager]	p0 [kPa]	Dybde [m]	Skjærspenning ved brudd [kPa]	Vertikal spenning ved brudd [kPa]	Aksiel tøyning ved brudd [%]	Aksiel tøyning ved halv brudd [kPa]	E50 [Mpa]
enaks	75	28	0,0	0,0	149,5	299,1	5,6	1,5	20,4
treaks	75	28	127,6	7,5	189,1	505,9	5,0	0,4	88,0
treaks	75	28	265,5	15	198,0	661,5	4,1	0,3	157,9
enaks	75	60	0	0	208,8	417,6	3,8	1,2	36,2
treaks	75	60	127,6	7,5	316,1	759,8	5,0	0,5	130,2
enaks	40	28	0,0	0,0	110,8	221,5	3,4	1,0	22,5
treaks	40	28	127,6	7,5	119,5	366,7	5,1	0,4	54,1

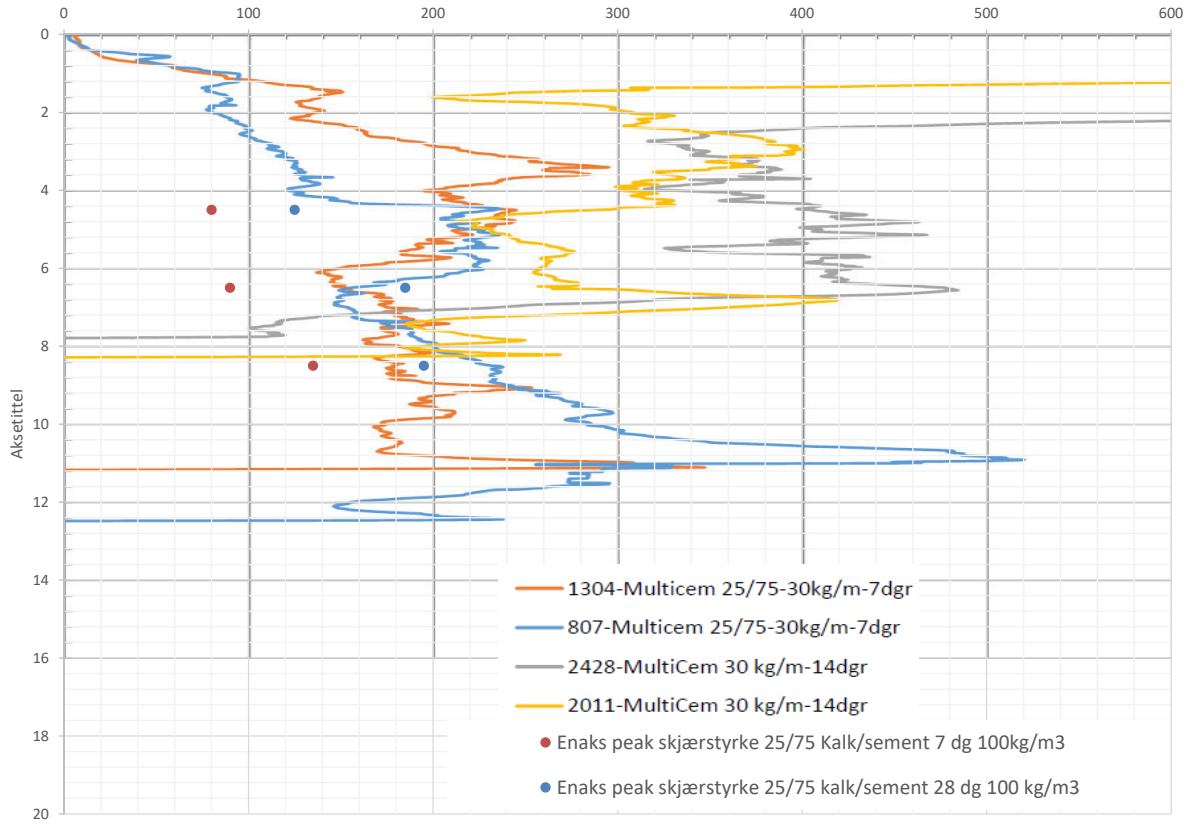
SEMII

Forsøk	innblanding 50/50 SEM I [kg]	konsoliderin gstid [dager]	p0 [kPa]	Dybde [m]	Skjærspenning ved brudd [kPa]	Vertikal spenning ved brudd [kPa]	Aksiel tøyning ved brudd [%]	Aksiel tøyning ved halv brudd [kPa]	E50 [Mpa]
enaks	75	28	0,0	0,0	121,5	243,1	5,8	2,0	12,2
treaks	75	28	127,6	7,5	205,8	539,3	5,0	0,5	75,2
treaks	75	28	265,5	15	238,1	741,8	4,0	0,3	185,5
enaks	75	60	0	0	195,5	391,0	4,3	1,0	37,3
treaks	75	60	127,6	7,5	437,2	1002,2	5,1	0,7	129,8
enaks	40	28	0,0	0,0	86,6	173,1	3,7	1,0	17,2
treaks	40	28	127,6	7,5	112,5	352,7	5,0	0,5	48,4

