

# Trykkbrudd i høyfast lettbetong med tøyningsgradient

**Aleksander Hammer**  
**Håvard Lauvsland**

Master i Bygg- og miljøteknikk  
Innlevert: juni 2018  
Hovedveileder: Jan Arve Øverli, KT  
Medveileder: Jelena Zivkovic, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk





## MASTEROPPGAVE 2018

FAGOMRÅDE: Konstruksjonsteknikk	DATO: 10.06.2018	ANTALL SIDER: 84 + 44 (vedlegg)
------------------------------------	---------------------	------------------------------------

TITTEL:

### Trykkbrudd i høyfast lettbetong med tøyingsgradient

Failure of high strength lightweight aggregate concrete under compressive strain gradient

UTFØRT AV:

Aleksander Hammer  
Håvard Lauvsland



SAMMENDRAG:

Tidligere forskning under DACS-prosjektet har konkludert med at høyfast lettbetong med Stalite som tilslag, har vist mer duktil oppførsel enn forventet [1]. Det har derfor blitt pekt på et behov for videre forskning på denne typen lettbetong, og da hovedsakelig på duktilitet. Det har blitt poengtert at hvis duktiliteten viser seg å være så god som resultatene tyder på, så bør lettbetong med Stalite i større grad brukes i konstruksjoner. Dette på grunn av gunstig forhold mellom styrke og densitet.

I denne oppgaven er det utført en tøyingsgradienttest for å se på tøyninger og duktilitet. Den er blitt utført ved å trykkteste uarmerte prismer sentrisk og med to ulike eksentrisiteter. Prismene og eksentrisitetene hadde samme størrelsesforhold som i en tidligere eksperimentell studie. Der ble det sett på lettbetong med Liapor 8 og forskjellige normalbetonger, og resultatene kan derfor sammenlignes. I dette forsøket undersøkes forskjellen ved å bruketørr (0,10 % fuktinnhold) og vannmettet (7,9 % fuktinnhold) Stalite. Effekten av å introdusere en liten mengde polyvinylalkoholfiber blir også undersøkt. Stalite (1/2 tomme) og sand fra de samme sekkene ble brukt i alle blandingene. Det er også utført forsøk og beregninger for å finne trykkfasthet, spaltestrekkfasthet, densitet, brudenergi, E-modul og tverrkontraksjonstall.

Betongen med vannmettet Stalite oppnådde litt høyere tøyninger og duktilitet enn betongen med tørr Stalite. Forskjellen var relativt liten. Største registrerte tøyning i den vannmettede blandingen var på 4,53%. Gjennom kvalitativ visuell inspeksjon av bruddflatene, ble det registrert at i betongen med tørr Stalite gikk bruddet både gjennom og rundt tilslagspartiklene, mens i bruddflaten til blandingen med vannmettet Stalite gikk det i større grad gjennom partiklene. Betongen med vannmettet Stalite hadde de mest eksplosive bruddene.

Å introdusere bare en liten mengde fiber (0,5 % av sementmassen) økte tøyningene og duktiliteten signifikant. Den største tøyningen som ble målt i fiberbetongen var på 6,82%. Bruddene i fiberbetongen var ikke sprø eller eksplosive, og prismene holdt sammen etterbrudd.

Eurokode 2 skiller ikke mellom ulike letttilslag ved utregning av tøyning, og underestimerer makstøyningene målt i denne oppgaven med 75-88%.

Resultatene fra denne oppgaven er lovende for økt fremtidig bruk av Stalite i konstruksjoner. Store tøyninger og duktilitet på høyde med normalbetong tyder på at egenskapene til høyfast lettbetong med Stalite som tilslag kan regnes som en mellomting mellom lettbetong og normalbetong. Med duktilitet som normalbetong og densitet som lettbetong, ser Stalite ut til å ha en god egenskap fra hver.

FAGLÆRER: Jan Arve Øverli  
VEILEDER(E): Jan Arve Øverli  
UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk

---

# Forord

Denne oppgaven er det avsluttende arbeidet på det 2-årige masterprogrammet på Bygg- og miljøteknikk. Oppgaven er utført av Håvard Lauvsland og Aleksander Hammer ved instituttet for konstruksjonsteknikk, ved NTNU. Oppgaven inngår som en del av forskningsprosjektet *Durable Advanced Concrete Structures, DACS*, som NTNU er involvert i.

Vi vil gjerne takke professor Jan Arve Øverli og PhD-kandidat Jelena Zivkovic, som har vært veiledere under oppgaven. Takk til seniorforsker Hans Stemland for god input. Takk til forsker Egil Fagerholt som har hjulpet til med oppsett og prosessering av DIC, Steinar Seehuus, Ragnar Moen, Bjørn Strickert Schjølberg og de andre som har hjulpet til på lab med støping og testing.

Vi vil gi en ekstra takk til Jelena Zivkovic som har gitt oss tett oppfølging og mange gode diskusjoner. Hun har vært til stor hjelp gjennom hele oppgaven.

Trondheim, 10.06.2018

Aleksander Hammer  
Håvard Lauvsland

---

---

# Sammendrag

Tidligere forskning under DACS-prosjektet har konkludert med at høyfast lettbetong med Stalite som tilslag, har vist mer duktil oppførsel enn forventet [1]. Det har derfor blitt pekt på et behov for videre forskning på denne typen lettbetong, og da hovedsakelig på duktilitet. Det har blitt poengtert at hvis duktiliteten viser seg å være så god som resultatene tyder på, så bør lettbetong med Stalite i større grad brukes i konstruksjoner. Dette på grunn av gunstig forhold mellom styrke og densitet.

I denne oppgaven er det utført en tøyingsgradienttest for å se på tøyninger og duktilitet. Den er blitt utført ved å trykkteste uarmerte prismer sentrisk og med to ulike eksentrisiteter. Prismene og eksentrisitetene hadde samme størrelsesforhold som i en tidligere eksperimentell studie. Der ble det sett på lettbetong med Liapor 8 og forskjellige normalbetonger, og resultatene kan derfor sammenlignes. I dette forsøket undersøkes forskjellen ved å bruke tørr (0,10 % fuktinnhold) og vannmettet (7,9 % fuktinnhold) Stalite. Effekten av å introdusere en liten mengde polyvinylalkoholfiber blir også undersøkt. Stalite (1/2 tomme) og sand fra de samme sekkene ble brukt i alle blandingene. Det er også utført forsøk og beregninger for å finne trykkfasthet, spaltetrekkfasthet, densitet, brudenergi, E-modul og tverrkontraksjonstall.

Betongen med vannmettet Stalite oppnådde litt høyere tøyninger og duktilitet enn betongen med tørr Stalite. Forskjellen var relativt liten. Største registrerte tøyning i den vannmettede blandingen var på 4,53 ‰. Gjennom kvalitativ visuell inspeksjon av bruddflatene, ble det registrert at i betongen med tørr Stalite gikk bruddet både gjennom og rundt tilslagspartiklene, mens i bruddflaten til blandingen med vannmettet Stalite gikk det i større grad gjennom partiklene. Betongen med vannmettet Stalite hadde de mest eksplosive bruddene.

Å introdusere bare en liten mengde fiber (0,5 % av sementmassen) økte tøyningene og duktiliteten signifikant. Den største tøyningen som ble målt i fiberbetongen var på 6,82 ‰. Bruddene i fiberbetongen var ikke sprø eller eksplosive, og prismene holdt sammen etter brudd.

Eurokode 2 skiller ikke mellom ulike letttilslag ved utregning av tøyning, og underestimerer makstøyningene målt i denne oppgaven med 75-88 %.

Resultatene fra denne oppgaven er lovende for økt fremtidig bruk av Stalite i konstruksjoner. Store tøyninger og duktilitet på høyde med normalbetong tyder på at egenskapene til høyfast lettbetong med Stalite som tilslag kan regnes som en mellomting mellom lettbetong og normalbetong. Med duktilitet som normalbetong og densitet som lettbetong, ser Stalite ut til å ha en god egenskap fra hver.

---

# Abstract

Earlier research done under the DACS-project has shown that high strength lightweight aggregate concrete with Stalite as aggregate has a more ductile behaviour than expected [1]. Because of the promising results there is a need for further study on this type of concrete, especially with regards to the ductility. The use of high strength concrete with Stalite as aggregate should increase if the results are as good as expected, because of the favourable combination of high strength with low density.

A strain gradient test has been used to investigate strains and ductility. The test was done by loading prisms centrally and with two different eccentricities. The proportions of the prisms and eccentricities were the same as in an earlier experiment and are therefore comparable. The earlier studies looked at the lightweight concrete Liapor 8 and different types of normal weight concrete. This study looks at the difference of using dry (0,10 % moisture content) or saturated (7,9 % moisture content) Stalite and how adding a small amount of polyvinylalcohol fibres effects the concrete. Both the Stalite (fraction size 1/2 inch) and the sands in all the concretes were from the same baches. Experiments and calculations were also carried out to find the compressive strength, tensile splitting strength, density, fracture energy, E-modulus and Poisson-ratio.

The concrete with the water saturated Stalite had somewhat higher strains and ductility than the concrete with dry Stalite. The difference was small and the largest strain in the concrete with saturated Stalite was 4,53 ‰. Through qualitative visual inspection of the fracture it was discovered that in the concrete with dry Stalite, the fractures both penetrated and travelled around the aggregate particles, while in the concrete with saturated Stalite, the fracture to a much larger degree only penetrated the particles. The concrete with the saturated Stalite had the most explosive fractures.

By introducing a small amount of fibres (0,5 % of the cement mass) the concrete became significantly more ductile and did not have brittle behaviour. The largest strain measured was 6,82 ‰. The fracture was not explosive and the prisms kept together afterwards.

Eurocode 2 does not differ between lightweight concrete with different types of aggregates, and underestimated the largest strains in this experiment by 75-88 %.

The results from this experiment are promising for increased use of high strength lightweight concrete with Stalite as aggregate for constructions. High strains and ductility show that concrete with Stalite can be considered as a product in between lightweight concrete and normal weight concrete. It combines the ductility from normal weight concrete with the low density from lightweight concrete.

---

# Innhold

<b>Forord</b>	<b>2</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Innhold</b>	<b>v</b>
<b>Tabeller</b>	<b>viii</b>
<b>Figurer</b>	<b>x</b>
<b>Definisjoner</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
<b>2 Litteraturstudie lettbetong</b>	<b>3</b>
2.1 Definisjon . . . . .	3
2.2 Historie . . . . .	3
2.3 Lettilslag . . . . .	4
2.3.1 Leca . . . . .	5
2.3.2 Liapor . . . . .	6
2.3.3 Lytag . . . . .	6
2.4 Stalite . . . . .	6
2.4.1 Produksjon . . . . .	7
2.4.2 Pumpbarhet . . . . .	7
2.4.3 Porestruktur og absorpsjon . . . . .	8
2.5 Egenskaper . . . . .	8
2.6 Duktilitetsindeks . . . . .	11
2.7 Bruddtyper . . . . .	11
2.8 PVA-Fiber . . . . .	12



---

<b>3</b>	<b>Metode</b>	<b>15</b>
3.1	Materialer . . . . .	15
3.1.1	Fuktinnhold i Stalite . . . . .	15
3.1.2	Forfukting av Stalite . . . . .	16
3.1.3	Siktekurve for Stalite . . . . .	16
3.1.4	Absorpsjon i Stalite . . . . .	17
3.1.5	Egenskaper for sand . . . . .	17
3.1.6	Blandeprosedyre og resept . . . . .	17
3.2	Småskala . . . . .	19
3.2.1	Terning . . . . .	20
3.2.2	Sylinder . . . . .	21
3.2.3	Bruddenergibjelker . . . . .	23
3.2.4	Densitet . . . . .	24
3.3	Fullskala . . . . .	24
3.3.1	Forskaling . . . . .	25
3.3.2	Testoppsett . . . . .	27
3.3.3	Sentrisk belastning . . . . .	28
3.3.4	Eksentrisk belastning . . . . .	29
3.3.5	Spenningsfordelinger . . . . .	30
3.3.6	Smøring av kulelager . . . . .	30
3.3.7	Håndberegninger . . . . .	31
3.3.8	LVDT . . . . .	32
3.3.9	Streklapper . . . . .	33
3.3.10	DIC . . . . .	34
3.3.11	Plassering av testinstrumenter . . . . .	36
3.4	Oversikt over alle forsøk som er blitt gjort . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>41</b>
4.1	Resept . . . . .	41
4.1.1	Fuktinnhold i Stalite . . . . .	41
4.1.2	v/c tall . . . . .	41
4.2	Småskala . . . . .	41
4.2.1	Materialparametere . . . . .	42
4.2.2	Trykkfasthet . . . . .	42
4.2.3	Spalttestrekkfasthet . . . . .	45
4.2.4	Bruddenergi . . . . .	45
4.2.5	Densitet . . . . .	47
4.3	Fullskala . . . . .	49
4.3.1	Bruddlast . . . . .	50
4.3.2	LVDT resultater . . . . .	51
4.3.3	LVDT vs DIC . . . . .	53
4.3.4	Makstøyninger fra DIC . . . . .	54
4.3.5	E-modul . . . . .	54
4.3.6	Duktilitetsindeks . . . . .	56
4.3.7	Tverrrkontraksjon . . . . .	57
4.3.8	Bruddtyper . . . . .	58

---

4.3.9	Bruddstørrelse . . . . .	60
4.3.10	Geometrifaktor . . . . .	60
4.3.11	Håndberegninger . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>63</b>
5.1	Resept . . . . .	63
5.1.1	Vanninnhold og fasthet . . . . .	63
5.1.2	Bearbeidbarheten til fiberblandingen . . . . .	64
5.2	Småskala . . . . .	64
5.2.1	Trykkfasthet . . . . .	64
5.2.2	Bruddflate . . . . .	65
5.3	Bruddtyper og bruddstørrelse . . . . .	66
5.4	LVDT resultater . . . . .	67
5.5	Sammenligning av LVDT og DIC . . . . .	67
5.6	Effekt av eksentrisk belastning . . . . .	69
5.7	Avvik fra planlagt spenningssituasjon . . . . .	69
5.8	Sammenligning av duktilitet i tørr og vannmettet Stalite . . . . .	71
5.9	Effekt av fiberarmering . . . . .	71
5.10	Sammenligning av testresultater og håndberegning . . . . .	72
5.11	Sammenligning med tidligere forsøk . . . . .	73
5.12	Sammenligning av tøyninger med Eurokode . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>Feilkilder</b>	<b>79</b>
	<b>Kilder</b>	<b>81</b>
	<b>Vedlegg A</b>	<b>85</b>
	<b>Vedlegg B</b>	<b>109</b>
	<b>Vedlegg C</b>	<b>121</b>

---

# Tabeller

2.1	Egenskaper for ulike typer fiberarmering . . . . .	13
3.1	Endelig oppveid resept, oppgitt for 1 m <sup>3</sup> blanding . . . . .	19
3.2	Småskalaprøver . . . . .	20
3.3	Plan for testing av prismer . . . . .	25
3.4	Testing av prøvelegemer med tørr Stalite. Støp: 12.03.18 . . . . .	39
3.5	Testing av prøvelegemer med vannmettet Stalite. Støp 05.04.18 . . . . .	39
3.6	Testing av prøvelegemer med fiberarmering. Støp 19.03.18 . . . . .	39
4.1	v/c-tall og fasthet . . . . .	41
4.2	Midlere materialparametere . . . . .	42
4.3	Trykkfasthet terninger <i>MPa</i> . . . . .	43
4.4	Trykkfasthet sylinder <i>MPa</i> . . . . .	45
4.5	Spaltstrekkfasthet sylinder <i>MPa</i> . . . . .	45
4.6	Bruddenergi . . . . .	46
4.7	Mettet densitet terninger $\frac{kg}{m^3}$ . . . . .	47
4.8	Mettet densitet sylinder $\frac{kg}{m^3}$ . . . . .	48
4.9	Ovnstørket densitet $\frac{kg}{m^3}$ . . . . .	48
4.10	Tabellen viser fastheten til betongen på testdagen, prismefastheten og bruddlasten til de forskjellige forsøkene . . . . .	50
4.11	Makstøyninger målt med DIC rett før brudd . . . . .	54
4.12	E-modul . . . . .	56
4.13	Duktilitetsindeks funnet med tall fra LVDT og DIC . . . . .	57
4.14	Tverrkontraksjonstall . . . . .	57
4.15	Bruddlengde og bruddybde . . . . .	60
4.16	Geometrifaktor . . . . .	61
4.17	Håndberegning . . . . .	61
5.1	v/c-tall og fasthet . . . . .	63
5.2	Sammenligning av makstøyninger fra LVDT og DIC . . . . .	69

---

5.3	Sammenligning av spenninger fra LVDT og ønsket spennings situasjon, se figur 3.14 . . . . .	70
5.4	Sammenligning, (t=testresultat, h=håndberegning) . . . . .	73
5.5	Sammenligning med tidligere forsøk . . . . .	74
5.6	Sammenligning av makstøyninger fra Eurokode og fra forsøk . . . . .	76

# Figurer

2.1	Fotografi av Raftsundet bru . . . . .	4
2.2	Leca . . . . .	5
2.3	Snitt av Liapor og Liapor . . . . .	6
2.4	Lyttag . . . . .	6
2.5	Snitt av Stalite . . . . .	7
2.6	Arbeidsdiagram for normalbetong (NDC) og lettbetong (LWAC) . . . . .	9
2.7	Skisse av skrått skjærbrudd og langsgående strekkbrudd . . . . .	12
2.8	Kjemisk oppbygging av PVA fiber . . . . .	12
2.9	Bruddflater, til venstre Kuralon, i midten Polypropylene og til høyre ARG	13
2.10	Til venstre er det et bilde som illustrer lengden av fiberarmingen og til høyre er et bilde av betong med fiberarmring. . . . .	14
3.1	Veiing av tørket Stalite . . . . .	16
3.2	Synkmålttest . . . . .	18
3.3	Trykkfasthetstest terning . . . . .	20
3.4	Trykkfasthetstest sylinder . . . . .	21
3.5	Spaltestrekkfasthetstest . . . . .	22
3.6	Bruddenergibjelker . . . . .	23
3.7	Prisme med mål . . . . .	25
3.8	Forskalingsbatteri . . . . .	26
3.9	Kutting av overflaten på prisme . . . . .	26
3.10	Sentrisk og eksentrisk belastning . . . . .	27
3.11	Statisk system for testoppsettet . . . . .	28
3.12	Prisme under sentrisk belastning. . . . .	29
3.13	Prisme under eksentrisk belastning, $e= 23,33 \text{ mm}$ . . . . .	30
3.14	Spenningsfordeling for de tre ulike lasttilfellene . . . . .	30
3.15	Prinsipp for bestemmelse av friksjon i kulelager . . . . .	31
3.16	LVDT-er limt på prisme . . . . .	33
3.17	Streklapp festet på prisme . . . . .	34
3.18	Prinsipp for DIC . . . . .	34

---

3.19	Prikkete prisme klargjort for DIC-analyse . . . . .	35
3.20	DIC-oppsett . . . . .	36
3.21	Skisse som viser plassering av LVDT og strekkklapp på testprismene . . . . .	37
3.22	Logging av data under testing . . . . .	38
4.1	Timeglassbruddform . . . . .	43
4.2	Fasthetsutvikling for de forskjellige betongtypene . . . . .	44
4.3	Brudd sylinder . . . . .	44
4.4	Spaltestrekkbrudd . . . . .	45
4.5	Bruddenergi . . . . .	46
4.6	Bruddflate på bruddenergibjelkene . . . . .	47
4.7	Navngivning LVDT-er og strekkklapper . . . . .	49
4.8	Navngivning tøyninger fra DIC . . . . .	50
4.9	LVDT for sentrisk belastning . . . . .	51
4.10	LVDT for prizmer belastet med 7,78 mm eksentrisitet . . . . .	52
4.11	LVDT for prizmer belastet med 23,33 mm eksentrisitet . . . . .	52
4.12	Overensstemmelse mellom LVDT-er og DIC sentrisk DLWAC . . . . .	53
4.13	Overensstemmelse mellom LVDT-er og DIC sentrisk WLWAC . . . . .	53
4.14	Overensstemmelse mellom LVDT-er og DIC sentrisk FLWAC . . . . .	54
4.15	E-modul DLWAC . . . . .	55
4.16	E-modul WLWAC . . . . .	55
4.17	E-modul FLWAC . . . . .	56
4.18	Tverrkontraksjonstall . . . . .	57
4.19	DLWAC. Til venstre: sentrisk, i midten: eksentrisitet 7,78 mm, til høyre: eksentrisitet 23,33 mm . . . . .	58
4.20	WLWAC. Til venstre: sentrisk, i midten: eksentrisitet 7,78 mm, til høyre: eksentrisitet 23,33 mm . . . . .	59
4.21	FLWAC. Til venstre: sentrisk, i midten: eksentrisitet 7,78 mm, til høyre: eksentrisitet 23,33 mm . . . . .	59
4.22	Bruddlengde og bruddybde . . . . .	60
5.1	Sammenligning av fasthet mellom terning, sylinder og Eurokode . . . . .	65
5.2	Forklaring på bruddvei . . . . .	66
5.3	Til venstre er bruddflaten til DLWAC, i midten er bruddflaten til WLWAC og til høyre er bruddflaten til FLWAC. . . . .	66
5.4	Antatt lineær tøyningfordeling gir makstøyning basert på LVDT-S og LVDT-W . . . . .	68
5.5	Reelle spenninger i uoverensstemmelse med planlagt spenningssituasjon . . . . .	70
5.6	Om man antar lineær tøyning vil spenningsoppbyggingen avta i den plas- tiske delen av prismet . . . . .	70
5.7	Snitt fiberbetong . . . . .	72
5.8	Arbeidsdiagram for normalbetong og lettbetong . . . . .	75
7.1	Fargeskala tøyninger DIC . . . . .	86

---

---

# Definisjoner

$A$	=	Tverrsnittsareal av betong
$b$	=	Bredde
$D$	=	Duktilitetsindeks
$d$	=	Sylinderdiameter
$\delta$	=	Deformasjon
$d_b$	=	Bruddybde
$\epsilon_{c,DIC}$	=	Makstøyning målt med DIC
$\epsilon_{c,LVDT}$	=	Makstøyning målt med LVDT
$E_{cm}$	=	E-modul
$\epsilon_{cu}$	=	Plastisk tøyning
$e_e$	=	Ytre eksentrisitet
$\epsilon_{el}$	=	Elastisk tøyning
$e_i$	=	Indre eksentrisitet
$E_{lcm}$	=	E-modul fra Eurokode 2
$\epsilon_{lcu}$	=	Plastisk tøyning fra Eurokode 2
$F$	=	Bruddlast
$f_c$	=	Trykkfasthet
$f_{ck}$	=	Sylinder trykkfasthet etter 28 døgn
$f_{cm}$	=	Midlere trykkfasthet etter 28 døgn
$f_{cm7}$	=	Midlere trykkfasthet etter 7 døgn
$f_{cp}$	=	Trykkfasthet prisme
$f_{ct}$	=	Spaltestrekkfasthet etter 28 døgn
$f_{ctm}$	=	Midlere spaltestrekkfasthet etter 28 døgn
$G$	=	Geometrifaktor
$G_f$	=	Bruddenergi
$h$	=	Høyde
$L$	=	Sylinderlengde
$l_b$	=	Bruddlengde
$l_d$	=	Bryddybde
$m_a$	=	Masse i luft
$M_F$	=	Friksjonsmoment
$m_w$	=	Masse nedsenket i vann
$\nu$	=	Tverrkontraksjonstall
$P$	=	Trykkraft
$p$	=	Bidrag fra prismets vekt
$\rho$	=	Densitet
$\rho_{lc0}$	=	Ovnstørket densitet
$\rho_{lcs}$	=	Mettet densitet



---

$\rho_w$  = Densitet vann  
 $R$  = Lastrate  
 $s$  = Spenningsrate  
 $V$  = Volum  
 $W_0$  = Areal under last/def-kurven

ASR = Alkali-Silika-Reaksjon  
DIC = Digital Image Correlation  
DLWAC = Dry Light Weight Aggregate Concrete  
FLWAC = Fiber Light Weight Aggregate Concrete  
ITZ = Interfacial Transition Zone  
LVDT = Linear Variable Differential Transformer  
PVA = Polyvinyl Alcohol Fibers  
SG = Strain Gauge  
WLWAC = Wet Light Weight Aggregate Concrete

# Kapittel 1

## Introduksjon

Bruken av lettbetong har økt de siste hundre årene. Lettbetong blir brukt for å redusere vekten av konstruksjonen. Dette kan være kostnadsbesparende med tanke på redusert størrelse på tverrsnitt og fundamenter. I Norge blir lettbetong hovedsaklig brukt i broer med lange spenn og offshore-konstruksjoner. Det er det gode styrke/densitet-forholdet, samt god bestandighet, som gjør lettbetong godt egnet til slike formål. Den strukturelle duktiliteten til en betongkonstruksjon er hovedsaklig avgjort av armeringsdetaljeringsen, men betongens duktilitet er en viktig materialfaktor som det blir sett på i denne oppgaven. En ulempe med lettbetong er nettopp lav duktilitet, som gir et sprøtt og uforutsigbart brudd. Dette fører til at bruken av lettbetong er begrenset. En mer duktil betong vil gi forvarsel ved riss og nedbøyning før kollaps.

Lettbetongen som blir brukt i denne oppgaven har Stalite, med fraksjon  $\frac{1}{2}$  tomme, som tilslag. Stalite er ekspandert skifer som varmebehandles i roterovn. Tilslaget produseres i North Carolina, USA. Det har en annen porestruktur enn andre letttilslag, som gir andre absorpsjonsegenskaper. Absorpsjonsegenskapene påvirker herdeforløpet til betongen.

Oppgaven inngår som en del av forskningsprosjektet *Durable Advanced Concrete Structures, DACS*. Aktørene som er med i *DACS* er Kværner AS (prosjekteier), Norges forskningsråd, Axion AS (Stalite), AF Gruppen Norge AS, Concrete Structures AS, Mapei AS, Multiconsult AS, NorBetong AS, Norcem AS, Statens vegvesen, Veidekke Entreprenør AS, SINTEF Byggforsk, Skanska Norge AS, Unicon AS og Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Målet med *DACS* er å muliggjøre bærekraftige betongkonstruksjoner som takler miljøpåkjenninger i et arktisk-marint miljø. Prosjektet er delt inn i fire deler hvor denne oppgaven går inn under; *Ductile Lightweight Aggregate Concrete*.

### Oppgavens hensikt

Tidligere forskning under *DACS*-prosjektet har konkludert med at høyfast lettbetong med Stalite som tilslag har vist mer duktil oppførsel enn forventet [1]. Det har derfor blitt pekt på et behov for videre forskning på denne typen lettbetong, og da hovedsaklig duktilitet. Det har også blitt poengtert at hvis duktiliteten viser seg å være så god som resultatene tyder på, så bør lettbetong med Stalite i større grad brukes i konstruksjoner. Først i oppgaven vil en kort litteraturstudie av lettbetong presenters.

Hensikten med oppgaven er å se på forskjeller i lettbetongens duktilitet med bruk av tørr og vannmettet Stalite i et eksperimentelt arbeid. Det blir også utført tester på et mindre antall prøver med polyvinylalkoholfiber. I tillegg skal det også støpes terninger, sylindere og bjelker for å kartlegge materialegenskapene. Kravet for høyfasthets lettbetong er trykkstyrke over  $60 \text{ MPa}$  og densitet under  $2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

Duktilitet kan anses som betongens evne til å omlagre spenninger. Det er derfor valgt å utføre en tøyingsgradientstest, slik at ikke hele tverrsnittet er utsatt for like spenninger. Tøyningene måles ved bruk av LVDT-er, strekkklapper og DIC. Ved hjelp av disse blir en duktilitetsindeks (D %) bestemt. Ved kvalitativ visuell inspeksjon blir også bruddenes eksplosivitet og form vurdert.

På grunn av Stalites overflateporer forventes det at blandingen med tørr Stalite vil absorbere inn pasta i porestrukturen før herding. Dette vil føre til en sterkere ITZ (overgangssone mellom pasta og tilslag), som muligens gir en mer duktil betong. Det vil si at blandingen med tørr Stalite vil få større tøyning før den går til brudd enn den med vannmettet Stalite. Forskjellen mellom blandingene forventes å være liten. Fiberbetongen ventes derimot å få en betydelig mer duktil oppførsel. Det ventes også at bruddet for blandingen med tørr Stalite i større grad vil gå rundt Stalite-partiklene.

Resultatene blir sammenlignet med tilsvarende forsøk gjort på andre betongtyper.

# Kapittel 2

## Litteraturstudie lettbetong

Dette kapitlet gir en grov innføring i temaet lettbetong. Hovedfokuset ligger på hva som skiller lettbetong fra normalbetong både angående fasthet og bestandighet. Det vil fokuseres mest på letttilslaget Stalite, da det er dette tilslaget som brukes i forsøkene i denne oppgaven. Det er også lagt til litt informasjon om typen polyvinylalkoholfiber som brukes i enkelte av forsøkene.

### 2.1 Definisjon

Lettbetong blir hovedsaklig definert av densiteten. I mange standarder er definisjonen betong med en ovnstørket densitet under  $2000 \frac{kg}{m^3}$ . Det er mulig å lage lettbetong med en densitet mellom 300 og  $2000 \frac{kg}{m^3}$ . I den gamle betongstandarden NS 3473 ble lettbetong definert som betong med en ovnstørket densitet mellom 1200-2200  $\frac{kg}{m^3}$  [2].

Dimensjonering av lettbetong i Norge gjøres etter kapittel 11 i Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger [3].

### 2.2 Historie

Lettbetong er ikke noe nytt materiale. Helt tilbake til romertiden finnes det eksempler på bruk av betong med letttilslag. Deler av Colosseum og Pantheon er bygget av betong med tilslag av knust leire og pimpstein, som er lavabergarter med lav densitet. Men det er særlig i løpet av de siste 100 årene at bruken av lettbetong har tatt seg opp, først i USA. Under 2. verdenskrig ble over 100 amerikanske skip bygget av lettbetong. Denne suksessen førte til utvidet bruk også i broer og bygninger [4].

Fra og med 1990-tallet ble det populært å bygge konstruksjoner i lettbetong også i Norge, særlig broer og offshore-konstruksjoner. Bergsøysundbrua (1992), Nordhordaland skråstagbru (1993), Støvset bru (1993), Heidrun TLP (1995), Colosseum Park (1998) og Stolmasundet bru (1998) er alle eksempler på konstruksjoner hvor enten Liapor eller Leca er brukt som lettvektstilslag [5]. Kassetvernsnittsbroa Stolmasundet bru hadde, med

sitt spenn på 301m, verdensrekord i lengste brospenn for fritt frembygg-broer da den ble bygget [6]. I dag regnes Norge og Danmark som de landene i verden med høyest forbruk av lettvektstilslag per innbygger. Danmark anses som det europeiske fødestedet til Leca, et mye brukt letttilslag [4].

Det bør også nevnes at letttilslag ikke bare er brukt som tilslag i betong, men også som lett fyllmasse. Leca lettklinker (løs leca) ble i 1958 for første gang i Norge brukt på Drammensveien (E18) ved Sjølyst i Oslo. Leca i blir i dag brukt både som lett fyllmasse og drenerende og isolerende materiale. De viktigste funksjonene til Leca lettklinker er: stabilitetssikring, setningsreduksjon, jordtrykksreduksjon, kompensert fundamentering og frostsikring [7].

Det amerikanske lettvektstilslaget Stalite er relativt nytt i Norge, og foreløpig lite brukt. Men i 1998 ble Raftsundet bru i Lofoten bygget med Stalite, se figur 2.1. En av egenskapene til lettbetong med bruk av Stalite som tilslag, er muligheten for pumping. Denne egenskapen ble utnyttet i Raftsundet bru [5].



**Figur 2.1:** Fotografi av Raftsundet bru [8]

### 2.3 Letttilslag

Det skilles mellom naturlige og fabrikkfremstilte letttilslag. De fleste naturlige er vulkanske bergarter. Pimpstein og scoria, som kun er mekanisk behandlet i form av knusing og sikting, er eksempler på naturlige tilslag. Disse er mye brukt til husbygging på Island [4].

I Norge er det i hovedsak fabrikkfremstilte lettvektstilslag som blir brukt [9]. Disse grupperes ofte videre inn etter opprinnelsen til råmaterialet. Det kan være naturlige materialer, industrielle produkter eller industrielle biprodukter. For leire- og skifertilslag er det mest vanlig å fremstille tilslaget ved bruk av roterovn. Da varmes råstoffene opp til en tem-

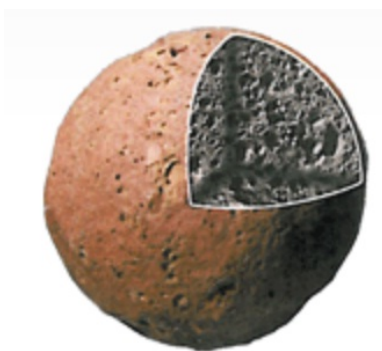
peratur på 1150-1400°C for å ekspandere. Det dannes da luftbobler inne i tilslagpartiklene, og det kan oppnås en densitet ned til  $250 \frac{kg}{m^3}$  [4].

Den høye porøsiteten medfører at lettilslaget har stor evne til å absorbere vann. De mest vanlige grovtilslagene som benyttes i Norge, vil i tørr tilstand kunne absorbere 5-10 % av sin egenvekt før betongen herder. Som en tommelfingerregel antas absorbert vann i den ferske fasen å tilsvare den vannmengden tilslaget absorberer i løpet av en time neddykket i vann. Å ikke ta hensyn til tilslagets absorpsjonsevne, kan få svært store konsekvenser, da opptil  $100 \frac{l}{m^3}$  vann kan absorberes dersom også fintilslaget har lav densitet. Dette dreier seg i hovedsak om konsistensproblemer, slumtap og setning av betongen etter støp. I noen tilfeller kan også økt fare for oppsprekking på grunn av plastisk svinn være et problem [9].

Så lenge vannabsorpsjonen i lettilslaget er tatt hensyn til ved proporsjoneringen, er det ikke påvist at det har negativ påvirkning på bestandigheten. Tvert imot kan vannreservoarene i lettilslaget bidra til "intern herding", og påvirke både fasthetsutviklingen og bestandigheten positivt. En må riktignok være klar over at de nevnte vannreservoarene vil kunne mate sementpastaen med fuktighet og føre til lang uttørkningstid. Dette kan være kritisk dersom det for eksempel skal legges gulvbelegg, og fremdriften i byggeprosessen derfor ikke tillater en lengre tørkeperiode [9].

### 2.3.1 Leca

Leca står for Light Expanded Clay Aggregate, direkte oversatt lett ekspandert leiretilslag. Det produseres i Norge, og har vært mye brukt som lettilslag. Fra slutten av 1980-tallet ble det også mulig å produsere høyfasthets lettbetong med Leca. Det førte til at en rekke innovative konstruksjoner innen offshore og bro. For eksempel Eidsvoll Sundbro (1992), Nordhordalandsbroa (skråstagbru, 1994), Troll oljeplattform (1996) og Stolmasundet bru (fritt frembygg, 1998) [9]. Leca kan produseres med densitet mellom 250 og  $800 \frac{kg}{m^3}$  og har en absorpsjonsevne på 7-41 % av sin egenvekt etter 24 timer i vann [4]. Leca er kuleformet, se figur 2.2.



Figur 2.2: Leca [10]

### 2.3.2 Liapor

Liapor er også, som Leca, et ekspandert leireprodukt som kommer i ulike densitets- og fasthetsklasser. Disse er i samme størrelsesorden som Leca,  $250-800 \frac{kg}{m^3}$  [4]. Det produseres i Tyskland og har i likhet med Leca blitt brukt i flere grensesprengende bro- og offshore-prosjekter. For eksempel Sandhornøya bru (1989), Boknasundet bru (1991), Støvset bru (1993), pontonger for Bergsøysundet (1992) og Nordhordalandsbrua (flytebru 1994) og Heidrun flytende plattform (1995) [9]. Absorpsjonsevnen til Liapor er på 15-25 % av sin egenvekt etter 24 timer i vann [11]. Også Liapor er kuleformet, se figur 2.3.



