



Universitetet  
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

## MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:	Vårsemesteret, 2014  Åpen
Forfatter: Robin Simonstad	<i>Robin Simonstad</i> ..... (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder(e): Kjell Tore Fosså	
Tittel på masteroppgaven: Duktilitet i lettbetong ved bruk av fiber  Engelsk tittel: Ductility in fibrereinforced lightweight concrete	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Lettbetong Fiberarmering Duktilitet Rissutvikling Stålfiber Basaltfiber	Sidetall: 87  + vedlegg/annet: 33  Stavanger, 13.06/-14 dato/år

## Sammendrag

Denne masteroppgavens omhandler utprøving av fiberarmert lettbetong, samt en beskrivelse av lettbetongens oppbygging. Betongens duktilitet ved tilsetning av fiber er sentralt i oppgaven, og det er også gjennomført strukturelle analyser og beregninger som er sentrale med tanke på lettbetongens bestandighet og spesielt mekaniske egenskaper.

For å undersøke fiberens oppførsel i lettbetongen er det utført forsøk hvor fiberarmeringens innvirkning på duktiliteten er vurdert. Forsøk som dokumenterer forbedring av duktiliteten i form av bøyestrekfasthet og strekkfasthet, samt forsøk på å studere rissutvikling under belastning i fiberarmert lettbetong er utført. I tillegg er det utført prøver av sylindere for å undersøke lettbetongens fasthet, spaltestrekfasthet og arbeidsdiagram trykk. For å få en forståelse av fiberens oppførsel er det brukt to typer fiberarmering med variert dosering. To serier inneholder stålfiber med endekrok, og to serier blir tilsatt vridde basaltfibere.

Sylinderprøvene viser at en høyfast lettbetong i klasse LB55-LB65 er oppnådd, og prøveresultatene viser at fastheten ikke blir noe forbedret ved tilsetning av fiber. Resultatet fra spaltestrekfasthetsprøvene viser at fiberdoseringsforholdet forbedrer spaltestrekfastheten, og arbeidsdiagram trykk viser en forbedring fra referansebjelkene. Resultatene fra trepunkts bøyeprovning og strekkfasthet viser at duktiliteten blir vesentlig forbedret ved bruk av alle fiberdoseringene, og da spesielt ved LWAC-1,0SF og LWAC-1,5SF hvor fiberen blir dratt ut og gjør lettbetongen mer seig. Også ved rissutvikling prøvene viser resultatene at rissutvidelsen blir best forbedret ved stålfiber, så både med tanke på forbedring av rissutvikling og duktile egenskaper gir serien med 1,5% stålfiber best resultat.

## Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b>	<b>5</b>
<b>1.0 Innledning</b>	<b>6</b>
<b>2.0 Litteraturstudium</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Generelt om lettbetong</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Lettbetongens historie</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Tilslag</b>	<b>9</b>
2.3.1 Fint tilslag	10
2.3.2 Grovt tilslag	10
2.3.3 Lett tilslag	11
<b>2.4 Sement</b>	<b>12</b>
2.4.1 Norcem Anlegg FA	13
<b>2.5 Tilsetningsstoffer</b>	<b>14</b>
2.5.1 Plastiserende-/Superplastiserende stoff	14
<b>2.6 Pozzlaner</b>	<b>15</b>
2.6.1 Silikastøv	15
2.6.2 Flygeaske	15
<b>2.7 Fasthet</b>	<b>15</b>
<b>2.8 Fiberarmering</b>	<b>17</b>
2.8.1 Stålfiber	17
2.8.2 Basaltfiber	18
<b>3.0 Bruddmekanikk</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Bruddseighet og duktilitet i lettbetong</b>	<b>20</b>
3.1.1 Bøyestrekkefasthet	20
3.1.2 Karakteristisk lengde	22
3.1.3 Brittleness number	23
3.1.4 Spennings- og tøyingsforholdet i lettbetong	23
<b>4.0 Strukturell analyse</b>	<b>25</b>
<b>4.1 Bruddgrensetilstand (ULS)</b>	<b>25</b>
4.1.1 Materialfaktor	25
4.1.2 Bøyemoment	26
4.1.3 Skjærkapasitet	29
<b>4.2 Bruksgrensetilstand (SLS)</b>	<b>30</b>
4.2.1 Minimumsarmering ved bruk av fiber, forslag Kanstad	30
4.2.2 Rissmoment og risslast	31
4.2.3 Rissvidde	33
<b>4.4 Konstruksjonsregler ved bruk av fiber</b>	<b>35</b>
4.4.1 Minimumsarmering med vanlig armering og fiber, forslag Kanstad	35
4.4.2 Minimumsarmering i henhold til EC2	35
<b>5.0 Eksperimentelt</b>	<b>36</b>
<b>5.1 Støpe plan</b>	<b>36</b>
<b>5.2 Materialer</b>	<b>37</b>
<b>5.3 Blandesyklus</b>	<b>39</b>
<b>5.4 Prøving av fersk betong</b>	<b>39</b>
5.4.1 Synkmål	39
5.4.2 Densitet	40
5.4.3 Luftinnhold	41
<b>5.5 Utstøping av prøvestykker</b>	<b>42</b>

<b>5.6</b>	<b>Prøving av herdet betong</b>	<b>44</b>
5.6.1	Sylindertrykkfasthet	44
5.6.2	Spaltestrekkfasthet	45
5.6.3	Arbeidsdiagram - trykk	47
<b>5.7</b>	<b>Bøystrekkfasthet</b>	<b>48</b>
<b>5.8</b>	<b>Arbeidsdiagram - strekk</b>	<b>50</b>
<b>5.9</b>	<b>Prøving av store bjelker</b>	<b>51</b>
5.9.1	Beregning av minimumsarmering	52
5.9.2	Beregning av risslast og bruddlast for lettbetong	53
<b>6.0</b>	<b>Prøveresultater og diskusjon</b>	<b>55</b>
<b>6.1</b>	<b>Resultater fersk betong</b>	<b>55</b>
6.1.1	Synkmål	55
6.1.2	Luftinnhold	56
6.1.3	Densitet	57
<b>6.2</b>	<b>Testresultater av herdet betong</b>	<b>58</b>
6.2.1	Sylindertrykkfasthet	58
6.2.2	Spaltestrekkfasthet	60
6.2.3	Arbeidsdiagram - trykk	61
<b>6.3</b>	<b>Bøystrekkfasthet</b>	<b>64</b>
6.3.1	ND-referanse	64
6.3.2	LWAC-referanse	65
6.3.3	LWAC-1,0% stålfiber	66
6.3.4	LWAC-1,5% stålfiber	67
6.3.5	LWAC-1,5% basaltfiber	68
6.3.6	LWAC-3,0% basaltfiber	69
<b>6.4</b>	<b>Arbeidsdiagram - strekk</b>	<b>70</b>
<b>6.5</b>	<b>Bruddseighet</b>	<b>73</b>
<b>6.6</b>	<b>Risslast og rissutvikling</b>	<b>75</b>
<b>6.7</b>	<b>Feil kilder</b>	<b>80</b>
<b>7.0</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>81</b>
<b>8.0</b>	<b>Figur liste</b>	<b>82</b>
<b>9.0</b>	<b>Tabell liste</b>	<b>84</b>
<b>10</b>	<b>Referanser</b>	<b>85</b>
<b>11</b>	<b>Vedlegg</b>	<b>87</b>

## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som et avsluttende prosjekt på mine 5 års studie tid innen Konstruksjon og Materialer vårsemesteret 2014.

Først og fremst vil jeg rette en stor takk til min veileder Kjell Tore Fosså. Fosså sin kunnskap innen betongteknologi har vært til stor hjelp ved situasjoner hvor jeg har sittet fast og jeg vil sende en stor takk for støtte og positiv veiledning gjennom hele våren.

Avhandlingen har foregått på Universitetet i Stavanger ved Teknisk- Naturvitenskapelig Fakultet som har stått for de økonomiske utgiftene underveis i prosjektet. De eksperimentelle forsøkene i prosjektet har foregått på betonglaboratoriet i Paviljong 4 så jeg vil gjerne takke personellet ved laboratoriet, og da spesielt Samdar Kakay.

Siden jeg måtte gjennomgå operasjon i ankelen og har vært avhengig av krykker store deler av våren, vil jeg sende en ekstra stor takk til Jan Erik Waage og Jesper Bruneau Simonsson for deres hjelp på laboratoriet. Uten deres hjelp hadde dette prosjektet blitt vanskeligere å gjennomføre for en midlertidig handicapet.

Til slutt vil jeg rekke en stor takk til resten av gjengen på brakka for mange fine studierelaterte samtaler, sosiale lunsjer og mange liter kaffe som er delt dette vårsemesteret.

Stavanger, juni 2014

Robin Simonstad

## 1.0 Innledning

Menneskets lårbein er i realiteten sterkere enn ren betong, men fremdeles hender det at det oppstår beinbrudd noe som er vanskelig å forhindre. I betong derimot kan det gjøres endringer for å styrke egenskapene til betongen, og det er nettopp det denne oppgaven omfatter. Betong i seg selv er i realiteten et sprøtt materiale og derfor lite duktilt. Ved å tilsette fiber i betongen vil betongen bli mer duktil når det blir påført krefter og faren for at det oppstår kritiske riss og sprekker reduseres.

Offshore selskap bygger i dag flere betongplattformer for bruk i arktiske strøk. For å gjøre produksjonen enklere og billigere vurderes det å ta i bruk lettbetong slik at produksjonen kan foregå lenger i tørrdøkk, før utslep til dypere farvann for videre produksjon. Denne oppgaven tar for seg hvordan egenskapene til høyfast lettbetong blir endret ved bruk av fiber, og undersøker om denne blir mer duktil ved å utføre forsøk for å se hvordan lettbetongen reagerer.

I forbindelse med denne oppgaven er det gjennomført flere forsøk på betonglaboratoriet ved Universitetet i Stavanger i henhold til ulike metoder beskrevet i standard. For å se på fiberens oppførsel skal det utføres forskjellig prøving av bjelker for både trykk og strekk. Ved hjelp av en trepunkts bøyetest hvor standardiserte bjelker blir påført deformasjonsstyrt last, vil det være mulig å se en eventuell forbedringen av duktiliteten fra en last-CMOD kurve. Videre skal det gjennomføres trykkytesting av fullskala bjelker for å undersøke rissutvikling i den fiberarmerte lettbetongen, samt strekkprøving av bjelker for å undersøke strekkfasthet og dokumentere eventuelle endringer og forbedringer for de ulike fiberdoseringene.

Opgaven har hovedfokus på å øke kunnskapen for fiberarmert lettbetong og få en forståelse på hvordan de mekaniske egenskapene til betongen forbedres ved tilsetting av fiber. For å sammenligne fiberarmert lettbetong er det benyttet 2 ulike fibertyper og ulik dosering over 6 serier.

## 2.0 Litteraturstudium

Betong er generelt ikke karakterisert som et spesielt duktilt materiale, betongen er vanligvis sprø og går fort til brudd hvis den blir utsatt for store strekk krefter. Men en av betongens positive sider er at ved tilsetning av forskjellige komponenter vil egenskapene kunne bli vesentlig forbedret, og det er muligheter for å oppnå en mer bestandig og levedyktig betongkonstruksjon. Dersom forholdet mellom de vanlige ingrediensene som vann, sement, tilsetningsstoffer, tilslag og armering endres vil en ha mulighet til å oppnå de egenskapene som ønskes for den gjeldene konstruksjonen.

For å få en forståelse av hva duktilitet i betongen er og hvordan denne påvirker betongens bestandighet og egenskaper vil dette kapittelet gi en innføring i betongens oppbygging og hva som påvirkes av de ytre kreftene som betongkonstruksjonen blir utsatt for.

### 2.1 Generelt om lettbetong

Lettbetong er definert i henhold til NS-EN 206-1 som betong med densitet under  $2000 \text{ kg/m}^3$ , men kan også ha en densitet så lav som  $800 \text{ kg/m}^3$  i ovenstående tilstand. Hovedgrunnen til at det kan oppnås en så liten densitet i lettbetongen er at det brukes såkalt lett tilslag, som i denne oppgaven innebærer bruk av leca klinker. Leca klinkeret kan ofte ha en partikkel densitet helt ned i underkant av  $1000 \text{ kg/m}^3$  noe som er vesentlig lavere enn for vanlig tilslag som ofte ligger på om lag  $2700 \text{ kg/m}^3$ , og gjør dermed betongen lettere. Derav navnet lettbetong. [1]

Ved bruk av lettbetong vil egenvekten på konstruksjonen kunne bli vesentlig lavere, og det er nettopp derfor det er blitt et populært produkt og spesielt ved offshore konstruksjoner. Lettbetongen gjør at konstruksjonen oppnår en lavere egenvekt enn en hadde oppnådd ved bruk av normal betong, samt at det blir bedre oppdrift i konstruksjonen. Produksjonen kan derfor foregå lenger i tørrdøkk og medfører dermed at byggeprosessen blir forenklet og prosjektet blir billigere selv om lettbetong er et dyrere materiale enn normalbetong.

### 2.2 Lettbetongens historie

Lettbetongens historie kan trekkes helt tilbake til romertiden hvor det ble gjort tiltak for å redusere egenvekten på konstruksjonene, og den kanskje mest kjente konstruksjonen det ble brukt en form for lettbetong er Pantheonet i Roma, Italia. Her brukte romerne porerikt vulkansk tilslag (knust pumpestein) som var sortert etter vekt, og ettersom man kom høyere i den totalt 50 meter kuppelkonstruksjonen ble betongens egenvekt redusert ved å bruke det lettere tilslaget.

Det var først på begynnelsen av 1900-tallet og etter at det ble oppfunnet metoder for å produsere kunstig tilslag med liten egenvekt at bruken av lettbetong økte. En irskættet teglprodusent og bygningsentreprenør med navn Stephen J. Hyde fant i 1914 ut at dersom han tilsatte knust "feilprodusert" tegl i betongen, ble betongen så lett at den fløt i vann. Han skjønnte raskt at dette var noe som ville revolusjonere visse byggeprosesser og søkte tidlig om patent og ble med det han som ofte omtales "Lettbetongens far".

Etter Hyde's oppfinnelse med bruk av roterovn for å produsere lett tilslag ble den første fullskala fabrikk åpnet i Kansas City i 1920 og fikk navn Haydite Company. I årene etter Haydite Company åpnet ble det brukt lettbetong i flere byggeprosjekt, og det første bygget hvor det ble brukt lettbetong var Westport High School i nettopp Kansas City i 1922. [2]

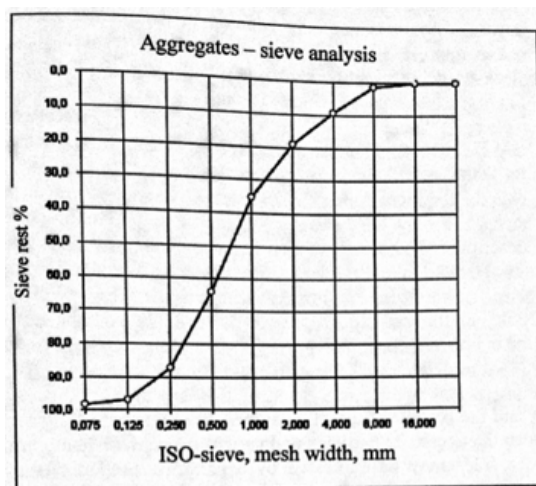
Ettersom årene gikk fortsatte utviklingen av lettbetong og den ble stadig brukt i nye konstruksjoner eller påbygg av bla. skyskrapere, og er et produkt som stadig er under utvikling og er oftere brukt i bla. bro- og marine konstruksjoner i dag.



## 2.3 Tilslag

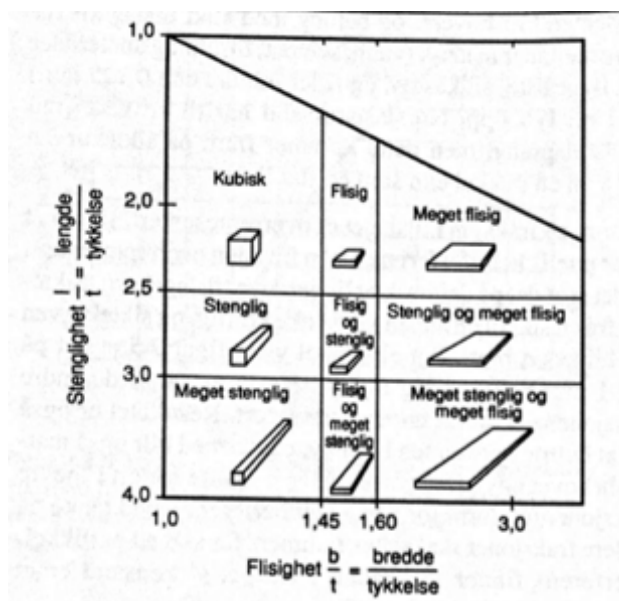
Når det er snakk om tilslag er dette en fellesbetegnelse på sand-, grus- og steininnholdet i betongen og er absolutt en viktig faktor for å oppnå en god betong. Vanligvis innebærer tilslaget 65-75% av betongsammensetningen og deles ofte opp i grovt- og fint tilslag. I Norge er det vanlig å bruke fraksjoner på 0-8mm (fint tilslag) og 8-16mm (grovt tilslag), men disse kan også deles inn i mindre fraksjoner som 0-4mm, 4-8mm, 8-12mm og 12-16mm.

Ved å kombinere de forskjellige fraksjonene vil man få varierende graderingskurver og betongblandinger med minst mulig hulrom mellom tilslaget, og man vil dermed oppnå en rimelig og god betongsammensetning med gode egenskaper. For å finne riktig korngradering blir det foretatt en sikteprøve analyse av tilslaget hvor en kjent mengde av tilslaget blir ristet i satser med ulik maskevidde. Hver fraksjon blir så samlet opp i hver sats for så og bli oppveid og beregnet i prosent ut ifra totalmassen. Man vil så kunne føre disse verdiene opp i en tabell og få en siktekurve for det gitte tilslaget, se figur 2.1. Det mest gunstige er å oppnå en siktekurve med S-form som har tilnærmet lineær gradering med lite knekk i "svingene" på S'en. [1]



Figur 2.1 – Form på ønsket siktesats [1]

Partikkelformen og ruheten på tilslaget (flisligheten) er en faktor som både påvirker støpeligheten, nødvendig mengde sementpasta, samt stabiliteten til betongen. Kubiske runde partikler medfører at sementlimet glir lettere imellom korna når betongen er i bevegelse. Dette gir en positiv effekt på støpeligheten til betongen og medfører at det trengs mindre sementpasta i betongsammensetningen enn ved bruk av skarpe og avlange korn. [3]



Figur 2.2 - Oversikt over flislighet [4]

### 2.3.1 Fint tilslag

I lettbetong kan fint tilslag enten innebære ren lettvektsand, naturlig sand eller en kombinasjon av disse. Bruken av fint tilslag vil ha stor påvirkning på støpeligheten, betongens egenvekt og slutfasthet, og det er derfor viktig å ha et fint tilslag med god siktekurve for å få en betong med gode egenskaper. Ved bruk av lettvekt sand (knust leca klinker) i betongblandingen kan man oppnå en densitet helt ned i  $800-1000 \text{ kg/m}^3$ , men problemet er at det blir en grov betongsammensetning og dermed en lite støpelig betong. I denne oppgaven er det bare brukt naturlig sand og det er da vanskelig å få en betong med densitet under  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Det fine tilslaget har evnen til ofte å absorbere mye vann ved fuktige omgivelser, og det er derfor viktig å ta hensyn til fukt-% når en proporsjonerer for å unngå betongblandinger med feil v/c-tall og dårlig støpelighet.

### 2.3.2 Grovt tilslag

Grovt tilslag er definert som sand- og steinfraksjoner som er over 8 mm, og innebærer knust stein i form av pukk og grus. Generelt har det norske grove tilslaget en ru overflate med skarpe kanter og en liten evne til å absorbere vann. Når det kommer til fasthet og styrke av betongen er det det grove tilslaget som utgjør en vesentlig rolle, og fastheten i tilslaget kan ligge på 100-350 MPa varierende ut ifra kvalitet og opphav.

### 2.3.3 Lett tilslag

Lett tilslag er partikler som ofte er laget av naturlige materialer som vulkansk aske, pimpstein, leire eller skifer. Densiteten og fastheten på tilslaget vil variere ut ifra hvordan det er fremstilt, og for å oppnå en lettbetong med høy fasthet må også lett tilslaget ha en høy fasthet. Problemet med lett tilslaget er at dersom en ønsker tilslag med lav densitet vil tilslaget være mer porøst og ha en lavere fasthet. Det blir da en sammenheng mellom densitet og fasthet i lett tilslaget som påvirker lettbetongens egenskaper. [1]

Som nevnt finnes det flere typer lett tilslag og de to mest vanlige er laget av leire og skifer. Produksjonen foregår ved at skiferen og leiren henholdsvis blir varmet opp til om lag 1200°C og 1300°C og dermed ekspanderer. Steinen blir plastisk nok til at det oppstår gasser som former mange små hulrom jevnt over hele massen, og sluttproduktet blir dermed lettere enn den opprinnelige skiferen eller leiren. Leca- og skifer tilslaget som blir brukt i dag har vanligvis en bulkdensitet på alt ifra 200-1000  $kg/m^3$  og en partikkeldensitet på 1000-1600  $kg/m^3$ . [1]



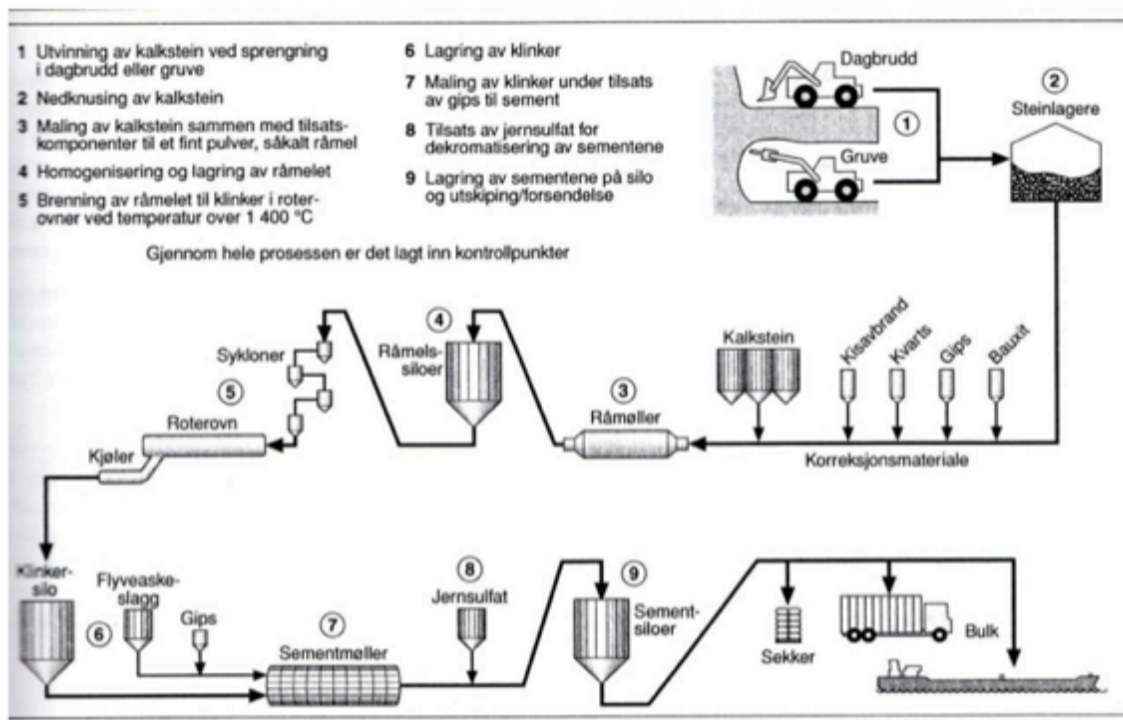
Figur 2.3 – Naturlig sand og to fraksjoner lett tilslag

## 2.4 Sement

Historikerne er uenige om når og hvor sementens egentlig opphav kommer fra, men de er alle enige om at det er et byggemateriale som har eksistert igjennom årtusener. Det er dokumentert at rundt år 1000 f.Kr. begynte romerne å benytte en blanding av kalkmørtel og vulkansk aske som bindemiddel, før de senere begynte å blande inn steinmateriale i bindemiddelet. Flere av romernes byggverk som ble bygget med dette bindemiddelet for flere tusen år siden er intakt den dag i dag, så dette beviser at kvaliteten og utførelsen var svært god. [2]

Sementen som brukes i Norge i dag er på mange måter en videreutvikling av romernes eldgamle bindemiddel og kalles portlandsement. Portlandsement er en felles betegnelse for de fleste sementer som brukes i bygge bransjen i dag og kommer i varierende kombinasjoner og egenskaper.

Portlandsementen som brukes her til lands er tilpasset det norske klima og byggekrav, og er derfor hurtige noe som innebærer et høyt innhold av portlandklinker, ca. 95%. Portlandklinker er en blanding av malt naturlig kalkstein, kvarts, mindre mengder bauxitt og jern som er malt sammen og brent i roterovn ved 1450°C. Klinkeren blir så blandet med gips og malt til den finheten som ønskes, se figur 2.4. [3]



Figur 2.4 – Oversikt over produksjonsprosess for sement [4]

Under produksjonsprosessen av portlandklinkeren danner de tilsatte materialene fire hoved mineraler som alle er reaktive mot vann, og det er denne reaksjonen som gjør slik at størknings- og herdeprosessen trer i kraft, se tabell 2.1.