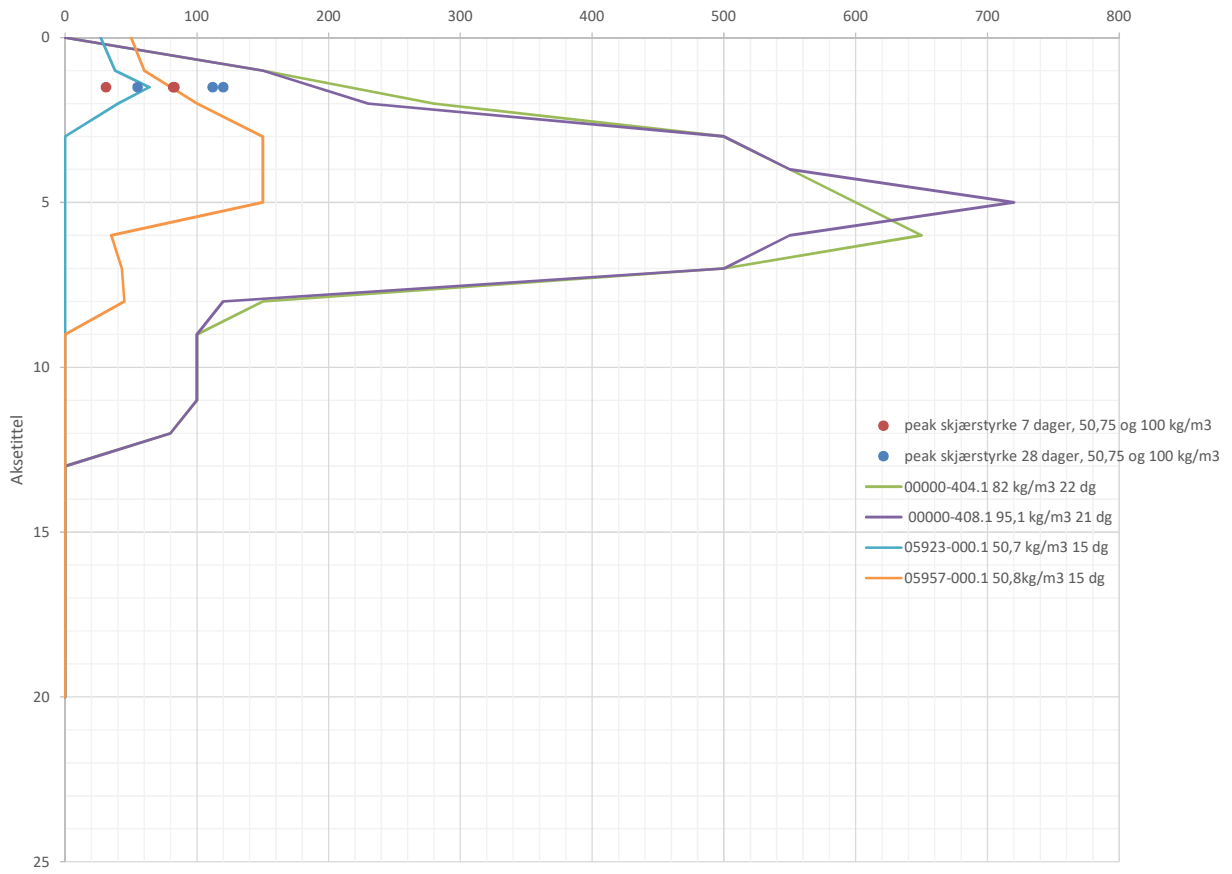


E7 Nærliggende felttester av KS-peler

E16 Bærumsveikrysset, 25/75 multisem/sement FELT og 25/75 kalk/sement LAB



Lysaker Polaris. Innblanding med 50/50 sement/multicem, felt og lab



Mustad Betongkulvert Granfoss. Innblanding med 50/50 sement/multicem. Testtid felt: 26-27 dager