Figur 2.3: Snitt av Liapor og Liapor [12]

### 2.3.3 Lytag

Det engelske letttilslaget Lytag er lite eller aldri brukt i Norge, men nevnes likevel grunnet omfattende bruk i England og på kontinentet. Et eksempel på dette er Westminster bridge i London (1998). Lytag er et avfallsprodukt fra kullfyrte kraftverk. Det produseres bare med densitet  $800 \frac{kg}{m^3}$ , og har noe lavere fasthet enn Leca og Liapor med tilsvarende densitet [9]. Absorpsjonsevnen til Lytag er 13-14 % av sin egenvekt etter 24 timer i vann [11]. Lytag har en noe mer ruflete form enn Liapor, men er likevel ganske kuleformet, se figur 2.4.



Figur 2.4: Lytag [13]

## 2.4 Stalite

Stalite er et letttilslag bestående av ekspandert skifer produsert i roterovn. Foreløpig er det kun et område øst for Charlotte i North Carolina USA hvor man finner skifer med de egenskapene som trengs for produksjon av Stalite [14]. Stalite har en densitet rundt  $800 \frac{kg}{m^3}$  [15]. Raftsundet bro er bygget med stalite og betongen har en densitet rett under 2000

$\frac{kg}{m^3}$ , altså helt på grensen til hva som kan kalles lettbetong [16]. Figur 2.5 viser at Stalite har en mer kantete/ruflete overflate enn de andre letttilslagene. Dette kan være med på å gi en sterkere ITZ.



**Figur 2.5:** Snitt av Stalite [17]

### 2.4.1 Produksjon

Ved produksjon av Stalite er det først og fremst viktig å prøvebore og analysere prøvene for å finne riktig råmateriale. Deretter knuses råmaterialet til optimal størrelse og oppbevares i silo. Selve produksjonen går ut på å forvarme materialene før de føres inn i en roterovn. Roterovnen er vinklet med en liten helning og materialene beveger seg langsomt mot høyeste temperatur på 1200 °C. Målene på roterovnen er 3,4 m i diameter og lengden er 49 m. Ved oppvarming til 1200 °C blir skiferen tilstrekkelig plastisk til at det oppstår ekspanderte gasser som lagres i små usammenhengende porer. Deretter kjøles materialet slik at porene vedvarer, dette gir lavere egenvekt og relativt lav absorpsjonsevne er oppnådd. Kjølingen skjer med luft, og ikke vann, for å hindre mulig krystallisering. Til slutt knuses materialet til de ulike fraksjonene 0-4.75 mm (finstoff), 9.5 mm 12.5 mm og 18 mm [14, 18].

### 2.4.2 Pumpbarhet

Lettbetong har tradisjonelt ikke vært egnet for pumping. Problemene oppstår på grunn av høyt trykk under pumping. Trykket vil kunne føre til ansamling av vann og luftblærer på tilslagsoverflaten, som gir utslag på den herdede betongen. I tillegg vil trykket kunne bidra til å presse vannet i den ferske betongen inn i porene i tilslaget. Dette kan føre til proppdannelse i slangen. I nyere tider har det blitt gjort forsøk for å undersøke mulighetene for å pumpe lettbetong. Tidligere forsøk viser at lettbetong med Leca 600 og 700 ikke kan pumpes [19]. Statens vegvesen gjorde en rekke forsøk for Raftsundbroen som viste at både Liapor, Leca 800 og Stalite er pumpbare, hvis enkelte egenskaper er oppfylt. Leca 800 krever forfuktet tilslag og redusert pumpetrykk. Liapor og Stalite må være vannmettet på grunn av den åpne porestrukturen. Carolina Stalite Company anbefaler at Stalite er har en vannmettingsgrad på 6 % av massen når det skal pumpes [20]. Det er dokumentert ved fullskalaforsøk på lettbetong med Stalite som tilslag at pumping med et pumpetrykk på 300 bar (85 bar overført på betongen) ikke har negativ innvirkning på betongens mikrostruktur [19]. Ved bygging av Raftsundet bro ble pumping av Stalite-betong benyttet. Det var



ingen indikasjoner på at pumpingen hadde noen innvirkning på verken fastheten eller bestandigheten [16].

### 2.4.3 Porestruktur og absorpsjon

Stalite skiller seg fra de andre lettilslagene med tanke på porestrukturen. 12,5 mm fraksjonen til Stalite har en absorpsjonsprosent på 3,4 % av sin egen tørrvekt ved neddykking i en time, 6,6 % etter 24 timer og 8 % tilsvarer mettet tilstand [21]. Den totale absorpsjonen er altså lavere enn for andre lettilslag. Porene som fylles ligger i hovedsak på overflaten av tilslagspartiklene. Kun enkelte porer innover i partiklene som er sammenkoblet med mikroriss, vil kunne bli fylt med væske. Andre lettilslag vil i større grad absorbere væske gjennom hele tilslagspartiklene.

## 2.5 Egenskaper

Letttilslaget gir betongen andre egenskaper enn normalttilslag, noen er gunstige, mens andre er ugunstige. Under er det en gjennomgang av både de mekaniske egenskapene og bestandigheten til lettbetong.

### Trykkfasthet

Tilslaget i normalbetong har betraktelig større styrke og stivhet en pastaen. Dette gjør at tilslaget tar opp størsteparten av spenningene i betongen. Når betongen går til brudd, går bruddflaten oftest i pastaen [9].

Lettbetong har i motsetning til normalbetong tilslag og pasta med omtrent samme styrke og stivhet. Dette fører til at spenningene blir fordelt jevnere. Bruddflaten vil gå gjennom både pastaen og tilslaget. Hvis man forandrer forholdet mellom tilslag og pasta, vil det ha mindre utslag på styrken i lettbetong enn for normalbetong [9].

Høyfasthets-lettbetong defineres som lettbetong med sylindrefasthet større enn 60 MPa [22]. Det er ikke noe problem å lage lettbetong med fasthet over 70 MPa [16]. Det er liten forskjell i fasthetsutviklingen til lettbetong i forhold til normalbetong etter 48 timer [23].

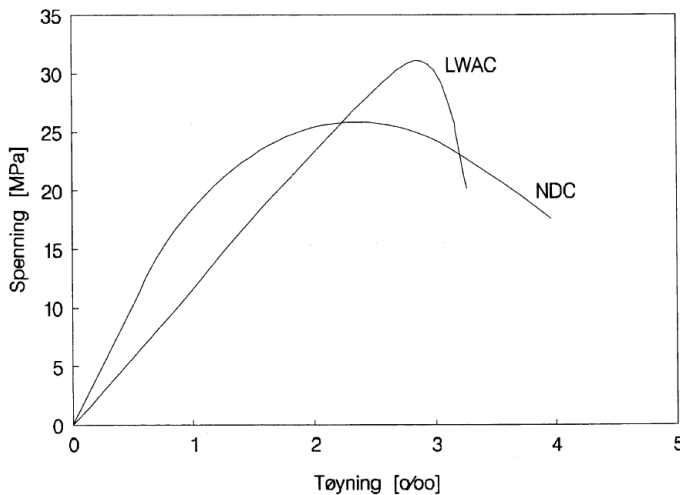
### Strekkfasthet

Strekkfastheten er avhengig av samvirket mellom delmaterialene i betongen. Lettilslag har en strekkfasthet som er lavere enn strekkfastheten til normalttilslag. Strekkfastheten til lettilslag er i samme størrelsesorden som strekkfastheten til pastaen. Noen typer lettbetong har bedre ITZ, som gir bedre heft mellom pasta og tilslag. På grunn av denne gode overgangsonen er det ikke store forskjeller i strekkfastheten mellom normal- og lettbetong. Forskjellen blir større for betong med lav fasthet [9].

### Arbeidsdiagram

E-modulen er en avhengig av tilslag- og pasta-stivhet, og volumforholdet mellom disse. En typisk E-modul for lettbetongtilslag ligger mellom 5000-15000 MPa. For fasthetsklasser LC15 og oppover ligger E-modulen mellom 1000-26000 MPa avhengig av type lettilslag,

trykkfasthet og densitet [9]. Høyfasthetslettbetong med Stalite har en E-modul rundt 24000 MPa [1].



**Figur 2.6:** Arbeidsdiagram for normalbetong (NDC) og lettbetong (LWAC)[9]

Figur 2.6 sammenligner arbeidsdiagrammene til lettbetong og normalbetong. Den elastiske delen er mer lineær for lettbetong. I plastisk fase faller grafen til lettbetong raskt og går raskt til brudd. Dette beskriver en sprø oppførsel. Man vil forvente et plutselig brudd. Normalbetong forandrer seg mer gradvis og vil deformere seg mer før brudd oppstår.

Lettbetong tåler svinn og termiske effekter bedre enn normalbetong på grunn av lavere E-modul [9].

### Bruddenergi

Forsøk på bruddenergi gir ikke entydige resultater for forholdet mellom bruddenergien til lettbetong og normalbetong. Forskning spriker fra å si at lettbetong har 50 % lavere bruddenergi enn normalbetong, til at lettbetong og normalbetong har samme bruddenergi [4].

### Kryp

Kryp er en tidsavhengig deformasjon. Den blir forårsaket av at pasta komprimeres og en større andel av spenningene tas opp av tilslaget. Kryphastigheten vil derfor avta over tid. Lettilslag med lavere stivhet vil derfor få større kryp. Krypforskjellen mellom normalbetong og lettbetong blir mindre når fastheten øker. I NS 3473 antas kryp å være det samme for lettbetong og normalbetong når densiteten til betongen er større enn  $1800 \frac{kg}{m^3}$  [6, 9].

### Svinn

Lettbetong med lav kvalitet har større svinn enn normalbetong, men med økende kvalitet

blir forskjellen mindre. Forsøk viser at svinn skjer langsommere i lettbetong. Dette er fordi porene i letttilslaget lagrer vann og gir pastaen nytt vann når det tørker ut. Denne effekten er gunstig med tanke på faren for svinnriss [6, 9].

### **Termisk utvidelseskoeffisient**

Lettbetong har lavere termisk utvidelseskoeffisient enn normalbetong med lik styrke. Forsøk har vist at koeffisienten er mellom 80% – 65% av normalbetong [6]. Lettbetong har også bedre isoleringsevne, som gjør at betongen vil holde bedre på temperaturen. Med disse egenskapene vil spenningene som oppstår på grunn av temperatur være lavere enn for normalbetong [4].

### **Utmatting**

Forsøk har vist at lettbetong har like gode utmattingsegenskaper som normalbetong når densiteten er over  $1500 \frac{kg}{m^3}$ . Lettbetong er noe bedre på høyere lastnivå, og noe dårligere på lavere lastnivå [9].

### **Porøsitet/permeabilitet**

Betongens vannabsorpsjon styres av porestrukturen, størrelsesfordelingen og tilslagets overflate. Som tidligere nevnt, har letttilslag en større evne til å absorbere vann på grunn av sin høye porøsitet og permeabilitet. Dette fører til en mer velhydrert betong. Denne effekten reduserer også autogent svinn. Sementpastaen binder seg bedre til letttilslag enn normalttilslag, spesielt til Stalite på grunn av den åpne og ruge overflaten, og gir en sterkere ITZ. Dette bidrar til lav permeabilitet i lettbetong. Lettbetong med høye fasthetsklasser har vist seg å være minst like tett som normalbetong med tilsvarende fasthet [6, 9].

### **Frostbestandighet**

Frostmotstand i betong er avhengig av sammensetningen av pasta, type tilslag, fukt- og luftinnhold. Lettbetong har god frostbestandighet på grunn av letttilslagets porøsitet. Porevolumet har evnen til å ta opp volumøkningen når vannet fryser. Lettbetong med god kvalitet vil ha like god eller bedre frostbestandighet enn tilsvarende normalbetong [9].

### **Karbonatisering**

Letttilslag har større porøsitet enn normalttilslag, men så lenge porene innkapsles av sementmørtel vil ikke lettbetong ha større transport av karbondioksid enn normalbetong. Ved lave fasthetsklasser vil karbonatiseringen gå noe raskere [9].

### **Kloridintrengning**

For lettbetong med høy fasthet er kloridintrengningen omtrent lik som for normalbetong med samme fasthet. Ved lave fasthetsklasser kan inntringningshastigheten være noe raskere i tidlig alder [9].

### Alkalisilikareaksjon

For at ASR skal oppstå trenger man reaktivt tilslag, alkalier og tilstrekkelig med fuktighet. SINTEF har vist at Stalite, Leca og Liapor alle har en kjemisk/mineralogisk sammensetning som gjør at de kan være alkalieraktive. Hvis forholdene ligger til rette med tilstrekkelig alkalimengde og tilstrekkelig fukt, vil ASR kunne oppstå [24]. Stalite er gunstig med tanke på porestruktur og god ITZ som fører til lav transport av fukt, og gir dermed mindre sjanse for ASR.

### Brann

Oppførselen til lettbetong i brann i forhold til normalbetong, er avhengig av type brann som oppstår. I hydrokarbonbrann med høy temperatur og rask temperaturstigning er normalbetong mer egnet på grunn av mindre avskalling. I en cellulosebrann med lavere temperatur og saktere temperaturstigning vil lettbetong være bedre på grunn av lavere spenningsoppbygninger mellom mørtel og tilslag. Dette skyldes likere E-modul i tilsalg og pasta. Lettbetongen vil også ha en bedre evne til å beskytte armeringen over lengre tid [9].

## 2.6 Duktilitetsindeks

Duktilitetsindeksen beskriver hvor mye arbeidsdiagrammet fraviker fra linearitet. Det reflekterer derfor også mengden mikrosprekking i betongen før maks last er nådd. Mikrosprekking påvirker betongoppførselen positivt ved å redusere sjansen for plutselig brudd dannet ved oppspreking langs armering eller avskalling av overdekningen. Økt duktilitet gir større deformasjoner før brudd og kan øke bruddkapasitet. Det er derfor en viktig materialegenskap med tanke på betongens motstand mot forskjellige laster og forvarsel før brudd. Duktilitetsindeksen blir bestemt med følgende formel [25]:

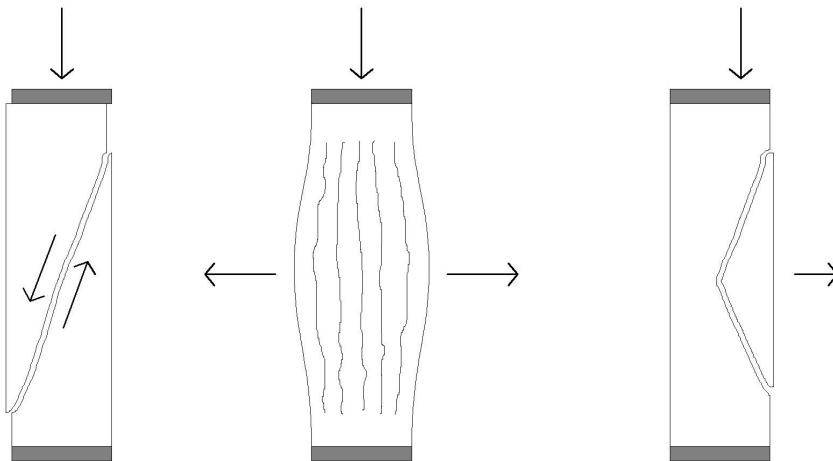
$$D = \frac{\epsilon_{cu} - \epsilon_{el}}{\epsilon_{el}} * 100\%$$

hvor:

- $\epsilon_{cu}$  plastisk tøyning;
- $\epsilon_{el}$  elastisk tøyning.

## 2.7 Bruddtyper

Et betongprisme utsatt for aksialt trykk vil antageligvis enten gå til et skrått skjærbrudd eller et langsgående strekkbrudd, se figur 2.7. Ved eksentrisk belastning forventes det at bruddet er begrenset til den mest belastede siden.

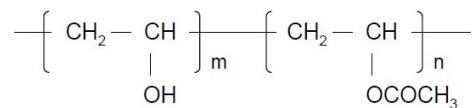


**Figur 2.7:** Skisse av skrått skjærbrudd (til venstre), langsgående strekkbrudd (i midten) og langsgående strekkbrudd ved eksentrisk belastning (til høyre)

For å kunne si noe om hvordan bruddet vil oppstå, må egenskapene til tilslaget, pastaen og ITZ studeres [26]. Som tidligere nevnt har lettbetong i noen tilfeller en sterkere ITZ enn normalbetong, og letttilslag har lavere stivhet enn normalttilslag. Derfor vil det ikke alltid være ITZ som er svakest leddet i betongen. Mikrorissene vil kunne spre seg til flere deler av betongen. På grunn av tilnærmet lik stivhet gjennom hele lettbetongen vil det oppstå færre, og mer dominerende riss. Dette er en forklaring på at lettbetong har et plutselig, eksplosivt brudd [4].

## 2.8 PVA-Fiber

PVA står for Polyvinyl alcohol fibers og er en type fiberarmering laget av Kuralon Co. Fiberene har den kjemiske oppbyggingen som er vist i figur 2.8.



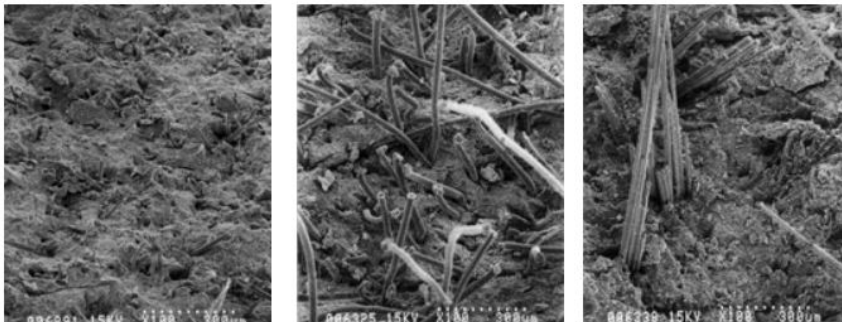
**Figur 2.8:** Kjemisk oppbygging av PVA-fiber [27]

Fiberene har høy fasthet, høy E-modul, liten lengdeutvidelse, lav vekt, god heft med betongen og god motstand mot alkalier. I tabell 2.1 kan man se en sammenligning av forskjellige typer fiberarmeringer [27].

**Tabell 2.1:** Egenskaper for ulike typer fiberarmering [27]

Fiber	Strekkapasitet <i>MPa</i>	Folengelse %	E-modul <i>GPa</i>	Densitet [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
Kuralon	880 - 1600	6	25 - 41	1300
Polypropylen	400	25	5	910
Stålfiber	1200	3-4	200	7900
AR-Glass	2200	0-4	80	2700

I denne oppgaven blir Kuralon-fiber brukt. De andre typene har alle sine svakheter. Polypropylen flyter i vann og kan derfor være vanskelig å fordele i betongen, stålfiber rustet samt har høy densitet og AR-Glass reagerer med alkalier [27]. Kuralon har også bedre heft enn Polypropylen og ARG, se figur 2.9. Når man ser på bruddflatene, ser man at Kuralon-fiberene er fullstendig avrevet mens de andre er trukket ut av betongen [28].

**Figur 2.9:** Bruddflater, til venstre Kuralon, i midten Polypropylen og til høyre ARG [28]

PVA fiberarmering øker duktiliteten til betongen. Fibrene tar ikke opp den opprinnelige spenningen ved oppsprekking, men etter at sprekke har oppstått, og betongen i seg selv begynner å miste fastheten, tar de spenningene. På grunn av den gode heften kan fibrene virke fastholdene mellom sprekker og hindre sprekke i å bli større, og de fører til at betongen kan tøyes lengre uten å gå til brudd. Det vil si at fiberene forbedrer kapasiteten til betongen i deformert tilstand. Den fiberarmeringen som brukes i denne oppgaven kan redusere faren for sprekker fra kryp med opp til 50 % [27].

Det finnes en rekke typer PVA-fiber. I denne oppgaven brukes den som heter RSC15/8mm. Den har en diameter på 40  $\mu m$ , en lengde på 8 mm, strekkapasitet på 1,4 *GPa* og E-modul på 36 *GPa* [27], se figur 2.10.



**Figur 2.10:** Til venstre er det et bilde som illustrer lengden av fiberarmeringen og til høyre er et bilde av betong med fiberarmering.

# Kapittel 3

## Metode

Dette kapittelet omhandler fremgang ved planlegging og utførelse av forsøkene. Kapittelet er delt inn i tre deler; materialer, småskala og fullskala.

### 3.1 Materialer

Dette kapittelet beskriver hvordan egenskaper til tilslaget ble målt. Videre forklares prosedyren ved blanding av betong. Til slutt presenteres endelige resepter for blandingene med tørr Stalite, vannmettet Stalite og fiberarmering. I Vedlegg C finnes resultater, siktekurver og resepter.

#### 3.1.1 Fuktinhold i Stalite

For å bestemme fuktinnholdet i tilslaget ble prøver på cirka 4000 g tatt fra midten av tilslagssekken og veid. Deretter ble de tørket i 24 timer i en ovn på 110°C og veid på nytt. Differansen i masse tilsvarer fuktinnholdet.





**Figur 3.1:** Veiing av tørket Stalite

### 3.1.2 Forfukting av Stalite

En god uke før støpingen av betongen med vannmettet Stalite, ble Staliten lagt i plastsekker som ble fylt med vann. Forskning utført av Carolina Stalite Company og resultater fra egne forsøk, viser at en uke neddykking er tilstrekkelig for at Stalite skal være tilnærmet fullstendig vannmettet [21]. Før den vannmettede Staliten ble brukt i blandingen, ble den overflatetørket. Det ble nøye kontrollert at det ikke var vann på overflaten av tilslagspartiklene. Eventuelt overflatevann ble tørket bort med bruk av håndklær.

### 3.1.3 Siktekurve for Stalite

Tørkede prøver som hadde vært brukt til å måle fuktinnhold ble deretter brukt til å utarbeide siktekurven for blandingen med tørr Stalite. Det ble gjort i henhold til *NS-EN 933-1:2012 Prøvmingsmetoder for geometriske egenskaper for tilslag, Del 1: Bestemmelse av kornstørrelsefordeling, Sikteanalyse* [29]. Det ble brukt mekanisk risting. Et gjennomsnitt av to siktekurver ble regnet ut og brukt i resepten.

I prosessen med å vannmette Stalite ble en del av finstoffet tørket bort i forbindelse med overflatetørkningen. Noe finstoff ble også liggende igjen i plastsekkene som ble brukt til vannmettingen. Dette førte til en endret siktekurve i forhold til tørr Stalite. Derfor ble det utarbeidet en egen siktekurve for Stalite som har vært vannmettet eller "vasket". Prøven som ble brukt til dette ble også tørket i varmeskap på 110°C før sikting. Siktingen ble gjort i henhold til *NS-EN 933-1:2012 Prøvmingsmetoder for geometriske egenskaper for tilslag, Del 1: Bestemmelse av kornstørrelsefordeling, Sikteanalyse* [29]. Det ble brukt mekanisk risting.

### 3.1.4 Absorpsjon i Stalite

Partiklene med størrelse over 4 mm fra den ene siktekurveprøven, ble brukt til å bestemme absorpsjonen. Prøven ble vasket i en 4 mm sikt for å få bort støv. Prøven ble så tørket i en ovn på 110°C over en helg og så veid. Deretter ble tilslaget neddykket i vann. Hvert påfølgende døgn ble tilslaget overflatetørket, veid og lagt ned i vannbadet igjen. Dette ble gjort fire dager. Metoden er utført i henhold til ASTM C127-15 [30].

### 3.1.5 Egenskaper for sand

Siktekurve og absorpsjonsevne for både Årdal 0/8 mm og Ramlo 0/2 mm nat. vask var oppgitt fra leverandøren. Samme dag som det ble blandet betong, ble fuktinnholdet i sandfraksjonene målt. For å bestemme fuktinnholdet i sanden ble prøver på cirka 200 g tatt fra midten av tilslagssekkene og veid. Deretter ble de tørket i 15 minutter på en kokeplate og veid på nytt. Differansen i masse tilsvarende fuktinnholdet.

### 3.1.6 Blandeprosedyre og resept

Skanskas regneark *Proporsjonering av betong* ble brukt for å utarbeide reseptene. For å være mest mulig sikker på å oppnå god betong ble det først blandet to prøveblandinger på ca 10 liter. En med tørr Stalite, og en med vannmettet Stalite. Det ble ikke utført prøveblending for betongen med fiberarmering. Prøveblandingen ble utført med følgende tørrblandingsprosedyre:

- 1 min tørrblending;
- 2 min våtblending;
- 2 min hvile;
- 1 min blanding.

Først ble prøveblandingen med tørr tilslag laget. Den hadde volum på 9,5 liter. Det ble utført synkmålttest og måling av densitet. Alle synkmålttester ble gjort som beskrevet i *NS-EN 12350-2:2009, Prøving av fersk betong, Del 2: Synkmål* [31]. Deretter ble det laget en prøveblending på 8 liter med vannmettet Stalite. Figur 3.2 er et fotografi av synkmålttesten for den andre prøveblandingen. Siden densiteten var godt under  $2000 \frac{kg}{m^3}$  for den første prøveblandingen, var det ikke nødvendig å sjekke densitet til den andre blandingen.



**Figur 3.2:** Synkmåltest

Begge blandingene hadde høye synkmål, over 20 cm. Særlig blandingen med tørt tilslag viste tegn til segregering og blødning. Derfor ble det bestemt å endre reseptene slik at synkmålet ble litt mindre. Blandingene vil fortsatt ha god nok bearbeidbarhet og lavere risiko for segregering og blødning.

Hovedblandingene med tørt Stalite ble blandet med samme blandedprosedyre som for prøveblandingene. For blandingen med vannmettet Stalite ble det brukt en annen prosedyre. For at fuktigheten i Staliten ikke skulle reagere med sementen før vannet ble tilsatt, ble Stalite først tilsatt etter at blandingen hadde startet. Våtblending ble ikke brukt fordi man var redd for at Staliten bare ville holde seg i den øvre delen av massen under blandingen. Denne effekten ville kunne oppstå fordi Staliten er lettere enn pastaen, og det ble brukt en horisontalblander. Derfor ble det brukt en variant av tørrblending. Blandeprosedyren var som følger:

Sement, sand og silica ligger i blanderen. Stalite tilsettes under omrøring;

1 min alt vann deretter superplastiserende tilsettes under omrøring;

1 min blanding;

2 min hvile;

1 min ekstra superplastiserende tilsettes.

For betongblandingen med fiberarmering ble det brukt vannmettet Stalite. På slutten av blandedprosedyren ble bearbeidbarheten vurdert og ekstra superplastiserende tilsatt og blandet i et minutt etter tilsetning. Blandingen ble utført med følgende prosedyre:

- 30 sek tørt ekskludert Stalite;
- 30 sek 70 % av vannet og 70 % av superplastiserende tilsettes under omrøring;
- 1 min blanding;
- 1 min fiber tilsettes rolig under omrøring;
- 1 min resten av vann og resten av superplastiserende tilsettes under omrøring;
- 1 min blanding;
- 1 min Stalite tilsettes under omrøring;
- 2 min blanding;
- 1 min ettertilsetning av ekstra superplastiserende.

Basert på regnearket fra Skanska og justeringen gjort på bakgrunn av prøveblandningene ble reseptene for hovedblandningene som presentert i tabell 3.1. Det presiseres at dette er oppveid resept, inkludert aktuelt fuktinnhold. I tabeller vil forkortelsene DLWAC (Dry Light Weight Aggregate Concrete) bli brukt for blandingen med tørr Stalite, WLWAC (Wet Light Weight Aggregate Concrete) for blandingen med vannmettet Stalite og FLWAC (Fiber Light Weight Aggregate Concrete) for blandingen med fiber.

**Tabell 3.1:** Endelig oppveid resept, oppgitt for 1 m<sup>3</sup> blanding

Bestanddel	DLWAC	WLWAC	FLWAC
Benevning	[ $\frac{kg}{m^3}$ ]	[ $\frac{kg}{m^3}$ ]	[ $\frac{kg}{m^3}$ ]
Norcem Anlegg FA	440,7	438,6	397,5
Elkem Mikrosillica	23,2	23,2	20,9
Fritt vann	159,5	138,2	134,6
Absorbert vann	6,1	6,3	7,3
Sand Årdal 0/8 mm	549,0	584,0	545,0
Sand Ramlo 0/2 mm nat. Vask	240,2	249,3	396,3
Stalite 1/2"	513,6	528,8	495,0
Mapei Dynamon SR-N	3,3	3,9	6,2
Fiber (Kuralon PVA 8 mm)	0,0	0,0	6,5

## 3.2 Småskala

Det ble laget terninger, sylindre og bruddenergibjelker for å bestemme materialparametre og kvalitetsikre betongen. Parametrene som ble bestemt var trykkfasthet, spaltstrekkfasthet, E-modul, tverrkontraksjon, densitet og bruddenergi. Tabell 3.2 viser en oversikt over

prøvestykkene. Dette kapitlet beskriver hvordan prøvestykkene ble produsert, lagret og testet. Oversikt over tester, når de ble utført og resultater, finnes i Vedlegg B.

**Tabell 3.2:** Småskalaprøver

	<b>Tørr Stalite</b>	<b>Vannmettet Stalite</b>	<b>Fiber</b>
Terninger	18	18	6
Sylinder	12	12	3
Bruddenergibjelker	2	2	0

### 3.2.1 Terning

For å bestemme betongens trykkfasthet, ble det brukt standard terninger med lengde, bredde og høyde på 100 mm. For blandingene uten fiber ble terninger testet etter 7, 14, 28 og 60 døgn. På grunn av et mindre antall terninger med fiberbetong ble de testet etter 7 og 28 døgn. Resten ble testet samtidig som prismene. Dette gir et bilde på fasthetsutviklingen og styrken på den aktuelle testdagen. Testene ble utført som beskrevet i *NS-EN 12390-3:2009 Prøving av herdnet betong Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet* [32]. Det ble brukt en *ToniTechnik* testmaskin, se figur 3.3.



**Figur 3.3:** Trykkfasthetstest terning

Resultatene ble registrert og trykkfastheten ble deretter regnet ut med følgende formel

[32]:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

hvor:

- $f_c$  er trykkfasthet [ $Nmm^2$ ];
- $F$  er bruddlast [ $N$ ];
- $A_c$  er tverrsnittsareal [ $mm^2$ ].

### 3.2.2 Sylindrer

Sylindrene ble støpt med standardmål på 100 mm i diameter og høyde 200 mm. Sylindrene ble brukt til å bestemme spaltestrekkfasthet ved 28 døgn og trykkfastheten etter 28 og 60 døgn.

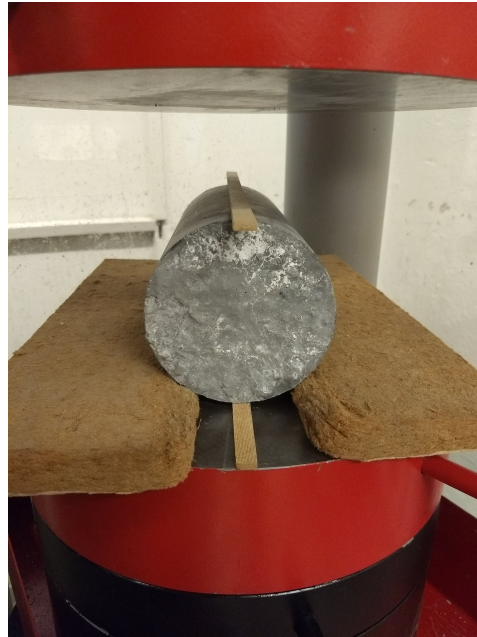
Trykktestene ble utført i henhold til *NS-EN 12390-2:2009: Prøving av herdet betong, Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet*, identisk som for terningene [32]. Begge endene av sylindrene ble slipt før testen ble utført, for å oppnå flate og glatte ender. Det ble brukt en *Toni Technik* testmaskin, se figur 3.4.



**Figur 3.4:** Trykkfasthetstest sylindrer

Trykkfastheten  $f_c$  ble funnet med samme formel som for terningene.

Spaltestrekktestene ble utført i henhold til *NS-EN 12390-6:2009: Prøving av herdet betong, Del 6:Prøvelegemers spaltestrekkfasthet* [33]. Sylinderne ble plassert sentrisk i forhold til lasten ved bruk av en tynn strips på under- og oversiden i testmaskinen *ToniTechnik*, se figur 3.5. Testen ble utført og bruddlasten ble registrert. Sylinderne som ble brukt i spaltestrekktestene ble ikke slipt, slik at høyden forble 200 mm.



**Figur 3.5:** Spaltestrekkfasthetstest

Lastraten ble bestemt med følgende formel [33]:

$$R = s * \pi * L * \frac{d}{2}$$

hvor:

- $R$  er nødvendig lastrate [ $\frac{N}{s}$ ];
- $L$  er lengden av sylinderen [mm];
- $d$  er sylinderdiameteren [mm];
- $s$  er spenningsraten [ $\frac{MPa}{s}$ ].

Spaltestrekkfastheten ble bestemt med følgende formel [33]:

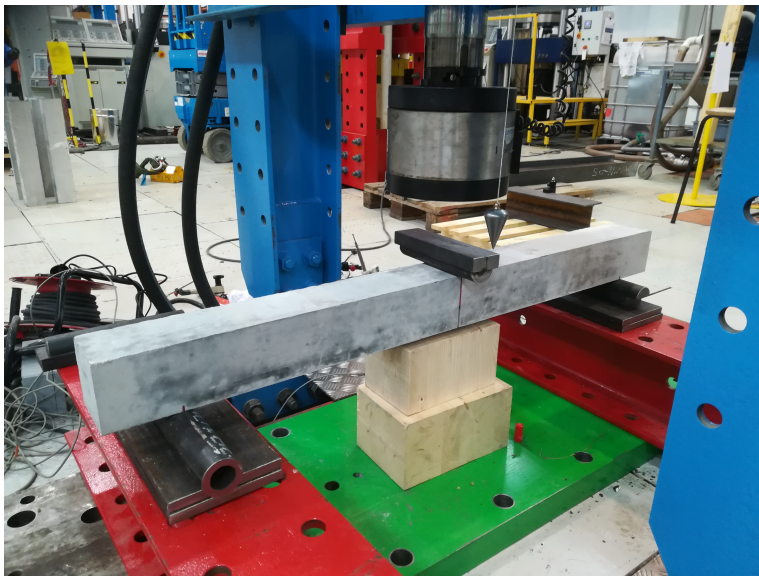
$$f_{ct} = 2 * \frac{F}{\pi * L * d}$$

hvor:

- $f_{ct}$  er spaltestrekkfastheten [ $MPa$ ];  
 $F$  er maksimal last [ $N$ ];  
 $L$  er lengden av sylindere [ $mm$ ];  
 $d$  er sylinderdiameteren [ $mm$ ].

### 3.2.3 Bruddenergibjelker

SINTEFs metode *Bruddenergi ved 3-punkts prøving av prismer med kjerv* ble benyttet for bestemmelse av bruddenergi [34]. To uarmerte bjelker med mål  $100 \times 100 \times 1200$  mm ble laget for hver av blandingene uten fiber. Disse ble støpt i ferdige støpeformer smurt med formolje. Figur 3.6 viser hvordan testoppsettet så ut.



Figur 3.6: Bruddenergibjelker

På bakgrunn av resultatene ble bruddenergien bestemt med følgende formel [34]:

$$G_f = \frac{W_0 + 2 * 0.4 * p * 9.81 * \delta}{b * h}$$

hvor:

- $G_f$  er bruddenergi [ $\frac{Nm}{m^2}$ ]  
 $W_0$  er arealet under last/deformasjonskurven [ $Nm$ ];  
 $\delta$  er deformasjonen ved brudd, målt midt på prismet [ $m$ ];  
 $p$  er bidraget fra prismets vekt [ $kg$ ];



- $b$  er prismebredden i brudd [ $m$ ];  
 $h$  er prismehøyden ekskludert kjerv i brudd [ $m$ ].