De fire hoved mineralene reagerer sammen og det dannes kalsium silikat hydrat, C-S-H, som er et bindemiddel gel som dannes i herdeprosessen. Når sementen blir tilsatt vann vil silisium- og kalsiumbestanddeler i sementen reagere med vann og tilsetningsstoffer, og det vil skje en hydratiseringsprosess. Det er disse reaksjonene som fører til at det oppstår fasthets- og temperaturutvikling i betongen, og som igjen bidrar til at betongen får de egenskapene som er ønsket. [1]

Tabell 2.1 – De fire hoved mineralene

Hoved fase	Mineralogisk navn	Kjemisk reaksjon	Forkortelse
Trikalsium silikat	Alite	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
Dikalsium silikat	Belite	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$
Trikalsium aluminat	Aluminat	$3CO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$
Tetrakalsium aluminaferritt	Ferritt	$4CaO \cdot AlO_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$

#### 2.4.1 Norcem Anlegg FA

Sementen som ble brukt i dette prosjektet var Norcem Anlegg FA, og er en portlandsement som er utviklet for bruk på anleggs- og marine konstruksjoner. Anlegg FA inneholder 17% flyveaske og er en sement som gir relativ lav varmeutvikling og er derfor god ved bruk i massive tverrsnitt for å unngå temperaturutviklings riss.

Anleggsement FA er en sement som gir svært høy slutfasthet og er tilpasset norske forhold for bruk i bestandighetsklasse M45 og MF45, og tilfredsstillende dermed kravene til NS-EN 197-1-CEM II. Sementen gir en meget god støpelighet ved lave v/c-tall, og inneholder et moderat alkaliinnhold som medfører at alkaliereaktivt tilslag også kan brukes.

## 2.5 Tilsetningsstoffer

I dagens bruk av betong, og med avanserte betongkonstruksjoner er vi stort sett avhengig av tilsetningsstoffer. Tilsetningsstoffer er en gruppe produkter som blir tilsatt betongsammensetningen under miksing for å oppnå andre egenskaper i betongen enn den opprinnelig ville hatt. Produktene blir tilsatt for å modifisere egenskapene til betongblandingen enten det er i fersk eller herdet tilstand, men må ikke overstige 5% av sementmengden. Det finnes flere forskjellige typer tilsetningsstoff som kan modifisere alt fra temperaturutvikling til støpelighet, og selv en dårlig betongblanding kan bli vesentlig bedre ved bruk av tilsetningsstoff.

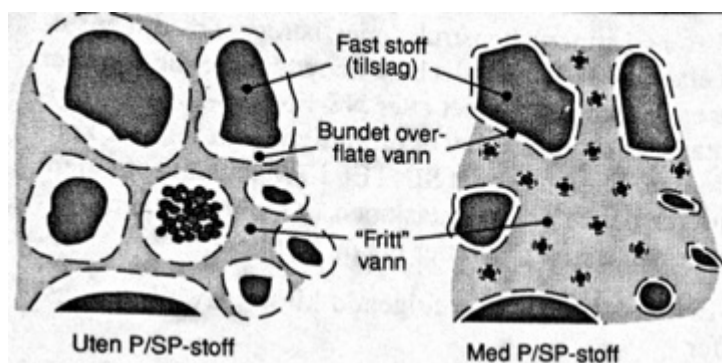
### 2.5.1 Plastiserende-/Superplastiserende stoff

Plastiserende og superplastiserende stoff er de tilsetningsstoffene som er mest brukt i norsk betongproduksjon, og innebærer om lag 95% av alt tilsetningsstoff som blir solgt i Norge. Ved bruk av plastiserende/superplastiserende stoff medfører det at vi kan bruke mindre vannmengde i betongsammensetningen, og allikevel oppnå den støpeligheten som ønskes. I denne oppgaven er det brukt et superplastiserende tilsetningsstoff som gir en bedre effekt enn plastiserende stoff, og kan ha en vannreducerende effekt på opptil 40%, se tabell 2.2.

Tabell 2.2 – SP-stoff

Type SP-stoff	Vannreduksjon [%]
Melanmin	15-17
Naftalen	17-19
Kopolymerer	opptil 40

Ved miksing av betongsammensetningen har sementpartiklene en tendens til å klumpe seg sammen til sementklumper og det oppstår dermed en lite støpelig betong. Ved bruk av superplastiserende tilsetningsstoff vil dette løse opp sementklumpene ved å nøytralisere de elektrisk ladede sementpartiklene og det blir dermed mindre overflatekrefter og friksjon mellom partiklene. De plastiserende stoffene smører da systemet, sementpartiklene glir dermed lettere forbi hverandre og støpeligheten blir forbedret uten at v/c-tallet endres.



Figur 2.5 – Betong med og uten SP-stoff [4]

## 2.6 Pozzlaner

Pozzolaner er ofte sett på som hydraulisk latente tilsetningsstoffer, noe som vil tilsi at dette er tilsetningsstoffer som ikke har noen hydrauliske egenskaper. Pozzolaner har ofte positiv effekt på betongsammensetningen, og ved den kjemiske forbindelsen kalsiumhydroksid dannes det en forbindelse som er tilnærmet lik den som foregår mellom sement og vann (C-S-H). Dette kalles pozzolanreaksjoner. [1]

### 2.6.1 Silikastøv

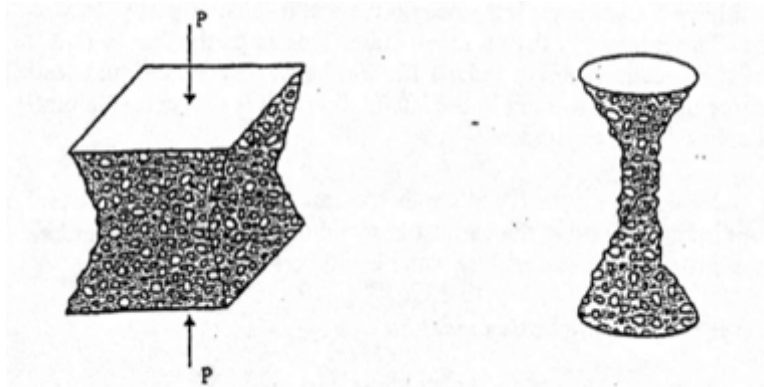
Silikastøv er et biprodukt som filtreres ut fra røykgassene under silisium- og ferrosilisiumproduksjon. Silikastøvet er en meget god filler blant annet på grunn av den lille størrelsen på kornene som tilsvarer 1/100 av et sement korn. Silikastøvet har også en meget stor spesifikk overflate, ca.  $20.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ , noe som gjør at ganske små mengder har stor innvirkning på den ferske betongens egenskaper. Den store overflaten gjør at silikaen binder mer vann og den ferske betongen vil bli mer seig og stiv, noe som medfører at det kan brukes et høyere synkmål uten at det er fare for separasjon. Reaksjonen mellom silikastøvet og kalsiumhydroksid vil øke heften mellom tilslaget og sementpastaen og fastheten vil dermed øke ettersom betongen herder. [1, 3]

### 2.6.2 Flygeaske

Flygeaske kommer som et produkt fra kullfyrte kraftverk, og er et produkt som er med på redusere mengden sement i betongen opp mot 30-40%. Flygeaske forbedrer støpeligheten i den ferske betongen, samt øker langtidsfastheten. Den herdede betongen vil derimot ha en forholdsvis lav tidlig fasthet på grunn av flygeaskens lave temperaturutvikling. [1]

## 2.7 Fasthet

Når det kommer til design og beregninger innen betong konstruksjoner er det veldig viktig å ha oversikt over materialegenskapene til betongen, og den viktigste av alle er trykkfastheten. Trykkfastheten er den høyeste spenningen betongen tåler før den bryter sammen og måles enten ved trykktesting av terninger eller sylindere. I henhold til NS 3473 brukes 100x100x100mm terninger når en tar for seg betongfastheten, men standardverket i Norge er bygd opp etter sylindrefasthet. Sylindrefastheten er mer nøyaktig når det er snakk om små marginer og blir derfor stadig mer brukt når en skal finne betongfastheten på byggeprosjekter i dag. Terningene/sylindrene blir etter avforming lagt i et vannbad på  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  i 28 døgn før de blir trykktestet til de går i brudd. Det er også vanlig å gjennomføre en trykktesting etter at terningene/sylindrene har lagt 7 døgn i vannbad, betongen har da omkring 75% av 28 døgnsfastheten. [3]



Figur 2.6 – Typisk fasthetsbrudd ved terning og sylinder [1]

Forskjellige betongkonstruksjoner trenger ulike betongkvaliteter og styrker, og Norsk Standard har derfor innført fasthetsklasser. Fasthetsklassene angir den laveste betongkvaliteten prøvestykkene kan ha etter utstøping i henhold til standardens vurderinger. Når det kommer til lettbetong ligger trykkfastheten her vanligvis på 50-80% av normalbetong, men en kan også oppnå høyfast lettbetong ved å endre proporsjoneringen og bruke lave  $v/c$ -tall og høy sementmengde som er prøvd i dette prosjektet. Ved høy trykkfasthet blir betongen mer sprø, og ved lettbetong gjelder dette i enda større grad så det er derfor viktig å ta hensyn til dette i konstruksjoner der det er brukt høyfast betong.

Fasthetsklasse NS	B10	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65	B75	B85	B95
CEN-betegnelse		C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C55/67				
Karakteristisk sylinderfasthet $f_{ck}$	10	20	25	30	35	45	55	65	75	85	95
Karakteristisk terningfasthet $f_{ck}$ <sup>1)</sup>	12	25	30	37	45	55	67	80	90	100	110

<sup>1)</sup> For fasthetsklasse B55 og høyere kan andre verdier benyttes hvis forholdet mellom disse og referansefastheten for sylindere er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen

Fasthetsklasse NS	LB12	LB20	LB25	LB30	LB35	LB45	LB55	LB65	LB75
CEN-betegnelse	LC12/13	LC20/22	LC25/28	LC30/33	LC35/38	LC45/50	LC55/60		
Karakteristisk sylinderfasthet $f_{ck}$	12	20	25	30	35	45	55	65	75
Karakteristisk terningfasthet $f_{ck}$ <sup>1)</sup>	13	22	28	33	38	50	60	72	83

<sup>1)</sup> Andre verdier kan benyttes hvis forholdet mellom disse og referansefastheten for sylindere er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen

Figur 2.7 – Fasthetsklasser for normal- og lettbetong [12]



## 2.8 Fiberarmering

Historisk sett er det brukt flere former for fiberarmering for å forbedre betongmørtelen oppigjennom årene. Som isolerende effekt brukte indianerne i Amerika stråfiber i mørtelen mange år før europeerne ankom kontinentet, mens kineserne brukte fiber i form av bambus når den Kinesiske mur ble bygget på 200-tallet f.Kr. I forbindelse med diverse broarbeider i New York City skrev Harry Porter en rapport i 1910 hvor det ble bevist at betongens strekkfasthet ble så mye som åttedoblet når det ble tilsatt oppskårede spiker i betongblandingen. [2]

I dag blir fiberarmering stadig mer brukt i både bærende- og ikke-bærende konstruksjoner og forbedrer materialegenskaper som bla. rissforsterkning, brannmotstand og økt bæreevne. Fiberen på markedet i dag kommer i flere former og lages av materialer som plast, glass, naturlige forekomster (basalt) og stål. Stålfiberen brukes vanligvis for å forsterke konstruksjonen, og syntetiske for å kontrollere riss og avskalling forårsaket av for eksempel temperatur- eller uttørkningsvinn. [5]

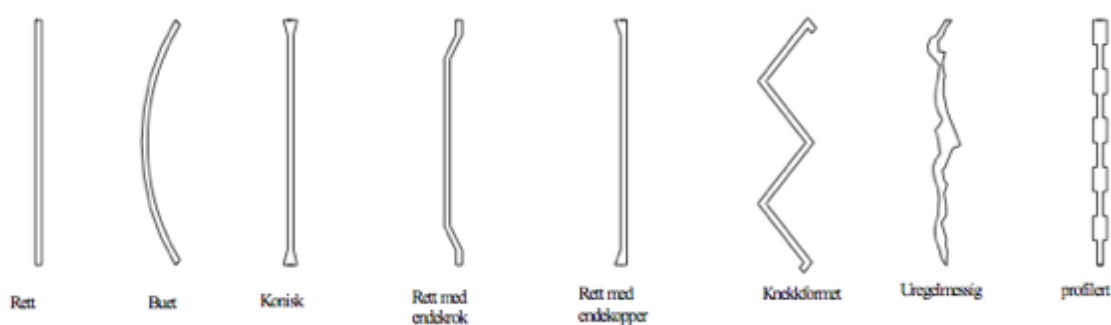
Når det brukes fiber i byggebransjen i dag økes materialegenskapene vesentlig, spesielt etter at det er oppstått riss i betongen. Når betong blir utsatt for trykk vil betongen utvide seg i alle tverretninger i kraftretningen, noe som medfører at det oppstår indre kreftspenninger i betongen og dermed riss. Straks det oppstår sprekker i betongen vil fiberen overta strekkspenningene i området rundt risset og fiberen vil da danne en bro over risset. Disse såkalte fiberbroene vil dermed redusere rissvidde hastigheten og gjør betongen mer duktil. Dette varierer selvsagt ut ifra hvor stor mengde fiber det er brukt i blandingen, samt fiberfordelingen og fiberorientering noe som er vanskelig å kontrollere.

### 2.8.1 Stålfiber

Etter Porter eksperimenterte med spiker i betongen på begynnelsen av 1900-tallet, som nevnt i 2.8, har stålfiberen stadig vært i utvikling. Stålfiber er laget av stål i varierende kvalitet, og kommer i flere former og dimensjoner. Stålfiberen er laget slik at når det oppstår sprekker i betongkonstruksjonen overtar fiberen strekkraftene og forhindrer at risset ikke skal utvikle seg. For å oppnå best mulig heft mellom stålfiber og betong har fiberarmeringen endekroker som forhindrer at de blir dratt ut så lett, såkalt pull-out. Ved bruk av ikke-deformerbare endekroker oppnår stålfiberen opp mot perfekt ankring og duktiliteten i betongen forbedres kraftig.

## 2.8.2 Basaltfiber

Basaltfiber er laget av smeltet vulkansk basaltstein som er strekt til en tråd med ønsket diameter. Basalttråden blir deretter overflatebehandlet og kuttet i forskjellige lengder etter hva slags betongblanding og -konstruksjon de skal benyttes i. Siden basaltfiberen er produsert av stein er den ikke korrosiv, den har høy strekkfasthet og har liten egenvekt i forhold til stålfiberen, og oppfører seg dermed annerledes enn stålfiber. I motsetning til stålfiberen hvor fiberen overtar kreftene etter det har oppstått sprekker i betongen, er basaltfiberen elastisk og absorberer dermed spenningene med engang. Dette gjør at basaltfiberen er effektiv mot å forhindre riss og rissutvikling, men vil ikke være med å bidra noe spesielt på bæreevnen i konstruksjonen.



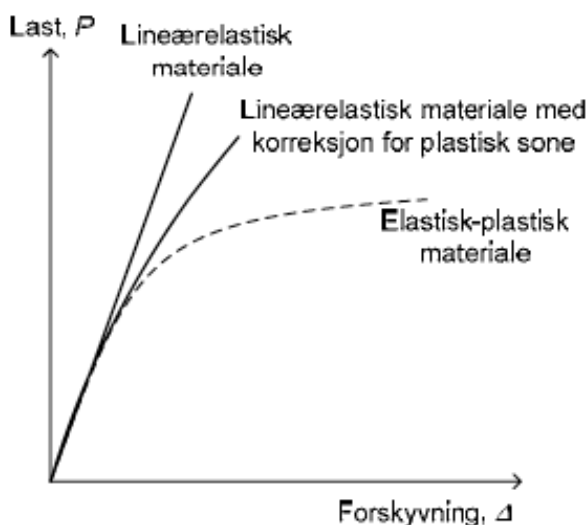
Figur 2.8 – Oversikt over fiberformer [5]

### 3.0 Bruddmekanikk

Bruddmekanikk er et helt eget fagområde innen byggebransjen og er en teori på hvordan sprekker og brudd oppstår, og hvordan dette eventuelt kan forhindres. For å beskrive bruddene og for å forstå bruddmekanikk blir det ofte foretatt to forskjellige forsøk, en bruddbasert- samt en styrke basert modell. Den styrke baserte modellen blir basert på at brudd oppstår i betongen når skjærkapasiteten blir overskredet av den indre skjærspenningen, mens det i den brudd baserte modellen antas at det oppstår indre feil og sprekker i betongen og det er disse som fører til brudd. For å få avklart hvilken modell som er mest riktig å benytte finnes det en rekke parametere som må bestemmes. Når parametere som skal benyttes er bestemt må grundig evaluering og bruddmekanisk prøving gjennomføres for å finne de riktige verdiene på parametere.

Bruddmekanikkens utgangspunkt er at alle konstruksjonsmaterialer er utsatt for sprekkdannelser og når en slik sprekke overstiger en viss dybde samt den nominelle spenningen i konstruksjonen overstiger en viss størrelse, vil konstruksjonen gå til brudd. Denne dybden og størrelsen er avhengig av material kvalitet og materialets egenskaper og kalles materialitets bruddseighet. [6, 8]

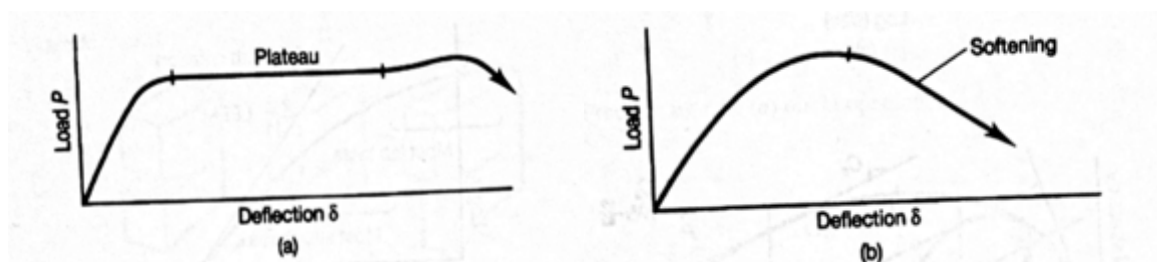
Når det er snakk om bruddmekanikk er det viktig å nevne at bruken av dette i praksis ikke er noen eksakt vitenskap. Tidlige studier av sprekkdannelser i betong viste seg å være feil pga. teorien innen lineær-elastisk bruddmekanikk (LEFM) ble benyttet, og de såkalte mikrosprekkene ble dermed neglisjert. Mikrosprekkene oppstår før makrosprekkene og er definert som en sprekke som ikke er synlig for det blotte øye ( $>200\mu m$ ). Disse er viktig å ta hensyn til med tanke på at oppførselen til mikrosprekkene ved last økning er i direkte sammenheng med makrosprekkene og senere brudd. Det var først etter 1960-tallet at bruddmekanikken gradvis ble utviklet til å innebære ikke-lineære materialer samt ta hensyn til dynamiske effekter. [6]



Figur 3.1 – Forskjell mellom lineærelastisk- og elastisk-plastisk materiale [11]

### 3.1 Bruddseighet og duktilitet i lettbetong

Som nevnt i kapittel 2.0 er lettbetong et svært sprøtt materiale og derfor ikke noe særlig duktilt. Duktilitet er definisjonen på materialets evne til å la seg plastisk deformere uten at materialet skal oppnå noen form for kritiske skader. Duktiliteten til betong avhenger av betongens sammensetning og tilslaget mekaniske egenskaper og struktur. I motsetning til ved normal betong hvor bruddet ofte skjer rundt tilslaget, sprekker gjerne lettbetongen opp tvers igjennom lett tilslaget i og med at lett tilslaget ofte har en lavere fasthet enn sementpastaen. Ved tilsetning av fiber vil lettbetongen bli mer seig, og dermed mer duktil noe som vil forbedre både bruddseigheten og den karakteristisk lengden. [5, 8]

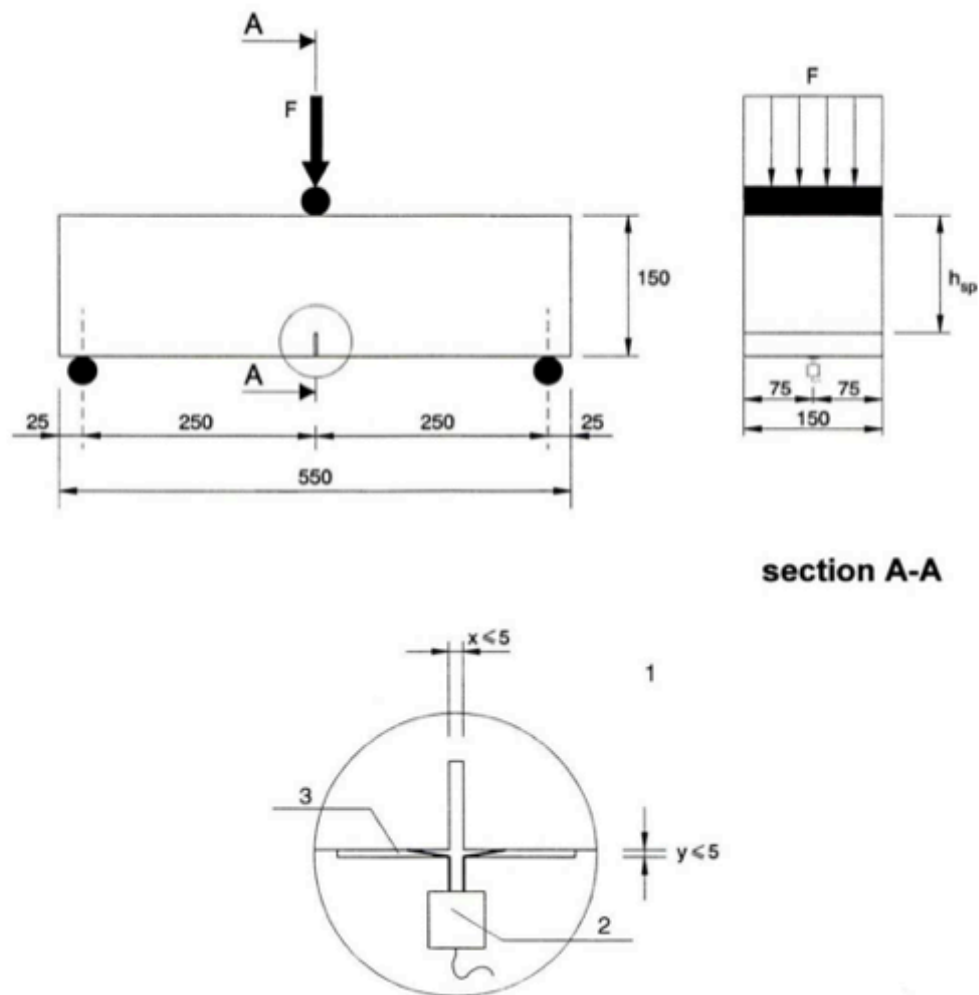


Figur 3.2 – Last forhold for duktil- (a) og sprøtt materiale (b) [6]

#### 3.1.1 Bøyestrekfasthet

I henhold til prøvingsstandarden (NS-EN 14651) kan betongens bøyestrekfasthet og rest strekkfasthet bestemmes ved å utføre prøvingsforløp med standardiserte bjelker. [14] Ved å anta lineær spenningsfordeling over tverrsnittet er det mulig å finne parametere som gir oss et inntrykk av hvor seig og duktil betongen er, og dermed få en forståelse på hvordan betongen oppfører seg etter det er oppstått riss.

Prøvingsstandarden har definert standardiserte bjelker på 550x150x150 mm med en forhåndsdefinert slisse sentrert i midtspennet av bjelken som brukes til utførelse av målingen, punkt A i figur 3.3. Bjelken blir påført deformasjonsstyrt last i området over slissen, og CMOD avlesninger blir foretatt under hele prøveprosedyren opp til en CMOD-verdi på 5mm, se kap. 5.7. En transducer, eller clip gauge, måler økningen på sprekåpningen, og den karakteristiske bøyestrekfastheten (proporsjonalitetsgrensen) hvor første riss oppstår, samt fire forhåndsdefinerte sprekstørrelser (CMOD<sub>1</sub>- CMOD<sub>4</sub>) blir bestemt for samtlige bjelker for å se oppførselen til de fiberarmerte prøvestykkene etter riss.



Figur 3.3 – Prøvingsprosedyre for CMOD i samsvar med NS-EN 14651 [14]

Ut ifra last-CMOD diagrammet, figur 3.4, tar en i henhold til NS-EN 14651 for seg proporsjonalitetsgrensen og fire forhåndsdefinerte rissvidder for å bestemme rest bøyestrekfastheten ved forskjellige lasttilfeller ved bruk av formel 3.1.

