

Sivert Eidsmo

**NTNU**  
Norges teknisk-naturvitenskapelige  
universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Sivert Eidsmo

## Sammenligning av ulike bindemidler for dypstabilisering av kvikkleire

Juli 2019





Kunnskap for en bedre verden

# Sammenligning av ulike bindemidler for dypstabilisering av kvikkleire

**Sivert Eidsmo**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juli 2019

Hovedveileder: Arnfinn Emdal

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg - og miljøteknikk



## **Forord**

Denne masteroppgaven er utført som avslutning av en to-årig masterutdanning i Bygg- og miljøteknikk ved NTNU, våren 2019. Temaet for oppgaven ble valgt på bakgrunn av et ønske om å kombinere geoteknikk og betongteknologi. Arbeidet har vært både givende og lærerikt, men ikke minst krevende.

Jeg ønsker å takke veileder Arnfinn Emdal for gode diskusjoner og hjelp underveis. I tillegg ønsker jeg å takke Svein Eriksson i Norcem AS og Kjell Skjeggerud i Heidelberg Cement for innspill og for å ha bidratt med bindemidler til undersøkelsene. Karl Ivar Volden Kvisvik og Espen Andersen skal også ha takk for kyndig veiledning i laboratoriet.

Trondheim, Juli 2019

Sivert Eidsmo

## Sammendrag

Denne masteroppgaven undersøker udrenert skjærfasthet for kvikkleire stabilisert med ulike bindemidler. Det er tilsammen laget 126 prøver med stabilisert leire som er testet i enaksialt trykkapparat etter herding i 1, 7 og 28 dager. Materialet som er benyttet i forsøkene er kvikkleire fra Norwegian Geo-Test Sites Tiller-Flotten. Av bindemidler er det benyttet syv ulike blandinger av Cement Kiln Dust(CKD) og sement fra Norcems fabrikk i Brevik, samt en blanding av CKD og sement fra Slite i Sverige. Det er også gjort forsøk med en blanding av kalk og sement. CKD er et biprodukt fra sementproduksjon som hovedsakelig inneholder brent kalk, sement og aske fra forbrenning. Fordi CKD er et biprodukt er det ingen  $CO_2$ -utslipp knyttet til produksjonen, og bruk av CKD i dypstabilisering kan bidra til å senke utslippene betraktelig.

Laboratorieundersøkelsene i masteroppgaven er todelt; del 1 er hovedsakelig en sammenligning av ulike sammensetninger av Cement Kiln Dust og forskjellige sementtyper i ulike blandingsforhold. Sementtypene som er undersøkt er Industrisement, Standardsement FA (med flygeaske for lavere  $CO_2$ -utslipp) og Mikrosement (finmalt Industrisement). Bindemidlene er tilsatt i en mengde på 90 kg per  $m^3$  leire. Resultatene viser at bruk av mikrosement gir økt tidlig fasthet og blandingen med Standardsement FA gir bedre 28-dagers skjærfasthet med ca 20% lavere  $CO_2$ -utslipp. Den mest effektive blandingen med hensyn på fasthet og  $CO_2$ -utslipp er CKD/Mikrosement med blandingsforhold 70/30.

Del 2 av laboratorieundersøkelsene er en ren sammenligning av 50/50 CKD/Industrisement og 50/50 kalk/Industrisement for innblandingsmengdene 60, 90 og 120  $kg/m^3$ . Resultatene viser at blandingen med CKD oppnådde tydelig høyere 28-dagers skjærfasthet for alle innblandingsmengder.

Alle blandinger som er undersøkt ga 28-dagers skjærfasthet over 200 kPa.

## Summary

This master thesis examines the undrained shear strength of quick clay stabilized with different binders. A total of 126 samples were tested in an unconfined pressure test rig after hardening for 1, 7 and 28 days. The quick clay was collected from Norwegian Geo-Test Sites Tiller - Flotten. Seven different binder-combinations with Cement Kiln Dust (CKD) and cement from the Norcem cement plant in Brevik and one mix with CKD and cement from the Cementa cement plant in Slite in Sweden were used. One mix with lime and cement were also used. Cement Kiln Dust is a by-product from cement manufacturing that contains lime, cement and ash from the cement kiln. CKD has no  $CO_2$  emissions, and using it as a binder with the deep mixing method can reduce the total emissions considerably.

The laboratory investigations in the thesis were separated in two parts. Part 1 was a comparison between different combinations of CKD and three types of cement. The cements used were Norcem Industrisement, Norcem Standardsement FA (cement containing fly ash to lower  $CO_2$  emissions) and Norcem Mikro (Norcem Industrisement with higher fineness). There were added 90 kg of binder per  $m^3$  of clay. The results show that using Norcem Mikro will increase the early age shear strength. Standardsement FA gives a higher 28-day shear strength with about 20% lower  $CO_2$  emissions. The most efficient combination with regards to strength and emissions was a mix with 70 % CKD and 30% Norcem Mikro.

Part 2 of the laboratory investigations was a comparison between 50/50 CKD/Norcem Industrisement and 50/50 lime/ Norcem Industrisement. In this part there were binder dosages of 60, 90 and 120  $kg/m^3$ . The blend with CKD reached higher 28-day strengths for all dosages.

All of the combinations that were investigated reached 28-day shear strength above 200 kPa.

# Innhold

Forord . . . . .	i
Sammendrag . . . . .	ii
Summary . . . . .	iii
<b>1 Introduksjon</b>	<b>2</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	2
1.2 Problemstilling . . . . .	3
1.3 Fremgangsmåte . . . . .	3
1.4 Begrensninger . . . . .	3
1.5 Rapportens oppbygging . . . . .	4
<b>2 Teori</b>	<b>5</b>
2.1 Dypstabilisering . . . . .	5
2.1.1 Fasthet i stabiliserte løsmasser . . . . .	5
2.2 Produksjon av bindemidler . . . . .	9
2.2.1 Sement . . . . .	9
2.2.2 Cement Kiln Dust . . . . .	12
2.2.3 Flygeaske . . . . .	13
2.2.4 Ulesket kalk . . . . .	13
2.2.5 Utslipp fra produksjon av bindemidler . . . . .	14
2.3 Bindemidlenes virkemåte . . . . .	14
2.3.1 Sementreaksjoner . . . . .	15
2.3.2 Ulesket kalk . . . . .	16
2.3.3 Cement Kiln Dust . . . . .	16
2.3.4 Pozzolanreaksjonen . . . . .	16



2.3.5	Strukturforandring ved ionebytte . . . . .	17
2.3.6	Andre faktorer som påvirker herding . . . . .	17
2.4	Parametre fra enaksiale trykkforsøk . . . . .	18
2.5	Lagringseffekter i kvikkleire . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Materialer og Metode</b>	<b>20</b>
3.1	Leire . . . . .	20
3.2	Bindemidler . . . . .	22
3.3	Prøveprogram . . . . .	24
3.3.1	Valg av variabler i prøveprogrammet . . . . .	24
3.3.2	Del 1 - Sammenligning av ulike typer Multicem . . . . .	25
3.3.3	Del 2 - Sammenligning av Multicem og Kalk/Sement . . . . .	26
3.4	Rutineundersøkelser på leire . . . . .	26
3.5	Innblanding av bindemidler og tilvirking av prøver . . . . .	26
3.6	Forsøk på stabiliserte prøver . . . . .	29
3.7	Datainnsamling . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>32</b>
4.1	Rutineundersøkelser . . . . .	32
4.2	Del 1 - Sammenligning av ulike typer Multicem . . . . .	33
4.3	Del 2 - Sammenligning av Multicem og Kalk/Sement . . . . .	36
4.4	Densiteter for KC og MC . . . . .	39
4.5	CKD og Industrisement i leire fra storblokk og miniblokk . . . . .	40
4.6	Elastisitetsmodul . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>42</b>
5.1	Rutineundersøkelser . . . . .	42
5.2	Metode og materialer . . . . .	43
5.3	Del 1 - Sammenligning av ulike typer Multicem . . . . .	44
5.4	Del 2: Sammenligning av Multicem og kalk/ment . . . . .	46
5.5	CKD og Industrisement i leire fra storblokk og miniblokk . . . . .	47
5.6	Elastisitetsmodul . . . . .	48

<i>INNHold</i>	vi
<b>6 Oppsummering</b>	<b>49</b>
<b>7 Vider arbeid</b>	<b>50</b>
<b>Bibliografi</b>	<b>53</b>
<b>A Resultater fra enaksiale trykkforsøk</b>	<b>54</b>
A.1 Beskrivelse . . . . .	54
<b>B Resultater fra rutineundersøkelser</b>	<b>97</b>

# Figurer

2.1	Hovedprinsippene ved dypstabilisering . . . . .	6
2.2	Vanlige mønster ved dypstabilisering . . . . .	7
2.3	Virkning av dypstabilisering på ulike jordtyper . . . . .	8
2.4	Sammenheng mellom fasthet og mengde bindemiddel . . . . .	8
2.5	Skjematisk fremstilling av sementproduksjon . . . . .	10
2.6	Bestemmelse av $E_{50}$ fra enaksialt trykkforsøk . . . . .	18
3.1	Løsmassekart og beliggenhet, NGTS Flotten . . . . .	21
3.2	Innblanding av bindemiddel . . . . .	28
3.3	Trykkapparatet som ble benyttet ved tilvirking av prøver. . . . .	29
3.4	Hydraulisk presse som ble benyttet ved trykkforsøk. . . . .	30
4.1	En av fem 160 mm blokkprøver som ble benyttet. . . . .	33
4.2	Skjærfasthet M1-M4 . . . . .	34
4.3	Skjærfasthet M5-M8 . . . . .	34
4.4	Skjærfasthet - tid for M1-M8 . . . . .	35
4.5	Skjærfasthet for MC og KC . . . . .	36
4.6	Skjærfasthet - tid for MC og KC . . . . .	37
4.7	Skjærfasthet - innblandingsmengde for MC og KC . . . . .	38
4.8	Densitet - Innblandingsmengde for KC(50/50 kalk/sement). . . . .	39
4.9	Densitet - Innblandingsmengde for Multicem (50/70 CKD/Industrisement). . . . .	39
4.10	Skjærfashtet - tid for MC (storblokk) og M1 (miniblokk) . . . . .	40
4.11	Elastisitetsmodul - skjærfasthet for alle bindemidler. . . . .	41
5.1	Forholdstall mellom skjærfasthet og utslipp for M1-M8 og KC . . . . .	46

# Tabeller

2.1	Brenselandeler ved Norcem Brevik i 2017 (Norcem AS, 2019b) . . . . .	12
2.2	Sammenligning av CKD fra Brevik og Kjøpsvik. . . . .	13
2.3	Forkortelser av oksider . . . . .	14
2.4	Klinkerfaser i Portlandsement . . . . .	15
3.1	Parametere for leira mellom 11-20 meters dyp, Flotten. . . . .	21
3.2	Oversikt over prøver brukt i laboratorieforsøkene. . . . .	21
3.3	Egenskapene til sementene som er benyttet, data fra (Norcem AS, 2019g). . . . .	22
3.4	Bindemiddelsammensetninger for M1-M8, MC og KC. . . . .	23
3.5	Utslippsestimat fra bindemidlene som er benyttet. . . . .	24
3.6	Del 1 - Sammenligning av ulike typer Multicem. . . . .	25
3.7	Del 2 - Sammenligning av Multicem og Kalk/Sement. . . . .	26
3.8	Henvisning til standarder for labforsøk. . . . .	27
4.1	Gjennomsnittsverdier fra rutineforsøk, 160 mm og 270 mm . . . . .	32

# Kapittel 1

## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn

Dypstabilisering av løsmasser er en metode som har vært i bruk siden midten av 1970-tallet. I starten ble det i all hovedsak benyttet kalk, men på midten 1980-tallet ble sement tatt i bruk. Senere har en blanding av kalk og sement blitt mest vanlig. En av utfordringene med dypstabilisering med kalk og sement er at prosessene for å fremstille bindemidlene medfører svært store  $CO_2$ -utslipp. I store infrastrukturprosjekter kan det installeres flere hundre tusen løpemetere med kalksementpeler, noe som medfører stort forbruk av bindemidler og store utslipp.

De siste årene har bruk av bindemiddelet Multicem blitt mer utbredt (Norsk Geoteknisk Forening, 2012). Multicem er produsenten Norcems produktnavn på en blanding av industrisement og bypasstøv, eller CKD (Cement Kiln Dust). CKD skilles ut ved sementproduksjon, og betraktes som et biprodukt. Støvet tas ut fordi det inneholder en del stoffer som ikke er ønskelig i betong, men komponenter som kalk, små mengder sement og salter bidrar til fasthetsøkning i reaksjon med jord. I Norge har Multicem blitt benyttet til stabilisering av løsmasser siden 2004 og i dag leveres Multicem med 25, 50 og 75% andel CKD (Norcem AS, 2019c). I tillegg til at Multicem har lignende egenskaper som tradisjonell kalk/sement, har produktet langt lavere utslipp av  $CO_2$ , det er billigere og man får nytte av et produkt som det tidligere har vært utfordringer med å bli kvitt.

Selv om det er Industrisement som tradisjonelt har blitt brukt i Multicem, finnes det idag fle-

re typer sementer på markedet som kan være aktuelle. Dette er produkter som sammen med CKD kan bidra til å øke fasthet, eller ytterligere redusere  $CO_2$  -utslipp. Stabiliseringseffekten av disse sementproduktene er derimot ikke så godt dokumentert, og det er derfor ønskelig å sammenligne med mer veltestede produkter. Ofte velges kalk/sementblandinger på grunn av mer erfaring med produktene. For å øke bruken av Multicem er det derfor nødvendig å dokumentere effekten sammenlignet med kalk/sement.

## 1.2 Problemstilling

Problemstillingen i oppgaven består av følgende spørsmål:

- Hvilken effekt har bruken av ulike sementtyper sammen med CKD?
- Er det mulig å redusere utslipp av  $CO_2$  ved å endre sammensetningen av bindemidler i blandinger med CKD og sement?
- Hvilken effekt har Multicem på sensitiv leire fra Trøndelag, sammenlignet med kalk/sement?

## 1.3 Fremgangsmåte

For å svare på problemstillingen har det utført laboratorieundersøkelser med leire fra Flotten i Trondheim. Det ble benyttet i overkant av 60 kg leire, og det ble laget tilsammen 126 prøver i et todelt laboratorieprogram. Del 1 sammenlignet ulike sammensetninger av CKD og sement, og del 2 sammenlignet Multicem og kalk/sement.

## 1.4 Begrensninger

De viktigste faktorene for fasthetsøkning i stabilisert jord er jordtype, mengde og type stabiliseringsmiddel, innblandingsarbeid, tid og temperatur etter innblanding og spenning i jorda når materialet avbinder. (Norsk Geoteknisk Forening, 2012, 3.5.1) Disse faktorene kan kombineres på utallige måter, og derfor er enkelte faktorer sett bort fra i denne masteroppgaven. Effektene av temperatur og spenning i jorda er ikke undersøkt, og det er benyttet leire fra kun en lokasjon. Det er benyttet tre ulike tilsetningsmengder og prøvene er trykktestet på tre ulike tidspunkter

etter innbygging. Den lengste herdeperioden er 28 dager. Det er kun benyttet enaksiale trykkforsøk for å undersøke styrken til prøvene.

## **1.5 Rapportens oppbygging**

Masteroppgaven er delt inn i 7 kapitler. Kapittel 2 tar for seg teori knyttet til problemstillingen. Dette omfatter metoden dypstabilisering, produksjon av bindemidler og bindemidlenes virkemåte. Kapittel 3 omhandler materialene og metodene som er brukt i laboratorieundersøkelsene. Kapittel 4 presenterer resultatene fra forsøkene som er utført. Resultatene blir diskutert i kapittel 5, og oppsummeres i kapittel 6. I kapittel 7 anbefales videre arbeid.

# Kapittel 2

## Teori

Dette kapitlet tar for seg dypstabilisering som metode og faktorer som påvirker fasthet. I tillegg beskrives produksjon og virkemåte for relevante bindemidler.

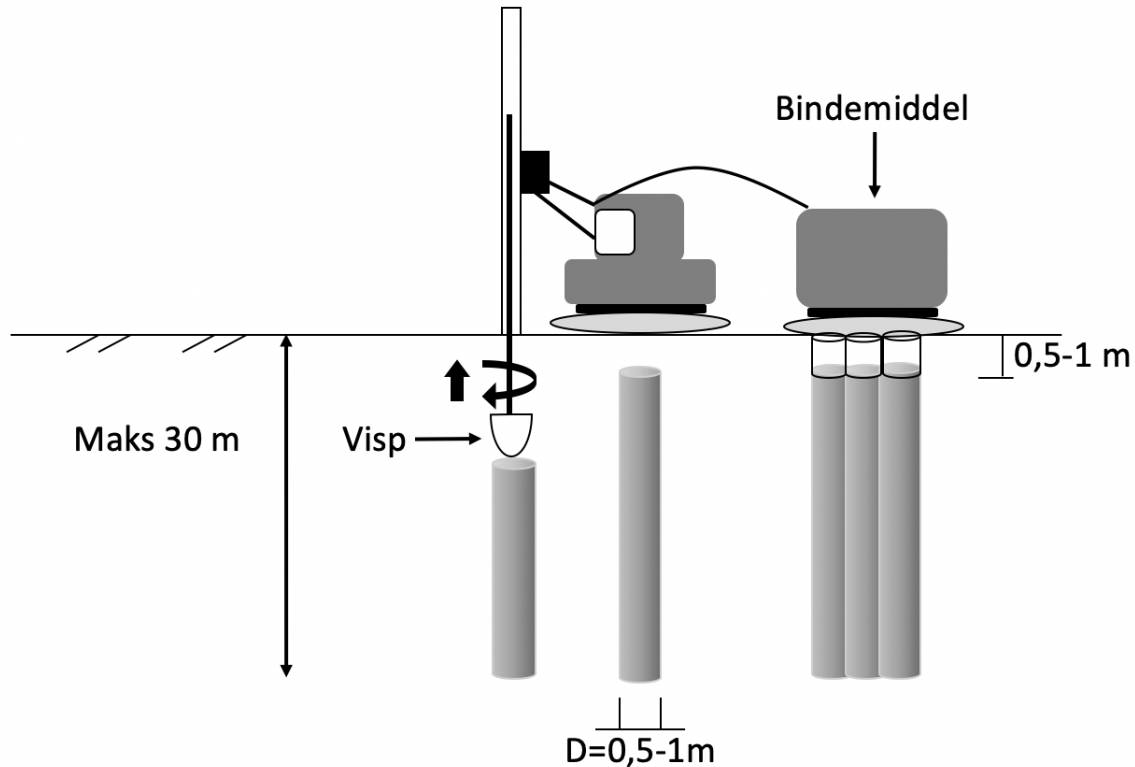
### 2.1 Dypstabilisering

Dypstabilisering av jord brukes i områder med dårlige grunnforhold, typisk middels fast, bløt eller sensitiv leire. Metoden kan benyttes ved en rekke problemstillinger, blant annet for å sikre skråningsstabilitet, byggegroper, og vibrasjonsdemping. Pelene installeres ved at en roterende stang, med en visp trykkes ned i jorda. Ved ønsket dybde blåses et bindemiddel ut i jorda, samtidig som vispen roterer og trekkes opp. Dette fører til at bindemiddelet blandes med jorda og herdeprosessen starter. Diameteren på pelene er fra 0,5-1m, og pelene kan installeres ned til 30 meters dybde. De installeres alene eller i mønster tilpasset problemstillingen. Pelers i mønster installeres med overlapp for å sikre at de blir sammenhengende. Figur 2.1 viser hovedprinsippene ved dypstabilisering og figur 2.2 viser de vanligste mønstrene som brukes i dypstabilisering.

#### 2.1.1 Fasthet i stabiliserte løsmasser

Fasthet i stabiliserte løsmasser avhenger av flere forhold, men de viktigste er: type jord, mengde og type bindemiddel, innblandingsarbeid, tid og temperatur etter innblanding og spenninger i jorda når materialet avbinder (Norsk Geoteknisk Forening, 2012, Kap 3.5).



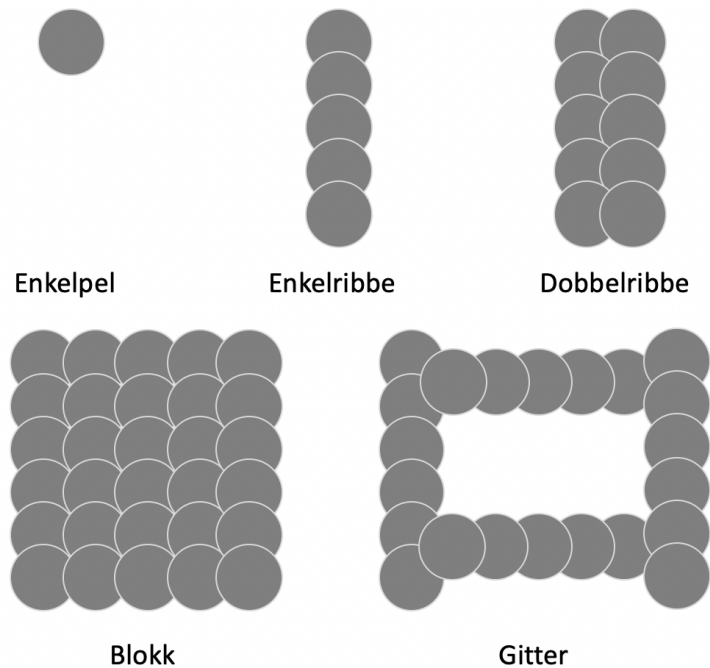


Figur 2.1: Hovedprinsippene ved dypstabilisering (Norsk Geoteknisk Forening, 2012, modifisert etter figur 2.2.1).

### Type jord

Virkingen av stabilisering avhenger av jordtypen. Figur 2.3 viser at kvikkleire har god effekt av stabilisering, mens jordarter med større innhold av organisk stoff har mindre effekt. En årsak til dette er at visse organiske forbindelser har en hemmende effekt på herding av sement.

Vanninnholdet i jorda påvirker også fastheten. Generelt sett vil høyere vanninnhold gi lavere fasthet. I betongteknologien brukes ofte begrepet masseforhold eller v/c-tall. V/c-tallet beskriver masseforholdet mellom vann og sement i betongblandingen. Høyt v/c-tall gjør den herdede sementen mer porøs, noe som gir lavere fasthet. I betongblandinger ligger masseforholdet oftest mellom 0,3 og 1 og tilpasses faktorer som fasthet, støpelighet og økonomiske hensyn. I dypstabilisering er ikke v/c-tallet like mye brukt, og masseforholdet er ofte langt høyere enn i betong. Prinsippet er likevel det samme: høyere vanninnhold fører til at den herdede sementen er mer porøs, og gir lavere fasthet (Åhnberg et al., 1995).



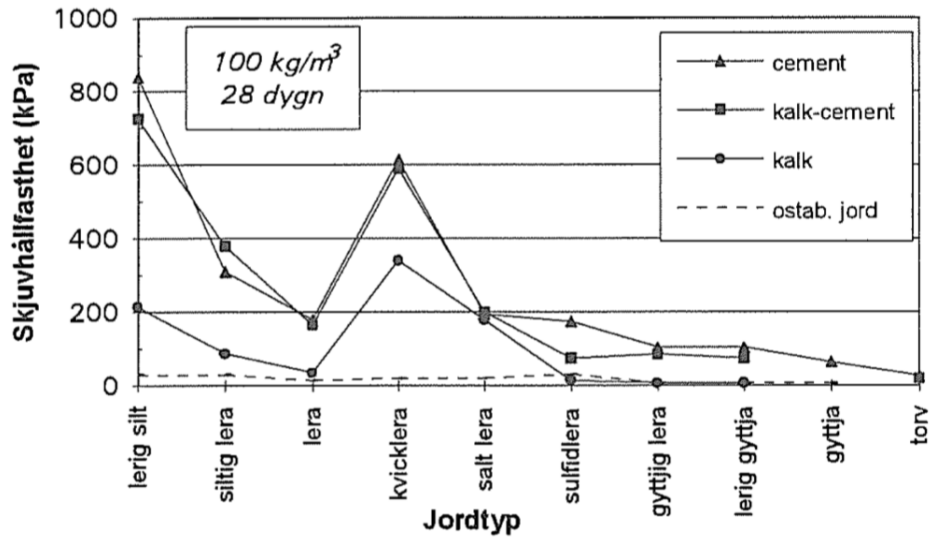
Figur 2.2: Vanlige mønster ved dypstabilisering (Norsk Geoteknisk Forening, 2012, modifisert etter figur 2.1.1).

### Type og mengde bindemiddel

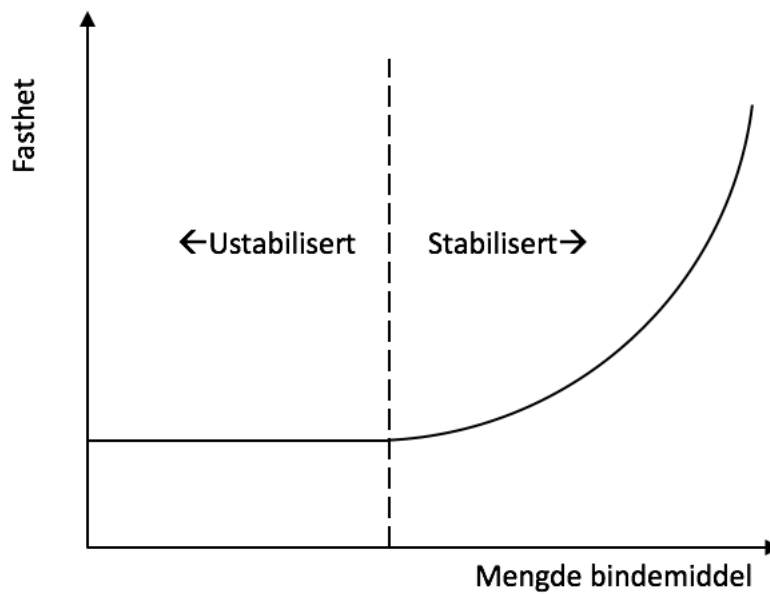
De vanligste bindemidlene som benyttes i dypstabilisering er kalk, sement og CKD. Anbefalte mengder for bindemidler avhenger av jordtypen som stabiliseres. For torv anbefales opp mot  $300 \text{ kg/m}^3$ , men for sensitiv leire anbefales  $80\text{-}110 \text{ kg/m}^3$ . Figur 2.4 viser prinsipielt at det er nødvendig med en minimumsmengde bindemiddel for å oppnå en stabiliserende effekt. Dette skyldes bindemiddelet må tilsettes i en slik mengde at det sammen med jorda får et lastbærende skjelle (Janz and Johansson, 2002). Reaksjonene til ulike bindemidler beskrives nærmere i kapittel 2.3.

### Innblandingsarbeid

Innblanding av bindemidler i løsmasser avhenger i hovedsak av rotasjonshastighet, visptype og stigning (mm heving per omdreining). Kombinasjonen av disse faktorene avgjør hvor homogent innblandet bindemiddelet blir i jorda, og må tilpasses ut fra bindemiddel og jordtype. Innblanding arbeidet i felt blir gjort i forhold som i liten grad lar seg gjenskape med laboratoriemetodene som benyttes. Innblanding i laboratoriet har likevel innvirkning på fastheten som oppnås. Både Åhnberg et al. (1995, kapittel 5.3.3) og Kitazume and Terashi (2013, kapittel 3.3.3) viser at fastheten i hovedsak øker med innblandingstiden, men at effekten varierer for ulike jord-



Figur 2.3: Virkning av dypstabilisering på ulike jordtyper (Åhnberg et al., 1995, figur 5.8).



Figur 2.4: Sammenheng mellom fasthet og mengde bindemiddel (Janz and Johansson, 2002, modifisert etter figur 3.1).

typer og bindemidler.

### **Tid og temperatur etter innblanding**

Temperatureffekter i dypstabilisert leire er undersøkt av Wiersholm (2018). Resultatene fra oppgaven viser blant annet at stabilisert materiale herdet ved høy temperatur, gir til høyere stivhet og fasthet enn materiale herdet ved lav temperatur. Dette skyldes at høyere temperaturer øker reaksjonshastigheten til bindemidlene. Faktorene som påvirker varmeutvikling i sement er sementens sammensetning, finhet, eventuelle tilsetningsstoffer og temperatur i omgivelsene (Jacobsen et al., 2016, kapittel 6.3). Det at temperaturutvikling og dermed fasthetsutvikling avhenger av temperatur i omgivelsene er en potensielt viktig forskjell mellom dypstabilisering i felt og laboratorieforsøk. I laboratoriet blandes bindemidler inn ved ca. 20°C og lagres ved ca. 8°C. Ettersom volumet med stabilisert jord er så lite i prøver laget i laboratoriet, påvirkes temperaturen inne i prøven i stor grad av temperaturen som omgir prøven. I felt vil temperaturen i pelene påvirkes av både temperaturen på jorda rundt, men også pelens størrelse og hvilket pelemønster som benyttes. Målinger har vist at temperaturen i kalk/semmentpeler kan komme opp i 70°C noen timer etter installasjon, og 10-15 °C opp til et år etter installasjon (Åhnberg, 1987).

### **Spenninger i jorda når materialet avbinder**

Betydningen av spenningstilstand under herding er undersøkt av Engeset (2018). Masteroppgaven viser at prøver tilvirket i laboratorium som herder under økt trykk får høyere fasthet, kohesjon og densitet. Sammenhengen mellom fasthet er også dokumentert for flere jordtyper i Kitazume and Terashi (2013, kapittel 3.4.4).

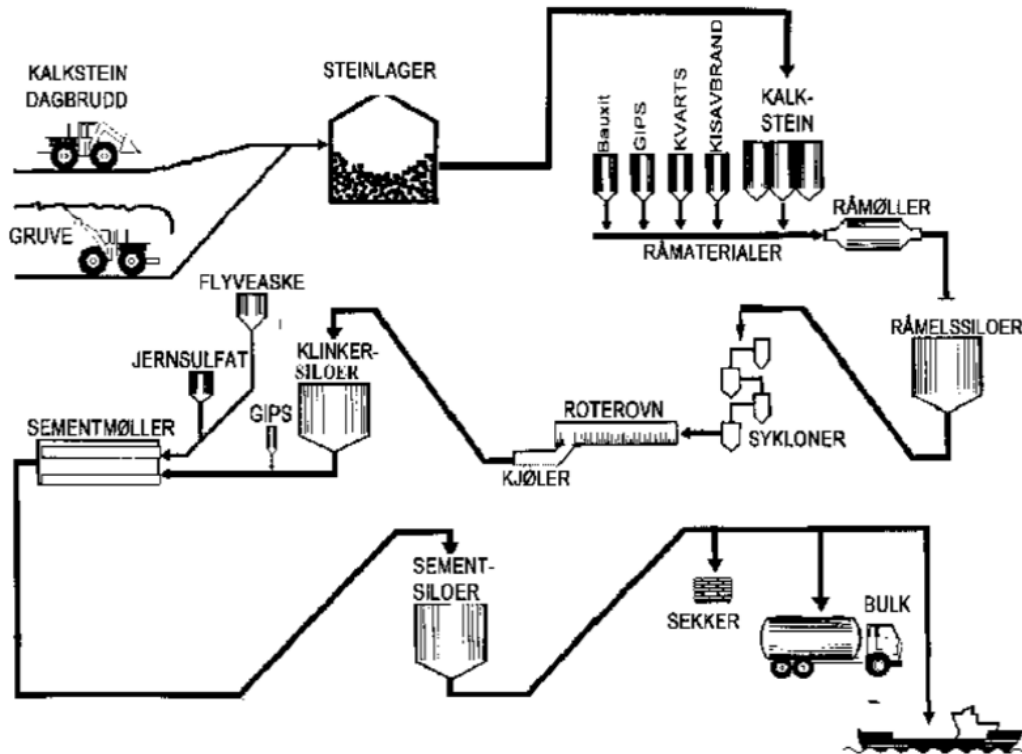
## **2.2 Produksjon av bindemidler**

Bindemidlene som brukes i denne masteroppgaven kommer hovedsakelig fra Norcems fabrikk i Brevik i Telemark. Dette underkapitlet beskriver den typen produksjonsprosess som benyttes der og hvordan CKD skilles ut. I tillegg beskrives produksjon av brentkalk og flygeaske.

### **2.2.1 Sement**

Beskrivelsen av produksjonsprosessen er basert på kapittel 5.2 i Jacobsen et al. (2016). Figur 2.5 viser en skjematisk fremstilling av sementproduksjon.

Hovedbestanddelen i portlandsement er kalkstein, og ved Norcem Brevik benyttes kalkstein fra



Figur 2.5: Skjematisk fremstilling av sementproduksjon (Norcem AS, 2019d).

tre ulike steder. Norcems gruver ved fabrikkene i Brevik, fra dagbrudd i Verdal i Trøndelag og dagbrudd i Bjørntvet ved Porsgrunn. Stein fra Verdal og Bjørntvet fraktes til Brevik med henholdsvis skip og tog (Norcem AS, 2019b). I tillegg til kalkstein (kalsiumkarbonat -  $CaCO_3$ ) tilsettes korreksjonsmaterialer som kvarts (silisiumdioksid  $SiO_2$ ), kisavbrann (hovedsakelig jernoksid  $Fe_2O_3$ ), gips (kalsiumsulfat -  $CaSO_4 + 2H_2O$ ) og bauksitt (aluminiumoksid  $Al_2O_3$ ). Blandingen males i råmøller og råmelet lagres i siloer. Sammensetningen av oksider i råmelet kontrolleres nøye, da den er avgjørende for kvaliteten på sementen.

Videre fra siloene går råmelet først gjennom et 80 meter høyt syklontårn der råmelet tørkes og kalsineres. Varmeutvekslingen i syklontårnet bidrar til å senke det totale energibehovet i produksjonen ved at varme gasser fra roterovnen utnyttes effektivt, samt at en stor del av kalsiumkarbonatet er kalsinert før det går inn i roterovnen. Ved kalsinering tilføres kalsiumkarbonat energi,  $CO_2$  frigjøres og det dannes kalsiumoksid ( $CaO$ , brentkalk, eller ulesket kalk).

Fra syklontårnet sendes råmelet gjennom en kalsinator, som kalsinerer råmelet ytterligere før

det sendes inn i roterovnen. Roterovnen er et 50-100 meter langt stålrør med diameter mellom 5 og 10 meter. Røret har en helning på 3-4% og roterer sakte. Helningen og rotasjonen gjør at råmelet som mates inn i ovnen sklir mot brennesonen i enden av ovnen og tilslutt blir varmet opp til 1450°C. Reaksjonene som oppstår i ovnen kan grovt sett deles i tre:

1. Reaksjoner under 1300 °C

(a) Kalsinering,  $CaO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

(b) Belitt ( $C_2S$ ), Aluminat( $C_3A$ ), Ferritt( $C_4AF$ ) dannes.

2. Reaksjoner mellom 1300 og 1450°C

(a) Ca. 20-30% av massen smelter og blir flytende, hovedsakelig aluminitt og ferritt.

(b) Belitt og brentkalk ( $CaO$ ) reagerer og gir Alitt ( $C_3S$ )

(c) Det dannes klumper med klinker med diameter på ca. 3-20mm. Klumpene størkner ved nedkjøling.

3. Reaksjoner ved nedkjøling

(a) Væsken krystalliseres og danner Aluminat( $C_3A$ ), Ferritt( $C_4AF$ ).

Fra roterovnen sendes klinkeren gjennom en kjøler og transporteres videre til klinkersiloer for mellomlagring. Klinkeren males så med ca. 3-5% gips for å unngå at sementen herder for hurtig. Deler av klinkeren i portlandsement kan erstattes av andre stoffer som for eksempel flyveaske eller silicastøv. Denne typen sement kalles portlandkomposittsement. Sementen lagres så i sementsiloer før de pakkes i sekker eller transporteres i bulk med båt eller bil til andre silostasjoner eller direkte til kunder.

Tradisjonelt sett har roterovnen blitt varmet av forbrenning av kull og andre fossile brensler, men de seneste årene har alternative brensler blitt tatt i bruk. Tabell 2.1 viser fordelingen av brensler ved Brevik i 2017. Bruk av alternative fossile brensler som spillolje og løsemidler sparer miljøet ved å utnytte seg av en ikke-fornybar ressurs, samtidig som at det er en trygg og miljømessig akseptabel metode for å fjerne avfall på (Taylor, 1997, kapittel 3.2.1). Andelen av de ulike brenselene varierer, noe som fører til at det blir en variasjon i hvilke kjemiske stoffer som tilføres produksjonsprosessen fra forbrenningen, som igjen fører til variasjoner i både sement og støvet

fra sementovnen.

Tabell 2.1: Brenselandeler ved Norcem Brevik i 2017 (Norcem AS, 2019b)

Brenseltype	Andel [%]
Fossilt brensel (eks. kull, petroleumkoks)	36,4
Alternativt fossilt brensel (eks. spillolje, plast)	39,8
Biobasert brensel	23,8

Sementproduksjon er en strengt kontrollert industriell prosess. Norcems hovedsementer er CE- og NS-sertifisert og oppfyller kravene til sementproduktene som er gitt i "NS-EN 197-1:2011 Sement - Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper". I tillegg har Norcem et eget system for kvalitetsdata der det månedlig dokumenterer egenskapene til deres hovedsementer (Norcem AS, 2019a). Norcems prosess- og kvalitetskontroll er meget avansert og omfattende for å sikre at sluttproduktet får riktig kvalitet, med så lite variasjon som mulig. Likevel brukes naturlige materialer, fra ulike steder, med ulik kjemisk sammensetning i produksjonen. Det må dermed forventes at det vil være en viss variasjon i egenskapene til sluttproduktet.

### 2.2.2 Cement Kiln Dust

Cement Kiln Dust, også kalt bypass-støv filtreres ut fra gass som trekkes ut mellom roterovnen og kalsinatoren. Hvilke stoffer støvet inneholder avhenger av hvor det trekkes ut, og dette kan variere fra fabrikk til fabrikk. I Brevik er bypass-systemet laget for å fjerne klorider, alkalier og svovel fra produksjonsprosessen. Dette gjøres fordi disse stoffene kan danne belegg på overflater i syklontårnet, og begrense kapasiteten til hele anlegget. Klorider og alkalier er heller ikke ønskelig i betong på grunn av reaksjoner med stål og tilslag i armerte konstruksjoner. Ved Norcems anlegg i Brevik produseres omtrent 16000 tonn CKD per år. Støvet som trekkes ut filtreres og lagres i siloer.

CKD inneholder hovedsakelig ulesket kalk, noe sementklinker, aske fra forbrenning og andre kalsinerte mineraler. I motsetning til sement er det ingen formelle krav til innhold eller egenskaper. Innholdsstoffene i CKD avhenger av produksjonsmåte (våtprosess, tørr prosess, prekalsinering), måten støvet samles på, måten produksjonsprosessen styres, råmaterialene og brensler (Jacobsen, 2007). Forskjeller i mineralinnhold i CKD fra Norcems fabrikker i Brevik og Kjøpsvik

på ulike tidspunkter er vist i tabell 2.2. Data merket 1 er fra Kraft et al. (2007), data merket 2 kommer fra et utgått teknisk datablad for Multicem (Norcem AS, 2019f) og data merket Brevik 3 er gjennomsnittet fra 24 målinger av CKDen produsert i Brevik mellom april 2018 og april 2019. Fabrikkene produserer sement på samme måte, men likevel er det forskjeller i mineralsammensetningen til CKD fra de to fabrikkene. Sammenlignet med CKD fra andre produksjonsprosesser vist i Kraft et al. (2007, tillegg B.1) er forskjellene mellom Brevik og Kjøpsvik likevel små. Resultatene fra Kraft et al. (2007) viser at CKD fra Kjøpsvik og Brevik oppnår fasthet i samme størrelsesorden ved stabilisering av leire.

Tabell 2.2: Sammenligning av CKD fra Brevik og Kjøpsvik.

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

### 2.2.3 Flygeaske

Flygeaske er et restprodukt fra forbrenning av kull i kullkraftverk, og består av ca. 45-55% silisiumdioksid (*SiO<sub>2</sub>*) og 20-30% aluminiumoksid (*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*) (Jacobsen et al., 2016). Norcem bruker flygeasken Vattenfall Fly ash Moorburg i sine FA-sementer. Denne flygeasken kommer fra kraftvarmeverket Moorburg i Hamburg i Tyskland, og er sertifisert i overensstemmelse med kravene i NS-EN 450-1:2012, klasse A.

### 2.2.4 Ulesket kalk

Ulesket kalk (*CaO*) fremstilles ved at kalkstein med høyt innhold av kalsiumkarbonat (*CaCO<sub>3</sub>*) varmes til mellom 900-1300°C (avhengig av produksjonsmetode). Den kjemiske reaksjonen ved brenning av kalk kalles kalsinering:  $CaCO_3 + energi \rightarrow CaO + CO_2$ . Etter brenning fraksjoneres og kvernes kalken tilpasset bruksområdet, for eksempel stabilisering av jord, bruk i stålindustri eller fremstilling hydratkalk.



### 2.2.5 Utslipp fra produksjon av bindemidler

Produksjon av sement og kalk er forbundet med svært store  $CO_2$ -utslipp. Dersom det ikke iverksettes tiltak for å redusere utslipp, er utslippet ca. 1 tonn  $CO_2$  per tonn produsert sementklinker. Om lag 60% av dette skyldes utskillingen av  $CO_2$  ved kalsinering, og 40% kommer fra forbrenning og finmaling (Norcem AS, 2019e). I 2017 var utslippene fra Norcems fabrikk i Brevik på 776 kg  $CO_2$  per tonn sementklinker (Norcem AS, 2019b). Ifølge en rapport fra European Lime Association (EuLA), som den norske kalkprodusenten Franzefoss AS er medlem av, er gjennomsnittlig utslipp fra produksjon av ulesket kalk 1,092 tonn  $CO_2$ , per tonn kalk-produkt. Av dette kommer 68% fra kalsinering, 30% fra forbrenning og 2% fra elektrisitet som benyttes i produksjonen (Stork et al., 2014). Utslipp vil variere med produksjonsmetode og andre forhold knyttet til produksjonen. Norcem oppgir at utslippene fra ulesket kalk som brukes til dypstabilisering i Norge er 1000 kg  $CO_2$  per tonn kalk. CKD er et biprodukt og betraktes i Norge som utslippsfritt med hensyn til produksjon. I Sverige tillegges deler av utslippene fra sementproduksjonen CKD, og er dermed ikke helt utslippsfritt. For svensk Multicem fra produsenten CEMENTA er det utarbeidet en egen EPD (Environmental Product Declaration). EPDen beskriver miljøpåvirkningen som er knyttet til produksjonen av bindemiddelet (Cementa AB, 2019).

## 2.3 Bindemidlenes virkemåte

I dette kapitlet vil de kjemiske reaksjonene til bindemidlene som er benyttet i laboratorieundersøkelsene beskrives. Hydratisering består av komplekse systemer av reaksjoner, derfor vil reaksjonene som beskrives her være noe forenklet. Notasjon, kjemiske beskrivelser og reaksjoner er hentet fra kompendiet fra emnet TKT 4215 Betongteknologi (Jacobsen et al., 2016). Forkortelser av relevante oksider er gjengitt i tabell 2.3.

Tabell 2.3: Forkortelser av oksider

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

### 2.3.1 Sementreaksjoner

Sement er et hydraulisk bindemiddel som i reaksjon med vann (hydratisering) skaper et reaksjonsprodukt med høy fasthet. I dypstabilisering brukes både ordinær portlandsement og portlandkomposittsement. Ordinær portlandsement består av 95-100% sementklinker som herder i kontakt med vann. Portlandkomposittsement består av sementklinker og en andel pozzolanstoff. Pozzolan-stoffene som er mest vanlig i Norge er silicastøv og flyveaske, og bruken av disse bindemidlene fører til en mer effektiv utnyttelse av portlandsement (Jacobsen et al., 2016). Portlandsement består av fire hovedfaser som er gitt i tabell 2.4.