### 3.2.4 Densitet

Densiteten til terninger og sylindere blir bestemt som beskrevet i *NS-EN 12390-7:2009 Prøving av herdnet betong Del 7: Densitet av herdnet betong*. Standarden beskriver flere metoder for å bestemme densitet. I dette forsøket ble vannfortrengingsmetoden anvendt. Volumet av terningen ble funnet med ligningen [35]:

$$V = \frac{m_a - m_w}{\rho_w}$$

hvor:

- $V$  er volum av prøvestykke [ $m^3$ ];  
 $m_a$  er prøvens masse i luft [ $kg$ ];  
 $m_w$  er prøvens masse nedsenket i vann [ $kg$ ];  
 $\rho_w$  er densiteten til vann, ved 20°C [ $998 \frac{kg}{m^3}$ ].

Den samme vekten ble brukt til måling av masse over og under vann. Prøvens densitet ble deretter bestemt med formelen [35]:

$$\rho = \frac{m_a}{V}$$

hvor:

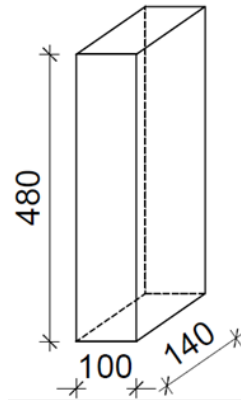
- $\rho$  er prøvens densitet [ $\frac{kg}{m^3}$ ];  
 $m_a$  er prøvens masse i luft [ $kg$ ];  
 $V$  er volum av prøvestykke [ $m^3$ ].

$m_a$  gir den mettede densiteten. I Eurokoden blir betong for det meste klassifisert av ovenstående densitet. De sylindrene som ble brukt til spaltestrekktestene ble deretter brukt til å bestemme den ovenstående densiteten. Forsøkene ble gjort som beskrevet i *NS-EN 12390-7:2009 Prøving av herdnet betong Del 7: Densitet av herdnet betong* [35].

## 3.3 Fullskala

For begge betongblandingene uten fiber ble det støpt tolv prizmer, hvorav ni fra hver ble testet. Det ble også støpt og testet tre prizmer med fiber. Prismene hadde mål 100 mm x 140 mm x 480 mm, se figur 3.7, og ble testet til brudd under trykkbelastning. Belastningen

ble variert ved å bli påført sentrisk og med to ulike eksentrisiteter, se tabell 3.3, for å oppnå en tøyingsgradient. Dette kapittelet beskriver hvordan prismene ble produsert, lagret og testet. Det inneholder også en beskrivelse av hvordan spenningene i prismene ble anslått på forhånd gjennom håndberegninger.



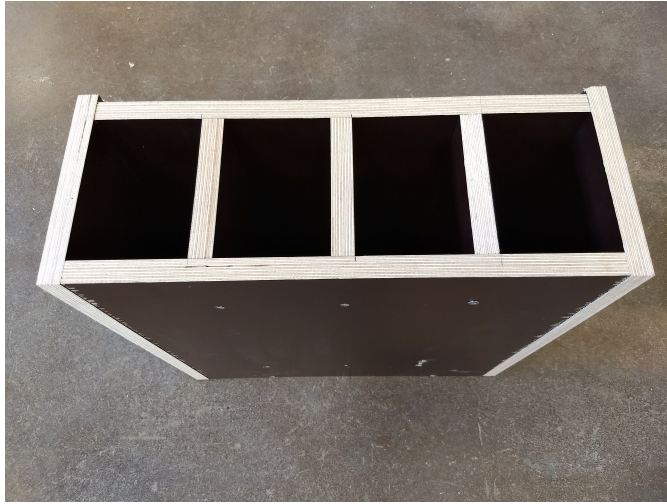
Figur 3.7: Prisme med mål

Tabell 3.3: Plan for testing av prizmer

Blandinger	Betongtyper	Type tilslag	Antall prøver		
			e=0	e=7,78	23,33
DLWAC	LWAC65 tørr	Stalite ½"	3	3	3
WLWAC	LWAC65 våt	Stalite ½"	3	3	3
FLWAC	FLWAC65	Stalite ½"+PVA	1	1	1

### 3.3.1 Forskaling

For støping av prismene ble det skrudd forskalinger av 20 mm tykke kryssfinér forskalingsplater. Fire og fire prizmer ble støpt i et batteri, se figur 3.8. Til sammen ble det laget tre batterier, som gir totalt tolv prizmer. Forskalingen ble smurt med formolje og deretter fylt med betong, i samme retning som lasten senere ble påført. De samme forskalingsbatteriene ble brukt til alle blandningene. Prismene ble avforsalet etter 24 timer og plassert i vannbad i minst 28 døgn for optimale herdeforhold.



**Figur 3.8:** Forskalingsbatteri

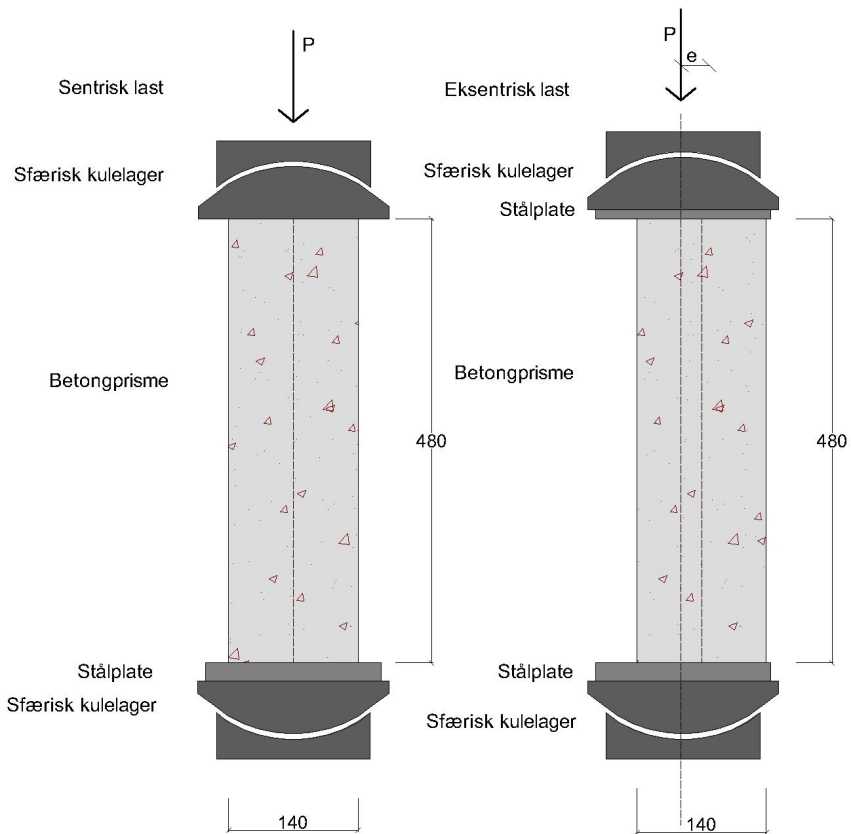
For at belastningen under testingen skulle kunne fordele seg best mulig, var det viktig at belastningsflatene var mest mulig plane. Derfor ble et tynt lag av oversiden av prismene (den siden som ikke har hatt kontakt med forskalingen) skåret av, se figur 3.9.



**Figur 3.9:** Kutting av overflaten på prisme

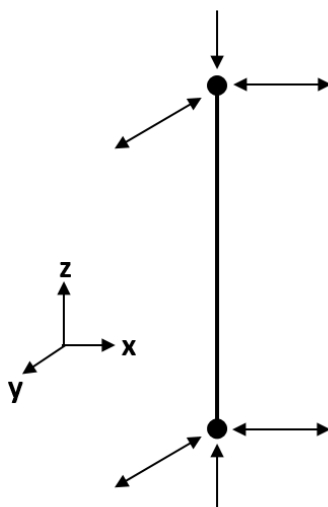
### 3.3.2 Testoppsett

Håndberegninger viste at største forventet kapasitet ville være på  $791 \text{ kN}$ . Dermed ble en kraftig rigg med kapasitet på  $1000 \text{ kN}$  benyttet. Denne var godt avstivet i alle retninger. Jekken som ble brukt var en elektro-hydraulisk servo-kontrollert forskyvningsmaskin som belaster prismene i støperetning. Figur 3.10 viser en skisse for hvordan det sentriske og det eksentriske oppsettet skulle se ut. Prismene ble forlastet med  $100 \text{ kN}$  før jekken ble påført jevnt med et press på  $0,3 \text{ mm}$  forskyvning per minutt. I de følgende avsnitt blir testoppsettene beskrevet mer i detalj.



**Figur 3.10:** Sentrisk belastning (til venstre) og eksentrisk belastning (til høyre)

Med dette oppsettet får man et statisk system som vist i figur 3.11. Prismet er fritt til å bevegeseg i  $x$ - $y$  planet, leddet om alle akser i topp og bunn og fastholdt mot å bevege seg i negativ  $z$ -retning i bunnen og lasten påføres i negativ  $z$ -retning på toppen. Dette er egentlig et statisk ubestemt system, men friksjon i topp og bunn gjør at prismet holdes på plass.



**Figur 3.11:** Statisk system for testoppsettet

### 3.3.3 Sentrisk belastning

Det ble plassert sfæriske kulelagre mellom jekken og prismet både på toppen og bunnen av prismet. Dette ble gjort for å best mulig unngå skjevbelastning. Prismet ble plassert ved hjelp av vater slik at belastningsaksen var helt loddrett. Kulelagerene justerte for skjevheter i rigg og prismeflater. Dermed oppnås en mest mulig sentrisk belastning, med jevn spenningsfordelig over hele tverrsnittet. Figur 3.12 viser hvordan det sentriske oppsettet så ut.



**Figur 3.12:** Prisme under sentrisk belastning.

### 3.3.4 Eksentrisk belastning

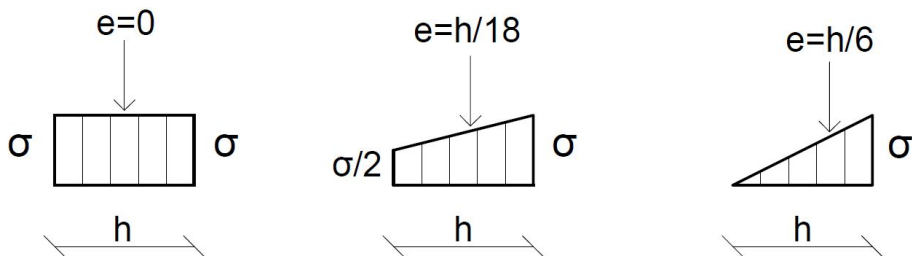
For å unngå skjevbelastning ble det også brukt kulelager i det eksentriske oppsettet. For å få en eksentrisk belastning ble prismene plassert tilsvarende eksentrisiteten ut fra senter av kulelagerene. Eksentrisitetene som ble brukt var  $7,78\text{ mm}$  og  $23,33\text{ mm}$ . I tilfellet med  $23,33\text{ mm}$  ble en ekstra plate brukt mellom kulelageret i toppen og prismet for å overføre lasten til hele prismetoppen, vist i figur 3.13.



Figur 3.13: Prisme under eksentrisk belastning.  $e = 23,33 \text{ mm}$

### 3.3.5 Spenningsfordelinger

De nevnte eksentrisitetene ble valgt for å gi en forenklet spenningsfordeling for et lineært elastisk materiale, som vist i figur 3.14. Ved innsetting av  $h = 140 \text{ mm}$  oppnås eksentrisitetene nevnt i avsnittet over.

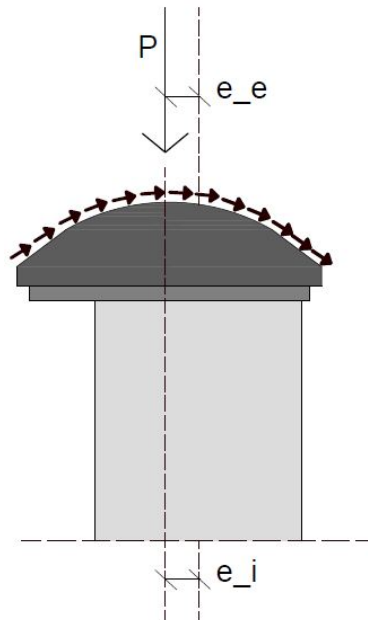


Figur 3.14: Spenningsfordeling for de tre ulike lasttilfellene

### 3.3.6 Smøring av kulelager

Hans Stemland forsket tidlig på 1990-tallet på effekten av friksjon i kulelagrene. Dette ble gjort i forbindelse med et forsøk som omhandlet utmatting av betong. Resultatene fra dette er publisert i en ikke-offentlig SINTEF-rapport, og er derfor ikke referert til. Når det oppstår

friksjon, vil det kunne oppstå ekstra moment i prismet. Det kan gi en spenningsfordeling som er ulik den som er beskrevet i figur 3.14. Det ble utført forsøk som vist i figur 3.15.



**Figur 3.15:** Prinsipp for bestemmelse av friksjon i kulelager

Fra tøyninger målt på aluminiumsprøver ble plasseringen av den interne reaksjonskraften utregnet. Dermed kunne friksjonsmomentet finnes ved hjelp av differansen mellom ekstern og intern eksentrisitet:

$$M_F = P * (e_e - e_i)$$

Eksperimentene som ble utført viste at ved en trykkraft på 1000 kN kunne det oppstå et friksjonsmoment på 500 Nm, men om kulelagerene smøres mellom hvert forsøk, vil friksjonsmomentet være neglisjerbart. Derfor ble kulelagerene rengjort og smurt inn med nytt fett mellom hvert forsøk.

### 3.3.7 Håndberegninger

Det ble gjort enkle håndberegninger for å få et overslag på omtrentlig kapasitet under trykkbelastning. Håndberegningene ble gjort med antagelse om at det er null friksjon mellom betongprismet og stålplatene over og under. Ved eksentrisk last ble det dermed antatt at spenningen fordeler seg som beskrevet i avsnitt 3.3.5. Det ble bare regnet med lineær spenningsfordeling, og det er dermed ikke tatt høyde for eventuelle omlagring av spenninger.

Følgende formel for trykkfasthet ble brukt for å finne maksverdien på den påførte trykklasten F:



$$F = f_c * A * G$$

hvor:

- $F$  er påført trykklast [ $N$ ];
- $f_c$  er betongens trykkfasthet [ $MPa$ ];
- $A$  er betongtverrsnittets areal [ $mm^2$ ];
- $G$  er geometrifaktor.

Ved eksentrisk belastning ble maksimal trykklast kalkulert ved å bruke spenningene vist i figur 3.14, der  $\sigma$  er lik  $f_c$ .  $f_c$  ble bestemt av trykktester utført på småskala-terningene og småskala-sylindrene. Det ble valgt å ikke multiplisere med noen materialfaktor eller koeffisient ved bestemmelse av  $f_c$ . Dette for å best mulig kunne treffe realistisk kapasitet, da forsøkene i laboratoriene er utført på en nøyaktig måte under ideelle forhold. Håndberegningene er presentert i Vedlegg A.

### 3.3.8 LVDT

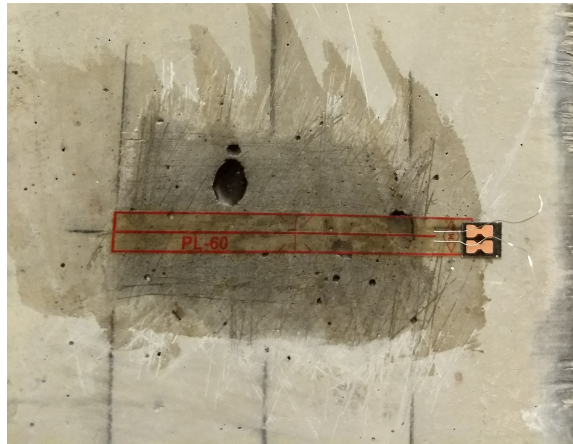
LVDT står for *Linear Variable Displacement Transducer*, og baserer seg på forskyvning mellom to punkter. Forskyvningen gjøres om til tøyning ved å bruke startavstanden og den registrerte forskyvningen under forsøket. Prinsippene bak LVDT er endring i elektromagnetisk felt ved forskyvning [36]. Det ble plassert en LVDT på to av sidene til prismet, se figur 3.16. Avstanden mellom målepunktene var på omlag 200  $mm$ . Etter plassering ble den korrekte avstanden målt og lagt inn i PC-en for å få korrekte tøyninger. LVDT-ene var sentrert både horisontalt og vertikalt.



**Figur 3.16:** LVDT-er limt på prisme

### 3.3.9 Strekkapper

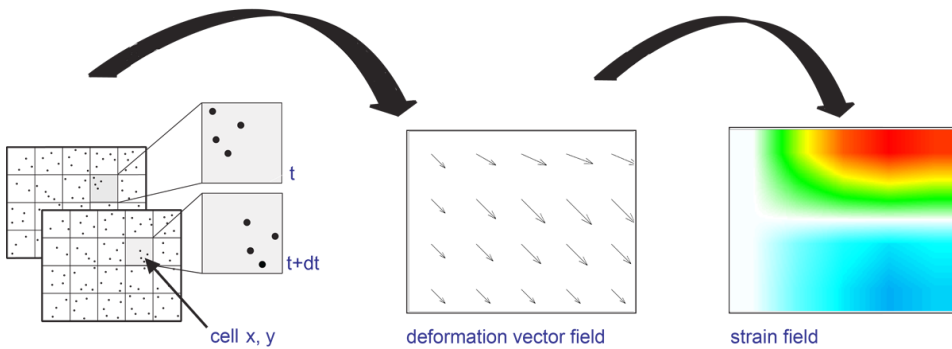
Prinsippet bak strekkapper er basert på at resistansen for et elektrisk ledende materiale forandrer seg ved forlengelse [37]. I dette forsøket ble strekkapper festet horisontalt på de to sidene av hver testprisme som også har LVDT, se figur 3.17 og 3.16. Strekkappene var sentrisk plassert og registrerte sideveis utvidelse av betongen, når den ble utsatt for trykkraften. Strekkapp-typen PL-60-11 ble brukt. Den har lengde på 60 mm. For å enklest mulig kunne sammenligne resultatene, ble like strekkapper med tøyingsfaktor på 2,08 brukt på alle prismene. Overflatene hvor strekkappene ble limt på ble først pusset litt med en pussestein og sandpapir for å sikre god heft. Eventuelle overflateporer ble fylt med lim. Etter at strekkappene var festet, ble det kontrollert at de hadde en resistans innenfor området  $120 \pm 0,3\Omega$  med et multimeter.



Figur 3.17: Strekkklapp festet på prisme

### 3.3.10 DIC

DIC står for *Digital Image Correlation* og er en optisk teknikk for å måle tøyninger og forskyvninger. Teknikken går ut på at serier av gråtonebilder i ulike stadier av deformasjon sammenlignes. Under forsøket lagres alle bildene på en PC tilkoblet kameraene. Etter at forsøket er fullført kjøres det en analyse ved bruk av en korrelasjonslogaritme. Figur 3.18 viser prinsippet for DIC. Pikselen vil forskyve seg fra den originale posisjonen. Dette skaper et felt med deformasjonsvektorer, som kan vises som tøyninger.



Figur 3.18: Prinsipp for DIC [38]

Vektorene kan uttrykkes med formelene:

$$x^* = x + u_x + \frac{\delta u_x}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta u_x}{\delta y} \Delta y$$

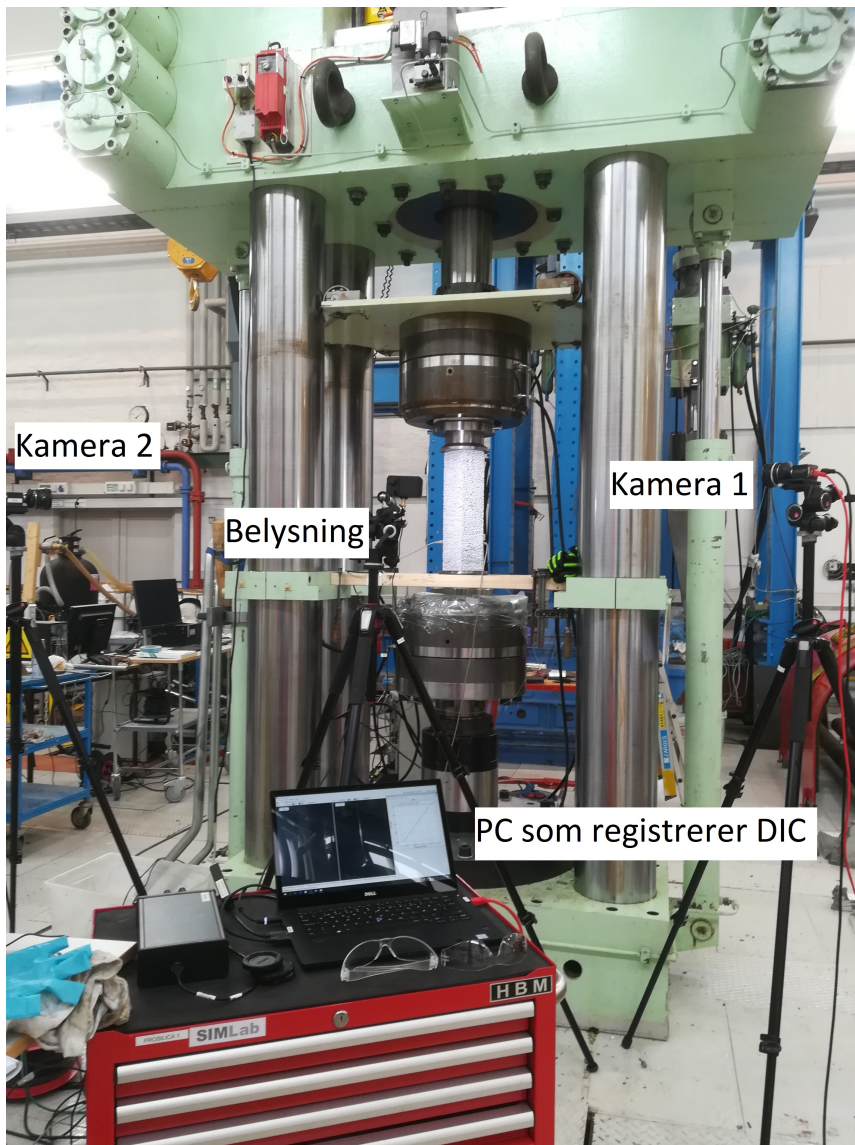
$$y^* = y + u_y + \frac{\delta u_y}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta u_y}{\delta y} \Delta y$$

DIC ble utført på de to sidene av prismene som ikke hadde påmontert strekkklapp og LVDT. Overflaten til prismene ble malt hvite og prikket med svart sprittusj for at DIC-kameraene best mulig kunne registrere forskyvninger, se figur 3.19.



**Figur 3.19:** Prikkete prisme klargjort for DIC-analyse

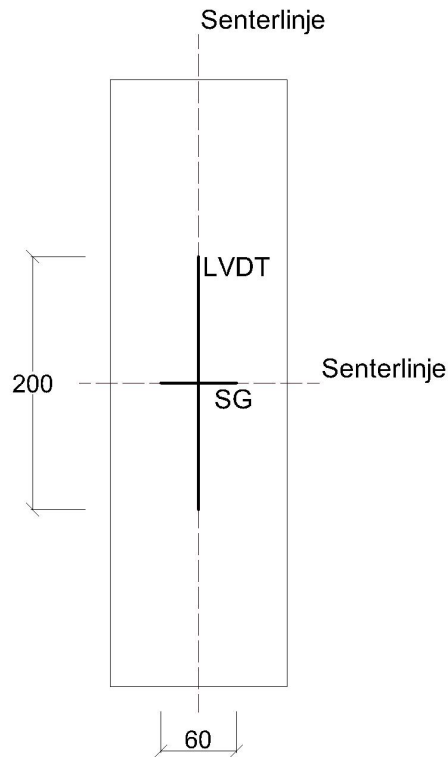
Figur 3.20 viser hvordan DIC oppsettet ble sendt ut med to kameraer som tok bilder av hver sin side av prismet og et lys som lyste opp prismet. Kameraene var plassert vinkelrett på flatene som ble analysert. Bildene ble tatt med en frekvens på 2 Hz og sendt til en PC som lagret bildene. PC-en registrerte også last og forskyvning på det gitte tidspunktet bildet ble tatt.



Figur 3.20: DIC-oppsett

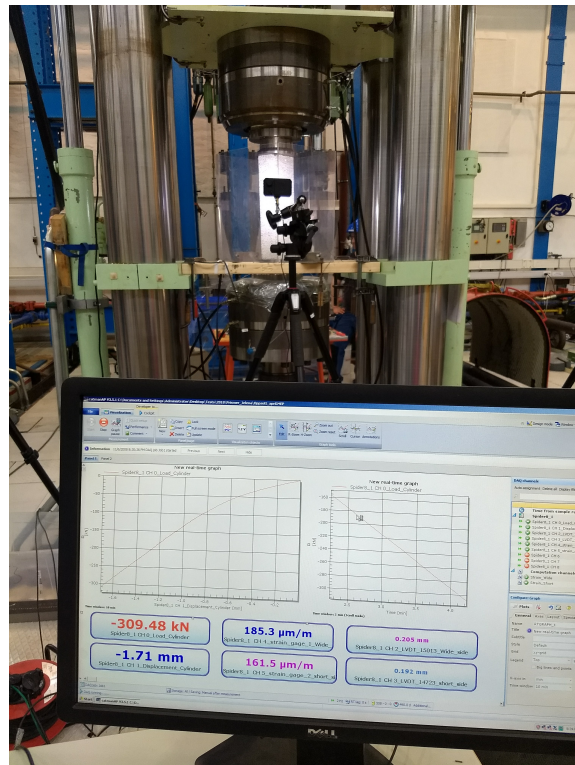
### 3.3.11 Plassering av testinstrumenter

Som tidligere nevnt ble det på to av sidene (én bredside og én kortsida) plassert en LVDT og en strekkklapp, se figur 3.21. Disse var sentrert og målte tøyningene henholdsvis i lengderetningen og tverretningen av prismet. På de to andre sidene av prismet ble tøyningene målt ved bruk av DIC.



**Figur 3.21:** Skisse som viser plassering av LVDT og strekkklapp på testprismene

Alle måleinstrumentene ble koblet til en HBM spider 8 måleforsterker. Her ble også data fra forskyvning og last fra jekken registrert. Videre ble målingene sendt til en datamaskin med softwareprogrammet Catman Easy ap. Programmet prosesserte dataene og logget de i en text-fil. I figur 3.22 kan man se hvordan dataene ble registrert under testingen. Til venstre nederst på skjermen er last og forskyvning, i midten er strekkklappene og til høyre er LVDT-ene. DIC-bildene ble lagret på en annen PC.



Figur 3.22: Logging av data under testing

### 3.4 Oversikt over alle forsøk som er blitt gjort

I dette kapitlet presenteres en oversikt over antall herdedøgn de ulike prøvelegemene fikk før de ble testet. Tabell 3.4 viser antall herdedøgn for blandingen med tørr Stalite. Tabell 3.5 viser antall herdedøgn for blandingen med vannmettet Stalite. Tabell 3.6 viser antall herdedøgn for blandingen med fiberarmering.

**Tabell 3.4:** Testing av prøvelegemer med tørr Stalite. Støp: 12.03.18

<b>Alder, døgn</b>	7	14	28	38	53	56	57	58	60
Prismer:									
- Sentrisk					2			1	
- Eksentrisk 8 mm						3			
- Eksentrisk 23 mm							2	1	
Sylindre:									
- Trykkfasthet			3						2
- Spaltestrekkfasthet			3						
Terninger	3	3	3	2	1	1	1	1	2
Bruddenergibjelker									2

**Tabell 3.5:** Testing av prøvelegemer med vannmettet Stalite. Støp 05.04.18

<b>Alder, døgn</b>	7	14	28	29	32	33	34	36	60
Prismer:									
- Sentrisk					1	1	1		
- Eksentrisk 8 mm						3			
- Eksentrisk 23 mm							3		
Sylindre:									
- Trykkfasthet			3						2
- Spaltestrekkfasthet			3						
Terninger	3	3	3	1	1	1	1	2	3
Bruddenergibjelker								2	

**Tabell 3.6:** Testing av prøvelegemer med fiberarmering. Støp 19.03.18

<b>Alder, døgn</b>	7	14	28	46	50	51
Prismer:						
- Sentrisk				1		
- Eksentrisk 8 mm					1	
- Eksentrisk 23 mm						1
Sylindre:						
- Trykkfasthet			1			
- Spaltestrekkfasthet			2			
Terninger	1		2	1		





# Kapittel 4

## Resultat

Dette kapittelet presenterer de viktigste dataene fra laboratorieforsøkene.

### 4.1 Resept

#### 4.1.1 Fuktinnehold i Stalite

I den tørre blandingen ble det brukt Stalite som hadde et fuktinnhold på 0,10 %, og i den vannmettede blandingen hadde Staliten et fuktinnhold på 7,90 %.

#### 4.1.2 v/c tall

**Tabell 4.1:** v/c-tall og fasthet

	<b>v/c-tall</b>
<b>DLWAC</b>	0,36
<b>WLWAC</b>	0,32
<b>FLWAC</b>	0,34

### 4.2 Småskala

I dette kapittelet presenteres et utdrag av resultatene fra småskalaforsøkene. En mer omfattende fremstilling av resultatene fra testingen finnes i Vedlegg B.

## 4.2.1 Materialparametere

Tabell 4.2: Midlere materialparametere

Materialparameter	Symbol	DLWAC	WLWAC	FLWAC
Trykkfasthet, terning etter 7 døgn $MPa$	$f_{cm7}$	51,06	58,14	48,83
Trykkfasthet, terning etter 28 døgn $MPa$	$f_{cm}$	71,55	77,54	71,01
Trykkfasthet, sylinder etter 28 døgn $MPa$	$f_{cm}$	67,00	72,92	63,66
Spaltetrekkfasthet etter 28 døgn $MPa$	$f_{ctm}$	4,72	4,86	4,54
Mettet densitet, terning [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$\rho_{cs}$	1997,9	2008,4	2019,2
Mettet densitet, sylinder [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$\rho_{cs}$	1994,6	2001,9	2028,9
Ovnstørrket densitet [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$\rho_{c0}$	1879,9	1864,6	1899,5
Bruddenergi [ $\frac{N}{m}$ ]	$G_I$	79,86	91,61	
E-modul $MPa$	$E_{cm}$	23 653	21 701	22 549
Tverrkontraksjonstall	$\nu$	0,18	0,20	0,19

## 4.2.2 Trykkfasthet

Trykkfastheten til de ulike betongene ble testet etter 7, 14, 28 og 60 dager. Dette gir et bilde av herdeforløpet til betongen. Trykkfastheten ble også målt dagen prismene ble testet for å kartlegge trykkfastheten på testdagen. Alle betongene var over kravet for høyfasthetslett-betong på 60 MPa.

### Terning

For alle terningene forble belastningssidene hele etter brudd. Dette er et krav for godkjent bruddform. De fleste hadde timeglassbruddform som vist i figur 4.1, noe som tyder på sentrisk belastning.

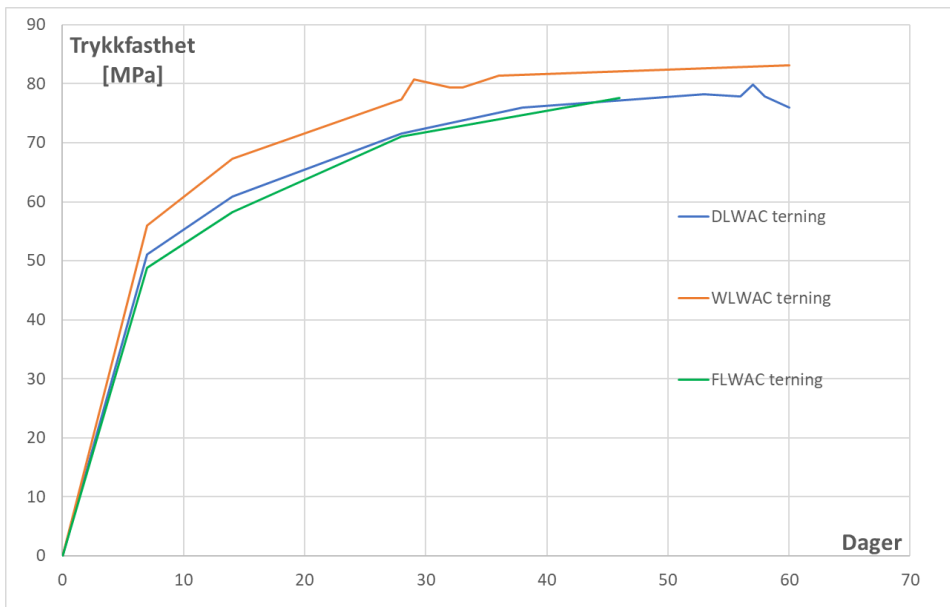


**Figur 4.1:** Timeglassbruddform

I tabell 4.3 er de målte fasthetene for fasthetsutviklingen fremstilt.

**Tabell 4.3:** Trykkfasthet terninger  $MPa$

<b>Døgn</b>	<b>DLWAC</b>	<b>WLWAC</b>	<b>FLWAC</b>
7	51,93	58,42	49,73
7	51,11	57,73	47,94
7	50,14	58,26	
14	60,10	66,57	58,3
14	60,20	66,60	
14	61,50	68,58	
28	72,66	76,16	70,69
28	71,63	78,79	71,34
28	70,37	77,68	
60	74,31	82,22	
60	77,50	81,06	
60		86,02	



**Figur 4.2:** Fasthetsutvikling for de forskjellige betongtypene

### Sylinder

Alle sylinderrestene ble gjort etter 28 dager for å kartlegge gjennomsnittlig trykkfasthet. Trykktesten gav eksplorative brudd som førte til fullstendig splittede sylindere, se fig 4.3. Belastningssidene forble hele etter bruddet.



**Figur 4.3:** Brudd sylinder

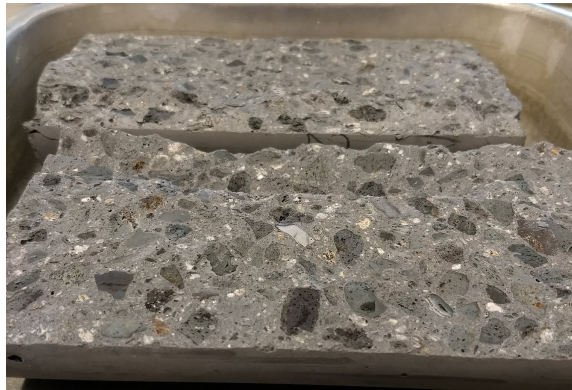
I tabell 4.4 er resultatene for de forskjellige betongtypene fremstilt.

**Tabell 4.4:** Trykkfasthet sylinder *MPa*

Døgn	DLWAC	WLWAC	FLWAC
28	65,26	73,76	63,66
28	66,44	70,56	
28	69,31	74,45	
60	72,48	76,61	
60	72,14	77,04	

### 4.2.3 Spaltestrekkfasthet

Spaltestrekkforsøkene ble utført etter 28 dager. Alle forsøkene som ble utført hadde gode brudd med bruddflate tvers gjennom sylindren, se figur 4.4.

**Figur 4.4:** Spaltestrekkbrudd

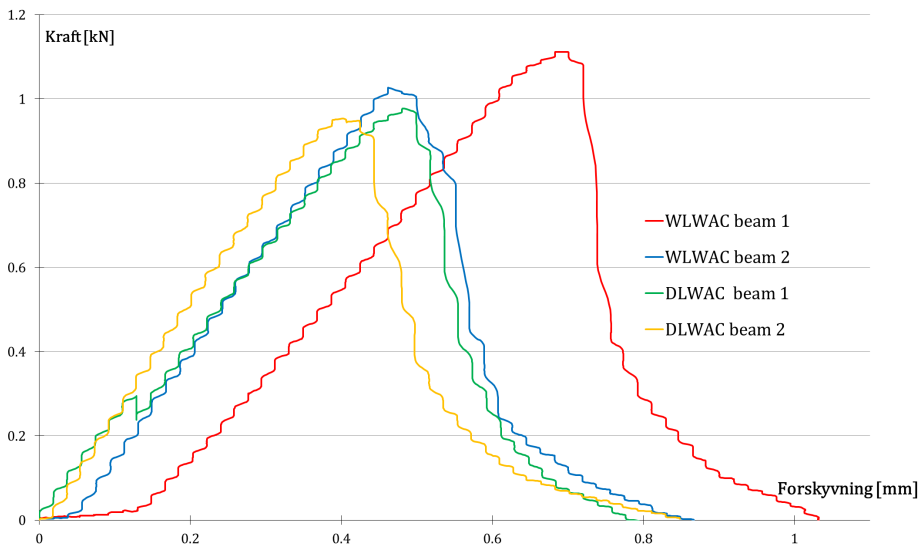
Fra testen ble største trykkraft registrert. Den ble regnet om til spaltestrekkfasthet som forklart i metoden. I tabell 4.5 kan man se resultatene for de forskjellige betongtypene.