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (3.1)$$

hvor:

$f_{R,j}$  - bøyestrekfasthet når  $j=1,2,3,4$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

$F_j$  - påført last når  $j=1,2,3,4$  [N]

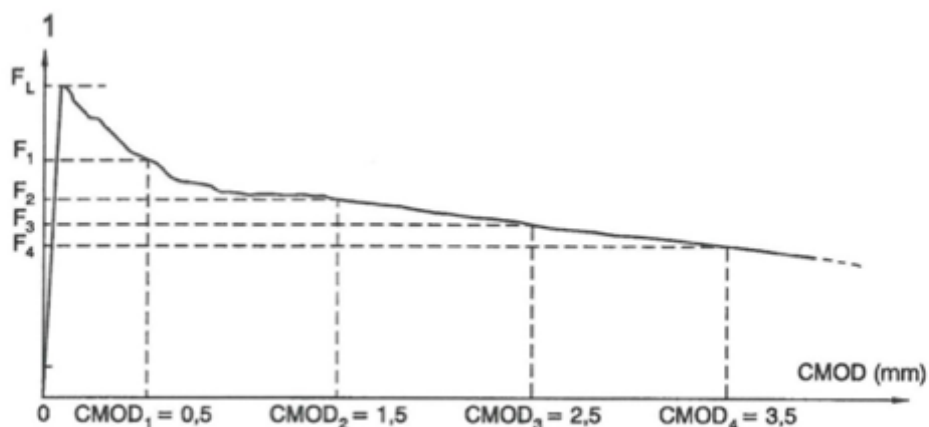
$l$  - lengden på prøvestykket [mm]

$b$  - bredden på prøvestykket [mm]

$h_{sp}$  - tykkelse på prøvestykket fra trykkrand til utskåret slisse [mm]

Videre kan den karakteristiske restbøyestrekfastheten bestemmes som:

$$f_{ftk, res2,5} = 0,37 \cdot f_{R,3} \quad (3.2)$$



Figur 3.4 – Last-CMOD diagram [14]

Notasjoner:

$f_{ct,L}^f$  - Karakteristisk bøyestrekfasthet ved 1.riss (proporsjonalitetsgrensen, LOP), eller ved rissvidde=0,05mm.

$f_{R,1}$  - Rest bøyestrekfasthet ved 0,5mm rissvidde

$f_{R,2}$  - Rest bøyestrekfasthet ved 1,5mm rissvidde

$f_{R,3}$  - Rest bøyestrekfasthet ved 2,5mm rissvidde

$f_{R,4}$  - Rest bøyestrekfasthet ved 3,5mm rissvidde

### 3.1.2 Karakteristisk lengde

Når det er snakk om den karakteristiske lengden i betongen er dette en indikasjon på økningen av sprøhet i betongen, og er definert som:

$$l_{ch} = \frac{E_{ch} \cdot G_f}{f_{lctm}^2} \quad (3.3)$$

hvor:

$l_{ch}$  - karakteristisk lengde [mm]

$E_{ch}$  - betongens elastitetsmodul [GPa]

$G_f$  - bruddenergien [N/mm]

$f_{lctm}$  - lettbetongens strekkfasthet [MPa]

og:

$$G_f = \frac{W_o}{h_{sp} \cdot b} \quad (3.4)$$

der:

$W_o$  - arealet under CMOD-kurve [Nm]

$h_{sp}$  - tykkelse på prøvestykket fra trykkrand til utskåret slisse [mm]

$b$  - bredden på prøvestykket [mm]

Ved normal betong ligger vanligvis den karakteristiske lengden på omkring 200 mm, mens ved en lettbetong kan den være mindre enn 100 mm. Ved å beregne den karakteristiske lengden kan en få en indikasjon på betongens oppførsel under lastpåføring og ved jo lavere  $l_{ch}$ , jo mindre duktil er betongen.

### 3.1.3 Brittleness number

Brittleness number er en parameter, akkurat som karakteristisk lengde, som beskriver hvor sprøtt materialet er bare at her tar en også hensyn til prøvebjelkens totale lengde,  $L$ , og er definert som:

$$\beta = \frac{L \cdot f_{ctm}^2}{E_{ch} \cdot G_f} \quad (3.5)$$

For brittleness number er der motsatt enn for karakteristisk lengde, og ved høye verdier vil dette tilse en sprø betongblanding. [10]

### 3.1.4 Spennings- og tøyingsforholdet i lettbetong

Materialer som blir utsatt for trykk vil alltid utgi en deformasjon før det vil gå til brudd, men størrelsen på denne deformasjonen varierer fra materiale til materiale. Når det kommer til betong er dette et materiale som tåler store trykkrefter, men også det har sine begrensninger. Betongsammensetninger med høy trykkfasthet, og spesielt lettbetong, vil som nevnt i 3.1 være mer sprø og dermed oppnå mindre tøyingsverdi ved brudd enn for en seig betongblanding. I henhold til EC2 og tabell 11.3.1 har lettbetong under trykk en maks spenningsstøyning,  $\varepsilon_{lc2}$ , og bruddtøyning,  $\varepsilon_{lcu2}$ , som øker med hensyn på fasthetsklasse og densiteten til lettbetongen. For lettbetong med fasthet  $>50\text{MPa}$  gjelder følgende formler for å finne maks spennings- og bruddtøyning:

$$\varepsilon_{lc2} = \eta_1 \cdot [2,0 + 0,085(f_{lck} - 50)^{0,53}] \quad (3.6)$$

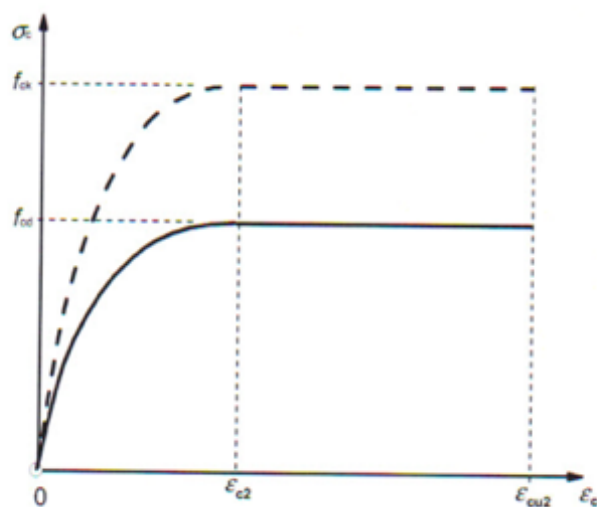
$$\varepsilon_{lcu2} = \eta_1 \cdot \left[ 2,6 + 35 \left( \frac{90 - f_{lck}}{100} \right)^4 \right] \quad (3.7)$$

hvor:

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6 \frac{\rho}{2200} \quad (3.8)$$

og  $\rho$  er densitetens øvre grense for den aktuelle klassen i overenstemmelse med tabell 11.1 i EC2.

Som en ser fra formlene vil maks spennings- og bruddtøyningen øke ved jo høyere fasthetsklasse, men vil igjen avta dersom lettbetongen har en høy densitet. Spennings- og tøyningsforholdet i lettbetongen er dermed avhengig av flere faktorer som er med på å avgjøre de duktile egenksapene.



Figur 3.5 – Spennings- deformasjon fordeling for betong under trykk [12]



## 4.0 Strukturell analyse

For å se litt på hva slags betydning fiberarmeringen har på betongens strukturelle egenskaper er det i dette kapitlet tatt med noen beregninger som viser forslag til hvordan en tar hensyn til fiberen. Det er ikke utført beregninger på alle punkter som er tatt med i kapitlet, men for å vise fiberarmeringens oppførsel mot sprekkdannelse er forslagene tatt med.

### 4.1 Bruddgrensetilstand (ULS)

Bruddgrensetilstanden er den grensetilstanden hvor en bestemmer betongkonstruksjonens kapasitet mot brudd ved beregning på grunnlag av tøyningsegenskaper og dimensjonerende fastheter. Videre i dette kapitlet skal vi ta for oss de viktigste lastvirkningene som er aktuelle med tanke på de eksperimentelle bjelkeundersøkelsene som ble foretatt i oppgaven.

#### 4.1.1 Materialfaktor

Når  $CMOD=2,5\text{mm}$  og en skal ta for seg rest strekkfastheten i bruddgrensetilstand,  $f_{ftk,res2,5}$ , sier Kanstad [5] at en materialfaktor kan settes til:

$$\gamma_{cf} = 1,5$$

Den dimensjonerende rest bøyestrekfastheten kan da defineres ved:

$$f_{ftd,res2,5} = \frac{f_{ftk,res2,5}}{\gamma_{cf}} \quad (4.1)$$

Dersom det er avvik i tverrsnittets dimensjoner og en tar hensyn til dette i dimensjoneringen i henhold til pkt. A2.2 i Eurocode 2 [12], samt at det påvises at rest strekkfastheten ikke overskrider 10% kan materialfaktoren reduseres til:

$$\gamma_{cf} = 1,35$$

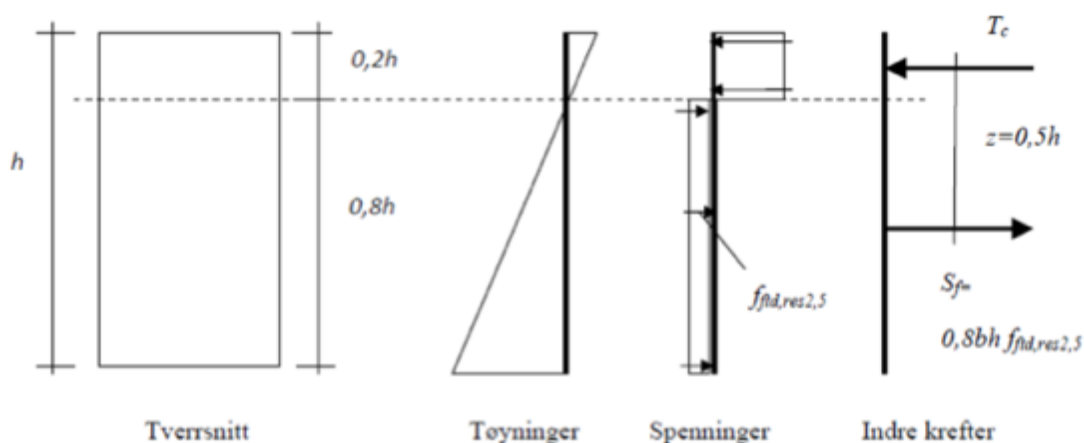
### 4.1.2 Bøyemoment

Som nevnt i 2.8 vil deler av et betongtverrsnitt kunne overta strekkrefter etter at det er oppstått riss dersom det blir benyttet fiberarmering. Ved å ta for seg strekksonen kan denne forenklet karakteriseres ved en jevn spenningsfordeling med spenning tilsvarende den dimensjonerende reststrekkfastheten,  $f_{ftd,res2,5}$ . Overførselen av strekkreftene fører til at trykksonene i betongen øker, noe som fører til økt høyde på trykksonen og som er positivt med tanke på momentkapasiteten. Momentkapasiteten er svært viktig når det kommer til betongberegning og det er derfor viktig å komme frem til en formel hvor en også tar hensyn til bruken av fiberarmering. Vi skal nå se på hvordan momentkapasiteten kan defineres ved bruk av fiberarmering.

#### 4.1.2.1 Momentkapasitet for fiberarmert betong, forslag Kanstad

Når en ser skal finne momentkapasiteten for fiberarmerte betongtverrsnitt kan en forenkle kapasiteten ved å anta at rest strekkfastheten,  $f_{ftd,res2,5}$ , virker over  $0,8h$  og den indre momentarmen er  $0,5h$ . For rektangulære tverrsnitt blir momentkapasiteten for det fiberarmerte tverrsnittet da:

$$M_{Rd} = 0,4 \cdot f_{ftd,res2,5} \cdot b \cdot h^2 \quad (4.2)$$

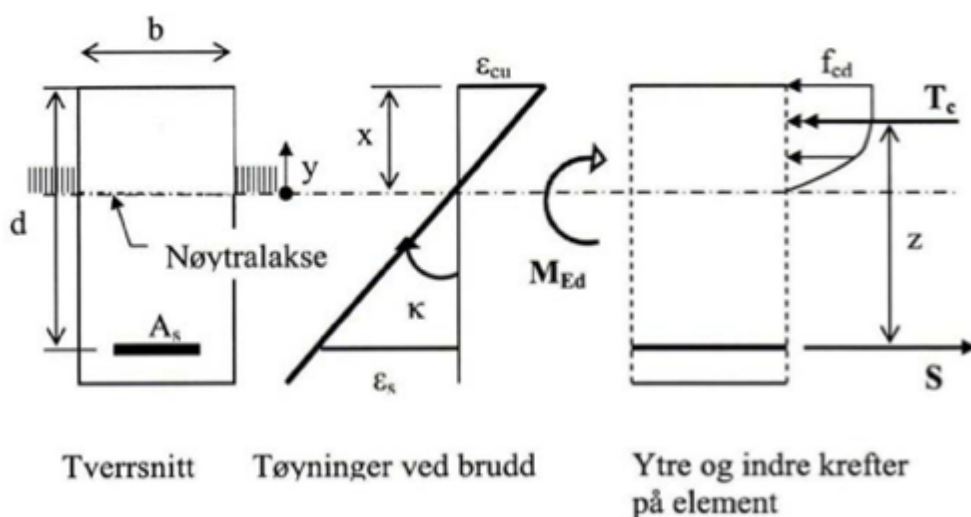


Figur 4.1 – Spennings- og tøyningsfordeling for rektangulært fiberarmert tverrsnitt utsatt for ren bøyning [5]

#### 4.1.2.2 Momentkapasitet i henhold til Eurocode 2

Om en følger Eurocode 2 sine retningslinjer for momentkapasitet, vil en her se at spennings- og tøyningsforløpet vil ha en noe annerledes beregningsmodell enn når en tar hensyn til fiber. Beregningene som følger her er basert på Sørensen [9] og EC2 [12] og følgende forutsetninger er tatt iht. EC2, kap. 6.1(2):

- full heft mellom armeringsjern og betong
- ser bort fra betongens strekkfasthet
- plane tverrsnitt forblir plane
- Spennings- og tøyningsegenskaper etter EC2, kap. 3.1.7



Figur 4.2 – Beregningsmodell for momentkapasitet [9]

hvor:

- d - effektiv høyde fra trykkrand til tyngdepkt. i strekkarmering [mm]
- $A_s$  - strekkarmeringens tverrsnitt [ $mm^2$ ]
- x - trykksonehøyde [mm]
- S - kraft i strekkarmeringen [kN]
- $T_c$  - trykkresultant av betongspenningen i trykksonen [kN]
- z - indre momentarm [mm]
- b - betongtverrsnittets bredde [mm]
- h - betongtverrsnittets høyde [mm]
- $\alpha$  - trykksonehøydefaktor

Vanlig praksis i Norge er at en tar for seg tverrsnittet som et normalarmert tverrsnitt, dvs. når tøyningen i betongtrykksonen er lik  $\epsilon_{cu2}$  og når ståltøyningen i strekksonen  $\epsilon_s = 2\epsilon_{yk} = 0,005mm$ . Trykksonehøyden i et slikt normalarmert tverrsnitt er definert som:

$$x = \alpha \cdot d \quad (4.3)$$

hvor:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + 2\varepsilon_{yk}} \quad (4.4)$$

$\varepsilon_{cu}$  - er det samme som  $\varepsilon_{cu2}$  i tab. 3.1 i EC2, eller  $\varepsilon_{lcu2}$  i tab. 11.3.1 i EC2 for lettbetong

$2\varepsilon_{yk}$  - er det samme som  $\varepsilon_s = 0,005mm$

I henhold til tabell 11.3.1 er  $\varepsilon_{lcu2}$  definert som:

$$\varepsilon_{lcu2} = 0,0035 \cdot \eta_1 \quad (4.5)$$

og  $\eta_1$  er definert i formel 3.8 i kapittel 3.1.4.

Betongtrykksjonens dimensjonerende momentkapasitet kan da finnes ved bruk av formel 4.6:

$$M_{Rd} = K f_{cd} b d^2 \quad (4.6)$$

hvor:

$K$  - faktor som finnes i tabell 4.3

$f_{cd}$  - dimensjonerende betongtrykkfasthet [MPa]

$b$  - tverrsnittets bredde [mm]

$d$  - effektive høyde fra trykkrand til tyngdepkt. i strekkarmering [mm]

Fasthetsklasse	B20 – B45	B55	B65	B75	B85	B95
<b>K</b>	0,275	0,250	0,219	0,195	0,177	0,161

Figur 4.3 – Verdi for K ved normalarmert B20-B95 [9]

Dersom tverrsnittet ikke er normalarmert må det undersøkes om det er et balansert underarmert tverrsnitt. For å undersøke dette må vi regne ut den balanserte armeringsmengden,  $A_{s,b}$ , og sammenligne denne med aktuell  $A_s$ , for så å finne trykksonefaktoren,  $\alpha$ , og videre  $M_{Rd}$ :

$$A_{s,b} = \lambda \cdot \eta \frac{f_{cd}}{f_{yd}} b \cdot d \cdot \alpha_b \quad (4.7)$$

hvor:

$\lambda = 0,8$  - for fasthetsklasse  $\leq B50$

$\eta = 1,0$  - for fasthetsklasse  $\leq B50$

og

$$\alpha_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \quad (4.8)$$

når  $\varepsilon_s = \varepsilon_{yd} = 0,005mm$

Dersom  $A_{s,b} \geq A_s$  er det et balansert underarmert tverrsnitt og vi kan da finne  $\alpha$  og til slutt  $M_{Rd}$  for betongtverrsnittet:

$$\alpha = \frac{f_{yd} \cdot A_s}{\lambda \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d} \quad (4.9)$$

$$M_{Rd} = \lambda \cdot \eta \cdot \alpha (1 - 0,5\lambda \cdot \alpha) f_{cd} \cdot b \cdot d^2 \quad (4.10)$$

### 4.1.3 Skjærkapasitet

Når det kommer til å beregne skjærkapasiteten til fiberarmert betong finnes det en rekke metoder og modeller som er tilgjengelig. Fremgangsmåten og modellene er hovedsakelig basert på resultater fra diverse bjelkeprøver med konvensjonell strekkarmering, og det er godt dokumentert at fiberarmering gir økt kapasitet mot skjærbrudd. Det finnes ikke noen klar beregningsmetode for tverrsnitt bare armert med fiberarmering, men det er kjent at fiberarmering øker strekkfastheten vesentlig dersom det er en kombinasjon av fiber- og vanlig armering. [5]

#### 4.1.3.1 Skjærkapasitet for vanlig armering, forslag Kanstad

Forslaget fra Kanstad 2011 [5] tar for seg skjærkapasiteten for betongtverrsnitt med vanlig bøyestrekkarmering i underkant av bjelken, og uten tradisjonell bøylearmering iht. EC 2 kap 6.2.2. Skjærkapasiteten kan da finnes på tradisjonell metode i henhold til Eurocode 2 kap. 6.2, men med fiberen som et ekstra bidrag,  $V_{Rd,cf}$ :

$$V_{Rd,c} = V_{Rd,ct} + V_{Rd,cf} \quad (4.11)$$

$$V_{Rd,ct} = [C_{Rd,c} k (100\rho_1 f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (4.12)$$

$$V_{Rd,cf} = 0,6 \cdot f_{ftd,res2,5} b_w h \quad (4.13)$$

hvor:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,15}{\gamma_c} \text{ eller } \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (4.14)$$

$$k_1 = 0,15$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b_w d} \leq 0,02 \quad (4.15)$$

hvor:

- $A_s$  - arealet av strekkarmering [ $mm^2$ ]  
 $b_w$  - minste bredde av tverrsnittet i strekksonen [mm]  
 $d$  - effektiv høyde [mm]

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,02f_{cd} \quad (4.16)$$

hvor:

- $N_{Ed}$  - aksiallast pga. ytre last eller forspenning [N] ( $N_{Ed} > 0$  for trykk)  
 $A_c$  - arealet av betongtverrsnitt [ $mm^2$ ]

$$f_{ftd,res2,5} = \frac{f_{ftk,res2,5}}{\gamma_{cf}} \quad (4.17)$$

$$\gamma_{cf} = 1,5 \quad (\text{evt. } \gamma_{cf} = 1,35 \text{ som nevnt i 4.1.1})$$

## 4.2 Bruksgrensetilstand (SLS)

Bruksgrensetilstanden bygger på at konstruksjonen skal tåle angitt hensikt og bruk over sin tiltenkte brukstid. Kravene som stilles til denne grensetilstanden skal også tilse at bestandigheten til konstruksjonen opprettholdes og er sikret. Denne oppgaven fokuserer på duktilitet i lettbetongen så i dette kapittelet blir det tatt hensyn til opprissing av betong.

### 4.2.1 Minimumsarmering ved bruk av fiber, forslag Kanstad

Hvis det er krav om begrensning av rissvidden i en betongkonstruksjon, kreves det en minimummengde armering med heft for å stanse opprissingen i områder der det kan oppstå strekk. [12] Hensikten til minimumsarmeringen er å ha en god og skikket konstruksjon som er sikret mot skadelige riss forårsaket av krefter som vanligvis ikke er tatt hensyn til i den strukturelle analysen. Minimumsarmeringen skal oppta kreftene slik at kapasiteten når det oppstår riss skal være større eller lik kapasiteten var like før det oppsto rissdannelse. Ses dette på i sammenheng med NS-EN 14651 vil dette tilsi at rest bøyestrekkefastheten,  $f_{R,i}$ , skal være større eller lik bøyestrekkefastheten,  $f_{ct,L}^f$ , ved alle sprekkåpninger. Ved bruk av fiberarmering vil fiberbroene som etter hvert oppstår i den oppsprekte betongen medføre at bøyestrekkefastheten vil øke, og eventuelle skader på betongen vil bli redusert på grunn av fiberens oppførsel i rissområdet. [5]

Kanstad 2011 [5] har laget et forslag til beregning av minimumsarmering som blir presentert her, og baserer seg på at strekksonen i et tverrsnitt skal ha lik kapasitet etter rissdannelse som like før. Beregningen følger Eurocode 2 kap. 7.3.2, men tar også hensyn til og inkluderer fiberarmeringen:

$$A_{s,min}\sigma_s + A_{ct2}f_{ftk,res2,5} \geq A_{ct}f_{ct,eff} \quad (4.18)$$

eller

$$A_{s,min} \geq \frac{A_{ct}f_{ct,eff} - A_{ct2}f_{ftk,res2,5}}{\sigma_s} \quad (4.19)$$

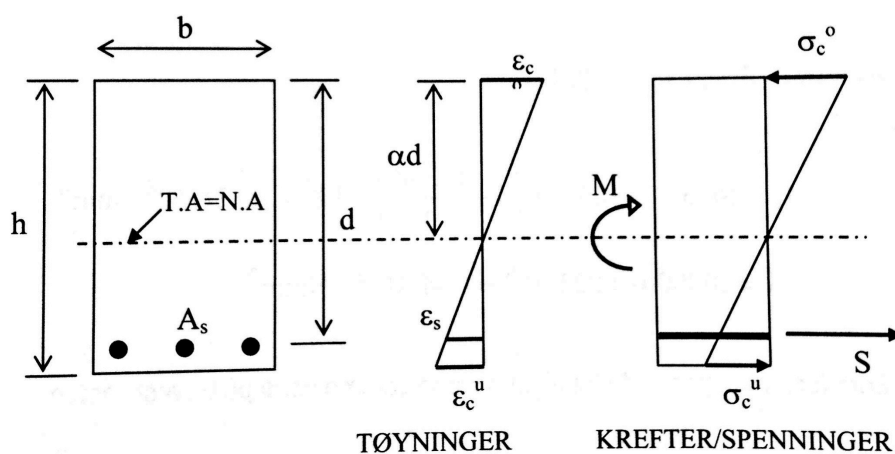
hvor:

- $A_{s,min}$  - tverrsnittsarealet av vanlig armering i strekksonen [ $mm^2$ ]
- $A_{ct}$  - arealet til betongtverrsnittets i strekksonen [ $mm^2$ ]
- $A_{ct2}$  - arealet til betongtverrsnittet etter opprissing [ $mm^2$ ]
- $\sigma_s$  - størst tillatt spenning i armeringen. Antas å være lik flytespenningen til armeringsjernet  $f_{yk}$ . [MPa]
- $f_{ct,eff}$  - gjennomsnittlig strekkfasthet når det forventes riss [ $N/mm^2$ ]
- $f_{ftk,res2,5}$  - karakteristisk strekkfasthet relatert til 2,5mm rissvidde [ $N/mm^2$ ]

#### 4.2.2 Rissmoment og risslast

Opprissing av betong skal begrenses for å unngå skader på konstruksjonen som påvirker betongens bestandighet eller utseende. Det er i påfølgende kapittel vist beregninger i henhold til Sørensen [9] og EC 2 [12] med tanke på risslast og rissmoment for å se hvordan teorien stemmer overens med de eksperimentelle resultatene. Følgende forutsetninger er tatt:

- Betongen antas å ikke ha noen strekkfasthet, dvs. spenningsløs betong i strekksone for fullstendig opprissing.
- Betong i trykk og stål er lineært elastiske materialer som følger Hooke's lov.
- Naviers hypotese om at plane tverrsnitt forblir plane og normale til akse under bøyning gjelder.