Tabell 2.4: Klinkerfaser i Portlandsement

Navn	Forkortet kjemisk betegnelse	Andel i portlandsement	Varmebidrag
-	-	masse-%	<i>kJ/kg</i>
Alitt	$C_3S$	55-60	500
Belitt	$C_2S$	14-20	260
Aluminat	$C_3A$	5-10	870
Ferritt	$C_4AF$	6-10	420

#### Alitt og Belitt

Av klinkerfasene er det alitt og belitt som i størst grad bidrar med fasthet. Ved hydratisering dannes reaksjonsproduktet CSH. ( $C_3S_2H_3$ ). CSH gir fasthet ved at nålformede krystaller vokser ut fra sementoverflaten og binder sammen partiklene i massen. Alitt reagerer forholdsvis raskt med vann, og er den klinkerfasen som bidrar til tidlig fasthet. Belitt reagerer mer langsomt, men bidrar til langvarig fasthet. Reaksjonsligningene for alitt og belitt er gitt i ligning 2.1 og 2.2.



Ligningene er hentet fra (Jacobsen et al., 2016). Reaksjonene danner i tillegg til CSH, kalsiumhydroksid ( $CH$ ).  $CH$  kan ved en pozzolan-reaksjon danne mer CSH. Denne reaksjonen er beskrevet i kapittel 2.3.4.

### Aluminat og Ferritt

Reaksjonsproduktene fra aluminat og ferritt bidrar mindre til fasthet i herdet sement enn reaksjonsproduktene fra alitt og belitt. Reaksjonene bidrar likevel med betydelig varmeutvikling, spesielt aluminat som reagerer svært raskt med vann. Den hurtige aluminatreaksjonen demper av gipsen som tilsettes sementen for å .

### 2.3.2 Ulesket kalk

I jorda reagerer ulesket kalk( $C$ ) og vann( $H$ ), og danner lesket kalk ( $CH$ ). Reaksjonen er eksoterm og frigir mye varme(1163 kJ/kg ), men bidrar ikke til varig fasthet. Varmen som frigis ved denne reaksjonen er med på å tørke ut jorda, noe som gir en hurtig, men midlertidig fasthetsøkning. Fastheten avtar hvis den stabiliserte massen igjen mettes med vann (Norsk Geoteknisk Forening, 2012, 3.2.5). For å oppnå varig fasthet er en pozzolan reaksjon nødvendig, enten med pozzolane stoffer i jorda, eller i bindemiddel som er tilsatt sammen med kalken. (Janz and Johansson, 2002) Dersom lesket kalk kommer i kontakt med  $CO_2$  i luft, dannes det igjen kalkstein, eller kalsiumkarbonat. Denne reaksjonen gir også fasthet, men vil være lite relevant i jorda, da tilgangen på  $CO_2$  er begrenset.

### 2.3.3 Cement Kiln Dust

CKD inneholder både ulesket kalk og sementklinker, og det kan forventes at CKD reagerer på samme måte som kalk og sement ved innblanding i leire (Jacobsen, 2007). CKD inneholder i tillegg kloridforbindelser som bidrar til at sementreaksjonene akselereres.

### 2.3.4 Pozzolanreaksjonen

Pozzolane stoffer i bindemidler eller i jorda kan reagere med  $CH$  fra lesket kalk, eller fra overskudd av  $CH$  fra alitt- og belitthydratiseringen. Ligning 2.3.4 viser hvordan denne reaksjonen skaper mer CSH i jorda.



Leire kan i tillegg til pozzolane stoffer inneholde aluminiumholdige mineraler, som kan påvirke reaksjonsproduktet som dannes i jorda. I stedet for CSH kan det dannes CASH i ulike varianter, eksempelvis  $C_2ASH_8$ ,  $C_3AH_6$  eller  $C_3ASH_2$  (Janz and Johansson, 2002).

En forutsetning for pozzolanreaksjonen er at pH-verdien i jorda er tilstrekkelig høy. Tilsetting av kalk og sement i jorda bidrar til at pH-verdien i jorda øker. Pozzolanreaksjonen påvirkes også av temperaturen i jorda, og høyere temperatur gir raskere reaksjoner.

### 2.3.5 Strukturforandring ved ionebytte

Ionebytte i leire kan ha en stabiliserende effekt ved at leiras struktur endres fra å være dispergert med lav plastisitet, til mer flokkulert med høyere plastisitet. Denne effekten oppnås når natrium- og kalium-ionene som omgir leirpartiklene byttes ut med kalsiumioner fra bindemidler som tilsettes. Effekten av ionebyttet avhenger av leirens ionebyttekapasitet, leirens overflateareal og hvilket bindemiddel som benyttes. Effekten er lavere ved bruk av sement, fordi sementreaksjoner øker innholdet av natrium- og kalium-ioner i porevannet, noe som hemmer ionebyttet med kalsiumionene (Janz and Johansson, 2002, 3.2).

### 2.3.6 Andre faktorer som påvirker herding

#### Finhet

Finheten til sementer sier noe om reaktiviteten til sementprodukter. Finheten angis ofte som Blaine-finhet. Ved måling av Blaine-finhet presses et kjent volum luft igjennom en mengde komprimert sementpulver med avtagende trykk (Taylor, 1997). Tiden dette tar blir målt. Finheten beregnes ut fra at motstanden til et kjent volum sement med kjent porøsitet avhenger av overflatearealet. Blaine-finheten angis i overflateareal per kg sement ( $m^2/kg$ ), og norske sementer varierer vanligvis mellom  $360-550m^2/kg$ . Større overflateareal på sementkornene fører til raskere hydratisering, raskere temperaturutvikling og høyere tidlig fasthet (Jacobsen et al., 2016).

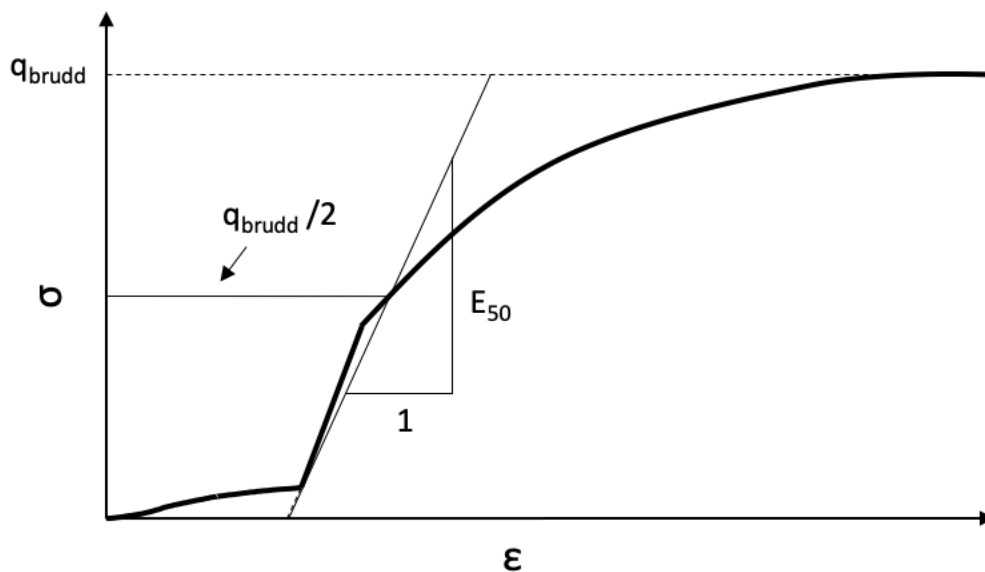
#### Kalsiumklorid som akselerator

Kalsiumklorid ( $CaCl_2$ ) benyttes idag som veisalt, men har lenge vært en kjent akselerator for herding av portlandsement. Kalsiumklorid har tidligere blitt brukt i betong, og en tilsetningsmengde på kun 2% av sementmassen kan doble 1-dagsfastheten i betongen. Tilsetting av kalsiumklorid øker faren for armeringskorrosjon, og brukes derfor ikke lenger i stålarmerte konstruksjoner. Kalsiumklorid øker den tidlige varmetviklingen ved at hydratiseringen av alitt ak-

selereres. Effekten av kalsiumklorid er størst i starten, avtar etterhvert og kan føre til lavere endelig fasthet. I tillegg er effekten størst ved lave temperaturer (Taylor, 1997, 11.5).

## 2.4 Parametre fra enaksiale trykkforsøk

Bruddspenning, bruddtøyning, skjærfasthet, og elastisitetsmodul  $E_{50}$  for stabilisert materiale bestemmes fra enaksiale trykkforsøk. Figur 2.6 viser hvordan  $E_{50}$  bestemmes. Anbefalt deformasjonshastighet for trykkforsøk på stabiliserte prøver er 1,5% per minutt. 1,5 mm/min for 100 mm høye prøver. For ustabilisert leire anbefales deformasjonshastighet på ca. 3,5 - 4,5mm/min. Årsaken til at det anbefales lavere deformasjonshastighet for stabilisert leire er at den ofte har lavere bruddtøyning enn vanlig leire, og at testing med lavere deformasjonshastighet vil gi lavere skjærfasthet (Norsk Geoteknisk Forening, 2012).



Figur 2.6: Bestemmelse av  $E_{50}$  fra enaksialt trykkforsøk (modifisert etter Norsk Geoteknisk Forening, 2012, figur 3.5.1).

## 2.5 Lagringseffekter i kvikkleire

Kvikkleire er definert som leire med lavere omrørt skjærfasthet enn 0,5 kPa (Norsk Geoteknisk Forening, 2011). Kvikkleireprøvers kvalitet påvirkes på flere måter fra prøvetaking til testing. Faktorer som prøvetakingsmetode, innpakking, transport, lagringsforhold, lagringstid og behandling vil på ulike måter påvirke prøvene før det utføres forsøk. Effekten av lagringstid for kvikk-

leire er omtalt av Söderblom (1974), der leire som var kvikk ved prøvetaking ikke var kvikk etter lagring. Det er også utført undersøkelser på kvikkeleire av Lessard and Mitchell (1985). Undersøkelsene viser at kvikkeleiras egenskaper endres uavhengig av lagringsmetoder. Studien viser at flytegrensen og omrørt skjærfasthet øker, mens sensitivitet, flyteindeks og pH synker. Det ble ikke observert klare forandringer i vanninnhold, plastisitetsgrense og uomrørt skjærstyrke. Det ble også observert en forandring i fargen på leira, fra blålig grå, til brunlig. Endringene i egenskaper forklares i hovedsak av oksidering av jernsulfid, som fører til produksjon av jernhydroksid og svovelsyre. Syredannelsen gjør at innholdet av positivt ladde ioner i jorda øker. Dette fører til redusert frastøting mellom partiklene og dermed høyere omrørt skjærstyrke.

## Kapittel 3

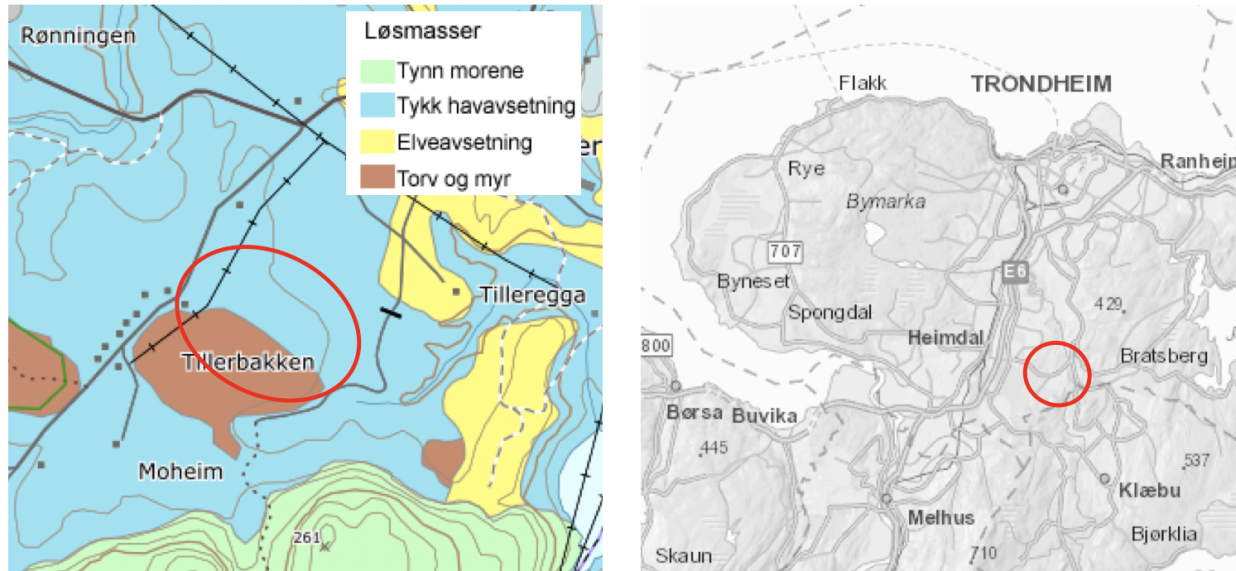
# Materialer og Metode

I dette kapittelet er materialene og metodene som ble brukt i laboratorieundersøkelsene beskrevet. Arbeidet omfatter rutineundersøkelser på leire, tilvirkning av stabiliserte prøver og testingen av disse. Undersøkelsene ble gjort i perioden mellom uke 16 og uke 24 våren 2019, i laboratoriene ved geoteknisk avdeling på NTNU.

### 3.1 Leire

Leirmaterialet som er benyttet i forsøkene er kvikkleire fra NGTS (Norwegian Geo-Test Sites) Tiller-Flotten. Området på Flotten er et av fem nasjonale forsøksfelt som brukes til uttesting og verifisering av nye metoder for grunnundersøkelser og forsøksprosedyrer. Feltet ligger på ca. kote +125, om lag 10 km sør for Trondheim sentrum. Figur 3.1 viser feltets lokasjon og et utsnitt av løsmassekart fra NGU. Deler av forsøksfeltet er dekket av myr, men løsmassene karakteriseres forøvrig som tykk havavsetning. Det er tidligere utført flere undersøkelser av leira på Flotten, blant annet i en masteroppgave fra 2017 (Gella, 2017). Relevante parametre for leira mellom 11-20 meters dyp er gjengitt i tabell 3.4. Løsmassene på området består av et lag med ikke-sensitiv leire til ca. 7,5 meters dyp, med tørrskorpeleire i toppen. Mellom 7,5 og 20 meter karakteriseres leira som svært sensitiv kvikkleire. Videre viser sonderinger lagdelt leire mellom 20 og 33 meters dyp, og videre leire til stort dyp (Emdal, 2017).

Leira som er benyttet er hentet fra mellom 11 og 19 meters dyp med blokkprøvetakere. Det ble brukt fem prøver hentet opp med 160 mm blokkprøvetaker (miniblokk), og en prøve ble hentet



Figur 3.1: Løsmassekart og beliggenhet, NGTS Flotten (Norges Geologiske Undersøkelse, 2019) og feltets plassering (Norges vassdrags- og energidirektorat).

opp med Sherbrook 270 mm blokkprøvetaker (storblokk). Ytterligere informasjon om prøvetaking og laboratorieundersøkelser med blokkprøver er beskrevet i Karlsrud et al. (2012). Tabell 3.2 viser en oversikt over dybder, dato for prøvetaking og prøveåpning for blokkprøvene som ble benyttet i laboratorieundersøkelsene.

Tabell 3.1: Parametere for leira mellom 11-20 meters dyp, Flotten.

Parameter	Tegn	Enhet	Verdi
Vanninnhold	$w$	%	30 - 45
Plastisitetsgrense	$w_p$	%	21
Flytegrense	$w_L$	%	30-35
Densitet	$\rho$	$g/cm^3$	18-19
Skjærfasthet	$S_u$	$kPa$	60-80
Omrørt skjærfasthet	$S_r$	$kPa$	0,2
Sensitivitet	$S_t$	-	150-200
Leirinhold	-	%	52
Saltinnhold	-	$g/l$	0,5-2

Tabell 3.2: Oversikt over prøver brukt i laboratorieforskene.

Dybde [m]	Type	Dato prøvetaking	Dato prøveåpning
11,82-12,22	270 mm	30.01.2019	12.05.2019
14,90-15,25	160 mm	09.11.2017	15.04.2019
16,30-16,65	160 mm	09.11.2017	15.04.2019
17,70-18,05	160 mm	09.11.2017	15.04.2019
18,40-18,75	160 mm	10.11.2017	15.04.2019
18,75-19,10	160 mm	10.11.2017	12.05.2019



## 3.2 Bindemidler

Det ble benyttet ni forskjellige bindemiddelsammensetninger i laboratorieundersøkelsene. Syv av disse er ulike sammensetninger av CKD og forskjellige sementtyper fra Norcem Brevik, en er Svensk Multicem med CKD og sement fra Slite i Sverige, mens den siste blandingen er en tradisjonell kalk/semmentblanding.

### Sementer

Sementtypene som har blitt benyttet er Norcem Industrisement, Norcem Standardsement FA og Norcem Micro. Industrisement benyttes med CKD i Multicem i dag. Standardsement FA er tilsatt flygeaske, som senker utslippet av  $CO_2$ . Norcem mikro er finmalt industrisement, med høyere finhet. De norske sementenes innhold, finhet og  $CO_2$ -utslipp er gitt i tabell 3.3. Tallene er hentet fra produktatablader og EPDer (Environmental Product Declaration) for de aktuelle produktene fra Norcem AS (2019g) sine nettsider.

Tabell 3.3: Egenskapene til sementene som er benyttet, data fra (Norcem AS, 2019g).

Sementtype	Innhold	Finhet Blaine [ $m^2/kg$ ]	$CO_2$ - utlipp $kg/tonn$ sement
Norcem Industrisement	96% sementklinker.	550	748
Norcem Standard FA	78% sementklinker, 18% flygeaske.	450	604
Norcem Micro	Finmalt Industrisement, 96% sementklinker.	720	748

Norcem Micro er en injeksjonssement som er laget av finmalt Industrisement og oppgis derfor med samme  $CO_2$ -utslipp.

### Cement Kiln Dust

CKD brukt i bindemiddelsammensetningene er fra Norcems fabrikk i Brevik. Det gjøres jevnlig analyser av CKDen som skilles ut, og gjennomsnittsverdier for CKD fra april 2018 til april 2019 er gitt i tabell 2.2.

### Sammensetninger

Sammensetningene som er benyttet er vist i tabell 3.4. De ulike blandingene har fått navn fra M1-M8, forkortelser for Multicem 1, Multicem 2 etc.

M1(CKD og Industrisement) er blandingen som selges som Muticem i Norge idag, men M4 (CKD

Tabell 3.4: Bindemiddelsammensetninger for M1-M8, MC og KC.

Navn	Sammensetning	Blandingsforhold
M1	Standard Norsk Multicem, CKD og Industrisement fra Norcem Brevik.	CKD/Sement 50/50
M2	Svensk Multicem, CKD og sement fra Slite i Sverige.	CKD/Sement 50/50
M3	CKD og Norcem Mikro.	CKD/Sement 50/50
M4	CKD og Standardsement FA	CKD/Sement 50/50
M5	CKD og Norcem Mikro.	CKD/Sement 30/70
M6	CKD og Norcem Mikro + 0,5% $CaCl_2$ .	CKD/Sement 30/70
M7	CKD og Norcem Mikro.	CKD/Sement 70/30
M8	KD og Norcem Mikro + 0,5% $CaCl_2$ .	CKD/Sement 70/30
MC	Standard Norsk Multicem, CKD og Industrisement fra Norcem Brevik.	CKD/Sement 50/50
KC	Stabila B80 kalk, og Norcem Industrisement	Kalk/Sement 50/50

og Standard FA) har også blitt benyttet. M2(Svensk Multicem) er et tilsvarende produkt som M1, men produseres i Slite i Sverige. M3 og M5-M8 er sammensetninger av CKD og mikrosement. Testing av M1, M3 og M4 gjør det mulig å se på effekten av de ulike sementtypene sammen med CKD. M5-M8 gjør det mulig å undersøke effekten av kalsiumklorid som akselerator. MC og M1 er samme blanding, men ble gitt ulike navn for å skille prøver i del 1 og del 2 av laboratorieundersøkelsene fra hverandre. Dette er ytterligere omtalt i kapittel 3.3.3. Sammensetningene av bindemidler ble valgt i samråd med Norcem, og alle blandingene av Multicem (M1-M8) ble blandet av Norcem og sendt til Trondheim. KC-blandingen ble laget i Trondheim med kalk tilsendt fra Verdalskalk, og Industrisement hentet ved Norcems silo i Trondheim.

### Miljøpåvirkning

Et estimat for de ulike bindemiddelsammensetningenes  $CO_2$ -utslipp er gitt i tabell 3.5. Utslippene for de ulike sammensetningene er beregnet ut fra tallene gitt i tabell 3.3. CKD fra Brevik betraktes som utslippsfri, og ulesket kalk slipper ut 1000 kg  $CO_2$  per tonn. Utslipp fra  $CaCl_2$  er ikke medregnet, da mengden tilsatt stoff er så liten at det ikke utgjør en betydelig forskjell. Utslipp fra finmalingen Industrisement er heller ikke medregnet. Årsaken er at det ikke finnes tilgjengelige tall for den aktuelle sementen og utslippene fra finmalingen er neglisjerbar sammenlignet med utslipp fra klinkerproduksjon. Dette fører til at flere av blandingene oppgis med samme utslipp, selv om det i praksis vil være små forskjeller. For Svensk Multicem er det utarbeidet en egen EDP som beskriver utslipp fra produksjonen. EDPen er hentet fra Cementa AB (2019) sine nettsider.

Tabell 3.5: Utslippsestimat fra bindemidlene som er benyttet.

Bindemiddel	Utslipp, kg $CO_2$ per tonn bindemiddel
M1/MC	374
M2	396
M3	374
M4	302
M5 og M6	524
M7 og M8	224
KC	874

### 3.3 Prøveprogram

Formålene med testingen i denne masteroppgaven har vært å sammenligne ulike varianter av Multicem, å sammenligne Multicem med kalk/semment i kvikkleire. Dette resulterte i et todelt prøveprogram der del 1 sammenligner ulike varianter av Multicem (M1-M8), og del 2 sammenligner kalk/semment og Multicem (KC og MC).

#### 3.3.1 Valg av variabler i prøveprogrammet

Det finnes et tilnærmet uendelig antall kombinasjoner av variablene som påvirker fastheten i stabilisert leire. Dette underkapitlet beskriver og begrunner hvilke herdeperioder, bindemiddelmengde, antall prøvereplikater og herdeforhold som er valgt for dette prøveprogrammet.

##### Herdeperioder

Håndbok R210 fra Statens vegvesen (2016) foreslår lagring i 7 eller 14 og 28 dager og Veiledning for grunnforsterkning med kalksemmentpeler fra Norsk Geoteknisk Forening (2012) anbefaler at forsøk utføres etter 1, 7 og 14 og/ eller 28 dager. I denne masteroppgaven ble prøvene trykktestet etter 1, 7 og 28 dagers herding. Herdeperiodene ble valgt med bakgrunn i de norske veilederene, samt at lagring i 1, 7 og 28 dager gjorde det mulig å fange opp tidlig fasthetsutvikling for de ulike bindemidlene. I tillegg er 28 dagers fasthet vanlig å bruke som karakteristiske verdier i dimensjonering, og det er den vanligste lagringsperioden i tidligere utførte studier.

##### Mengde bindemiddel

Det ble valgt å benytte tre ulike innblandingsmengder med bindemiddel. For del 1 av prøveprogrammet ble  $90 \text{ kg/m}^3$  brukt, og for del 2 ble 60, 90 og  $120 \text{ kg/m}^3$  brukt. Veiledning for



### 3.3.3 Del 2 - Sammenligning av Multicem og Kalk/Sement

Del 2 av prøveprogrammet besto av 54 prøver der Multicem og kalk/sement ble sammenlignet for tre ulike tilsetningsmengder og herdeperioder. Dette gjorde det mulig å sammenligne effekten av bindemidlene. Den typen Multicem (MC) som er benyttet i denne delen av prøveprogrammet er den samme som omtales som M1 i del 1. Det medfører at forsøkene med 50/50 CKD/Industrisement med tilsetningsmengde  $90 \text{ kg/m}^3$  er utført både i del 1 og del 2 av prøveprogrammet. Leira som ble benyttet i denne delen av forsøksprogrammet kom fra en blokkprøve tatt med 270 mm Sherbrooke blokkprøvetaker. Forsøkene i del 2 av prøveprogrammet er vist i tabell 3.7.

Tabell 3.7: Del 2 - Sammenligning av Multicem og Kalk/Sement.

Trykk og Temperatur	Herdetid (dager)	Kvikkleire fra NTGS Flotten					
		$60 \text{ kg/m}^3$		$90 \text{ kg/m}^3$		$120 \text{ kg/m}^3$	
		KC	MC	KC	MC	KC	MC
Atmosfærisk	1	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C
trykk	7	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C
8°C	28	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C

### 3.4 Rutineundersøkelser på leire

I forbindelse med klørgjøring av leire til stabilisering ble det gjort en rekke rutineundersøkelser. Dette ble fortrinnsvis gjort for å kontrollere at leira som ble brukt hadde like egenskaper som beskrevet i kapittel 3.1. På miniblokkprøvene (160mm) ble det utført tre vanninnhold, et konusforsøk, et enaksialt trykkforsøk og to ringdensitetsforsøk. For storblokkprøven (270mm) ble det utført tre vanninnhold, to konusforsøk, to enaksiale trykkforsøk og to ringdensitetsforsøk. Flytegrense og plastisitetsgrensene ble også funnet. Rutineforsøkene er ikke beskrevet ytterligere i denne oppgaven, men det er henvist til aktuelle standarder i tabell 3.8.

### 3.5 Innblanding av bindemidler og tilvirking av prøver

Innblanding av bindemiddel og tilvirking av prøver er basert på metoden gitt i Håndbok R210, kapittel 225 fra Statens vegvesen (2016), men med enkelte justeringer. Metoden tar utgangspunkt i 54mm prøvesylindere, men på grunn av stort antall prøver ble det i dette arbeidet be-

Tabell 3.8: Henvisning til standarder for labforsøk.

Forsøk	Standard
Vanninnhold	NS-EN ISO 17892-1:2014
Densitet	NS-EN ISO 17892-2:2014
Konus	NS-EN ISO 17892-6:2017
Enaksialt trykkforsøk	NS-EN ISO 17892-7:2018
Flyte- og plastisitetstegrens	NS-EN ISO 17892-12:2018

nyttet blokkprøver. I tillegg ble leira blandet sammen etter rutineundersøkelsene for å oppnå en så homogen leirmasse som mulig. Dette ble gjort for å unngå at variasjoner i leiras egenskaper skulle påvirke fastheten til den stabiliserte leira. Leira ble tildekt av diffusjonstett plast og lagret i kjølerom i 1-3 dager før den ble blandet med bindemiddel.

### **Innblanding**

Innblanding ble utført på følgende måte:

- Ca. 1,5 kg homogenisert materiale ble samlet i bollen til en Kenwood blandemaskin og veid.
- Bollen ble så plassert i blandemaskinen og leira ble rørt rundt i 30 sekunder på innstillingen "min" for å bryte ned strukturen.
- Beregnet mengde bindemiddel ble tilsatt og blandet i 30 sekunder.
- Materiale som hadde festet seg til kanten av bollen og vispen ble tilbakeført ved hjelp av en liten metallspade.
- Materealet ble til slutt blandet i nye 30 sekunder.

Figur 3.2 viser blandet leire, tilsetting av bindemiddel og leira etter den er tilbakeført fra visp og kanten av bollen.

Håndbok R210 beskriver at det skal lages fire prøver per blanding, men det ble kun laget tre prøver per blanding. Dette ble gjort for å redusere mengde leire i blanderen, da tidligere utførte forsøk har vist at blandemaskinen kan stoppe av for stor motstand. Mindre leire i bollen gjør innblanding av bindemiddel mer effektiv, og sikrer et mer likt resultat fra blanding til blanding. Innblandingsmengden for bindemidler ble beregnet etter metoden gitt i R210 225 8.1.2 (Statens vegvesen, 2016). Metoden bruker volumforhold og tar utgangspunkt i leiras målte densitet.

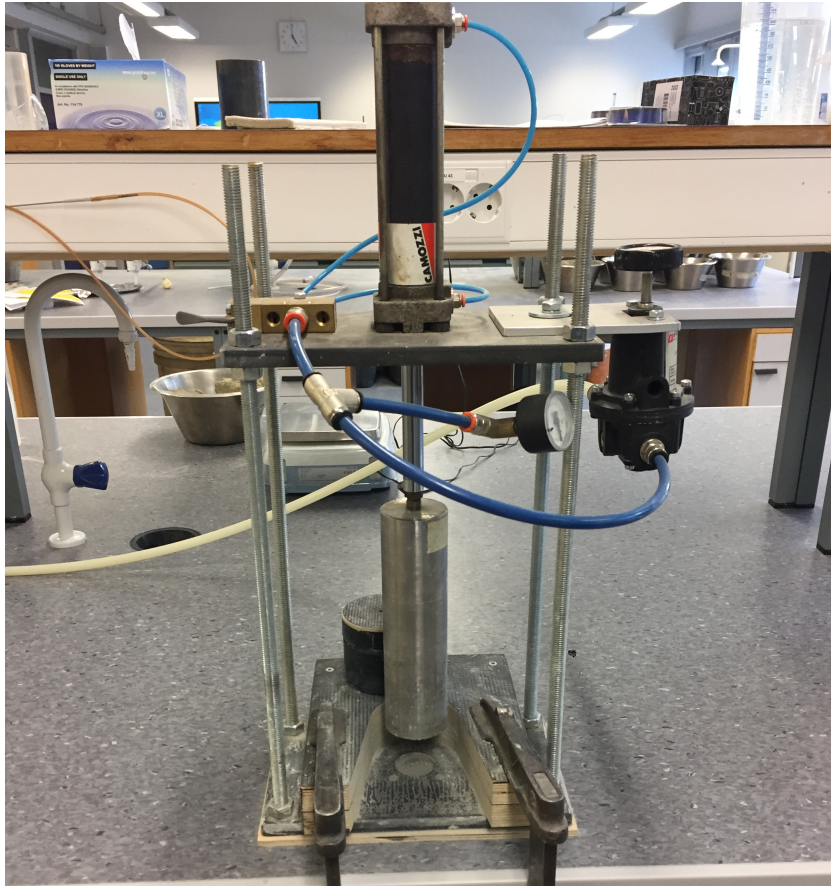


Figur 3.2: Innblanding av bindemiddel. Nedbrutt leire, tilsetning av bindemiddel og leire etter innblanding.

### Tilvirking av prøver

Etter leira og bindemidlene var blandet, ble materialet bygget inn i plastsylindere med indre diameter 54mm og høyde 100mm. Sylindere ble merket og dekket med diffusjonstett plast i bunn, så ble de veid og vekten av tom sylinder med plast ble notert. Deretter ble sylindere fylt med stabilisert materiale i 5 lag med tilnærmet lik tykkelse. Hvert lag ble komprimert med et trykk på 200 kPa i 10 sekunder i et trykkapparat som er vist i figur 3.3. Etter fylling av sylindere ble toppen renskåret med trådsag og veid. Til slutt ble toppen av prøven dekket til med plast. Alle prøver ble blandet og tilvirket i romtemperatur på ca. 20°C, før de ble plassert i kjøleskap direkte etter innblanding. De tre prøvene fra hver blanding var ferdig innbygget ca. 5, 10 og 15 minutter etter innblanding av bindemiddel.

Metoden for å komprimere materialet i prøvesylindere er beskrevet i Håndbok R210 (Statens vegvesen, 2016). En svakhet med metoden er at den ikke tilpasses hvilken densitet som er ønskelig å oppnå i prøvesylindere. Densiteten til prøvene er avhengig av det stabiliserte materiales evne til å komprimeres under de forholdene som er gitt (komprimeringsstrykk, lagtykkelser og komprimeringstid). Konsistens og variasjon i vanninnhold i det stabiliserte materialet er faktorer som kan påvirke hvor lett det er å komprimere. Disse faktorene styres ikke bare av leira og vanninnholdet i den, men også av type og mengde bindemiddel som tilsettes.



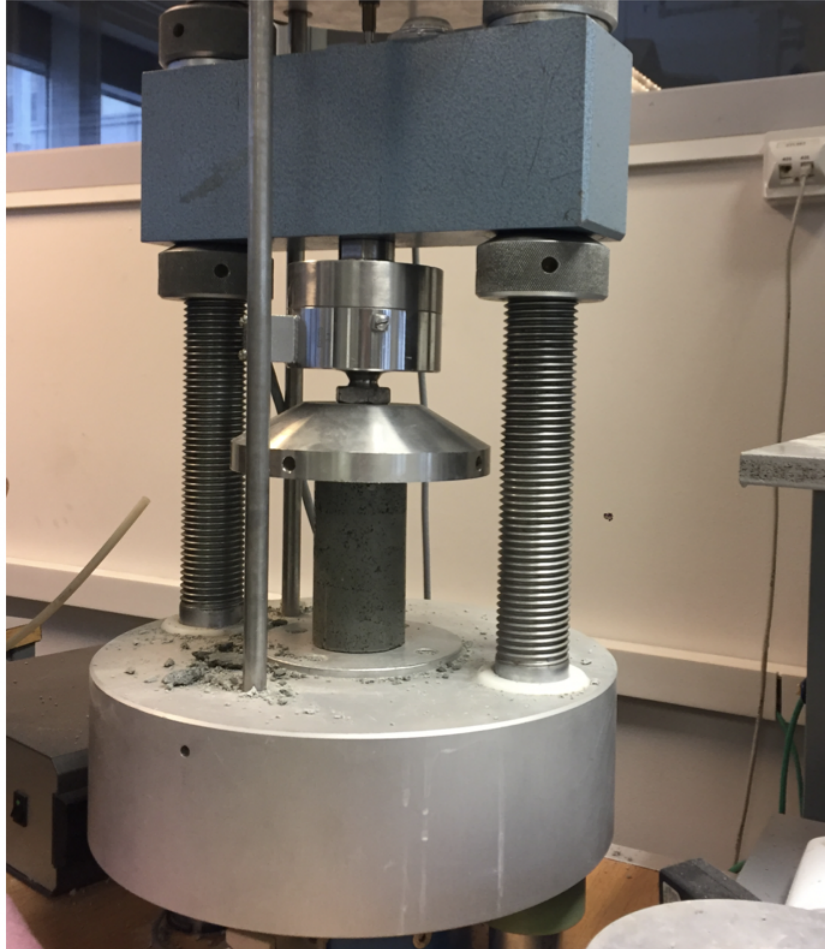
Figur 3.3: Trykkapparatet som ble benyttet ved tilvirking av prøver.

### 3.6 Forsøk på stabiliserte prøver

Etter lagring i 1, 7 eller 28 dager ble prøvene skjøvet ut med en prøveutskyver. Prøvene ble veid og målt for å finne nøyaktig høyde, diameter og densitet. Det ble så utført enaksiale trykkforsøk med hydraulisk presse som registrerer kraft og prøvens deformasjon. Den hydrauliske pressa er vist i figur 3.4. Forsøkene ble kjørt slik at fullstendig spenning- tøyningsskurver ble registrert for prøvene. Dette gjorde det mulig å finne skjærfasthet,  $E_{50}$  og bruddtøyning. Trykkforsøkene ble kjørt med deformasjonshastighet på 1,5 mm/min og registrering av kraft og deformasjon hvert sekund.

Enaksiale trykkforsøk ble valgt som testmetode fordi metoden er relativt rask og enkel, noe som gjorde det mulig å teste mange prøver. I tillegg har tidligere studier vist at metoden avdekker forskjeller mellom bindemidler på en god måte.





Figur 3.4: Hydraulisk presse som ble benyttet ved trykkforsøk.

### 3.7 Datainnsamling

Det ble tatt flere grep for å sikre kvaliteten på undersøkelsene som ble utført i denne oppgaven. Etter trykktesting ble samtlige prøver fotografert for å avdekke eventuelle feil som ulikheter i lagtykkelser eller tydelige lagdelinger. Det ble også registrert hvilken bruddform prøven hadde. Dette ble gjort for å kunne finne ut om prøvens oppbygging og lagdeling påvirket bruddformen eller oppnådd fasthet.

Kombinasjonen av tre lagringsperioder, tre replikater og tre prøver per blanding gjorde det mulig å redusere feilkilder ved innblanding. Dette ble gjort ved at alle A-, B- og C-prøver ble laget fra hver sin blanding. Det vil si at 1-A, 7-A og 28-A ble laget fra samme blanding. På den måten kunne det unngås at alle prøvene fra samme herdeperiode (1, 7 eller 28 dager) ble påvirket av

avvik som feil mengde bindemiddel i en blanding, eller at bindemiddelet ble blandet for lenge.

Ettersom det ble laget store antall prøver ble leira blandet med bindemidler mellom en og tre dager etter prøveåpning og rutinetesting. Vanninnholdet testet underveis i arbeidet med å lage prøvene. Ca. 2/3 av alle blandinger ble testet for vanninnhold for å sjekke at leirmassen ikke tørket ut og at leira som ble stabilisert hadde likt vanninnhold uavhengig av når prøvene ble laget.

All informasjon om hver enkelt prøve ble samlet i et regneark. Info om bindemidler, tilsetningsmengde, tidspunkt og masse ved innbygging og utskyving, resultater fra trykktesting, samt kommentar om bruddformen til prøven ble registrert. Tidspunktene for innbygging av prøvene ble registrert for å unngå store forskjeller i herdetid . For 7 og 28 dagers fasthet var dette mindre viktig, men for prøvene som skulle testes etter 1 dag var det viktig. Fasthetsutviklingen er rask i starten, og dersom en prøve hadde blitt laget på ettermiddagen og testet tidlig på morgenen kunne det påvirket sammenligningsgrunnlaget med andre prøver. Vekten til prøvene ble målt både før og etter herding for å avdekke eventuelle massetap.

# Kapittel 4

## Resultater

### 4.1 Rutineundersøkelser

Tabell 4.1 viser resultater fra rutineundersøkelser på blokkprøvene. Verdiene for 160 mm (miniblokk) er et gjennomsnitt av resultatene fra fem blokkprøver tatt mellom 14,9 og 19,1 meters dybde. Verdiene for 270 mm (storblokk) er fra en blokkprøve tatt opp fra 11,8-12,2 meters dybde. Komplette resultater fra rutineforsøkene er vist i vedlegg B.

Tabell 4.1: Gjennomsnittsverdier fra rutineforsøk, 160 mm og 270 mm

Parameter	Tegn	Enhet	160 mm Blokkprøve	270 mm Blokkprøve
Vanninnhold	$w$	%	39	46,1
Plastisitetsgrense	$w_p$	%	21	23
Flytegrense	$w_L$	%	33	33
Densitet	$\rho$	$g/cm^3$	18,9	18,0
Skjærfasthet (Konus)	$s_u$	$kPa$	71,5	60,6
Omrørt skjærfasthet (Konus)	$s_r$	$kPa$	1,8	0,25
Sensitivitet	$S_t$	-	40	254
Enaksial skjærfasthet	$s_u$	$kPa$	79,2	72,9
Bruddtøyning enaks.	$\epsilon$	%	3,3	2,1

Resultatene viser at leira kan betegnes som middels plastisk og meget sensitiv. Leira tatt opp med 270 mm blokkprøvetaker defineres også som kvikk, da omrørt skjærfasthet er lavere enn 0,5 kPa. Det gjelder ikke leira tatt med 160 mm blokkprøver, ettersom omrørt skjærfasthet er større enn 0,5 kPa (Norsk Geoteknisk Forening, 2011).

Figur ?? viser en av fem 160 mm blokkprøver som ble benyttet i laboratorieundersøkelsene. Bildet viser et felt med lysere farge langs kanten av prøven. De øvrige 160 mm blokkprøvene hadde

tilsvarende misfarging. Blokkprøven med diameter 270 mm hadde også en tilsvarende farge, men kun et svært tynt skall.



Figur 4.1: En av fem 160 mm blokkprøver som ble benyttet.

## 4.2 Del 1 - Sammenligning av ulike typer Multicem

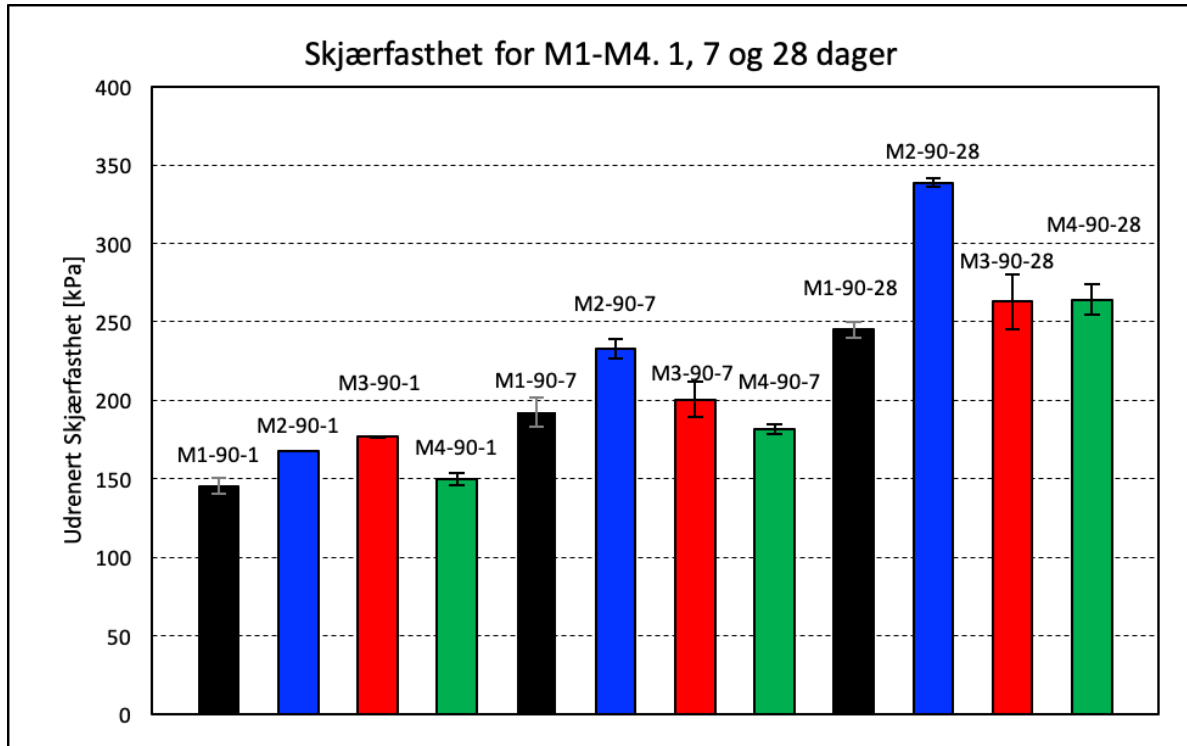
Skjærfasthet fra enaksiale trykkforsøk på stabilisert leire med bindemidlene M1-M8 er vist i figur 4.2 og 4.3. Det er benyttet bindemiddelmengde  $90 \text{ kg/m}^3$  for alle prøvene, og leira er fra 160 mm blokkprøver. Verdiene er et gjennomsnitt av 3 replikater, og standardavviket til prøvene er vist. Prøvene er lagret i 1, 7 og 28 dager ved  $8^\circ\text{C}$  og er navngitt etter følgende formel:

### **Bindemiddelblanding-Innblandingsmengde-Herdetid**

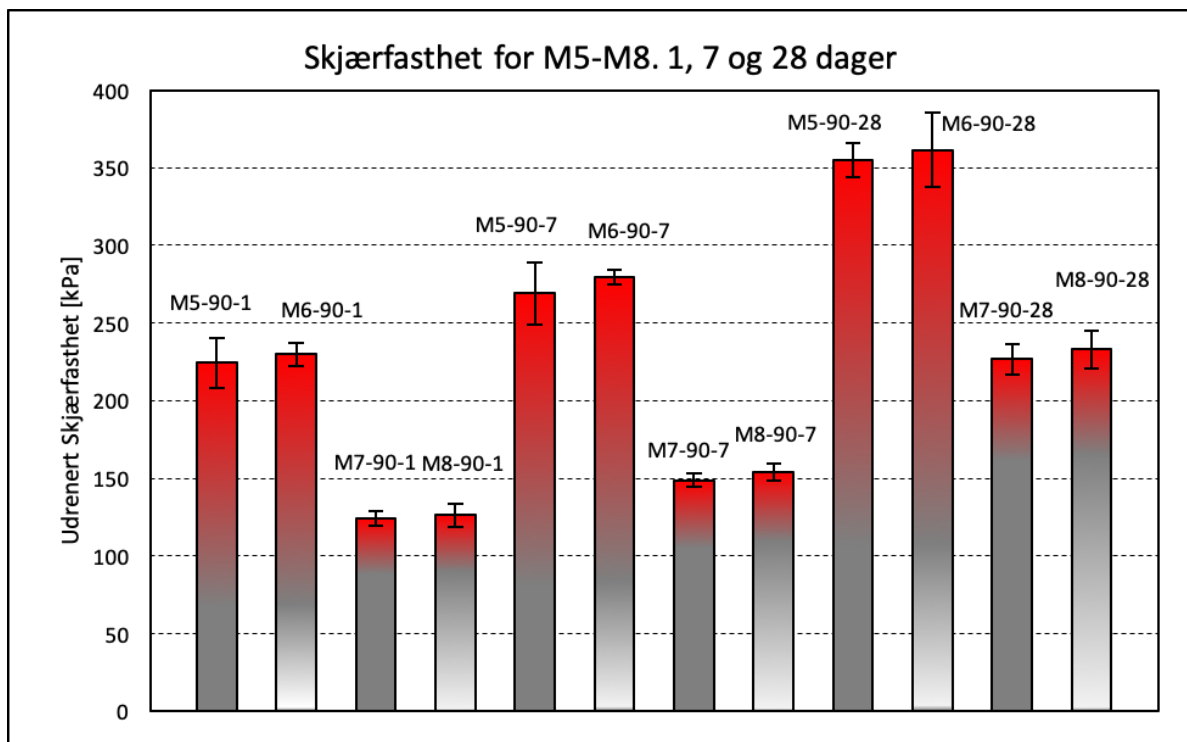
Før innblanding av bindemidler ble det tatt vanninnhold av 19 blandinger med leira fra de fem 160 mm blokkprøvene. Vanninnholdet for leira var i gjennomsnitt 38%, med et standardavvik på 1,4%.