**Tabell 4.5:** Spaltestrekkfasthet sylinder *MPa*

Døgn	DLWAC	WLWAC	FLWAC
28	4,85	4,48	4,16
28	5,30	5,16	4,91
28	4,03	4,93	
Snitt	4,72	4,86	4,54

### 4.2.4 Bruddenergi

Resultatet kommer fra tre-punkts prøving av bruddenergibjelker med kjerv. I figur 4.5 er belastningen plottet med hensyn på forskyvningen.



Figur 4.5: Bruddenergi

Arealet under last/forskyvningsgrafen ble beregnet og bruddenergiene regnet ut og presentert i tabell 4.6.

Tabell 4.6: Bruddenergi

	DLWAC $G_f [\frac{Nm}{m^2}]$	WLWAC $G_f [\frac{Nm}{m^2}]$
Bjelke 1	82,94	10,50
Bjelke 2	76,42	82,7
Snitt	79,86	91,61

Figur 4.6 viser at den tørre blandingen har en røffere bruddflate hvor bruddet går gjennom enkelte av Stalite partiklene og rundt andre, mens bruddflaten for den vanmettede blandingen stort sett går rett gjennom Stalite-partiklene.



Figur 4.6: Bruddflate på bruddenergibjeltene

#### 4.2.5 Densitet

**Mettet densitet** Den mettede densiteten finnes ved å veie både terninger og sylindere i luft og vann. I tabell 4.7 og 4.8 kan man se gjennomsnittlig resultat for de forskjellige betongtypene.

Tabell 4.7: Mettet densitet terninger  $\frac{kg}{m^3}$

Døgn	DLWAC	WLWAC	FLWAC
1	1997,9	2008,4	2019,2
7	1972,7	1977,8	2003,6
28	1969,1	1983,8	1992,7



**Tabell 4.8:** Mettet densitet sylinder  $\frac{kg}{m^3}$

Døgn	DLWAC	WLWAC	FLWAC
1	1994,6	2001,9	2028,9
28	2014,3	2008,4	2004,0

**Ovnstørket densitet** Sylinderhalvdelene fra spaltstrekkforsøkene ble brukt for å bestemme ovnstørket densitet. Resultatene er presentert i tabell 4.9. Alle betongene er under kravet for lettbetong på 2000  $\frac{kg}{m^3}$ .

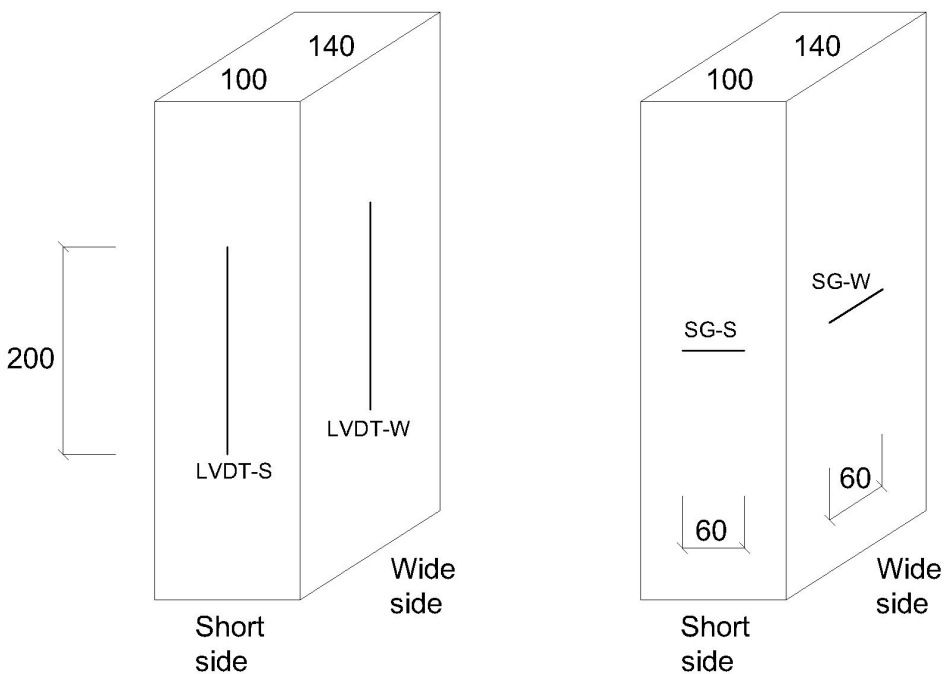
**Tabell 4.9:** Ovnstørket densitet  $\frac{kg}{m^3}$

DLWAC	WLWAC	FLWAC
1879,9	1864,6	1897,5

## 4.3 Fullskala

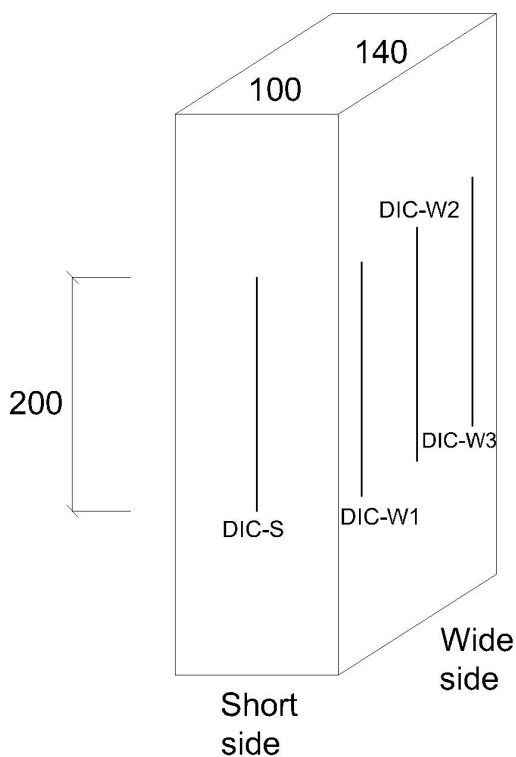
Av de 21 prismeforsøkene som er blitt gjort er den beste for hver blanding og belastnings-situasjon valgt. Dette kapittelet presenter de viktigste resultatene fra de prismeforsøkene. Resultater fra alle prismeforsøkene finnes i Vedlegg A.

For å kunne referere til LVDT-ene og strekkklappene på en hensiktsmessig måte, er det valgt å navngi de som vist i figur 4.7. S står for *Short side*, mens W står for *Wide side*.



**Figur 4.7:** Navngivning LVDT-er og strekkklapper

På de to av sidene av prismene hvor det er brukt DIC er det mulig å måle tøyninger over hele overflaten i alle retninger. For å kunne klare å behandle resultatene, var det helt nødvendig å begrense omfanget. Det ble derfor valgt å se på tre tøyninger i vertikal retning på langsiden og en tøyning i vertikal retning på midten av kortsiden, se figur 4.8. Vektorene som ble brukt, hadde omtrent samme lengde som LVDT-ene (200 mm).



**Figur 4.8:** Navngivning tøyninger fra DIC

### 4.3.1 Bruddlast

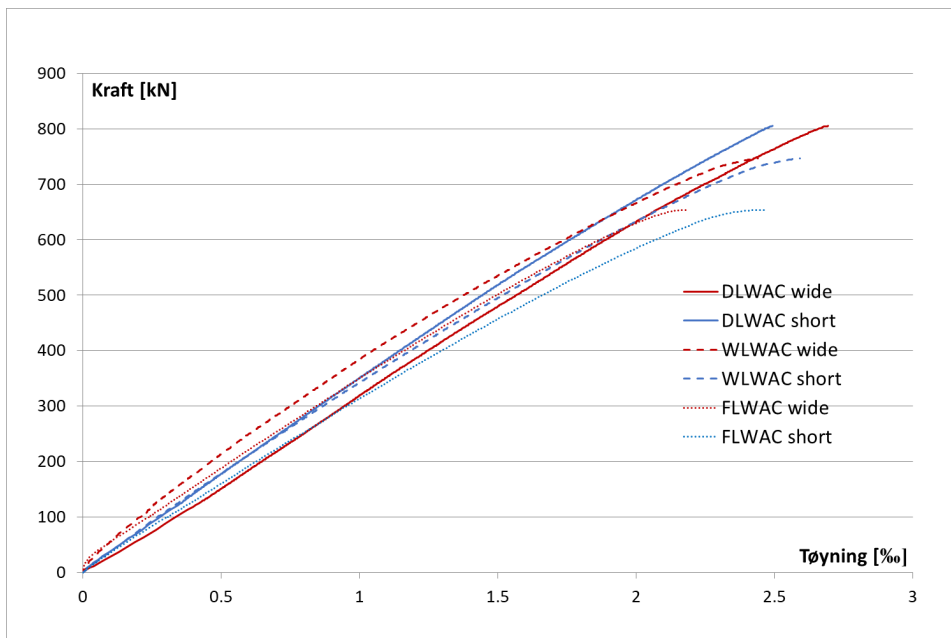
Tabell 4.10 viser bruddlasten til de forskjellige prismene, trykkfastheten til terningene på testdagen og prismefastheten.

**Tabell 4.10:** Tabellen viser fastheten til betongen på testdagen, prismefastheten og bruddlasten til de forskjellige forsøkene

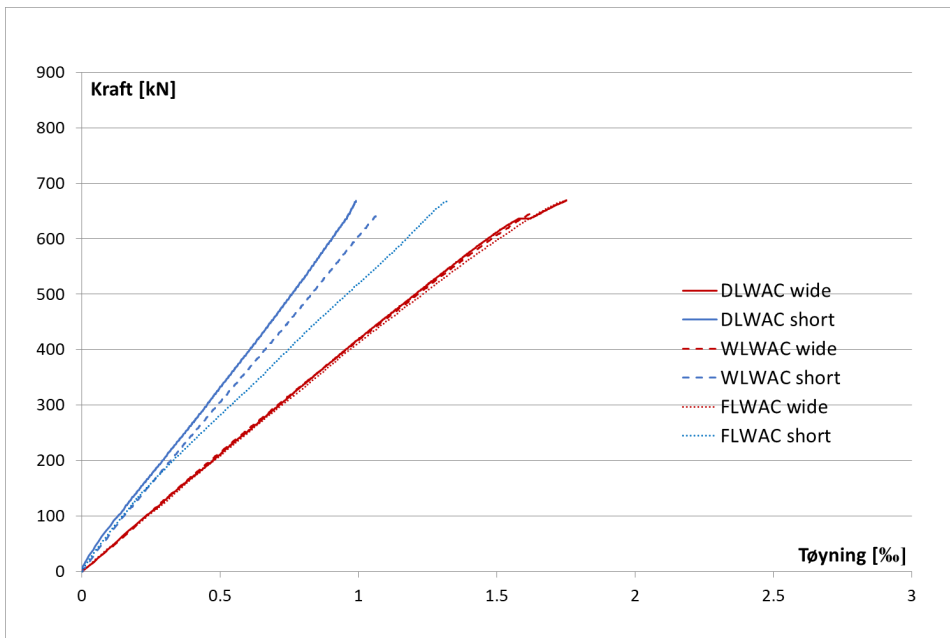
		<b>DLWAC</b>	<b>WLWAC</b>	<b>FLWAC</b>
$f_c$	<i>MPa</i>	77,9	80,7	77,6
$f_{cp}$	<i>MPa</i>	57,5	53,3	46,7
$e = 0$	<i>kN</i>	804,94	746,43	653,54
$e = 7, 78$	<i>kN</i>	668,36	648,04	669,96
$e = 23, 33$	<i>kN</i>	495,93	541,66	577,89

### 4.3.2 LVDT resultater

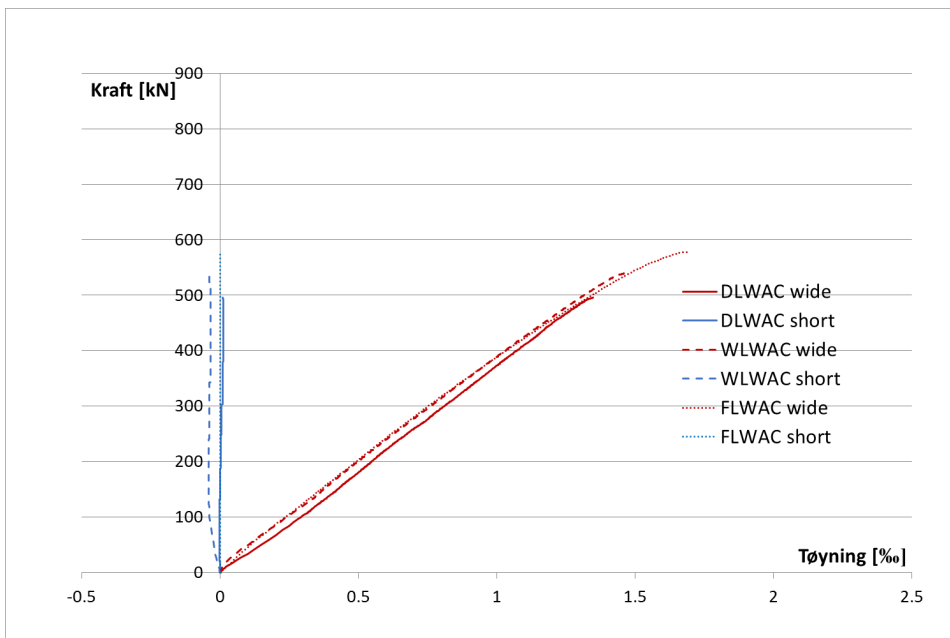
I figur 4.9, 4.10 og 4.11 er prismene med lik belastning plottet sammen. Grafene viser hvordan LVDT-ene har registrert tøyning når lasten har økt. De røde linjene er LVDT-W og de blå linjene er LVDT-S.



Figur 4.9: LVDT for sentrisk belastning



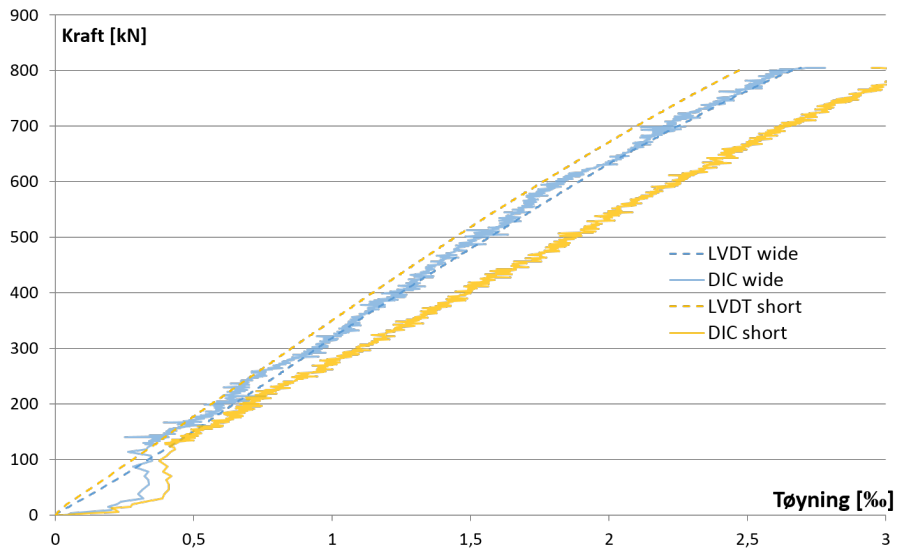
Figur 4.10: LVDT for prismer belastet med 7,78 mm eksentrisitet



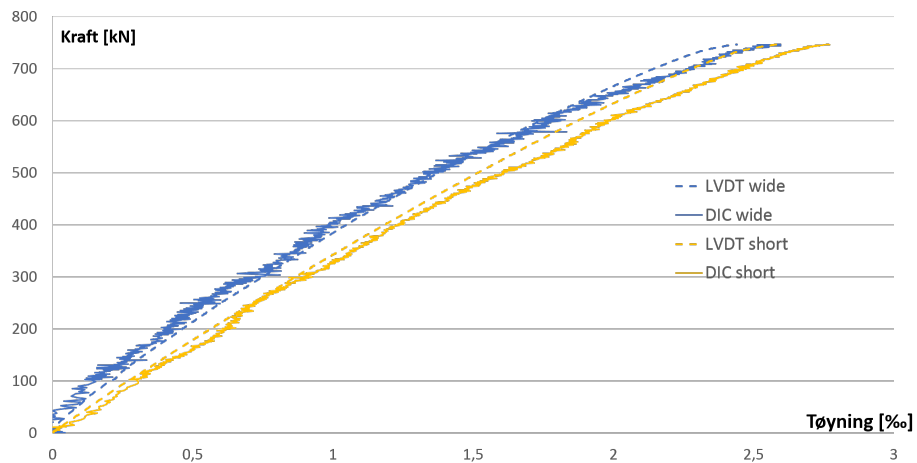
Figur 4.11: LVDT for prismer belastet med 23,33 mm eksentrisitet

### 4.3.3 LVDT vs DIC

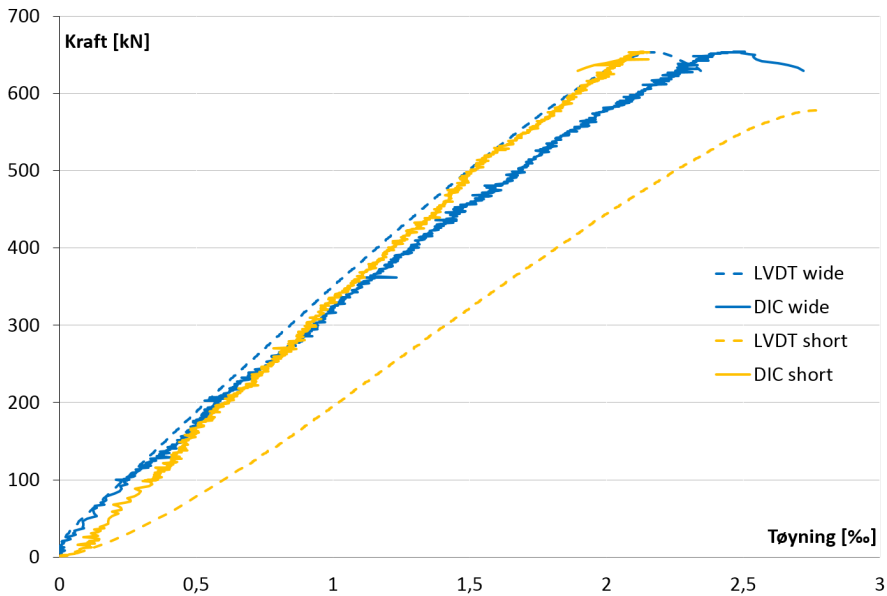
I figur 4.12, 4.13 og 4.14 plottes LVDT-W, DIC-W2, LVDT-S og DIC-S for de ulike sentriske prøvene.



**Figur 4.12:** Overensstemmelse mellom LVDT-er og DIC sentrisk DLWAC



**Figur 4.13:** Overensstemmelse mellom LVDT-er og DIC sentrisk WLWAC



Figur 4.14: Overensstemmelse mellom LVDT-er og DIC sentrisk FLWAC

### 4.3.4 Makstøyninger fra DIC

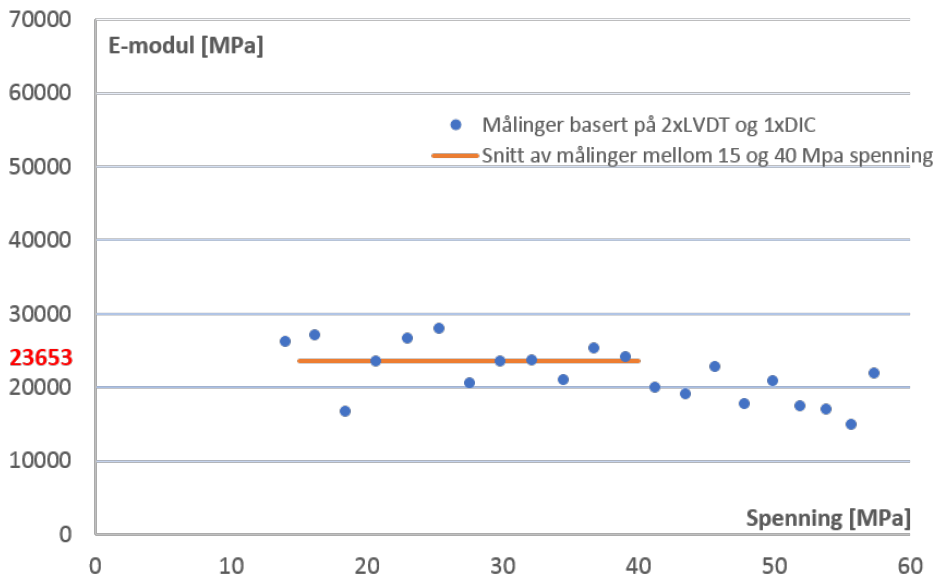
Største målte tøyninger med DIC langs vektorene skisert i figur 4.8 er vist i tabell 4.11.

Tabell 4.11: Makstøyninger målt med DIC rett før brudd

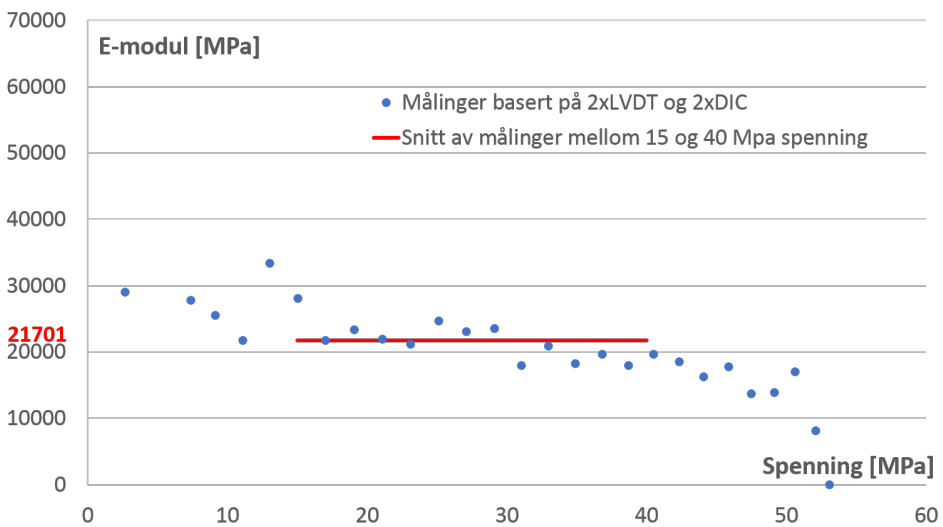
	DLWAC	WLWAC	FLWAC
	$\epsilon_{cu}$	$\epsilon_{cu}$	$\epsilon_{cu}$
$e = 0$	3,08	3,40	2,92
$e = 7,78$	3,47	3,69	4,54
$e = 23,33$	3,81	4,53	6,82

### 4.3.5 E-modul

De ulike betongenes E-moduler ble beregnet på bakgrunn av tøyningene målt på alle fire sidene av de sentrisk belastede prismene. Utregningene er gjort på de beste prøvene fra hver blanding. For DLWAC er det sett bort fra DIC-short fordi denne ikke stemmer helt overens med tøyningene på de tre andre sidene, se figur 4.12. For FLWAC er det sett bort fra LVDT-short fordi denne ikke stemmer overens med tøyningene på de tre andre sidene, se figur 4.14.

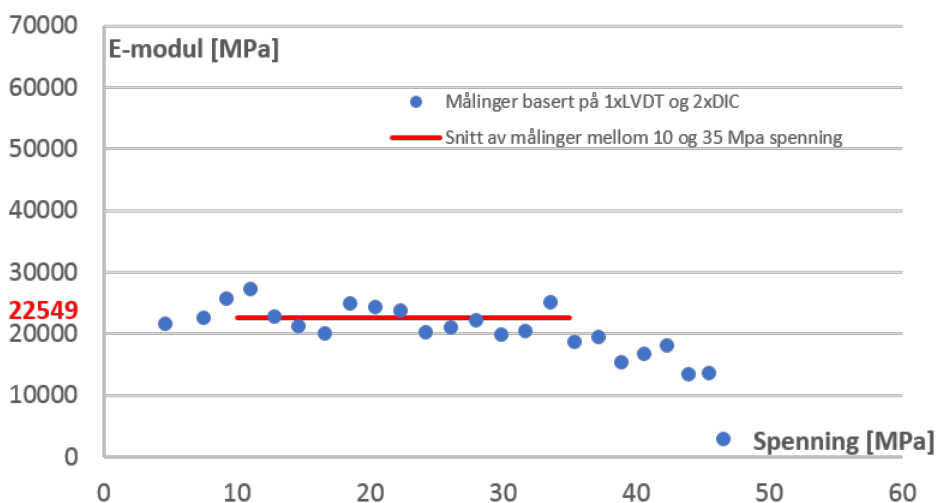


Figur 4.15: E-modul DLWAC



Figur 4.16: E-modul WLWAC





Figur 4.17: E-modul FLWAC

Basert på tøyningene på de fire (evnentelt tre) sidene er det regnet ut en *gjennomsnittstøyning*. Videre gir endring i spenning i løpet av 20 sekunders testing, delt på endring i tøyning i løpet av 20 sekunders testing, verdier på E-modul. Disse verdiene er plottet i figur 4.15, 4.16 og 4.17 med hensyn på spenningen i prismet. Det er så regnet ut et gjennomsnitt av disse verdiene for å få en verdi på E-modul for hver betong. Dette gjennomsnittet er regnet fra 15 MPa for å unngå forstyrrelser under rask pålastning i starten av forsøkene. Gjennomsnittet er avsluttet på 40 MPa for å unngå at betongen beveger seg inn i plastisk sone. For FLWAC er intervallet forskjøvet fram til 10-35 MPa på grunn av lavere maksspenning. I tabell 4.12 er E-modulene for de ulike betongene.

Tabell 4.12: E-modul

DLWAC	23 653 MPa
WLWAC	21 701 MPa
FLWAC	22 549 MPa

### 4.3.6 Duktilitetsindeks

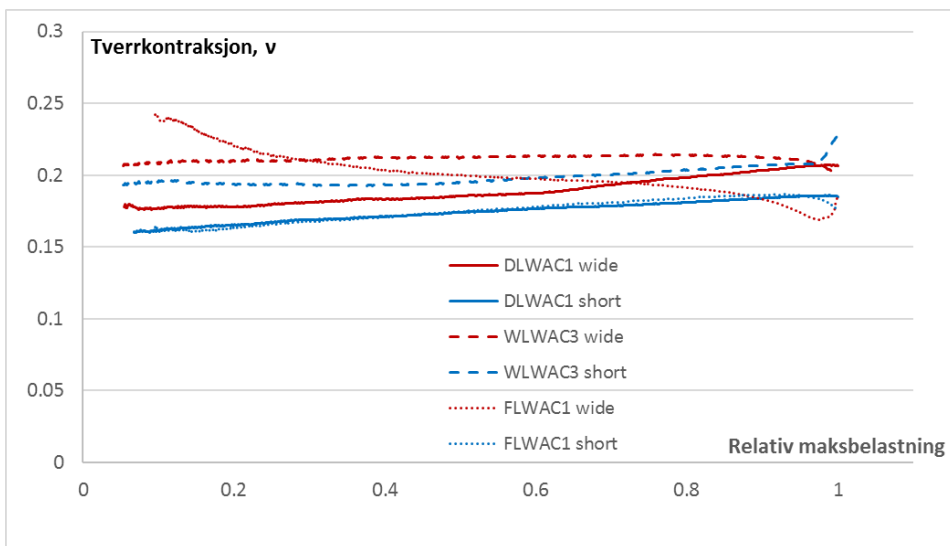
I tabell 4.13 er duktilitetsindeksen regnet ut for den beste sentriske prøven for hver betongtype.  $\epsilon_{el}$  bestemmes vanligvis ved å se på starten av platået i arbeidsdiagrammet [2]. Kun arbeidsdiagrammet til fiberblandingen hadde platå. De andre hadde en mer diffus overgang, se fig 4.12, 4.13 og 4.14. Derfor ble  $\epsilon_{el}$  bestemt ved å se på endringen i lastøkning. Da lastøkningen begynte å minke, ble det definert at man gikk fra elastisk og inn i plastisk sone, og  $\epsilon_{el}$  ble lest av. Den samme vektoren ble brukt for å lese av  $\epsilon_{el}$  og  $\epsilon_{cu}$ . Det ble funnet en duktilitetsindeks for LVDT-målingene og en for DIC-målingene for hver av betongene.

**Tabell 4.13:** Duktilitetsindeks funnet med tall fra LVDT og DIC

		<b>DLWAC</b>	<b>WLWAC</b>	<b>FLWAC</b>
<b>LVDT</b>	$\epsilon_{el}$	2.42	2.25	1.80
	$\epsilon_{cu}$	2.69	2.59	2.47
	$D_{LVDT}\%$	11,2	15,1	37,2
<b>DIC</b>	$\epsilon_{el}$	2.45	2.41	1.81
	$\epsilon_{cu}$	2,78	2,77	2,49
	$D_{DIC}\%$	13,3	14,9	37,6

### 4.3.7 Tverrkontraksjon

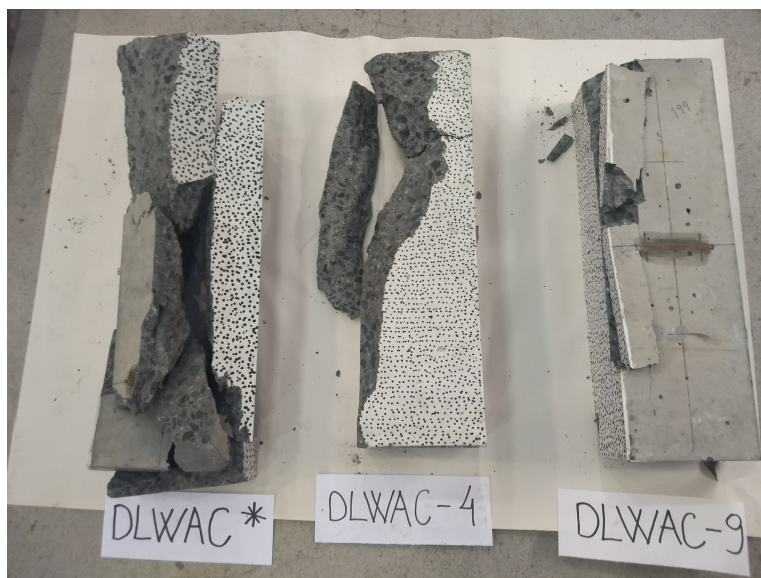
Forholdet mellom langsgående tøyninger målt med LVDT-er og tverrtøyninger målt med strekkklapper, gir betongens tverrkontraksjonstall (Poisson's ratio). Y-aksen i figur 4.18 viser tverrkontraksjonstallet for både kortsiden og langsiden for en prisme fra hver betongblanding. Langsiden har alltid størst verdi. Dette er plottet med hensyn på relativ maksimalbelastning. Verdiene for tverrkontraksjonen for de ulike betongene er presentert i tabell 4.14. Dette er et gjennomsnitt mellom målingene på kortsiden og langsiden.

**Figur 4.18:** Tverrkontraksjonstall**Tabell 4.14:** Tverrkontraksjonstall

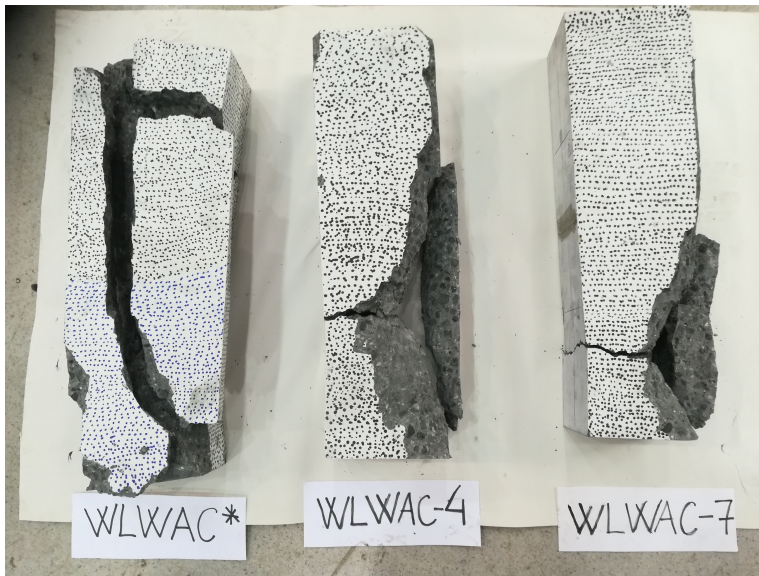
<b>DLWAC</b>	0,18 MPa
<b>WLWAC</b>	0,20 MPa
<b>FLWAC</b>	0,19 MPa

### 4.3.8 Bruddtyper

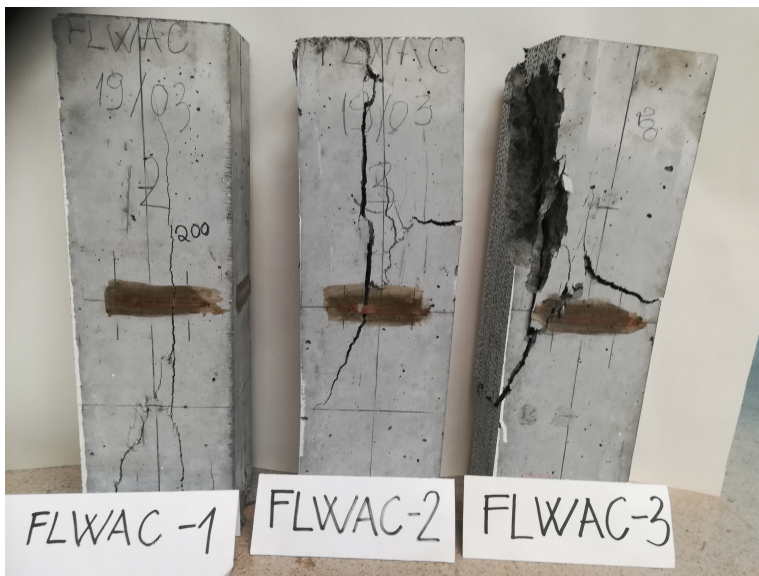
I dette delkapittelet presenteres bilder av bruddtypene for de ulike eksentrisitetene og betongtypene.



**Figur 4.19:** DLWAC. Til venstre: sentrisk, i midten: eksentrisitet  $7,78 \text{ mm}$ , til høyre: eksentrisitet  $23,33 \text{ mm}$



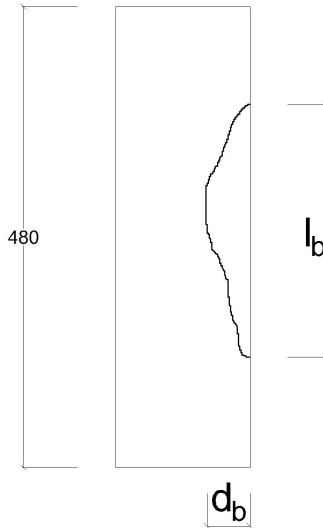
**Figur 4.20:** WLWAC. Til venstre: sentrisk, i midten: eksentrisitet  $7,78\text{ mm}$ , til høyre: eksentrisitet  $23,33\text{ mm}$



**Figur 4.21:** FLWAC. Til venstre: sentrisk, i midten: eksentrisitet  $7,78\text{ mm}$ , til høyre: eksentrisitet  $23,33\text{ mm}$

### 4.3.9 Bruddstørrelse

For alle prøvene ble lengden og dybde av bruddet registrert. Se figur 4.22 for definisjon av bruddlengde  $l_b$  og brudddybde  $d_b$ .