Figur 4.4 – Bøyning i uopprikket tverrsnitt [9]

For relativt lave lastnivåer vil strekkspenningene i betongen være mindre enn strekkfastheten og tverrsnittet vil da være uopprisset, se figur 4.4. Siden tverrsnittet er uopprisset er nøytralaksen lik tyngdepunktsaksen. Aksens beliggenhet kan derfor lettest bestemmes ved en enkel tyngdepunktsberegning for det transformerte betongtverrsnittet, og momentet om øvre rand gir:

$$(A_c + \eta A_s) \cdot \alpha d = A_c \cdot \frac{h}{2} + \eta A_s \cdot d \quad (4.20)$$

eller:

$$\alpha d = \frac{A_c \cdot 0,5h + \eta A_s \cdot d}{(A_c + \eta A_s)} \quad (4.21)$$

$$\eta = \frac{E_s}{E_{lcm}} \quad (4.22)$$

hvor:

$A_c$	- arealet til betongtverrsnittets i strekksonen [ $mm^2$ ]
$A_s$	- tverrsnittsarealet av vanlig armering i strekksonen [ $mm^2$ ]
$h$	- høyden til betongtverrsnittet [mm]
$d$	- avstand fra øvre rand til armering [mm]
$E_s$	- armeringsjernets elastitets modul [GPa]
$E_{lcm}$	- lettbetongens elastitets modul [GPa]

Betongens bidrag til arealmomentet vil da bli:

$$I_{cl} = \frac{bh^3}{12} + bh \cdot (\alpha d - 0,5h)^2 \quad (4.23)$$

Armeringsjernets bidrag til arealmomentet:

$$I_{sl} = A_s(d - \alpha d)^2 \quad (4.24)$$

En vil da kunne finne den totale bøyestivheten for det uopprissede betongtverrsnittet:

$$EI = E_{lc}I_{cl} + E_sI_{sl} \quad (4.25)$$

Videre forutsettes det at det oppstår riss i tverrsnittet fra figur 4.4 når strekkspenningen i underkant,  $\sigma_c^U$ , når strekkfastheten  $f_{ctm}$ . Ved å benytte lastkombinasjonene fra figur 4.4 og de nevnte forutsetningene kan rissmomentet,  $M_{cr}$  og risslast,  $P_{cr}$ , da bestemmes ut ifra:

Krumning:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI} = \frac{\varepsilon_c^U}{h - \alpha d} \quad (4.26)$$

Bøyestivheten, EI, kan da videre uttrykkes som:

$$EI = E_{lc} \cdot \left( I_{cl} + \frac{E_s}{E_{lc}} \cdot I_{sl} \right) = E_{lc} \cdot (I_{cl} + \eta I_{sl}) \quad (4.27)$$



Ved å kombinere ligning 4.26 og 4.27 vil vi få et uttrykk for momentet i betongtverrsnittet:

$$M = \frac{\varepsilon_c^U \cdot E_{lc} \cdot (I_{cl} + \eta I_{sl})}{h - ad} = \frac{\sigma_c^U (I_{cl} + \eta I_{sl})}{h - ad} \quad (4.28)$$

Som nevnt er risskriteriet  $\sigma_c^U = f_{ctm}$  og vi får da et rissmoment og risslast definert utifra formlene:

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{(I_{cl} + \eta I_{sl})}{h - ad} \quad (4.29)$$

og

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot M_{cr}}{a} \quad (4.30)$$

hvor a er avstanden fra lastpunkt og ut til opplager.

### 4.2.3 Rissvidde

I bruksgrensetilstand kan rissvidde utvikling være et stort problem, og bruk av fiber vil ofte redusere og virke svært gunstig på både rissavstand og rissvidder. Videre følger beregning av rissvidde for vanlig armert betongkonstruksjoner iht. EC 2, samt forslag til beregning når det er benyttet fiberarmering.

#### 4.2.3.1 Rissvidder i armert fiberbetong, forslag Kanstad

Forslaget til rissvidde beregningen til Kanstad 2011 [5] er tilnærmet lik Eurocode 2 sitt forslag, men har med en ekstra koeffisient,  $k_5$ , som tar hensyn til fiberens oppførsel. Fiberen blir tatt hensyn til ved å beregne spenningen i armeringen med utgangspunkt i tøyings- /spenningsforløpet med uniform restspenning lik  $f_{ftk,res2,5}$ .

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (4.31)$$

hvor:

- $w_k$  - rissvidden [mm]
- $s_{r,max}$  - største rissavstand [mm]
- $\varepsilon_{sm}$  - gjennomsnittlig tøyning i armering
- $\varepsilon_{cm}$  - gjennomsnittlig tøyning i betongen mellom riss

og:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{\rho_{p,eff}}}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (4.32)$$

hvor:

$\sigma_s$  - spenningen i armeringen ved opprisset tilstand [MPa]

$k_t$  - faktor som avhenger av varigheten til lasten

$k_t=0,6$  for kortvarig last

$k_t=0,4$  for langvarig last

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} \quad (4.33)$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{(A_s + \xi_1^2 A_p)'}{A_{c,eff}} \quad (4.34)$$

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot \frac{\phi}{\rho_{s,eff}} \quad (4.35)$$

hvor:

$\phi$  = armeringens diameter

$k_1 = 0,8$  ved god heft og  $1,6$  ved tilnærmet glatt overflate

$k_2 = 0,5$  for bøyning og  $1,0$  ved strekk

$k_3 = 3,4$

$k_4 = 0,425$

$$k_5 = 1 - \frac{f_{tk,res2,5}}{f_{ctm}} \quad (4.36)$$

$$\rho_{s,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A_p}{A_{c,eff}} \quad (4.37)$$

hvor  $A_{c,eff}$ ,  $\xi_1^2$  og  $A_p$  er definert i pkt. 7.3.2(3) i EC2

## 4.4 Konstruksjonsregler ved bruk av fiber

For at fiberarmeringen skal være tillatt å benytte i konstruksjoner fremfor vanlig armering, må det dokumenteres at de fiberarmerte konstruksjonene tilfredsstillere kravene som stilles til minimumsarmering. Dette kapittelet tar for seg konstruksjonsregler for konstruksjoner hvor det er benyttet vanlig armering, samt forslag til minimumsarmering når det er benyttet fiber.

### 4.4.1 Minimumsarmering med vanlig armering og fiber, forslag Kanstad

Basert på omfattende forsøkkserier med bruk av fiberarmering uttrykker Kanstad 2011 [5] konstruksjonsregler som tilsier at rektangulære bjelker bør minst ha en armering i strekksonen som tilsvarer:

$$A_{s,min} = \frac{0,26 \cdot b_t \cdot d (f_{ctm} - 2,1 f_{ftk,res2,5})}{f_{yk}} \quad (4.38)$$

men

$$A_{s,min} \geq 0,0013 \cdot b_t \cdot d \left( \frac{1 - 2,1 f_{ftk,res2,5}}{f_{ctm}} \right) \quad (4.39)$$

hvor:

- $b_t$  - gjennomsnittlig bredde av strekksonen [mm]
- $d$  - effektiv tverrsnitthøyde [mm]
- $f_{ctm}$  - gjennomsnittlig strekkfasthet i betongen, evt  $f_{lctm}$  for lettbetong [MPa]
- $f_{ftk,res2,5}$  - karakteristisk strekkfasthet ved 2,5mm rissvidde [MPa]
- $f_{yk}$  - armeringens karakteristiske flytegrense [ $N/mm^2$ ]

I Eurocode 2 finner en henholdsvis  $f_{ctm}$  i tab. 3.1 for normalbetong og  $f_{lctm}$  i tab. 11.3.1 for lettbetong [12].

### 4.4.2 Minimumsarmering i henhold til EC2

Tar en for seg Eurocode 2 sitt forslag til å beregne minimumsarmering i en rektangulær bjelke vil dette være tilnærmet likt som forslaget nevnt i 4.4.1, men effekten fra fiberarmeringen vil ikke være inkludert:

$$A_{s,min} = \frac{0,26 \cdot b_t \cdot d \cdot f_{ctm}}{f_{yk}} \quad (4.40)$$

og

$$A_{s,min} \geq 0,0013 \cdot b_t \cdot d \quad (4.41)$$

## 5.0 Eksperimentelt

### 5.1 Støpe plan

For å få en best mulig forståelse på hvordan lettbetongen oppfører seg og om duktiliteten blir endret ved bruk av ulik dosering og type fiberarmering, støpes det flere forskjellige typer prøveelementer. For å undersøke ønskede egenskaper i lettbetongen blir følgende prøveelementer utstøpt:

Tabell 5.1 – Forsøksoversikt

Hensikt	Form	Dimensjon [mm]
Sylinderfasthet	Sylinder	150x300
Spaltestrekkfasthet	Sylinder	150x300
Arbeidsdiagram	Sylinder	150x300
Bøyestrekfasthet	Bjelke	150x150x550
Strekktest	Bjelke m./innstøpt anker	150x150x550
Rissutvikling	Stor bjelke	250x300x2200

For å se hvordan duktiliteten endres ved bruk av forskjellig type fiberarmering, blir det utstøpt 6 serier, hvorav 2 serier og 4 er med variabel dosering fiberarmering. Det er ønskelig å oppnå en høyfast lettbetong med sylinderfasthet på ca. 50 MPa. For å oppnå en slik fasthet i lettbetongen er det nødvendig med en sementtype hvor en oppnår høy fasthet samt et lavt v/c-tall, og for å tilfredsstillere kravene blir det benyttet Norcem Anlegg FA og et v/c-tall på 0,3.

Formålet med laboratorieforsøket er som kjent å se hvordan duktiliteten i lettbetongen endrer seg i forhold til ulik dosering og type fiberarmering. I henhold til ønsket fasthet for lettbetongen blir det bestemt en betongresept som brukes på alle lettbetongblandingene. For også å sammenligne hvordan duktiliteten i lettbetong er kontra normalbetong blir det støpt en referanseblanding med høyfast normalbetong uten fiberarmering så en kan sammenligne de to referanseblandingene. Se vedlegg A for proporsjoneringsark.

Tabell 5.2 – Blandingsforhold

Serie navn	Stålfiber [vol%]	Basaltfiber [vol%]	Ant. sylindere	Ant. små bjelker	Ant. store bjelker
ND-ref	-	-	4	4	1
LWAC-ref	-	-	9	4	1
LWAC-1,0SF	1,0	-	9	4	1
LWAC-1,5SF	1,5	-	9	4	1
LWAC-1,5BF	-	1,5	9	4	1
LWAC-3,0BF	-	3,0	9	4	1

Hvor SF=stålfiber og BF=basaltfiber

## 5.2 Materialer

For å oppnå en lettbetong med ønskede egenskaper og støpelighet blir det benyttet følgende materialer:

- Sement: CEM II 42,5N - Norcem Anlegg FA, densitet  $2990 \text{ kg/m}^3$ , finhet(Blaine)  $390 \text{ kg/m}^3$ . Se vedlegg B.2.
- Superplastiserende: Dynamon SX-N fra Rescon Mapei, densitet  $1060 \pm 20 \text{ kg/m}^3$ , tørrstoffinnhold  $18,5 \pm 1\%$ . Se vedlegg B.3.
- Lett tilslag: I lettbetongen blir det benyttet naturlig sand samt 2 fraksjoner av leca
  - Forsand 0-8mm.
  - Filtralite HR 3-6mm. Partikkeldensitet  $1450 \text{ kg/m}^3$ . Se vedlegg B.1.
  - Filtralite HR 4-8mm. Partikkeldensitet  $1400 \text{ kg/m}^3$ . Se vedlegg B.1



Figur 5.1 – Leca 4-8 mm til venstre og 3-6mm til høyre

- Grovt tilslag: I referanse blandingen for normalbetong benyttes det 3 fraksjoner
  - Forsand 0-8mm.
  - Velde 8-16mm.
  - Velde 16-22mm.



Figur 5.2 – Forsand 0-8mm

- Fiber: Videre benyttes det to forskjellige typer fiberarmering
  - Stålfiber: Krampe Harex DE 50/1 N, rett med enkel endekrok. Lengde  $50 \pm 10$  mm, strekkfasthet  $1100 \pm 15\%$  MPa. Se vedlegg B.4.
  - Basaltfiber: ReforceTech, rett. Lengde  $30 \pm 10$  mm, strekkfasthet 3200 MPa, densitet  $2680 \text{ kg/m}^3$ . Se vedlegg B.5.



Figur 5.3 – Stålfiber til venstre, basaltfiber til høyre

### 5.3 Blandesyklus

På betonglaboratoriet blir en tvangsblender med kapasitet på 110 liter benyttet for å blande betongsammensetningen. For å forsikre seg at betongen blir mikset ordentlig er volumet per blanding på omkring 95 liter, samt at fiberen ble fordelt i to doseringer. Følgende blandingsyklus blir gjennomført for hver serie:

- 1 minutt blanding av tørr tilslag og 50% av fiberarmering
- 2 minutter blanding med tilsetning av vann og SP-stoff
- 1 minutt pause og tilsetning av restenende fiber
- 1 minutt blanding



Figur 5.4 – Tvangsblender som ble brukt under prosjektet

### 5.4 Prøving av fersk betong

For hver serie ønskes det å foretas prøving av den ferske betongen for å undersøke luftinnhold, slump og densitet. Resultatene og egenskapene til samtlige prøver som blir tatt i fersk tilstand har stor innvirkning på lettbetongens bestandighet og slutfasthet. Prøvingsforløpene blir foretatt i henhold til "Prøving av fersk betong standardene", NS-EN 12350-1/7:2000.

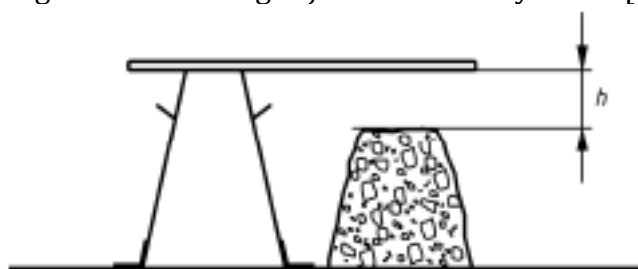
#### 5.4.1 Synkmål

For å måle synkmål i den ferske lettbetongen gjennomføres dette i henhold til NS-EN 12350-2:2000. Før prøvetakningen starter må det forsikres om at underlaget er horisontalt og vadret opp. Synkkjeglen blir så fuktet og holdt fast til underlaget ved at en av laborantene står på håndtakene til kjeglen, før kjeglen blir fylt med 3 lag hvor hvert

lag utgjør omlag 1/3 av kjeglen. Hvert betonglag blir underveis komprimert med 25 støt med en komprimeringsstav, og ved lag 2 og 3 blir komprimeringsstaven så vidt trengt ned i det underliggende laget. Det øverste laget blir til slutt avrettet kant i kant med kjeglen og synkkjeglen blir løftet opp med en jevn hastighet uten sidebevegelser. Iht. NS-EN 12350-2 er prøven bare gyldig dersom hele prøveprosedyren foregår på under 150 sekunder, samt at prøvelegemet forblir intakt og unngår skjærdeformasjoner som vist til høyre i figur 5.5. Synkmålet blir til slutt målt som vist i figur 5.6 og avrundet til nærmeste 10mm. [15]



Figur 5.5 – Sant- og skjærdeformert synkmål [15]



Figur 5.6 – Avlesningsmetode for synkmål [15]

#### 5.4.2 Densitet

Måling av den ferske betongens densitet blir foretatt i samsvar med NS-EN 12350-6:2000. En vanntett beholder med kjent volum og masse blir fylt med betong i 2 lag og komprimert med 25 støt slik at betongen fyller beholderen opp til kanten. Beholderen blir deretter veid og avlest, og beholderens vekt med betong blir dividert på beholderens volum. Lettbetongens ferske densitet blir beregnet etter formel 4.1. [16]

$$D = \frac{m_{tot} - m_b}{V_b} \quad (5.1)$$

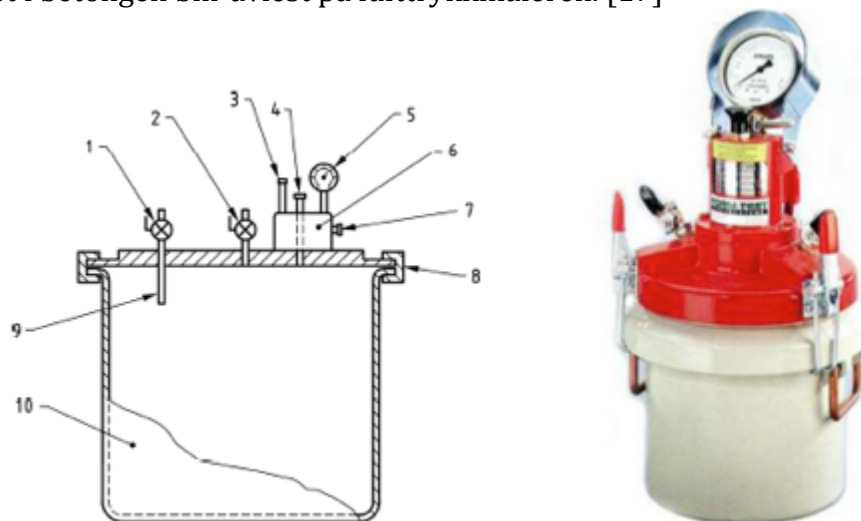
hvor:

- D - densitet [ $kg/m^3$ ]
- $m_{tot}$  - beholderens totale masse m./ lettbetong [kg]
- $m_b$  - beholderens masse u./ lettbetong [kg]
- $V_b$  - beholderens totale volum [liter]



### 5.4.3 Luftinnhold

Metoden som benyttes for å måle luftinnholdet i lettbetongen kalles "trykk-gauge metoden", og gjennomføres og måles i samsvar med NS-EN 12350-7:2000. Apparatet som er vist i figur 5.7 blir fylt med betong i 3 lag, hvor hvert lag stemples 25 ganger med komprimeringstang. Apparatet blir så rengjort grundig rundt kantene slik at all betong og smuss blir fjernet før lokket settes på. Ved hjelp av en flaske blir det sprutet vann inn i ventil A frem til det pipler ut av ventil B, før det blir pumpet luft inn i beholderen og stabilisert til måleapparatets startpunkt. Hovedventilen blir til slutt åpnet og luftinnholdet i betongen blir avlest på luftrykkmåleren. [17]



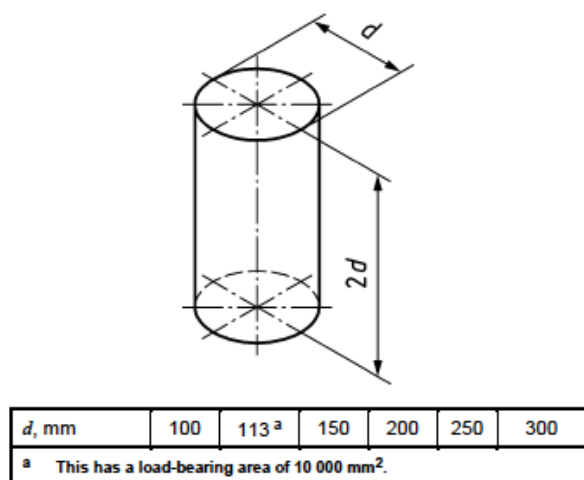
Figur 5.7 – Luftinnhold måler ved bruk av trykk-gauge metoden [17]

hvor:

- |   |                   |    |                                  |
|---|-------------------|----|----------------------------------|
| 1 | - Ventil A        | 6  | - Luftkammer                     |
| 2 | - Ventil B        | 7  | - Avtappingsventil for luft      |
| 3 | - Pumpe           | 8  | - Klemme                         |
| 4 | - Hovedluftventil | 9  | - Forlengingsrør for kalibrering |
| 5 | - Trykkmåler      | 10 | - Beholder                       |

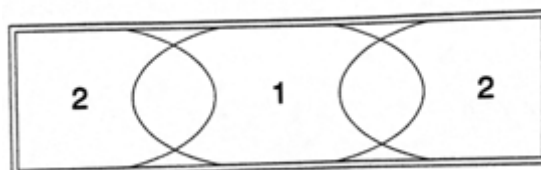
## 5.5 Utstøping av prøvestykker

For å undersøke sylindertykkfasthet, spaltestrekkfasthet og arbeidsdiagram trykk, se kapittel 5.6, blir det totalt utstøpt 9 sylindere (150x300mm) per serie. Hver sylinder blir utstøpt i 3 lag hvor hvert lag tilsvarer ca. 1/3 av sylindere, og lagene blir komprimert med 25 støt med samme fremgangsmåte som nevnt i 5.4.1. Sylindere blir også dunket med gummihammer for å motvirke utskilling av fiber og at fiberen legger seg på linje, samt forsikre seg om at sylindere får en fin overflate. Etter utstøping blir sylindere tildekket med lokk og lagret på laboratoriet i ca. 24 timer før de blir avformet og lagt til lagring i et vannbad frem til prøving. [19]

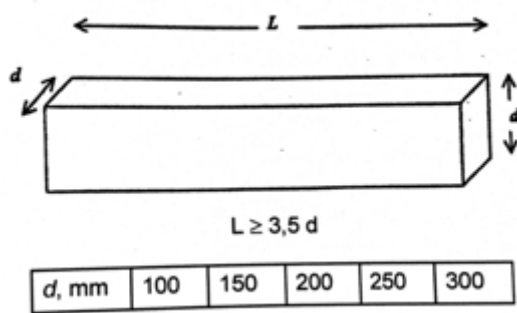


Figur 5.8 – Nominell størrelse på sylindere [18] og sylindere i vannbad

I tillegg til sylindere støpes det 4 bjelker (150x150x550mm) for hver serie for bestemmelse av bøyestrekfasthet og strekktesting. 2 bjelker testes for bøyestrekfasthet og 2 bjelker blir innstøpt med anker for strekktesting, se kapittel 5.7. Bjelkene blir utstøpt i henhold til NS-EN 14651 sin utførelse, se figur 5.9. Område 1 og 2 blir fylt med betong til om lag 90% av formhøyden før den blir komprimert. Formen blir så toppet og jevnet ut kant i kant med formen samtidig som den blir komprimert. Bjelkene blir dekket til med plast og avformet etter ca. 24 timer før de blir lagret på laboratoriet, dekket til med plast og vannet med jevne mellomrom frem til prøvetidspunkt. [14]

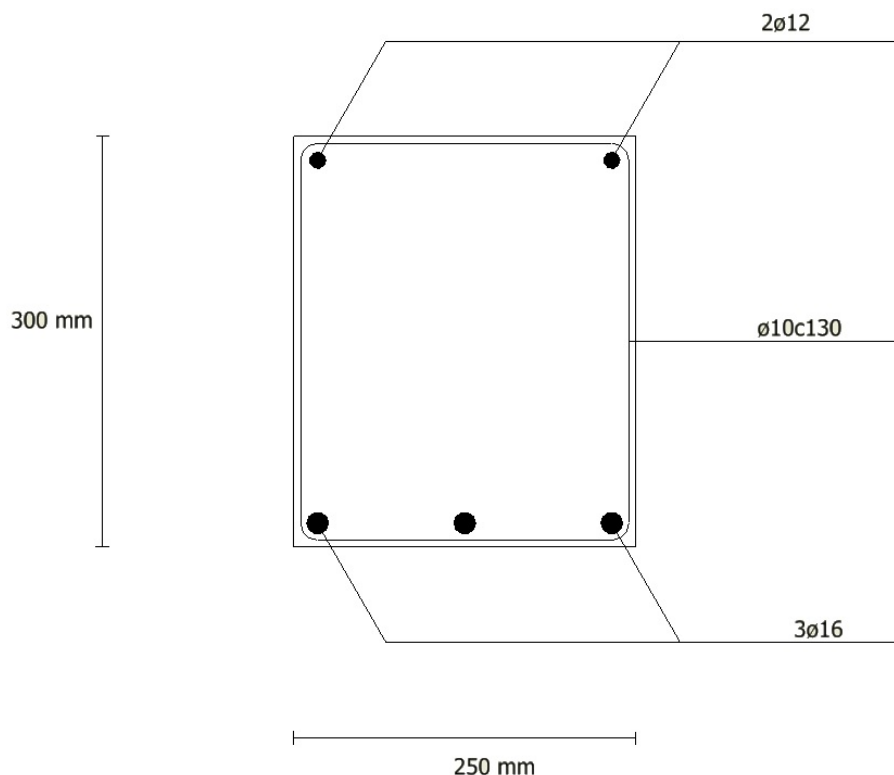


Figur 5.9 – Støpeprosedyre for bjelker [14]



Figur 5.10 – Nominell størrelse for test bjelker [18] og bjelkeform

For å se på rissutvikling og bruddlast skal det også støpes ut en fullskala bjelke (250x300x2200mm) for hver serie. For å oppta strekkrefter blir bjelkene armert med 2 $\phi$ 12 i OK, 3 $\phi$ 16 i UK og  $\phi$ 10 bøylar c130mm, se figur 5.11 og kapittel 5.9.1. Når det kommer til utstøping av bjelker har utførelsen stor innflytelse på kvaliteten til sluttproduktet. Bjelkene blir derfor lagvis utstøpt med jevn støpefront og komprimeres underveis med vibrator for å oppnå best mulig resultat. I tillegg blir det støpt inn et heisefeste slik at det er enklere å flytte på bjelkene etter at de er herdet. Bjelkene blir avformet etter ca. 24 timer og lagret på laboratoriet hvor de blir vannet regelmessig frem til de skal prøves.



Figur 5.11 – Armert bjelketverrsnitt



Figur 5.12 – Bjelke form med armering og ferdig utstøpt til høyre

## 5.6 Prøving av herdet betong

For betongkonstruksjoner er det en forutsetning at disse tåler de belastningene de er bygd for over den planlagte levetiden, og det stilles strenge krav til bestandighet og styrke ved konstruksjonene. Det neste avsnittet tar dermed for seg de viktigste egenskapene som trengs å vite om lettbetongen, og hvordan disse bestemmes. Samtlige prøver er gjennomført i henhold til "Prøving av herdet betong", NS-EN 12390-1/7:2002, sine retningslinjer.