Standardavviket for skjærfasthet til tre replikater var i gjennomsnitt 4,7% for prøvene i del 1.

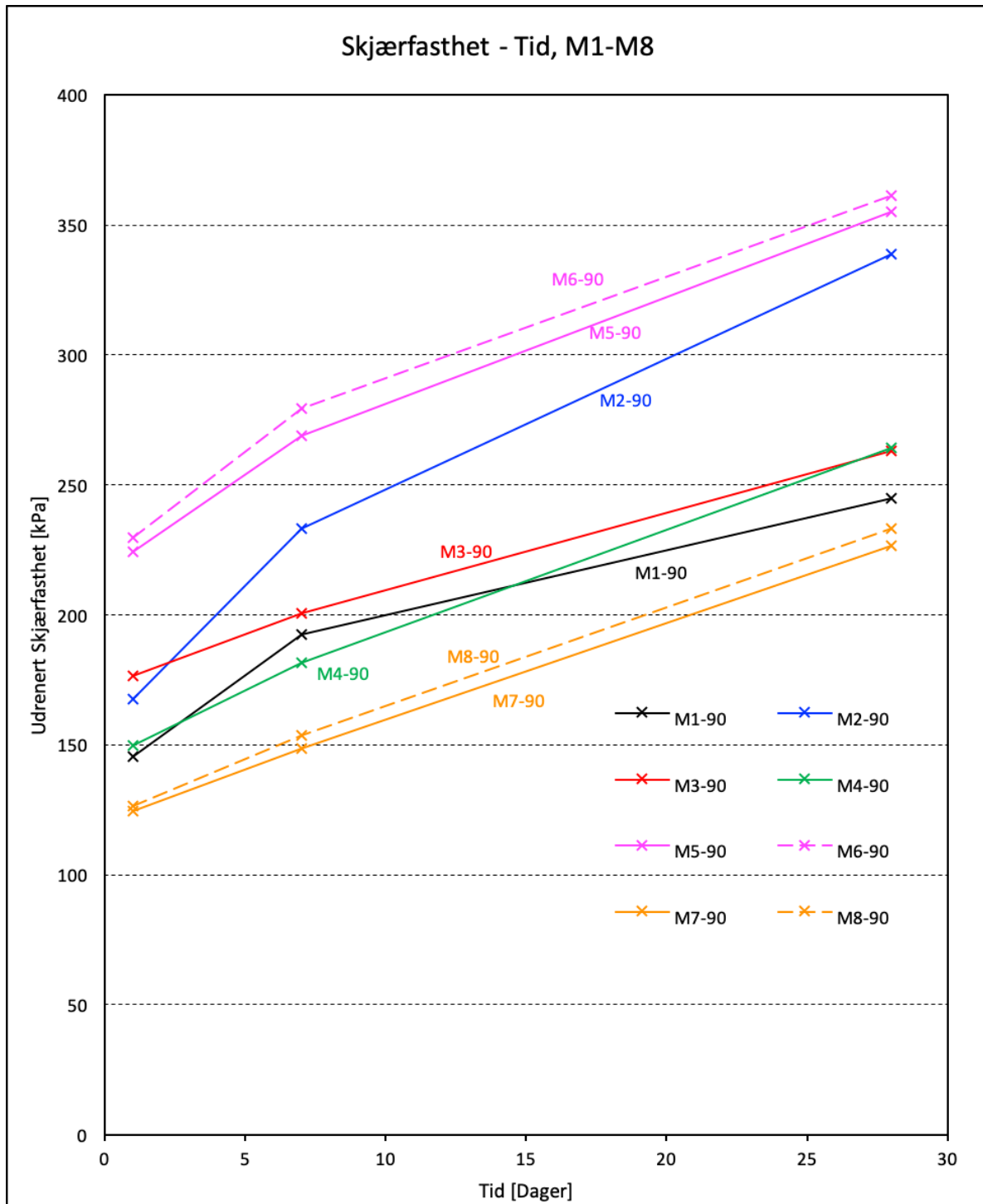
Figur 4.4 viser utvikling av fasthet med tid.



Figur 4.2: Skjærfasthet for M1: 50/50 CKD/Industrisement Brevik, M2: 50/50 CKD/Sement Slite (Svensk Multicem), M3: 50/50 CKD/Norcem Mikro, M4: 50/50 CKD/Standard FA. Innblandingsmengde  $90 \text{ kg/m}^3$ .



Figur 4.3: Skjærfasthet for M5: 30/70 CKD/Norcem Mikro, M6: 30/70 Norcem Mikro med 0,5%  $\text{CaCl}_2$ , M7: 70/30 CKD/Norcem Mikro, M8: 70/30 Norcem Mikro med 0,5%  $\text{CaCl}_2$ . Innblandingsmengde  $90 \text{ kg/m}^3$ .



Figur 4.4: Skjærfasthet - tid for M1: 50/50 CKD/Industrisement Brevik, M2: 50/50 CKD/Sement Slite (Svensk Multicem), M3: 50/50 CKD/Norcem Mikro, M4: 50/50 CKD/Standard FA, M5: 30/70 CKD/Norcem Mikro, M6: 30/70 Norcem Mikro med 0,5%  $CaCl_2$ , M7: 70/30 CKD/Norcem Mikro, M8: 70/30 Norcem Mikro med 0,5%  $CaCl_2$ . Innblandingsmengde  $90 \text{ kg/m}^3$ .

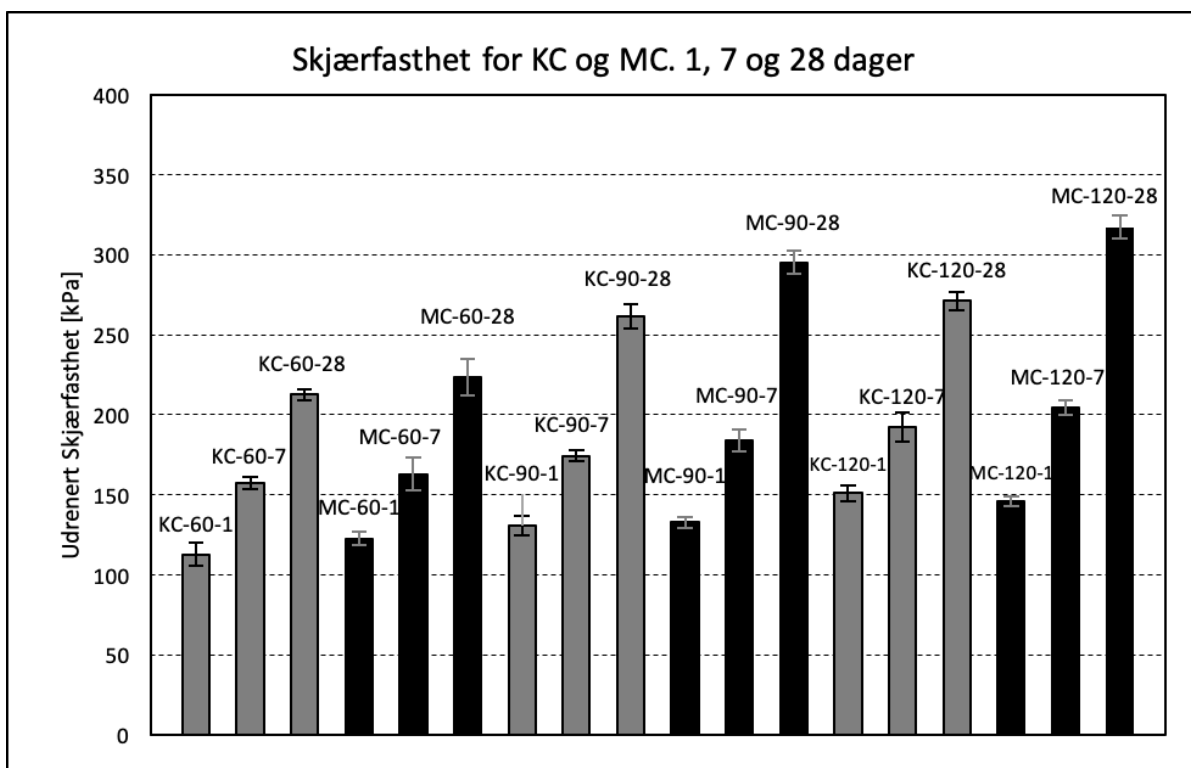
### 4.3 Del 2 - Sammenligning av Multicem og Kalk/Sement

Skjærfasthet fra enaksiale trykkforsøk på stabilisert leire med bindemidlene MC og KC er vist i figur 4.5. Det er benyttet 3 bindemiddelmengder: 60, 90 og 120  $kg/m^3$ . Leira som er stabilisert kommer fra en 270 mm blokkprøve. Verdiene i figur 4.5 er et gjennomsnitt av 3 replikater, og standardavviket til prøvene er vist. Prøvene er lagret i 1, 7 og 28 dager ved 8°C. Før innblandingen av bindemidler ble det tatt vanninnhold av 16 blandinger med leira, og vanninnholdet for leira var i gjennomsnitt 42%, med et standardavvik på 2,3% for 16 blandinger.

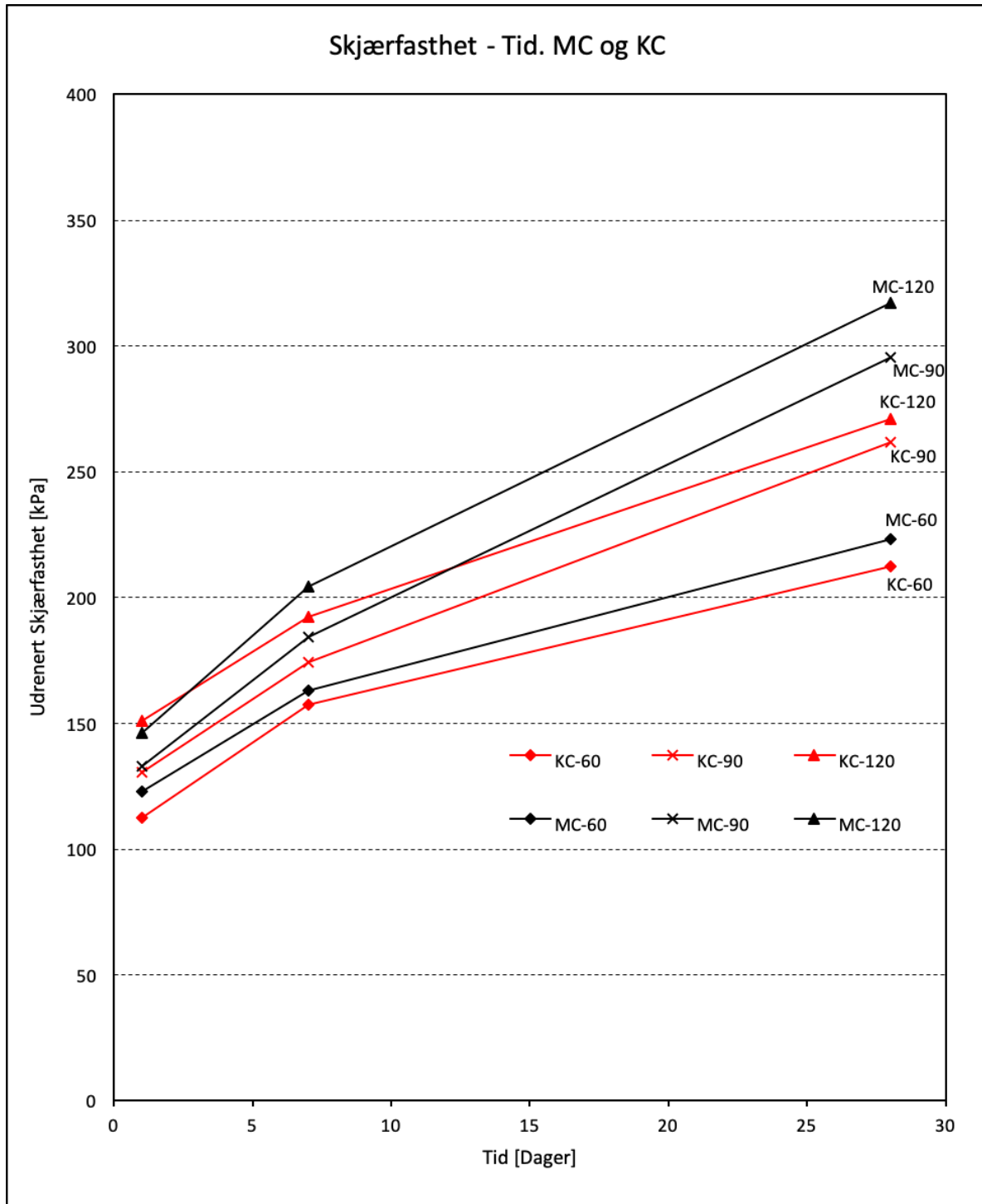
Standardavviket for skjærfasthet til tre replikater var i gjennomsnitt 3,5% for prøvene i del 2.

Figur 4.6 viser utvikling av fasthet med tid for KC og MC.

Figur 4.7 viser effekten av innblandingsmengde for KC og MC.

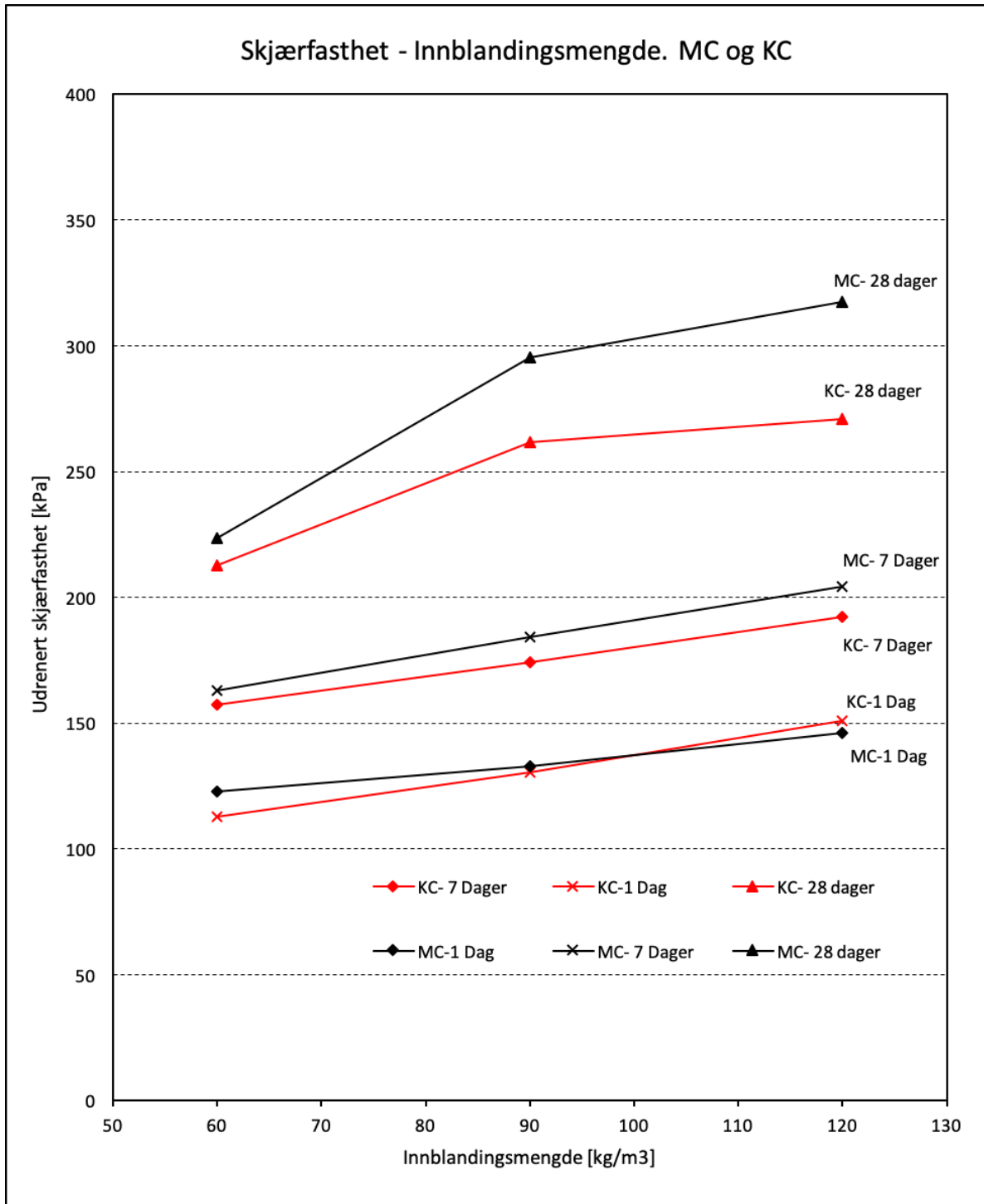


Figur 4.5: Skjærfasthet for MC: 50/50 CKD/Industrisement og KC: 50/50 Kalk/sement. Innblandingsmengder 60, 90 og 120  $kg/m^3$ .



Figur 4.6: Skjærfasthet - tid for MC: 50/50 CKD/Industrisement og KC: 50/50 Kalk/semest. Innblandingmengder 60, 90 og 120  $kg/m^3$ .

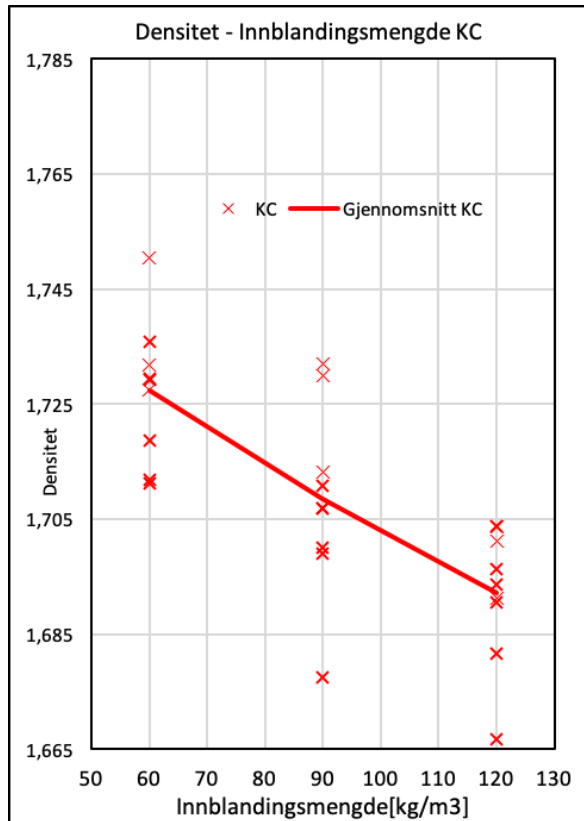




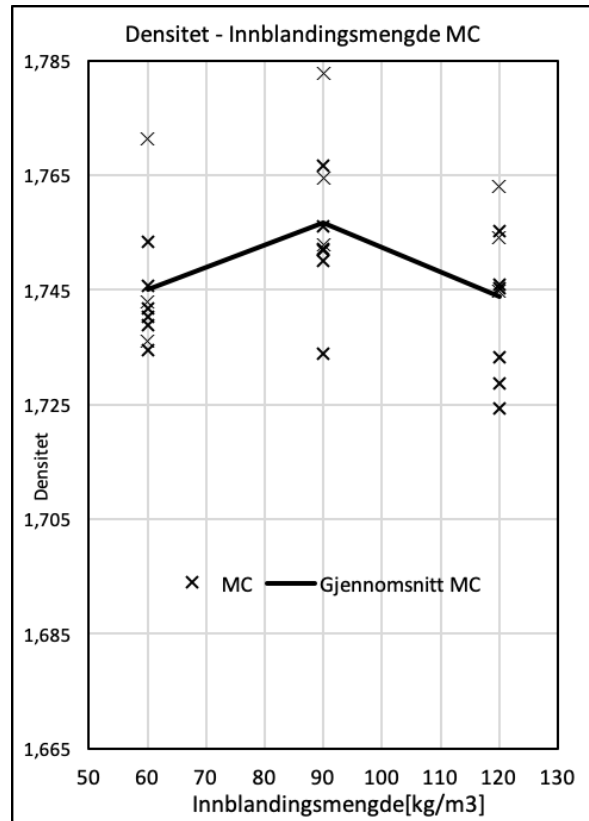
Figur 4.7: Skjærfasthet - innblandingsmengde for MC: 50/50 CKD/Industrisement og KC: 50/50 Kalk/semnt. Innblandingsmengder 60, 90 og 120 kg/m³.

#### 4.4 Densiteter for KC og MC

Ved behandling av resultater etter testing ble det observert forskjell i densiteten til prøver stabilisert med kalk/semment og Multicem. Sammenheng mellom prøvedensitet og innblandingsmengden ( $kg/m^3$ ) for KC og MC er vist i henholdsvis figur 4.8 og 4.9.



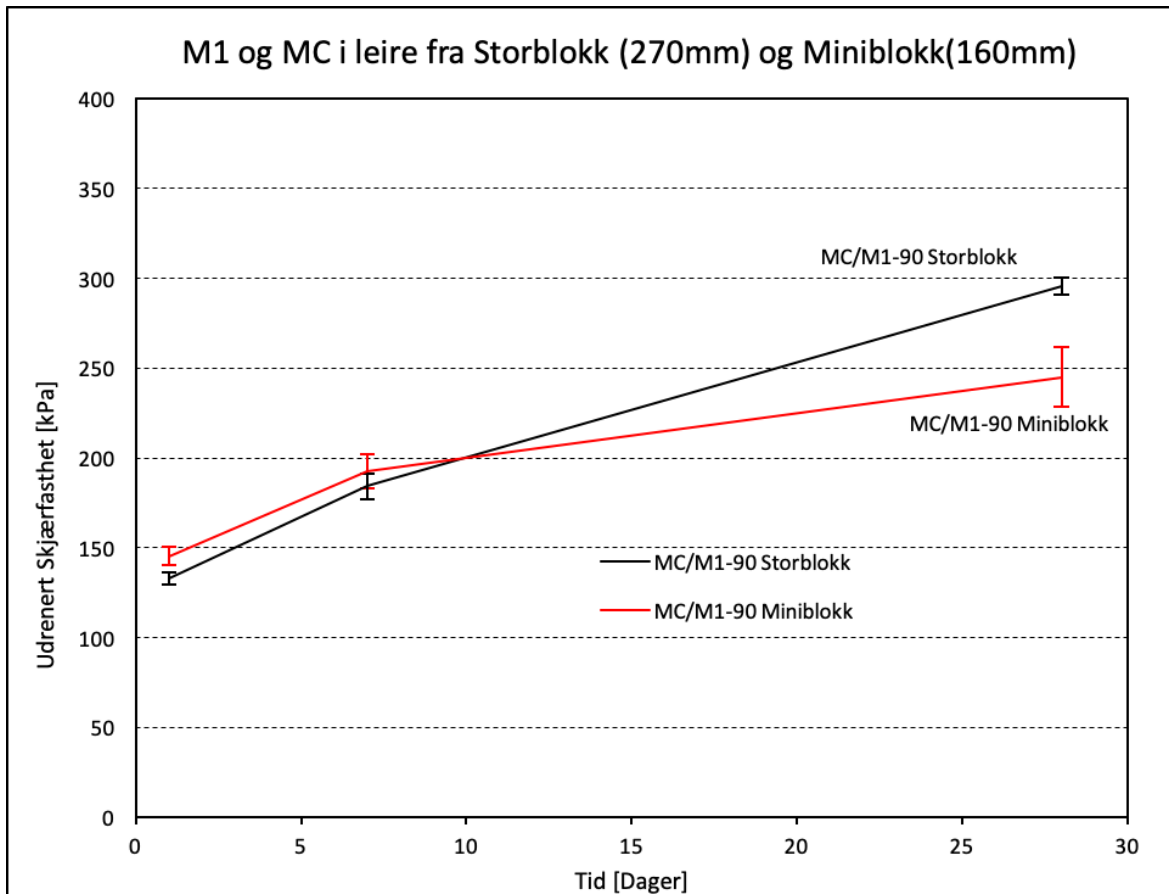
Figur 4.8: Densitet - Innblandingsmengde for KC(50/50 kalk/semment).



Figur 4.9: Densitet - Innblandingsmengde for Multicem (50/70 CKD/Industrisement).

## 4.5 CKD og Industrisement i leire fra storblokk og miniblokk

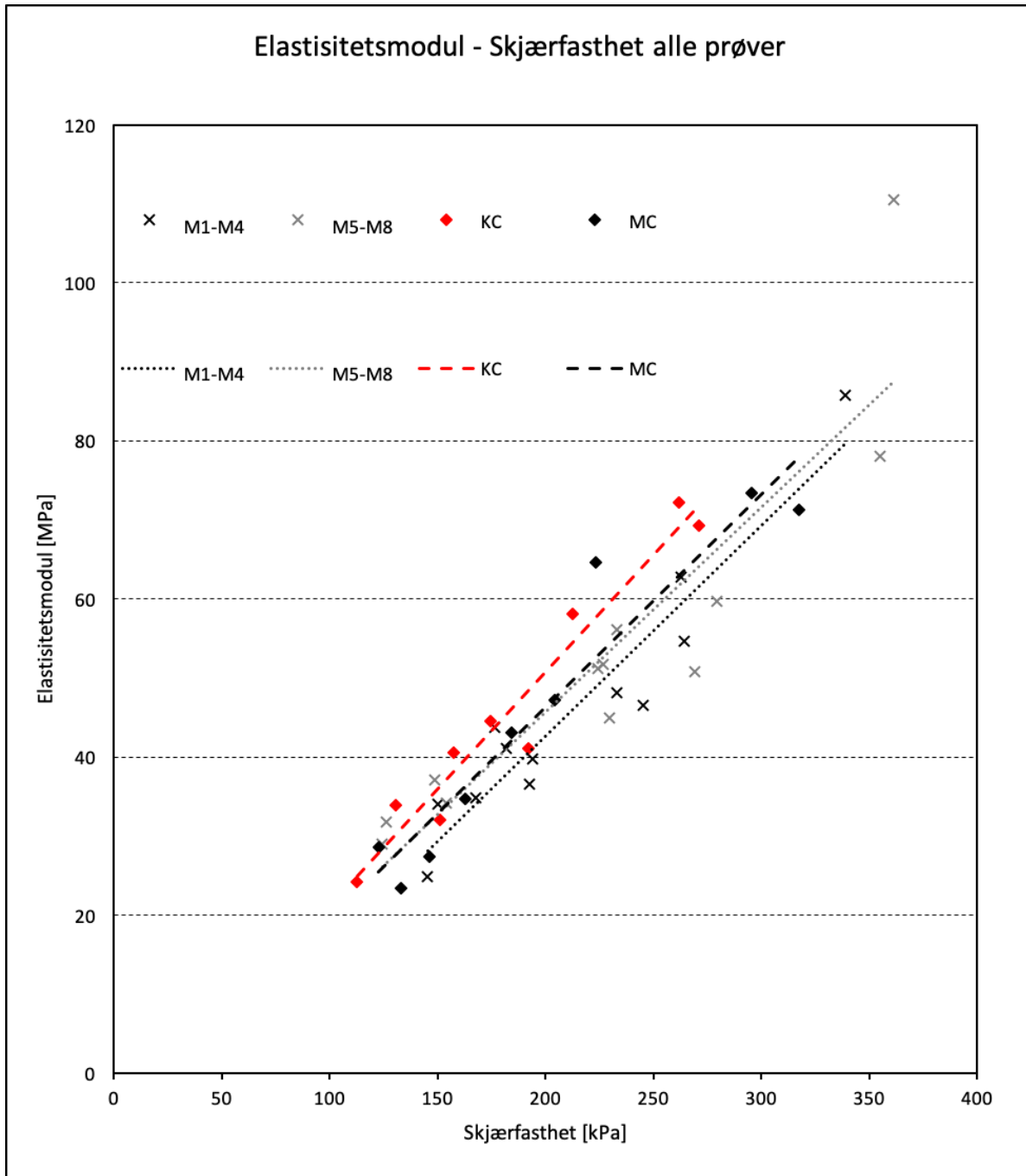
Bindemiddelet 50/50 CKD/Industrisement (M1 og MC) ble testet både i leira fra storblokkprøven og miniblokkprøvene. Utviklingen i fasthet med herdetid er vist i figur 4.10.



Figur 4.10: Skjærfasthet - tid for MC og M1: 50/50 CKD/Industrisement i leire fra storblokk (270 mm) og miniblokk(160 mm).

## 4.6 Elastisitetsmodul

Figur 4.11 viser elastisitetsmodul  $E_{50}$  plottet mot fasthet for alle bindemiddelsammensetninger. Verdiene er gjennomsnitt av tre replikater for hver kombinasjon av bindemideler, innblandingsmengder og herdeperioder.



Figur 4.11: Elastisitetsmodul - skjærfasthet for alle bindemidler.

## Kapittel 5

# Diskusjon

### 5.1 Rutineundersøkelser

Resultatene fra rutineundersøkelsene viser at det er forskjeller på leira tatt med 160 mm og 270 mm blokkprøvetakere. Forskjellene skyldes trolig at prøvene er tatt opp fra ulike dybder og at prøvene tatt med 160 mm prøvetaker er påvirket av lagring.

Miniblokkprøvene er tatt opp fra 14,9-19,1 meters dybde og storblokkprøven er tatt opp fra 11,8-12,2 meters dybde. Det målte vanninnholdet i prøvene samsvarer med tidligere undersøkelser for respektive dybder. Det samme gjør verdiene for plastisitets- og flytegrenser. Densiteten og udrenert skjærfasthet er noe høyere for miniblokkprøvene enn for storblokkprøven, men også disse verdiene samsvarer med tidligere undersøkelser. For storblokkprøven var omrørt skjærfasthet og sensitivitet i tråd med tidligere undersøkelser. Bruddtøyningene fra enaksiale trykkforsøk er alle under 5%, og indikerer derfor ikke prøveforstyrrelse (Statens vegvesen, 2016).

Det største avviket mellom tidligere undersøkelser og rutineundersøkelsene utført i denne masteroppgaven er for omrørt skjærfasthet og sensitivitet til leira tatt med 160 mm prøvetaker. Disse prøvene ble lagret nesten et og et halvt år før prøveåpning. Omrørt skjærfasthet var høyere, og sensitiviteten var lavere. I tillegg ble det observert endring i fargen til leira, se figur ???. Disse endringene i egenskaper samsvarer godt med lagringseffektene som er beskrevet av Lessard and Mitchell (1985), og gjengitt i kapittel 2.5.

## 5.2 Metode og materialer

Metoden som ble brukt for innblanding og innbygging av prøver var effektiv, ga generelt sett liten spredning og tydelige resultater for de ulike kombinasjonene av bindemidler, innblandingsmengder og lagringsperioder.

En ulempe med metoden som ble brukt ved tilvirking av prøver, er at den beskriver at utførelsen skal gjøres med trykkeapparat som komprimerer leira med et fastsatt trykk, i en gitt periode og med et gitt antall lag. Dette gjør metoden repeterbar, men ikke så godt tilpasset ulike material- og bindemiddelegenskaper. I del 1 av prøveprogrammet ble leire med densitet  $1,89 \text{ g/cm}^3$  benyttet, men prøvene som ble laget hadde bare gjennomsnittlig densitet på  $1,75 \text{ g/cm}^3$ . I del 2 ble det brukt leire med densitet på  $1,80 \text{ g/cm}^3$ , og prøvene hadde gjennomsnittlig densitet på  $1,73 \text{ g/cm}^3$ . Det viste seg også at bindemiddeltipe og bindemiddelmengde påvirket prøvedensiteten, noe som omtales mer i 5.4.

Leira som ble benyttet i del 1 (miniblokk) viste tegn til påvirkning av lagringseffekter i form av høyere omrørt skjærfasthet og lavere sensitivitet enn leira som ble benyttet i del 2 (storblokk). Det er usikkert om dette påvirker egenskapene til det stabiliserte materiale og eventuelt i hvor stor grad. Det ble ikke gjort målinger for å undersøke dette, men ut fra en vurdering av materialet under innblanding, virket materialet å bli svært endret ved tilsetningen av bindemidler. Dette er vist i figur 3.2. Leira ble klumpete og tørr, og dette skjedde tilsynelatende i like stor grad for begge leirene, uavhengig av om utgangspunktet var leire med omrørt skjærfasthet på 0,25kPa eller 1,8 kPa.

Ved tilsetning av bindemidler ble den målte densiteten for leirene brukt som utgangspunkt. Etersom leira tilsettes i  $\text{kg/m}^3$  ble leira med lavest densitet (storblokk) tilsatt 5% mer bindemiddel per kg leire. Det gjør at resultatene fra del 1 og del 2 av undersøkelsene ikke er direkte sammenlignbare.

### 5.3 Del 1 - Sammenligning av ulike typer Multicem

Generelt sett gir alle bindemidlene god effekt, med laveste 28 dagers skjærfasthet rett i overkant av 225 kPa. Sammensetningene med 50% CKD og 50% sement fra Brevik ga resultater i samme størrelsesorden, men enkelte forskjeller er observert.

Spredningen i skjærfasthet for del 1 av undersøkelsene er litt høyere enn for del 2 av undersøkelsene. Noe av forklaringen på det kan være at leira som ble benyttet i del 1 var fra flere blokker fordelt mellom 14,9 og 19,1 meters dyp, mens i del 2 var leira fra en blokkprøve.

#### Effekten av kalsiumklorid som akselerator

Figur 4.4 viser at gjennomsnittlig fasthet for blandingene med tilsatt kalsiumklorid (M6 og M8) er marginalt bedre enn blandingene uten (M5 og M7) for alle tre herdeperioder. Effekten er tilsynelatende størst etter 7 dagers herding, der økningen i fasthet er ca. 3,5% for begge blandinger. Forskjellen mellom blandingene med og uten kalsiumklorid er i samme størrelsesorden som standardavvikene til prøvene, og det er derfor vanskelig å tallfeste effekten. Likevel var blandinger med  $CaCl_2$  bedre for begge blandinger og for alle tre herdeperioder. Dersom tilsetningen ikke gir effekt, ville forventningen vært at blandingene uten kalsiumklorid var best i like mange tilfeller som blandingen med.

I følge teorien bidrar  $CaCl_2$  til fasthetsøkning ved å akselerere hydratiseringen av alitt i sementen og øke temperaturen. Effekten er best ved lave temperaturer, og i starten av herdeprosessen. Dette er egenskaper som egner seg godt i dypstabilisering, da temperaturen er lav i jorda når bindemidlene blandes inn, og hurtigere økning i temperatur vil bidra til raskere fasthetsutvikling i pelene. Det kan være flere årsaker til at effekten av kalsiumklorid i bindemidlene var lav. I eksempelet fra Taylor (1997), der 1-dags fasthet ble doblet, ble 2%  $CaCl_2$  tilsatt sementmassen, masseforholdet mellom vann og sement var 0,5, og prøven ble herdet ved 20°C. M6 og M8 hadde masseforhold mellom vann/ment i størrelsesorden 8 - 19, og tilsetningsmengden var kun 0,5%. Konsentrasjonen av kalsiumklorid i porevannet er med andre ord langt lavere enn i eksempelet fra teorien. En annen mulig årsak er at virkningen av økt varmeutvikling ikke gir effekt når prøven herdes i 8°C, fordi den ekstra varmen som utvikles i starten av herdingen tapes til omgivelsene.

**Effekt av høyere finhet i sementen**

Effekten av mikrosement finnes ved å sammenligne M1 (50/50 CKD/Industrisement) og M3 (50/50 CKD/Mikrosement) i figur 4.4. Den tydeligste forskjellen er for en dags fasthet, der M3 oppnår 22% bedre fasthet enn M1. Effektene for 7 og 28 dagers fasthet er lavere, henholdsvis 4,2% og 7,2%. På samme måte som for kalsiumklorid bidrar høyere finhet i sementer til økning i temperaturen i starten av herdeprosessen, og på samme måte som for kalsiumklorid er effekten påvirket av lagringstemperaturen.

**Sement med flygeaske**

Ved å tilsette flygeaske i sementen vil det dannes mer av reaksjonsproduktene som skaper fasthet. Denne reaksjonen tar lengre tid enn sementreaksjonene, så forventningen til sement med flyveaske er lavere tidlig fasthet, men høyere endelig fasthet. Figur 4.4 viser at M4(50/50 CKD/Standardsement FA) har tilsvarende og lavere fasthet enn M1(50/50 CKD/Industrisement) ved 1 og 7 dager, men høyere 28 dagers fasthet. Avviket fra forventningen er at 1-dags fasthet er høyere for M4, enn M1.

**Forskjell mellom Norsk og Svensk Multicem**

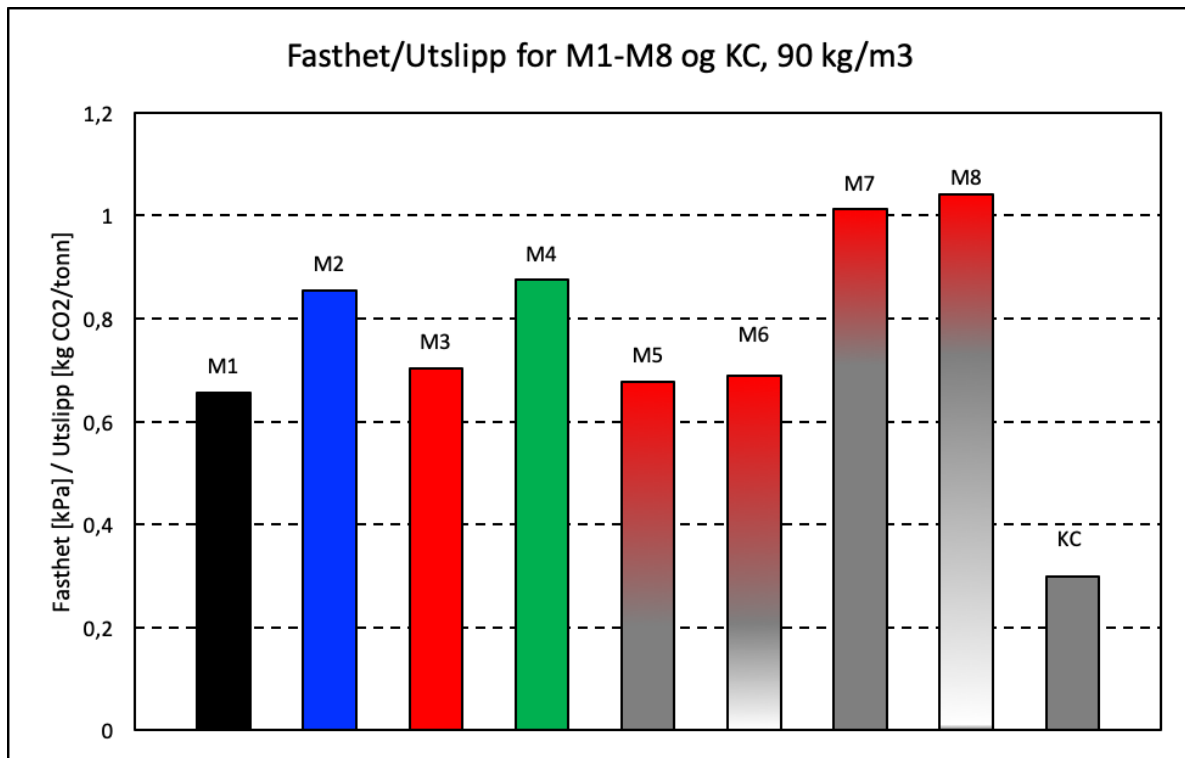
M2 (50/50 CKD/Sement fra Slite) ga med unntak av 1-dags fasthet for M3(50/50 CKD/Mikrosement) høyere fasthet enn alle 50/50-blandinger med CKD og sement fra Brevik. Årsaken er ukjent, men både egenskapene til sement og CKD kan variere fra fabrikk til fabrikk. Sammensetningen av CKD avhenger av produksjonsprosessen og hvor i prosessen støvet skilles ut. En mulig forklaring er at CKD fra Slite har større innhold av sementklinker, og derfor oppnår større fasthet. Analyser av innholdet i blandingen var ikke tilgjengelig.

**Fasthet og  $CO_2$ -utslipp**

For å illustrere effekten til bindemiddelene, sett i sammenheng med utslippene av  $CO_2$  er det beregnet forholdstall mellom fasthet og utslipp. Dette gjøres ved at 28 dagers skjærfasthet deles på  $CO_2$ -utslipp per tonn bindemiddel. Forholdstallet er vist i figur 5.1 for bindemidler med innblandingmengde  $90 \text{ kg/m}^3$ . Figuren viser at blandingene med 70/30 CKD/ Mikrosement (og med 0,5% kalsiumklorid) er de mest effektive sammensetningene. Av blandingene med 50/50 CKD og sement er Svensk Multicem og CKD/Standardsement FA mer effektive enn blandingene med Industrisement og finmalt industrisement. Blandingene med CKD/Mikrosement 30/70



hadde effekt på samme nivå som 50/50 CKD/Mikrosement. Ut fra figuren er det åpenbart at blandingen med kalk/semment er langt mindre effektiv i et miljøperspektiv. Det må nevnes at dis-



Figur 5.1: Forholdstall mellom skjærfasthet og utslipp for M1-M8 og KC, med innblandingmengde  $90 \text{ kg/m}^3$

se verdiene kun er beregnet for å illustrere forskjeller mellom bindemidlene, og at denne fordelingen kun er gyldig for innblandingmengde  $90 \text{ kg/m}^3$ . Forholdstallet må også ses i sammenheng med oppnådd fasthet. Ren CKD ville gitt et uendelig høyt forholdstall ettersom utslippet er 0, men ville ikke nødvendigvis vært relevant for prosjektering, på grunn av for lav fasthet. I dette tilfellet har alle bindemidlene skjærfasthet over 200 kPa.