**Figur 4.22:** Bruddlengde og brudddybde

I tabell 4.15 er bruddstørrelsen for de samme prismene som er brukt i LVDT-resultatene presentert. De sentrisk belastede prismene hadde langsgående strekkbrudd som gikk i midten av prøven. Derfor ble ikke de sentriske prismene målt.

**Tabell 4.15:** Bruddlengde og brudddybde

$e = 7,78mm$	<b>DLWAC</b>	<b>WLWAC</b>	<b>FLWAC</b>
$l_b$ mm	440	470	340
$d_b$ mm	110	110	60
$\frac{l_b}{d_b}$	4,0	4,3	5,6
$e = 23,33mm$	<b>DLWAC</b>	<b>WLWAC</b>	<b>FLWAC</b>
$l_b$ mm	370	410	290
$d_b$ mm	40	80	50
$\frac{l_b}{d_b}$	9,2	5,1	5,8

### 4.3.10 Geometrifaktor

Geometrifaktoren forteller oss hvor mye prismens geometri påvirker trykkapasiteten. I tabell 4.16 blir prismetrykkapasitet delt på terningtrykkapasitet for å finne faktoren. FLWAC prismen fikk tidlig brudd uten å nå makskapasitet. Det er derfor valgt å se bort fra dette resultatet. Geometrifaktoren blir da på 0,7.

**Tabell 4.16:** Geometrifaktor

	$f_{cp}$ MPa	$f_c$ MPa	Geometrifaktor
<b>DLWAC</b>	57,5	77,9	0,73
<b>WLWAC</b>	53,3	80,7	0,66
<b>FLWAC</b>	46,7	77,6	0,60

### 4.3.11 Håndberegninger

Tabell 4.17 gir en oversikt over kapasitetene funnet ved håndberegning med de ulike lasttilfellene og betongkvalitetene. Geometrifaktoren på 0,7 er brukt i utregningen. Fullstendig utregning finnes i Vedlegg A.

**Tabell 4.17:** Håndberegning

	Sentrisk	Eksentrisk $e = 7,78mm$	Eksentrisk $e = 23,33mm$
<b>DLWAC</b> kN	763	513	382
<b>WLWAC</b> kN	791	531	395
<b>FLWAC</b> kN	760	511	380



# Kapittel 5

## Diskusjon

I diskusjonskapittelet vil testresultatene fra forsøkene bli analysert. Resultatene vil også bli sammenlignet med en tidligere eksperimentell studie.

### 5.1 Resept

I dette delkapittelet blir det drøftet hvordan enkelte bestanddeler i de ulike reseptene påvirker egenskapene til betongen. Det er valgt å fokusere på hvordan vanninnhold spiller inn på fasthet og hvordan finstoffinnhold påvirker bearbeidbarhet. Reseptene det refereres til er presentert i tabell 3.1.

#### 5.1.1 Vanninnhold og fasthet

$v/c$ -tallet har en klar sammenheng med betongens fasthet. Jo mer vann i forhold til sement, desto svakere betong. Det er altså gunstig å ha lavest mulig  $v/c$ -tall, så lenge betongen er bearbeidbar nok til å kunne støpes.  $v/c$ -tallet i denne oppgaven regnes som massen av fritt vann delt på massen av sement [39].

**Tabell 5.1:**  $v/c$ -tall og fasthet

	$v/c$ -tall	$f_{ck}$ [MPa]
<b>DLWAC</b>	0,36	67,00
<b>WLWAC</b>	0,32	72,92
<b>FLWAC</b>	0,34	63,66

Fordi den ene blandingen er med tørr Stalite, og den andre er med vannmettet, vil det effektive  $v/c$ -tallet kunne være annerledes. Det er vanskelig å vite hvor mye fuktighet Stalite vil trekke til seg eller gi fra seg før herding. Om man antar at Stalite i den tørre blandingen trekker til seg tilsvarende 24 timer absorpsjon neddykket i vann, og at den



vannmettede gir fra seg slik at den får tilsvarende fuktinnhold (6,58 %), vil v/c-tallet bli 0,29 for DLWAC, 0,33 for WLWAC og 0,35 for FLWAC.

Siden denne oppgaven skulle omhandle høyfast lettbetong, var det viktig at betongen fikk en fasthet over grensa på 60 MPa [22]. Resepten til blandingen med tørr Stalite ble beregnet til å kunne gi en fasthet på 65 MPa med v/c-tall på 0,36. Dette viste seg å stemme bra, da betongen fikk en sylindrefasthet etter 28 dager på 67,00 MPa, se tabell 5.1. For blandingen med vannmettet Stalite ble det valgt å redusere mengden tilsatt fritt vann. v/c-tallet for denne blandingen ble da på 0,32. Dette for å være sikker på å oppnå høy nok fasthet, ved å ta hensyn til at den vannmettede Staliten tilfører betongen en betydelig mengde vann. Selv om Staliten er overflatetørket, vil en del vann trekke ut av tilslagspartiklene og bidra i herdeprosessen. Betongen fikk en sylindetrykkfasthet på 72,92 MPa etter 28 dager. Derfor kan vi anta at vannmengden ble tilstrekkelig redusert. v/c-tallet for den fiberarmerte betongen var på 0,34, noe som gav en sylindrefasthet på 63,66 MPa etter 28 dager. Selv om FLWAC hadde lavere v/c-tall enn DLWAC, hadde den lavere fasthet. En årsak til dette kan være at fibrene innfører mer luft i betongen og dermed reduserer fastheten.

### 5.1.2 Bearbeidbarheten til fiberblanding

En utfordring ved bruk av fiberarmering i betong, er å oppnå god nok bearbeidbarhet. Problemet er at fibrene trekker til seg vann som binder seg til overflaten av fibre. I fiberblanding i denne oppgaven ble det i hovedsak foretatt to tiltak i resepten for å oppnå god nok bearbeidbarhet, og samtidig høy nok fasthet. Det ene tiltaket var å øke mengden superplastiserende tilsetningsstoff. Det andre tiltaket var å øke mengden finstoff.

I Stalite-fraksjonen brukt i denne oppgaven er det lite innhold av finstoff, se siktekurver i Vedlegg C. Det ble derfor valgt å bruke to ulike sandfraksjoner for å sikre god bearbeidbarhet. I blandingen med fiber ble mengden av den fineste sanden (Ramlo 0/2 mm) økt, mens mengden av den grovere (Årdal 0/8 mm) ble redusert for å oppnå best mulig bearbeidbarhet. Dette gav et synkmål på 3 cm, se egenskaper for fersk betong i Vedlegg C. Betongen var altså ganske stiv, men med god komprimering gikk støpingen likevel fint. Til sammenligning var synkmålene for blandingene med tørr og vannmettet Stalite henholdsvis 17 cm og 19 cm. Så når synkmålet ble såpass mye lavere enn disse for fiberbetongen, viser dette at fibrene har stor innvirkning på bearbeidbarheten, selv om det ble gjort tiltak for å øke denne.

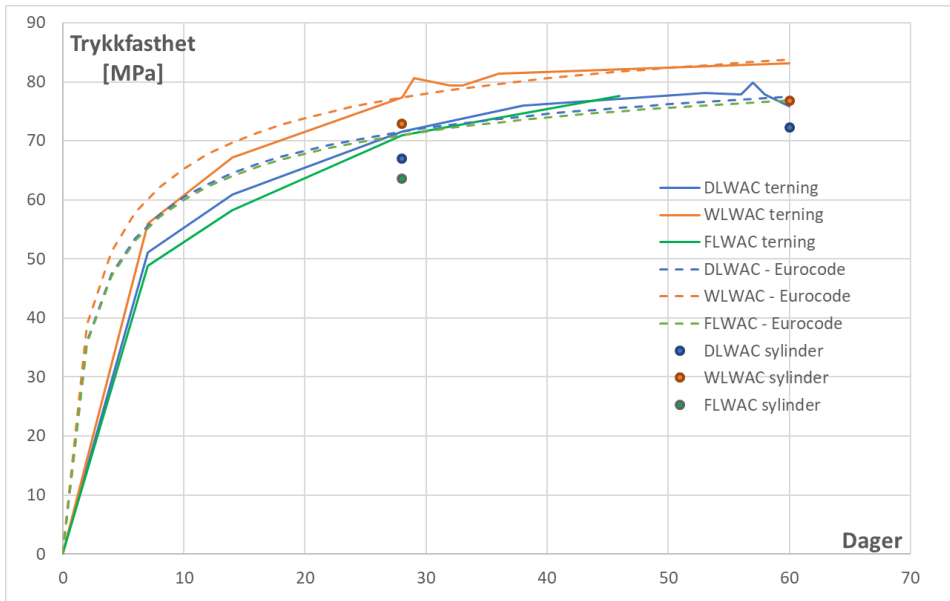
## 5.2 Småskala

I dette delkapittelet vil trykkfastheten og bruddflatene fra noen av småskala-forsøkene drøftes.

### 5.2.1 Trykkfasthet

Figur 5.1 sammenligner flere måter å finne trykkfastheten på. Man kan se at det er en temmelig god overensstemmelse mellom fasthetsutviklingen målt ved terninger og kurven som er bestemt ved å bruke terningstrykkfasthet ved 28 dager og formelene i Eurokode 2 [3]. Alle Eurokode-grafene har til felles at de har en for rask utvikling i starten, men etter

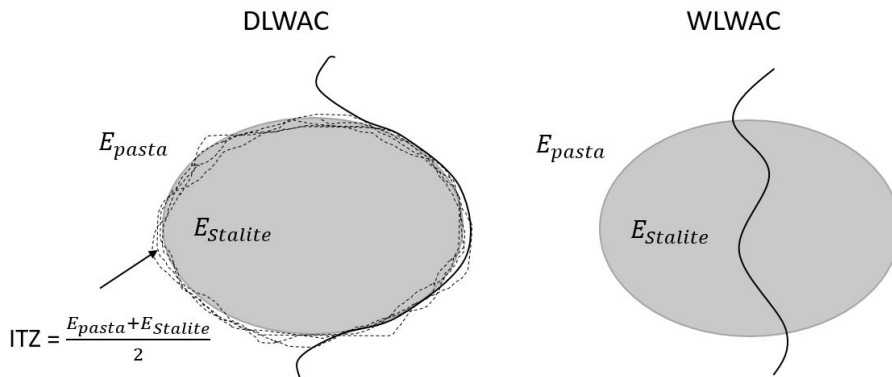
28 dager stemmer de mye bedre. I tabellen for Fasthetsklasser for lettbetong"i Eurokoden er sylindrefastheten 0,9 ganger terningfastheten[3]. Sylindrefastheten ble målt ved 28 og 60 dager, og det er god overensstemmelse med resultatene og det man forventer fra Eurokoden, se figur 5.1.



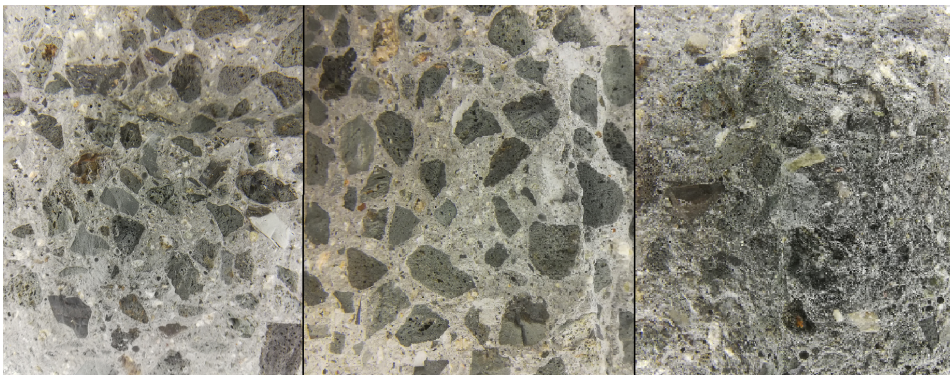
**Figur 5.1:** Sammenligning av fasthet mellom terning, sylinder og Eurocode

## 5.2.2 Bruddflate

Ved kvalitativ visuell inspeksjon av bruddflaten til prismene, spaltstrekkforsøkene og bruddenergibjelkene kunne man se at den tørre blandingen hadde en røffere overflate hvor bruddet gikk gjennom enkelte av tilslagspartiklene, og rundt andre. Figur 4.6 viser bruddflaten til WLWAC og DLWAC etter bruddenergitesten, og figur 5.3 er bruddflaten til alle tre betongtypene etter spaltstrekkforsøkene. Man kan se at den tørre blandingen har en røffere og mer ujevn bruddflate. I bruddflaten til den vannmettede blandingen går bruddet stort sett gjennom tilslaget og er derfor flatere og glattere. Figur 5.2 forklarer denne effekten. For den vannmettede blandingen er tilslaget det svakeste leddet, og bruddet går derfor gjennom. Den tørre blandingen trekker til seg pasta før herdingen og får derfor en sterk ITZ. Det antas at E-modulen i ITZ er en mellomting mellom E-modulen til pasta og Stalite (E-modulen til Stalite og pastaen har ikke blitt målt i denne oppgaven). På grunn av hardheten til ITZ vil bruddet enkelte ganger gå rundt tilslaget, selv om det også i den tørre blandingen er tilslaget som er svakest.



**Figur 5.2:** Forklaring på bruddvei



**Figur 5.3:** Til venstre er bruddflaten til DLWAC, i midten er bruddflaten til WLWAC og til høyre er bruddflaten til FLWAC.

Tilslagspartiklene i bruddflatene til betongen med vannmettet Stalite har en merkbar mørkere farge enn pastaen rundt. I betongen med tørr Stalite går bruddet i større grad i ITZ. Fordi pastaen har trukket inn i porene i overflaten i de tørre tilslagspartiklene, har en del av disse en lysere farge. I bruddflaten til fiberblandingen kan man se fiberene stikke ut, se figur 5.3.

### 5.3 Bruddtyper og bruddstørrelse

Ved kvalitativ visuell inspeksjon ble det registrert at bruddene endret form etter hvordan prismene ble belastet. Figur 4.19, 4.20 og 4.21 viser bruddene. For alle blandिंगene er de med sentrisk belastning sprukket opp med langsgående strekkbrudd hvor bruddet går omtrent i midten av prismet. De sentriske belastede prismene har sprukket i mange flere biter enn de eksentriske. Unntaket er det sentrisk belastede fiberprismet, som fremdeles

beholder sin form på grunn av fibre som binder delene sammen også etter bruddet. I og med at bruddene gikk nærme midten, og at disse i stor grad kollapset helt, var det ikke hensiktsmessig å måle bruddstørrelse på de sentrisk belastede prismene.

For alle blandinger fører de eksentriske lastene til at en del av prismene på den mest belastede siden blir ødelagt. Figur 4.22 er en skisse av bruddtypen. Lengden og dybden av disse bruddene ble registrert og er presentert i tabell 4.15. Det er tydelig at større eksentrisitet gir betydelig mindre både bruddlengde og brudddybde. Dette er naturlig da lastsenteret er nærmere kanten av prismet. Det er også logisk disse prismene med kortest bruddlengde og brudddybde vil ha lavest bruddlast, nettopp fordi bruddflaten er mindre enn for de sentrisk belastede prismene.

Med større eksentrisitet avtar brudddybden forholdsmessig mer enn bruddlengden. Dette gir seg utslag i et noe høyere bruddlengde/brudddybde-forhold. Som for den sentrisk belastede prismet, sørger fibre for at også de eksentrisk belastede prismene holdes sammen uten å kollapse også etter bruddet.

Tidligere forsøk viser at normalbeong fikk samme sprekkdannelse og bruddform som i disse forsøkene [40].

Ved kvalitativ visuell inspeksjon ble det registrert at sprøheten og eksplosiviteten varierte i forhold til lasttype og betongtype. Ingen av fiberprøvene hadde eksplosivt brudd og heller ikke høyt smell. Fiberprismene ble stående og holdt sammen etter brudd. Trolig på grunn av fastholdingen til fibre. Fiberbetongen hadde ikke en sprø oppførsel. Prismene uten fiber hadde derimot eksplosive brudd og sprø oppførsel. Prismene med vannmettet Stalite hadde de mest eksplosive bruddene. Det var de sentriske som hadde det største smellet, og større bruddlast gav større smell. Prismene med eksentrisitet hadde mindre eksplosivt brudd enn de sentriske. Dette kan skyldes mindre bruddareal og mindre bruddlast.

## 5.4 LVDT resultater

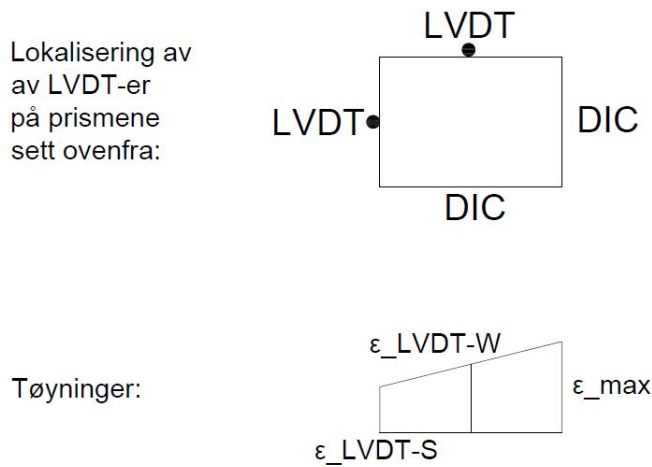
LVDT-ene er plassert slik at den ene er midt på den brede siden og den andre midt på den minst belastede kortsiden. Ved den sentriske belastningen var det forventet å få de samme tøyningene på begge sider. Med antagelsen om lineær tøyningfordeling var det forventet at under belastningen med  $7,78 \text{ mm}$  eksentrisitet, ville kortsiden få  $\frac{2}{3}$  av tøyningene målt midt på den brede siden. Da det ble belastet med  $23,33 \text{ mm}$  eksentrisitet, var det forventet null tøyning på LVDT-en kortsiden og halvparten av makstøyningene på LVDT-en midt på den brede siden.

Figur 4.9, 4.10 og 4.11 viser at antagelsene stemmer godt med oppnådd resultatet. For de sentriske forsøkene har LVDT-ene fått omtrent samme resultat på begge sidene. De som har eksentrisitet på  $7,78 \text{ mm}$ , har mindre tøyning på den smale siden enn på bredsidene og de med  $23,33 \text{ mm}$  eksentrisitet har omtrent ingen tøyning på kortsiden.

## 5.5 Sammenligning av LVDT og DIC

Figur 4.12, 4.13 og 4.14 er plott av tøyninger fra LVDT og DIC. Plottene er av de sentrisk belastede prismene og derfor burde alle grafene gi lik tøyning.

I figur 4.12 (DLWAC) gir DIC-short mye større tøyninger enn LVDT-short og figur 4.14 (FLWAC) viser at LVDT-short gir større tøyning enn DIC-short. Disse avvikene kan skyldes at betong er et veldig heterogent materiale, feilmålinger eller feil belastning. Det er vanskelig å vite grunnen, og derfor blir disse målingene sett bort i fra. Ellers er det ganske god overensstemmelse mellom LVDT og DIC, men trenden er at DIC gir litt større tøyninger. På grunn av at DIC jevnt over gav litt større tøyning, ble også makstøyningen estimert fra LVDT-resultatene. For å finne makstøyningene ble det antatt en lineær tøyningfordeling, se figur 5.4.



**Figur 5.4:** Antatt lineær tøyningfordeling gir makstøyning basert på LVDT-S og LVDT-W

$\epsilon_{max}$  ble estimert med følgende formel:

$$\epsilon_{max} = \epsilon_{LVDT_W} - \epsilon_{LVDT_S} * 2 + \epsilon_{LVDT_S}$$

**Tabell 5.2:** Sammenligning av makstøyninger fra LVDT og DIC

Blanding	Eksentrisitet <i>mm</i>	$\epsilon_{c,LVDT}$ <i>mmm</i>	$\epsilon_{c,DIC}$ <i>mmm</i>	$\frac{\epsilon_{c,DIC}}{\epsilon_{c,LVDT}}$ %
<b>DLWAC</b>	<i>e</i> = 0	2,69	3,12	114,5
	<i>e</i> = 7,78	2,51*	3,47	138,2
	<i>e</i> = 23,33	2,70*	3,81	141,1
<b>WLWAC</b>	<i>e</i> = 0	2,59	3,40	131,3
	<i>e</i> = 7,78	2,19*	3,69	168,5
	<i>e</i> = 23,33	2,96*	4,53	153,0
<b>FLWAC</b>	<i>e</i> = 0	2,46	2,94	119,5
	<i>e</i> = 7,78	2,18*	4,54	208,3
	<i>e</i> = 23,33	3,38*	6,82	201,8

\*Makstøyninger funnet fra LVDT-resultater, se figur 5.4.

De sentriske tøyningene er ikke estimert, men målte LVDT-verdier. DIC gir større tøyning. En mulig forklaring på dette kan være at det er foretatt flere målinger med DIC enn det er gjort med LVDT. På den brede siden (wide) er det gjort tre målinger ved hjelp av DIC, to helt ute ved kantene og én på midten. Det er da større sjanse for å fange opp felt med høye tøyningkonsentrasjoner. Estimaten av makstøyningen til de eksentriske prismene er også lavere enn DIC tøyningene. Merk at estimert makstøyning ved 7,78 *mm* eksentrisitet ikke er større enn de sentriske. Dette kan tyde på at estimatene er for lave. Da maksverdiene fra LVDT bare er estimerer som belager seg på helt lineær tøyningfordeling i prismene, mens DIC-verdiene er faktisk målte tøyninger, velges det å bruke resultatene fra DIC ved sammenligning med tidligere forsøk.

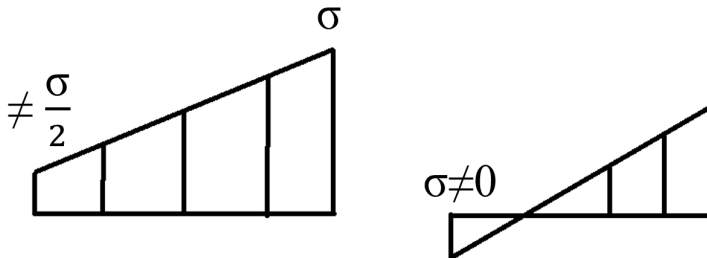
## 5.6 Effekt av eksentrisk belastning

Målingene viser tydelig at de eksentrisk belastede prismene får større maksimaltøyninger enn de sentrisk belastede, se tabell 4.11. Dette skjer på grunn av omlagring av krefter. Med en eksentrisk belastning er ikke hele tverrsnittet utnyttet i samme grad. Derfor kan spenningene omfordes til mindre belastede deler av tverrsnittet, og gi større maksimaltøyninger. Som beskrevet tidligere gir eksentrisk belastning et litt annet brudd, og som vist i tabell 4.10 tåler prismene mindre last når eksentrisiteten øker. Det er naturlig at bruddlasten minker når mindre deler av tverrsnittsarealet er fullt utnyttet.

## 5.7 Avvik fra planlagt spennings situasjon

I dette delkapittelet er det ment å gjøre et anslag på hvor bra spenningsfordelingen i resultatet stemmer overens med det som er planlagt for de eksentrisk belastede prismene. Det presiseres at dette baserer seg på Hookes lov, at spenningene er proporsjonale med tøyningene. For å estimere avviket sees det på forskjellen i tøyninger målt med LVDT-ene. Man vet at ved en eksentrisitet på 7,78 *mm* skal tøyningen på midten være 1,5 ganger så

stor som på kortsiden, og ved 23,33 mm eksentrisiteten skal kortsiden ha null tøyning, se fig 3.14. Resultatene viser spenninger som illustrert i figur 5.5. I tabell 5.3 er prøvene med størst avvik sammenlignet med den planlagte situasjonen.



**Figur 5.5:** Reelle spenninger i uoverensstemmelse med planlagt spenningssituasjon

**Tabell 5.3:** Sammenligning av spenninger fra LVDT og ønsket spenningssituasjon, se figur 3.14

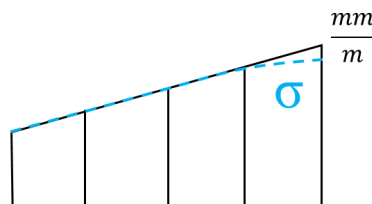
		DLWAC e=7.78	WLWAC e=23.33
<b>Maks spenning</b>	MPa	41,4	64,40
<b>Min spenning</b>	MPa	23,40	0,75
<b>Avvik fra planlagt spenningssituasjon</b>	%	15,20	1,17

\* Spenning funnet fra beregnet makstøyning fra LVDT-resultater, se figur 5.4.

For den verste prøven med 7,78 mm eksentrisitet er feilen størst med et avvik på 15,20 %. For den verste prøven med eksentrisitet 23,33 mm er feilen svært liten.

Det kan være flere årsaker til at det ikke oppnås total overensstemmelse mellom planlagt spenningssituasjon og faktisk oppnådd spenningssituasjon. Eventuell friksjon i kulelagrene vil medføre ekstra moment i testoppsettet. I tillegg ble prismene sentrert og satt i vater manuelt for hver test. Små unøyaktigheter i oppsettet vil kunne gi utslag.

Om det antas at tøyningene er lineære på grunn av den stive platen på toppen og bunnen av prismet, vil ikke spenningen være lineær der hvor tøyningene er plastiske, se figur 5.6.



**Figur 5.6:** Om man antar lineær tøyning vil spenningoppbyggingen avta i den plastiske delen av prismen

I og med at betong er et heterogent materiale vil det alltid være vanskelig å oppnå helt nøyaktig den planlagte spenningssituasjonen. Det må også nevnes at dette bare anses som et overslag for å få en indikasjon på at spenningene er rimelig riktige. Overslaget viser at oppnådd spenningssituasjon treffer rimelig bra med ønsket spenningssituasjon. Særlig oppsettet med størst eksentrisitet treffer svært bra.

## 5.8 Sammenligning av duktilitet i tørr og vannmettet Stalite

Før forsøkene ble utført, var antagelsen at blandingen med tørr Stalite skulle få større tøyninger og være mer duktil på grunn av en sterkere ITZ, men at forskjellen ikke skulle være stor.

Når man ser på resultatene, så er det blandingen med vannmettet Stalite som får størst tøyninger og størst duktilitetsindeks, se tabell 4.11 og 4.13. Forskjellen er ikke stor, men motsatt av hypotesen.

Hvis man går inn i materialparametrene, ser man at blandingen med vannmettet Stalite også har størst trykkfasthet, spaltstrekkfasthet, densitet og bruddenergi, se tabell 4.2. Større spaltstrekkfasthet og bruddenergi kan resultere i større tøyninger og duktilitet.

I resepten for blandingen med vannmettet Stalite ble det frie vannet redusert og mengden Mapei Dynamon SR-N økt. Dette kan ha hatt en innvirkning på betongens egenskaper, se tabell 3.1. Ellers er den største forskjellen at Stalite i den tørre blandingen hadde fuktinnhold på 0,10 % og 7,9 % i den vannmettede.

## 5.9 Effekt av fiberarmering

Som forventet gir polyvinylalkoholfibre (PVA) en betydelig mer duktil betong, se duktilitetsindeks i tabell 4.13. Den har derimot liten eller ingen påvirkning på spaltstrekkfastheten, se tabell 4.5. Last/tøynings-grafene til betongen med fiber avslutter ikke like brått som de andre, men buer ut på slutten. Dette viser at i motsetning til de andre to blandingene, hvor bruddet er plutselig, så vil fiberene fastholde betongen slik at den vil kunne tåle ytterligere belastning etter at den starter å slå sprekker. Ved kvalitativ visuell inspeksjon ble det observert at spaltstrekkforsøkene og prismetestene med fiberbetong ikke hadde den eksplosive oppførselen som de andre betongtypene hadde. Fastheten til fiberbetongen er ikke større enn de uten fiber. Det er først etter at betongen starter å slå sprekker at fiberene virker inn og gir ekstra tøyning.

E-modulen til PVA-fibre er på 36  $GPa$ . Dette er en betydelig lavere verdi enn E-modulen til for eksempel stålfiber, som er på 200  $GPa$ . Stålfibre ville derfor på grunn av høyere stivhet tatt opp enda større kraft og holdt betongen enda bedre sammen etter oppsprekking. Men stålfibre ville ha gitt en tyngre betong på grunn av densitet på 7900  $\frac{kg}{m^3}$  mot 1300  $\frac{kg}{m^3}$  for PVA-fiber.





**Figur 5.7:** Snitt fiberbetong

Som figur 5.7 viser, er det en del av fibrene som fremdeles er hele i bruddsonen også etter bruddet. Heften mellom fibrene og betongen har altså vært svakere enn strekkapasiteten til fibrene. Dette er ikke ønskelig, da fibrene i seg selv har en høyere kapasitet som ikke blir utnyttet. En løsning for å forbedre heftstyrken kan være å bruke lengre fiber. I dette forsøket er det brukt 8 mm fiber. Produsenten anbefaler at lengden på fiberene skal være 1,5 ganger diameteren til største tilslagspartiklene. Tilslaget som er brukt i denne oppgaven har en maks størrelse på 12,5 mm (1/2"). Om man da følger anbefalingen burde fiberlengden vært 18,75 mm [27].

I dette forsøket ble det brukt en fibermengde på 0,5 % av betongvolumet. Dette er en relativt liten mengde fiber. Produsenten selv anbefaler å bruke fra 0,1-3,0 % avhengig av type konstruksjonsdel [27]. 0,5 % er altså i nedre del av denne anbefalingen. Men som diskutert tidligere fører bruk av fiber til reduksjon av bearbeidbarhet. Det er derfor ikke nødvendigvis sikkert at økt fiberinnhold vil være gunstig. Kanskje vil en ytterligere reduksjon av bearbeidbarheten føre til vanskeligheter med å fylle forskalingen skikkelig. Det vil da kunne oppstå overflateporer som reduserer kapasiteten av tverrsnittet. En eventuell reduksjon av kapasiteten vil kanskje være verre enn fordelen av økt duktilitet.

## 5.10 Sammenligning av testresultater og håndberegning

For den sentriske håndberegningen ble trykkapasiteten til betongen ganget med lastarealet og geometrifaktoren. Det førte til en god overensstemmelse mellom testresultatene og beregningen, se tabell 5.4. Den sentriske prismet med fiberarmering gikk til brudd for tidlig til å kunne bruke den til sammenligning. Dette skyldes sannsynligvis en dårlig støpt prøve.

For alle tre blandingene blir avviket mellom håndberegning og testresultat større med større eksentrisitet. Dette skyldes trolig omlagring av spenninger. Når det antas lineær tøyingsfordeling på grunn av de stive platene på toppen og bunnen av prismene, vil spenningsutviklingen flate ut i den plastiske sonen, som illustrert i figur 5.6. Håndberegningen tar ikke hensyn til denne duktile oppførselen. Håndberegningen antar at prismet vil gå

til brudd når trykkfastheten nås i et punkt, men i realiteten vil betongen kunne omlagre kreftene og man kan laste ytterligere før maksspenningen nås. Derfor blir trolig avviket større når eksentrisiteten øker og duktiliteten er større.

**Tabell 5.4:** Sammenligning, (t=testresultat, h=håndberegning)

Blanding	Eksentrisitet <i>mm</i>	$f_c$ <i>MPa</i>	$P_{max_t}$ <i>kN</i>	$P_{max_h}$ <i>kN</i>	$\frac{P_{max_t}}{P_{max_h}}$
DLWAC	$e = 0$	77,9	804,94	763	1,05
	$e = 7,77$		668,32	513	1,30
	$e = 23,33$		495,93	382	1,29
WLWAC	$e = 0$	80,7	746,43	791	0,94
	$e = 7,77$		648,04	531	1,22
	$e = 23,33$		541,66	395	1,37
FLWAC	$e = 0$	77,6	653,54	760	0,85
	$e = 7,77$		669,96	511	1,31
	$e = 23,33$		577,89	380	1,52

## 5.11 Sammenligning med tidligere forsøk

I tabell 5.5 presenteres resultatene funnet i denne oppgaven i de øverste tre radene. I de fire nederste radene er det tatt med resultater fra tidligere forskning gjort på NTH i 1992 [40].

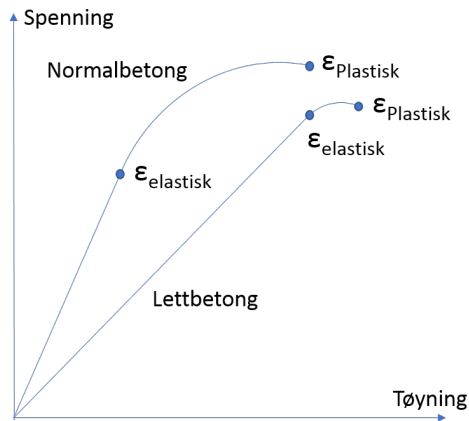
For å sammenligne duktilitetsindeksen med tidligere forsøk er indeksen funnet fra både LVDT og DIC. Det er god overensstemmelse mellom duktilitetsindeksen beregnet fra disse to metodene.  $\epsilon_{el}$  i de tidligere forsøkene er funnet som beskrevet i NS3473 [2].

**Tabell 5.5:** Sammenligning av prismefasthet ( $f_{cp}$ ), terningfasthet ( $f_c$ ), makstøyninger rett før brudd og duktilitetsindeks med tidligere forsøk [40].

<b>Blanding</b>	<b>Eksentrisitet</b> <i>mm</i>	$f_{cp}$ <i>MPa</i>	$f_c$ <i>MPa</i>	$\epsilon_{cu}$ $\frac{mm}{m}$	$DLVDT$ %	$DDIC$ %
<b>DLWAC</b>	$e = 0$	57,5	77,9	3,12*	11,2	13,3
	$e = 7,77$			3,47*		
	$e = 23,33$			3,81*		
<b>WLWAC</b>	$e = 0$	53,3	80,7	3,40*	15,1	14,9
	$e = 7,77$			3,69*		
	$e = 23,33$			4,53*		
<b>FLWAC</b>	$e = 0$	46,7	77,6	2,94*	37,2	37,6
	$e = 7,77$			4,54*		
	$e = 23,33$			6,82*		
<b>Liapor 8</b>	$e = 0$	86,8	93,8	3,12	9,6	
	$e = 7,77$			3,41		
	$e = 23,33$			3,55		
<b>Gneis/ Granitt</b>	$e = 0$	81,4	104,1	2,61	14,5	
	$e = 7,77$			2,97		
	$e = 23,33$			3,16		
<b>Basalt</b>	$e = 0$	89,0	105,1	2,72	31,7	
	$e = 7,77$			3,31		
	$e = 23,33$			3,45		
<b>Kvartsitt</b>	$e = 0$	86,5	106,7	2,47	14,8	
	$e = 7,77$			2,81		
	$e = 23,33$			2,84		

\*Makstøyninger rett før brudd målt med DIC

Resultatene fra de tidligere forsøkene viser at lettbetongen Liapor 8 har de største tøyningene, men likevel lavest duktilitetsindeks. Derfor må den elastiske tøyningen være stor, se figur 5.8. Selv om lettbetongen kan ha større maksimal plastisk tøyning, så er forskjellen mellom plastisk og elastisk tøyning avgjørende for duktiliteten. Basalt-blandingen skiller seg ut med en høy duktilitetsindeks, og Liapor 8 har litt lavere enn de andre.



**Figur 5.8:** Arbeidsdiagram for normalbetong og lettbetong

Alle de eksentrisk belastede prismene i denne oppgaven hadde DIC til å måle makstøyningene på den mest belastede siden. Blandingen med tørr Stalite har fått tøyninger som er ganske like Liapor 8, mens de andre har større tøyninger enn alle de tidligere forsøkene. Bortsett fra den sentriske prismet fra fiberblandingen som er mellom Basalt og Liapor 8. Dette kan skyldes dårlig prøve, legg merke til den lave bruddlast i tabell 4.10. Hvorvidt forskjell i måleinstrument spiller inn på resultatene, er vanskelig å vite.

I tabell 5.5 er det valgt å plote makstøyningene fra DIC. Ved sammenligning av tøyningene er resultatene for Stalite-betongen høyere enn for alle betongene fra de tidligere forsøkene. Betongen med tørr Stalite har riktignok ikke veldig mye større tøyninger enn Liapor 8. Fiberbetongen har klart større tøyninger enn noen av de andre betongene.