### 5.6.1 Sylindertykkfasthet

For å undersøke trykkfastheten til lettbetongen er dette utført i samsvar med NS-EN 12390-3:2002. Før sylindere blir plassert i prøvingsmaskinen er det viktig at all fukt og smuss blir fjernet, og alle løse legemer fjernes. Prøvelegemet blir sentrert i maskinen og en konstant hastighet for spenningsøkning blir satt til 0,5 MPa/s. [20] Største last blir avlest og trykkfastheten fremkommer av formel 5.2, og omgjort til nærmeste 0,5 MPa.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5.2)$$

hvor:

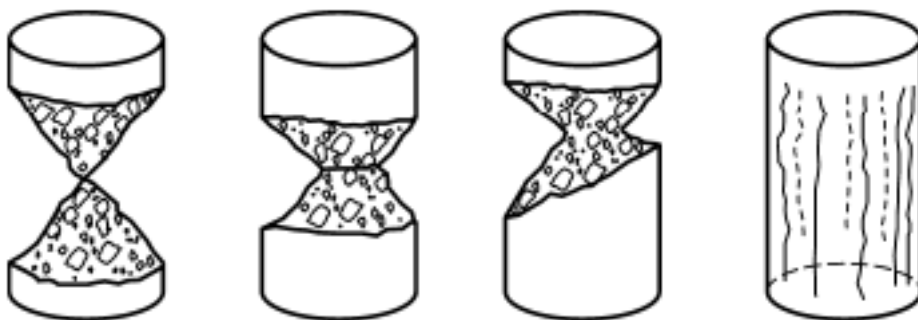
$f_c$  - trykkfasthet [MPa]

$F$  - bruddlast [N]

$A_c$  - tverrsnittarealet til prøvelegemet hvor trykkraften virker [ $mm^2$ ]



Figur 5.13 – Bruddform for LWAC-ref etter trykkfasthet prøving



Figur 5.14 – Oversikt over tilfredsstillende bruddform ved sylinder [20]

### 5.6.2 Spaltestrekkfasthet

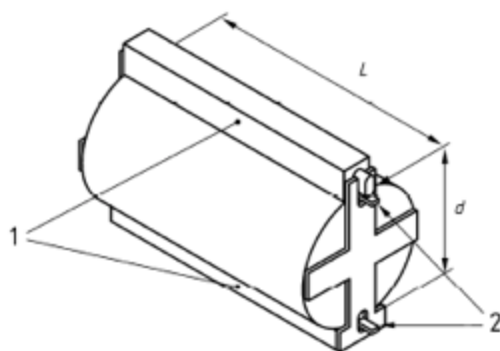
Ved utførelse av spaltestrekkfasthet blir forsøket utført i samsvar med NS-EN-12390-6:2001. Prøvelegemets overflate blir tørket for fukt og smuss og det blir undersøkt om mellomleggslisterne (2), se figur 5.15, er intakte før det blir plassert i prøvingsjiggen. Prøvingsjiggen blir plassert sentrisk i prøvingsmaskinen og belastningshastigheten blir satt til 3,5 MPa/s, før lasten blir påført frem til brudd. Spaltestrekkfastheten kan dermed beregnes ut ifra formel 5.3. [21]

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (5.3)$$

hvor:

- $f_{ct}$  - spaltestrekkfasthet [ $N/mm^2$ ]
- $F$  - bruddlast [N]
- $L$  - prøvesylinderens lengde [mm]
- $d$  - prøvesylinderens diameter [mm]

Spaltestrekkfastheten blir avrundet til nærmeste  $0,05 N/mm^2$ .



Figur 5.15 – Jigg for innfestning av sylinder [21]



Figur 5.16 – Spaltestrekkforsøk av LWAC uten fiber til venstre og med stålfiber til høyre.

### 5.6.3 Arbeidsdiagram - trykk

For å få en forståelse av hvordan sylindrene oppfører seg etter brudd blir, det foretatt en trykkprøving for sylindrene hvor de blir påført last etter brudd og frem til en bestemt deformasjon. Det vil da være mulig å se hvordan fiberen opptar trykkreftene i betongen etter brudd samt å finne elastitetsmodulen til lettbetongen. Sylindrene blir rengjort og tørket, før område hvor strekkklappen skal festes blir pusset ned med sandpapir for å få en jevn overflate. Strekkklappen blir så limt på betongsylindringen og sylindringen blir sentrert i prøvingsmaskinen, se figur 5.17. Det blir valgt en jevn trykkøkningens hastighet på 0,5 mm/s og det blir bestemt at sylindringen blir trykktestet frem til en deformasjon på 5mm er nådd. Grunnen til at prøven blir stoppet etter 5mm er fordi da er sylindringen risset opp og strekkklappen vil ikke kunne registrere mer reelle data. Strekkklappen vil bare måle reelle data frem til sylindringen går i brudd, så for å finne arbeidsdiagram trykk må dataene fra trykkmaskinen kombineres med dataene fra strekkklapp. Ut ifra dataene fra strekkklappen og arbeidsdiagrammet kan en finne E-modulen ved bruk av formel 5.4.

$$E_{lcm} = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_{c1}} \quad (5.4)$$

hvor:

- $E_{lcm}$  - Elastitesmodul [GPa]
- $f_{cm}$  - trykkfasthet ved brudd [MPa]
- $\varepsilon_{c1}$  - tøyning ved brudd [ $\mu m/mm$ ]



Figur 5.17 – Sylinder med strekkklapp etter endt prøving

## 5.7 Bøyestrekfasthet

For å bestemme bøyestrekfastheten til lettbetong prøvene blir dette gjennomført som nevnt i 3.1.1 og i samsvar med NS-EN-14651:2005+A1:2007. [14] De standardiserte prøvebjelkene får skjært en slisse i senter av bjelken på 25mm slik at høyden på bjelkene,  $h_{sp}$ , blir i henhold til standard og bruddet blir kontrollert til en kjent posisjon. Prøveelementene blir så plassert på prøvingsjiggen slik at slissen er like over lastposisjon, se figur 5.19. I henhold til prøvingsstandarden skal nedbøyningshastigheten være kontrollert i forhold til veksthastigheten til CMOD, hvor den skal være 0,05mm/min frem til CMOD=0,1mm og 0,2mm/min etter dette. Dersom prøvingsmaskinen ikke kan styres mtp. veksthastigheten til CMOD, sier NS-EN 14651 at forholdet mellom CMOD og nedbøyning skal kontrolleres ved følgende antakelse:

$$\delta = 0,85 \cdot CMOD + 0,04 \quad (5.5)$$

hvor:

$\delta$  - nedbøyning [mm]

NS-EN 14651 har satt opp følgende forhold mellom CMOD og nedbøyning istedenfor bruk av formel 5.5:

Tabell 5.3 – Forhold CMOD og  $\delta$  [14]

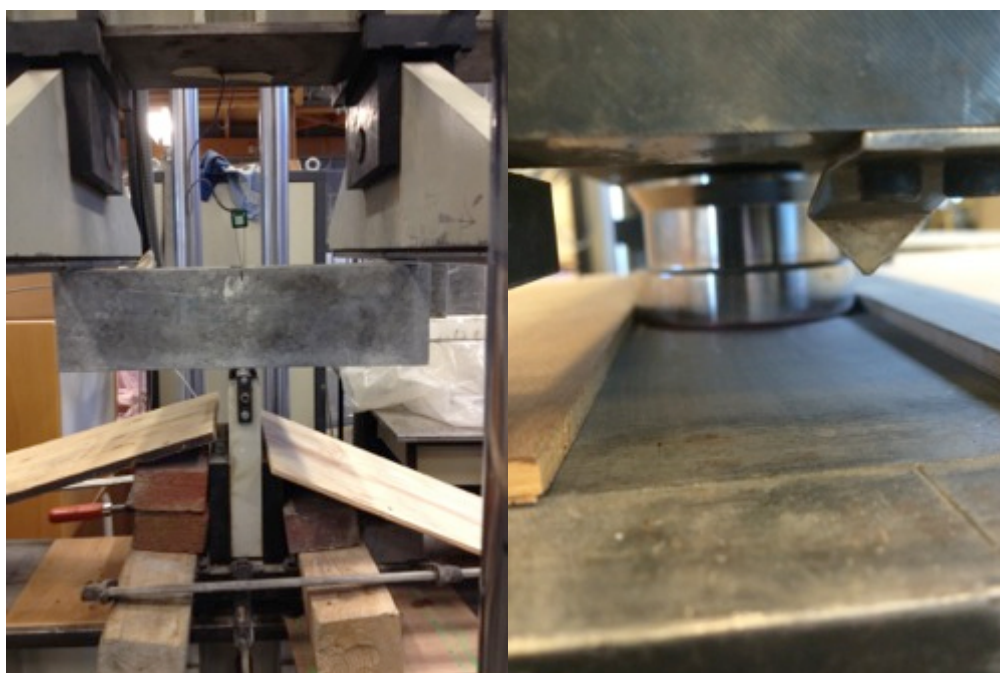
CMOD [mm]	$\delta$ [mm]
0,05	0,08
0,1	0,13
0,2	0,21
0,5	0,47
1,5	1,32
2,5	2,17
3,5	3,02
4,0	3,44

Prøvingsmaskinen på laboratoriet kan ikke kontrolleres med tanke på veksthastigheten til CMOD slik standarden sier. Lastpåføring blir dermed kontrollert gjennom nedbøyning og CMOD forholdet fra tabell 5.3 og hastigheten blir satt til 0,1mm/min for bjelkene hvor det ikke inneholder fiberarmering, og 0,21mm/min for prøvebjelkene hvor det inneholder fiber. Dette blir gjort i antakelse av at referanse bjelkene vil tåle en mindre nedbøyning enn de fiberarmerte bjelkene før brudd, og for fortsatt å opprettholde flere målinger rundt bruddet.





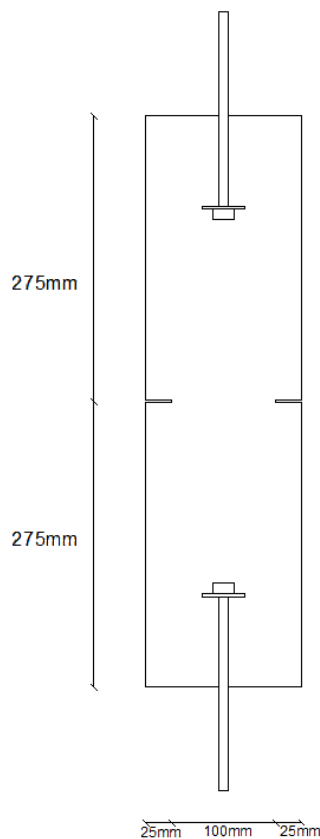
Figur 5.18 – Festeinnretning clip gauge t.v. og innfestet clip gauge på bjelke t.h.



Figur 5.19 – Opplager for bjelke til venstre og lastcelle under opplager til høyre

## 5.8 Arbeidsdiagram - strekk

Bjelkene som prøves under strekk har samme dimensjon som de standardiserte bjelkene som blir brukt under bøyestrekkefasthet prøven (150x150x550mm), men bjelkene har et innstøpt anker i hver ende slik at det finnes et festepunkt til strekkmaskinen, se figur 5.20. Ut fra strekkprøven ønskes det å undersøke hvordan lettbetongen reagerer når den blir utsatt for direkte strekk, samt strekkfastheten endres ved bruk av fiber. Prøvebjelkene får skjært en slisse på 25mm inn på hver side på midten av bjelken slik at tverrsnittet her er 100x100mm, se figur 5.20. Denne reduseringen av tverrsnittet blir foretatt for å forsikre seg om at bruddet oppstår midt i prøvestykket og for ikke å risikere at det vil oppstå kjeglebrudd i området rundt de innstøpte ankerene.

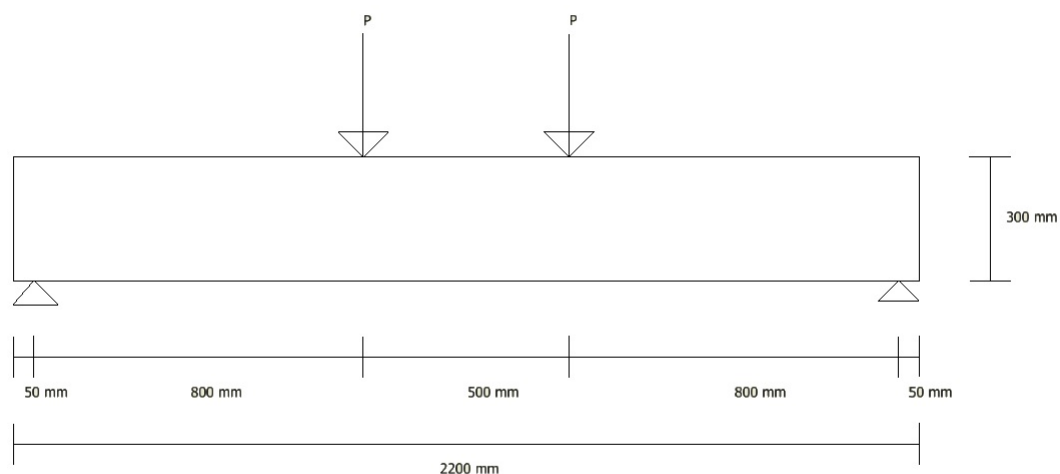


Figur 5.20 – Strekkbjelke med mål til høyre og innfestet bjelke i strekkmaskinen

Strekkmaskinen er deformasjonsstyrt og deformasjonshastigheten blir bestemt til 0,05 mm/min. For å se hvordan den fiberarmerte lettbetongen opptar strekkraftene også etter brudd blir det bestemt at det avleses verdier fram til en deformasjon på 7mm. Ved å vurdere resultatet i arbeidsdiagrammet for strekkprøven vil det være mulig å finne blant annet strekkfastheten, samt se den forskjellige oppførselen til fiberen ved ulik dosering.

## 5.9 Prøving av store bjelker

For å undersøke rissutvikling i lettbetong med forskjellige fiberdoseringer blir dette foretatt ved å undersøke de store bjelkene under jevn lastpåføring. Bjelkene blir plassert i testmaskinen hvor de blir symmetrisk belastet over to punktlaster, se figur 5.21, 800mm fra hver opplager, og det blir bestemt at det skal benyttes en jevn lastøkning på 0,1 kN/s under hele testforløpet. For hver 10.kN blir nye riss eller rissutvidelser markert med eksisterende last, slik at rissutviklingen blir merket helt frem til bjelken går i brudd.



Figur 5.21 – Opplagt bjelke med mål



Figur 5.22 – Testjigg med plassert bjelke

### 5.9.1 Beregning av minimumsarmering

I henhold til kapittel 4.4.2 blir det benyttet minimumsarmering fra formel 4.40:

Ønskelig betongtrykkfasthet er 50 MPa, og vi får da følgende verdier:

$$f_{ctm} = 4,8 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yk} = 434 \text{ N/mm}^2$$

$$b_t = 250 \text{ mm}$$

$$d = h - c - \frac{\phi_h}{2} - \phi_b = 257 \text{ mm}$$

$$A_{s,min} = \frac{0,26 \cdot b_t \cdot d \cdot f_{ctm}}{f_{yk}} = 192,2 \text{ mm}^2 \geq 0,0013 b_t \cdot d = 83,5 \text{ mm}^2$$

Velger 3Ø16 UK  $\rightarrow A_s = 603 \text{ mm}^2$

### 5.9.2 Beregning av risslast og bruddlast for lettbetong

Risslast og rissmoment blir beregnet i henhold til kapittel 4.2.2 og det blir benyttet en trykkfasthet,  $f_{ck}=50$  MPa og en antatt E-modul på 20 GPa.

For å finne nøytralaksen til betongtverrsnittet blir formel 4.21 benyttet, hvor:

$$A_s = 603 \text{ mm}^2$$

$$A_c = 75\,000 \text{ mm}^2$$

$$\eta = \frac{E_{sk}}{E_{lcm}} = \frac{200 \text{ GPa}}{20 \text{ GPa}} = 10$$

$$\alpha d = \frac{A_c \cdot 0,5h + \eta A_s \cdot d}{(A_c + \eta A_s)} = \underline{158 \text{ mm}}$$

Videre blir arealmomentet til betongtverrsnittet og armeringen, samt bøyestivheten til det uopprissede betongtverrsnittet:

$$I_{cl} = \frac{bh^3}{12} + bh \cdot (\alpha d - 0,5h)^2 = \underline{567,3 \cdot 10^6 \text{ mm}^4}$$

$$I_{sl} = A_s (d - \alpha d)^2 = \underline{5,91 \cdot 10^6 \text{ mm}^4}$$

$$E_{lc} \cdot (I_{cl} + \eta I_{sl}) = \underline{1,253 \cdot 10^{13}}$$

Til slutt finner vi rissmoment og risslast fra formel 4.29 og 4.30:

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{(I_{cl} + \eta I_{sl})}{h - \alpha d} = \underline{21,17 \text{ kNm}}$$

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot M_{cr}}{a} = \underline{52,9 \text{ kN}}$$

For å beregne bjelkens bruddkapasitet må momentkapasiteten bestemmes i henhold til kapittel 4.1.2.2:

For å se hvilken formel for momentkapasitet som skal benyttes må vi først undersøke om tverrsnittet er underarmert.

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{lcu2} = 0,0035 \cdot \eta_1$$

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6 \frac{\rho}{2200} = 0,959$$

hvor  $\rho = 2050 \text{ kg/m}^3$  iht. Tabell 11.1 i EC2

$$\alpha_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} = 0,4016$$

Antar sylindertrykkfasthet på 50 MPa, dimensjonerende trykkfasthet blir da:

$$f_{cd} = \frac{0,85 \cdot 50}{1,5} = \underline{28,4 \text{ MPa}}$$

$$A_{s,b} = \lambda \cdot \eta \frac{f_{cd}}{f_{yd}} b \cdot d \cdot \alpha_b = 1346 \text{ mm}^2 \geq A_s = 603 \text{ mm}^2$$

Betongverrsnittet er underarmert og vi må benytte formel 4.10 for å finne momentkapasiteten:

$$\alpha = \frac{f_{yd} \cdot A_s}{\lambda \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d} = \underline{0,18}$$

$$M_{Rd} = \lambda \cdot \eta \cdot \alpha (1 - 0,5 \lambda \cdot \alpha) f_{cd} \cdot b \cdot d^2 = \underline{62,4 \text{ kNm}}$$

$$P_{Rd} = \frac{2 \cdot M_{Rd}}{a} = \underline{156 \text{ kN}}$$

Forventet risslast for bjelken er 52,9 kN og det er forventet at bjelken vil gå til brudd ved 156 kN.

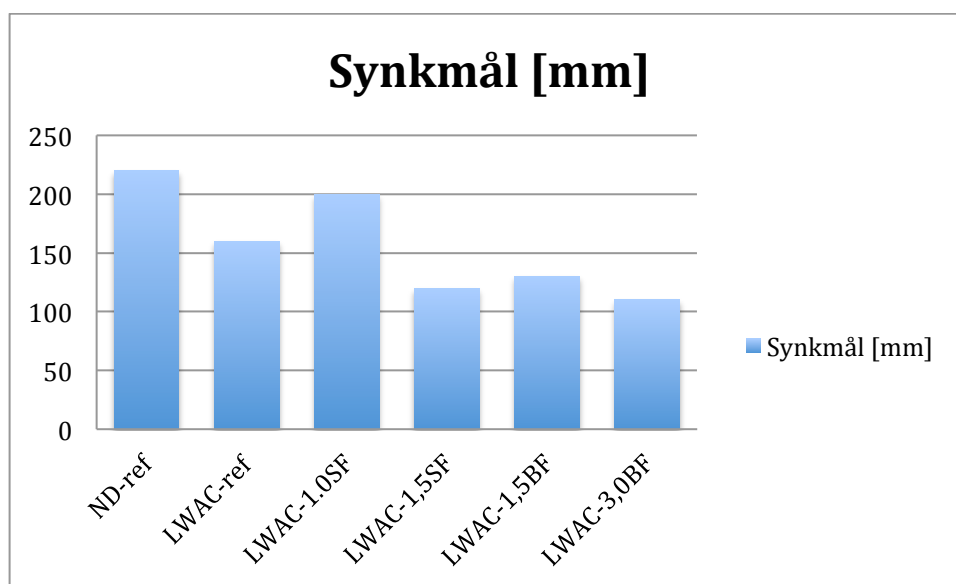
## 6.0 Prøveresultater og diskusjon

### 6.1 Resultater fersk betong

Tabell 6.1 – Prøveresultater for fersk betong

Serie navn	Synkmål [mm]	Luftinnhold [%]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Støpe dato
ND-ref	220	1,6	2456	11.02.2014
LWAC-ref	160	2,5	2056	13.02.2014
LWAC-1,0SF	200	2,1	2134	19.02.2014
LWAC-1,5SF	120	1,8	2190	20.02.2014
LWAC-1,5BF	130	1,5	2083	12.03.2014
LWAC-3,0BF	110	1,4	2112	13.03.2014

#### 6.1.1 Synkmål

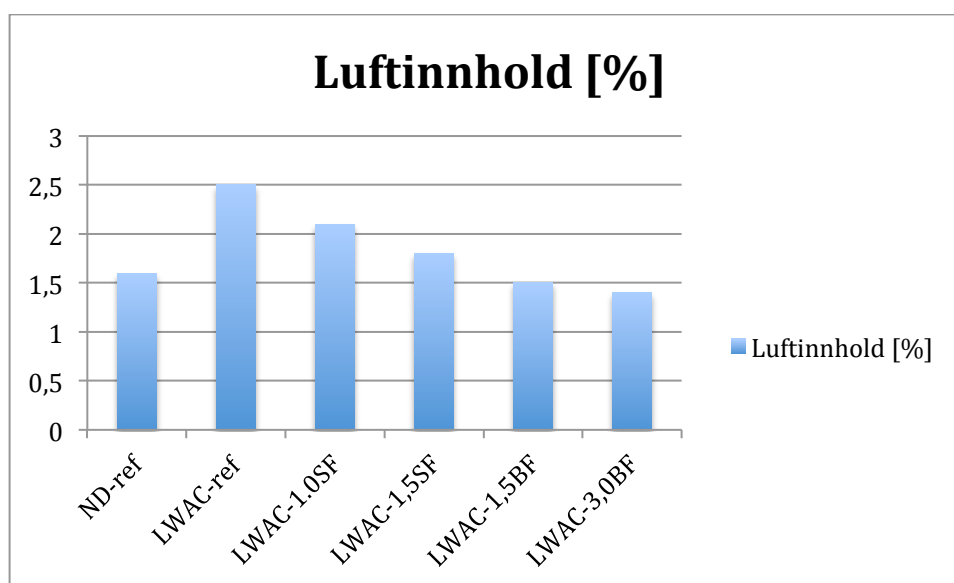


Figur 6.1 – Synkmål

På forhånd av de eksperimentelle forsøkene er det ønsket å oppnå et synkmål på om lag 200 mm og som en ser fra figur 6.1 er det stor variasjon på synkmålet på de forskjellige seriene. Fuktinnholdet i sanden blir målt før hver blanding og det blir gjort forsøk på å blande sand fra forskjellige nivåer i siloen for å få riktig resultat. Fukt i det porøse letttilslaget kan også ha være en påvirkende faktor i og med at dette var lagret ute uten at å være dekket til. Det blir gjort forsøk på å finne dette på forhånd av støpingen, men ut ifra metoden som blir brukt blir fuktinnholdet i de porøse lecaporene vanskelig å avgjøre. Resultatet blir allikevel tatt i betraktning og fuktinnholdet blir henholdsvis satt

til ca. 1% for lett tilslaget og 2-4% for sanden ved proporsjonering, noe som kan ha innvirkning på synkmålet samt være med å påvirke betongens v/c-tall dersom det har vært avvik i forhold til dette. Bruk av SP-stoff blir variert ut ifra hvor støpelig betongblandingen ble vurdert under miksing. Det blir henholdsvis brukt 1% SP-stoff på referanse seriene og prøvene hvor det er 1,0% fiber, mens det blir brukt 2% SP-stoff på seriene med 1,5% og 3,0% fiber. En ser fra resultatene at med 1% SP er gjennomsnittlig synkmål 190mm, mens ved bruk av 2% SP-stoff er gjennomsnittlig synkmål på 120mm. Dette tyder på at hovedårsaken til det varierende synkmålet skyldes økende bruk av fiberarmering. Selv om synkmålet er såpass varierende og bruken av SP-stoff blir variert for de forskjellige seriene, oppstod det ingen separasjon og betongsammensetningen var veldig støpelig og god å jobbe med under utstøping.