## 5.4 Del 2: Sammenligning av Multicem og kalk/semment

Resultatene fra sammenligningen av Multicem og kalk/semment viser tilnærmet entydig at Multicem har bedre effekt enn kalk/semment i kvikkleira fra Flotten. Kun ved 1-dags fasthet for innblandingmengde  $120 \text{ kg/m}^3$  er kalk/semment-blandingens marginalt bedre. Figur 4.7 viser at 1 og 7 dagers fasthet er forholdsvis like for begge bindemidler, og påvirkes likt av økt innblandingmengde. For innblandingmengde  $60 \text{ kg/m}^3$  er også forskjellen for 28 dagers fasthet liten. Forskjellene er størst for 28 dagers fasthet med innblandingmengdene  $90$  og  $120 \text{ kg/m}^3$ . I fi-

Figur 4.6 viser det tydelig at fasthetsutviklingen til kalk/semment med tilsetningsmengde 90 og 120  $kg/m^3$  stagnerer sammenlignet med Multicem, som har større økning fra 7 til 28 dager. Generelt sett har leira god effekt av stabilisering, og alle kombinasjoner av bindemiddel og innblandingsmengde oppnår 28 dagers fasthet over 200 kPa.

En mulig feilkilde i sammenligningen av kalk/semment og Multicem er oppnådd densitet i prøvene. Figur 4.11 viser at innblanding av Multicem og kalk/semment påvirker prøvedensiteten ulikt. Økende mengde innblanding av kalk/semment fører til lavere prøvedensitet, mens økende mengde Multicem ikke har samme effekt. Lavere densitet skyldes ikke forskjeller i densiteten til selve bindemidlene, men sannsynligvis materialets evne til å komprimeres. Kalk reagerer hurtig med vannet i prøven og utvikler mye varme, som tørker ut det stabiliserte materialet. Under laboratoriearbeidet ble det notert at kalk/semment-blandingene virket å tørke ut mer enn blandingene med Multicem, spesielt for høye tilsetningsmengder. Dette påvirker sannsynligvis resultatet, men i hvor stor grad fastheten påvirkes av densiteten er vanskelig å bestemme. Det er ingen tydelig korrelasjon mellom densitet og fasthet for de tre prøvereplikatene som er stabilisert med kalk/semment og har herdet i 28 dager. Det er lite spredning i densiteten for replikatene, noe som også gjør det vanskelig å tallfeste påvirkningene. Lavere densitet i prøver med kalk er også observert i Wiersholm (2018). Der er samme metode for innbygging av prøver benyttet, og det er bygget inn leire stabilisert med både semment og ren kalk. Blandingene med semment oppnådde i snitt densitet på  $1,97 g/cm^3$ , og blandingene med kalk  $1,79 g/cm^3$ . Forskjellen på  $0,18 g/cm^3$  er større enn forskjellene i undersøkelsene i denne masteroppgaven, som er på  $0,052 g/cm^3$  (Gjennomsnitt MC-120 og KC-120). At forskjellen er større i Wiersholm (2018) kan ha sammenheng med at det er benyttet ren kalk og ren semment i prøvene.

## 5.5 CKD og Industrisement i leire fra storblokk og miniblokk

Figur 4.10 viser utviklingen av fasthet med tid for MC/M1 (50/50 CKD/Industrisement) med tilsetningsmengde 90  $gk/m^3$ . Fasthet etter 1 og 7 dager er omtrent lik for begge leirene. For 28 dagers fasthet er det større differanse enn forventet. En mulig årsak kan være at det er benyttet 5% mer bindemiddel i leira fra storblokkprøven. Økt tilsetning av bindemiddel skyldes forskjellen i tyngdetetthet for leirene. Det er tydelig fra figur 4.6 at mengde bindemiddel har større betydning

for 28 dagers fasthet, enn ved 1 og 7 dagers fasthet, og det er mulig at den økte tilsetningen har bidratt til større 28 dagers fasthet.

## 5.6 Elastisitetsmodul

Figur 4.11 viser  $E_{50}$  plottet mot skjærfasthet for alle prøver. Forholdet mellom fasthet og stivhet er tilnærmet lineært i intervallet, og spredningen er forholdsvis liten. Figuren viser også at kalk/semment-blandingene virker å ha litt høyere stivhet ved samme fasthet som prøvene med CKD.  $E_{50}$  bestemmes som vist i figur 2.6. Verdiene for  $E_{50}$  kan påvirkes av at endene til prøvene som testes ikke er helt renskjærte, som igjen kan føre til uregelmessig spenning/tøynings-kurve og unøyaktigheter ved beregningen av elastisitetsmodulen.

## Kapittel 6

# Oppsummering

Forsøkene med ulike bindemidler kan oppsummeres på følgende vis:

- Metoden som er benyttet har gitt liten spredning for de ulike kombinasjonene av bindemidler og lagringsperioder som er undersøkt. Dette har gjort det mulig å skille effekten til de ulike bindemidlene på en god måte. Bruk av leire med lite variasjon i egenskaper har også bidratt til liten spredning.
- I en 50/50-blanding av CKD og sement gir Standardsement FA høyere 28-dagers fasthet enn Industrisement, og med nesten 20% lavere  $CO_2$ -utslipp.
- Bruk av mikrosement med høy finhet gir tydelig bedre 1-dags fasthet enn blandingene som inneholder sement med lavere finhet.
- Kalsiumklorid som akselerator viser tegn til å gi høyere fasthet, men har begrenset effekt med andelen som er brukt i disse undersøkelsene.
- Den mest effektive blandingen med hensyn på fasthet og  $CO_2$ -utslipp var CKD/Mikrosement med blandingsforhold 70/30.
- Ved sammenligning av Multicem og kalk/sement, ga Multicem tydelig høyere 28 dagers fasthet for alle innblandingsmengder. I tillegg til å gi bedre fasthet har Multicem over 50% lavere  $CO_2$ -utslipp, og er billigere.
- Innblandingsmengde så lav som  $60 \text{ kg/m}^3$  ga god stabiliseringseffekt på kvikkleira som ble benyttet.

## Kapittel 7

### Vider arbeid

Resultatene fra undersøkelsene viser flere mulige områder som kan studeres nærmere.

I et miljøperspektiv er det flere elementer det er mulig å ta tak i, og om mulig kombinere. Forholdstallene mellom fasthet og utslipp viste at en sammensetning med blandingsforhold 70/30 CKD/sement var mest effektiv, samt at Standardsement FA var den mest effektive sementen. Ved å finne optimalt blandingsforhold mellom CKD og Standardsement FA (som gir tilfredstillende styrke), for flere innblandingsmengder, dannes et svært godt grunnlag for å redusere  $CO_2$ -utslipp fra dypstabilisering. Med tallene som er lagt til grunn i denne oppgaven vil en 70/30-blanding CKD/Standardsement FA kun ha ca. 21% av  $CO_2$ -utslippet til en 50/50-blanding med kalk/sement. Dette kan også kombineres med undersøkelser av større innblandingsmengder av kalsiumklorid.

Utvikling av laboratoriemetoder som i større grad gjenskaper innblandingsforhold i felt kan også bidra til å optimalisere bruk av bindemidler.

# Bibliografi

- Cementa AB (2019). Multicem, hentet fra: <https://www.cementa.se/sv/Multicem> den 05.06.2019.
- Emdal, A. (2017). Kvikkleirefeltet på Tiller-Flotten, lastet ned fra: [https://www.vegvesen.no/\\_attachment/2052549/binary/1215411?fast\\_title=Kvikkleirefeltet+på+Tiller-Flotten.pdf](https://www.vegvesen.no/_attachment/2052549/binary/1215411?fast_title=Kvikkleirefeltet+på+Tiller-Flotten.pdf) den 10.10.2018.
- Engeset, I. (2018). *Betydning av spenningsnivå under herding av kalksementstabilisert leire*. Masteroppgave.
- Gella, K. P. (2017). Geotechnical and Geological Characterization of a Quick Clay Site at Flotten, Trondheim.
- Jacobsen, S. (2007). Properties of cement kiln dust (CKD) and use in cementitious materials - an overview. In *Sustainability in the Cement and Concrete Industry*. Norsk Betongforening.
- Jacobsen, S., Maage, M., Smeplass, S., Kjellsen, K. O., Sellevold, E. J., Lindgård, J., Myrdal, R., Bjøntegaard, , and Geiker, M. (2016). *Concrete Technology*. Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, Trondheim.
- Janz, M. and Johansson, S.-E. (2002). Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering. Rapport 9, Statens Geotekniska Institut.
- Karlsruud, K., Otter, R., and Gjelsvik, V. (2012). State-of-the-art: Blokkprøver. Report, Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og Jernbaneverket.
- Kitazume, M. and Terashi, M. (2013). The deep mixing method.
- Kraft, L., Arntsen, B., and Jacobsen, S. (2007). Experimental study of ckd as soil stabiliser. Rapport, Norut Teknologi.

- Lessard, G. and Mitchell, J. K. (1985). The causes and effects of aging in quick clays. *Canadian geotechnical journal*, 22(3):335–346.
- Norcem AS (2019a). Kvalitetsdata, hentet fra: <https://www.norcem.no/no/kvalitetsdata> den 02.06.2019.
- Norcem AS (2019b). Materialregnskap og utslipp, Norcem Brevik, hentet fra: [https://www.norcem.no/no/materialregnskap\\_brevik](https://www.norcem.no/no/materialregnskap_brevik) den 01.06.2019.
- Norcem AS (2019c). Multicem, hentet fra: <https://www.norcem.no/no/Multicem> den 03.06.2019.
- Norcem AS (2019d). Revidert Planprogram, lastet ned fra: <https://www.norcem.no/no/konsekvensutredning> den 02.06.2019.
- Norcem AS (2019e). Sementproduksjon og CO2, hentet fra: <https://www.norcem.no/no/mentproduksjon-co2> den 05.06.2019.
- Norcem AS (2019f). Teknisk datablad Multicem, lastet ned fra: <https://www.norcem.no/no/search?keywords=multicem> den 03.06.2019.
- Norcem AS (2019g). Våre Sementer, hentet fra: [https://www.norcem.no/no/Produkter\\_hoved](https://www.norcem.no/no/Produkter_hoved) den 05.06.2019.
- Norges Geologiske Undersøkelse (2019). Løsmassekart, hentet fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/> den 13.06.2019.
- Norges vassdrags- og energidirektorat. NVE Atlas, hentet fra <https://atlas.nve.no/> den 13.06.2019.
- Norsk Geoteknisk Forening (2011). Melding nr. 2, Veilending for symboler og definisjoner i geoteknikk. Veiledning.
- Norsk Geoteknisk Forening (2012). Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler. Veileder.
- Statens vegvesen (2016). Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser. Retningslinje, Vegdirektoratet.

Stork, M., Meindersma, W., Overgaag, M., and Neelis, M. (2014). A Competitive and Efficient Lime Industry. Teknisk rapport, European Lime Association.

Söderblom, R. (1974). Aspects on some problems of geotechnical chemistry - part iii. Report, Statens Geotekniska Institut.

Taylor, H. (1997). *Cement chemistry*. Thomas Telford Publishing, London, 2nd edition edition.

Wiersholm, P. (2018). *Temperatureffekter i Kalksementstabilisert Leire*. Masteroppgave.

Åhnberg, H og Holm, G. (1987). Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord. Rapport 30, Statens Geotekniska Institut.

Åhnberg, H., Johansson, S.-E., and Retelius, A. (1995). Cement och kalk för djupstabilisering av jord. Rapport 48, Swedish Geotechnical Institute.



# Tillegg A

## Resultater fra enaksiale trykkforsøk

### A.1 Beskrivelse

Dette vedlegget inneholder resultatene fra enaksiale trykkforsøk som er utført. Navnene til prøvene er gitt på følgende måte:

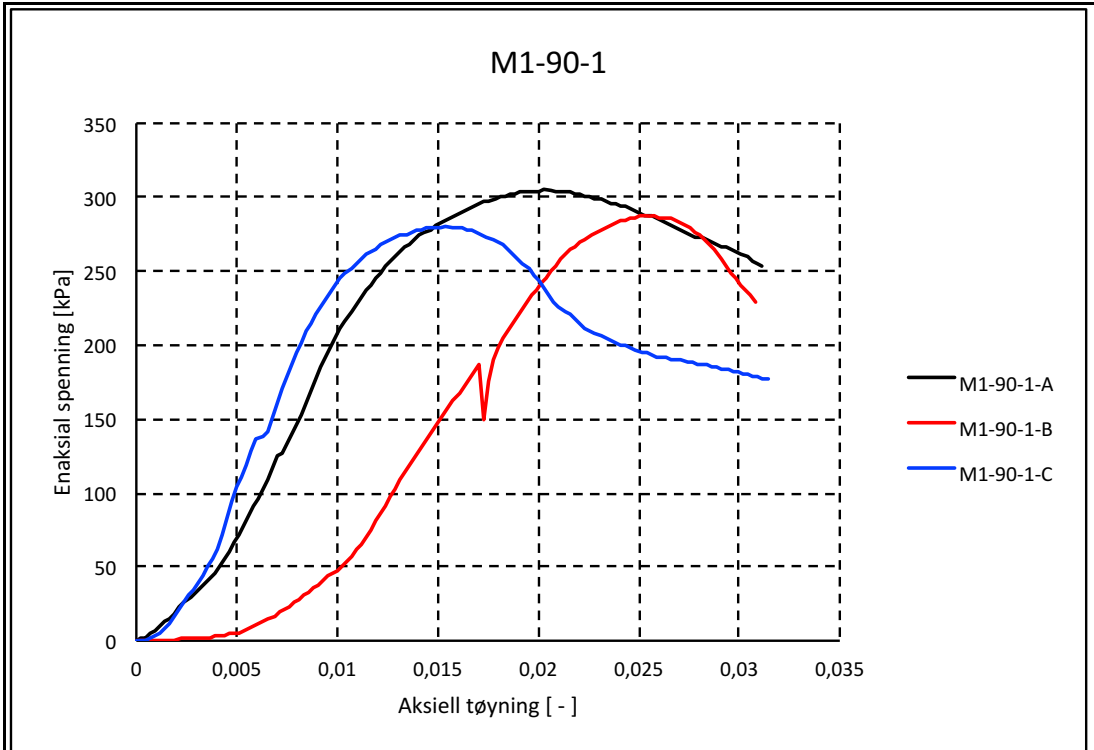
**Bindemiddelblanding - Tilsetningsmengde - Herdetid - A/B/C.**

Samleplottene er navngitt på samme måte, men uten A/B/C tilslutt.

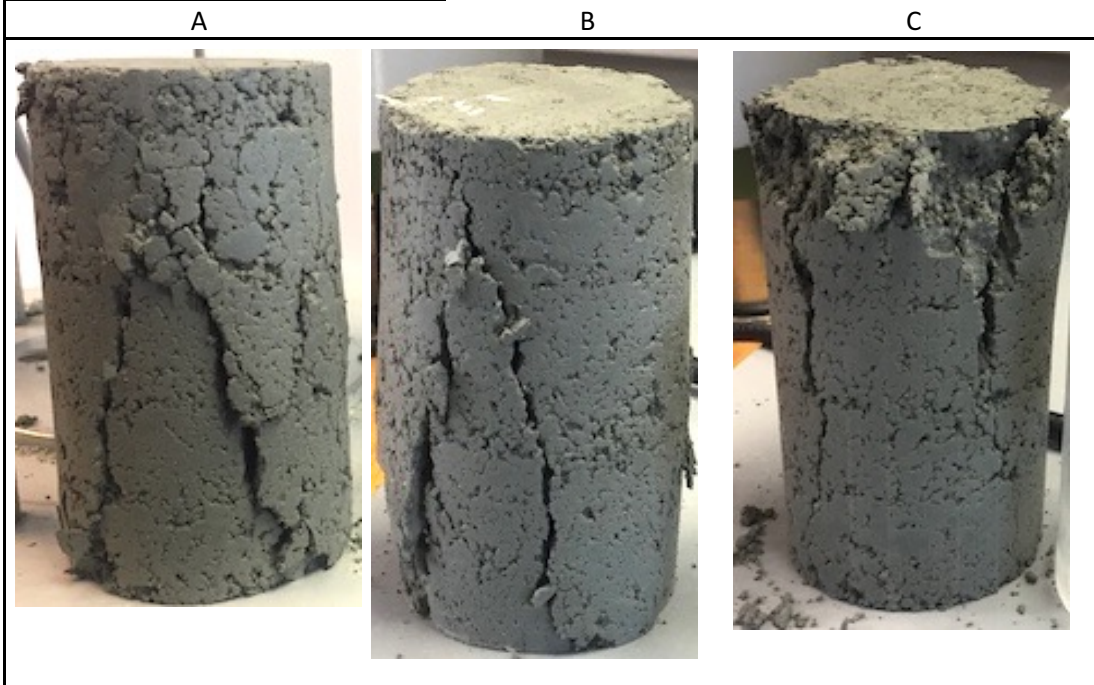
B-prøven stabilisert med M1, og bindemiddelmengde  $90\text{ kg/m}^3$ , som lagres i 7 dager har dermed navnet M1-90-7-B. Samleplottet denne prøven er med i heter M1-90-7. Bindemiddelsammensetningene er gitt i tabell 3.4.

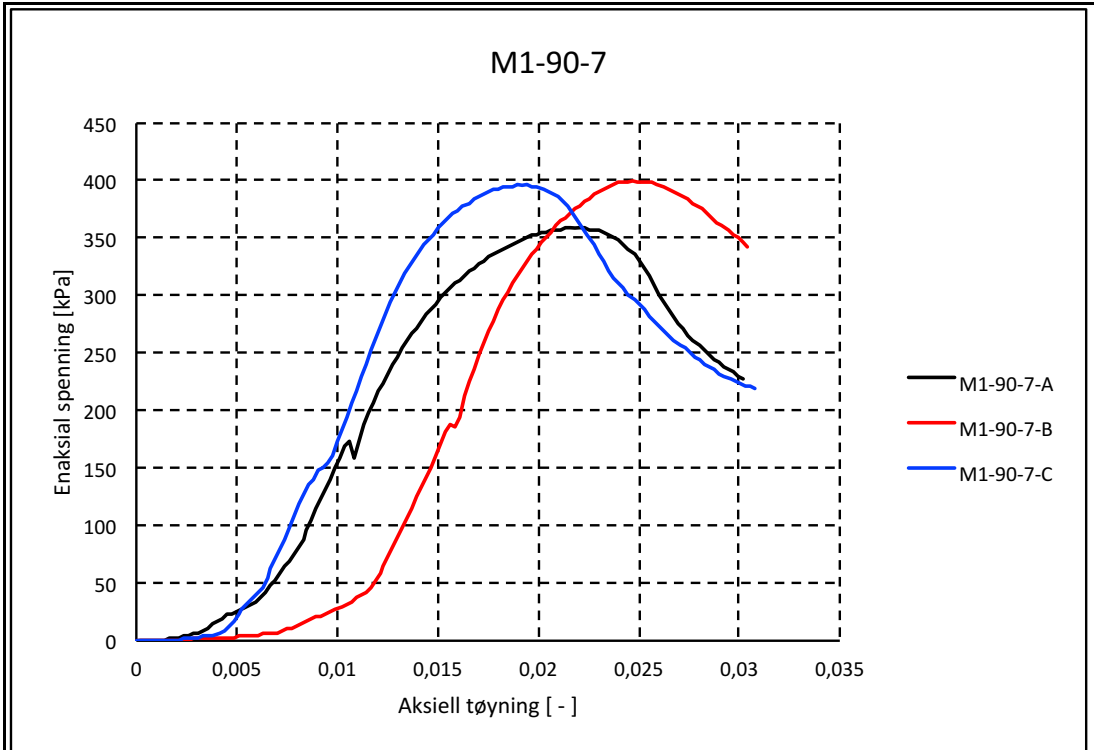
### Enheter

$\sigma_{brudd}$  og  $\tau_{maks}$  er gitt i  $kPa$ . Elastisitetsmodul  $E_{50}$  er gitt i  $MPa$  og Densitet er gitt i  $g/cm^3$ .



Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M1-90-1-A	304,6	152,3	0,0205	25,33	1,759
M1-90-1-B	287,3	143,65	0,025	20,8	1,764
M1-90-1-C	280,3	140,15	0,015	28,6	1,735
Gjennomsnitt		145,3667			
Standardavvik		5,106586			
Relativt standardavvik		3,51 %			



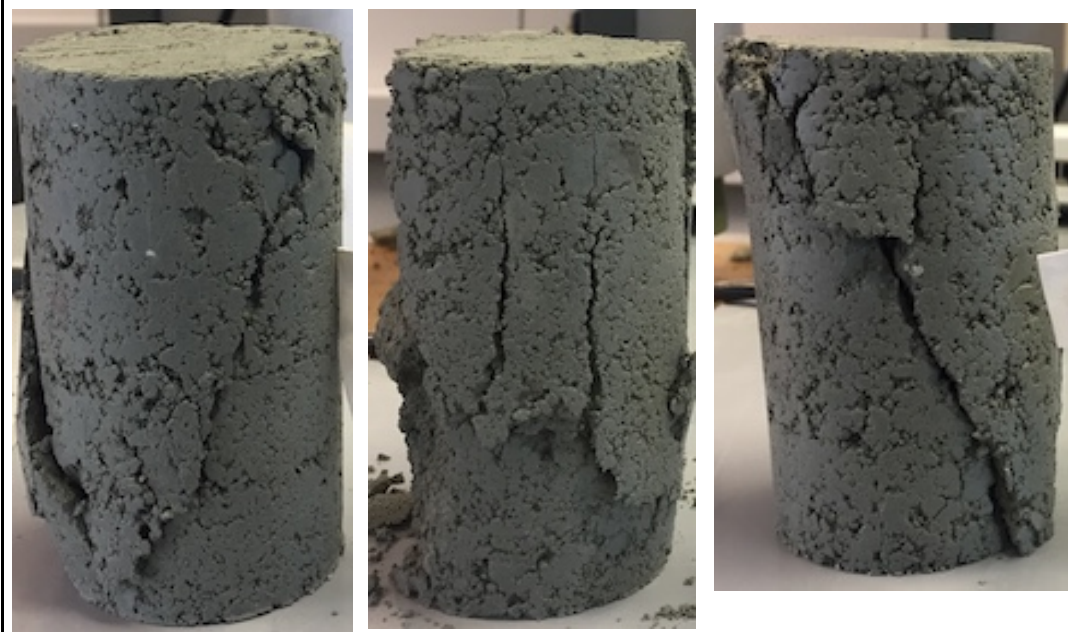


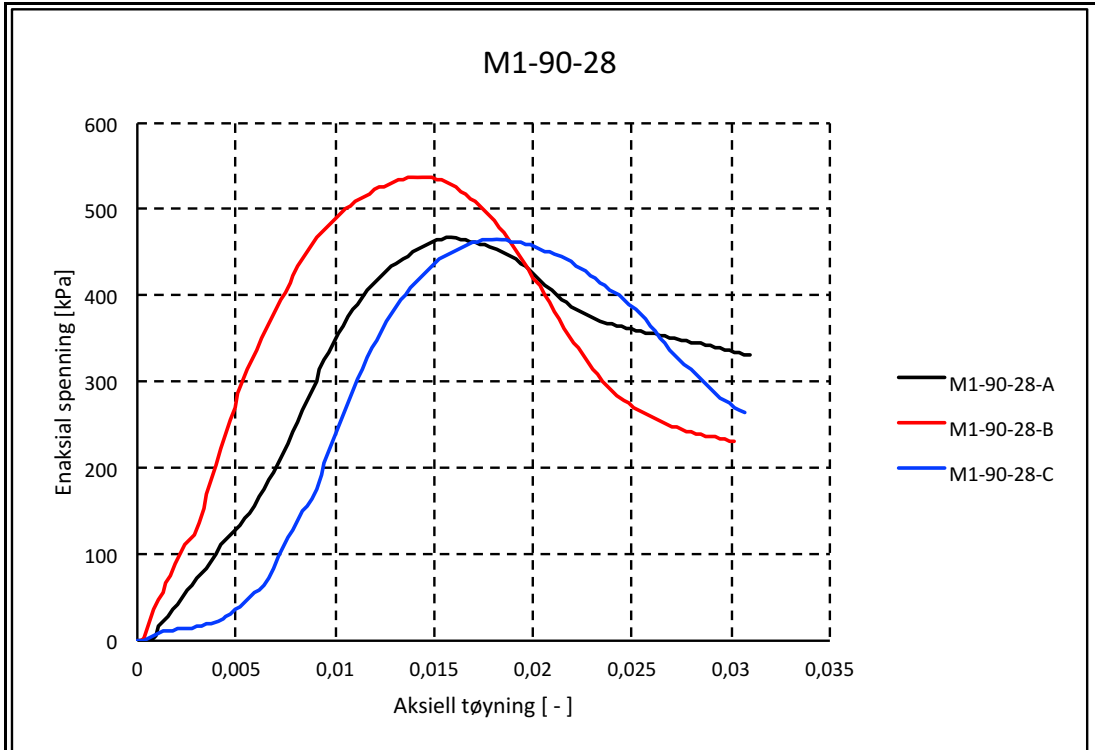
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
M1-90-7-A	358,9	179,45	0,021	34,2	1,748
M1-90-7-B	399,95	199,975	0,025	40	1,736
M1-90-7-C	396,1	198,05	0,018	35,4	1,721
Gjennomsnitt		192,4917			
Standardavvik		9,255276			
Relativt standardavvik		4,81 %			

A

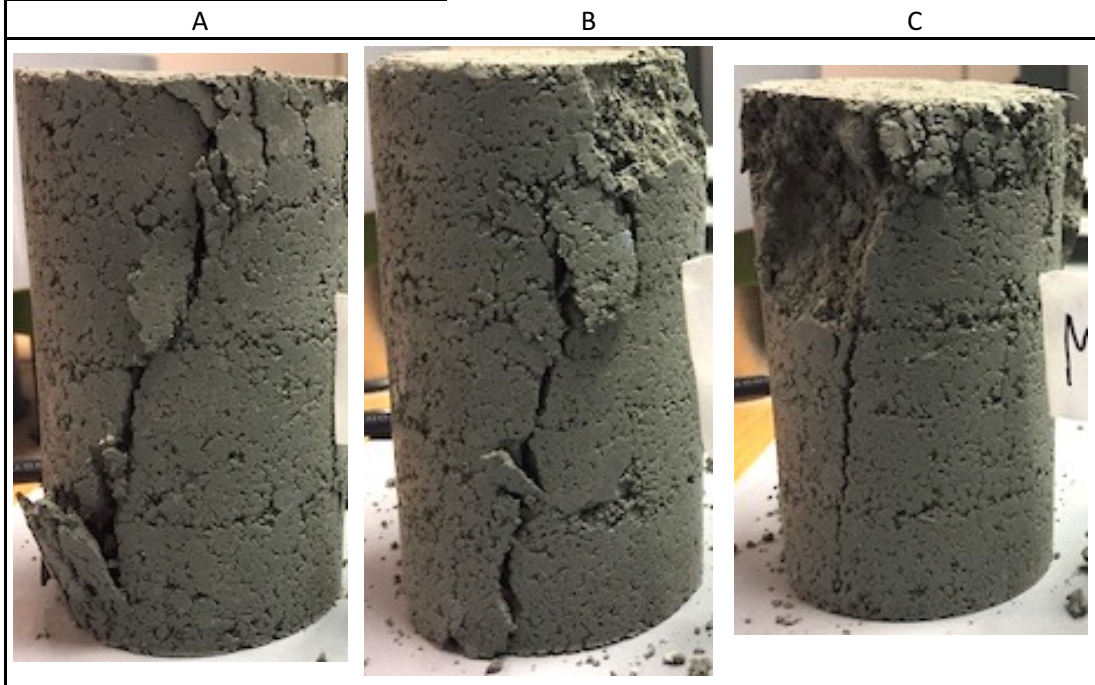
B

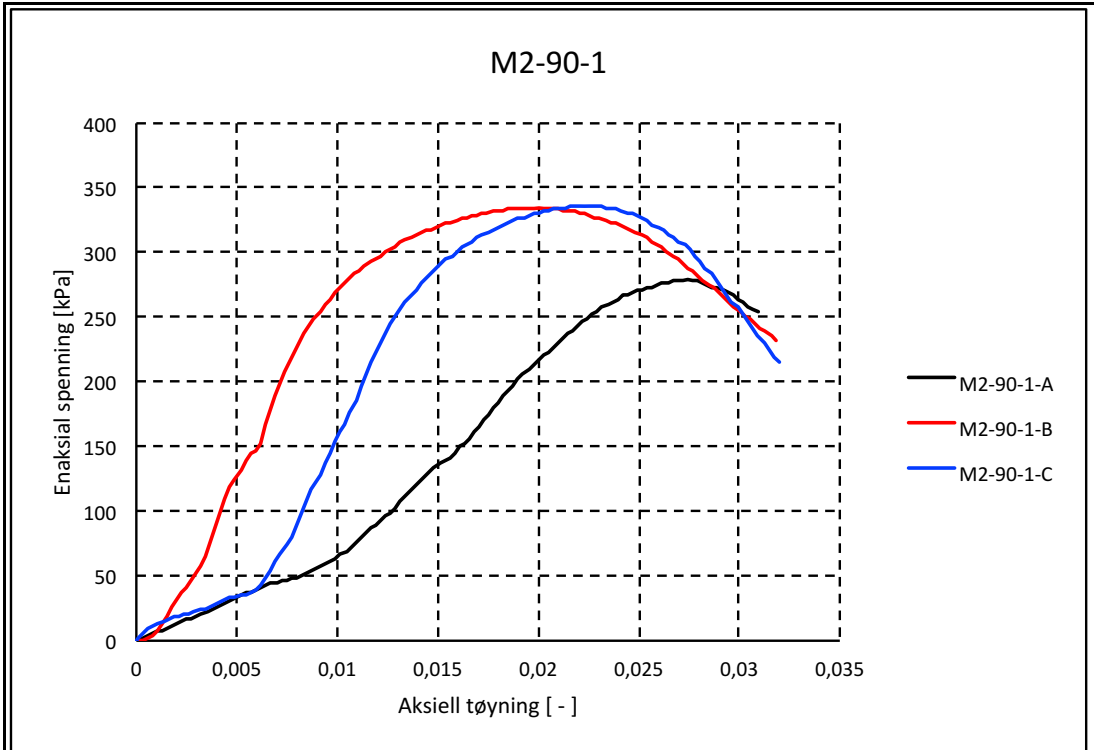
C



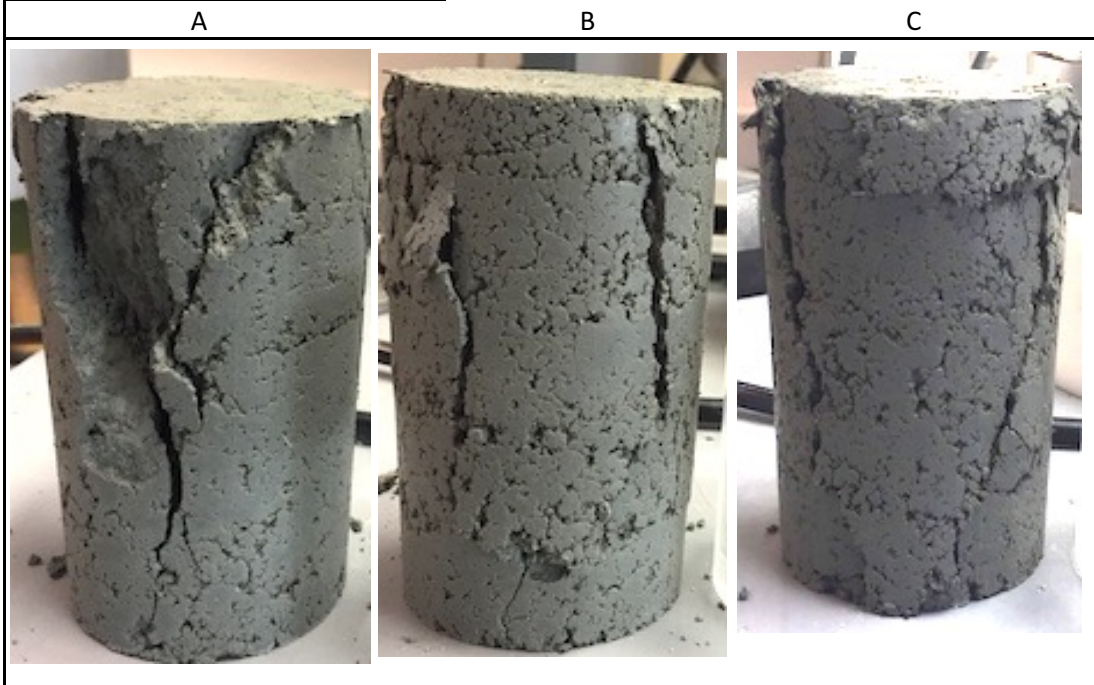


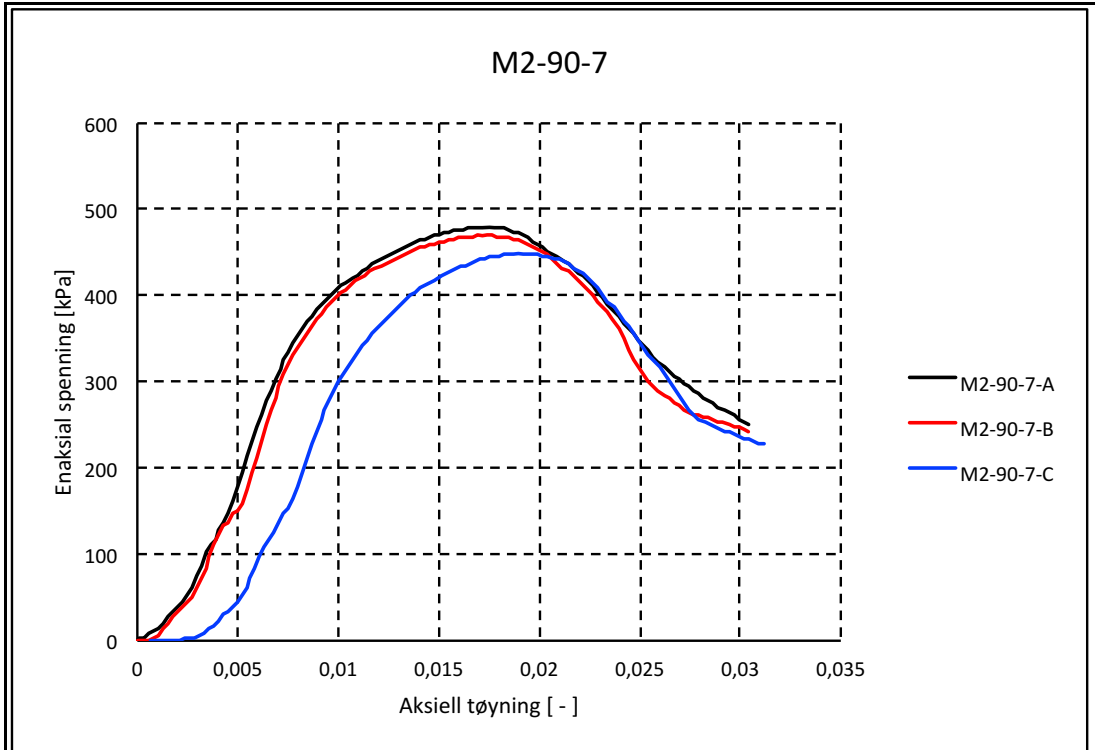
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M1-90-28-A	467,26	233,63	0,016	35,45	1,735
M1-90-28-B	537,29	268,645	0,014	56,63	1,724
M1-90-28-C	465,47	232,735	0,018	47,45	1,694
Gjennomsnitt		245,0033			
Standardavvik		16,72118			
Relativt standardavvik		6,82 %			





Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M2-90-1-A	279,25	139,625	0,027	14,35	1,782
M2-90-1-B	334,6	167,3	0,019	36,4	1,777
M2-90-1-C	335,96	167,98	0,022	33,17	1,793
Gjennomsnitt		158,3017			
Standardavvik		13,20932			
Relativt standardavvik		8,34 %			





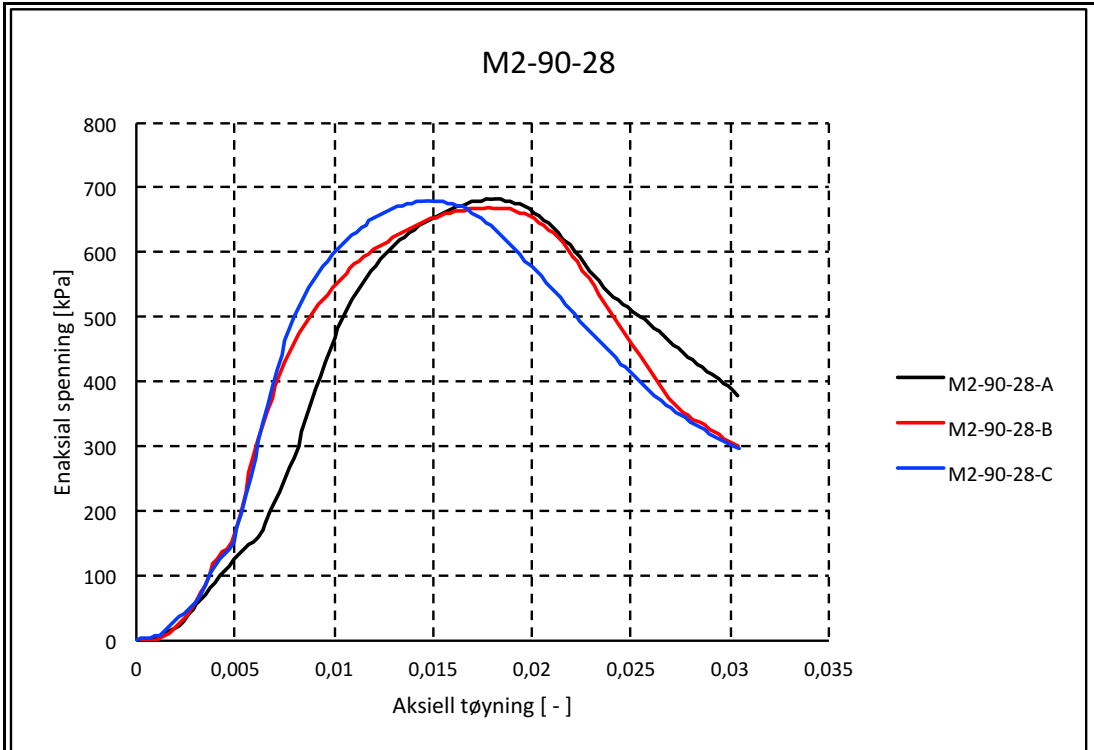
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M2-90-7-A	479,4	239,7	0,017	53,33	1,785
M2-90-7-B	469,7	234,85	0,016	45,19	1,781
M2-90-7-C	449	224,5	0,018	45,8	1,768
Gjennomsnitt		233,0167			
Standardavvik		6,339339			
Relativt standardavvik		2,72 %			

A

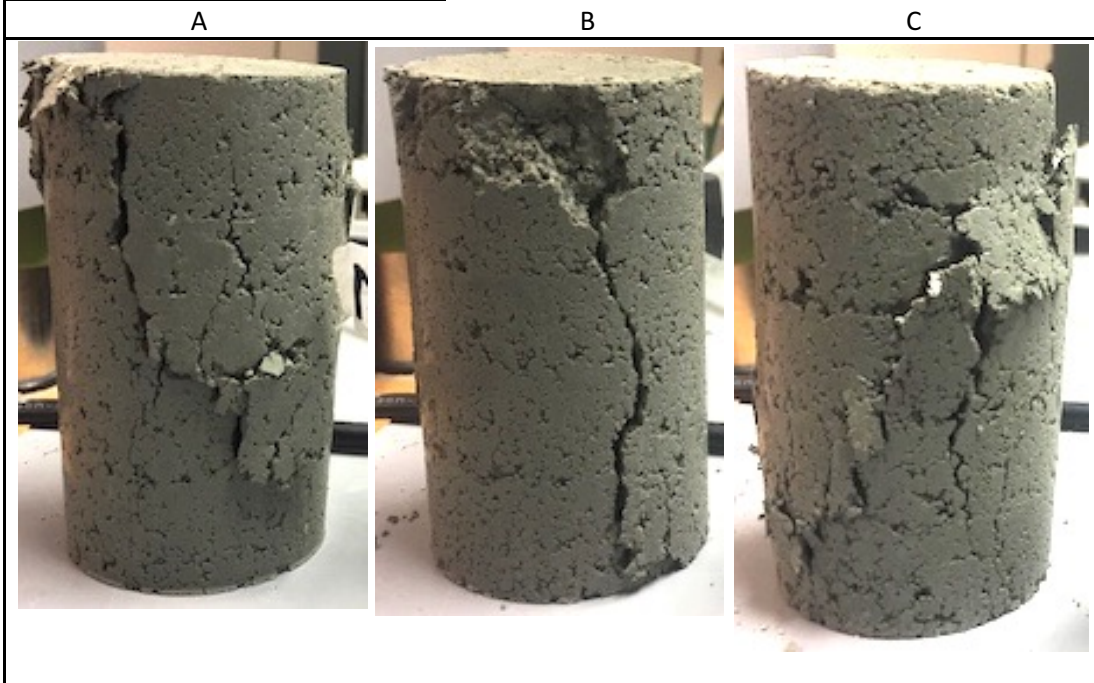
B

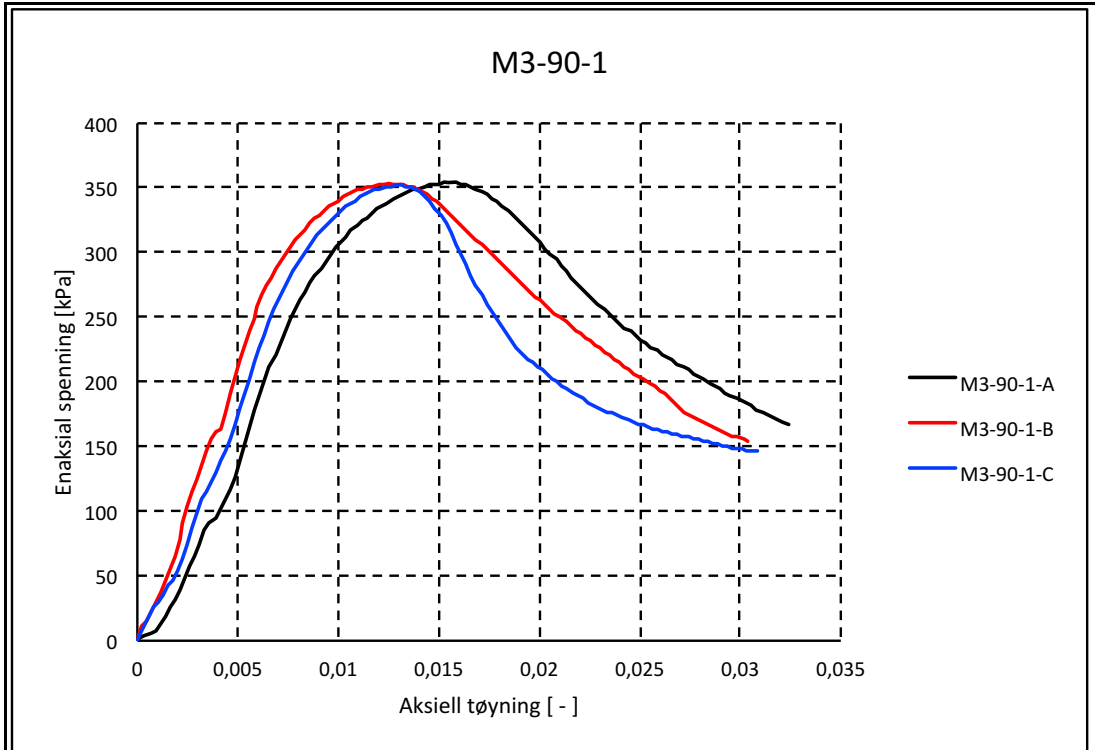
C



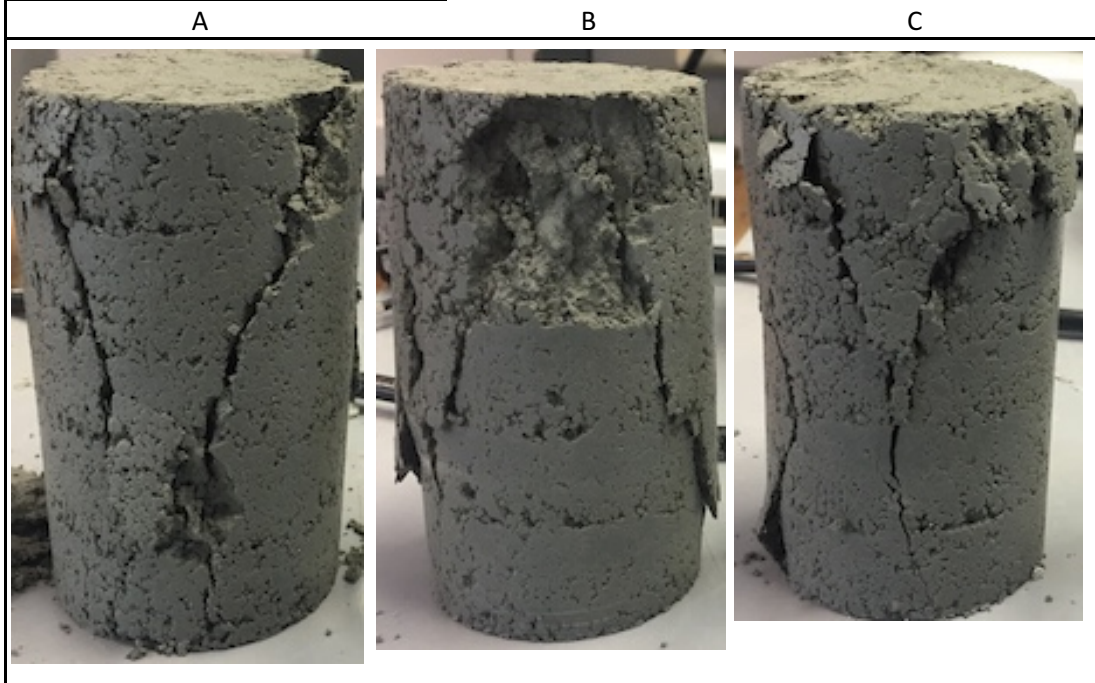


Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M2-90-28-A	682,61	341,305	0,018	85,25	1,7986
M2-90-28-B	669,81	334,905	0,017	86,88	1,7743
M2-90-28-C	680,04	340,02	0,015	85	1,7618
Gjennomsnitt		338,7433			
Standardavvik		2,764345			
Relativt standardavvik		0,82 %			