Det er viktig å legge merke til forskjellen i fasthet. Sees det på terningfasthet på testdagen  $f_c$ , har Liapor 8 over  $20 \text{ MPa}$  høyere fasthet enn Stalite-betongen. Normalvektsbetongene har enda høyere fasthet. Da det ofte er en sammenheng mellom høyere fasthet og lavere tøyninger, kan dette være en forklaring på hvorfor de tidligere forsøkene har lavere tøyninger.

Tabell 5.5 viser at Stalite uten fiber har duktilitetsindeks i samme størrelsesorden som normalvektsbetongene med Gneis/Granitt og Kvartsitt som tilslag. Altså merkbart høyere enn Liapor 8. På bakgrunn av dette kan det sies at lettbetong med Stalite som tilslag skiller seg fra de typiske duktilitetsegenskapene til lettbetong og minner mer om normalbetong.

## 5.12 Sammenligning av tøyninger med Eurokode

Som man ser i tabell 5.6, antar Eurokoden lavere makstøyning. Det bør merkes at Eurocoden ikke skiller mellom lettbetong med forskjellig tilslag, men at tøyningen finnes med en faktor som bestemmes kun av densitet. Det er i realiteten flere materialegenskaper enn densiteten som bestemmer tøyningsegenskapene til betongen, og disse blir igjen bestemt av tilslaget og betongsammensettingen.

**Tabell 5.6:** Sammenligning av makstøyninger fra Eurokode [3] og fra sentriske forsøk

<b>Blanding</b>	<b>Forsøk</b>	<b>Eurocode</b>	
	$\frac{\epsilon_{cu}}{mm/m}$	$\frac{\epsilon_{lcu}}{mm/m}$	%
<b>DLWAC</b> <i>kN</i>	3,08	2,59	84,1
<b>WLWAC</b> <i>kN</i>	3,40	2,55	75,0
<b>FLWAC</b> <i>kN</i>	2,94	2,59	88,1

Tabell 5.6 viser at estimert maksimaltøyning i Eurokoden er 75 - 88 % av faktisk oppnådd maksimaltøyning for de sentrisk belastede prismene.

# Kapittel 6

## Konklusjon

Målet med denne oppgaven har vært å kartlegge duktiliteten til høyfast lettbetong med Stalite som tilslag. Det har blitt sett på forskjellen mellom betong blandet med tørr og vannmettet Stalite. Det har også blitt sett på en blanding med polyvinylalkoholfiber.

- Stalite har åpne porer i overflaten og derfor trakk blandingen med tørr Stalite til seg pasta før herding. Under testingen ble det observert at bruddflaten til den tørre blandingen gikk rundt enkelte av tilslagspartilkene, mens i den vannmettede gikk den stort sett gjennom.
- Bruddformene var som forventet for de ulike belastningene, og de var like bruddformene for normalbetong fra en tidligere studie. Ved kvalitativ visuell inspeksjon av bruddene, viste det seg at betongen med vannmettet Stalite var den som hadde de mest eksplosive bruddene og den sprøeste oppførselen. Blandingen med tørr Stalite var også eksplosiv og sprø. Betongen med fiberarmering hadde ikke eksplosiv oppførsel, og prismene holdt sammen og ble stående etter brudd.
- Håndberegningene hadde god overensstemmelse med testresultatene for de sentrisk belastede prismene. Geometrifaktoren som ble brukt var på 0,7.
- Tøyingsgradienten ble variert ved å forandre eksentrisiteten på trykkbelastningen. Det ble registrert større tøyninger på den mest belastede siden ved større eksentrisitet. Tøyningene ble målt med de to forskjellige metodene LVDT og DIC. Resultatene fra disse metodene stemte godt overens.
- I sammenligningen med tidligere resultater viste makstøyningene fra Stalite-betongen uten fiber seg å være større enn for normalbetong. Betongen med tørr Stalite hadde like tøyninger som lettbetong med Liapor 8, mens for betongen med vannmettet Stalite var tøyningene litt større. Det er viktig å merke seg at det er stor forskjell i trykkfasthet mellom betongene støpt i denne oppgaven og de i tidligere forsøkene. Betongen med vannmettet Stalite hadde også større duktilitet enn betongen med tørr Stalite. Begge blandingenes duktilitet var større enn for Liapor 8. De var i størrelsesordenen til normalbetong.

- Å introdusere bare en liten mengde fiber (0,5% av sementmassen), økte tøyninger og duktilitet signifikant. Den klart største tøyningen ble målt i fiberlettbetongen. Fiberlettbetongen var langt mer duktil enn alle de andre betongtypene. En ulempe med fiberarmert betong er at den har dårlig bearbeidbarhet. Blandingen i dette forsøket hadde et synkmål på 3 cm. Dette er noe som bør forbedres i fremtiden.
- Eurokode 2 skiller ikke mellom ulike lettilslag ved utregning av tøyning og underestimerer makstøyningene målt i denne oppgaven med 75-88 %.

Resultatene fra denne oppgaven er lovende for økt fremtidig bruk av Stalite i konstruksjoner. Store tøyninger og duktilitetsindeks på høyde med normalbetong, tyder på at egenskapene til høyfast lettbetong med Stalite som tilslag kan regnes som en mellomting mellom lettbetong og normalbetong. Med duktilitet som normalbetong og densitet som lettbetong, ser Stalite ut til å ha en god egenskap fra hver.

Det anbefales å forske videre på styrke/densitet-forholdet og på hvilke bruksområder betong med Stalite egner seg best.

# Kapittel 7

## Feilkilder

- Hetrogent materiale og segregering av tilslaget
- Formfeil og avvik i prøvestykke
- Varierende herdetid og fasthet
- Vanskelig å sentrere prøven i riggen og friksjon
- Riggen er ikke 100% stiv
- Feil ved måling av tøyninger (SG, LVDT, DIC)
- Andre målefeil





# Bibliografi

- [1] J. Zivkovic and J. A. Øverli, "Shear capacity of lightweight aggregate concrete beams without shear reinforcement," pp. 1, 4, 11, NTNU, 2017.
- [2] NS 3473:2003, "Prosjektering av betongkonstruksjoner - Beregnings- og konstruksjonsregler," Standard Norge, Lysaker, Norway, 2003.
- [3] NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008, "Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger," Standard Norge, Lysaker, Norway, 2004.
- [4] EuroLightCon, "Lwac material properties state-of-the-art," *Document BE96-3942/R2*, pp. 9, 17, 18–19, 54–55, 65, 1998.
- [5] Norsk Betongforening, "Publikasjon nr 22: Lettbetong spesifikasjoner og produksjonsveiledning," pp. 37–38, 47–64, 65–66, 2013.
- [6] R. W. Castrodale, J. Zivkovic, and R. Valum, "Material properties of high performance structural lightweight concrete," pp. 1–9, 2017.
- [7] Leca Norge. (2010) 2738 Leca lett fyllmasse. Read 08.02.18. [Online]. Available: <http://www.leca.no/sites/default/files/2016-05/Leca%20Lett%20Fyllmasse.pdf>
- [8] P. Dittmar. (2006) 18 Lofoton 14 bridge. commons.wikimedia. Read 02.02.18. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3A18\\_Lofoton\\_14\\_bridge.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3A18_Lofoton_14_bridge.jpg)
- [9] Norsk Betongforening, "Publikasjon nr 23: Lettbetong prosjekteringsveiledning," pp. 6–7, 10–17, 2013.
- [10] World.blogspot.no. (2012) File: Lecakule. Read 07.03.18. [Online]. Available: <https://civil-engg-world.blogspot.no/2012/12/Leca-lightweight-Aggregate-Thermal-Insulated-Concrete.html>
- [11] S. Chandra and L. Berntsson, *Lightweight Aggregate Concrete*. Elsevier, 2002, pp. 139-140.

- 
- [12] FCN Betonelemente. Liapor. Read 08.02.18. [Online]. Available: <https://www.nuedling.de/wandbaustoffe/>
- [13] Specialist Aggregates Ltd. Lytag. Read 09.02.18. [Online]. Available: [http://www.specialistaggregates.com/advanced\\_search\\_result.php?search\\_in\\_description=1&keywords=Lytag](http://www.specialistaggregates.com/advanced_search_result.php?search_in_description=1&keywords=Lytag)
- [14] S. Kenneth and P. E. Harmon, "Engineering properties of structural lightweight concrete," pp. 2–3, Carolina Stalite Company, United States, 2006.
- [15] Carolina Stalite Company. (2011) Stalite lightweight aggregate properties and gradations for structural applications. Read 08.02.18. [Online]. Available: <http://www.stalite.com/uploads/Mat1%20Specs%20Structural%20Gradations.pdf>
- [16] J. E. Nilsskog, R. Valum, and K. S. Harmon, "Pumping og high performance lightweight concrete for the raftsundet brige," pp. 4, 6, 1998.
- [17] Carolina Stalite Company. Stalite. Read 08.02.18. [Online]. Available: <http://www.stalite.com/technical-resources.php?cat=30>
- [18] Carolina Stalite Company. (2011) Stalite lightweight aggregate properties and gradations for structural applications. Read 07.02.18. [Online]. Available: <http://www.stalite.com/uploads/Mat1%20Specs%20Structural%20Gradations.pdf>
- [19] S. Bostrøm, "Fullskala pumpeforsøk med Stalite som lettilslag," pp. 1, 9, SINTEF Bygg og miljøteknikk, 2000, Read 07.02.18. [Online]. Available: <https://www.nb.no/nbsok/nb/e59724070b545edb14c3732ccc787e1b?lang=no#13>
- [20] Carolina Stalite Company. Recommendations for Moisture Conditioning of STALITE Expanded Lightweight Coarse Aggregate Prior to Batching. Read 21.03.18. [Online]. Available: <http://www.stalite.com/technical-resources.php?cat=36>
- [21] Carolina Stalite Company. Moisture dynamics of expanded slate lightweight aggregate. Read 30.01.18. [Online]. Available: [www.stalite.com/uploads/moisturedynamicslightweightaggregate.pdf](http://www.stalite.com/uploads/moisturedynamicslightweightaggregate.pdf)
- [22] E. Thorenfeldt, "International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete," p. 720, 1995.
- [23] J. R. Wall and S. Maloof, "Early age and long term strength of mixes made with stalite lightweight aggregate," p. 3, Carolina Stalite Company reserch lab, Gold Hill, North Carolina, United States, 2003.
- [24] Statens Vegvesen. (2015) Alkalireaksjoner - Erfaringer med lett-betong. Statens vegvesen. Read 31.01.18. [Online]. Available: [https://www.vegvesen.no/\\_attachment/1372468/binary/1110706?fast\\_title=Nr+499+Alkalireaksjoner+-+Erfaringer+med+lettbetong.pdf](https://www.vegvesen.no/_attachment/1372468/binary/1110706?fast_title=Nr+499+Alkalireaksjoner+-+Erfaringer+med+lettbetong.pdf)
- [25] H. Nedrelid, "Towards a better understanding of the ultimate behaviour of lightweight aggregate concrete in compression and bending," NTNU, 2012.

- 
- [26] G. Markeset, "Failure of concrete under compressive strain gradients," NTH, 1993.
- [27] Kuraray Co, "Characteristics of KURALON (PVA fiber)," Presentasjon om PVA fiber.
- [28] Kuraray Co . What's KURALON"? Read 26.04.18. [Online]. Available: <http://kuralon-frc.kuraray.com/whats>
- [29] NS-EN 933-1:2012, "Prøvningsmetoder for geometriske egenskaper for tilslag, del 1: Bestemmelse av kornstørrelsesfordeling, sikteanalyse," Standard Norge, Lysaker, Norway, 2012.
- [30] American Society of the international association for Testing and Materials (ASTM-International), "Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate," C127-15.
- [31] NS-EN 12350-2:2009, "Prøving av fersk betong, Del 2: Synkmål," Standard Norge, Lysaker, Norway, 2009.
- [32] NS-EN 12390-3:2009, "Prøving av herdnet betong Del 3:Prøvelegemers trykkfasthet," Standard Norge, Lysaker, Norway, 2009.
- [33] NS-EN 12390-6:2009, "Prøving av herdnet betong Del 6: Prøvelegemers spaltestrekkfasthet," Standard Norge, Lysaker, Norway, 2009.
- [34] O. Skjølvold, "Bruddenergi ved 3-punkts prøving av prizmer med kjerv," SINTEF Byggeforsk, 2007.
- [35] NS-EN 12390-7:2009, "Prøving av herdnet betong Del 7: Densitet av herdnet betong," Standard Norge, Lysaker, Norway, 2009.
- [36] Omega. What is a LVDT? Omega Engineering. Read 05.06.18. [Online]. Available: <https://www.omega.co.uk/technical-learning/linear-variable-displacement-transducers.html>
- [37] Store Norske Leksikon. Strekkklapp. Read 09.03.18. [Online]. Available: <https://snl.no/strekkklapp>
- [38] LaVision. Digital Image Correlation (DIC). LaVision. Read 30.05.18. [Online]. Available: <https://www.lavision.de/en/techniques/dic-dvc/index.php>
- [39] S. Jacobsen(Redaktør), M. Maage, S. Smepllass, K. O. Kjellsen, E. J. Sellevold, J. Lindgård, R. Cepuritis, R. Myrdal, O. Bjøntegaard, M. Geiker, and m.fl, *Concrete Technology Kompendium*. NTNU, Fakultet for arkitektur og billedkunst, Institutt for bygg, anlegg og transport, 2016.
- [40] Einar Aassved Hansen and Gro Markeset, "Duktilitetens innflytelse på bruddforløpet i høyfast betong," pp. 5,9, NTH, 1992.

---

---

# Vedlegg A - Fullskala

## Håndberegning

<b>DLWAC</b>	<b>e=0</b>	<b>e=7.78</b>	<b>e=23.33</b>
Prisme høyde (mm)	480	480	480
Prisme bredde (mm)	100	100	100
Pisme lengde (mm)	140	140	140
Eksentrisitet (mm)	0	7.78	23.33
Last lengde (mm)	140	188.01	140.01
fck (MPa)	77.9	77.9	77.9
Geometrifaktor	0.7	0.7	0.7
Kapasitet (N)	<b>763</b>	<b>513</b>	<b>382</b>

<b>WLWAC</b>	<b>e=0</b>	<b>e=7.78</b>	<b>e=23.33</b>
Prisme høyde (mm)	480	480	480
Prisme bredde (mm)	100	100	100
Pisme lengde (mm)	140	140	140
Eksentrisitet (mm)	0	7.78	23.33
Last lengde (mm)	140	188.01	140.01
fck (MPa)	80.7	80.7	80.7
Geometrifaktor	0.7	0.7	0.7
Kapasitet (N)	<b>791</b>	<b>531</b>	<b>395</b>

<b>FLWAC</b>	<b>e=0</b>	<b>e=7.78</b>	<b>e=23.33</b>
Prisme høyde (mm)	480	480	480
Prisme bredde (mm)	100	100	100
Pisme lengde (mm)	140	140	140
Eksentrisitet (mm)	0	7.78	23.33
Last lengde (mm)	140	188.01	140.01
fck (MPa)	77.6	77.6	77.6
Geometrifaktor	0.7	0.7	0.7
Kapasitet (N)	<b>760</b>	<b>511</b>	<b>380</b>

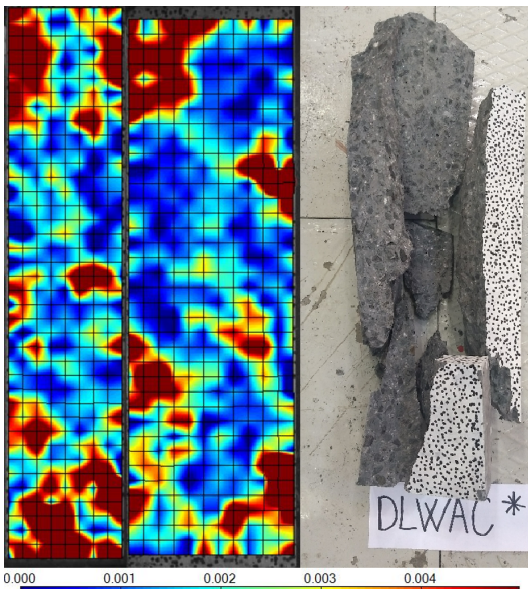
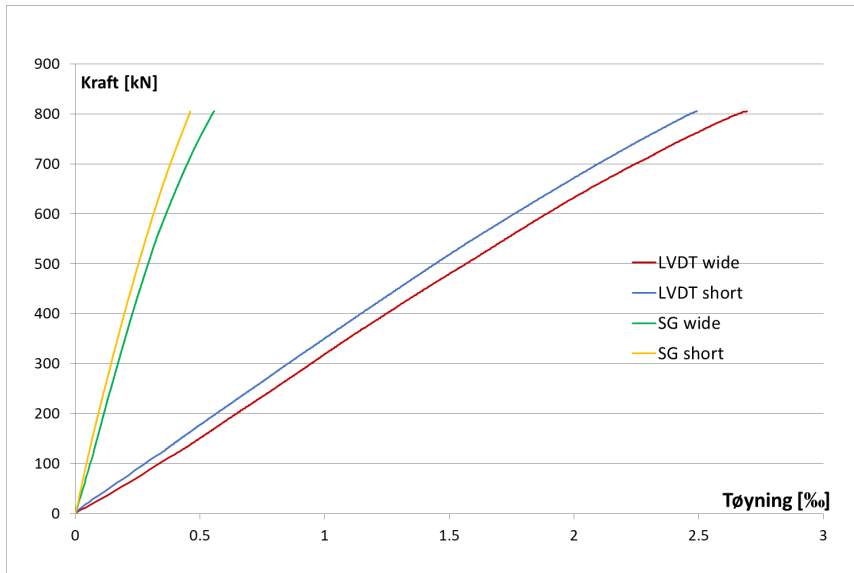
## Prismeforsøk

På de neste sidene kommer en gjennomgang av alle prismeforsøkene. For hver av prismene er det en graf med tøyningene fra LVDT og SG, plottet mot trykkraften. Det er et DIC bilde fra hver av kameraene som viser tøyningsfeltet rett før brudd. På alle DIC-bildene går skalaen fra 0,000 til 0,005, som tilsvarer 0 til 5 ‰, se figur 7.1. Ved siden av DIC bildene er det bilde av prismet etter brudd. I tabellen er bruddlasten kalt kraft og forskyvningen kalt forsk. Resten av verdiene er diverse tøyninger. Alle verdier er lest av rett før brudd. Nederst er det kommentarer fra hvert forsøk.



**Figur 7.1:** Fargeskala tøyninger DIC

## DLWAC1



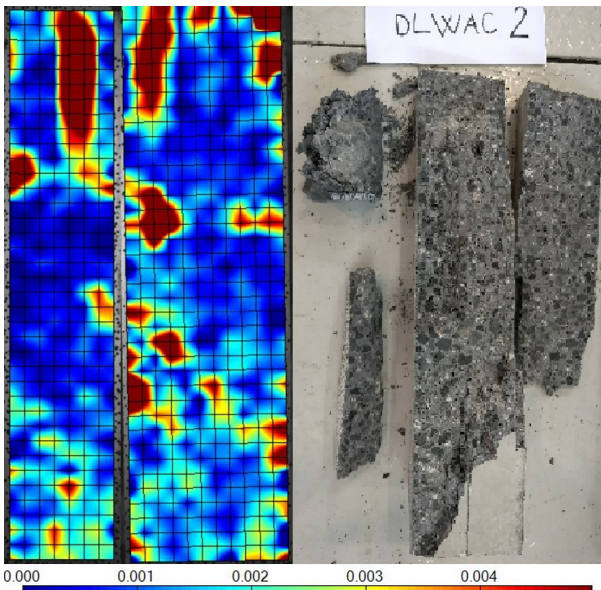
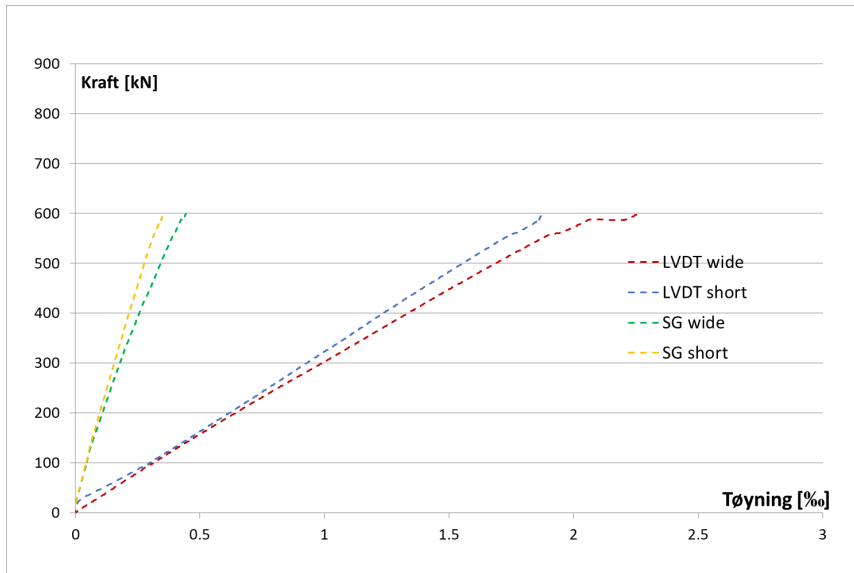
<b>Kraft</b>	804,94
<b>Forsk.</b>	3,20
<b>LVDT-W</b>	2,69
<b>LVDT-S</b>	2,49
<b>DIC-W</b>	2,64
<b>DIC-S</b>	3,08
<b>DIC-max</b>	3,08
<b>SG-W</b>	2,694
<b>SG-S</b>	2,493

### Kommentarer:

58 dager - 77,9 MPa. Små luftobler på sidene. Lik deformasjon på begge LVDT-er ved forlastning.



## DLWAC2

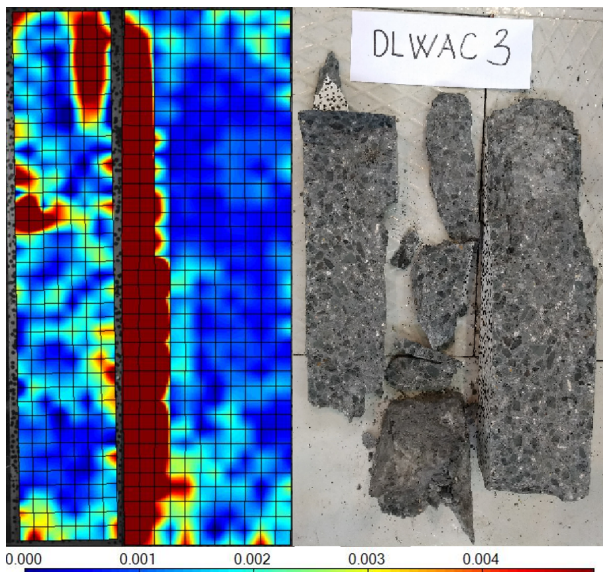
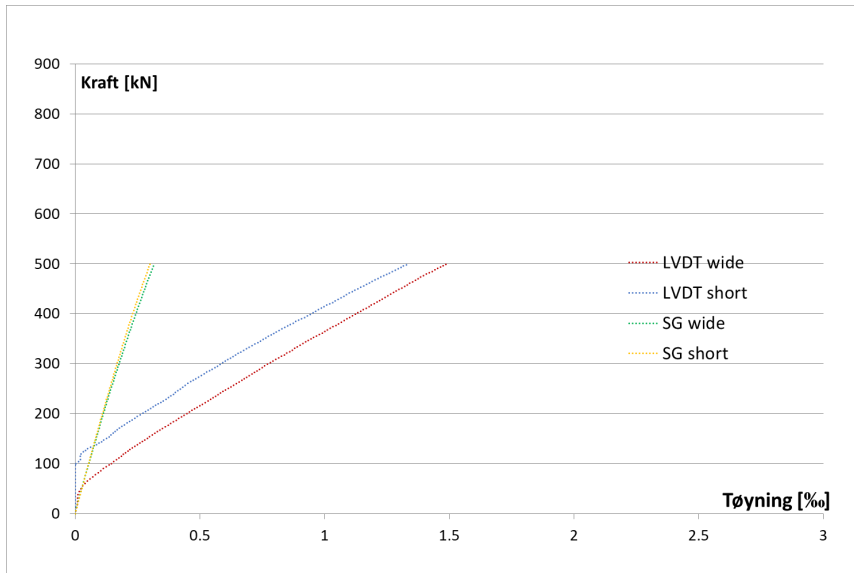


<b>Kraft</b>	679,16
<b>Forsk.</b>	3,33
<b>LVDT-W</b>	2,65
<b>LVDT-S</b>	2,13
<b>DIC-W</b>	2,70
<b>DIC-S</b>	2,61
<b>DIC-max</b>	2,90
<b>SG-W</b>	2,655
<b>SG-S</b>	2,132

### Kommentarer:

53 dager - 78,2 MPa. Et dårlig hjørne på toppen. Eksentrisk brudd.

### DLWAC3

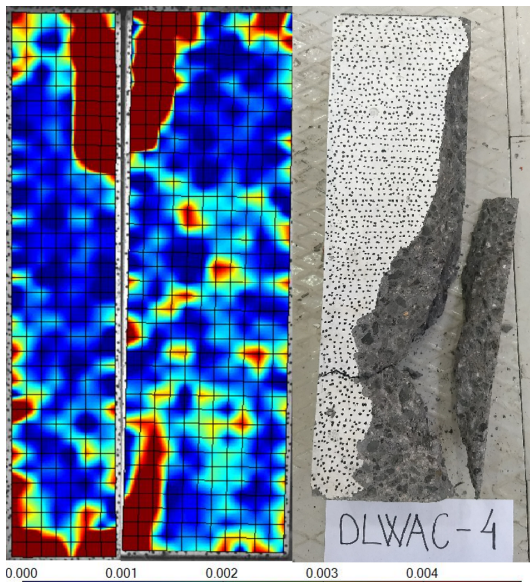
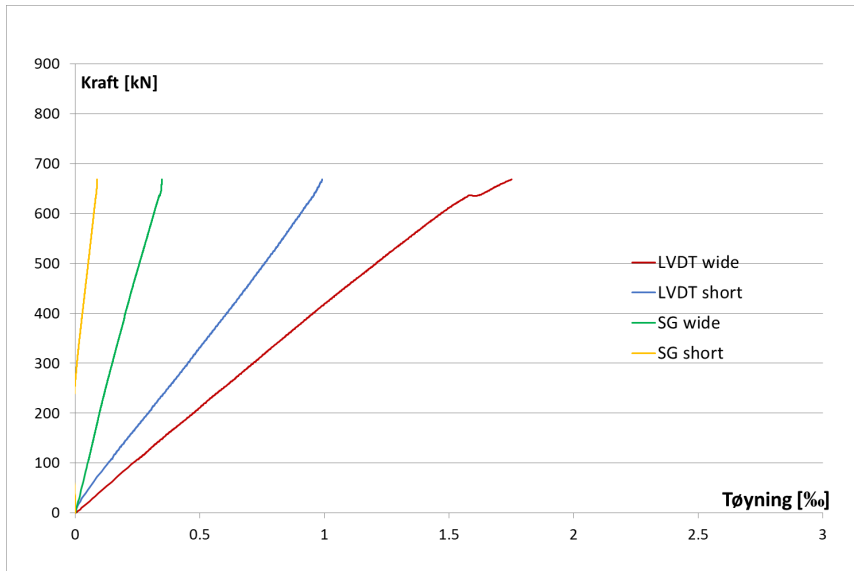


<b>Kraft</b>	572,07
<b>Forsk.</b>	2,66
<b>LVDT-W</b>	2,16
<b>LVDT-S</b>	2,37
<b>DIC-W</b>	1,40
<b>DIC-S</b>	1,39
<b>DIC-max</b>	2,00
<b>SG-W</b>	2,162
<b>SG-S</b>	2,371

#### Kommentarer:

53 dager - 78,2 MPa. Et dårlig hjørne på toppen (1,2 cm\*0,8 cm). Mer last på kortside. LVDT short kan ha gått i stykker. 0.004 mm forskjell mellom LVDT-ene. Fikk sentrisk brudd.

## DLWAC4

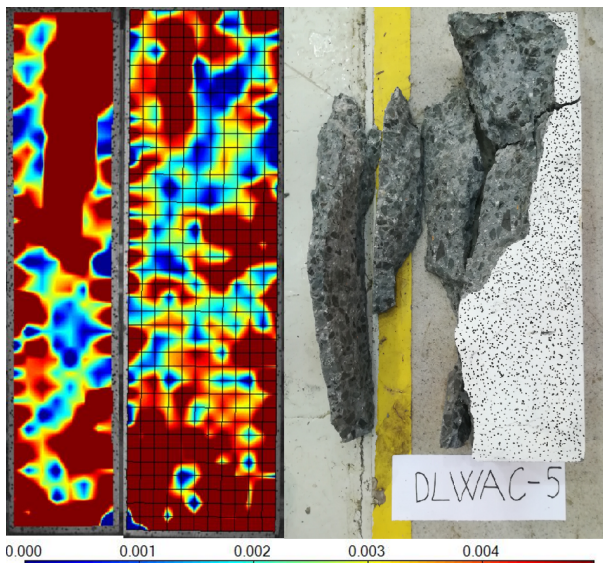
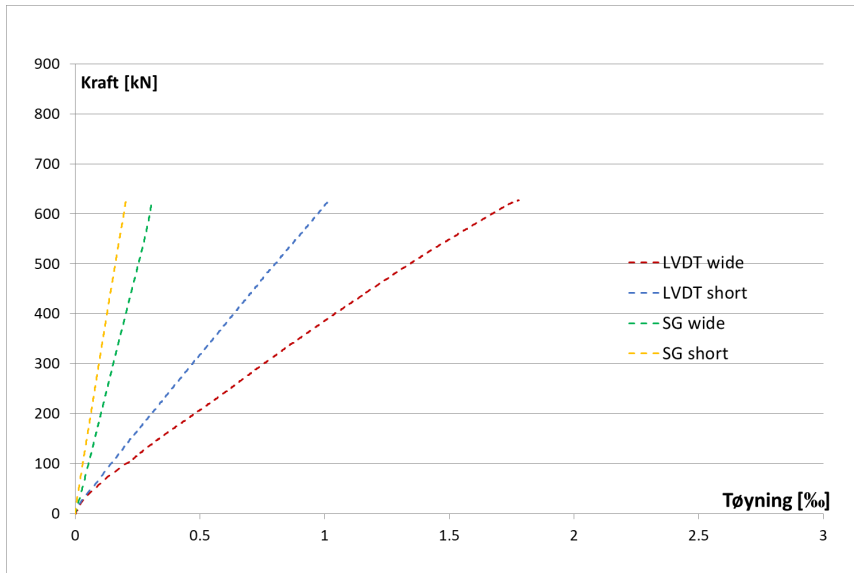


<b>Kraft</b>	668,32
<b>Forsk.</b>	2,99
<b>LVDT-W</b>	1,75
<b>LVDT-S</b>	0,99
<b>DIC-W</b>	2,72
<b>DIC-S</b>	4,14
<b>DIC-max</b>	4,14
<b>SG-W</b>	1,751
<b>SG-S</b>	0,990

### Kommentarer:

53 dager - 78,2 MPa. Et dårlig hjørne på toppen (0,7 cm\*1,0 cm). Eksentrisk lastet. Eksplisivt brudd.

## DLWAC5

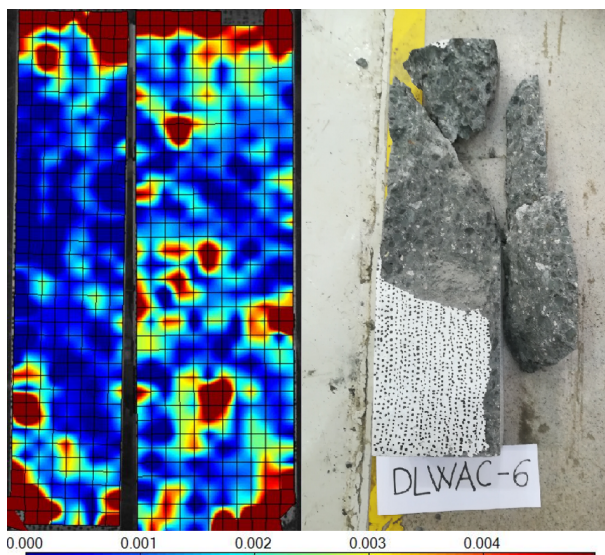
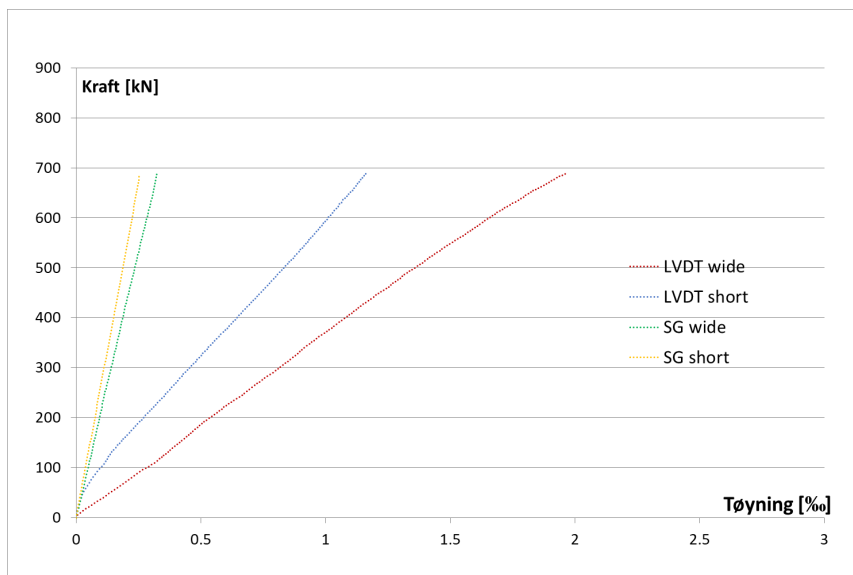


<b>Kraft</b>	627,39
<b>Forsk.</b>	2,90
<b>LVDT-W</b>	1,78
<b>LVDT-S</b>	1,02
<b>DIC-W</b>	2,31
<b>DIC-S</b>	3,34
<b>DIC-max</b>	3,47
<b>SG-W</b>	1,780
<b>SG-S</b>	1,018

### Kommentarer:

56 dager - 77,9 MPa. Bra prøve. Lite gap mellom prøve og stålplate pga. ikke 100 % flat topp. Eksentrisk belastet.

## DLWAC6

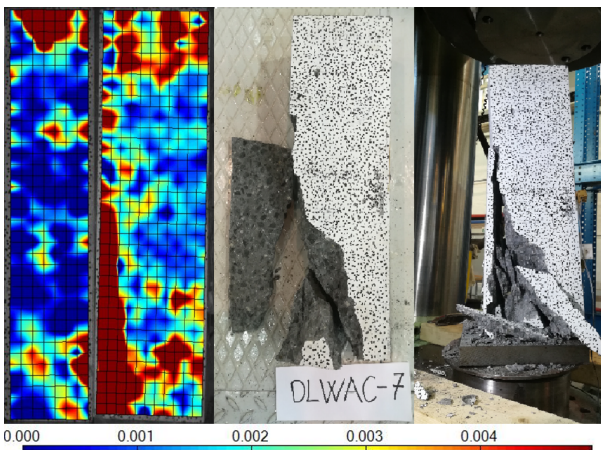
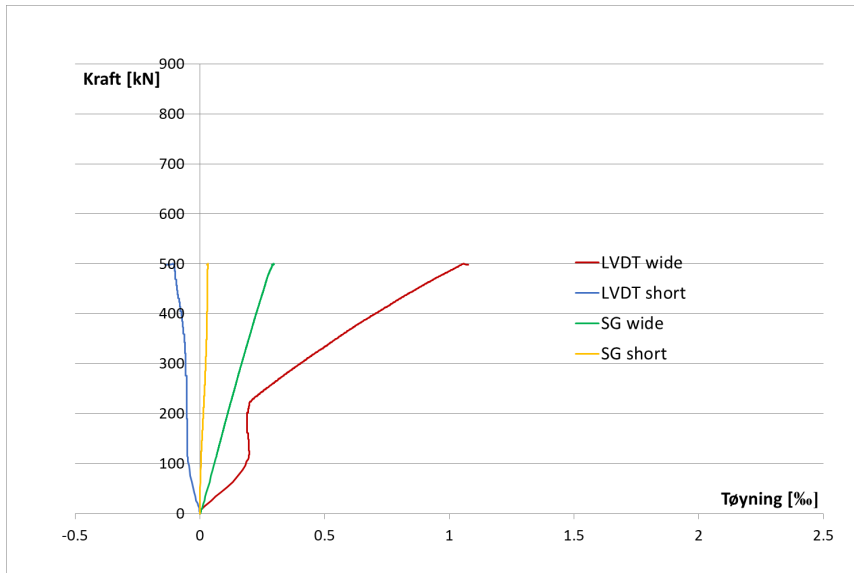


<b>Kraft</b>	688,32
<b>Forsk.</b>	2,87
<b>LVDT-W</b>	1,96
<b>LVDT-S</b>	1,16
<b>DIC-W</b>	2,87
<b>DIC-S</b>	3,84
<b>DIC-max</b>	3,87
<b>SG-W</b>	1,965
<b>SG-S</b>	1,162

### Kommentarer:

56 dager - 77,9 MPa. Bra prøve. Nye kulelagre. Bra brudd.