### 6.1.2 Luftinnhold

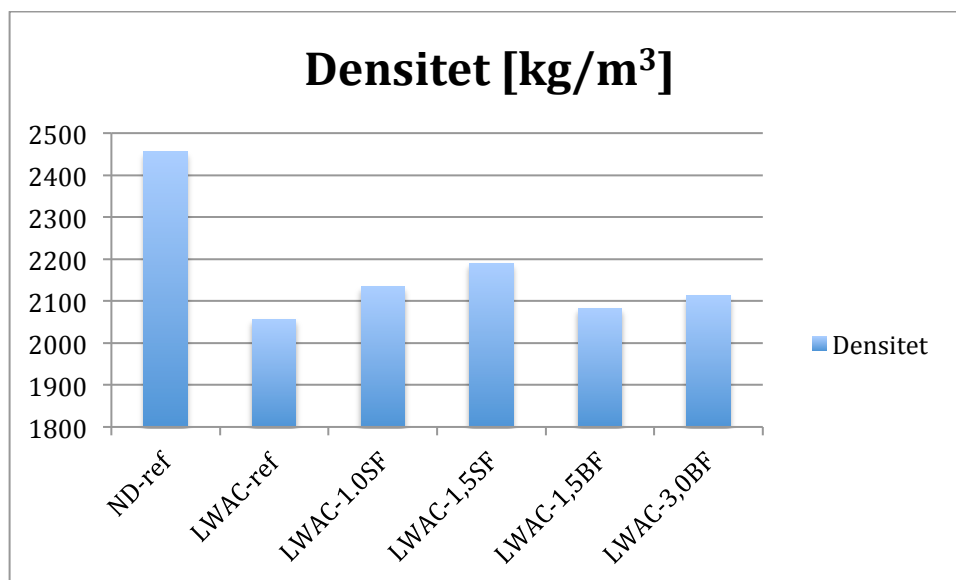


Figur 6.2 – Luftinnhold

Luftinnholdet i betongen er som figur 6.2 viser variabelt og det er et stort spenn i mellom de forskjellige seriene. Det er ikke satt noe krav til luftinnhold på forhånd av de eksperimentelle forsøkene, men forventningene er at luftinnholdet skal være forholdsvis stabilt. Det er brukt samme betongresept på alle LWAC-seriene og fiberarmering skal normalt ikke ha noen innvirkning på luftinnholdet. Resultatene viser derimot at luftinnholdet er avtakende med økt mengde fiber, noe som viser at fiberinnholdet har hatt en innvirkning på luften i betongen.



### 6.1.3 Densitet



Figur 6.3 – Densitet

Som nevnt i kapittel 2.3.1 er det vanskelig å få densitet på under  $2000 \text{ kg/m}^3$  i lettbetong når det er brukt naturlig sand som i dette prosjektet, så det var på forhånd beregnet at en densitet under dette er vanskelig å oppnå. Densiteten til alle lettbetongseriene er i et område i overkant av  $2000 \text{ kg/m}^3$  hvor det bare skiler  $134 \text{ kg/m}^3$  fra den med minst densitet til den med størst. Dette viser at lettbetongseriene er relativt stabile seg imellom og sees på som positivt. Densiteten til den høfaste normalbetongen er  $2456 \text{ kg/m}^3$ , noe som er som antatt i og med at denne inneholder tilslag med mye høyere egenvekt enn lecaklinkeren. Ser en på densiteten til lettbetongen i forhold til luftinnholdet ser vi at LWAC-ref hvor det er høyest luftinnhold, har også lavest densitet. Dette er i sammenheng ettersom jo flere luftporer det er i betongen, jo mindre plass vil det være til betong og densiteten vil avta. Sammenhengen mellom luft og densitet følges på alle LWAC-seriene og vi ser at ved avtakende luftinnhold vil densiteten til den ferske betongen øke. Når det kommer til differanse av densitet med tanke på fibertilsetning vil dette ha en innvirkning, men i liten grad. Serien det ble brukt størst masse fiber er LWAC-1,5SF hvor det er her brukt  $117 \text{ kg/m}^3$  stålfiber, se vedlegg A. Sammenligner vi denne med LWAC-ref hvor det ikke er brukt noe fiber skal det i henhold til proporsjoneringen være en økning på densiteten med  $85 \text{ kg}$ , mens det i virkeligheten er  $134 \text{ kg}$ . Tar vi i også differansen av luftinnholdet i betraktning vil vi se at resultatene av den ferske densiteten stemmer bra overens.

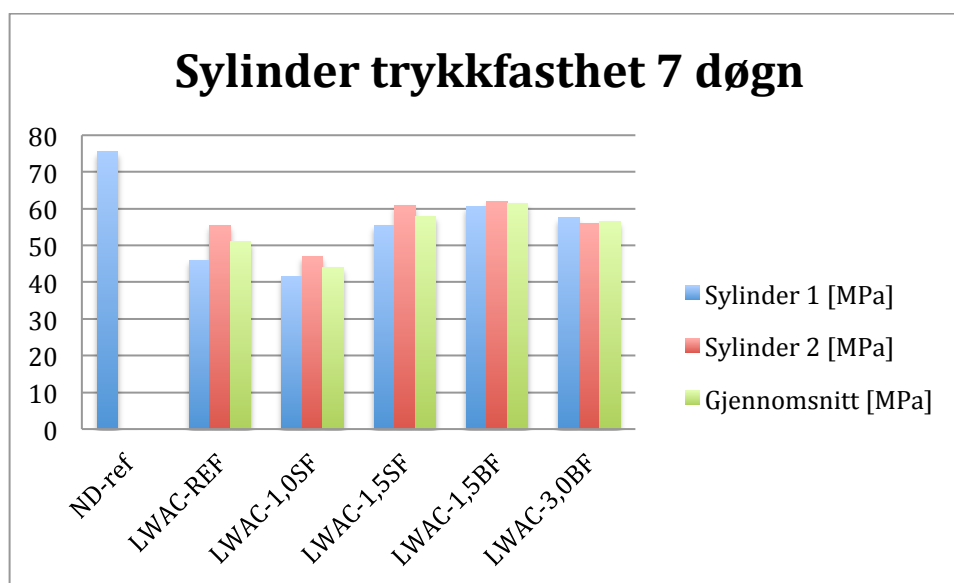
## 6.2 Testresultater av herdet betong

### 6.2.1 Sylindertykkfasthet

Tabell 6.2 – Sylindrefasthet 7 døgn

Serie navn	Maks trykk sylinder 1 [MPa]	Maks trykk sylinder 2 [MPa]	Gjennomsnitt [MPa]	Kapasitet ift. LWAC-ref [%]
ND-ref *	75,5	-	75,5	
LWAC-ref	46	55,5	51	-
LWAC-1,0SF	41,5	47	44	87
LWAC-1,5SF	55,5	61	58	115
LWAC-1,5BF	60,5	62	61,5	121
LWAC-3,0BF	57,5	56	56,5	112

\*Ble utstøpt terninger i ND-ref. Terningsfastheten er om kalkulert til sylindrefasthet



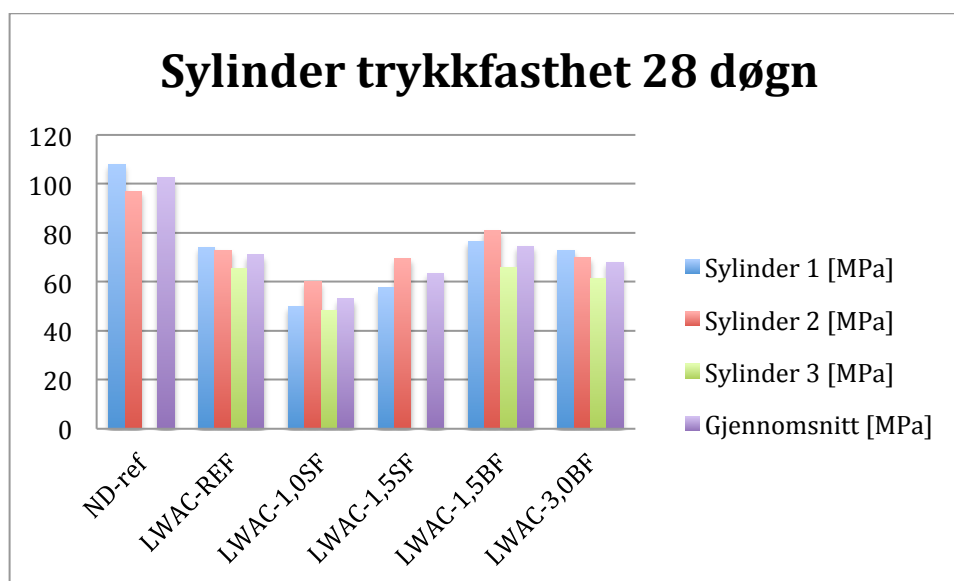
Figur 6.4 – Sylindrefasthet 7 døgn

Det er ønskelig å oppnå en lettbetong med sylindrefasthet på om lag 50 MPa, og allerede etter 7 døgns herding er dette oppnådd på alle utenom LWAC-1,0SF. Som forventet er det ND-ref som oppnår høyest trykkfasthet etter 7 døgn med 75,5 MPa, mens for lettbetongene er det LWAC-1,5BF som oppnår høyest fasthet med 61,5 MPa. Den andre serien med basaltfiber, LWAC-3,0BF, har en 7 døgnsfasthet på 56,5 MPa noe som er 12% bedre enn LWAC-ref på 51 MPa. Lettbetongen hvor det er brukt 1,0% stålfiber, LWAC-1,0SF, ser vi har en lav fasthet i forhold til de andre seriene med bare 44 MPa. Ses dette på i kombinasjon med synkmålet ser vi at LWAC-1,0SF er den lettbetongen med høyest slump, og fuktinnholdet i tilslaget er trolig med på å bidra til et høyere v/c-tall og dermed påvirke fastheten.

Tabell 6.3 – Sylindrefasthet 28 døgn

Serie navn	Maks trykk sylinder 1 [MPa]	Maks trykk sylinder 2 [MPa]	Maks trykk sylinder 3 [MPa]	Gjennomsnitt [MPa]	Kapasitet ift. LWAC- ref. [%]
ND-ref *	108	97	-	102,5	
LWAC-ref	74	73	65,5	71	-
LWAC-1,0SF	50	60	48,5	53	74,7
LWAC-1,5SF	57,5	69,5	-	63,5	90
LWAC-1,5BF	76,5	81	66	74,5	105,1
LWAC-3,0BF	73	70	61,5	68	96

\*Ble utstøpt terninger i ND-ref, terningsfastheten er om kalkulert til sylindrefasthet



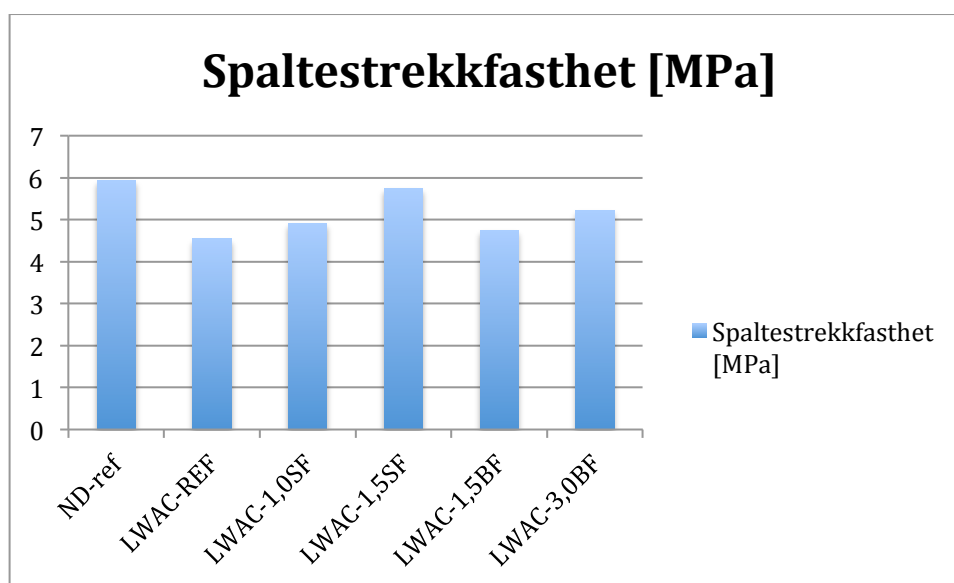
Figur 6.5 – Sylinder trykkfasthet 28 døgn

Ved tilsetning av fiberarmering i betongblandingen skal dette ikke ha noen videre innvirkning på trykkfastheten. Forskjellen under trykkfasthetprøving vil være at betongen bare vil sprekke opp og ikke knuses pga. fiberen vil holde betongen sammen. Som vi ser fra resultatene oppnår samtlige lettbetongserier en sylindertykkfasthet > 50 MPa, noe som er definisjonen på høyfast lettbetong og som i tillegg er innenfor ønsket område. LWAC-1,5BF oppnår den høyeste 28 døgnstrykkfastheten på 74,5 MPa, det var også denne som hadde høyest fasthet etter 7 døgn så herdeprosessen har fulgt riktig progresjon. Referanse serien for lettebetong nådde en sluttfasthet på 71 MPa etter 28 døgn noe som er en økning på 28% fra 7 døgnfastheten. Dette viser til at "tommelfingeregelen" om at betongen skal ha nådd ca. 75% av 28 døgnfastheten etter 7 døgn stemmer. Videre ser vi at det LWAC-1,0SF er den lettbetongen med lavest 28 døgn sylindertykkfasthet, noe som også er tilfelle etter 7 døgn. Denne serien har også et forholdsvis høyt luftinnhold i forhold til de andre seriene, og sees dette i sammenheng med fuktforhold i tilslaget er det trolig dette som har vært med på å påvirke den lave trykkfastheten i betongen.

## 6.2.2 Spaltestrekkfasthet

Tabell 6.4 – Spaltestrekkfasthet

Serie navn	Maks last sylinder 1 [kN]	Maks last sylinder 2 [kN]	Gj.snitt bruddlast [kN]	Gj.snitt spaltestrekk- fasthet [MPa]	Kapasitet ift. LWAC- ref. [%]
ND-ref	380,7	459,5	420,1	5,94	131
LWAC-ref	333,0	308,6	320,8	4,54	-
LWAC-1,0SF	358,5	337,7	348,1	4,92	108
LWAC-1,5SF	370,0	441,9	405,9	5,74	126
LWAC-1,5BF	323,5	348,4	335,9	4,75	105
LWAC-3,0BF	371,4	366,3	368,8	5,22	115



Figur 6.6 – Spaltestrekkfasthet 28 døgn

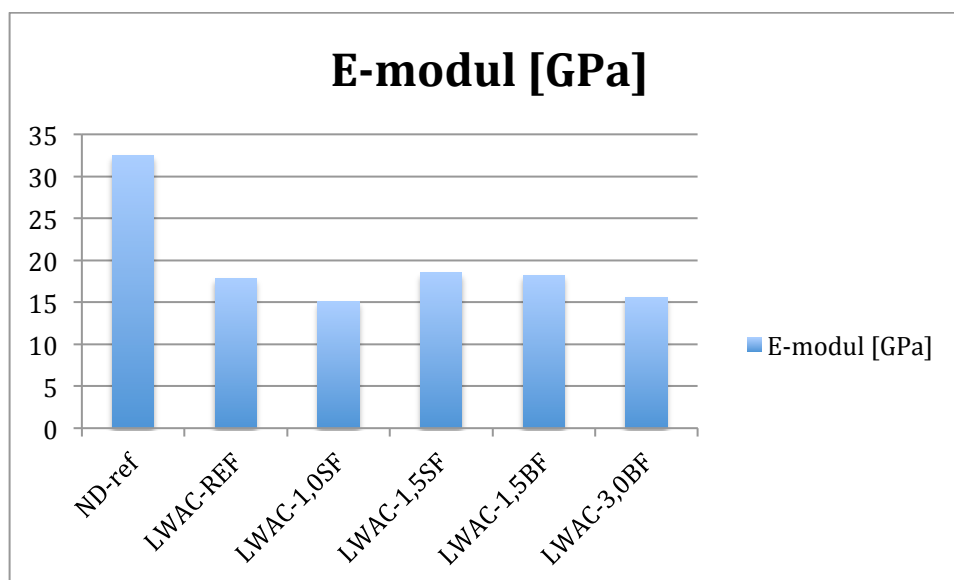
Ved bruk av fiberarmering i betong er det forventet at spaltestrekkfastheten skal øke. Samtlige serier som inneholder fiber får økt spaltestrekkfasthet og fiberen danner fiberbroer som holder betongen sammen, se figur 5.16. Forventet resultat av prøvestykkene er at spaltestrekkfastheten vil øke ettersom doseringen av fiber øker, noe resultatene viser. Fra figur 6.6 ser vi at spaltestrekkfastheten til LWAC-1,0SF øker med 0,38 MPa i forhold til LWAC-ref hvor det ikke er brukt noe fiber, og videre øker spaltestrekkfastheten til LWAC-1,5SF til 5,74 MPa når stålfiberdoseringen øker til 1,5%. Basaltfiberen, LWAC-1,5BF og LWAC-3,0BF, viser også vesentlig forbedring i forhold til LWAC-ref. I følge produsentene av basaltfiberen vil basaltfiberen gi mest utnyttelse ved stor dosering, noe LWAC-3,0BF viser med økning på 10% i forhold til LWAC-1,0SF og en spaltestrekkfasthet på 5,22 MPa. Serien hvor det er oppnådd høyest spaltestrekkfasthet er ND-ref, men dette er som forventet i og med at denne har en vesentlig høyere

trykkfasthet enn lettbetongen. Referanse seriene bekrefter også at ved ND-ref oppstår bruddet i sementpastaen og beveger seg rundt tilslaget, mens i LWAC-ref oppstår bruddet tvers igjennom tilslaget i og med at tilslaget normalt sett har en lavere fasthet enn sement pastaen.

### 6.2.3 Arbeidsdiagram - trykk

Tabell 6.5 – Resultater arbeidsdiagram trykk

Serie navn	Sylinder-trykkfasthet [MPa]	Brudd deformasjon [mm]	E-modul [GPa]	Brudd-tøyning, $\epsilon_{lcu}$ [‰]	Herdetid
ND-ref	100	0,92	32,5	3,08	50 døgn
LWAC-ref	76	1,28	17,8	4,28	48 døgn
LWAC-1,0SF	63,6	1,26	15,1	4,21	42 døgn
LWAC-1,5SF	77	1,25	18,5	4,17	43 døgn
LWAC-1,5BF	69,8	1,15	18,2	3,84	29 døgn
LWAC-3,0BF	62,9	1,21	15,6	4,04	28 døgn



Figur 6.7 – E-modul fra trykkprøving

Ved å påføre sylindere last etter brudd og fortsette trykkprøvingen ned til en bestemt deformasjon, er det ønskelig å få ut et arbeidsdiagram for trykkforløpet og dermed få en forståelse hvordan den fiberarmerte lettbetongen oppfører seg. Vi ser at sylindetrykkfasthet verdiene fra tabell 6.5 skiller seg ut fra resultatene i tabell 6.3, noe som skyldes at disse sylindere prøvene blir utsatt for trykkprøving etter en annerledes prosedyre. Ettersom strekkklappene ikke måler data etter sylindere når maks bruddlast må arbeidsdiagrammene fra trykkprøvingsmaskinen benyttes, mens deformasjonen i betongen blir registrert fra strekkklappen. Det er forventet at samtlige serier skal oppnå

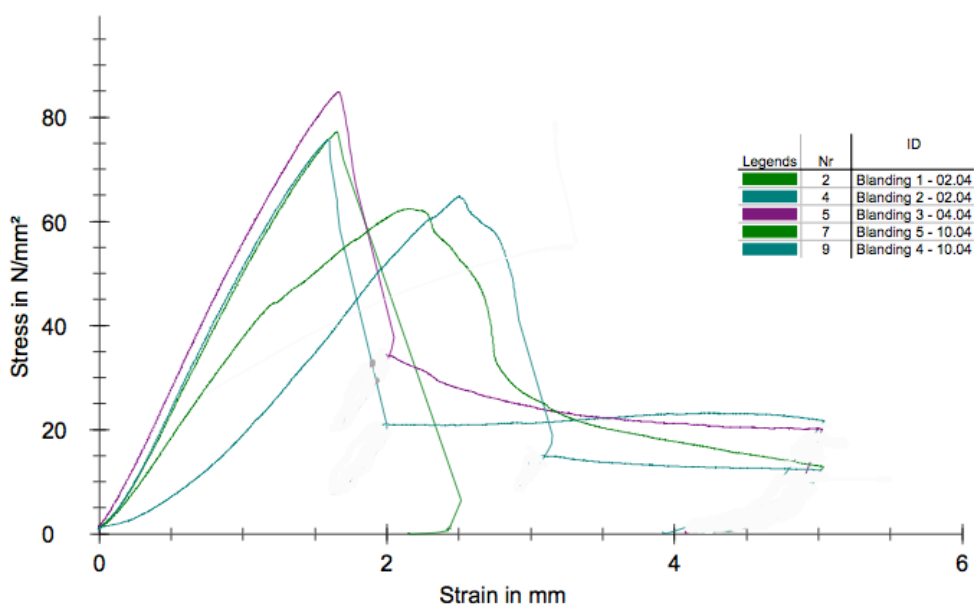
jevn E-modul, og at den variable herdetiden ikke skal ha noen vesentlig innvirkning på resultatet. Basert på erfaring fra litteratur er det forventet at fiberarmert lettbetong skal ha en E-modulen mellom 18-25 GPa, og fra resultatene i tabell 6.5 ser vi at det er noe avvik fra dette. LWAC-1,0SF og LWAC-3,0BF oppnår forholdsvis lave resultater, mens de andre seriene oppnår akseptable verdier og vi ser ingen effekt av fiber.

Bruddeformasjonen i lettbetongen viser svært jevne verdier hvor samtlige serier er gått til brudd ved en deformasjon på 1,15-1,28 mm og vi ser liten effekt av fiberarmeringen.

Tabell 6.6 – Målt og beregnet tøyingsverdier

	ND-ref	LWAC- ref	LWAC- 1,0SF	LWAC- 1,5SF	LWAC- 1,5BF	LWAC- 3,0BF
Målt bruddtøyning, $\epsilon_{l_{cu}}$ [%]	3,08	4,28	4,21	4,17	3,84	4,04
Beregnet spennings- tøyning, $\epsilon_{l_{cu}}$ [%]	2,67	2,32	2,06	2,25	2,36	2,30
Beregnet brudd- tøyning, $\epsilon_{l_{cu2}}$ [%]	2,60	2,53	3,12	2,65	2,51	2,57

Ved å ta for seg kapittel 3.1.4 og beregning av spennings- og bruddtøyningen, ser vi resultatene for de beregnede verdiene er noe lavere enn de målte verdiene fra trykkprøvingen. Det er viktig å presisere at dette er en grov tilnærming for å se på EC 2 sine tabell verdier i sammenligning med målte verdier. Lettbetong sylindrene som blir testet har en egenvekt på i overkant av 11,1 kg (ikke ovnstørr), noe som tilsier en tørrdensitet på om lag 2090 kg/m<sup>3</sup> og densitetsklasse 2 iht. tabell 11.1 i EC 2. Prøveresultatene fra tabell 6.6 vil ved tilnærmingen som er brukt bli sett på som akseptable resultater, hvor forskjellen fra målt- og beregnet verdi kan trekkes i sammenheng med sikkerhetsfaktorer. Vi ser at LWAC-seriene har en høyere bruddtøyning enn ND-ref, noe som kan skyldes at lettbetongen har vesentlig lavere E-modul og dermed tåler mer tøyning før brudd.



Figur 6.8 – Arbeidsdiagram trykk

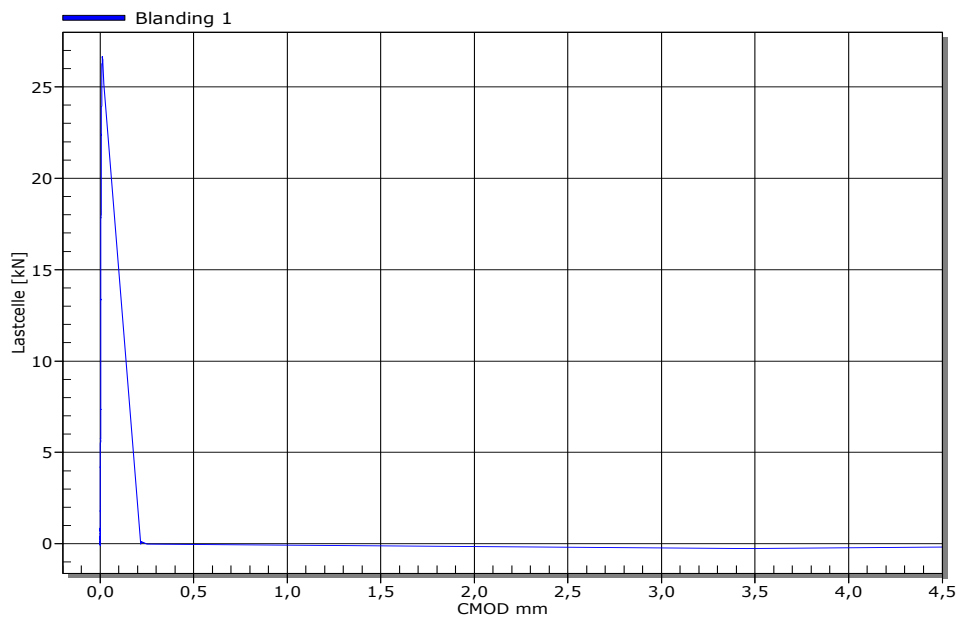
Ser vi på figur 6.8 ser vi arbeidsdiagrammet for trykk prøving som ble registrert fra trykkpresse. I og med at betongen er såpass sprø når den går til brudd, er avlesningene noe uklare rett etter brudd. Dette kan ha skjedd pga. maskinen og prøvingsprogrammet ikke greier å registrere de raske trykkendringene, men resultatet gir oss fortsatt en forståelse på lettbetongens oppførsel etter brudd med og uten fiber. Fra figur 6.8 ser vi klar forskjell på seriene som inneholder fiber og referanse serien hvor sylindren gikk direkte til brudd. For LWAC-1,0SF og LWAC 1,5SF (blanding 2 og 3) ser vi at kurven synker raskt etter brudd, men jevner seg ut ettersom dataprogrammet greier å registrere målingene. Etter dette holder kurven til LWAC-1,0SF seg relativt horisontal, mens LWAC-1,5SF har et noe høyere lastforhold og en slak nedgang. Sammenligner vi disse kurvene med LWAC-1,5BF og LWAC-3,0BF (blanding 4 og 5), ser vi at basaltseriene oppførte seg noe seigere og kurvene hadde en mer slak nedgang etter brudd.