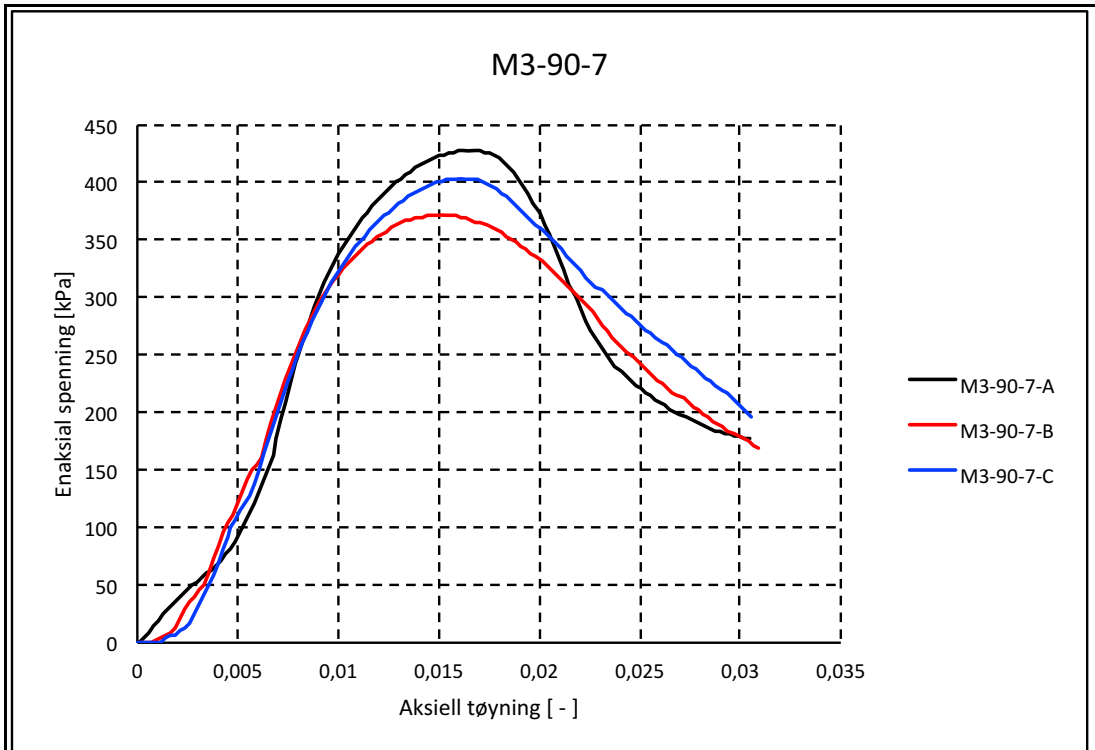




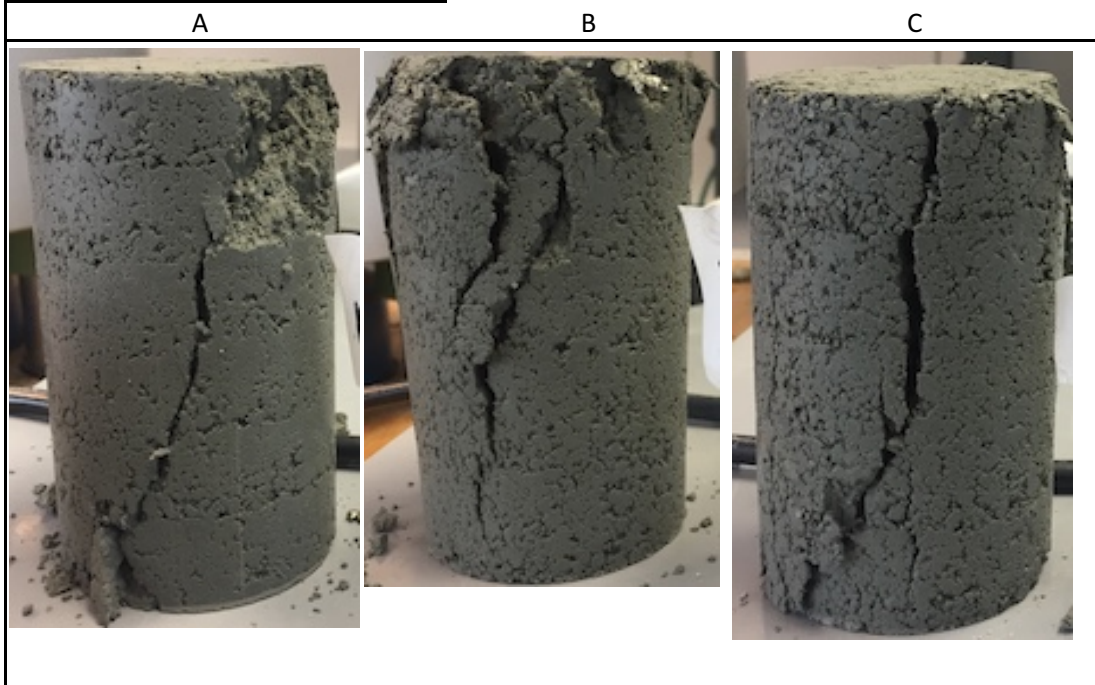
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M3-90-1-A	354,2	177,1	0,015	41,76	1,748
M3-90-1-B	353,5	176,75	0,012	46,58	1,755
M3-90-1-C	352,17	176,085	0,013	42,93	1,732
Gjennomsnitt		176,645			
Standardavvik		0,420971			
Relativt standardavvik		0,24 %			

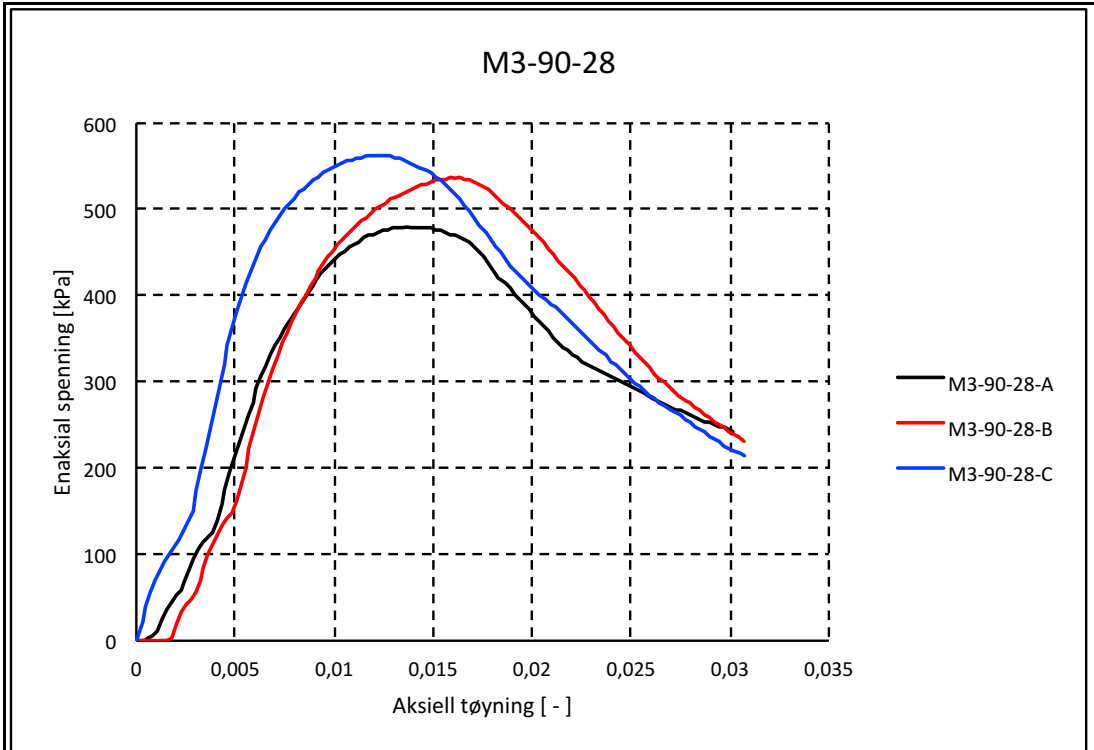




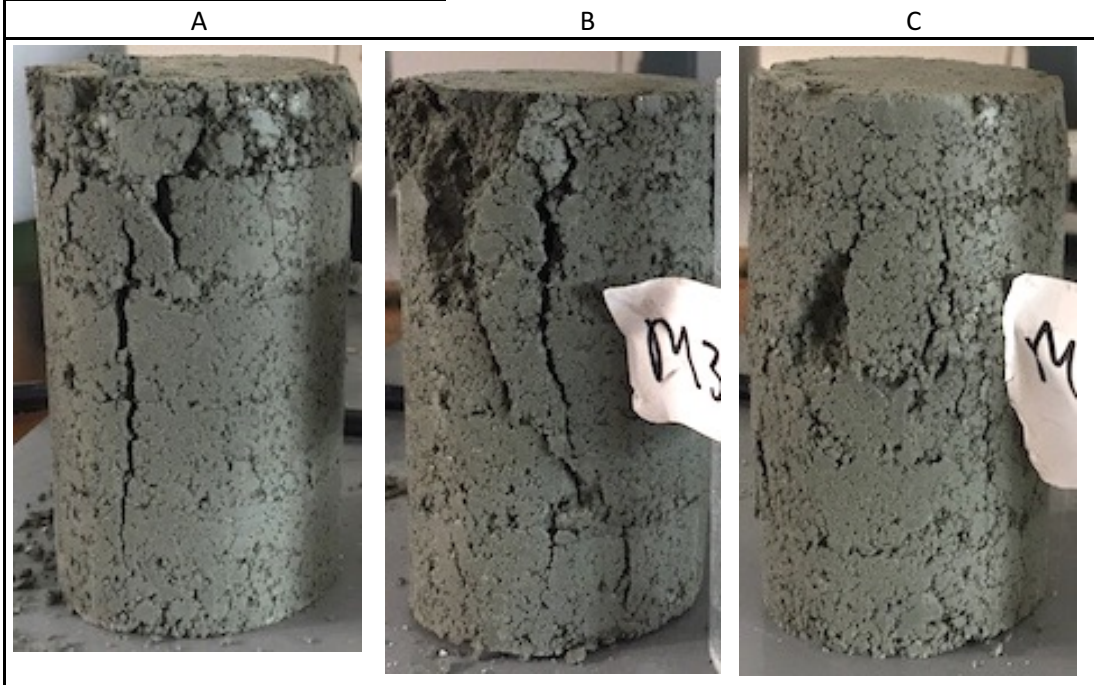


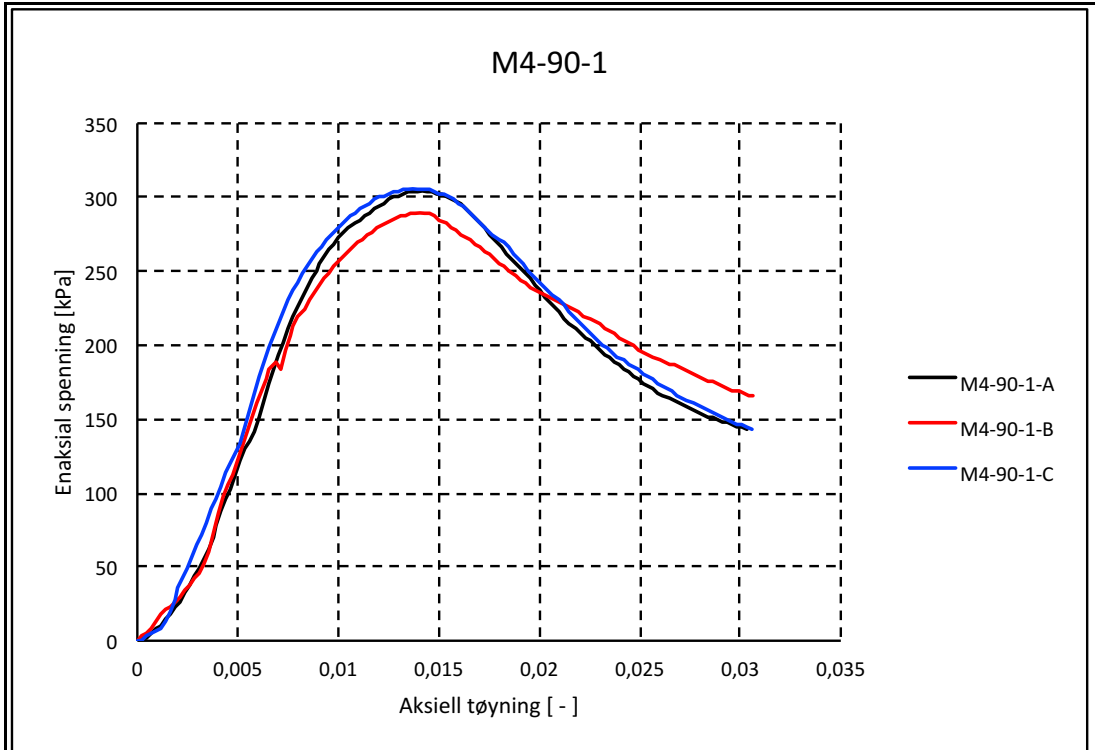
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M3-90-7-A	427,77	213,885	0,016	47,55	1,756
M3-90-7-B	371,97	185,985	0,015	37,57	1,728
M3-90-7-C	403,5	201,75	0,016	41,98	1,736
Gjennomsnitt		200,54			
Standardavvik		11,42222			
Relativt standardavvik		5,70 %			



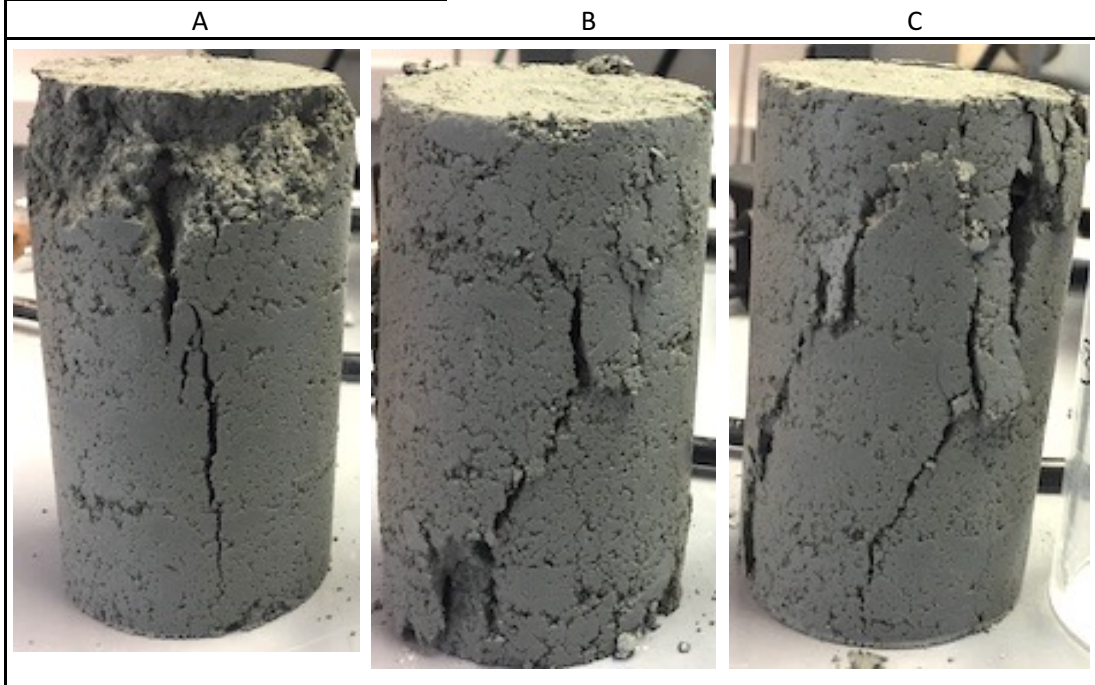


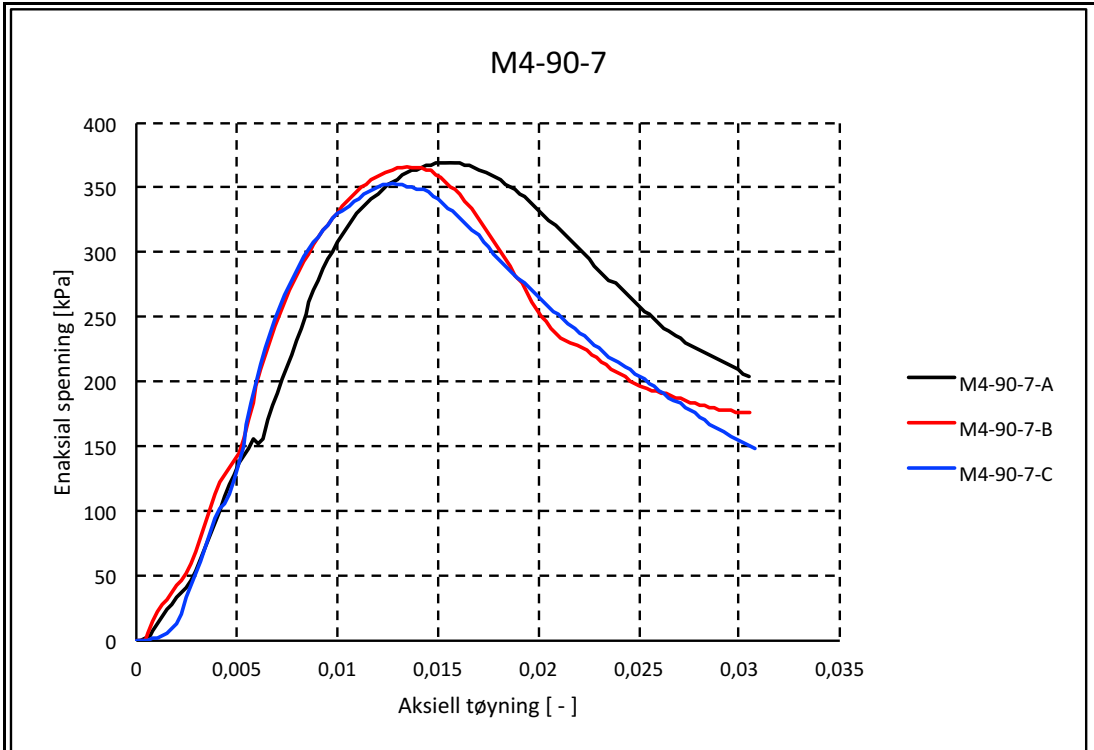
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M2-90-28-A	479	239,5	0,013	55,17	1,7031
M2-90-28-B	536,35	268,175	0,015	60,91	1,7493
M2-90-28-C	562,57	281,285	0,012	72,05	1,7121
Gjennomsnitt		262,9867			
Standardavvik		17,4487			
Relativt standardavvik		6,63 %			



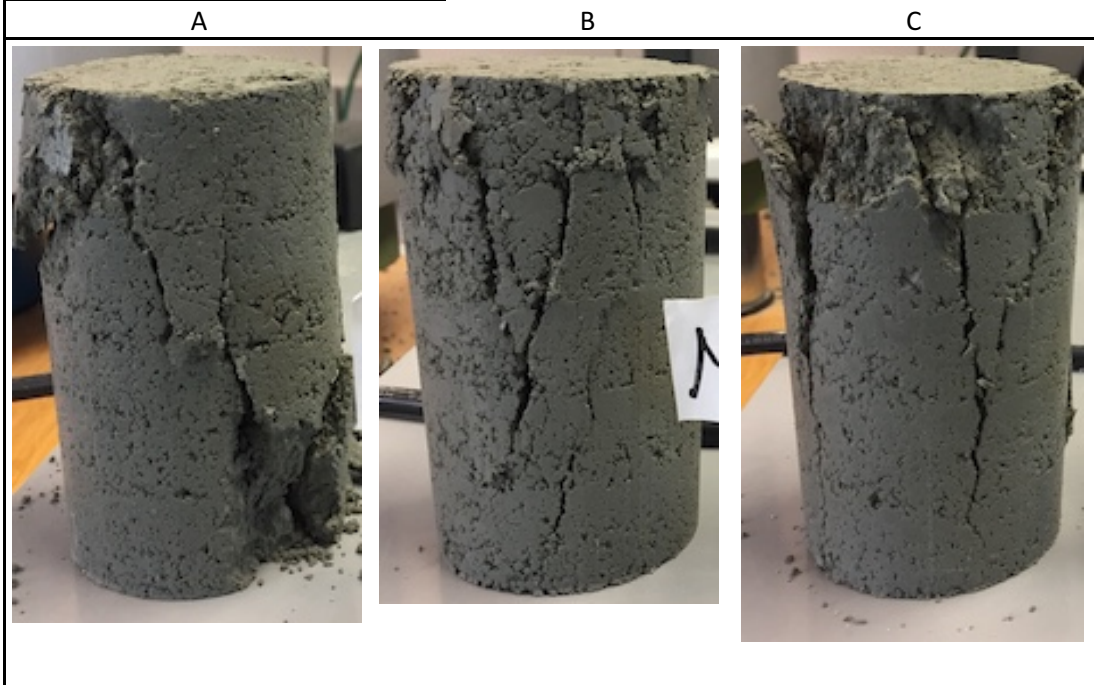


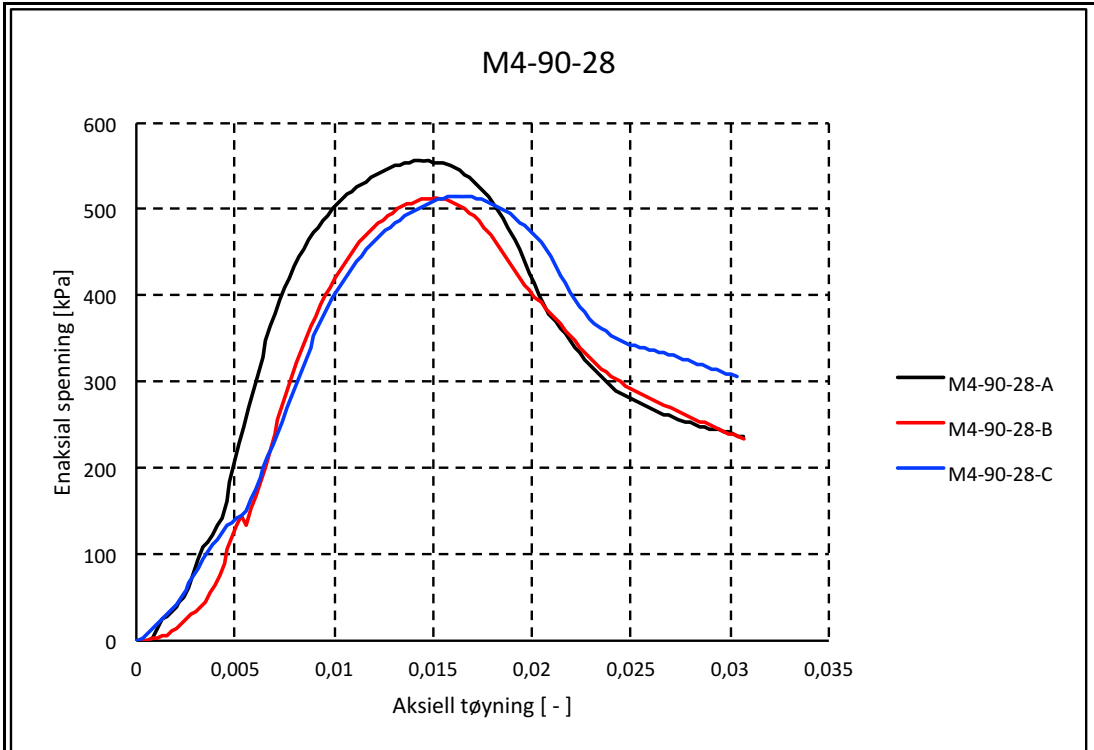
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
M4-90-1-A	304,3	152,15	0,014	35,35	1,766
M4-90-1-B	289,4	144,7	0,014	32,22	1,750
M4-90-1-C	305,68	152,84	0,013	34,38	1,766
Gjennomsnitt		149,8967			
Standardavvik		3,68538			
Relativt standardavvik		2,46 %			





Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M4-90-7-A	369,5	184,75	0,015	34,26	1,755
M4-90-7-B	366,4	183,2	0,013	44,1	1,748
M4-90-7-C	353,6	176,8	0,012	44,76	1,736
Gjennomsnitt		181,5833			
Standardavvik		3,441011			
Relativt standardavvik		1,90 %			





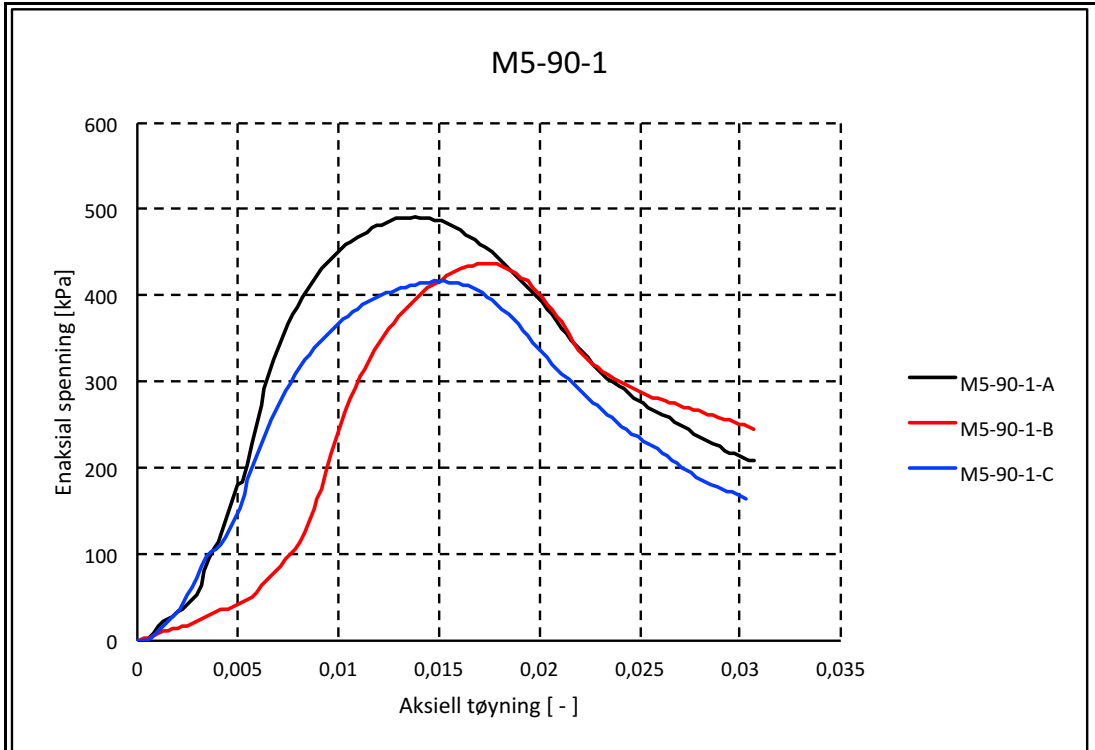
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M2-90-28-A	556,29	278,145	0,014	67,8	1,727
M2-90-28-B	513,41	256,705	0,015	55,87	1,738
M2-90-28-C	515,05	257,525	0,016	40,23	1,742
Gjennomsnitt		264,125			
Standardavvik		9,919288			
Relativt standardavvik		3,76 %			

A

B

C



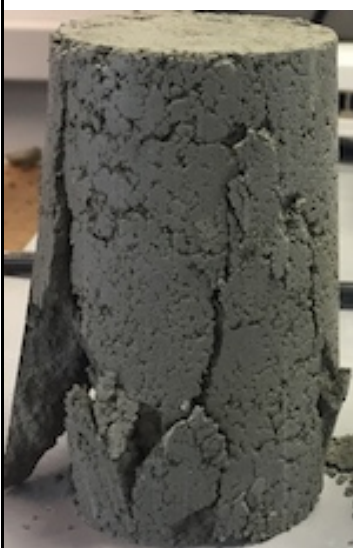


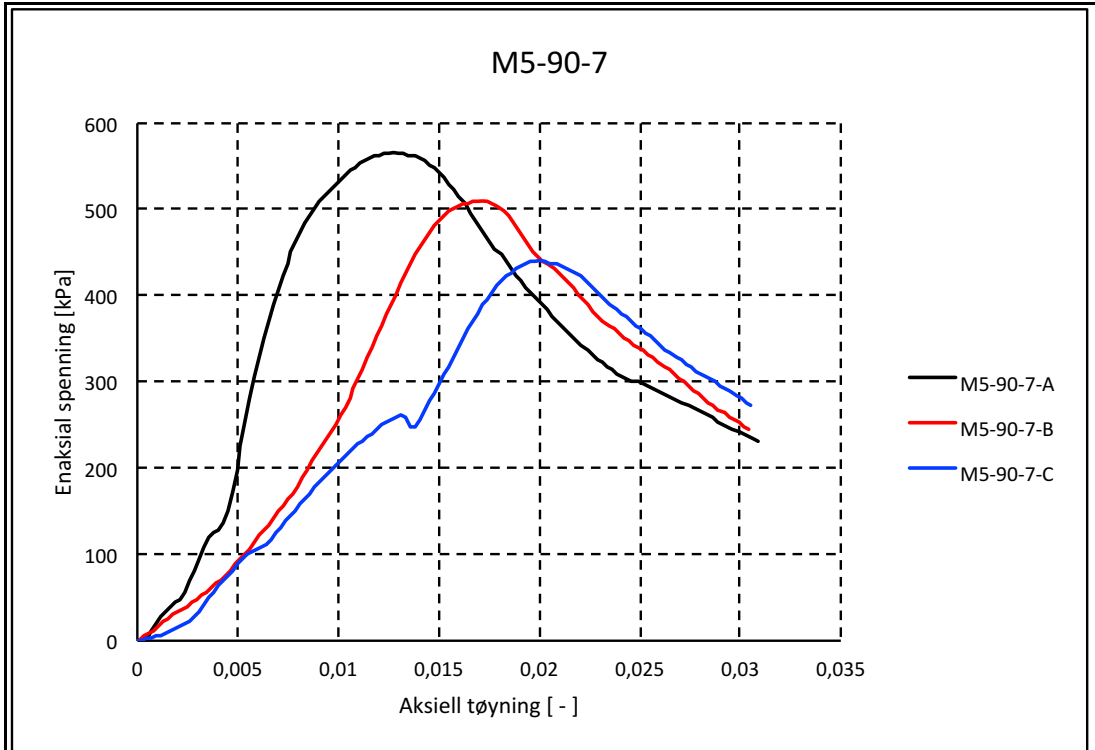
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
M5-90-1-A	491,5	245,75	0,014	61,8	1,791
M5-90-1-B	437,3	218,65	0,017	44,59	1,753
M5-90-1-C	416,75	208,375	0,015	47,38	1,766
Gjennomsnitt		224,2583			
Standardavvik		15,76521			
Relativt standardavvik		7,03 %			

A

B

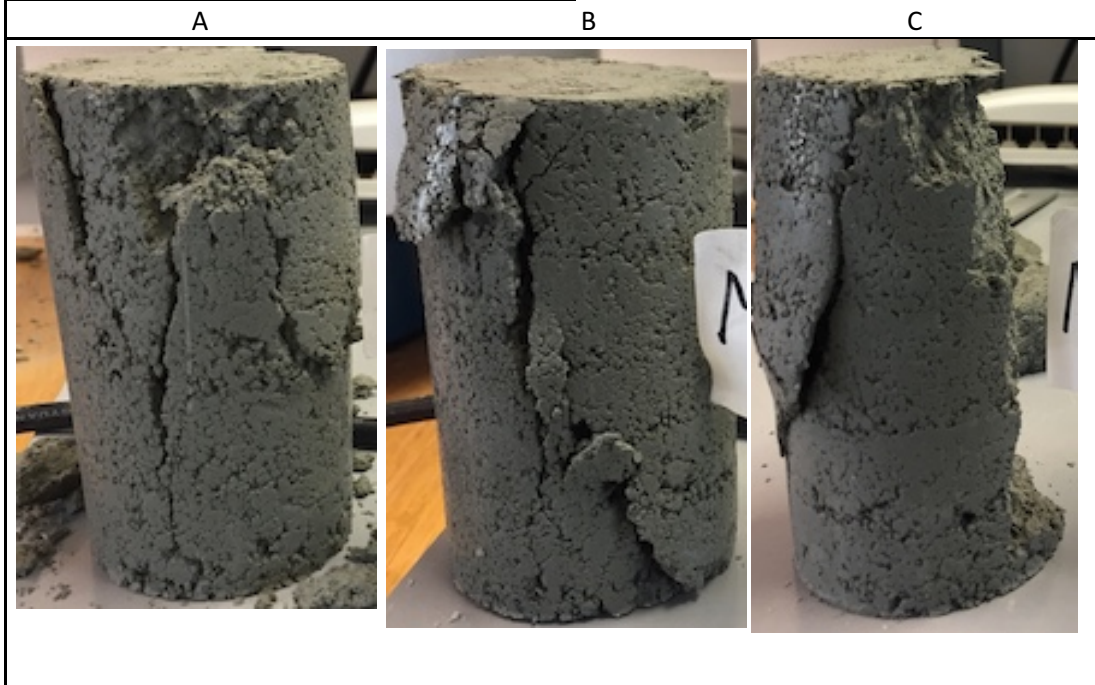
C

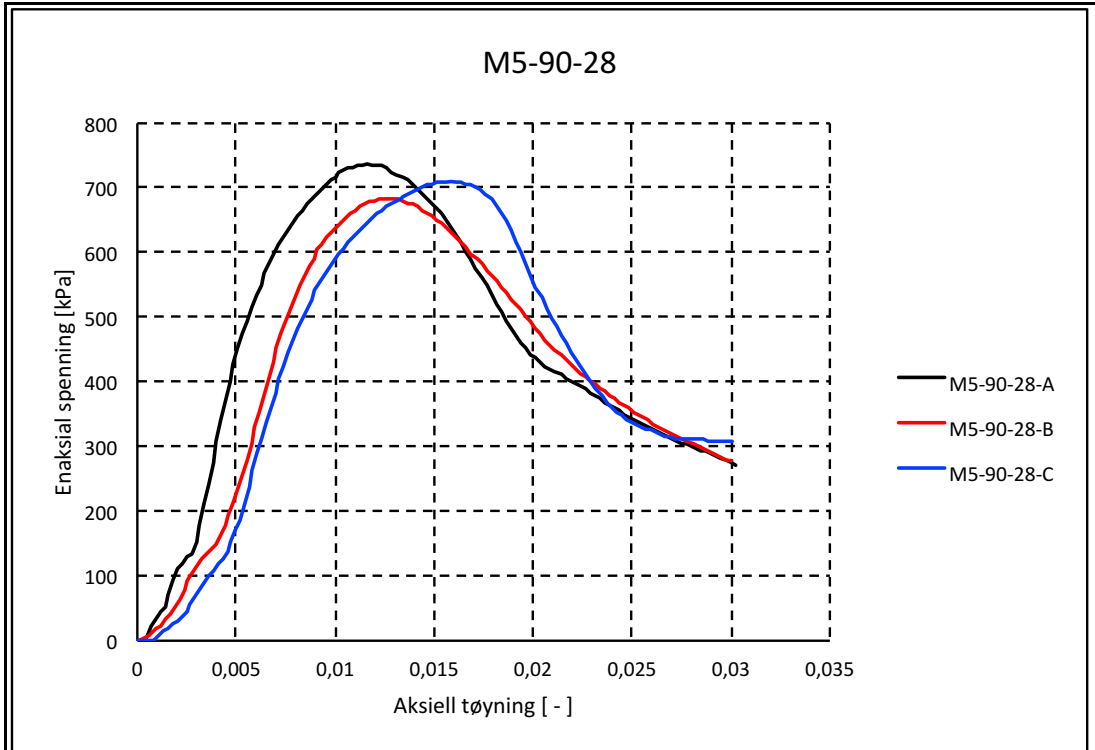




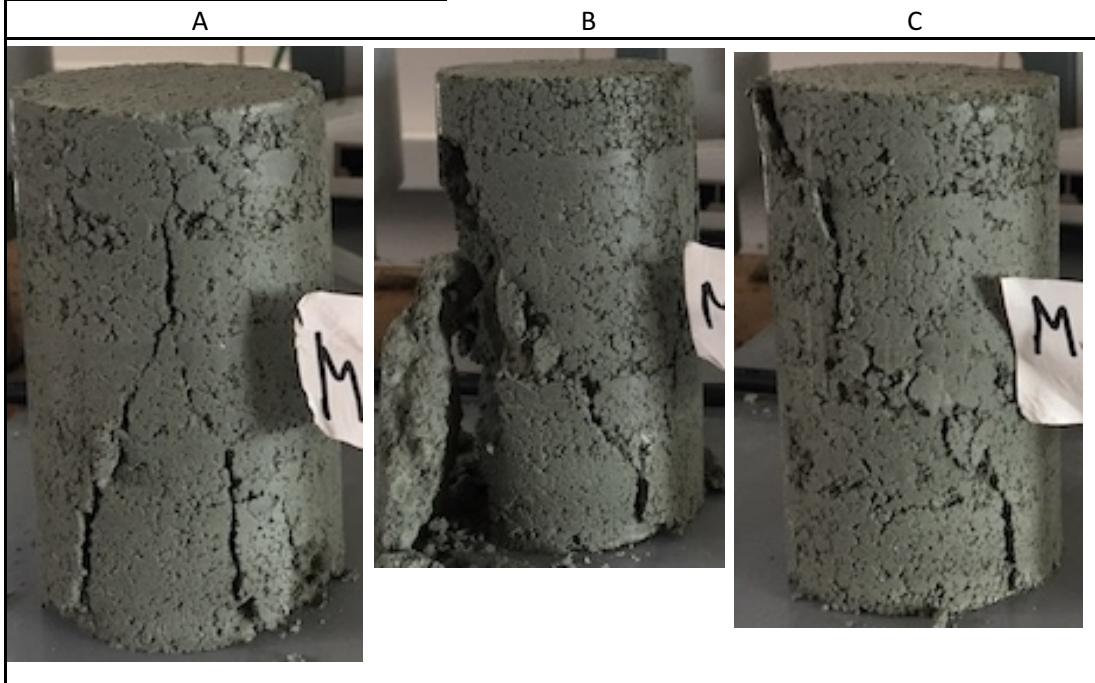
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M5-90-7-A	566,1	283,05	0,013	69,02	1,744
M5-90-7-B	509,93	254,965	0,017	32,48	1,752
M5-90-7-C	441	220,5	0,02	24,16	1,783
Gjennomsnitt		252,8383	269,0075		
Standardavvik		25,58017	14,0425		
Relativt standardavvik		10,12 %	5,22 %		

Avskalling

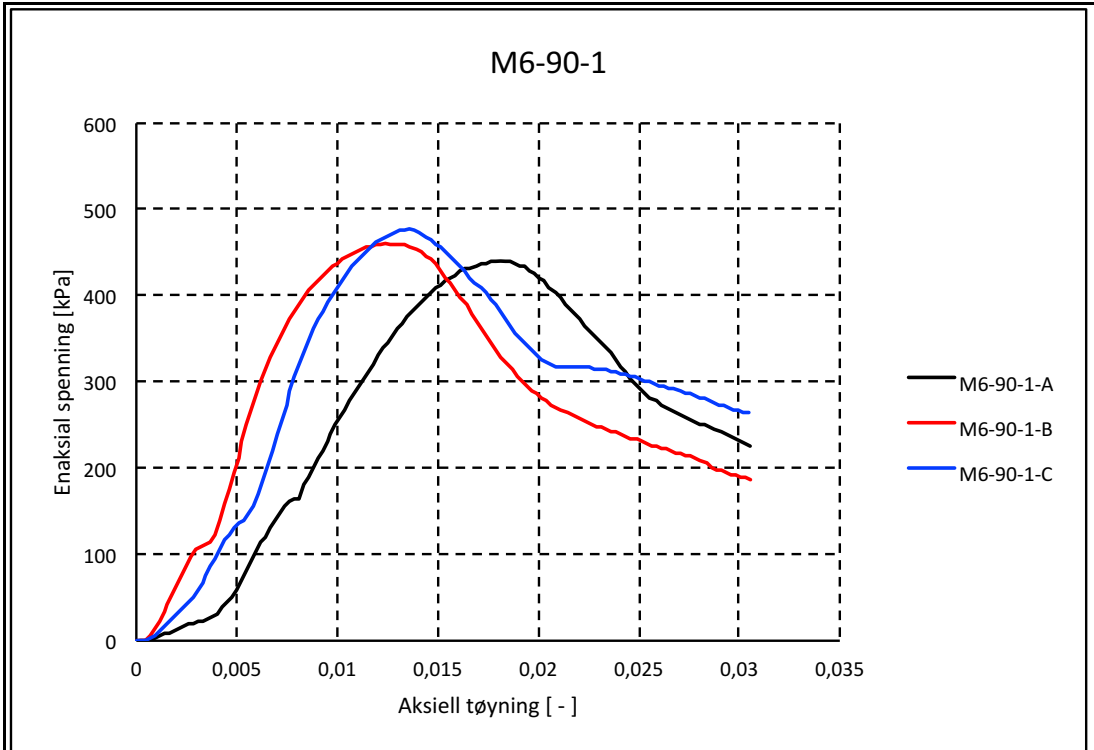




Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M5-90-28-A	737,21	368,605	0,011	92,12	1,749
M5-90-28-B	683,29	341,645	0,012	71,15	1,735
M5-90-28-C	710,05	355,025	0,016	71	1,745
Gjennomsnitt		355,0917			
Standardavvik		11,00647			
Relativt standardavvik		3,10 %			