**DLWAC7**

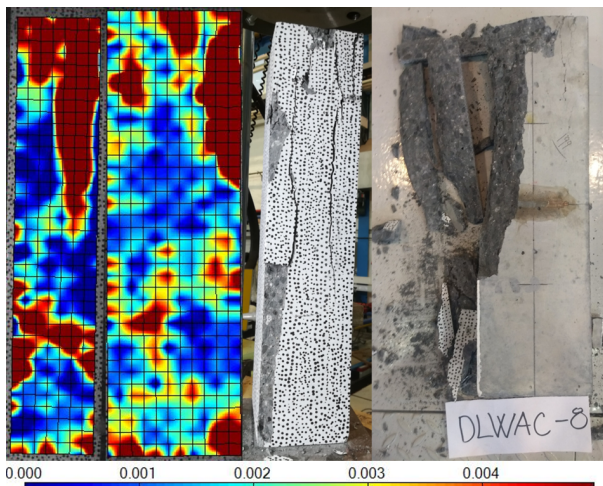
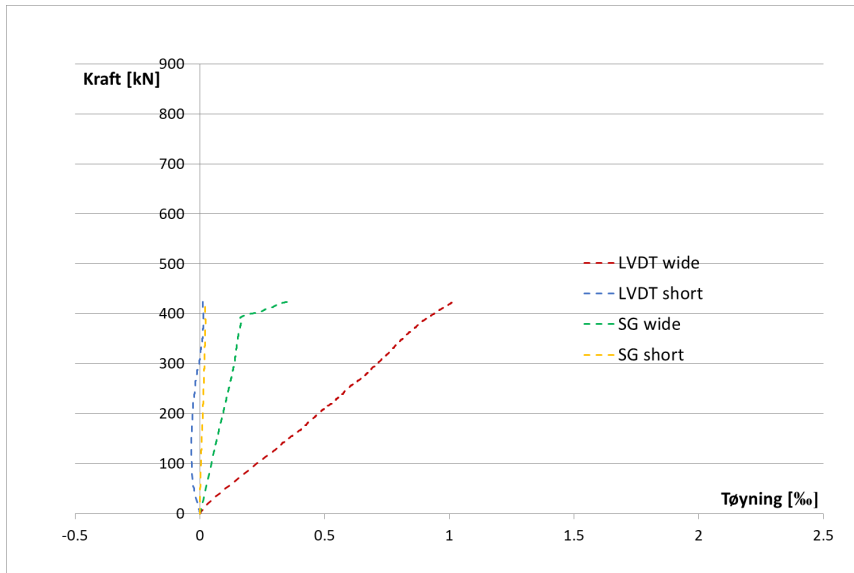


<b>Kraft</b>	525,01
<b>Forsk.</b>	2,54
<b>LVDT-W</b>	1,31
<b>LVDT-S</b>	0,31
<b>DIC-W</b>	1,27
<b>DIC-S</b>	4,21
<b>DIC-max</b>	4,21
<b>SG-W</b>	1,314
<b>SG-S</b>	-0,309

**Kommentarer:**

57 dager - 79,8 MPa. Bra brudd. Ikke eksplosivt. LVDT på wide side stoppet på 0.002 mm før den begynte å bevege seg igjen ved en last på rundt 220 kN. Har lineær bevegelse etter pausen.

## DLWAC8

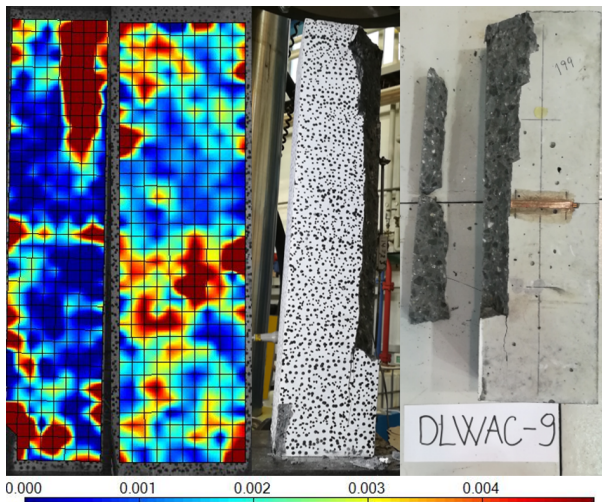
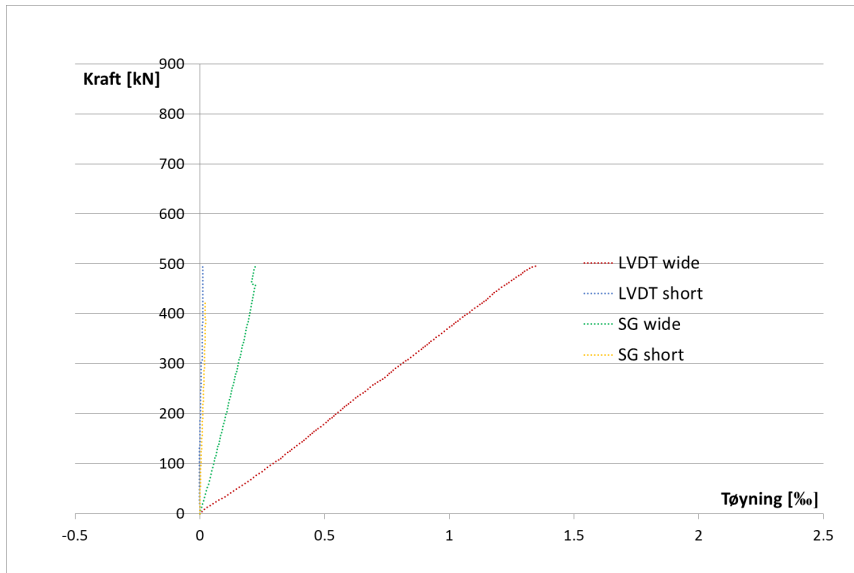


<b>Kraft</b>	424,67
<b>Forsk.</b>	2,41
<b>LVDT-W</b>	1,02
<b>LVDT-S</b>	0,01
<b>DIC-W</b>	1,49
<b>DIC-S</b>	4,08
<b>DIC-max</b>	4,08
<b>SG-W</b>	1,019
<b>SG-S</b>	0,015

### Kommentarer:

57 dager - 79.8 MPa. Bra brudd, bare på mest belastede side. Ikke eksplosivt. Bra lastflater. En stor pore på den mest belastede siden.

## DLWAC9



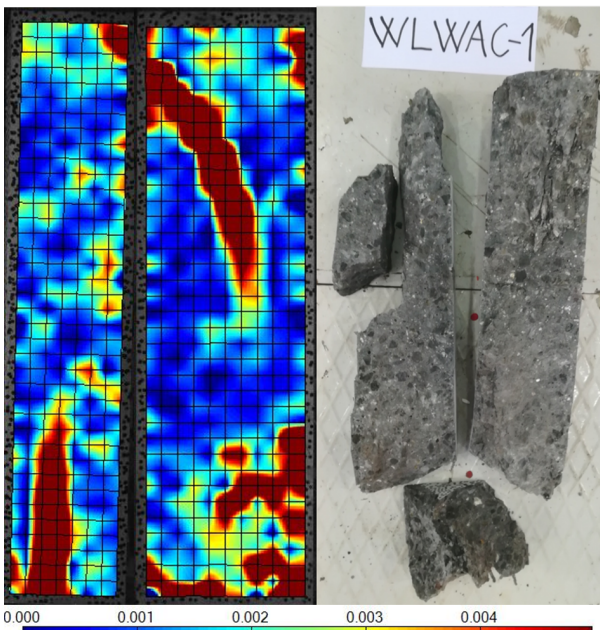
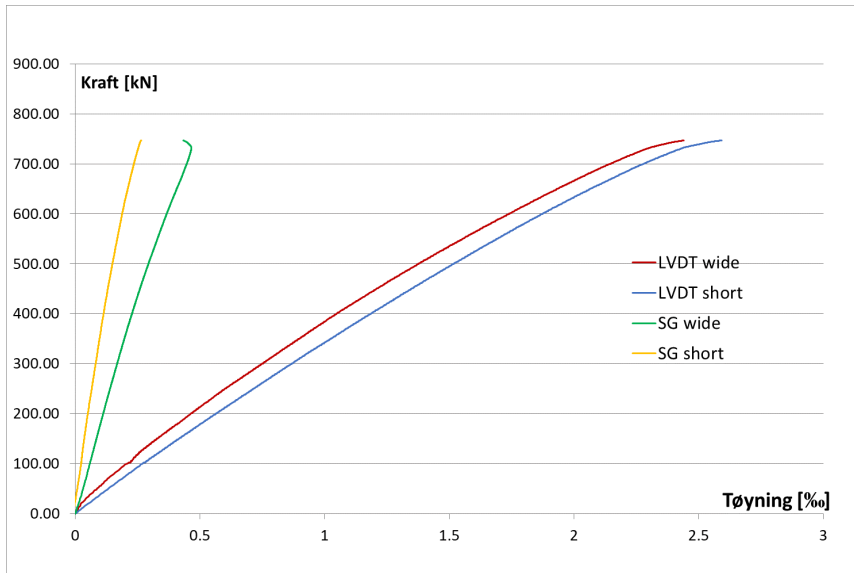
<b>Kraft</b>	495,93
<b>Forsk.</b>	2,61
<b>LVDT-W</b>	1,35
<b>LVDT-S</b>	0,01
<b>DIC-W</b>	1,97
<b>DIC-S</b>	3,81
<b>DIC-max</b>	3,81
<b>SG-W</b>	1,349
<b>SG-S</b>	0,009

### Kommentarer:

58 dager - 77.9 MPa. Bra prøve. Bra brudd på mest belastede side. Ikke eksplosivt. Ble stående, bunnen forble hel.



**WLWAC1**



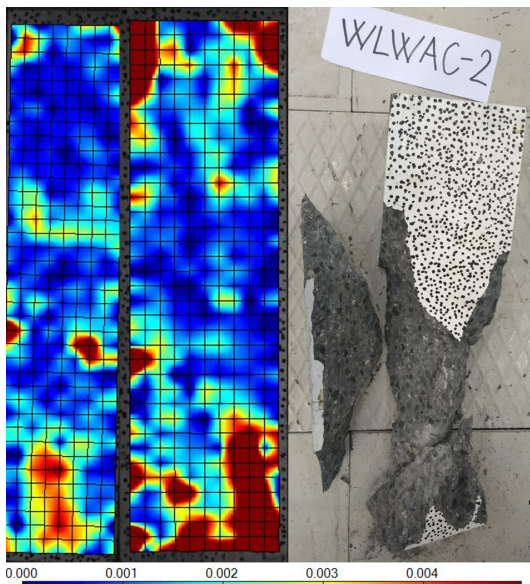
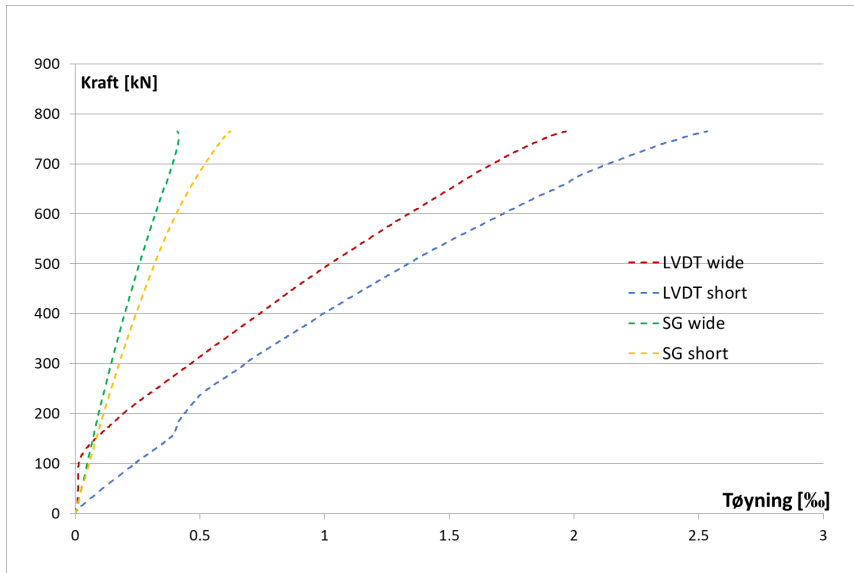
<b>Kraft</b>	746,43
<b>Forsk.</b>	3,38
<b>LVDT-W</b>	2,44
<b>LVDT-S</b>	2,59
<b>DIC-W</b>	2,70
<b>DIC-S</b>	2,71
<b>DIC-max</b>	3,40
<b>SG-W</b>	0,466
<b>SG-S</b>	0,264*

\*Dårlig limt strekklapp. Hadde vært høyere verdi hvis den hadde vært limt på skikkelig.

**Kommentarer:**

29 dager - 80,7 MPa. Bra prøve. Bra, eksplosivt brudd.

**WLWAC2**

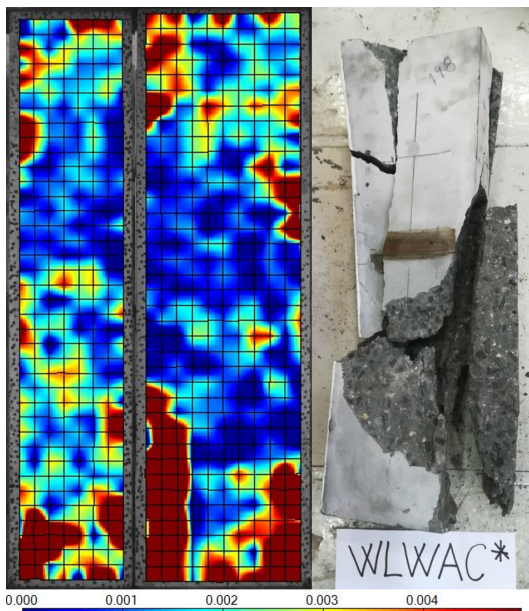
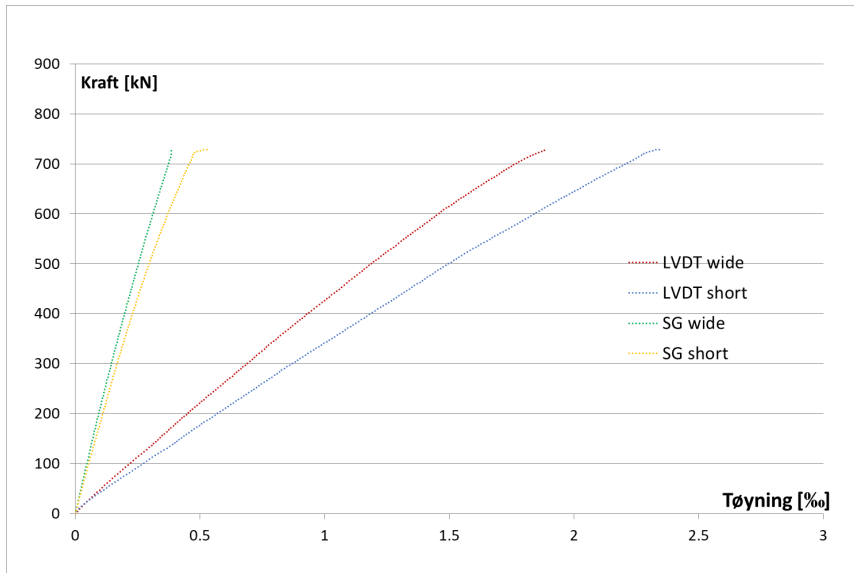


<b>Kraft</b>	764,83
<b>Forsk.</b>	3,18
<b>LVDT-W</b>	1,97
<b>LVDT-S</b>	2,54
<b>DIC-W</b>	3,42
<b>DIC-S</b>	2,72
<b>DIC-max</b>	3,42
<b>SG-W</b>	0,415
<b>SG-S</b>	0,540

**Kommentarer:**

29 dager - 80,7 MPa. I starten av testingen var ikke bunnen helt rett. Prøven var ikke helt nøyaktig. Bra, eksplisivt brudd.

### WLWAC3

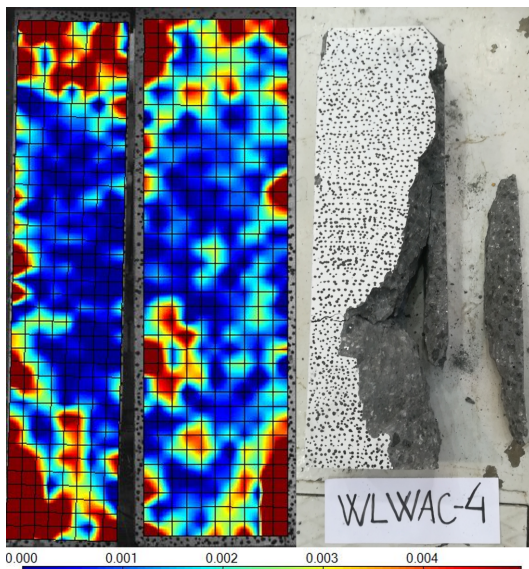
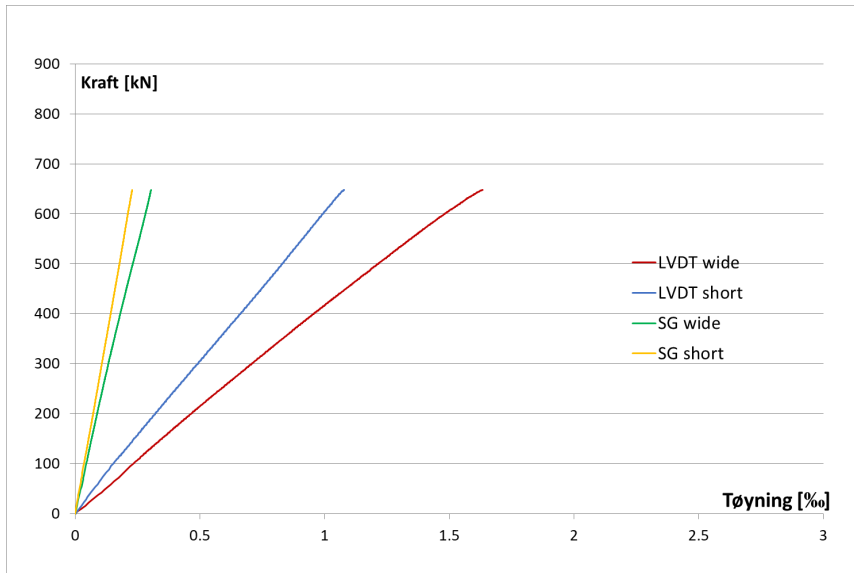


<b>Kraft</b>	728,73
<b>Forsk.</b>	3,11
<b>LVDT-W</b>	1,89
<b>LVDT-S</b>	2,35
<b>DIC-W</b>	3,18
<b>DIC-S</b>	2,56
<b>DIC-max</b>	3,23
<b>SG-W</b>	0,386
<b>SG-S</b>	0,540

#### Kommentarer:

34 dager - 79,4 MPa. Bra prøve. Bra, eksplosivt brudd.

**WLWAC4**

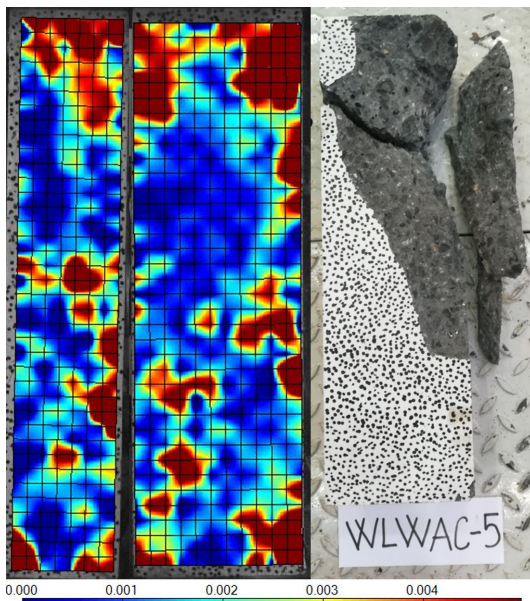
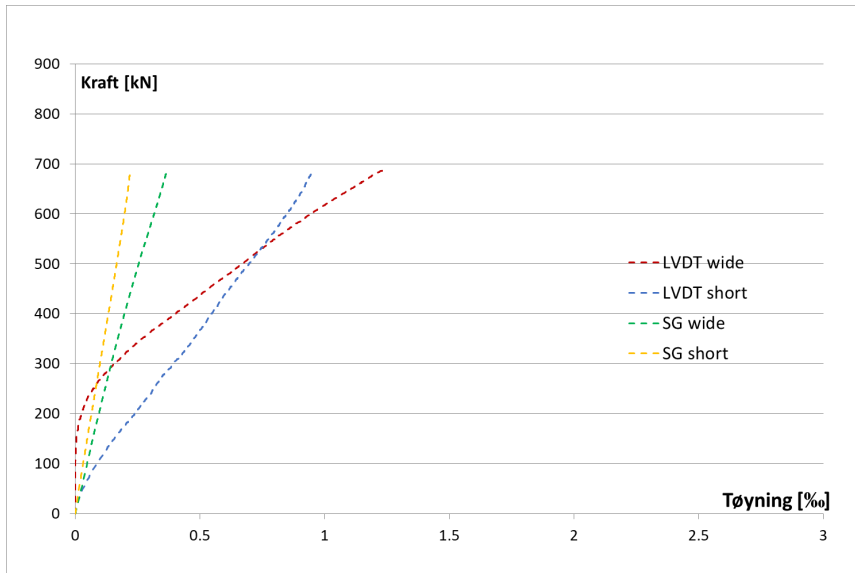


<b>Kraft</b>	648,04
<b>Forsk.</b>	2,58
<b>LVDT-W</b>	1,64
<b>LVDT-S</b>	1,08
<b>DIC-W</b>	2,82
<b>DIC-S</b>	3,69
<b>DIC-max</b>	3,69
<b>SG-W</b>	0,304
<b>SG-S</b>	0,229

**Kommentarer:**

32 dager - 79,4 MPa. Bra prøve, bra brudd.

**WLWAC5**

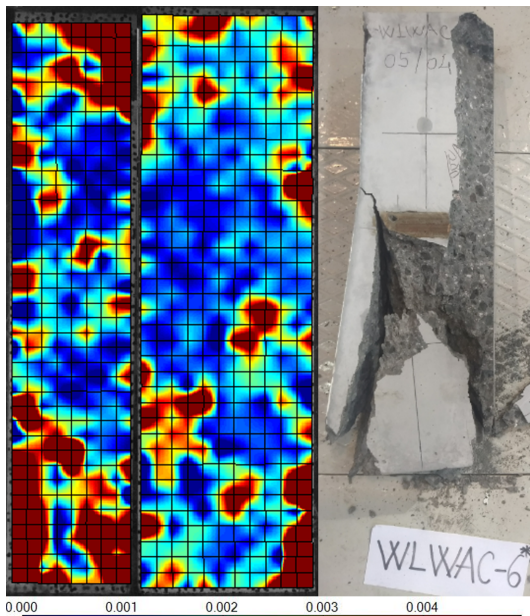
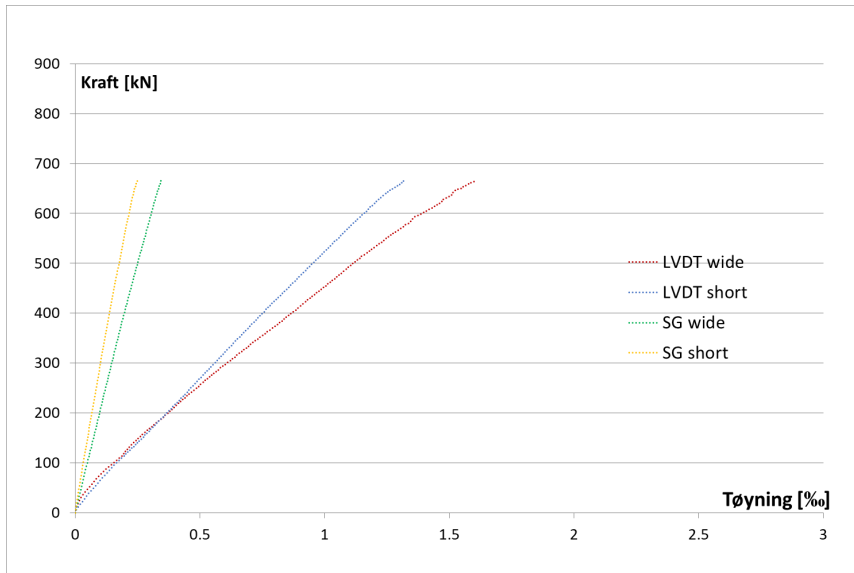


<b>Kraft</b>	687,44
<b>Forsk.</b>	2,51
<b>LVDT-W</b>	1,24
<b>LVDT-S</b>	0,96
<b>DIC-W</b>	2,78
<b>DIC-S</b>	4,07
<b>DIC-max</b>	4,07
<b>SG-W</b>	0,368
<b>SG-S</b>	0,221

**Kommentarer:**

33 dager - 79,4 MPa. Bra, eksentrisk brudd.

## WLWAC6

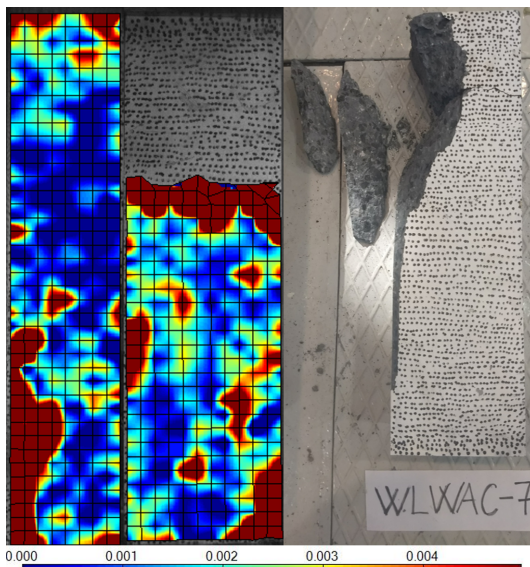
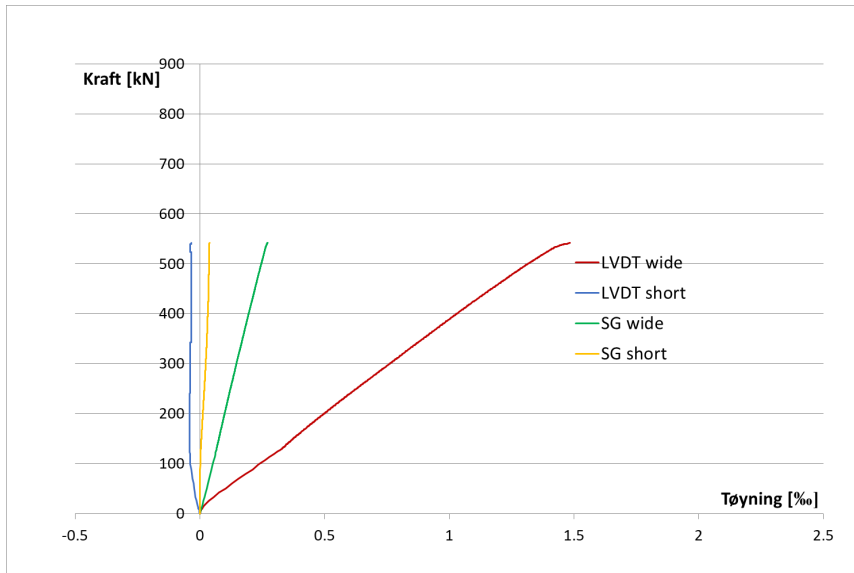


<b>Kraft</b>	666,24
<b>Forsk.</b>	3,02
<b>LVDT-W</b>	1,61
<b>LVDT-S</b>	1,32
<b>DIC-W</b>	2,59
<b>DIC-S</b>	3,92
<b>DIC-max</b>	4,12
<b>SG-W</b>	0,344
<b>SG-S</b>	0,248

### Kommentarer:

33 dager - 79,4 MPa. Bra prøve. Samme tøyninger opp til 125 kN = sentrisk. Etter 125 kN blir det eksentrisk belastning. Rart brudd.

**WLWAC7**



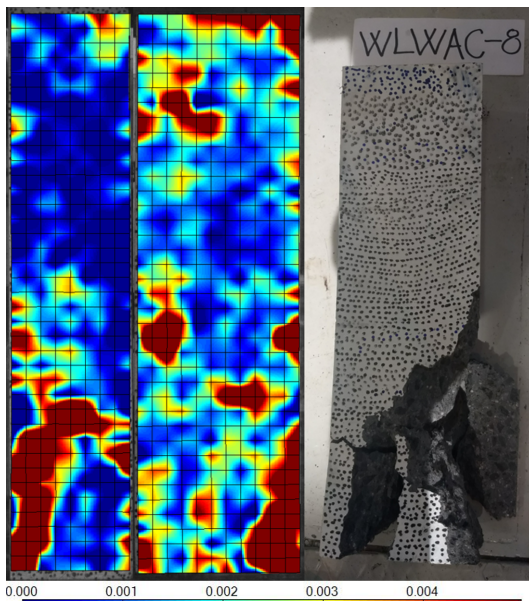
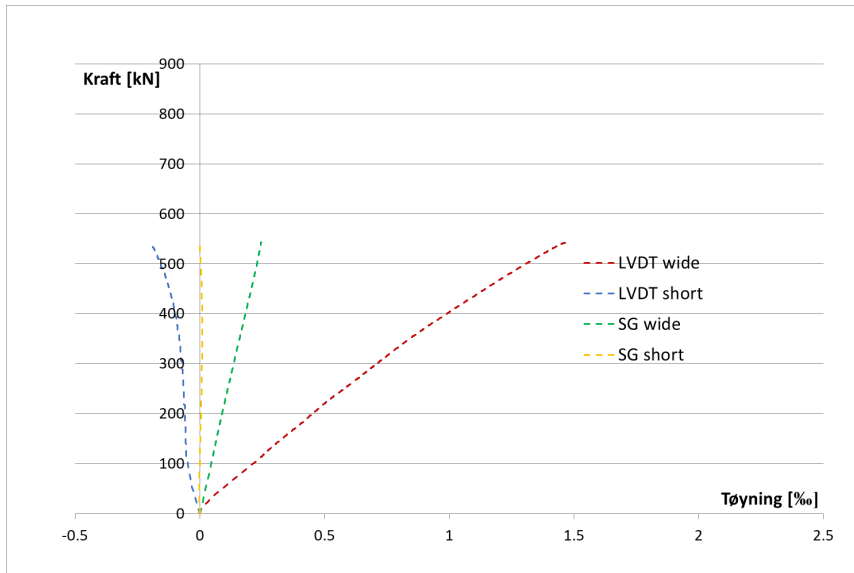
<b>Kraft</b>	541,66
<b>Forsk.</b>	2,69
<b>LVDT-W</b>	1,48
<b>LVDT-S</b>	-0,03
<b>DIC-W</b>	2,23*
<b>DIC-S</b>	4,19
<b>DIC-max</b>	4,53
<b>SG-W</b>	0,271
<b>SG-S</b>	0,039

\*obs: feil med DIC wide side på denne prøven.

**Kommentarer:**

34 dager - 79,4 MPa. To store luftbobler på trykksiden. Veldig eksplosivt brudd. Det skjedde noe feil med DIC-analysen på øvre halvdel av wide side. Analysen er derfor kun tatt med på nedre halvdel.

### WLWAC8



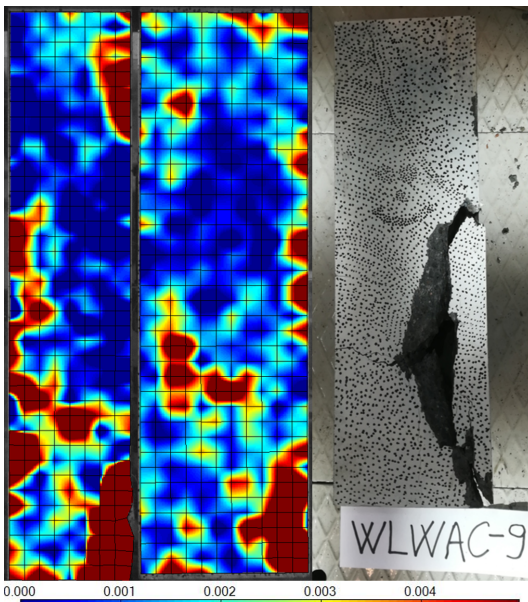
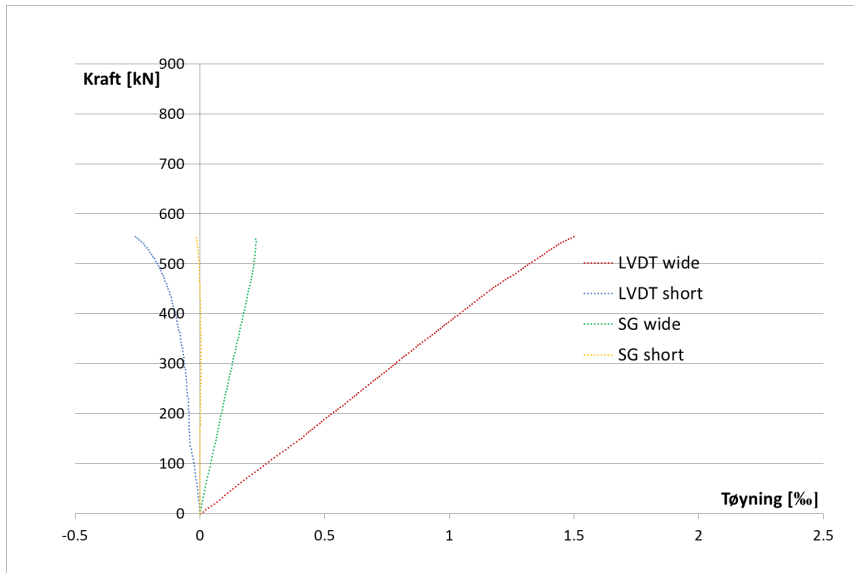
<b>Kraft</b>	542,90
<b>Forsk.</b>	2,69
<b>LVDT-W</b>	1,47
<b>LVDT-S</b>	-0,19
<b>DIC-W</b>	3,49
<b>DIC-S</b>	4,76
<b>DIC-max</b>	4,98
<b>SG-W</b>	0,246
<b>SG-S</b>	-0,002

#### Kommentarer:

34 dager - 79,4 MPa. Bra prøve. Bra brudd. Negative tøyninger.