### 6.3 Bøystrekkfasthet

#### 6.3.1 ND-referanse

Tabell 6.7 – Bøystrekk resultat ND-ref

	Prøvestykke 1	Prøvestykke 2	Gjennomsnitt
$b$ [mm]	150	150	150
$h_{sp}$ [mm]	125	125	125
$l$ [mm]	550	550	550
$F_L$ [kN]	26,5	- *	26,5
$f_{ct,L}^f$ [ $N/mm^2$ ]	9,33	- *	9,33
$f_{R,1}$ [ $N/mm^2$ ]	-	- *	-
$f_{R,2}$ [ $N/mm^2$ ]	-	- *	-
$f_{R,3}$ [ $N/mm^2$ ]	-	- *	-
$f_{R,4}$ [ $N/mm^2$ ]	-	- *	-



Figur 6.9 – CMOD-diagram ND-ref

Som antatt er den høystrekkbetongen i ND-ref svært sprø uten bruk av fiberarmering, og går dermed rett i brudd. Grunnet dårlig datamåling er det vanskelig å registrere små risstørrelser, men som vi kan så vidt kan se fra figuren dannes det en liten åpning i prøvebjelken på om lag 0,005mm før den går i brudd. Den karakteristiske bøystrekkfastheten er 9,33  $N/mm^2$  noe som er et godt resultat uten bruk av fiber.

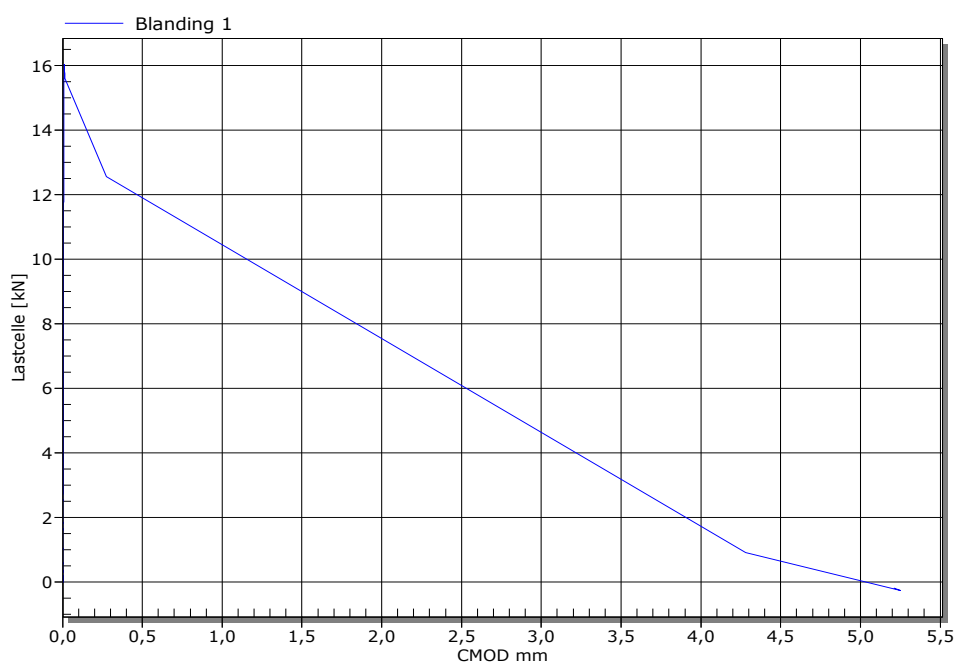


### 6.3.2 LWAC-referanse

Tabell 6.8 – Bøyestrek resultat LWAC-ref

	Prøvestykke 1	Prøvestykke 2	Gjennomsnitt
$b$ [mm]	150	150	150
$h_{sp}$ [mm]	125	125	125
$l$ [mm]	550	550	550
$F_L$ [kN]	15,8	- *	15,8
$f_{ct,L}^f$ [ $N/mm^2$ ]	5,56	- *	5,56
$f_{R,1}$ [ $N/mm^2$ ]	-	- *	-
$f_{R,2}$ [ $N/mm^2$ ]	-	- *	-
$f_{R,3}$ [ $N/mm^2$ ]	-	- *	-
$f_{R,4}$ [ $N/mm^2$ ]	-	- *	-

\* Prøveresultatet ble slettet fra program



Figur 6.10 – CMOD-diagram LWAC-ref

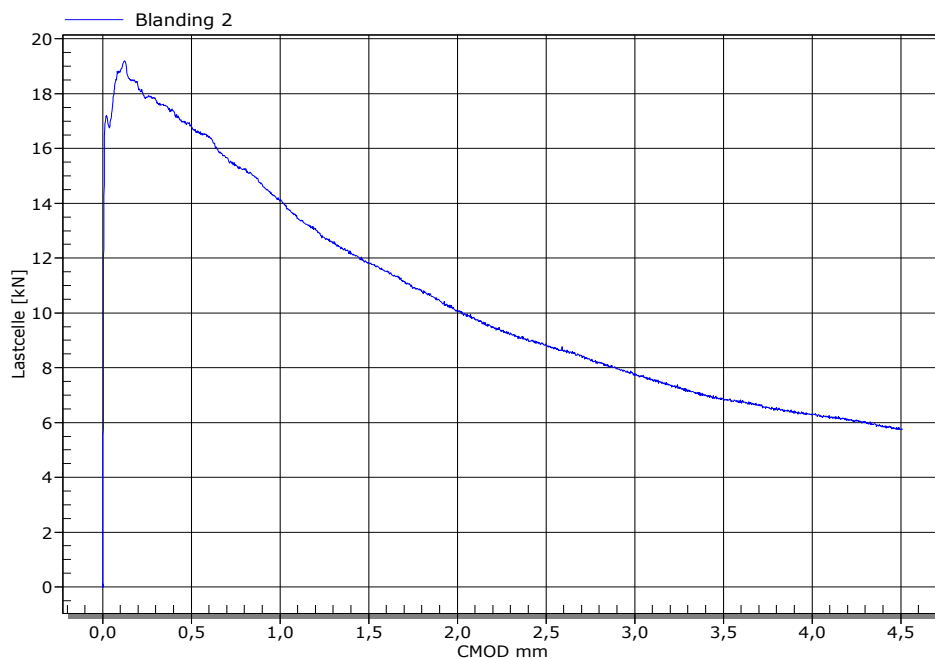
Fra prøving av bla. trykkfasthet viste det seg at sylinderprøvene for LWAC-ref fikk et eksplosjonsartet brudd under testing, og det er på forhånd kjent at lettbetongen er svært sprø. Referanse serien for lettbetong oppfører seg dermed som forventet når det kommer til bøyestrekfasthet prøving, og går direkte i brudd uten at betongen oppholder noen av kreftene. Som vi ser fra figur 6.10 viser grafen at bjelken går til brudd med en bruddlast på 15,8 kN, og deretter avtar lasten lineært mens det er registrert en økning i CMOD. Dette avviker fra observasjoner fra forsøket hvor bjelken som nevnt gikk direkte i brudd, så registrert data fra CMOD-diagrammet etter brudd er ikke gjeldende.

### 6.3.3 LWAC-1,0% stålfiber

Tabell 6.9 – Bøyestrek resultat LWAC-1,0SF

	Prøvestykke 1	Prøvestykke 2	Gjennomsnitt
$b$ [mm]	150	150	150
$h_{sp}$ [mm]	125	125	125
$l$ [mm]	550	550	550
$F_{max}$ [kN]	19,5	19,2	19,4
$F_L$ [kN]	14,5	17,3	15,9
$f_{ct,L}^f$ [ $N/mm^2$ ]	5,1	6,1	5,6
$f_{R,1}$ [ $N/mm^2$ ]	4,68	5,91	5,30
$f_{R,2}$ [ $N/mm^2$ ]	2,82 *	4,12	3,47
$f_{R,3}$ [ $N/mm^2$ ]	1,97 *	3,10	2,54
$f_{R,4}$ [ $N/mm^2$ ]	1,30 *	2,39	1,85

\* Resultatene er noe usikre ettersom clip-gauge løsnet og kurven ble ufullstendig, se vedlegg D



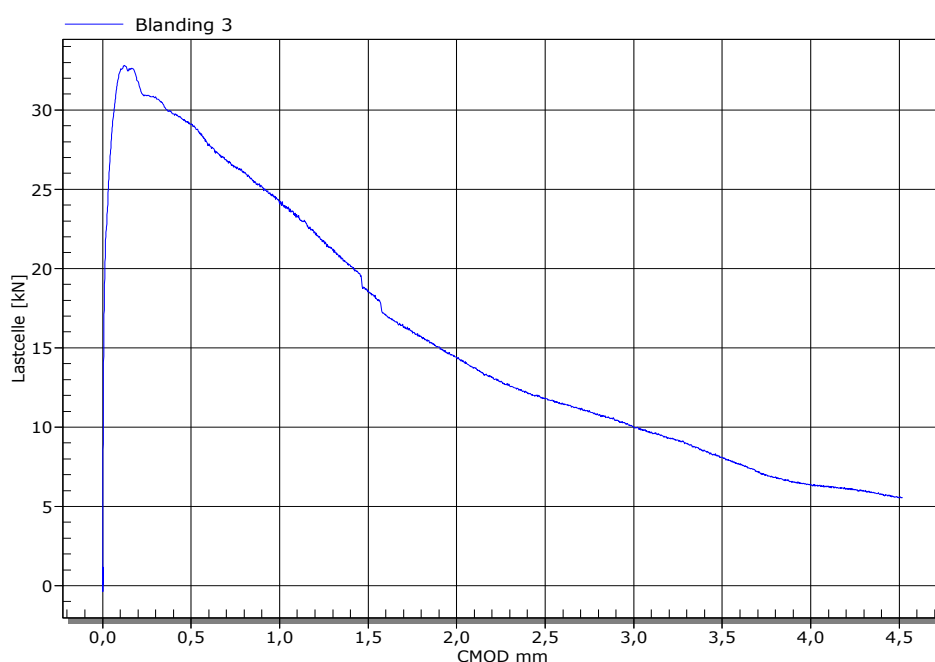
Figur 6.11 – CMOD-diagram for prøvestykket 2 LWAC-1,0SF

Ser vi på resultatene for LWAC-1,0SF ser vi at denne oppnår en noe høyere last enn LWAC-ref før den går til brudd, samt oppnår en høyere karakteristisk bøyestrekfasthet på 5,6  $N/mm^2$ . Kurven viser en helt annen oppførsel enn referanse bjelkene hvor vi ser at det er en mye slakere dropp før lasten gradvis synker nedover ettersom CMOD øker, og fiber viser seg å forbedre duktiliteten vesentlig. Verdiene på rest bøyestrekfastheten varierer noe som vist i tabell 6.9, noe som kan skyldes at clip-gaugen løsnet under testforløpet (se \*) og resultatene ble vanskelige å korrigere til eksakte verdier.

### 6.3.4 LWAC-1,5% stålfiber

Tabell 6.10 – Bøyestrek resultatene LWAC-1,5SF

	Prøvestykke 1	Prøvestykke 2	Gjennomsnitt
$b$ [mm]	150	150	150
$h_{sp}$ [mm]	125	125	125
$l$ [mm]	550	550	550
$F_{max}$ [kN]	31	32,8	31,9
$F_L$ [kN]	29	27	28
$f_{ct,L}^f$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10,2	9,5	9,85
$f_{R,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	9,08	10,24	9,66
$f_{R,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5,53	6,62	6,08
$f_{R,3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,59	4,19	3,89
$f_{R,4}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,43	2,85	2,64



Figur 6.12 – CMOD-diagram prøve 2 LWAC-1,5SF

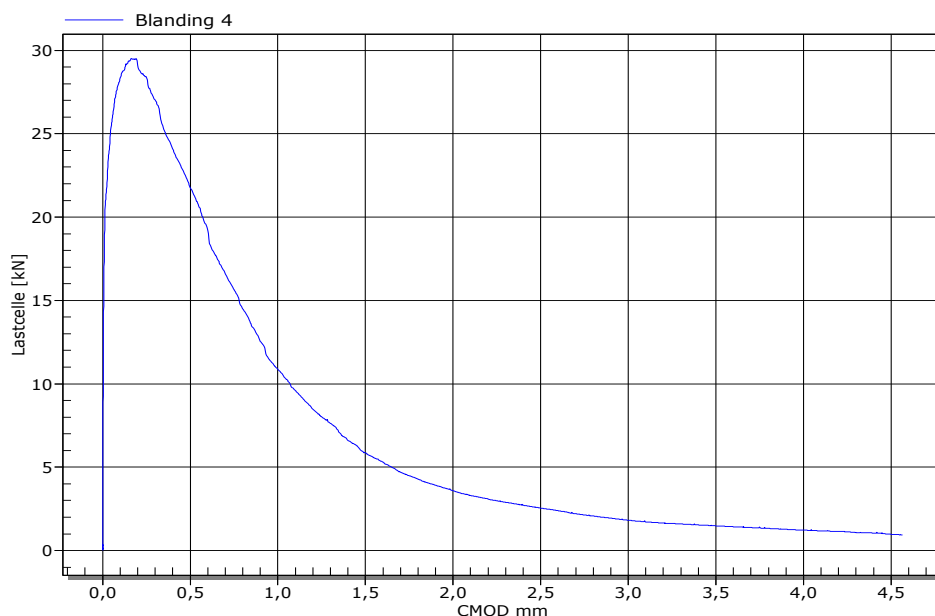
Fra resultatene til LWAC-1,5SF ser vi at bjelkeprøvene med 1,5% stålfiber oppnår en vesentlig høyere bruddlast enn referanse bjelkene, samt at lastene opprettholdes bedre selv med betydelig deformasjon som vist i figur 6.12. Etter opprissing er begynt registreres det at fiberen opptar kreftene frem til CMOD=0,11 mm før lastpåføringen begynner å avta, og serien har en gjennomsnittlig karakteristisk bøyestrekfasthet på 9,85 N/mm<sup>2</sup> ved proporsjonalitetsgrensen. Etter  $F_{max}$  er oppnådd synker belastningen på bjelkene gradvis nedover mot CMOD=4,5mm og viser god forbedring i duktiliteten. Vi

ser at i forhold til LWAC-1,0SF er restbøyestrekkefastheten og lastforholdet forbedret på samtlige verdier fra  $CMOD_1$  til  $CMOD_4$ .

### 6.3.5 LWAC-1,5% basaltfiber

Tabell 6.11 – Bøyestrekke resultater LWAC-1,5BF

	Prøvestykke 1	Prøvestykke 2	Gjennomsnitt
$b$ [mm]	150	150	150
$h_{sp}$ [mm]	125	125	125
$l$ [mm]	550	550	550
$F_{max}$ [kN]	29,5	22,2	25,8
$F_L$ [kN]	27,7	18,8	23,25
$f_{ct,L}^f$ [ $N/mm^2$ ]	9,75	6,62	8,20
$f_{R,1}$ [ $N/mm^2$ ]	7,67	5,14	6,40
$f_{R,2}$ [ $N/mm^2$ ]	2,11	1,76	1,94
$f_{R,3}$ [ $N/mm^2$ ]	0,98	0,79	0,89
$f_{R,4}$ [ $N/mm^2$ ]	0,60	0,39	0,50



Figur 6.13 – CMOD-diagram prøve 1 LWAC-1,5BF

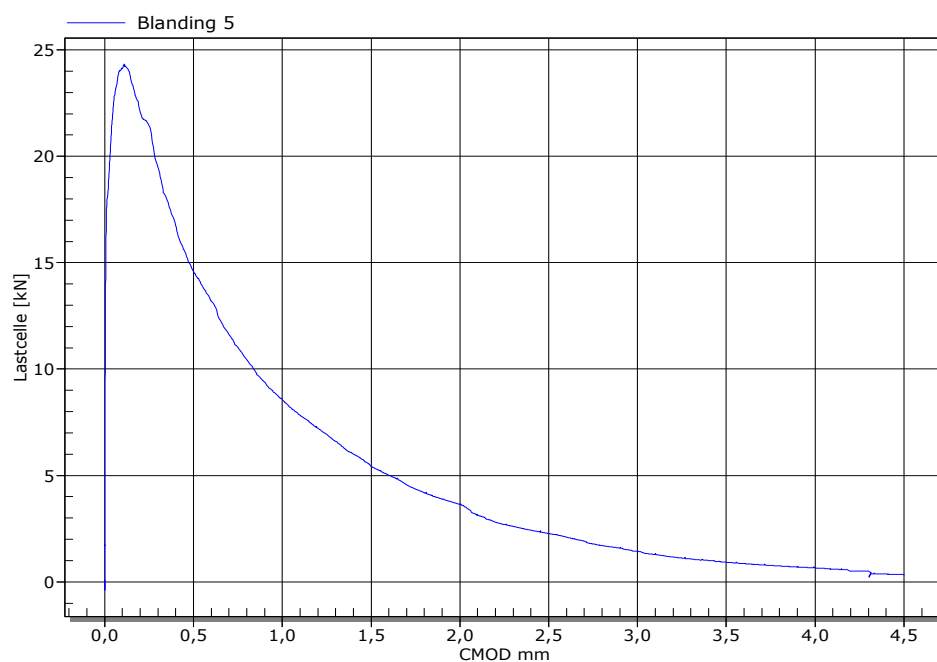
Bøyestrekke prøvene for bjelkeprøvene som inneholder 1,5% basaltfiber oppnår noe varierende resultater. Den ene viser vesentlig høyere makslast verdi, men resultatene jevner seg ut ettersom belastningen blir redusert. Som vi ser fra prøveresultatet har LWAC-1,5BF en raskere nedgang i belastning i forhold til stålfiber prøvene. Dette skyldes trolig av at basaltfiberen ryker og ikke blir dratt ut som for stålfiberen. Vi ser også fra figur 6.13 at lettbetongen er mer duktil frem mot  $F_{max}$ . Fiberen opptar kreftene

lenger etter proporsjonalitetsgrensen (til ca.  $CMOD=0,25mm$ ) enn foregående prøver, noe som kan skyldes at basaltfiberen er mer elastisk og absorberer spenningene med engang som nevnt i teorien i kapittel 2.8.2.

### 6.3.6 LWAC-3,0% basaltfiber

Tabell 6.12 – Bøyestrek resultatater LWAC-3,0BF

	Prøvestykke 1	Prøvestykke 2	Gjennomsnitt
$b$ [mm]	150	150	150
$h_{sp}$ [mm]	125	125	125
$l$ [mm]	550	550	550
$F_{max}$ [kN]	28,8	24,3	26,5
$F_L$ [kN]	25	23,7	24,4
$f_{ct,L}^f$ [ $N/mm^2$ ]	8,8	8,34	8,57
$f_{R,1}$ [ $N/mm^2$ ]	5,45	5,17	5,31
$f_{R,2}$ [ $N/mm^2$ ]	1,23	1,94	1,59
$f_{R,3}$ [ $N/mm^2$ ]	0,35	0,77	0,56
$f_{R,4}$ [ $N/mm^2$ ]	0,18	0,35	0,27



Figur 6.14 – CMOD-diagram prøve 2 LWAC-3,0BF

Bøyestrekfasthets prøvene for LWAC-3,0BF har veldig lik oppførsel som LWAC-1,0BF med rask nedgang av lastpåføring og lave verdier på  $CMOD_2$ - $CMOD_4$ . Som vi ser fra figur

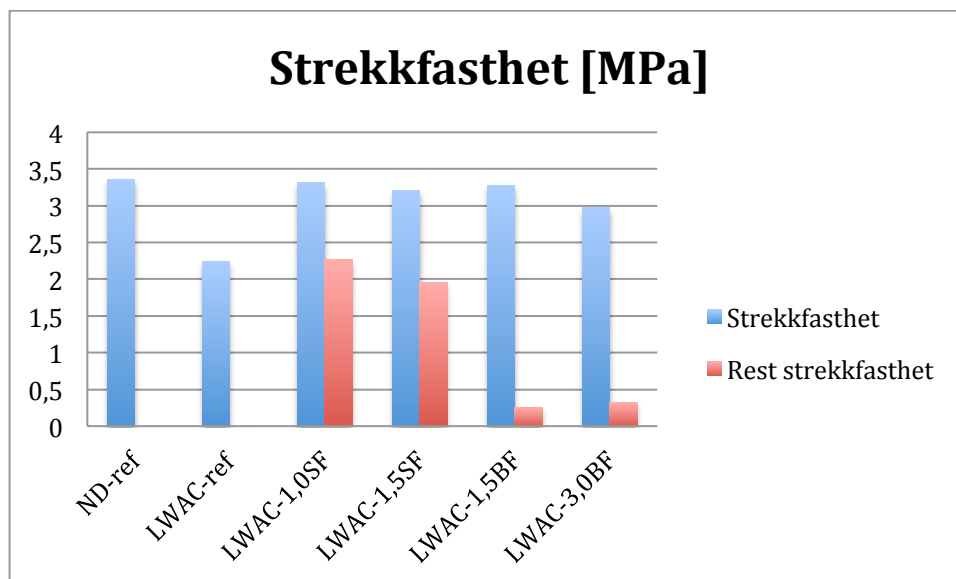
6.14 opptar basaltfiberen også her kreftene noe bedre etter proporsjonalitetsgrensen enn ved stålfiber- og referanse seriene, noe som viser at basaltfiberen gjør lettbetongen mer seig fra oppsprekking og frem til  $F_{max}$ . Sammenlignet med resultatene fra LWAC-1,5BF har LWAC-3,0BF noe lavere gjennomsnittlige rest bøyestrekfasthet verdier, men en ser også fra kapittel 6.2.1 at LWAC-3.0BF har en noe lavere trykkfasthet ved 28 døgn. Dette kan være med på å påvirke heften mellom basalten og sementpastaen og at dermed fiberen gir fortere etter. Videre kan det også skyldes dårlig fiberorientering noe som har svært stor innvirkning på betongens oppførsel.

#### 6.4 Arbeidsdiagram - strekk

Tabell 6.13 – Gjennomsnittlige strekkprøvningsresultater for de 2 prøvebjelkene

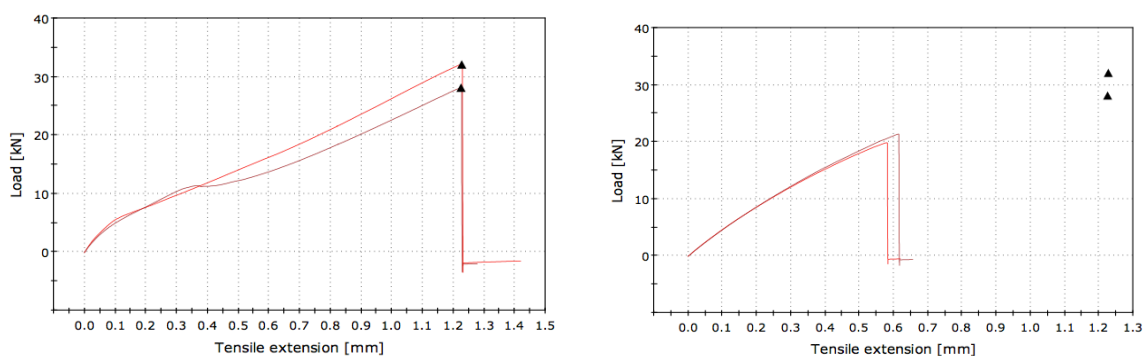
	<b>ND-ref</b>	<b>LWAC-ref</b>	<b>LWAC-1,0SF *</b>	<b>LWAC-1,5SF</b>	<b>LWAC-1,5BF</b>	<b>LWAC-3,0BF</b>
Tverrsnitt [mm]	93x96	97x95	95x95	95x97	97x95	94x97
Bruddtøyning [mm]	1,24	0,65	1,44	1,21	0,91	1,08
Bruddlast [kN]	30,1	20,6	29,9	29,4	20,7	27,1
Strekfasthet [ $N/mm^2$ ]	3,36	2,24	3,31	3,21	2,28	2,97
Rest last ved 3mm forlengelse [kN]	-	-	20,5	18	2,25	2,75
Rest strekfasthet ved 3mm forlengelse [ $N/mm^2$ ]	-	-	2,27	1,96	0,26	0,32

\* For LWAC-1,0SF ble det bare registrert målinger for et prøvestykke ettersom det ene prøvestykke ble brukt i forsøk uten å registrere målinger.