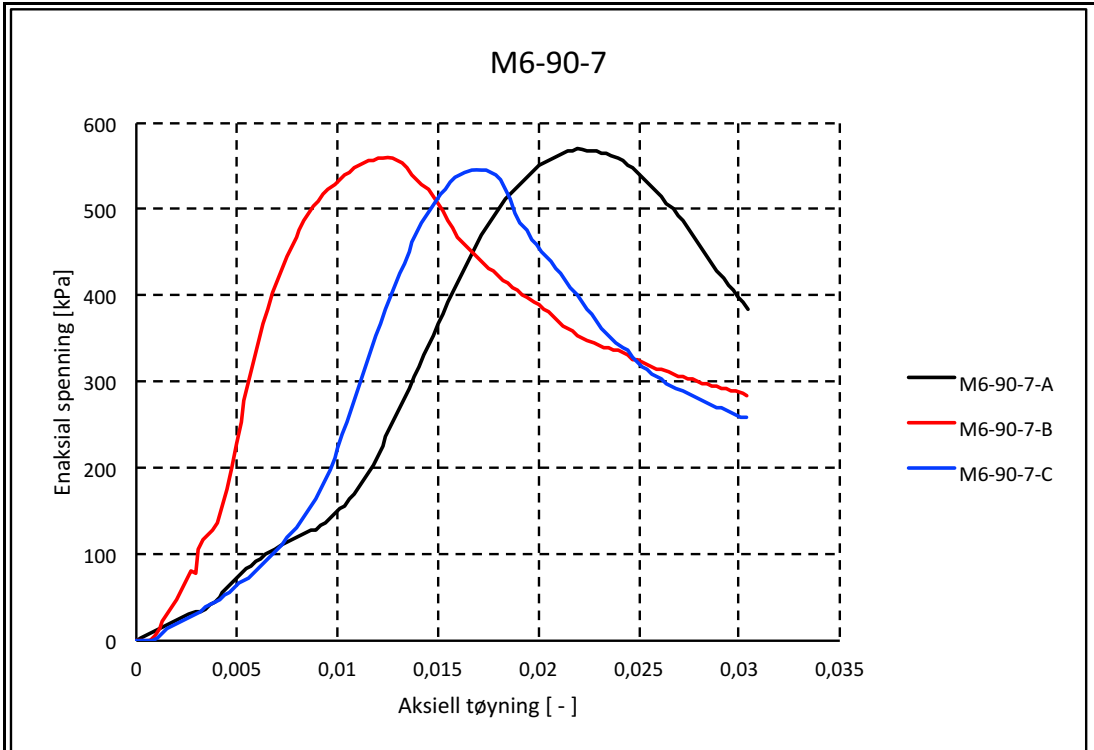
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M6-90-1-A	440,3	220,15	0,018	37,93	1,760
M6-90-1-B	460,7	230,35	0,012	51,11	1,760
M6-90-1-C	477,62	238,81	0,013	45,96	1,772
Gjennomsnitt		229,77			
Standardavvik		7,628945			
Relativt standardavvik		3,32 %			

A

B

C





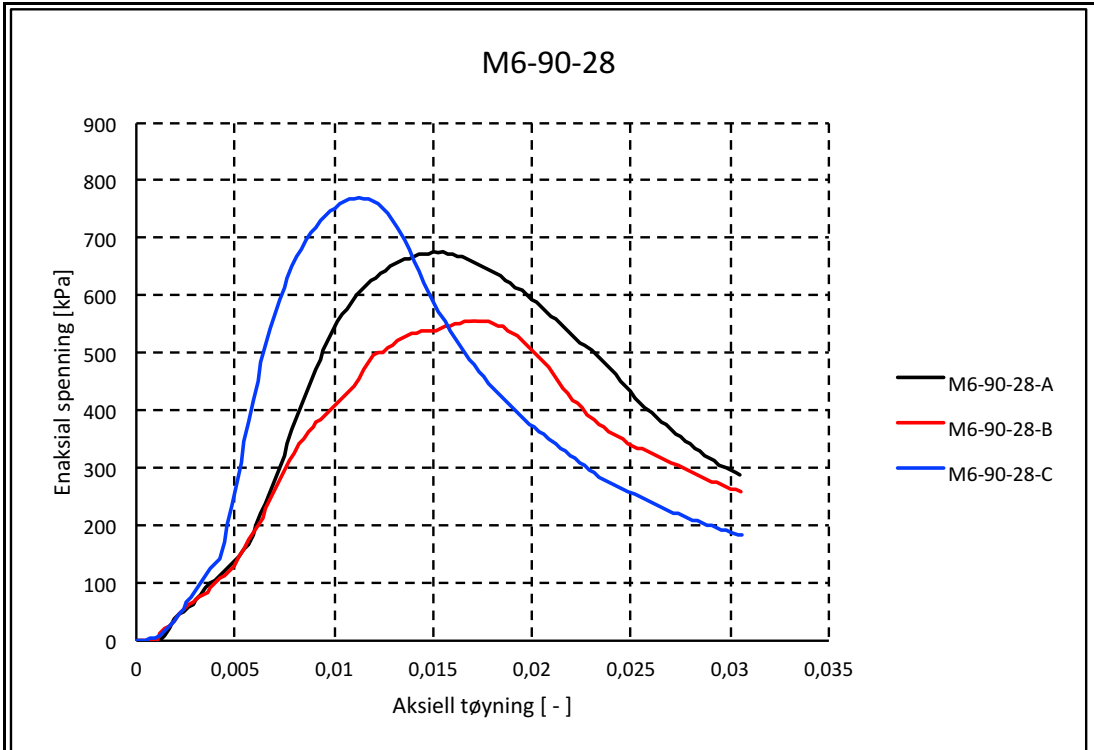
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M6-90-7-A	569,7	284,85	0,021	51,81	1,768
M6-90-7-B	560,36	280,18	0,012	63,68	1,738
M6-90-7-C	546,02	273,01	0,016	63,48	1,754
Gjennomsnitt		279,3467			
Standardavvik		4,869444			
Relativt standardavvik		1,74 %			

A

B

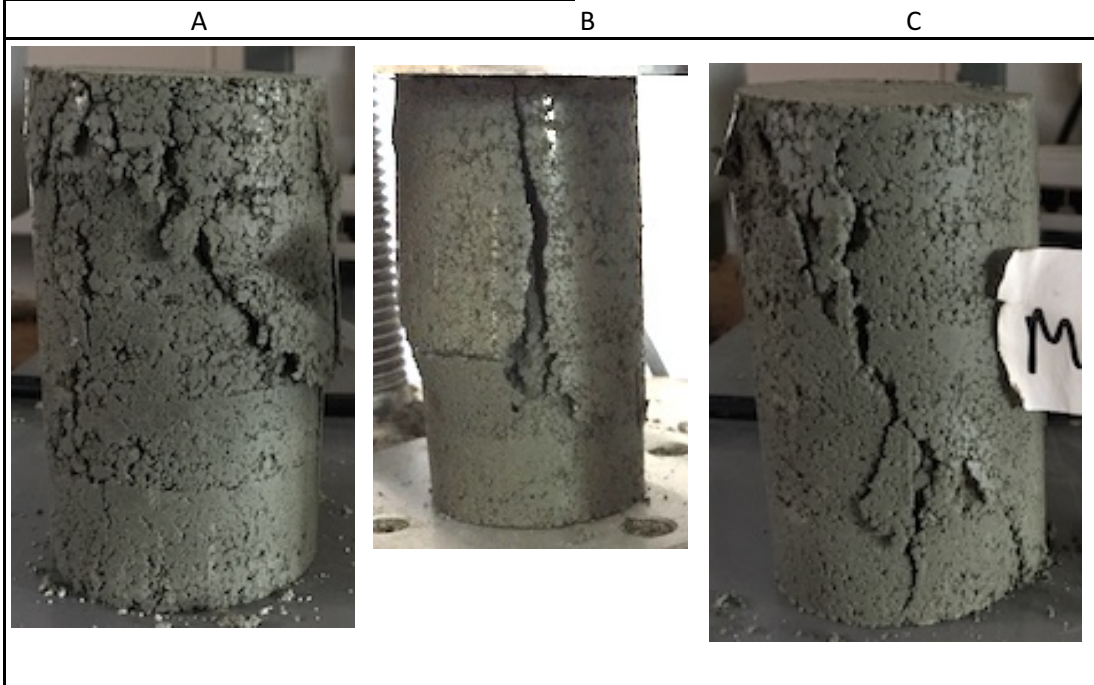
C

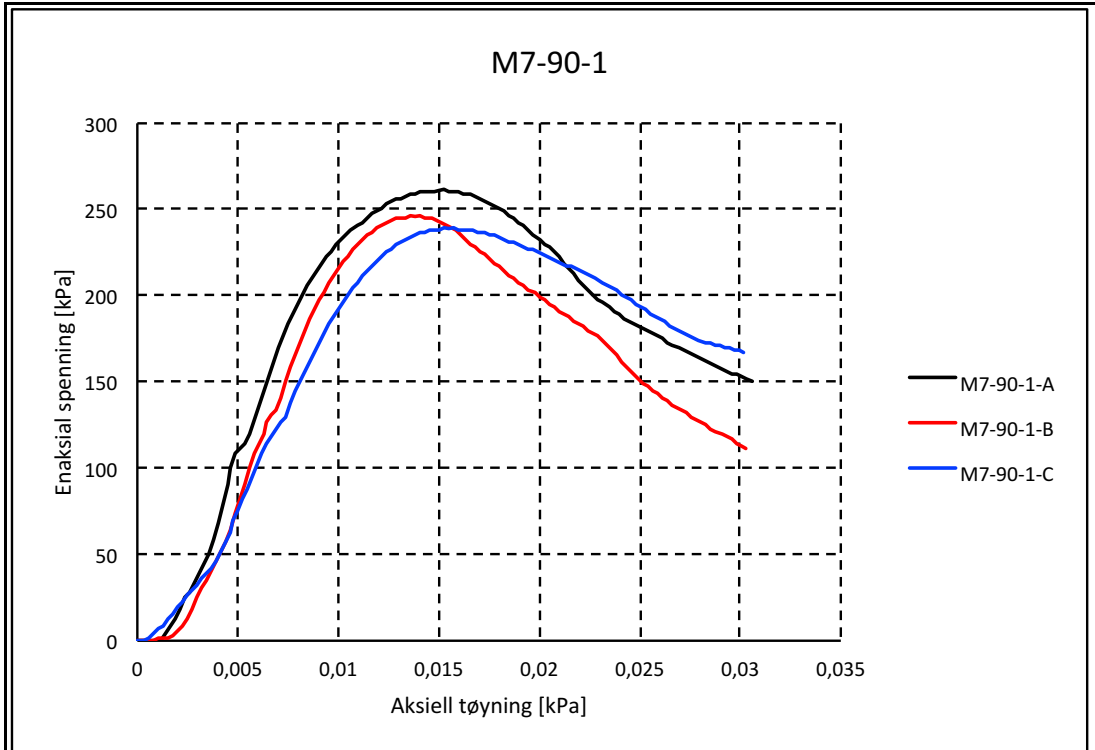




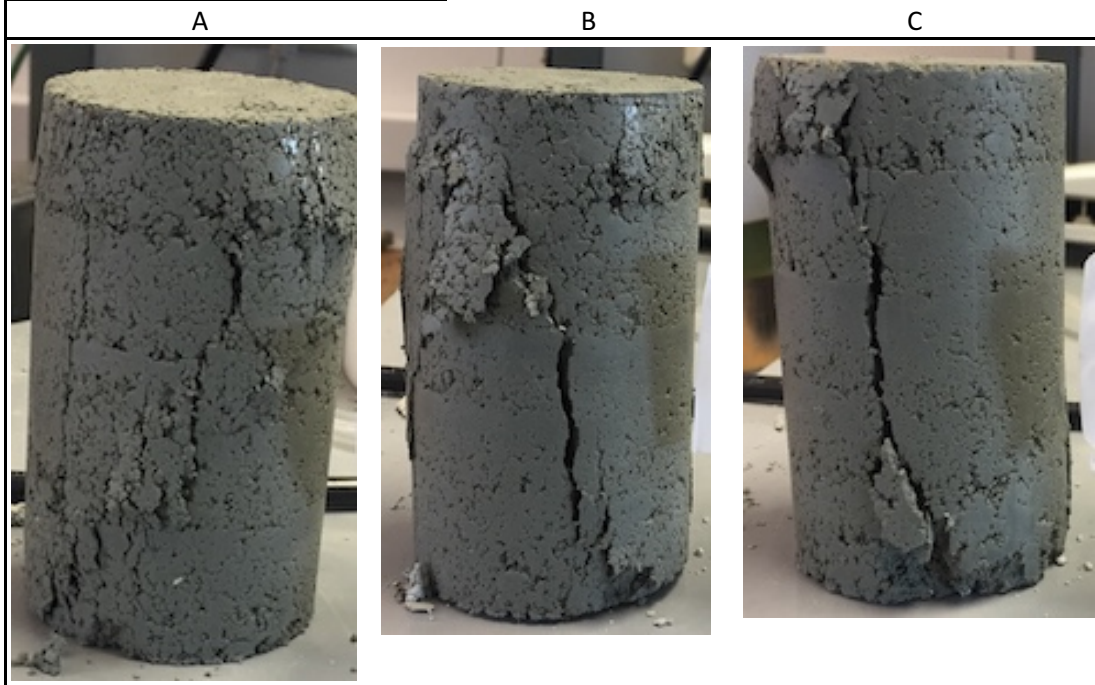
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M6-90-28-A	675,07	337,535	0,015	96,45	1,722
M6-90-28-B	556,09	278,045	0,016	67,8	1,757
M6-90-28-C	770,62	385,31	0,011	167,39	1,748
Gjennomsnitt		333,63	361,4225		
Standardavvik		43,87772	23,8875		
Relativt standardavvik		13,15 %	6,61 %		

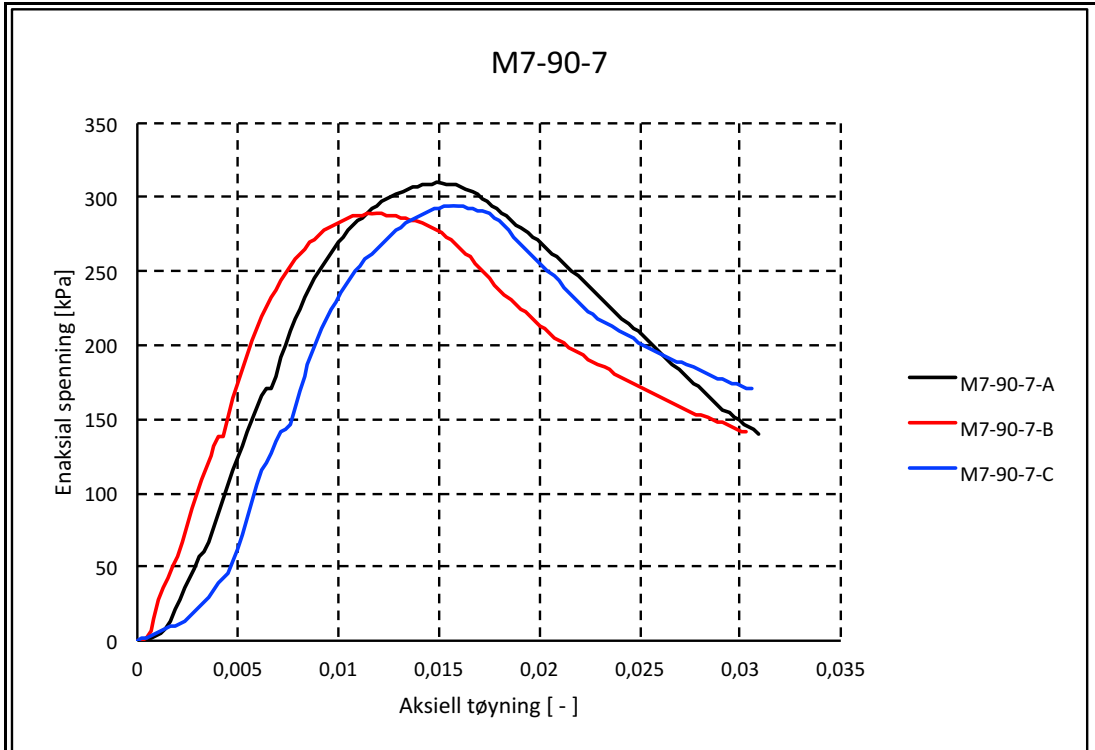
Tidlig sprekk i prøven



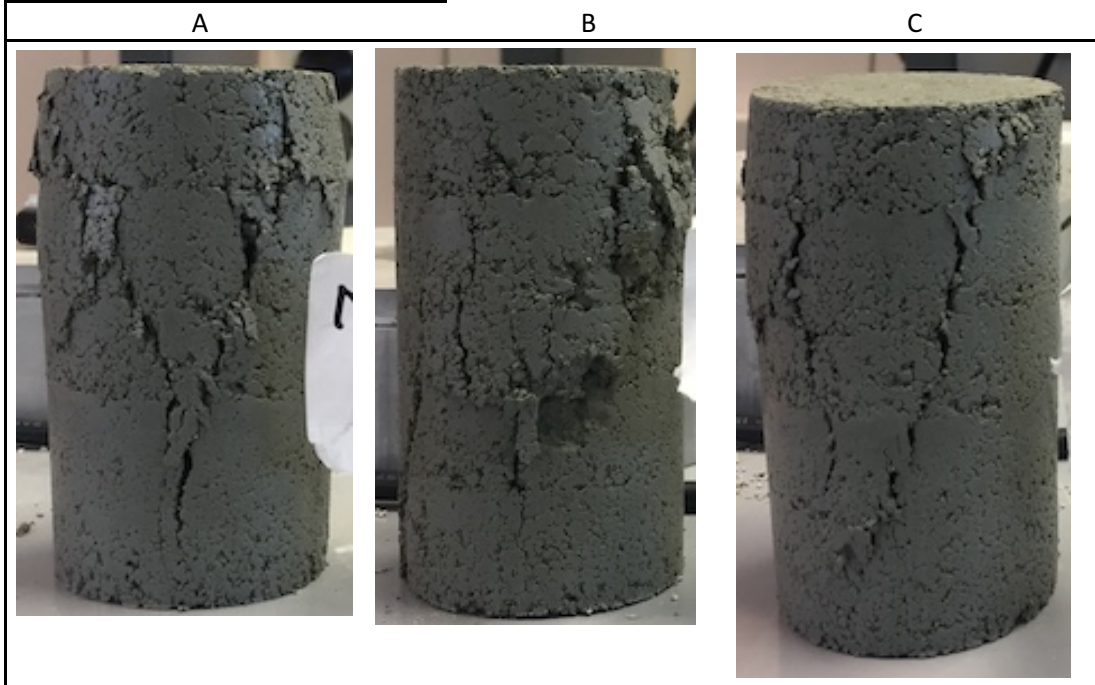


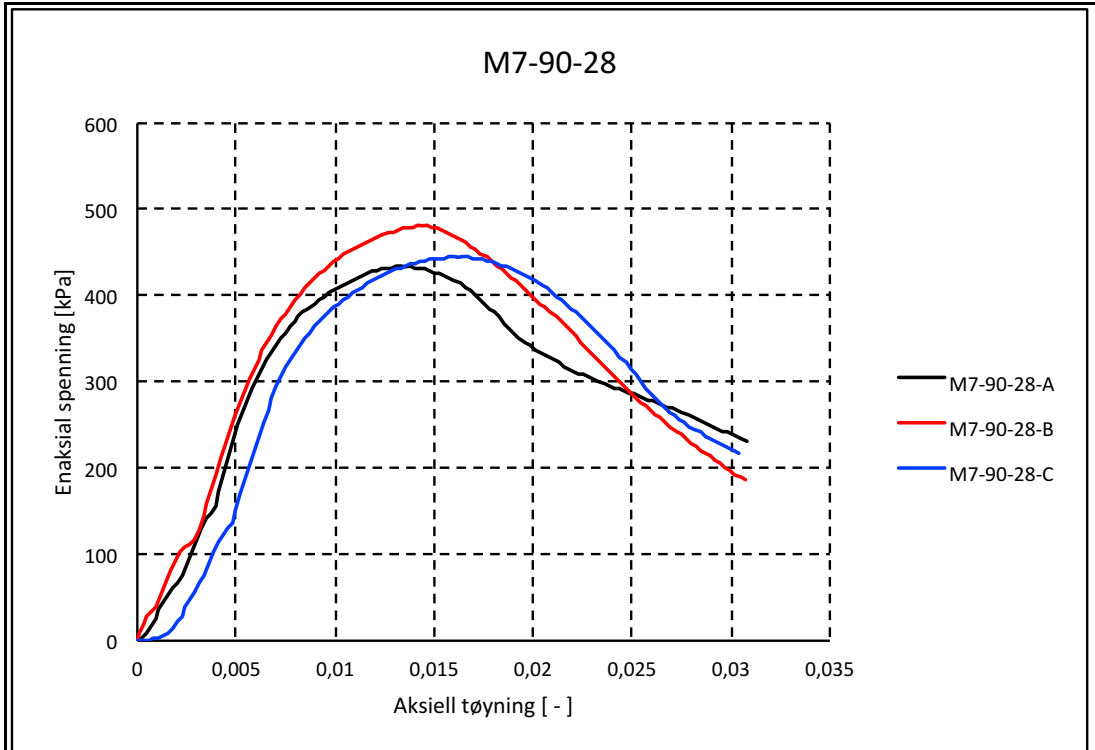
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M7-90-1-A	261,1	130,55	0,015	31,83	1,760
M7-90-1-B	246	123	0,014	28,6	1,741
M7-90-1-C	238,99	119,495	0,015	26,44	1,763
Gjennomsnitt		124,3483			
Standardavvik		4,612791			
Relativt standardavvik		3,71 %			



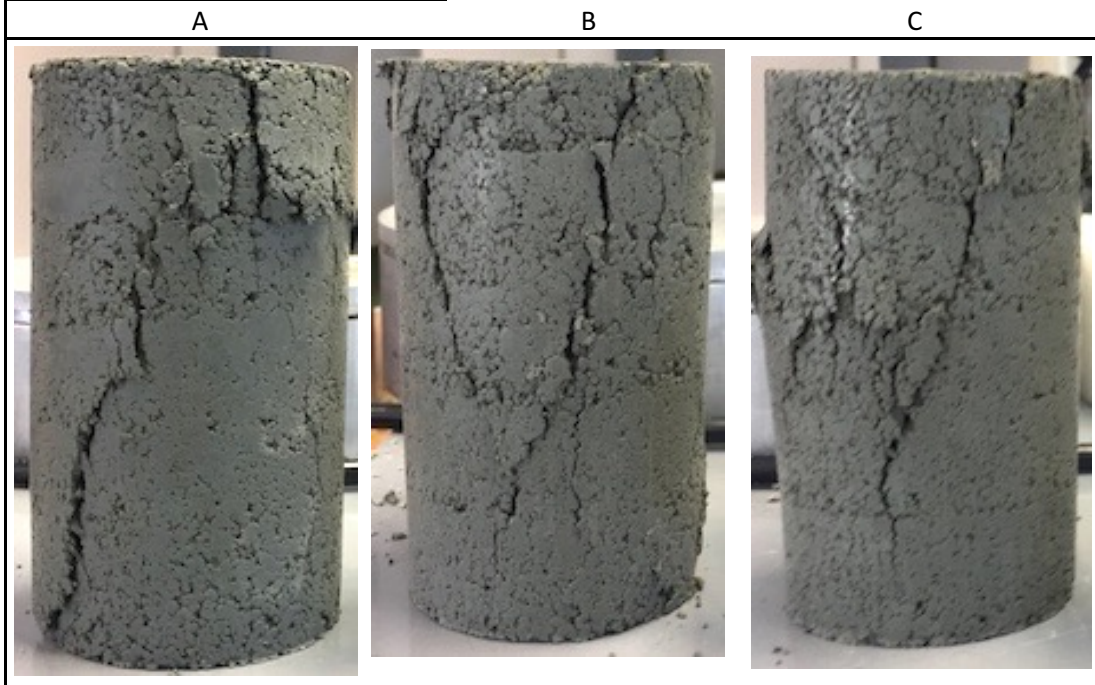


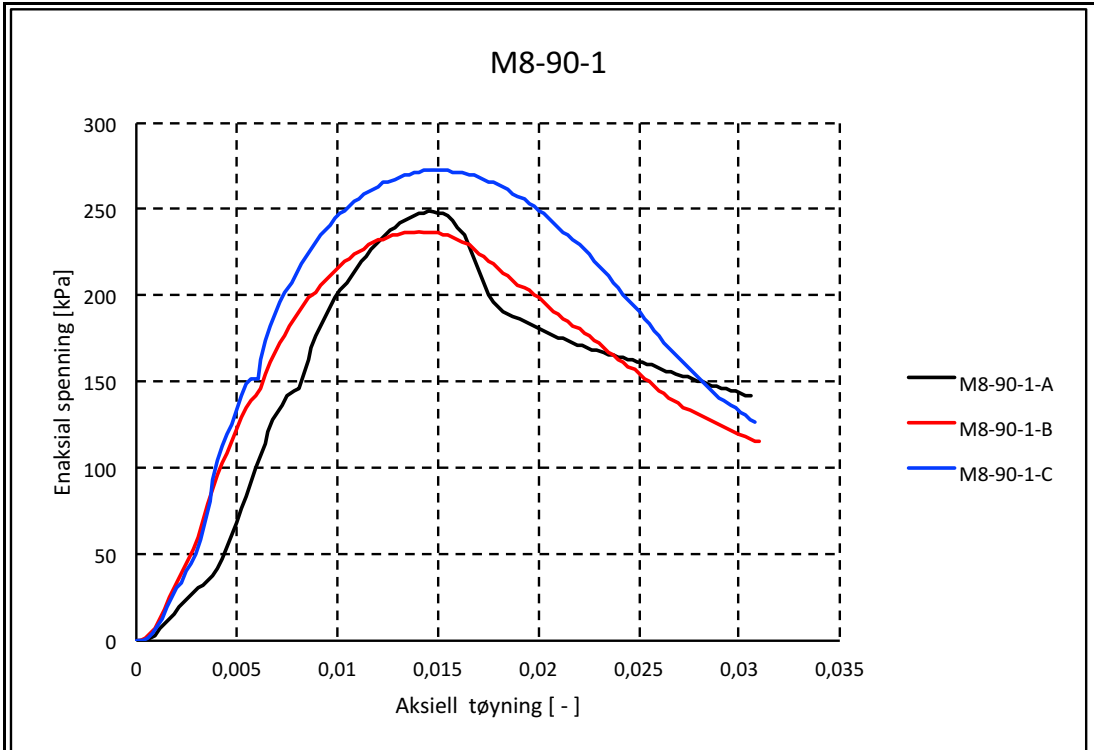
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M7-90-7-A	309,55	154,775	0,014	32,63	1,758
M7-90-7-B	288,85	144,425	0,011	40	1,732
M7-90-7-C	294,18	147,09	0,016	38,68	1,736
Gjennomsnitt		148,7633			
Standardavvik		4,387912			
Relativt standardavvik		2,95 %			



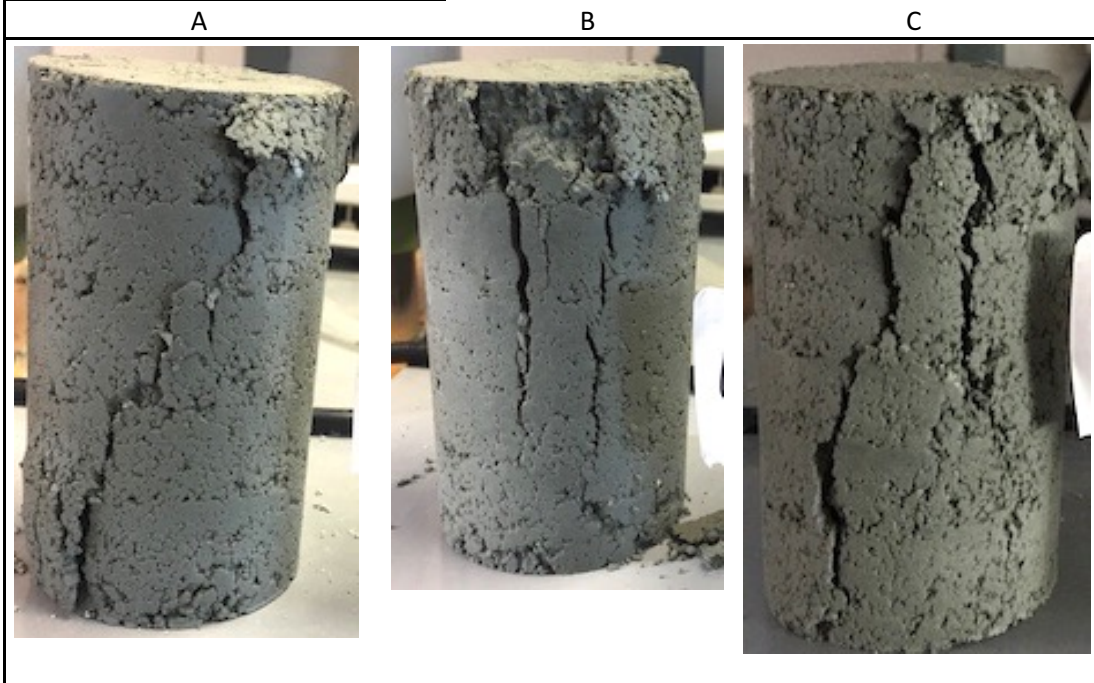


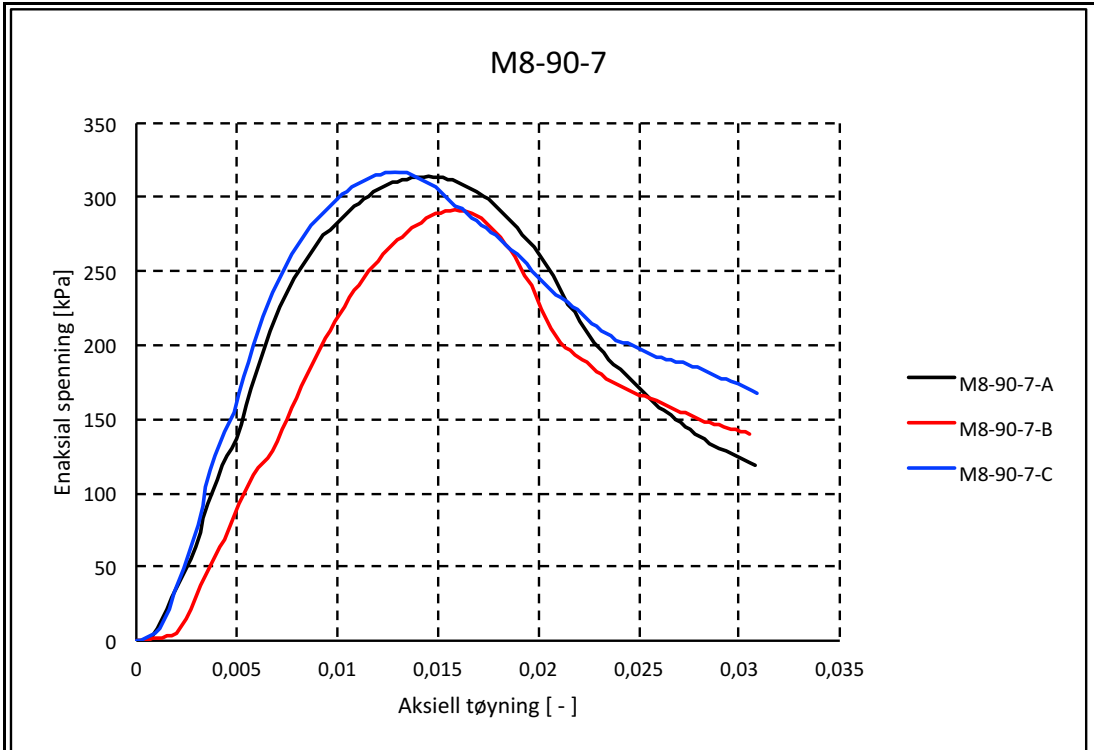
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
M7-90-28-A	433,74	216,87	0,013	47,4	1,729
M7-90-28-B	481,19	240,595	0,014	53,44	1,755
M7-90-28-C	444,69	222,345	0,016	54,15	1,722
Gjennomsnitt		226,6033			
Standardavvik		10,14294			
Relativt standardavvik		4,48 %			



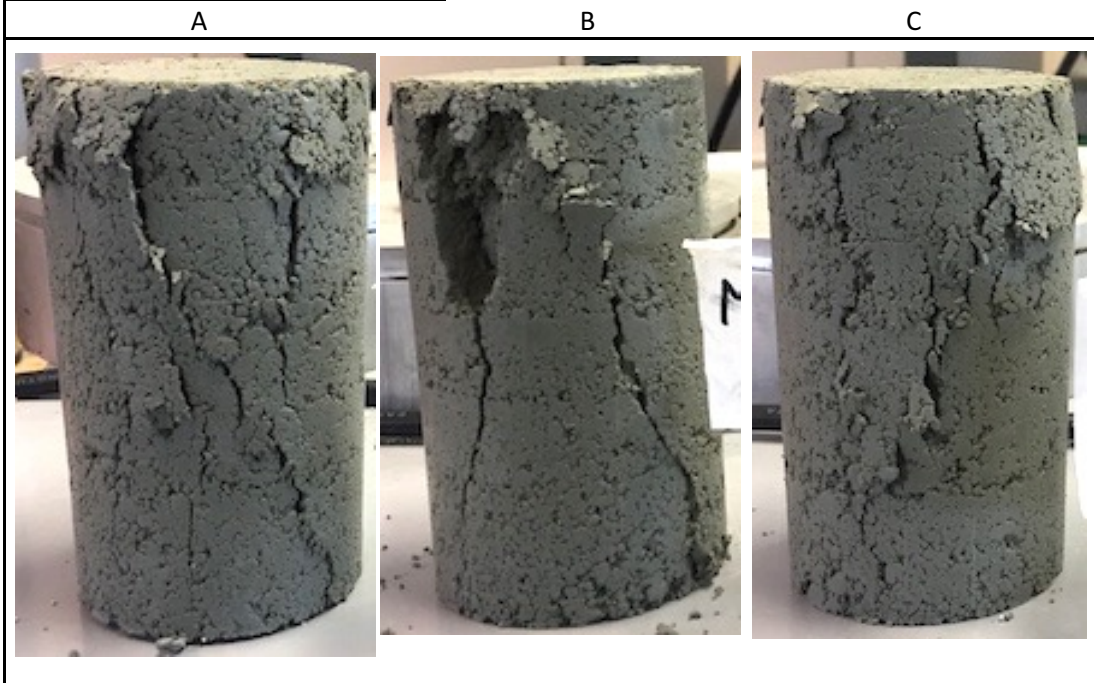


Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
M8-90-1-A	248,71	124,355	0,014	31,79	1,748
M8-90-1-B	237,06	118,53	0,014	30,38	1,750
M8-90-1-C	272,92	136,46	0,014	33,29	1,753
Gjennomsnitt		126,4483			
Standardavvik		7,468055			
Relativt standardavvik		5,91 %			

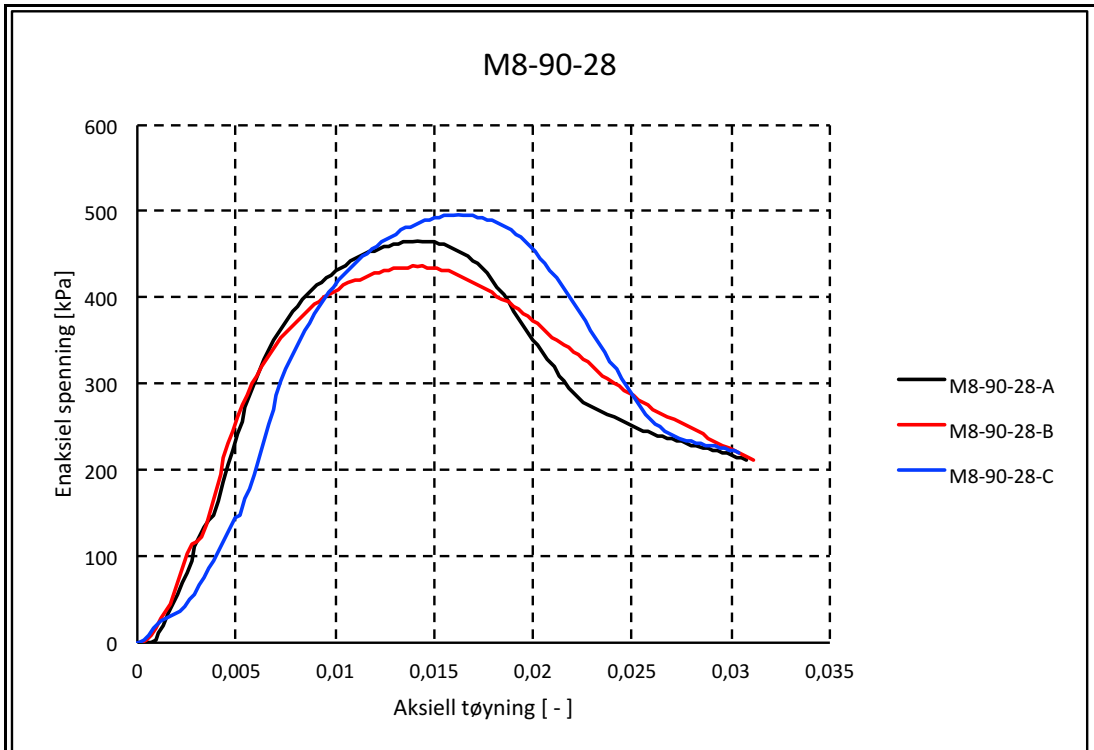




Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
M8-90-7-A	314,22	157,11	0,014	34,89	1,762
M8-90-7-B	291,59	145,795	0,015	28,08	1,755
M8-90-7-C	316,9	158,45	0,013	39,62	1,764
Gjennomsnitt		153,785			
Standardavvik		5,676206			
Relativt standardavvik		3,69 %			







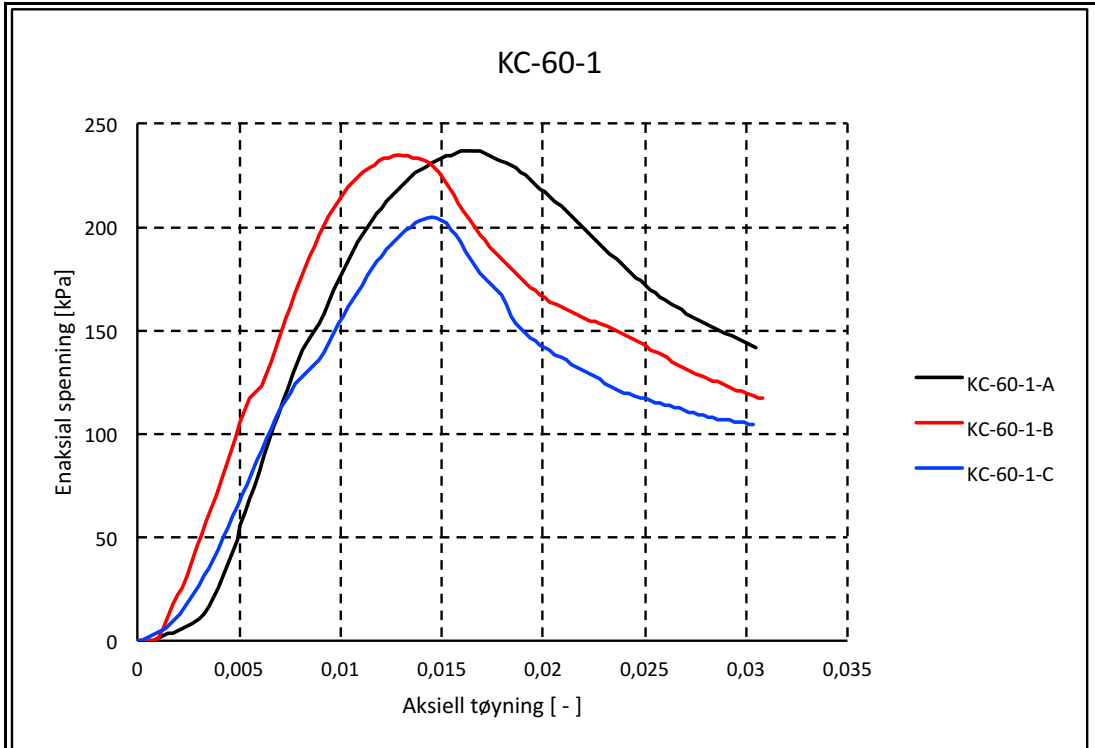
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
M8-90-28-A	465,71	232,855	0,014	59,74	1,739
M8-90-28-B	436,21	218,105	0,014	55,9	1,732
M8-90-28-C	496,23	248,115	0,016	52,76	1,733
Gjennomsnitt		233,025			
Standardavvik		12,25212			
Relativt standardavvik		5,26 %			

A

B

C





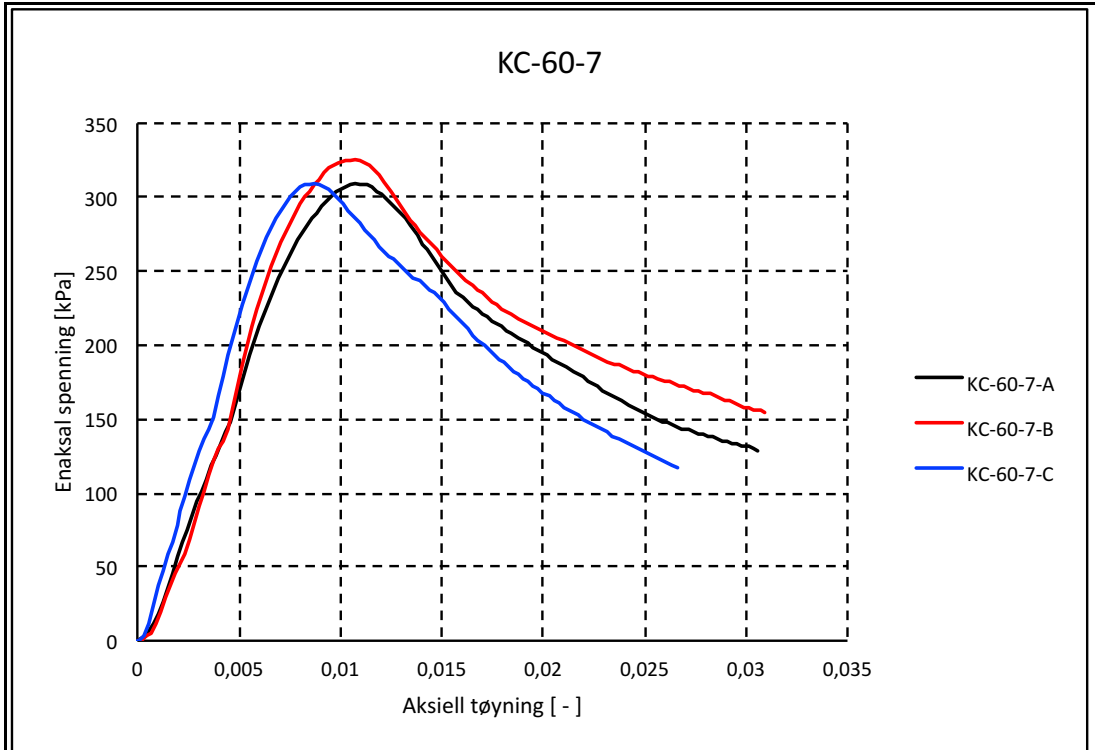
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
KC-60-1-A	236,6	118,3	0,016	25,1	1,732
KC-60-1-B	234,7	117,35	0,013	26,22	1,750
KC-60-1-C	204,67	102,335	0,014	21,25	1,727
Gjennomsnitt		112,6617			
Standardavvik		7,312348			
Relativt standardavvik		6,49 %			