**WLWAC9**

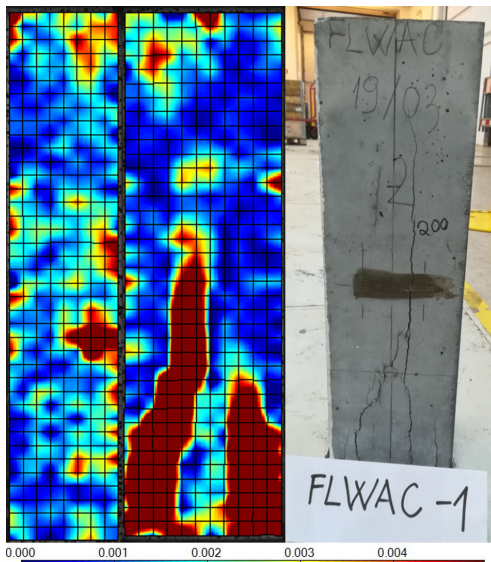
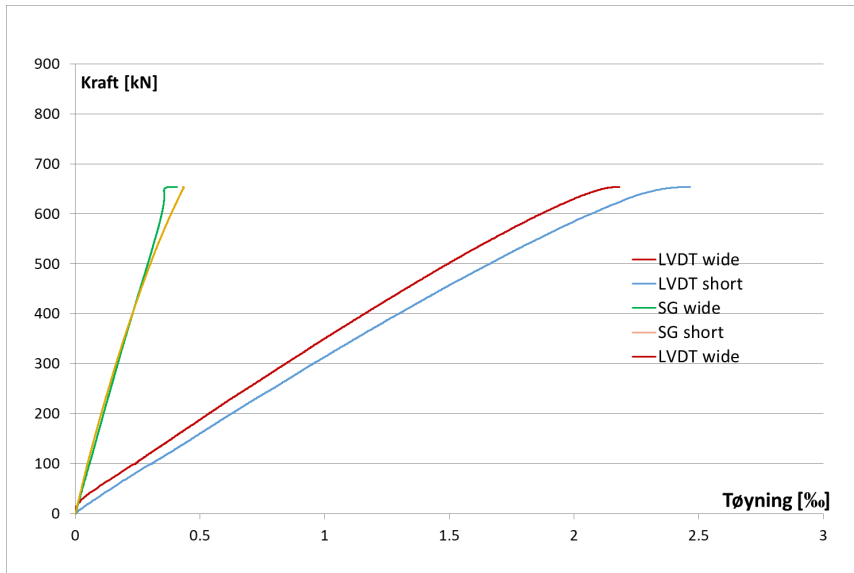


<b>Kraft</b>	554,46
<b>Forsk.</b>	3,19
<b>LVDT-W</b>	1,50
<b>LVDT-S</b>	-0,26
<b>DIC-W</b>	3,82
<b>DIC-S</b>	5,00
<b>DIC-max</b>	5,87
<b>SG-W</b>	0,225
<b>SG-S</b>	-0,013

**Kommentarer:**

34 dager - 79,4 MPa. Bra prøve. Bra brudd. Negative tøyninger.

## FLWAC1

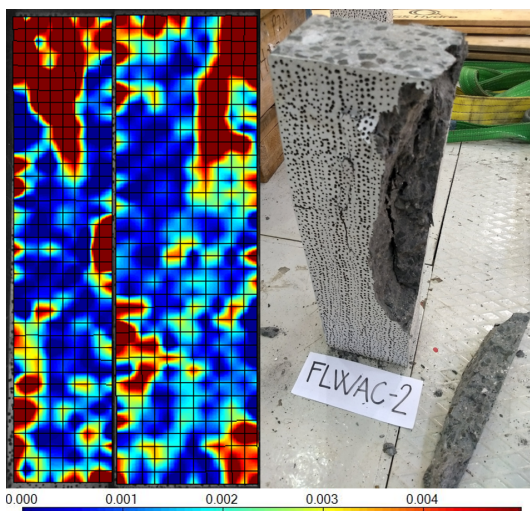
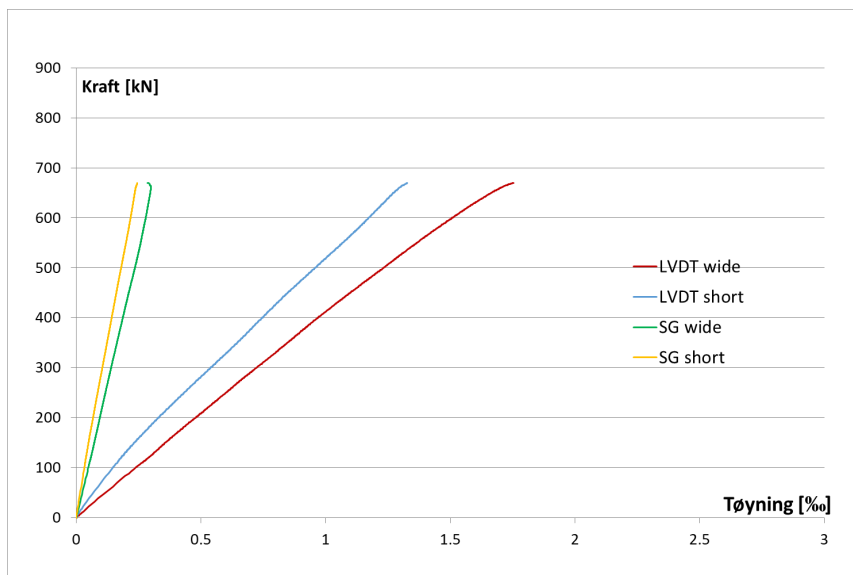


<b>Kraft</b>	653,54
<b>Forsk.</b>	3,06
<b>LVDT-W</b>	0,43
<b>LVDT-S</b>	0,49
<b>DIC-W</b>	2,88
<b>DIC-S</b>	2,16
<b>DIC-max</b>	2,94
<b>SG-W</b>	2,183
<b>SG-S</b>	2,465

### Kommentarer:

46 dager - 77,6 MPa. Et dårlig hjørne på toppen (1,5 cm\*0,7 cm). Ikke eksplosivt eller sprøtt brudd. Tålte ekstra last etter brudd. Last falt til 128 kN og økte deretter til 154 kN. Platå på grafen etter brudd. Prisme ble stående etter brudd.

## FLWAC2

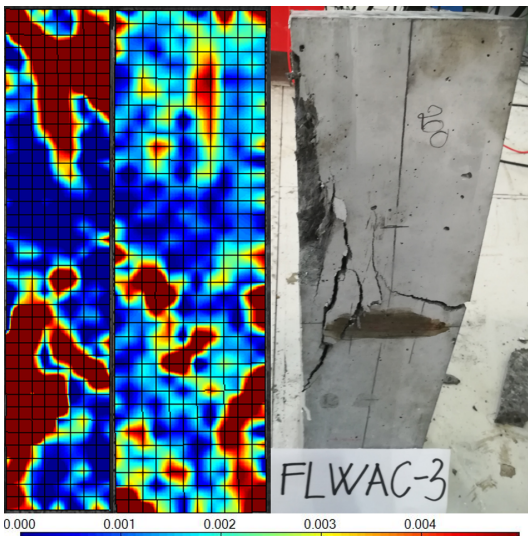
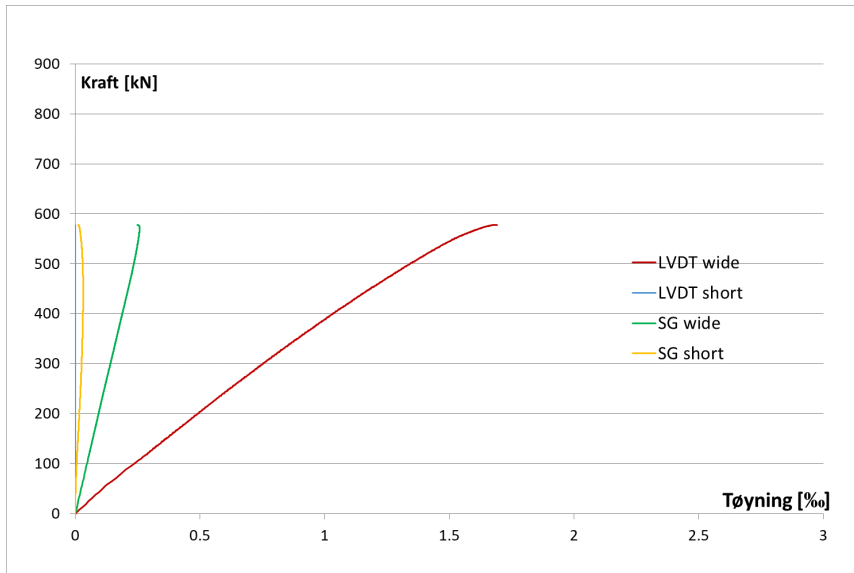


<b>Kraft</b>	669,96
<b>Forsk.</b>	2,92
<b>LVDT-W</b>	0,35
<b>LVDT-S</b>	0,27
<b>DIC-W</b>	3,03
<b>DIC-S</b>	3,99
<b>DIC-max</b>	4,54
<b>SG-W</b>	1,755
<b>SG-S</b>	1,328

### Kommentarer:

50 dager. Eksentrisk last. Store tøyninger. Bra brudd. Skjærbrudd. Prisme ble stående etter brudd.

### FLWAC3



<b>Kraft</b>	577,89
<b>Forsk.</b>	2,76
<b>LVDT-W</b>	0,34
<b>LVDT-S</b>	0,00
<b>DIC-W</b>	2,73
<b>DIC-S</b>	5,52
<b>DIC-max</b>	6,82
<b>SG-W</b>	1,691
<b>SG-S</b>	0,000

#### Kommentarer:

51 dager. Bra prøve. Platå på grafen. Ikke sprøtt. Skjærbrudd. Falt ikke sammen etter brudd.



# Vedlegg B - Småskala

## Terninger DLWAC

Terning	Dager	Beskrivelse av terning	Bruddstyrke	Bruddstyrke	Bruddform	
			Tonn	kN		
1	7	Only one visible small pockets of air, corners not perfect	51.93	519.30	Hourglass, fracture explosive	good not
2	7	Visible small air pockets on one side and one big air pocket, corners not perfect	51.11	511.10	Hourglass, fracture explosive	good not
3	7	Visible small air pockets on one side, corners not perfect	50.14	501.40	Hourglass, fracture explosive	good not
4	14	Only one visible small pockets of air, corners on two sides which suppose to be loading sides are not perfect missing part 0.7x0.7cm	60.10	600.99	Hourglass, fracture explosive	good not
5	14	Visible small air pockets and corners are not perfect, like cube was not full of concrete	61.20	611.97	Hourglass, fracture explosive	good not
6	14	Visible small air pockets and one big but not on the loading side corners are not perfect, like cube was not full of concrete	61.50	615.02	Hourglass, fracture explosive	good not
16	28	A lot of visible small pockets of air, corners on two sides which suppose to be loading sides are not perfect missing part	72.66	726.58	Hourglass, fracture explosive	good not
19	28	Visible small air pockets and corners are not perfect, like cube was not full of concrete	71.63	716.34	Hourglass, fracture explosive	good not
21	28	Visible small air pockets and corners are not perfect, one corner is bad, like cube was not full of concrete	70.37	703.73	Hourglass, fracture explosive	good not

## Vedlegg B - Småskala

---

<b>Terning</b>	<b>Dager</b>	<b>Beskrivelse av terning</b>	<b>Bruddstyrke Tonn</b>	<b>Bruddstyrke kN</b>	<b>Bruddform</b>
7	38	Big hole on the loading side, bad corners, like cube was not full of concrete	74.73	747.25	Hourglass, good fracture not explosive
8	38	Bad corners, like cube was not full of concrete	77.13	771.30	Hourglass, good fracture not explosive
10	53	Small hole on the one loading side, bad corners, like cube was not full of concrete	78.17	781.66	Hourglass, good fracture not explosive
11	56	Porosity on all the sides, bad corners, like cube was not full of concrete	77.87	778.66	Hourglass, good fracture not explosive
12	57	Porosity on all the sides, bad corners, like cube was not full of concrete	79.82	798.17	Hourglass, good fracture not explosive
20	58	Porosity on all the sides, big air bubble on loading side bad corners, like cube was not full of concrete	77.87	778.68	Hourglass, good fracture not explosive
24	60	Porosity on all the sides, like cube was not full of concrete	74,31	743,15	Hourglass, good fracture not explosive
14	60	Porosity on all the sides, like cube was not full of concrete	77,50	774,99	Hourglass, good fracture not explosive

### Terninger WLWAC

Terning	Dager	Beskrivelse av terning	Bruddstyrke	Bruddstyrke	Bruddform
			Tonn	kN	
1	7	Perfect, visible small pockets of air on loading side, cube was filed enough	51.93	519.30	Hourglass, good fracture not explosive
2	7	Perfect, visible small pockets of air, cube was filed enough	57.73	577.30	Hourglass, good fracture not explosive
3	7	Visible small air pockets, sample	58.26	582.60	Hourglass, good fracture not explosive
4	14	Just one big air bubble but not on the loading side	66.57	665.66	Hourglass, good fracture not explosive
5	14	Big air bubbles on the loading side	66.60	666.04	Hourglass, good fracture not explosive
6	14	Visible small pockets of air on the loading side	68.58	685.77	Hourglass, good fracture not explosive
18	28	Good sample	76.16	761.61	Good fracture
19	28	One loading side with air bubbles	78.19	781.93	Hourglass, good fracture not explosive
23	28	Good sample	77.68	776.79	Good fracture
22	29	Good sample	80.69	806.85	Good fracture
21	32	Good sample, small air bubbles	79.40	793.96	Good fracture
17	33	Good sample, small air bubbles	79.41	794.11	Good fracture
20	36	Good sample	84.20	842.02	Good fracture
16	36	Good sample	78.45	784.48	Good fracture
9	60	Good sample	82.25	822.48	Good fracture
11	60	Good sample	81.06	810.61	Good fracture
13	60	Good sample	86.02	860.23	Good fracture



### Terninger FLWAC

Terning	Dager	Beskrivelse av terning	Bruddstyrke	Bruddstyrke	Bruddform
			Tonn	kN	
1	7	A lot of samll air bubbles and one big on the testing area	49.73	497.30	Hourglass, good fracture not explosive
2	7	A lot of samll air bubbles and a couple of big air bubbles, one big one approximately 0.8x0.8 ccm is on the testing area	47.94	479.43	Hourglass, good fracture not explosive
3	14	A lot of samll and big air bubbles and some big on the loading area, dimensionas are ok	58.24	582.35	Hourglass, good fracture not explosive
4	28	A lot of samll air bubbles and some big on the loading area, dimensionas are ok	71.34	713.41	Hourglass, good fracture not explosive
5	28	A lot of samll and big air bubbles also at the loading area, dimensionas are ok	70.69	706.87	Hourglass, good fracture not explosive
6	46	A lot of samll air bubbles on the loading area, dimensionas are ok	77.57	775.69	Hourglass, good fracture not explosive

## Sylinder DLWAC

### Trykkfasthet

Sylinger	Dag	Trykkfasthet	F	Beskrivelse
6	28	65.26	512.55	Good failure, a lot of air bubbles, very explosive
1	28	66.44	521.83	Good failure, a lot of air bubbles, very explosive
2	28	69.31	544.36	Good failure, a lot of air bubbles, very explosive
10	60	72.48	569.29	Good failure, one side of sample big porosity
12	60	72.14	566.59	Good failure, one side of sample big porosity

### Spaltestrek

Sylinder	Lengde mm	F N	Densitet kg/m <sup>3</sup>	For last kg	Av brudd %	fct Mpa
9	200	152.26	2004	4300	28.2411664	4.84658633
5	200	166.39	2010	2500	15.0249414	5.2963582
11	200	126.54	2029	2100	16.5955429	4.0278933
mean			2014.33333			4.72361261

## Sylinder WLWAC

### Trykkfasthet

Sylinger	Dag	Trykkfasthet	F	Beskrivelse
11	28	73.76	579.28	Small air bubbles, Good failure
1	28	70.56	554.19	Small air bubbles, Good failure
6	28	74.45	584.75	One big air bubble and some small one's, Good failure
5	60	76,61	601,71	small air bubbles on loading sides, big boubles on sides, Good failure
8	60	77,04	605,05	air bubbles on loading sides (size 3-4mm), big bubbles on sides, Good failure

### Spaltetrekk

Sylinder	Lengde mm	F N	Densitet kg/m <sup>3</sup>	For last kg	Av brudd %	f <sub>ct</sub> Mpa
2	200	14072	3160.9	0	0	4.47925672
3	200	16218	3158.7	0	0	5.16234973
7	200	15499	3173.1	0	0	4.93348493
mean			3164.23333			4.85836379

## Sylinder FLWAC

### Trykkfasthet

Sylinger	Dag	Trykkfasthet	F	Beskrivelse
2	28	6366	499.96	Good failure, Sides stay stright

### Spaltestrek

Sylinder	Lengde mm	F N	Densitet kg/m <sup>3</sup>	For last kg	Av brudd %	fct Mpa
1	200	13073	2004	4300	0.32892221	0.41612651
3	195	15045	2004	4300	0.28580924	0.49117664
mean			334			0.45365158

**Densitet terning DLWAC**

nr.	Densitet etter 24t				ma	v	D	Dager	Mean
	ma	mw	v	D					
	kg	kg	m3	kg/m3	kg	m3	kg/m3		
1	1984.7	990.9	0.99579	1993.09	2006.0	1.01713	1972.21	7	
2	1995.4	991.4	1.00601	1983.48	2012.7	1.02335	1966.78	7	
3	1982.1	991.3	0.99279	1996.50	1999.7	1.01042	1979.08	7	1972.69
4	2007.0	1002.3	1.00671	1993.62	2025.9	1.02565	1975.23	14	
5	2002.1	1001.1	1.00301	1996.10	2019.9	1.02084	1978.66	14	
6	1995.2	996.9	1.00030	1994.60	2013.2	1.01834	1976.95	14	1976.95
7	1978.8	998.0	0.98277	2013.50	2002.7	1.00671	1989.34	38	
8	2005.5	1014.7	0.99279	2020.07	2029.7	1.01703	1995.71	38	1992.52
9	1942.2	958.8	0.98537	1971.03					
10	1971.7	988.2	0.98547	2000.77	1997.1	1.00651	1984.18	53	1984.18
11	1974.6	992.6	0.98397	2006.77	1999.5	0.98908	2021.58	56	2021.58
12	2010.1	1012.4	0.99970	2010.70	2035.9	1.03116	1974.37	57	1974.37
13	1990.9	1006.8	0.98607	2019.02					
14	1978.9	993.1	0.98778	2003.39	2005.6	1.00872	1988.27	60	
15	1992.0	998.9	0.99509	2001.83					
16	1959.7	975.1	0.98657	1986.37	1984.2	1.01112	1962.37	28	
17	1974.6	989.5	0.98707	2000.46					
18	1995.7	1000.7	0.99699	2001.72					
19	1966.4	981.6	0.98677	1992.76	1988.4	1.00882	1971.02	28	1969.08
20	1985.9	987.0	1.00090	1984.11	2010.0	1.02515	1960.69	58	1960.69
21	1974.8	986.9	0.98988	1994.99	1996.2	1.01132	1973.85	28	
22	1998.4	1003.5	0.99689	2004.63					
23	1978.9	990.8	0.99008	1998.73					
24	1935.6	960.7	0.97685	1981.46	1964.5	1.00581	1953.15	60	1970.71
Mean	1984.9	993.7	0.99232	1997.90					

### Densitet terning WLWAC

nr.	Densitet etter 24t				ma	v	D	Dager	Mean
	ma	mw	v	D					
	kg	kg	m3	kg/m3	kg	m3	kg/m3		
1	1980.0	975.0	1.00701	1966.21	1993.4	1.02044	1953.47	7	
2	2029.3	1028.7	1.00261	2024.03	2043.3	1.01663	2009.87	7	
3	2010.5	998.6	1.01393	1982.88	2023.8	1.02725	1970.11	7	1977.81
4	2049.8	1038.0	1.01383	2021.84	2069.7	1.03377	2002.09	14	
5	2037.6	1027.8	1.01182	2013.79	2054.5	1.02876	1997.07	14	
6	2037.6	1036.8	1.00281	2031.90	2053.6	1.01884	2015.63	14	2004.93
7	2033.6	1028.3	1.00731	2018.83					
8	2057.2	1041.2	1.01804	2020.75					
9	2045.8	1038.1	1.00972	2026.11					
10	2039.3	1038.4	1.00291	2033.39					
11	2055.6	1047.8	1.00982	2035.61					
12	2004.4	1002.8	1.00361	1997.20					
13	2061.3	1050.7	1.01263	2035.60					
14	2042.5	1032.5	1.01202	2018.23					
15	1971.1	966.7	1.00641	1958.54					
16	2007.4	990.6	1.01884	1970.28	2028.8	1.04028	1950.24	36	
17	2030.7	1025.3	1.00741	2015.75	2049.9	1.02665	1996.68	33	1996.68
18	2009.8	1008.1	1.00371	2002.38	2028.4	1.02234	1984.07	28	
19	2030.0	1030.2	1.00180	2026.35	2049.6	1.02144	2006.57	28	1983.76
20	2036.9	1036.2	1.00271	2031.40	2057.7	1.02355	2010.36	36	1980.30
21	2039.6	1022.2	1.01944	2000.71	2060.8	1.04068	1980.24	32	1980.24
22	2065.5	1045.7	1.02184	2021.35	2084.4	1.04078	2002.73	29	2002.73
23	2006.1	993.3	1.01483	1976.78	2023.1	1.03186	1960.63	28	
24	1981.0	978.0	1.00501	1971.12	1999.5	1.02355	1953.50	34	1953.50
Mean	2027.6	1020.0	1.00959	2008.38					

### Densitet terning FLWAC

nr.	Densitet etter 24t				ma	v	D	Dager	Mean
	ma	mw	v	D					
	kg	kg	m3	kg/m3	kg	m3	kg/m3		
1	2053.1	1049.3	1.00581	2041.24	2069.5	1.02224	2024.47	7	
2	1992.7	1001.1	0.99359	2005.56	2015.6	1.01653	1982.82	7	2003.64
3	2034.5	1035.6	1.00090	2032.67	2052.9	1.01934	2013.95	14	2013.95
4	2031.5	1033.1	1.00040	2030.69	2052.5	1.02144	2009.41	28	
5	2016.5	1010.3	1.00822	2000.07	2041.2	1.03297	1976.06	28	1992.73
6	2011.6	1010.2	1.00341	2004.77	2037.5	1.02936	1979.39	46	1977.72
Mean	2023.3	1023.3	1.00205	2019.16					

### Densitet sylinder DLWAC

nr.	ma kg	Densitet etter 24t		D kg/m3	28 dager D kg/m3
		mw kg	v m3		
1	3095.20	1542.10	1.55621	1988.93	
2	3152.20	1578.00	1.57735	1998.41	
3	3113.30	1554.40	1.56202	1993.12	
4	3148.90	1580.60	1.57144	2003.83	
5	3168.00	1600.40	1.57074	2016.88	2010.00
6	3104.90	1554.00	1.55401	1997.99	
7	3144.50	1576.10	1.57154	2000.90	
8	3114.40	1550.90	1.56663	1987.96	
9	3095.30	1542.40	1.55601	1989.25	2004.00
10	3093.80	1541.10	1.55581	1988.54	
11	3099.20	1538.00	1.56433	1981.17	2029.00
12	3142.80	1565.70	1.58026	1988.79	
<b>Mean</b>	3122.71	1560.31	1.56553	1994.65	2014.33

### Densitet sylinder WLWAC

nr.	ma kg	Densitet etter 24t		D kg/m3	28 dager D kg/m3
		mw kg	v m3		
1	3127.30	1559.80	1.57064	1991.10	
2	3137.70	1568.80	1.57204	1995.94	
3	3132.80	1559.50	1.57645	1987.25	
4	3164.80	1598.90	1.56904	2017.03	
5	3141.70	1566.80	1.57806	1990.87	
6	3189.00	1610.00	1.58216	2015.59	
7	3150.00	1574.10	1.57906	1994.86	
8	3142.50	1572.20	1.57345	1997.21	
9	3121.20	1548.30	1.57605	1980.39	
10	3187.90	1623.40	1.56764	2033.57	
11	3187.80	1615.50	1.57545	2023.42	
12	3136.20	1568.20	1.57114	1996.13	
<b>Mean</b>	3151.58	1580.46	1.57427	2001.95	

### Densitet sylinder FLWAC

nr.	ma kg	Densitet etter 24t		D kg/m3	28 dager D kg/m3
		mw kg	v m3		
1	3166.80	1608.80	1.56112	2028.54	2004
2	3171.10	1605.40	1.56884	2021.31	
3	3189.40	1626.80	1.56573	2037.00	2004
<b>Mean</b>	3175.77	1613.67	1.56523	2028.95	2004.00



### Ovnstørket densitet DLWAC

Prøvestykke	5.1	5.2	9.1	9.2	11.1	11.2	11.3	Mean
<b>Volum</b>	m3	m3	m3	m3	m3	m3	m3	
	0.00069	0.00080	0.00072	0.00073	0.00038	0.00036	0.00069	
<b>Timer</b>	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3
24	1961.16	1972.66	1945.93	1932.66	1942.34	1929.58	1929.79	1944.88
48	2017.43	2021.22	1995.86	1979.31	1998.66	1984.88	1982.44	1997.11
72	1941.77	1952.08	1925.85	1913.23	1922.68	1910.96	1911.04	1925.37
96	1929.82	1938.91	1913.58	1900.51	1910.46	1899.56	1898.64	1913.07
120	1919.47	1926.24	1901.72	1888.20	1900.10	1888.72	1887.68	1901.73
144	1901.83	1906.79	1883.45	1869.32	1884.17	1870.66	1869.93	1883.74
168	1899.35	1904.03	1881.22	1866.72	1882.04	1868.16	1867.34	1881.27
192	1898.04	1902.52	1880.11	1865.49	1880.98	1866.49	1866.04	1879.95

### Ovnstørket densitet WLWAC

Prøvestykke	2.1	2.2	3.1	3.2	7.1	7.2	Mean
<b>Volum</b>	m3	m3	m3	m3	m3	m3	
	0.00086	0.00068	0.00070	0.00073	0.00070	0.00081	
<b>Timer</b>	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3
24	1945.28	1903.51	1909.69	1917.98	1920.07	1922.36	1919.82
48	2028.53	1990.23	1997.42	2003.43	2005.79	2007.14	2005.42
72	1901.68	1863.26	1868.03	1875.74	1877.49	1878.68	1877.48
96	1895.97	1858.23	1862.91	1870.37	1871.82	1872.86	1872.03
120	1892.00	1855.12	1859.50	1866.66	1868.70	1868.77	1868.46
144	1887.46	1852.01	1856.52	1863.22	1863.87	1864.32	1864.57

### Ovnstørket densitet FLWAC

Prøvestykke	1	2	Mean
<b>Volum</b>	m3	m3	
	0.00075	0.00065	
<b>Timer</b>	kg/m3	kg/m3	kg/m3
24	1974.54	1947.01	1960.77
48	2058.00	2038.19	2048.10
72	1956.39	1927.54	1941.96
96	1943.93	1915.80	1929.86
120	1929.76	1902.66	1916.21
144	1910.42	1888.60	1899.51
168	1907.50	1887.36	1897.43

# Vedlegg C - Betongegenskaper

## Resept DLWAC (oppveid)

<b>Bestanddel</b>	<b>Vekt 210 liter</b> [kg]	<b>Vekt 1000 liter</b> [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
Norcem Anlegg FA	92,55	440,7
Elkem Mikrosillica	4,8745	23,2
Fritt vann	33,499	159,5
Absorbent vann	1,284	6,1
Sand Årdal 0/8 mm	115,30	549,0
Sand Ramlo 0/2 mm nat. Vask	50,45	240,2
Stalite 1/2''	107,85	513,6
Mapei Dynamon SR-N	0,6835	3,3

## Resept WLAWAC (oppveid)

<b>Bestanddel</b>	<b>Vekt 210 liter</b> [kg]	<b>Vekt 1000 liter</b> [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
Norcem Anlegg FA	92,10	438,6
Elkem Mikrosillica	4,8631	23,2
Fritt vann	29,030	138,2
Absorbent vann	1,322	6,3
Sand Årdal 0/8 mm	122,65	584,0
Sand Ramlo 0/2 mm nat. Vask	52,35	249,3
Stalite 1/2''	111,05	528,8
Mapei Dynamon SR-N	0,8229	3,9

## Resept FLWAC (oppveid)

Bestandsdel	Vekt 40 liter [kg]	Vekt 1000 liter [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
Norcem Anlegg FA	15,90	397,5
Elkem Mikrosillica	0,8373	20,9
Fritt vann	5,3824	134,6
Absorbert vann	0,291	7,3
Sand Årdal 0/8 mm	21,80	545,0
Sand Ramlo 0/2 mm nat. Vask	15,85	396,3
Stalite 1/2" (vannmettet)	19,8	495,0
Mapei Dynamon SR-N	0,2483	6,2
Polyvinylalkoholfibre	0,26	6,2

## Egenskaper fersk betong

Dato	Blanding	Densitet [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	Luftinnhold [%]	Synkmål [cm]
21. feb.	Prøveblanding tørr	1856	ikke målt	21
21. feb.	Prøveblanding våt	ikke målt	ikke målt	23
12. mars	Tørr	1989	2,5	17
5. april	Våt	2015	1,9	19
19. mars	Fiber	2011	2,5	3

## Absorpsjon for Stalite

Start dato: 12.02.2018 kl 10.30			
Tid	Vekt av fat	Vekt etter gitt tid	Absorpsjon
0	702,6	4 035,6	0,00%
24	702,7	4 301,3	6,58%
48	702,6	4 314,4	6,91%
96	702,7	4 332,2	7,35%
100	679,8	4 347,0	7,72%
168	702,7	4 349,5	7,78%

## Fuktinnhold i tilslag

Fraksjon	Dato og tid	Vekt før tørking [gram]	Vekt etter tørking [gram]	Tid tørking	Fukt [%]
<b>Stalite</b>					
Tørr	8. feb kl 10:25	4214,9	4211,0	24 timer*	0,09
Tørr	8. feb kl 10:25	4254,0	4249,7	24 timer*	0,10
Vannmettet	4. april kl 12:50	3303,3	3107,3	24 timer*	6,3
Vannmettet	5. april kl 12:50	3739,0	3464,0	24 timer*	7,9
<b>Sand Årdal 0/8</b>					
	21. feb	393,9	389,1	15 min**	1,23
	12. mars	294	286,5	15 min**	2,60
	4. april	301,2	294,0	15 min**	2,40
	5. april	305,8	297,9	15 min **	2,70
<b>Sand Ramlo 0/2</b>					
	21. feb	205,1	200,0	15 min**	2,55
	12. mars	288,2	275	15 min**	4,80
	4. april	305,1	293,8	15 min**	3,85
	5. april	260,7	249,8	15 min**	4,40

\* i ovn på 110°C

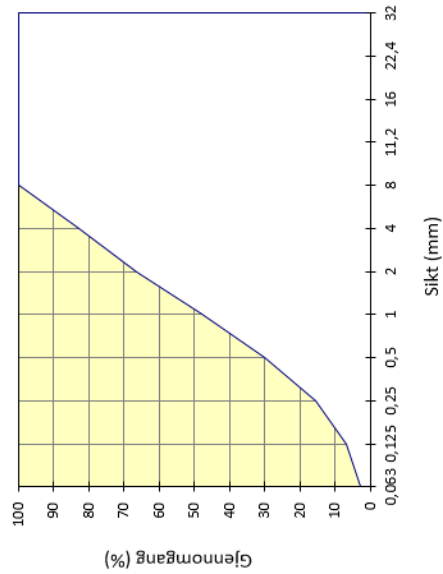
\*\* på kokeplate

# Siktekurver

## Fraksjon I

Type:	Sand Årdal 0/8 mm
Dato:	09.02.2018.
FM =	3,05

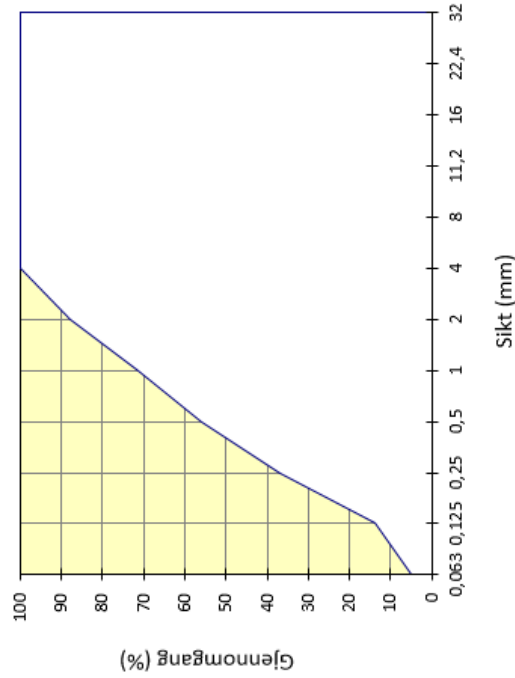
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	2,6	0	0,3	99,7
4	152,2	0	17,1	82,9
2	300,1	0	33,7	66,3
1	464,5	0	52,1	47,9
0,5	625,6	0	70,2	29,8
0,25	754,1	0	84,6	15,4
0,125	833,2	0	93,4	6,6
0,063	868,7	0	97,4	2,6
Bunn	892	0		



### Fraksjon II

Type:	Sand Ramlo 0/2 mm nat. vask
Dato:	24.01.2018.
FM =	1,91

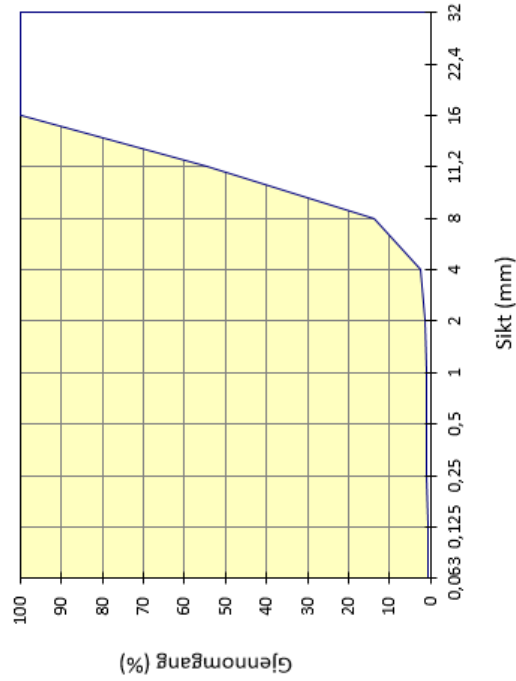
Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	0	0	0,0	100,0
4	1	0	0,1	99,9
2	101	0	12,1	87,9
1	238	0	28,5	71,5
0,5	366	0	43,9	56,1
0,25	526	0	63,1	36,9
0,125	720	0	86,3	13,7
0,063	793	0	95,1	4,9
Bunn	834	0		



### Fraksjon V

Type:	Stalite
Dato:	09.02.2018
FM =	6,29

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0,0	0,0	0,00	100,00
22,4	0,0	0,0	0,00	100,00
16	0,0	0,0	0,00	100,00
11,2	1747,1	2085,5	45,36	54,64
8	3590,1	3695,4	86,22	13,78
4	4082,4	4159,4	97,54	2,46
2	4134,2	4194,9	98,57	1,43
1	4148,7	4204,2	98,85	1,15
0,5	4154,8	4208,0	98,97	1,03
0,25	4161,0	4212,2	99,09	0,91
0,125	4169,2	4217,9	99,25	0,75
0,063	4177,8	4223,9	99,43	0,57
Bunn	4205,3	4244,8	100,00	0,00



**Fraksjon V (vannmettet og tørket Stalite)**

Type:	Stalite (vasket)
Dato:	04.04.2018
FM =	6,24

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0,0	0,0	0,00	100,00
22,4	0,0	0,0	0,00	100,00
16	0,0	0,0	0,00	100,00
11,2	942,2	0,0	30,34	69,66
8	2585,0	0,0	83,24	16,76
4	2996,1	0,0	96,47	3,53
2	3045,5	0,0	98,06	1,94
1	3064,5	0,0	98,68	1,32
0,5	3071,5	0,0	98,90	1,10
0,25	3077,0	0,0	99,08	0,92
0,125	3083,6	0,0	99,29	0,71
0,075	3090,2	0,0	99,50	0,50
Bunn	3105,6	0,0	100,00	0,00