A

B

C





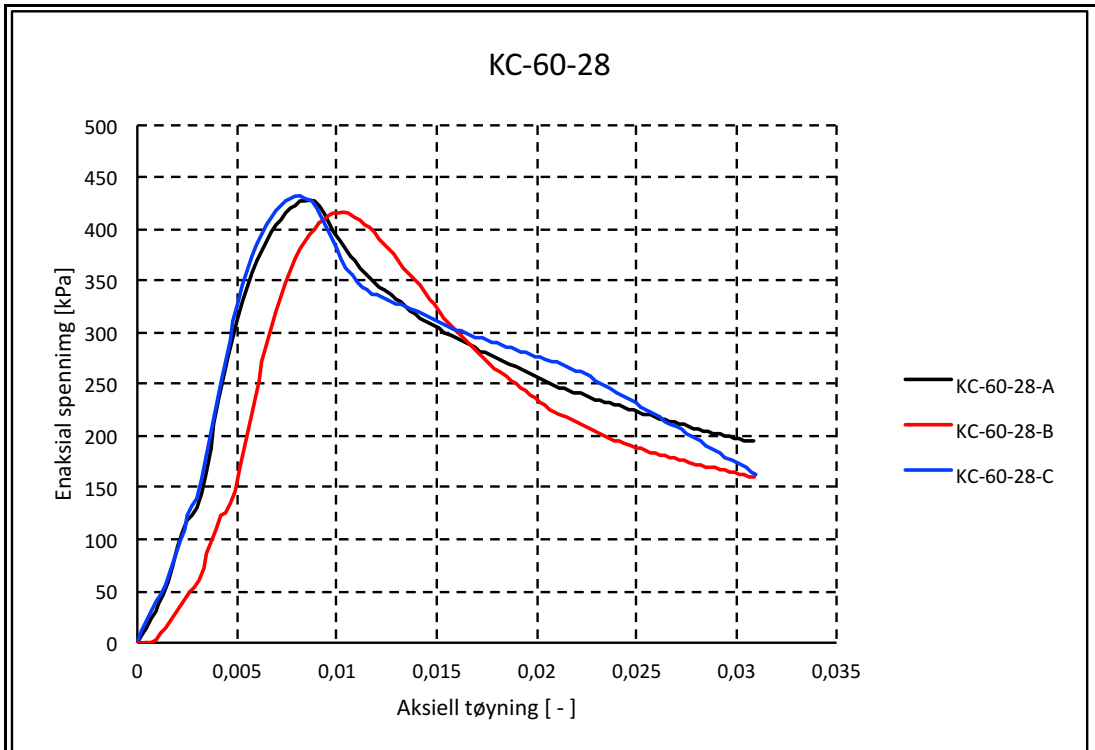
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
KC-60-7-A	309,27	154,635	0,011	36,79	1,712
KC-60-7-B	325,46	162,73	0,01	40,63	1,736
KC-60-7-C	309,24	154,62	0,0085	44,14	1,719
Gjennomsnitt		157,3283			
Standardavvik		3,81956			
Relativt standardavvik		2,43 %			

A

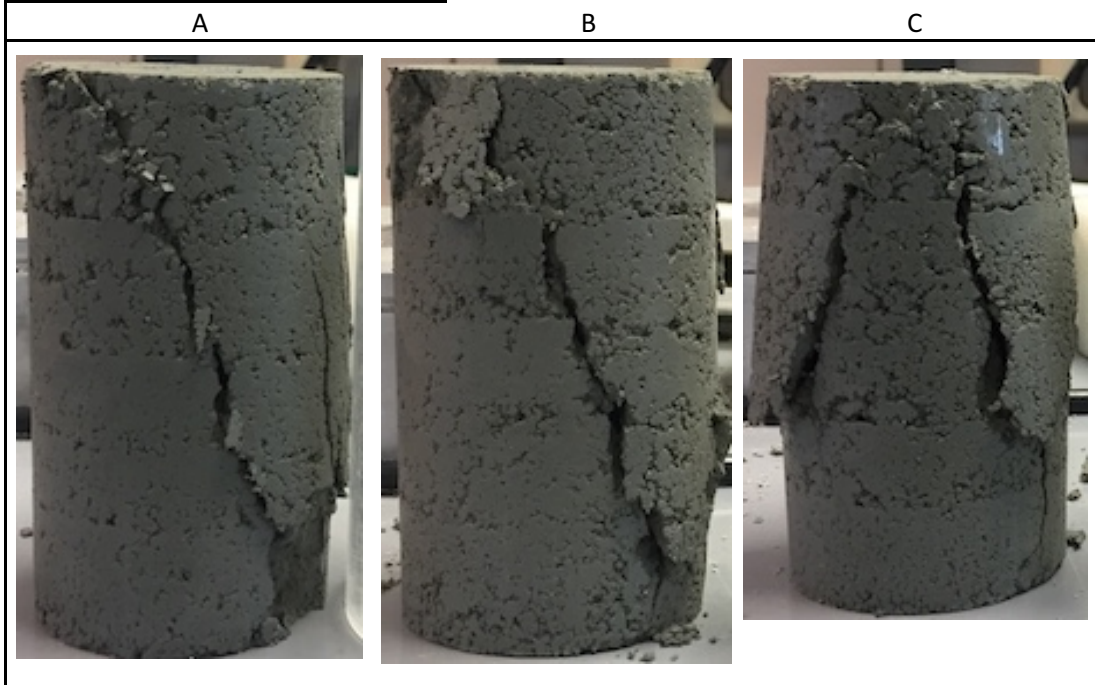
B

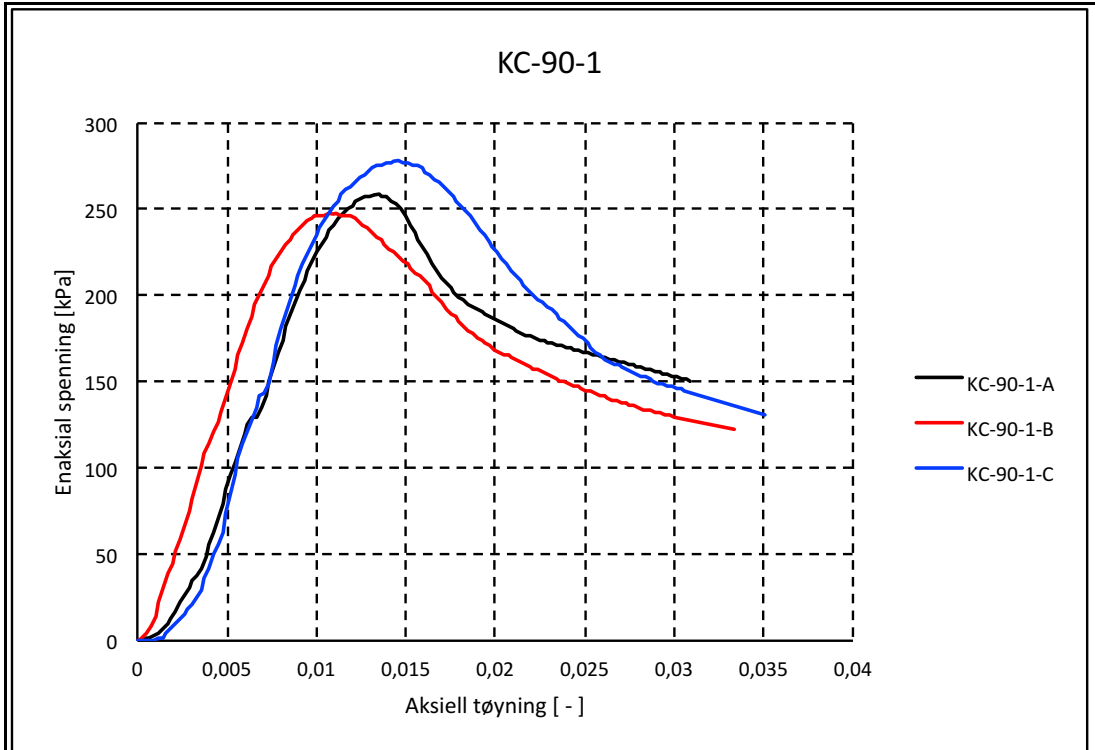
C



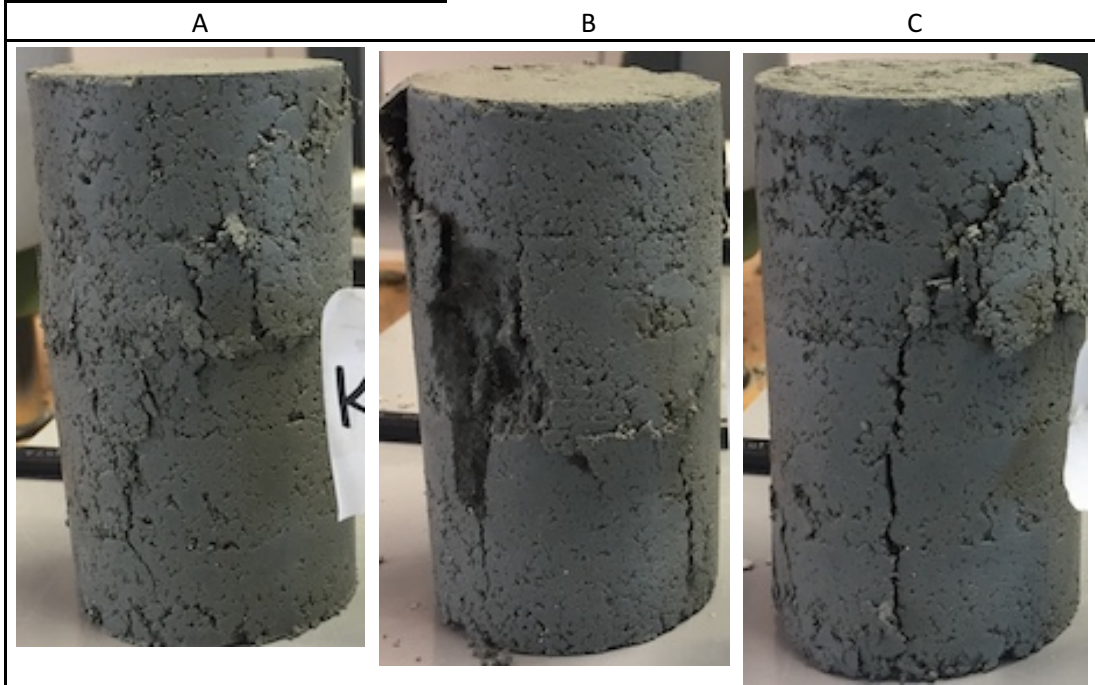


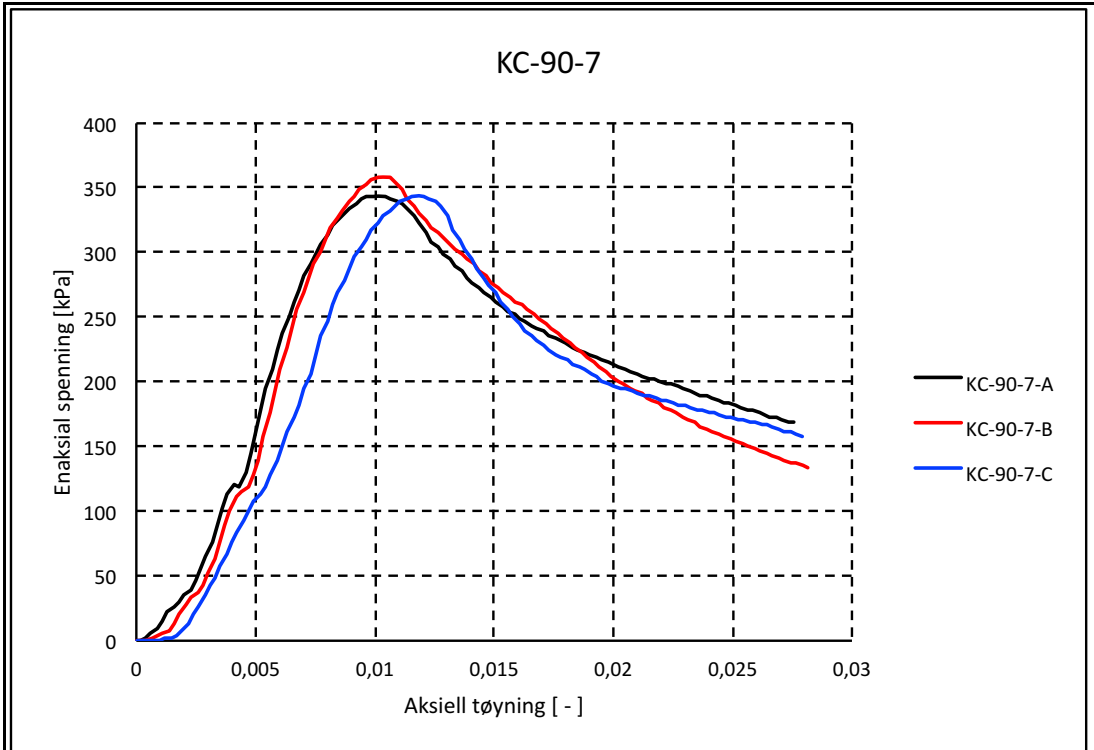
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
KC-60-28-A	427,59	213,795	0,008	54,87	1,711
KC-60-28-B	416,04	208,02	0,01	59,43	1,729
KC-60-28-C	431,87	215,935	0,008	60	1,729
Gjennomsnitt		212,5833			
Standardavvik		3,342944			
Relativt standardavvik		1,57 %			



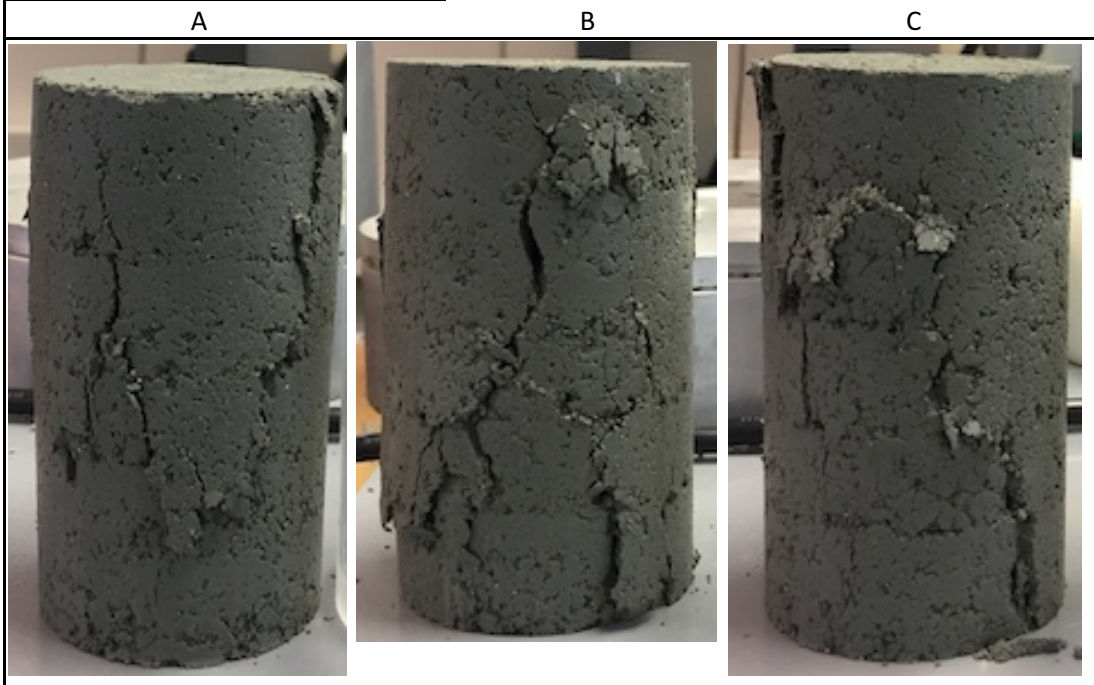


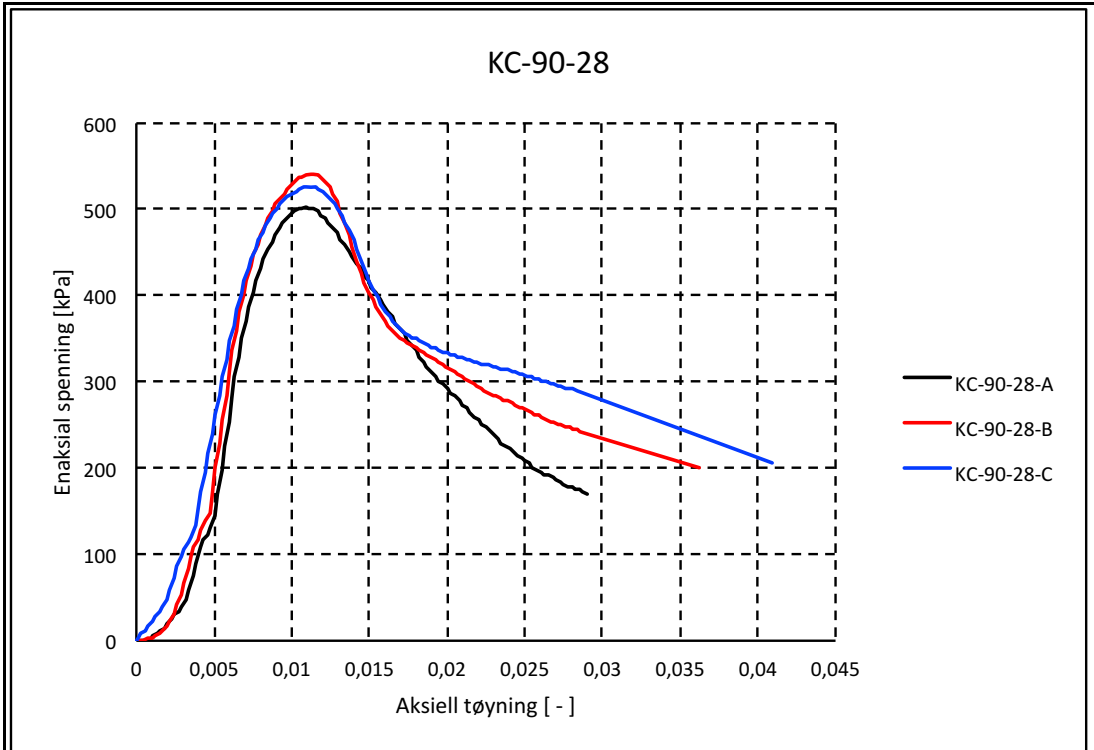
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
KC-90-1-A	258,5	129,25	0,013	30,71	1,732
KC-90-1-B	247,4	123,7	0,01	33,38	1,713
KC-90-1-C	278	139	0,014	37,57	1,730
Gjennomsnitt		130,65			
Standardavvik		6,32416			
Relativt standardavvik		4,84 %			



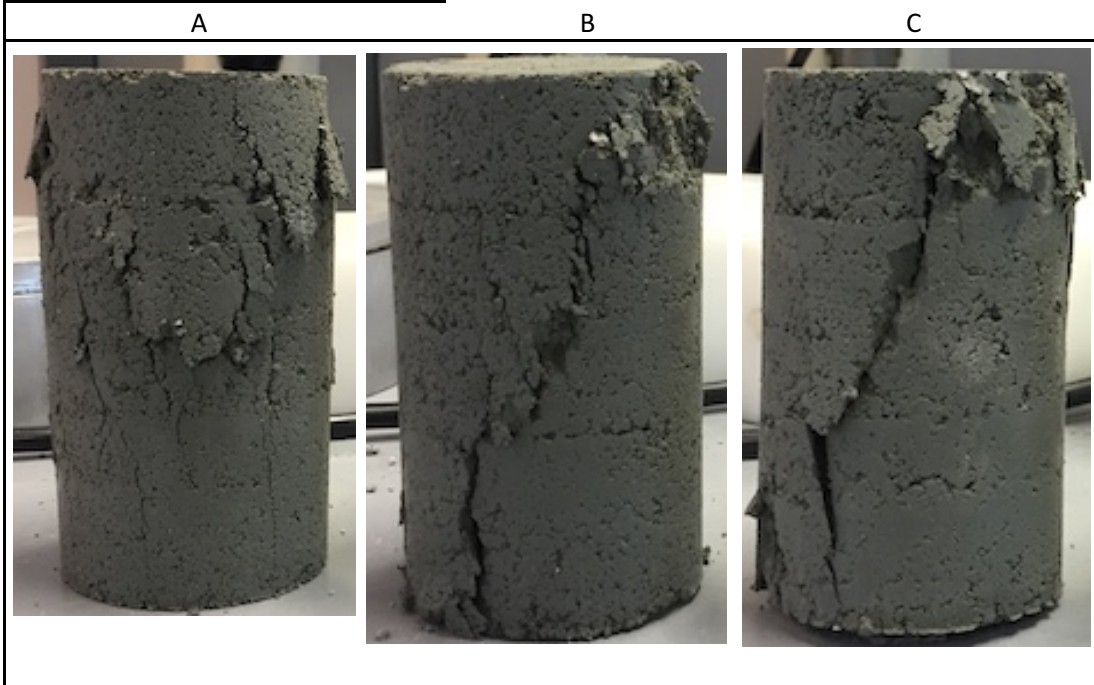


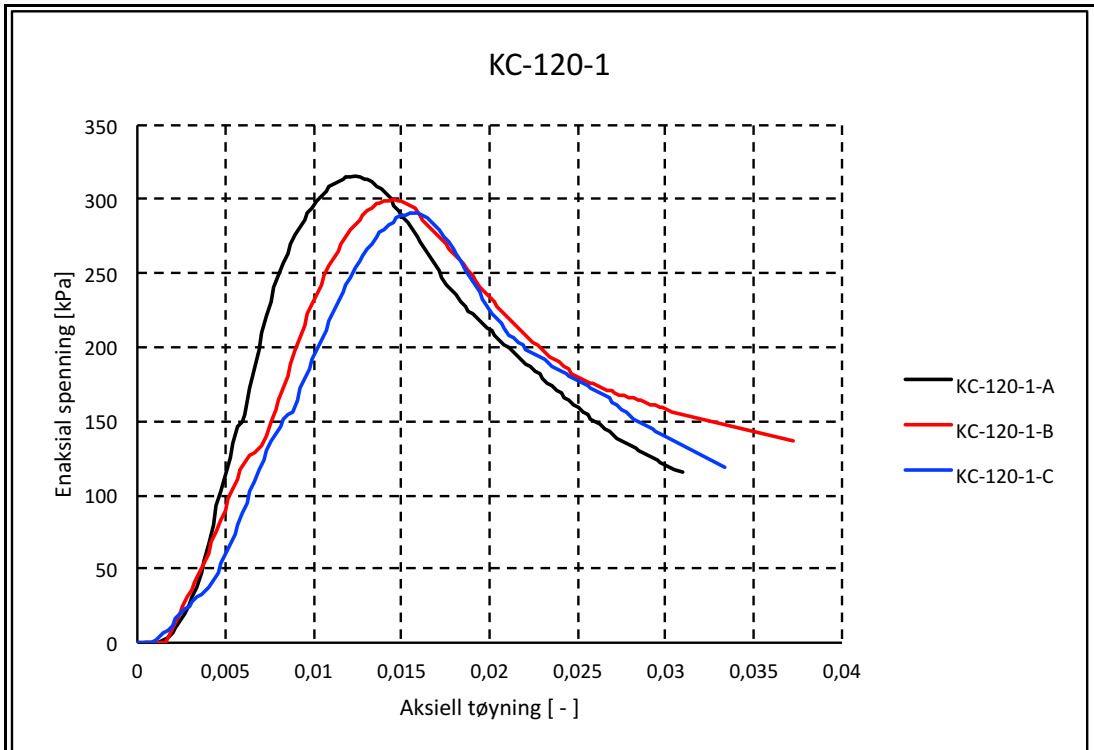
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
KC-90-7-A	343,73	171,865	0,01	46,49	1,700
KC-90-7-B	358,44	179,22	0,01	49,72	1,707
KC-90-7-C	344,01	172,005	0,012	37,29	1,711
Gjennomsnitt		174,3633			
Standardavvik		3,434658			
Relativt standardavvik		1,97 %			





Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
KC-90-28-A	502,88	251,44	0,01	73,97	1,707
KC-90-28-B	540,91	270,455	0,011	75,14	1,699
KC-90-28-C	525,92	262,96	0,011	67,43	1,678
Gjennomsnitt		261,6183			
Standardavvik		7,820597			
Relativt standardavvik		2,99 %			





Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
KC-120-1-A	315,64	157,82	0,012	41,58	1,704
KC-120-1-B	299,93	149,965	0,014	26,79	1,701
KC-120-1-C	290,58	145,29	0,015	27,88	1,691
Gjennomsnitt		151,025			
Standardavvik		5,169973			
Relativt standardavvik		3,42 %			

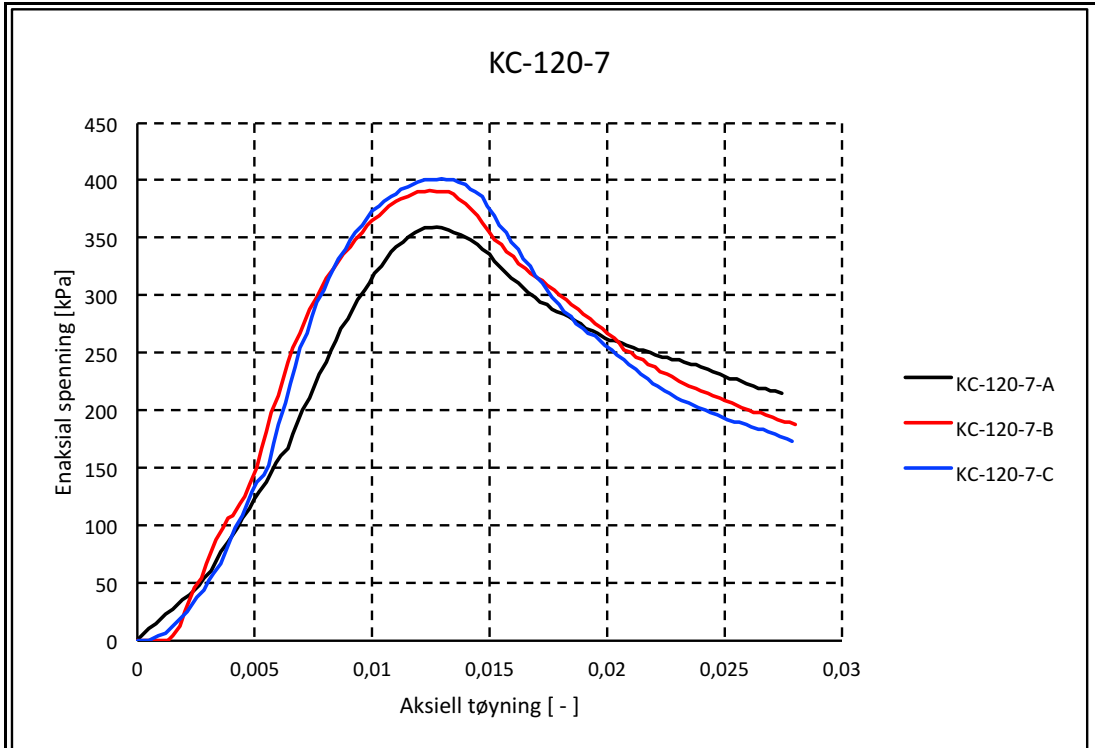
A

B

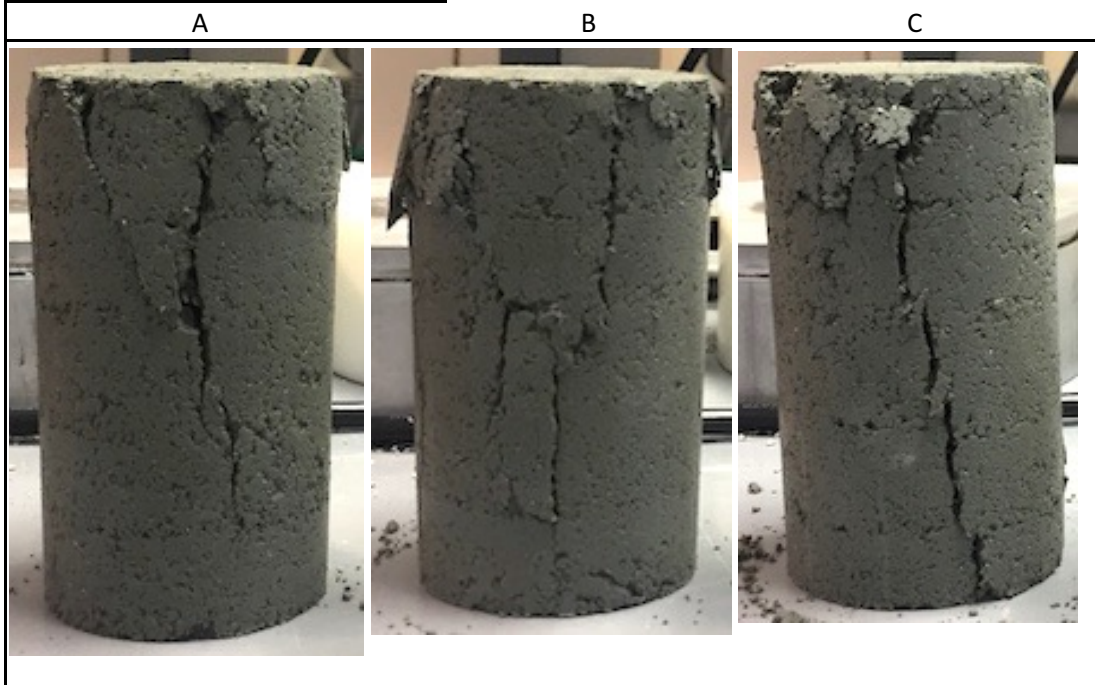
C

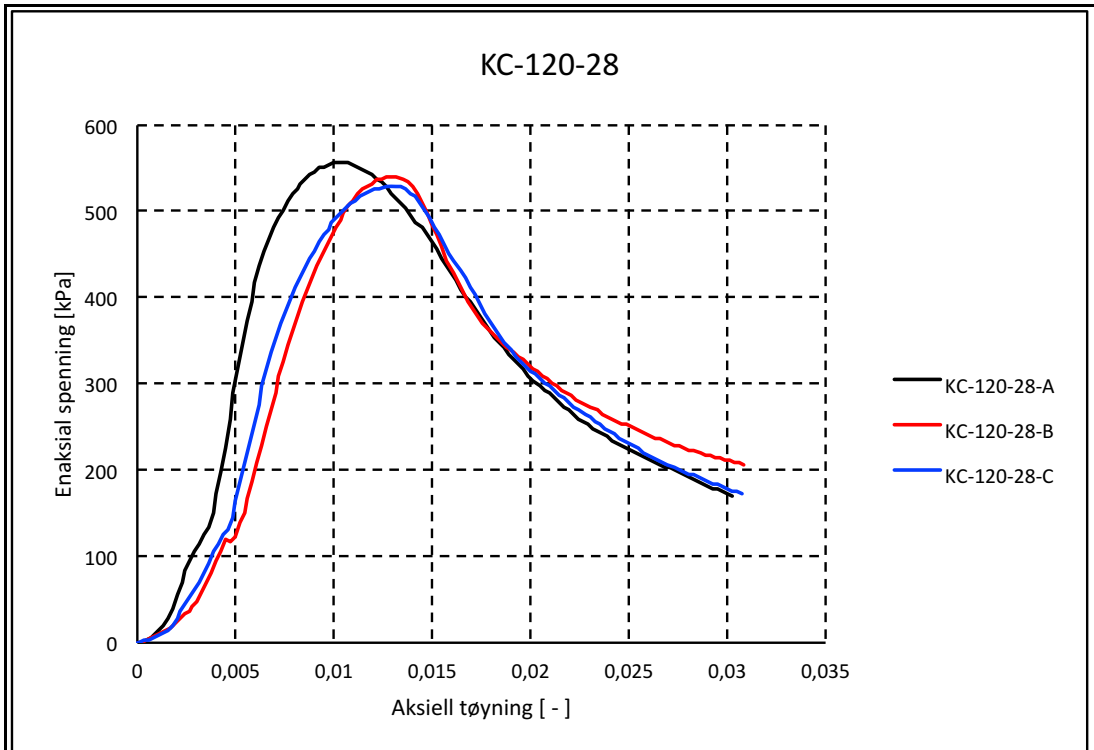
Bilder mangler





Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
KC-120-7-A	359,75	179,875	0,012	36	1,682
KC-120-7-B	391,56	195,78	0,012	47,8	1,696
KC-120-7-C	401,8	200,9	0,012	39,41	1,694
Gjennomsnitt		192,185			
Standardavvik		8,951934			
Relativt standardavvik		4,66 %			





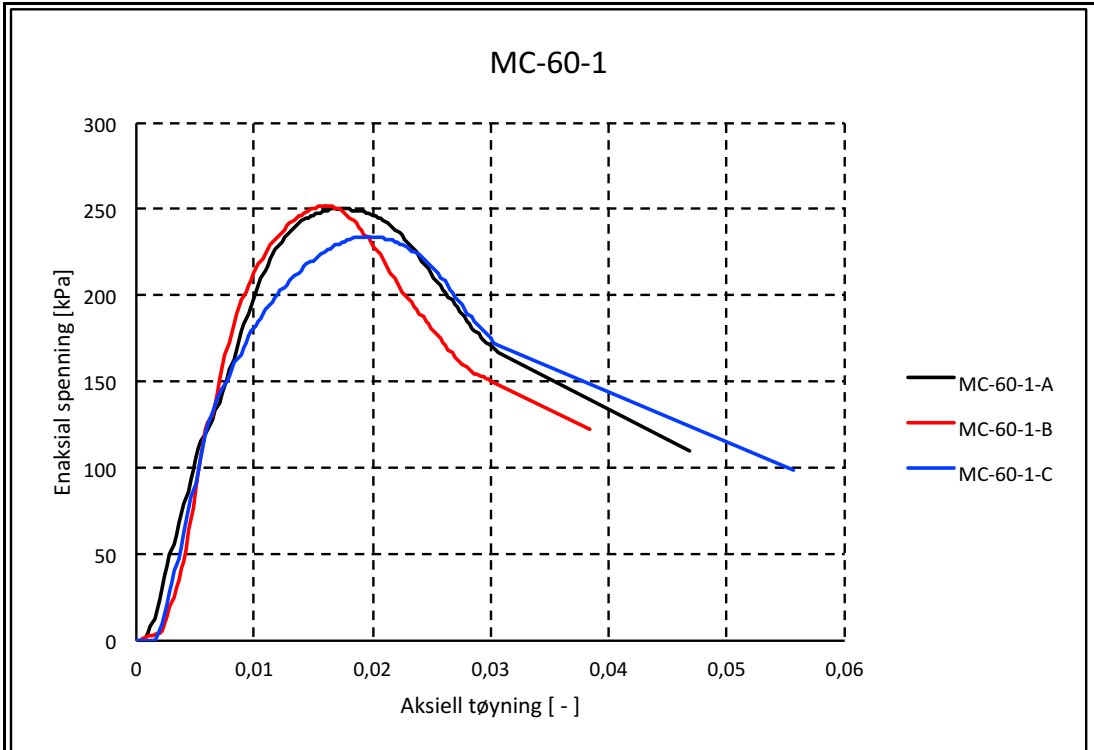
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
KC-120-28-A	556,93	278,465	0,01	81,91	1,667
KC-120-28-B	540,18	270,09	0,013	65,85	1,690
KC-120-28-C	529,26	264,63	0,013	60,11	1,704
Gjennomsnitt		271,0617			
Standardavvik		5,689752			
Relativt standardavvik		2,10 %			

A

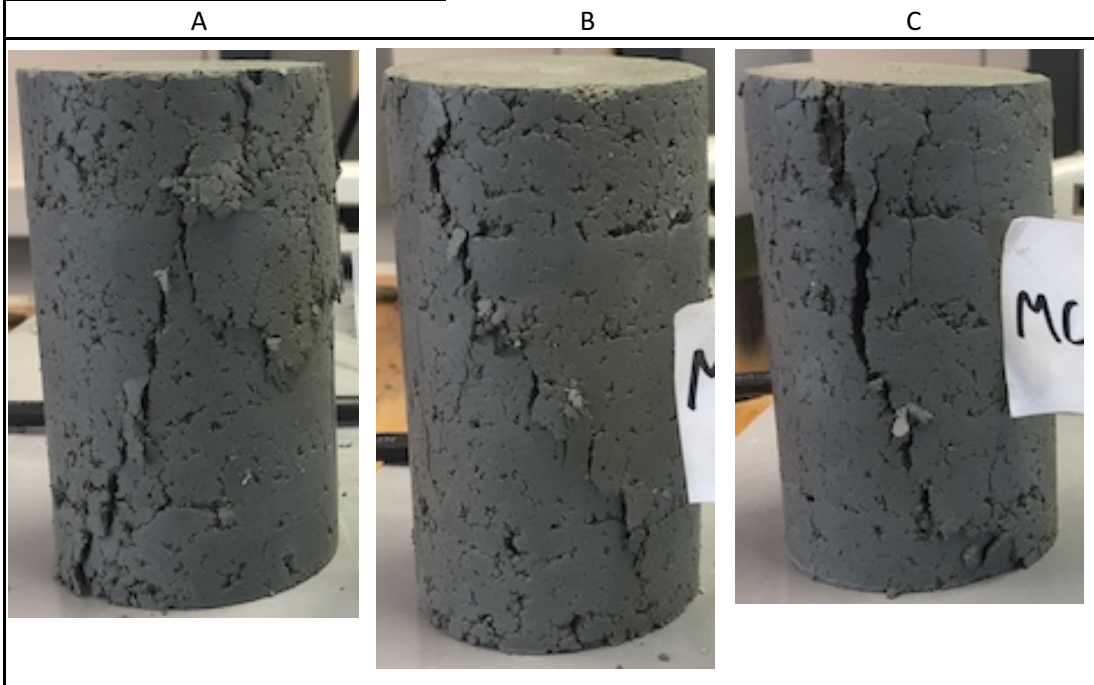
B

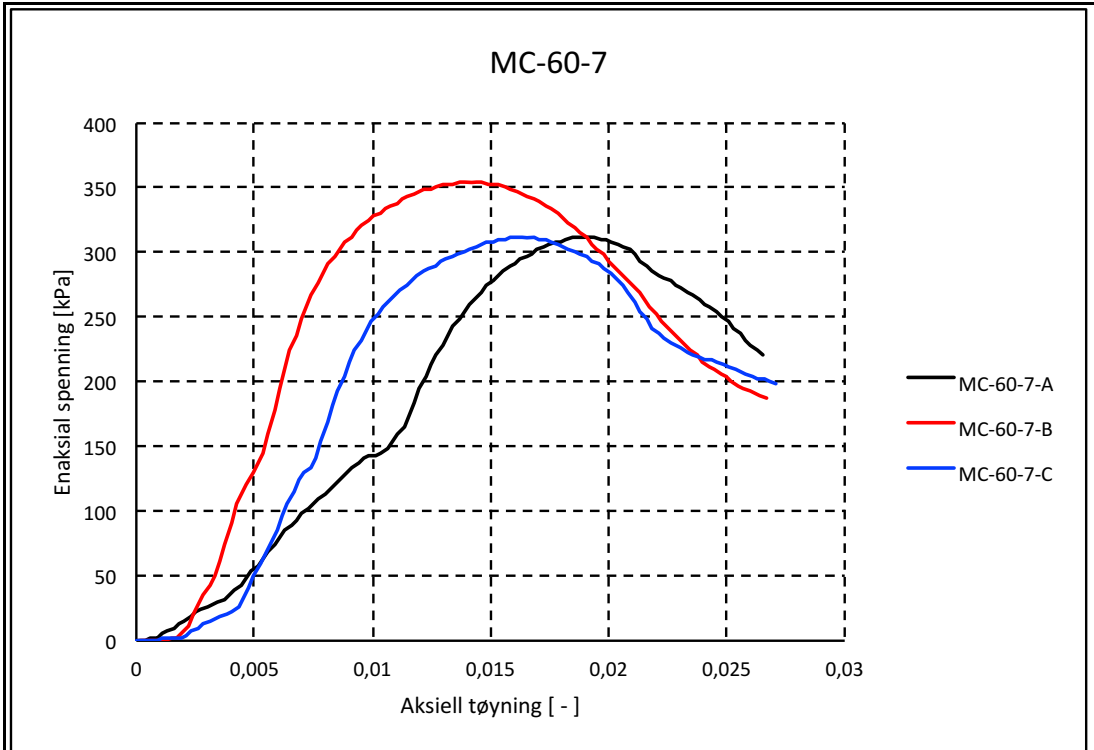
C



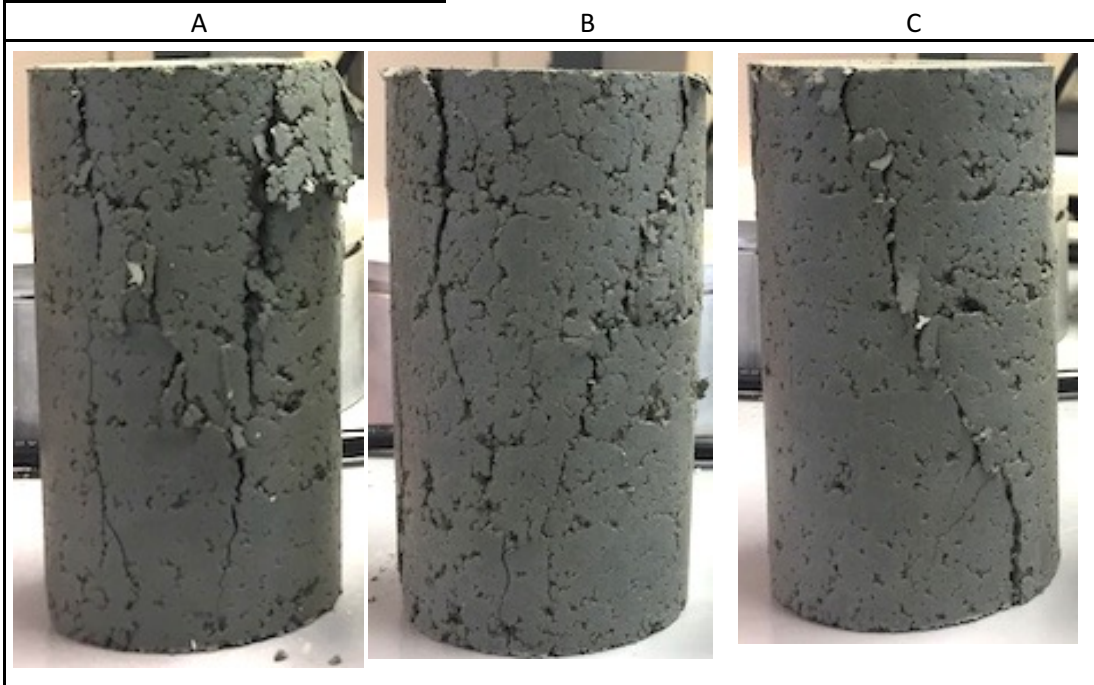


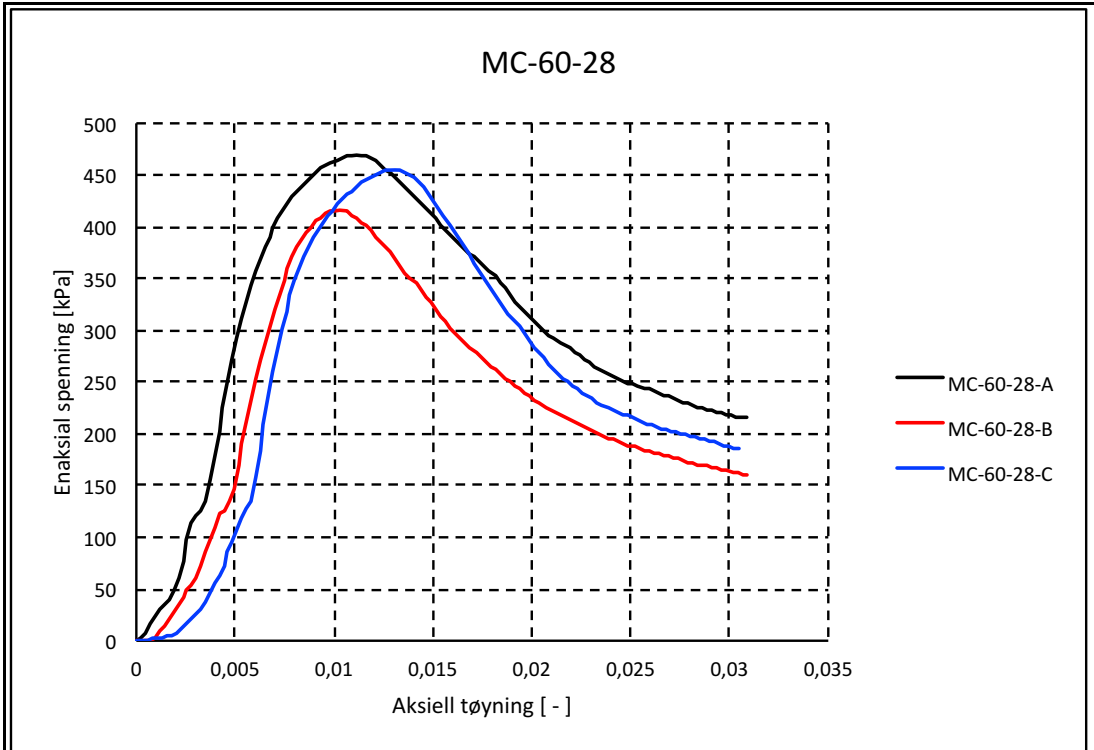
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
MC-60-1-A	250,16	125,08	0,016	23,58	1,771
MC-60-1-B	252,19	126,095	0,016	30,73	1,743
MC-60-1-C	234,31	117,155	0,019	31,62	1,736
Gjennomsnitt		122,7767			
Standardavvik		3,996658			
Relativt standardavvik		3,26 %			



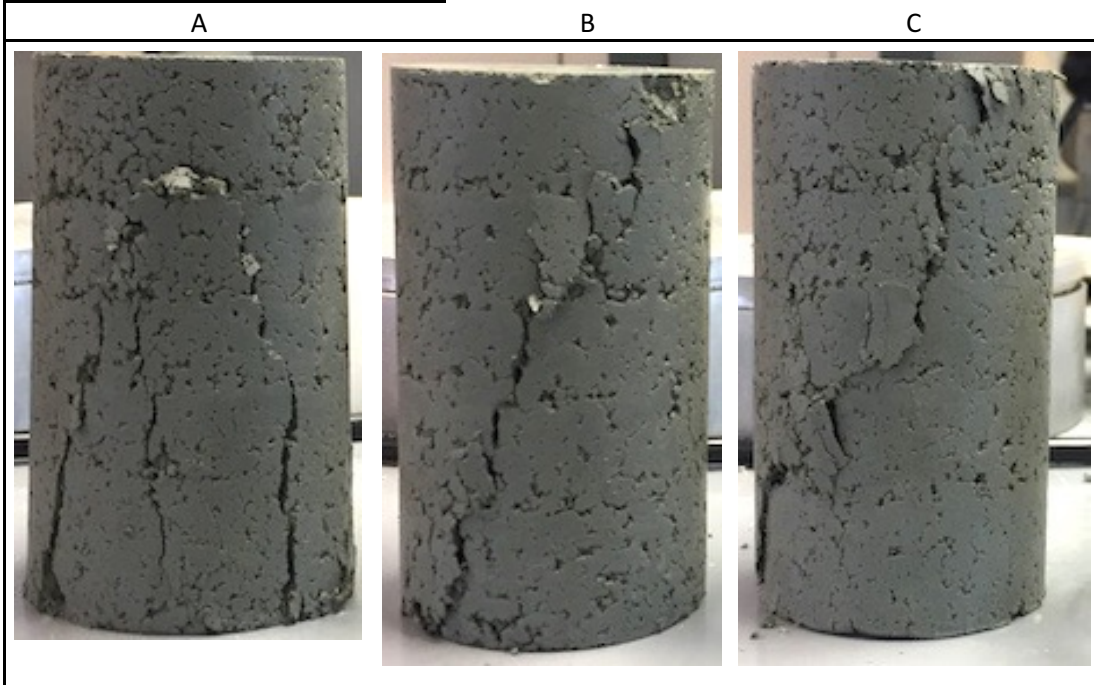


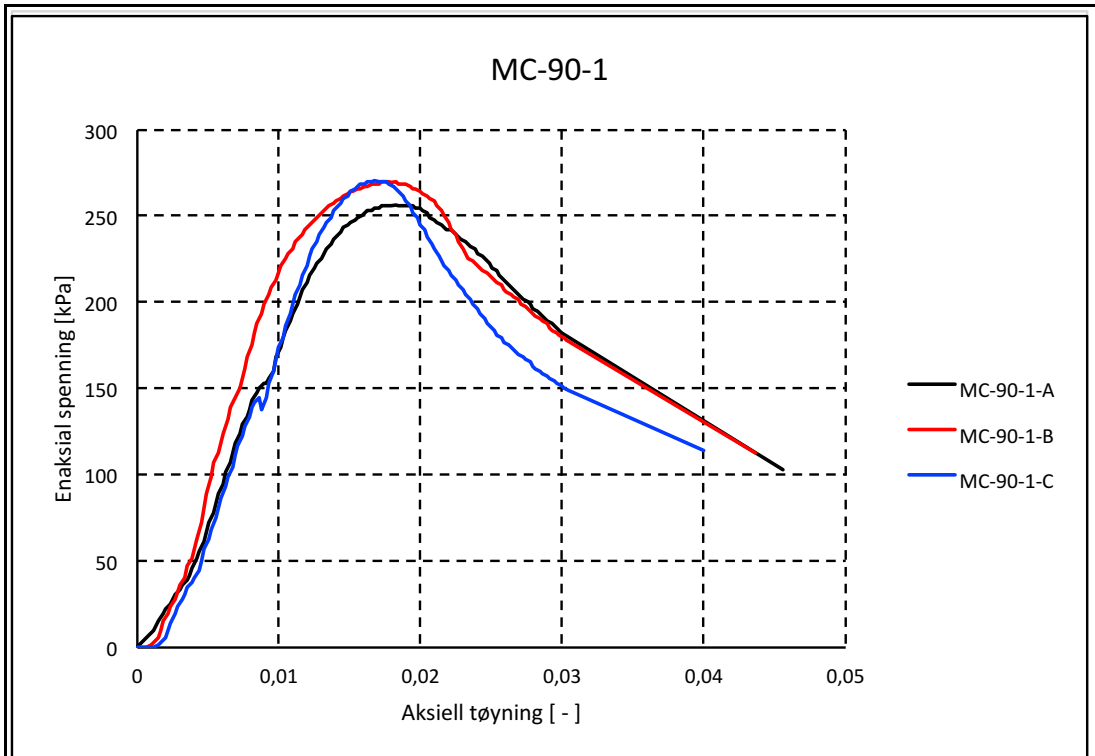
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
MC-60-7-A	311,98	155,99	0,018	17,27	1,753
MC-60-7-B	354,29	177,145	0,014	47,84	1,746
MC-60-7-C	311,55	155,775	0,016	38,95	1,742
Gjennomsnitt		162,97			
Standardavvik		10,02362			
Relativt standardavvik		6,15 %			





Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
MC-60-28-A	469,26	234,63	0,011	71,06	1,740
MC-60-28-B	416,04	208,02	0,01	59,43	1,739
MC-60-28-C	454,93	227,465	0,013	63,19	1,734
Gjennomsnitt		223,3717			
Standardavvik		11,24247			
Relativt standardavvik		5,03 %			





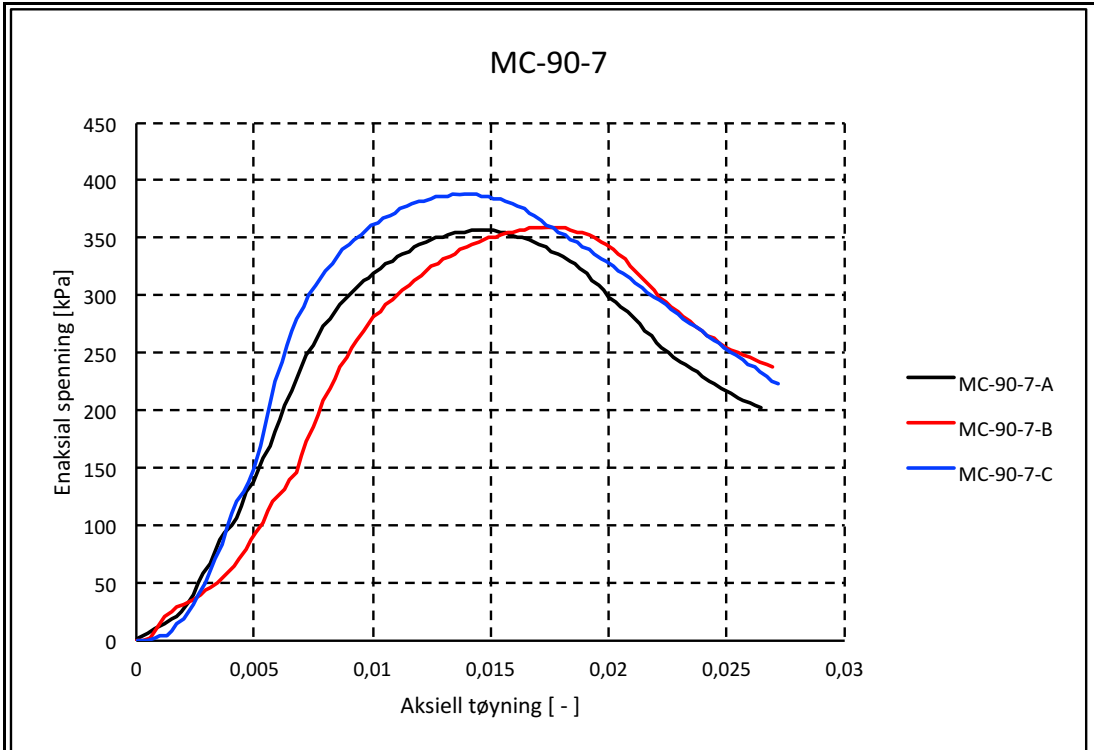
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
MC-90-1-A	256,57	128,285	0,018	23,7	1,753
MC-90-1-B	269,69	134,845	0,017	24,54	1,764
MC-90-1-C	270,74	135,37	0,016	22,13	1,783
Gjennomsnitt		132,8333			
Standardavvik		3,223291			
Relativt standardavvik		2,43 %			

A

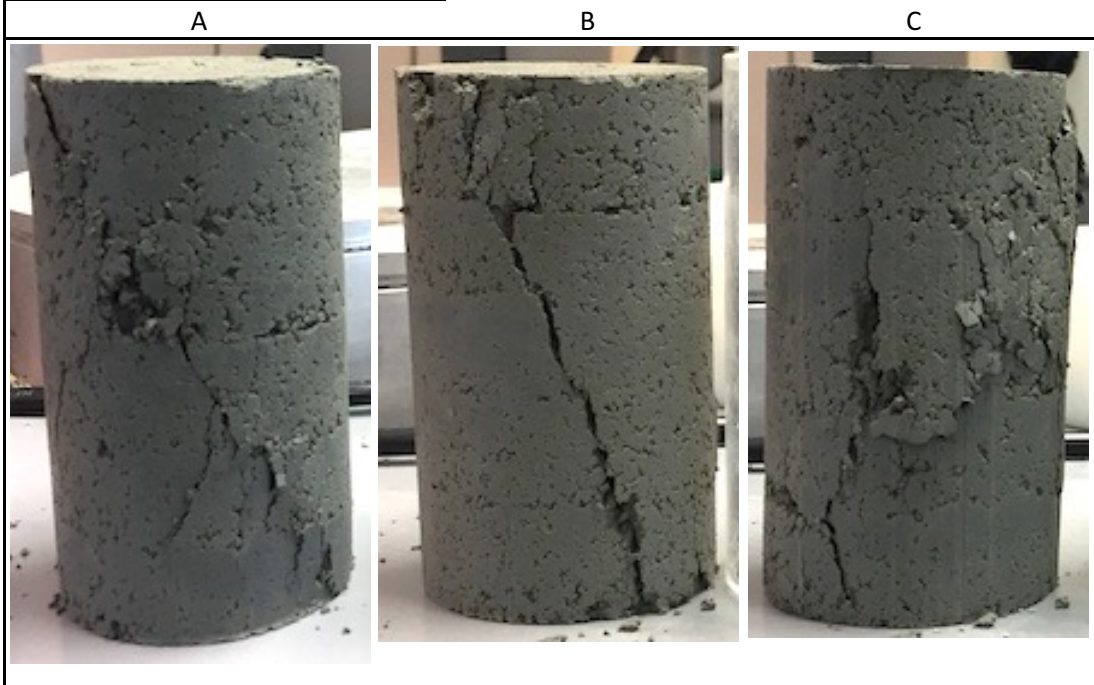
B

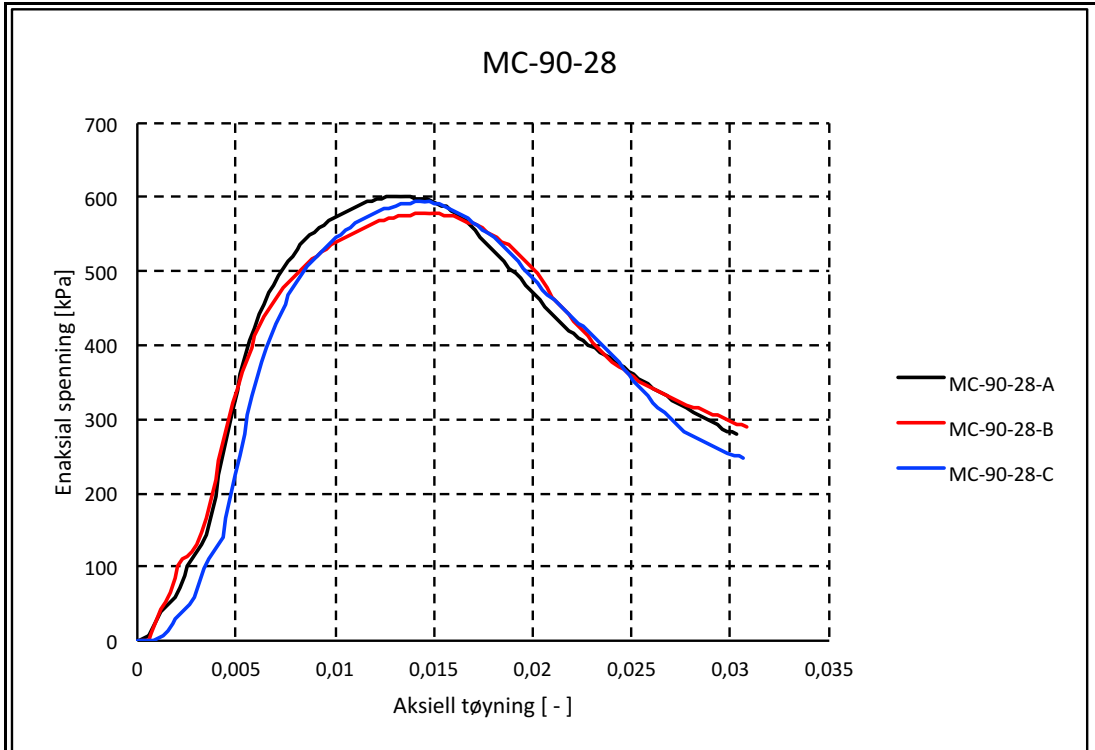
C



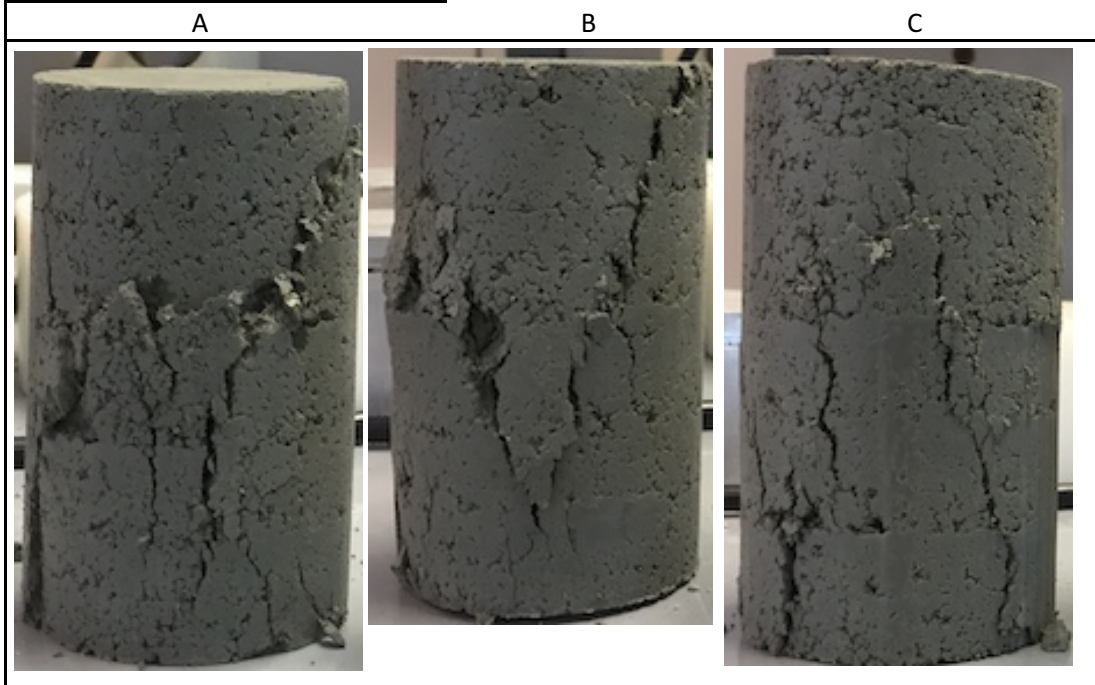


Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
MC-90-7-A	357,18	178,59	0,014	43,53	1,752
MC-90-7-B	359,51	179,755	0,017	33,33	1,734
MC-90-7-C	388,02	194,01	0,014	52,43	1,752
Gjennomsnitt		184,1183			
Standardavvik		7,010616			
Relativt standardavvik		3,81 %			

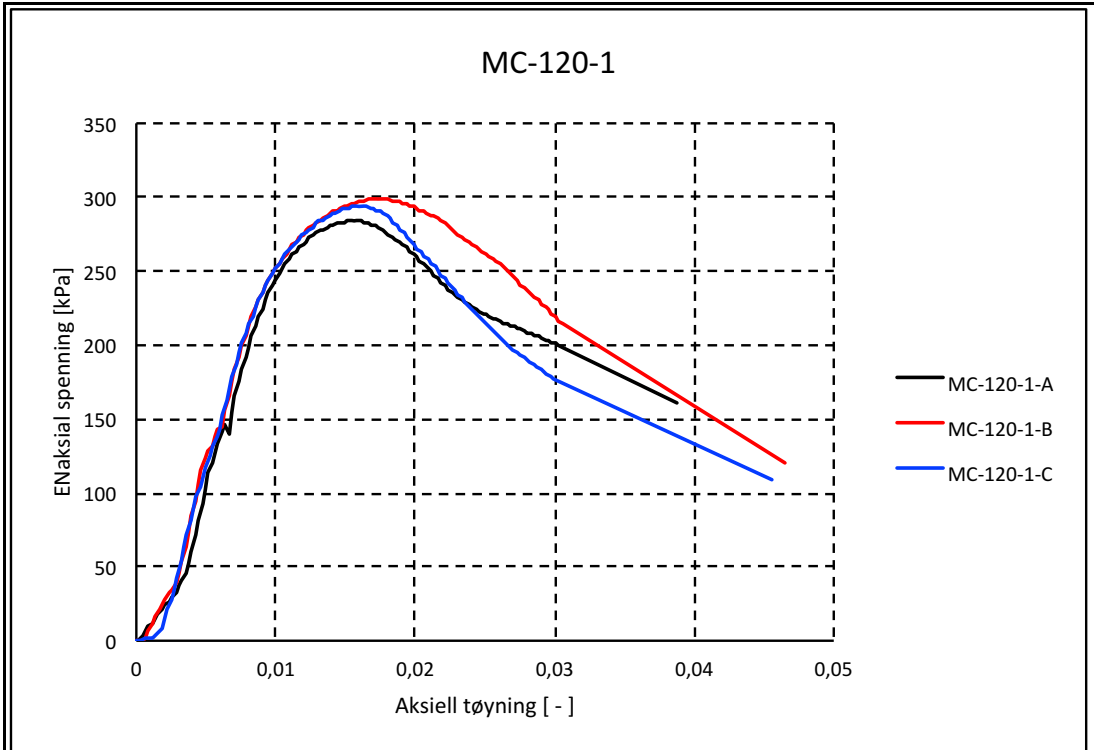




Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
MC-90-28-A	600,88	300,44	0,013	69,88	1,756
MC-90-28-B	577,97	288,985	0,014	74,1	1,750
MC-90-28-C	593	296,5	0,014	76,15	1,767
Gjennomsnitt		295,3083			
Standardavvik		4,751793			
Relativt standardavvik		1,61 %			







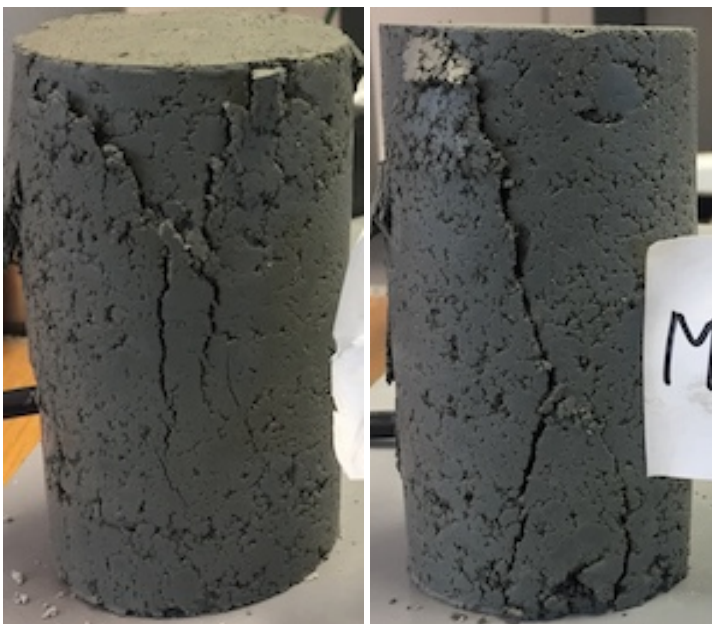
Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
MC-120-1-A	284,02	142,01	0,016	27,31	1,745
MC-120-1-B	298,84	149,42	0,017	26,23	1,763
MC-120-1-C	293,78	146,89	0,016	28,82	1,754
Gjennomsnitt		146,1067			
Standardavvik		3,075411			
Relativt standardavvik		2,10 %			

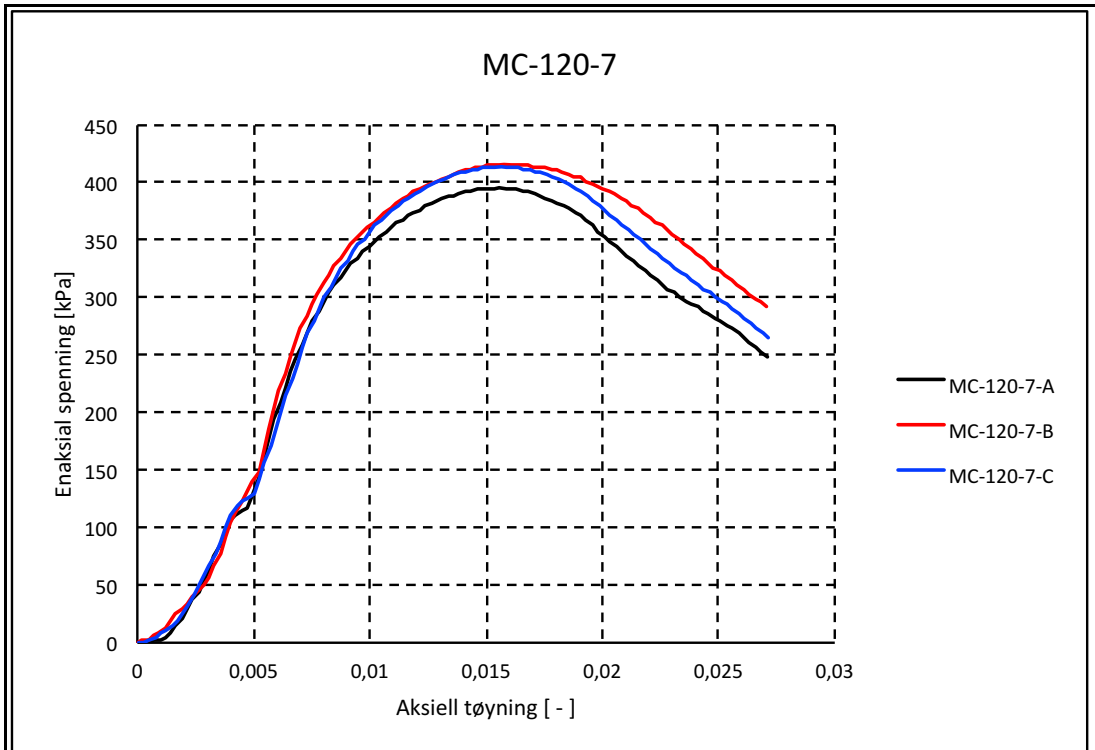
A

B

C

Bilde mangler



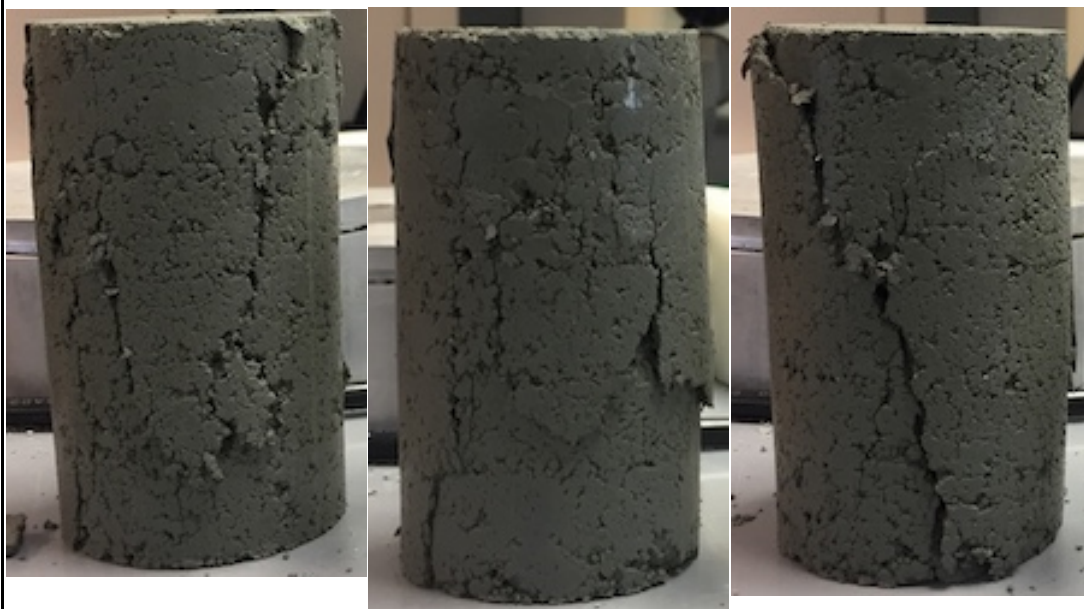


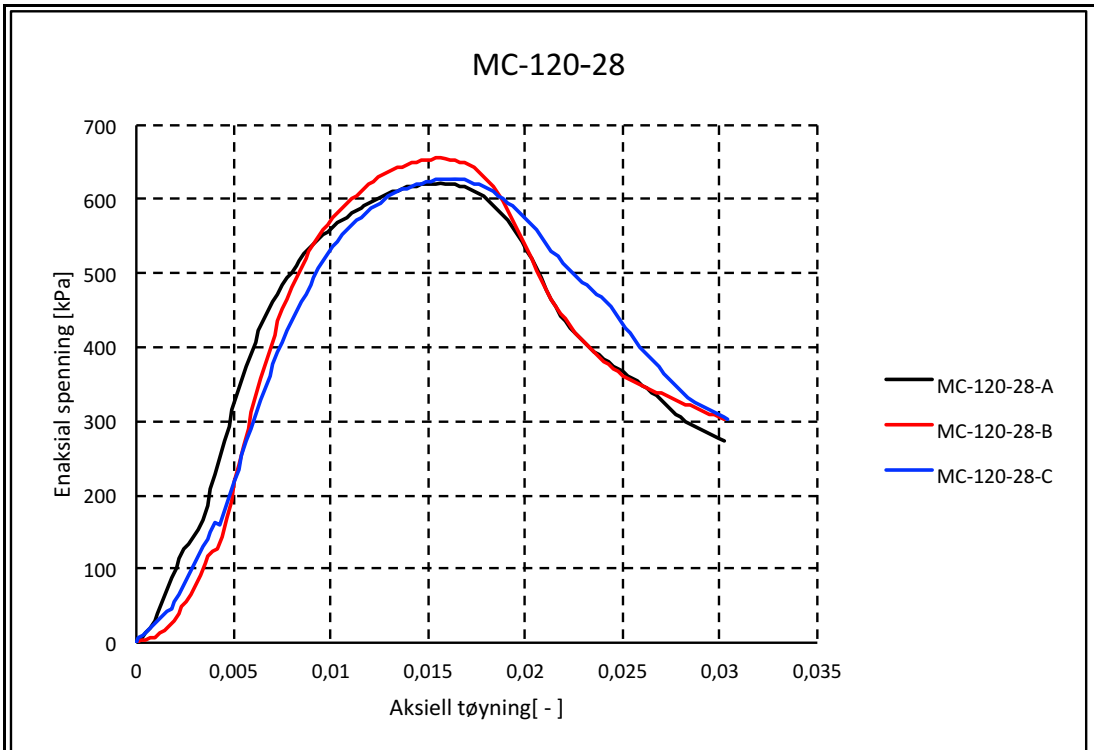
Prøve	$\sigma_{\text{brudd}}$	$\tau_{\text{maks}}$	$\epsilon_{\text{brudd}}$	$E_{50}$	Densitet
MC-120-7-A	395,73	197,865	0,015	47,14	1,733
MC-120-7-B	415,93	207,965	0,015	49,52	1,745
MC-120-7-C	413,98	206,99	0,015	45	1,755
Gjennomsnitt		204,2733			
Standardavvik		4,548825			
Relativt standardavvik		2,23 %			

A

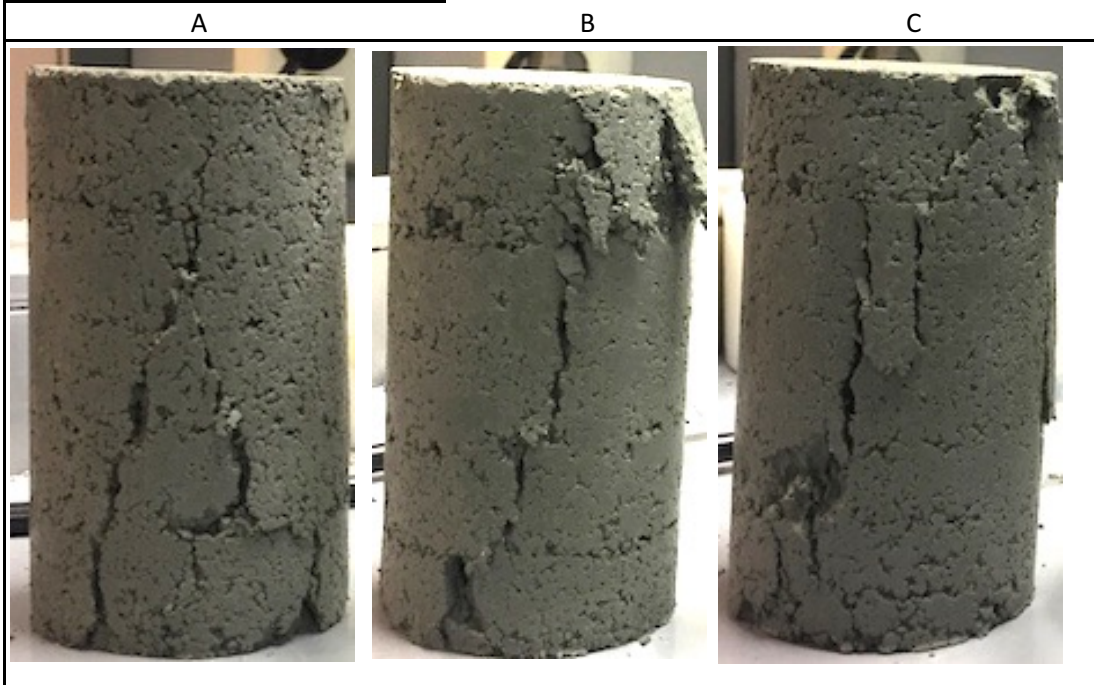
B

C





Prøve	$\sigma_{brudd}$	$\tau_{maks}$	$\epsilon_{brudd}$	$E_{50}$	Densitet
MC-120-28-A	621,64	310,82	0,015	72,33	1,724
MC-120-28-B	654,85	327,425	0,015	76,16	1,729
MC-120-28-C	627,17	313,585	0,016	65,31	1,746
Gjennomsnitt		317,2767			
Standardavvik		7,264196			
Relativt standardavvik		2,29 %			



## **Tillegg B**

# **Resultater fra rutineundersøkelser**

Dette tillegget inneholder resultater fra rutineundersøkelsene som ble utført i masteroppaven.

Rutineundersøkelser							
Prosjekt: Masteroppgave Multicem							
Prøve							
Borsted:	Flotten	Dato, prøvetaking	09.11.2017				
Hull nr.	NGI miniblokk	Dato, prøveåpning	15.04.2019				
Prøve nr.	3	Masse av prøve					
Dybde, z	14,9-15,25						
<b>Generell klassifisering</b>							
Geologisk betegnelse:			Jordart: Leire				
Beskrivelse:			Merknader:				
<b>Konusforsøk</b>				<b>Vanninnhold</b>			
Prøve	Su	Sr	St		w1	w2	w3
nr	kPa	kPa	-				
1	91,7	1,5	61,1333	Skål nr	68	33	39
2	87,8	1,4	62,7143	Tot. Masse våt	76,13	65,50	88,40
3	74,0	1,4	52,8571	Tot. masse tørr	60,82	53,14	70,31
4	77,6	1,4	55,4286	Masse skål, g	24,10	18,48	22,90
5	87,6	1,4	62,5714	Masse vann, g	15,31	12,36	18,09
6	85,3	1,4	60,9286	Masse tørr prøve	36,72	34,66	47,41
Snitt	84,0	1,4	59,2722	Vanninnhold %	41,7 %	35,7 %	38,2 %
				Gjennomsnitt vanninnhold:	38,5 %		
<b>Ringdensitet</b>				<b>Enaks. Trykkforsøk</b>			
Ring nr.	VII		III	Prøve	Su	$\epsilon$	
Masse ring	31,63		32,61	nr	kPa	%	
Masse prøve+ ring	98,93		99,47	1	77,7	2	
Masse prøve	67,3		66,86				
Volum ring	34,8		35,3				
Densitet	1,93391		1,894051				

Rutineundersøkelser							
Prosjekt: Masteroppgave Multicem							
Prøve							
Borsted:	Flotten	Dato, prøvetaking	09.11.2017				
Hull nr.	NGI miniblokk	Dato, prøveåpning	15.04.2019				
Prøve nr.	2	Masse av prøve					
Dybde, z	16,3-16,65						
<b>Generell klassifisering</b>							
Geologisk betegnelse:			Jordart: Leire				
Beskrivelse: 1. prøve på ny dag. Slam i toppen			Merknader:				
<b>Konusforsøk</b>				<b>Vanninnhold</b>			
Prøve	Su	Sr	St		w1	w2	w3
nr	kPa	kPa	-				
1	62,3	1,5	41,533	Skål nr	42	41	239
2	52,5	1,6	32,813	Tot. Masse våt	62,20	54,92	63,86
3	52,5	1,5	35	Tot. masse tørr	50,86	45,19	52,84
4	52,5	1,6	32,813	Masse skål, g	23,28	22,00	22,78
5	58,4	1,4	41,714	Masse vann, g	11,34	9,73	11,02
6	58,4	1,5	38,933	Masse tørr prøve	27,58	23,19	30,06
Snitt	56,1	1,5	37,134	Vanninnhold %	41,1 %	42,0 %	36,7 %
				Gjennomsnitt vanninnhold:	39,9 %		
<b>Ringdensitet</b>				<b>Enaks. Trykkforsøk</b>			
Ring nr.		III	VII	Prøve	Su	$\epsilon$	
Masse ring		32,61	31,63	nr	kPa	%	
Masse prøve+ ring		98,44	97,18	1	72,0	4	
Masse prøve		65,83	65,55				
Volum ring		35,3	34,8				
Densitet		1,864872521	1,8836207				

Rutineundersøkelser							
Prosjekt: Masteroppgave Multicem							
Prøve							
Borsted:	Flotten	Dato, prøvetaking	09.11.2017				
Hull nr.	NGI miniblokk	Dato, prøveåpning	15.04.2019				
Prøve nr.	4	Masse av prøve					
Dybde, z	17,7-18,05						
<b>Generell klassifisering</b>							
Geologisk betegnelse:			Jordart: Leire				
Beskrivelse:			Merknader:				
<b>Konusforsøk</b>				<b>Vanninnhold</b>			
Prøve	Su	Sr	St		w1	w2	w3
nr	kPa	kPa	-				
1	102,0	2,5	40,8	Skål nr	45	210	219
2	82,4	2,1	39,238	Tot. Masse våt	63,72	81,20	62,60
3	102,0	2,1	48,571	Tot. masse tørr	53,42	65,71	51,20
4	87,8	2,3	38,174	Masse skål, g	23,32	22,20	22,90
5	97,0	2,1	46,19	Masse vann, g	10,30	15,49	11,40
6	102,0	2,1	48,571	Masse tørr prøve	30,10	43,51	28,30
Snitt	95,5	2,2	43,591	Vanninnhold %	34,2 %	35,6 %	40,3 %
				Gjennomsnitt vanninnhold:		36,7 %	
<b>Ringdensitet</b>				<b>Enaks. Trykkforsøk</b>			
Ring nr.	VII		III	Prøve	Su	$\varepsilon$	
Masse ring	31,63		32,61		kPa	%	
Masse prøve+ ring	99,09		98,82	1	94,0	3,8	
Masse prøve	67,46		66,21				
Volum ring	34,8		35,3				
Densitet	1,9385		1,875637				

Rutineundersøkelser					
Prosjekt: Masteroppgave Multicem					
Prøve					
Borsted:	Flotten	Dato, prøvetaking	10.11.2017		
Hull nr.	NGI miniblokk	Dato, prøveåpning	15.04.2019		
Prøve nr.	1	Masse av prøve			
Dybde, z	18,4 - 18,75				
<b>Generell klassifisering</b>					
Geologisk betegnelse:			Jordart: Leire		
Beskrivelse: Mye slam i topp, riktig dybde i bunn.			Merknader:		
<b>Konusforsøk</b>				<b>Vanninnhold</b>	
Prøve	Su	Sr	St		
nr	kPa	kPa	-		
1	58,4	1,6	36,5	Skål nr	126
2	69,3	2	34,65	Tot. Masse våt	66,54
3	54,4	1,6	34	Tot. masse tørr	54,44
4	51,0	1,9	26,842	Masse skål, g	25,88
5	44,1	2	22,05	Masse vann, g	12,10
6	52,5	1,9	27,632	Masse tørr prøve	28,56
Snitt	55,0	1,8	30,279	Vanninnhold %	42,4 %
				Gjennomsnitt vanninnhold:	39,2 %
<b>Ringdensitet</b>			<b>Enaks. Trykkforsøk</b>		
Ring nr.	VII	III		Prøve	Su
Masse ring	31,63	32,61		nr	kPa
Masse prøve+ ring	97,32	97,51		1	69,2
Masse prøve	65,69	64,9			
Volum ring	34,8	35,3			
Densitet	1,887643678	1,838527			
				$\epsilon$	%



Rutineundersøkelser								
Prosjekt: Masteroppgave Multicem								
Prøve								
Borsted:	Flotten	Dato, prøvetaking	10.11.2017					
Hull nr.	#1	Dato, prøveåpning	12.05.2019					
Prøve nr.	5	Masse av prøve						
Dybde, z	18,75-19,1							
<b>Generell klassifisering</b>								
Geologisk betegnelse:			Jordart: Leire					
Beskrivelse:			Merknader: Liten skade fra skjærkniv i bunn					
<b>Konusforsøk</b>				<b>Vanninnhold</b>				
Prøve	Su	Sr	St		w1	w2	w3	
nr	kPa	kPa	-					
1	74,6	2,4	31		153	167	161	
2	77,0	2,1	37		60,72	62,20	65,45	
3	71,6	2,3	31		48,46	49,73	51,99	
4	62,3	2,1	30		18,89	18,88	18,42	
5	58,4	2,4	24		12,26	12,47	13,46	
6	60,3	2,1	29		29,57	30,85	33,57	
Snitt	67,4	2,2	30		Vanninnhold %	41,5 %	40,4 %	40,1 %
				Gjennomsnitt vanninnhold:			40,7 %	
<b>Ringdensitet</b>				<b>Enaks. Trykkforsøk</b>				
Ring nr.	V	VII		Prøve	Su	$\epsilon$		
Masse ring	33,06	31,63		nr	kPa	%		
Masse prøve+ ring	100,41	96		1	83,3	2,8		
Masse prøve	67,35	64,37						
Volum ring	35	34,8						
Densitet	1,924286	1,849713						

Rutineundersøkelser							
Prosjekt: Masteroppgave Multicem							
Prøve							
Borsted:	Flotten	Dato, prøvetaking	30.01.2019				
Hull nr.		Dato, prøveåpning	12.05.2019				
Prøve nr.		Masse av prøve	-				
Dybde, z	11,82-12,22						
<b>Generell klassifisering</b>							
Geologisk betegnelse:			Jordart:	Leire			
Beskrivelse:			Merknader:	Liten skade fra skjærkniv i bunn			
<b>Konusforsøk</b>				<b>Vanninnhold</b>			
Prøve	Su	Sr	St		w1	w2	w3
nr	kPa	kPa	-				
1	52,5	0,3	181	Skål nr	157	156	165
2	85,3	0,3	294	Tot. Masse våt	55,90	62,13	62,33
3	44,1	0,4	113	Tot. masse tørr	44,09	48,13	49,03
4	62,3	0,3	215	Masse skål, g	18,10	18,43	19,94
5	52,5	0,3	181	Masse vann, g	11,81	14,00	13,30
6	51,0	0,3	176	Masse tørr prøve	25,99	29,70	29,09
Snitt	58,0	0,3	193	Vanninnhold %	45,44 %	47,1 %	45,7 %
				Gjennomsnitt vanninnhold:	46,1 %		
<b>Ringdensitet</b>				<b>Enaks. Trykkforsøk</b>			
Ring nr.		V	VII	Prøve nr	Su	$\epsilon$	
Masse ring		33,06	31,63		kPa	%	
Masse prøve+ ring		96,02	94,06	1	67,0	2,2	
Masse prøve		62,96	62,43	2	78,7	2	
Volum ring		35	34,8				
Densitet		1,798857	1,793966				
<b>Atterberggrenser</b>			$W_p$	$W_L$	<b>Konusforsøk 2</b>		
Skål nr		11	242		Su	Sr	St
Tot. Masse våt		55,76	60,17	nr	kPa	kPa	-
Tot. masse tørr		50,7	52,13	1	62,3	0,2	311,5
Masse skål, g		29,1	27,57	2	74,1	0,2	370,5
Masse vann, g		5,06	8,04	3	69,2	0,2	346
Masse tørr prøve		21,6	24,56	4	52,5	0,2	262,5
Vanninnhold %		23 %	33 %	5	69,2	0,2	346
				6	51,0	0,2	255
				Snitt	63,1	0,2	315,3