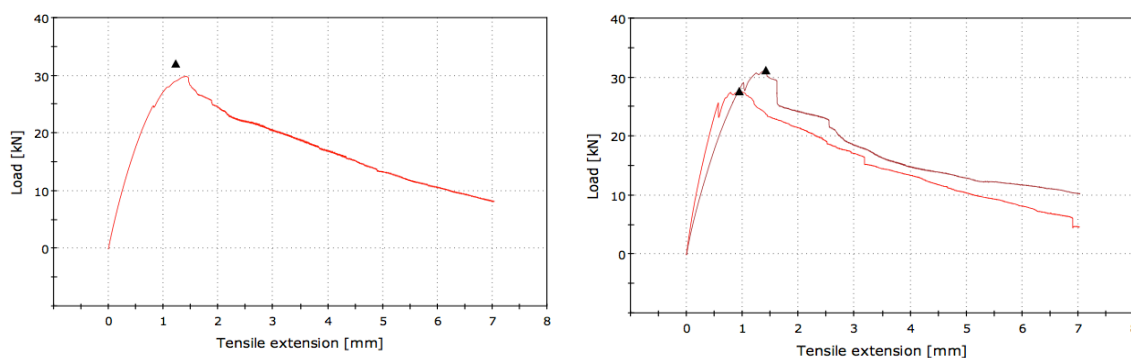
Figur 6.15 – Strekkfasthet og rest strekkfasthet

På grunn av manglende erfaring så er det usikkert hvordan lettbetong seriene vil reagere når de ble utsatt for strekkprøving. Det er kjent at betong i seg selv har lav strekkfasthet, men hvordan den fiberarmerte lettbetongen vil oppta strekkreftene er usikkert. Fra spaltestrekk resultatene var det gitt et inntrykk av hva strekkfastheten skulle bli i og med all teori tilsier at henholdsvis strekkfastheten og spaltestrekkfastheten skal bli forholdsvis like.



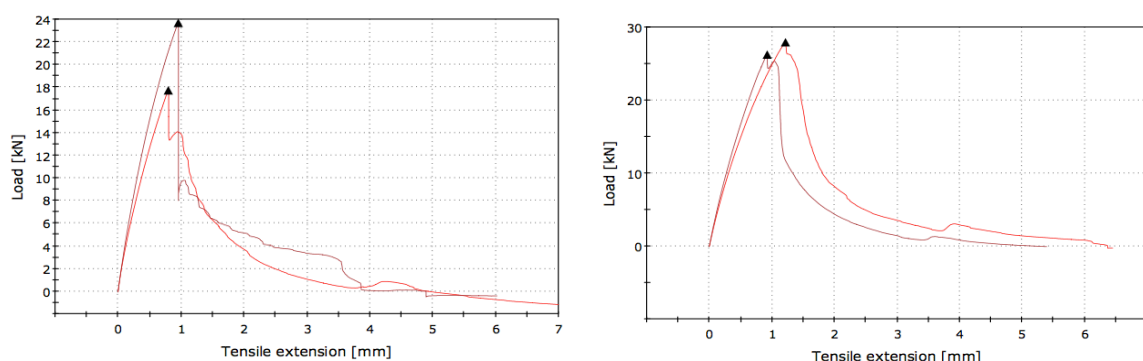
Figur 6.16 – Arbeidsdiagram strekk, ND-ref til venstre og LWAC-ref til høyre

Under prøving av referanse seriene uten fiber oppfører disse seg likt som ved bøyestrekfasthet prøvene, og bjelkene går direkte i brudd uten at betongen opptar strekkreftene, se figur 6.16. Lettbetongen tåler en tøyning på 0,65 mm før den går til brudd, mens den høyfaste referanse betongen oppnår høyere bruddtøyning enn samtlige fiberblandinger med 1,24 mm bruddtøyning.



Figur 6.17 – Arbeidsdiagram strekk, LWAC-1,0SF til venstre og LWAC-1,5SF til høyre

Fra resultatene i tabell 6.13 ser vi at bruddtøyningen øker ved bruk av fiberarmering og kurven får en slakere avtaking etter brudd. Ser vi på resultatene til LWAC-1,0SF oppnår denne en bruddlast på 29,9 kN noe som er tilnærmet det samme som for ND-ref. Bruddtøyningen øker vesentlig og i sammenheng med denne stiger strekkfastheten til 3,31 MPa. Ut fra figur 6.17 ser vi at kurven har noen hakk ettersom lasten avtar og forklares med at stålfiberen gir etter og blir dratt ut av betongverrsnittet, og er svært tydelig på kurven til LWAC-1,5SF. Denne prøven oppnår tilnærmet lik bruddlast som LWAC-1,0SF, men noe lavere bruddtøyning og strekkfasthet. Ettersom deformasjonen øker holder lasten seg forholdsvis jevnt med lettbetong serien hvor det inneholdt 1% stålfiber. Begge seriene oppnår dermed høye rest strekkfasthet verdier helt frem til prøvingsforløpet blir avsluttet etter en tøyning på 7 mm.



Figur 6.18 – Arbeidsdiagram strekk, LWAC-1,5BF til venstre, og LWAC-3,0BF til høyre

Under spaltestrekk forsøket oppnådde seriene med basaltfiber en spaltestrekkfasthet på henholdsvis 4,75 MPa for LWAC-1,5BF og 5,22 MPa for LWAC-3,0BF, mens strekkfastheten fra bjelkeprøvene ender på 2,28 MPa og 2,97 MPa noe som er ca. en halvering. Videre ser vi på kurvene i figur 6.18 at basaltprøvene reduserer strekkfastheten vesentlig forttere enn stålfiber seriene etter bruddlast. For LWAC-1,5BF får kurven en rask nedgang og vi ser at kurven har flere knekk ettersom basaltfiberen ryker underveis i lastpåføringen. Siden kurvene avtar så raskt for LWAC-1,5BF er det lav



strekkfasthet helt fra 1 mm tøyning og rest strekkfastheten ved 3 mm er vesentlig lavere enn for stålfiber seriene. Dette gjelder også for LWAC-3,0BF, men som nevnt i 6.2.2 vil basalten oppta kreftene bedre ved høyere volum%, og vi ser at lastforhold, rest- og strekkfasthet øker i forhold til ved bruken av 1,5% basaltfiber og referanse serien.

Ser vi på alle seriene i sammenheng viser samtlige resultater at både basaltfiber og stålfiber har stor effekt på deformasjonsforløpet ved strekkprøving. Vi ser også at strekktøyningen og rest strekktøyningen forbedres vesentlig ved fibertilsetning, men at 1,0% og 1,5% stålfiber er betydelig bedre enn basaltfiberen.

## 6.5 Bruddseighet

I henhold til kapittel 3.1.2 og 3.1.3 er det beregnet karakteristisk lengde og brittleness number for prøveelementene for å se om fiberarmeringen forbedrer sprøheten i betongen. For å regne ut bruddenergien er det i henhold til formel 3.4 nødvendig å finne arealet under graf,  $W_0$ . Dette blir foretatt ved en forenkling ved å omtrentlig regne ut arealet under CMOD-diagrammet.

Tabell 6.14 – Gjennomsnittlige resultater bruddseighet

	ND-ref	LWAC-ref	LWAC-1,0SF	LWAC-1,5SF	LWAC-1,5BF	LWAC-3,0BF
E-modul, $E_{ch}$ [GPa]	32,5	17,8	15,1	18,5	18,2	15,6
Bruddenergi, $G_f$ [Nm/mm <sup>2</sup> ]	149	130*	1733	3146	1426	1307
Spaltestrekkfasthet [N/mm <sup>2</sup> ]	5,94	4,54	4,92	5,74	4,75	5,22
Karakteristisk lengde, $l_{ch}$ [mm]	137	112*	1081	1766	1150	748
Brittleness number, $\beta$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4,0	4,90*	0,51	0,31	0,48	0,73

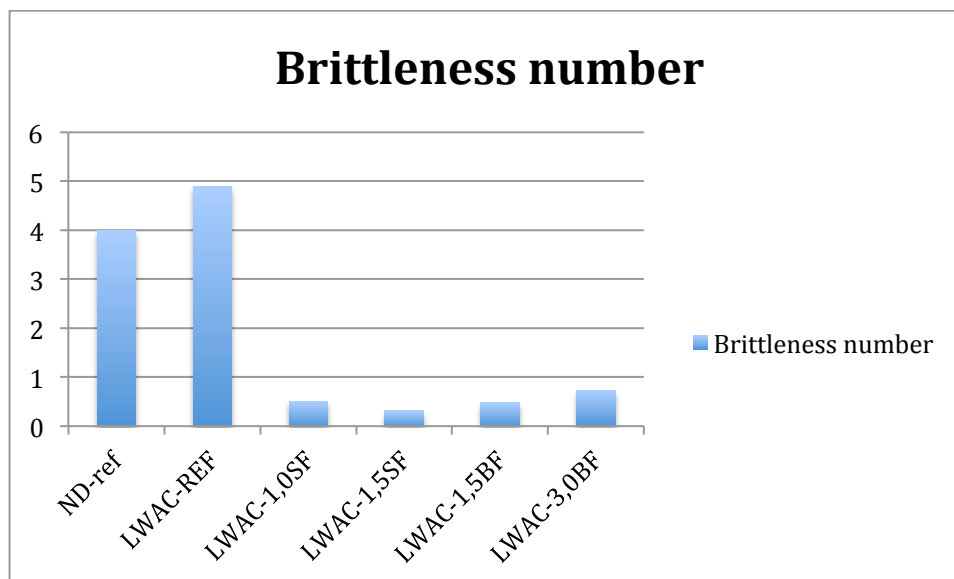
\* ingen verdier pga. ble feil i avlesning under prøveforløp, se 6.3.2. Antar derfor noe mindre enn ND-ref siden lettbetong er mer sprø



Figur 1 LOL

Figur 6.19 – Resultater karakteristisk lengde

Fra formel 3.3 blir det foretatt beregninger for å se hvordan den karakteristiske lengden endrer seg ved ulik bruk av fiberarmering. Den karakteristiske lengden avhenger av strekkfastheten så det er i disse utregningene valgt å benytte spaltestrekkfastheten fra kapittel 6.2.2. Som nevnt i kapittel 3.1.2 er den karakteristiske lengden en indikasjon på sprøheten i materialet, og ved lave verdier er betongen mer sprø enn ved høye verdier. Vi ser fra resultatene at den serien som hadde høyest karakteristisk lengde er LWAC-1,5SF og denne kan dermed defineres som den mest duktile betongen. Vi så fra CMOD-kurven fra bøyestrekfasthet prøvingen i kapittel 6.3 at dette var den serien med mest areal under grafen og vi får dermed en høy bruddenergi som er med å påvirke den karakteristiske lengden. Fra bøyestrekfasthet prøvingen i kapittel 6.3 så vi at for basaltprøvene avtok CMOD-kurven raskere enn for stålfiberprøvene, noe som medfører lavere bruddenergi. Lav bruddenergi i kombinasjon med høye verdier for spaltestrekkfasthet medfører dermed en lavere karakteristisk lengde.



Figur 6.20 – Brittleness number

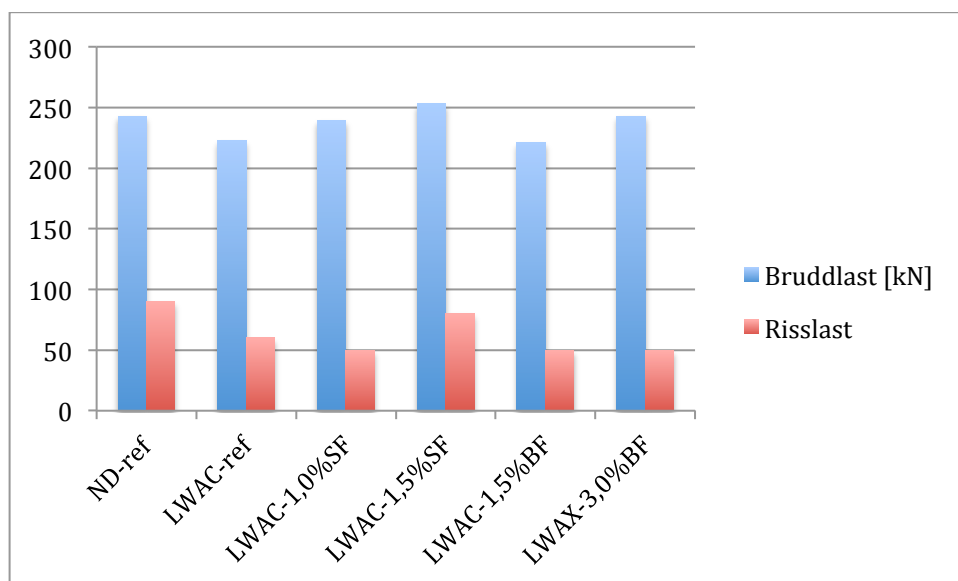
Fra formel 3.5 i kapittel 3.1.3 blir sprøhetstallet regnet ut ved å benytte de samme verdiene som for karakteristisk lengde. Som nevnt i 3.1.3 ønskes det å ha lavest mulig verdi for brittleness number for å ha en minst mulig sprø betong. Ser vi på verdiene for brittleness number i kombinasjon med karakteristisk lengde ser vi at LWAC-1,5SF er som forventet den mest duktile lettbetongen, mens referanse seriene er mest sprø og lite duktile.

## 6.6 Risslast og rissutvikling

Tabell 6.15 – Resultater stor bjelke

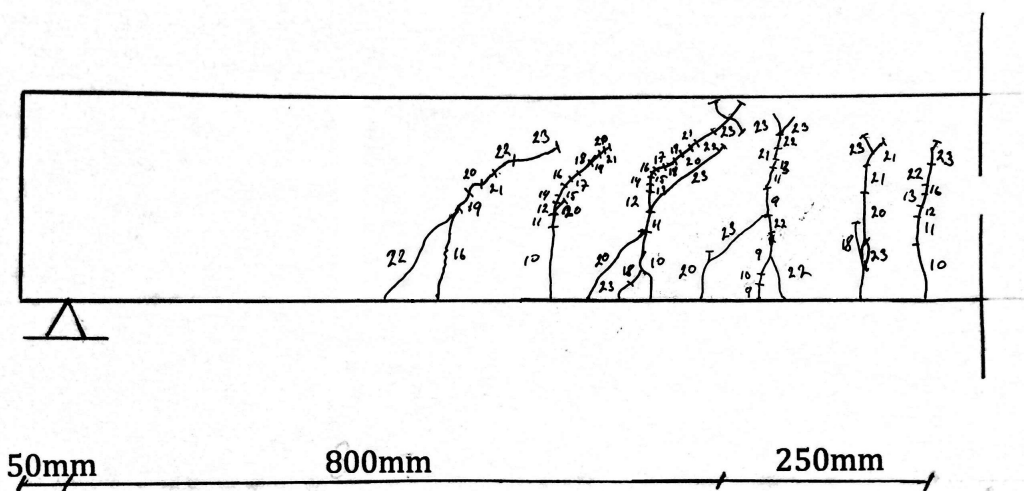
Resept navn	Risslast [kN]	Bruddlast [kN]	Herdetid
ND-ref	90	234,6	30 døgn
LWAC-ref	60	223,3	28 døgn
LWAC-1,0SF	50	239,4	35 døgn
LWAC-1,5SF	80	252,9	34 døgn
LWAC-1,5BF	50	221,1	26 døgn
LWAC-3,0BF	50	242,5	26 døgn

Ser vi på resultatene i tabell 6.15 i kombinasjon med beregnede verdier fra kapittel 5.8.2 ser vi at beregnet risslast er 52,9 kN for lettbetong og antar dermed tilnærmet lik for normalbetong. Fra registrerte verdier ser vi at for ND-ref er risslasten vesentlig høyere enn iht. EC2, mens resultatene er noe variable for lettbetong blandingene. Spesielt for LWAC-1,5SF viser målt risslast vesentlig forbedringer og oppnår bare 10 kN lavere last enn den høyfaste normalbetongen. Når det kommer til beregnet bruddlast oppnår samtlige bjelker en høyere last enn beregningene iht. EC2 fra 5.9.2, hvor det er forventet brudd ved 156 kN. Begge stålfiber seriene og LWAC-3,0BF oppnår høyere bruddlast enn ND-ref og seriene viser økt kapasitet ved bruk av fiber.



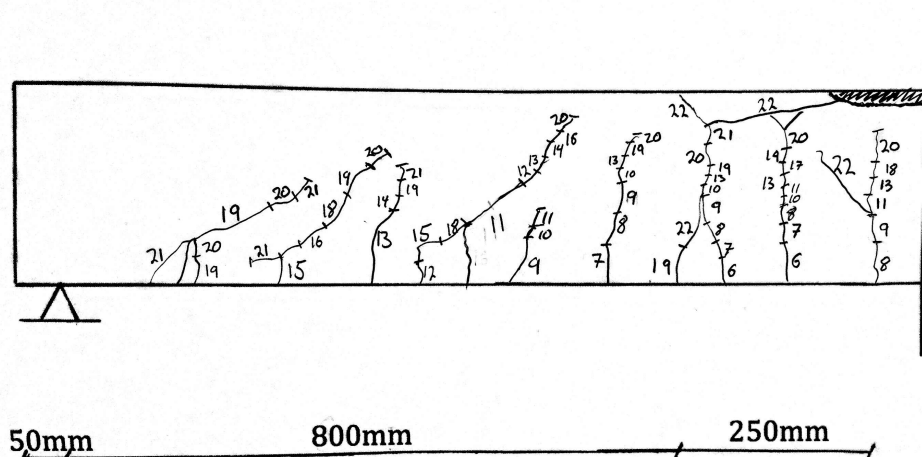
Figur 6.21 – Brudd- og risslast

For å få en forståelse på hvordan rissutviklingen varierer i forhold til fibertilsetning er de store utstøpte bjelkene testet til brudd mens rissutviklingen er dokumentert underveis. Siden bjelkene er symmetrisk belastet 800mm fra opplager og rissutviklingen dermed også er tilnærmet symmetrisk, blir bare resultatene fra halve bjelken presentert.



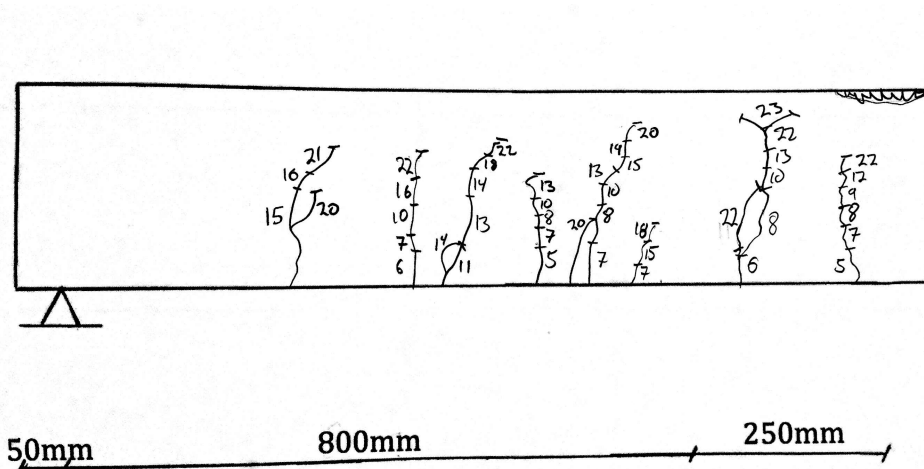
Figur 6.22 – ND-ref

Ser vi på rissutviklingen for ND-ref ser vi at rissene er konsentrert mot senter av bjelken og at samtlige ligger i strekksonen. Første riss er registrert ved 90 kN og beveger seg etter hvert som lasten øker opp mot bjelkens trykkrand. Når bjelken påføres økt last oppstår det riss nærmere opplager og beveger seg skrått opp mot lastpunktet frem mot fullstendig brudd i bjelken.



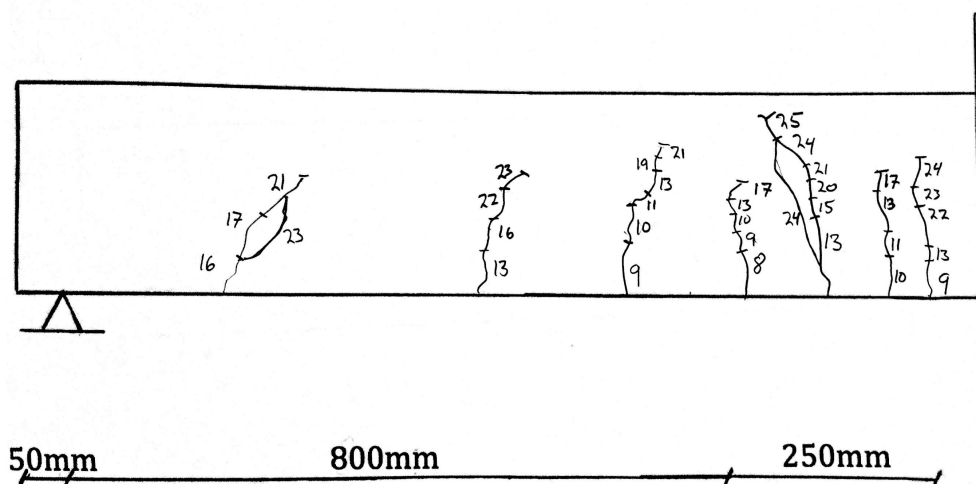
Figur 6.23 - LWAC-ref

For lettbetong referanse serien ser vi fra figur 6.23 at det oppstår mye riss under testforløpet. Etter første riss blir dokumentert ved 60 kN i strekksonen, begynner rissene og bevege seg tilnærmet vertikalt oppover mot trykkrand. Vi ser fra figuren at ettersom rissene først oppstår vokser de jevnlig i forhold til last økningen, og fra 120 kN og oppover beveger rissene seg lenger ut mot opplagene.



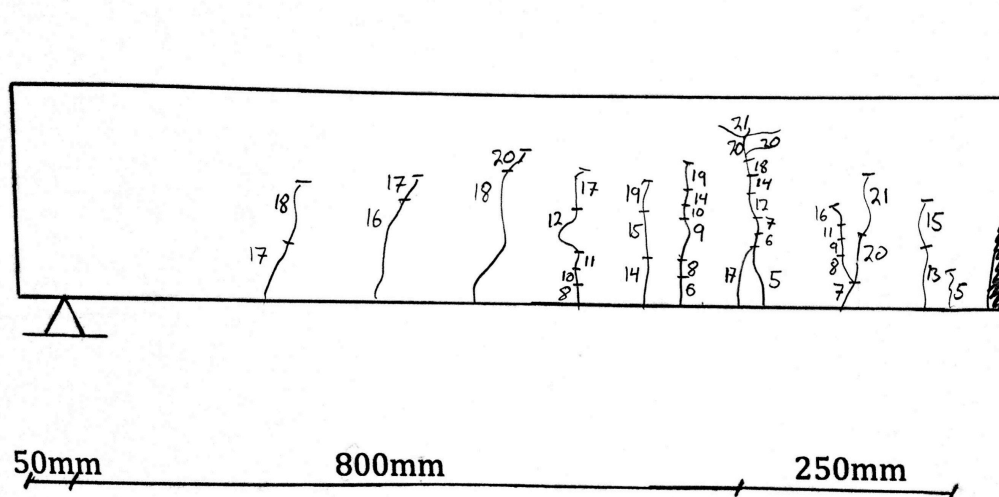
Figur 6.24 - LWAC-1,0SF

For LWAC-1,0SF bjelken blir første riss oppdaget ved 50 kN, noe som er noe lavere enn forventet risslast fra 5.9.2. Det er viktig å presisere at oppdagelsen av første riss kan være vanskelig grunnet det ikke er brukt risslupe, så nøyaktigheten på observasjon kan være noe variabel. Selv om LWAC-1,0SF har en lavere dokumentert risslast, ser vi at rissutviklingen er vesentlig endret. Rissene oppstår i strekksonen og vokser vertikalt i takt med lastpåføringen frem til bjelken går i brudd ved 239 kN.



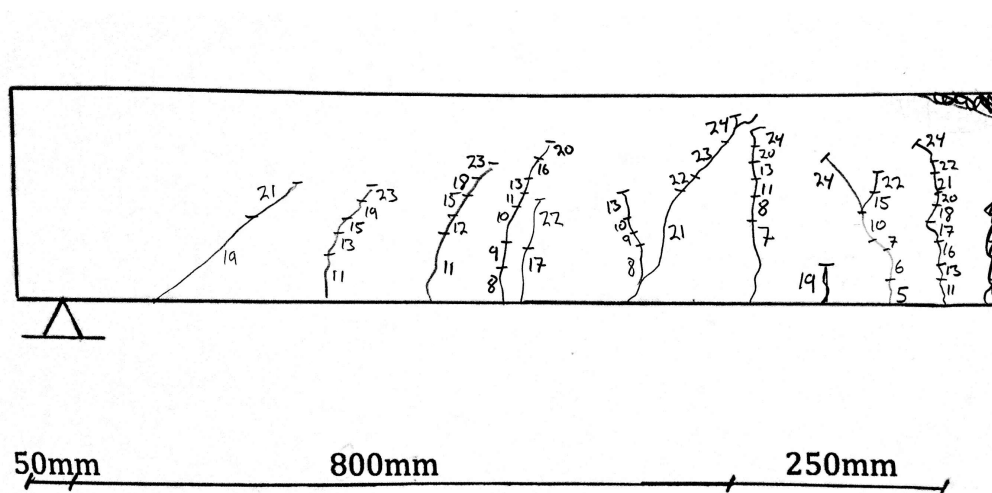
Figur 6.25 - LWAC-1,5SF

Fra tidligere resultater har det vært LWAC-1,5SF som har gitt størst forbedring med tanke på strekkfasthet og bøyestrekfasthet, så det er forventet at også dette skal være tilfelle for rissutvikling. Fra de oppmerkede rissene fra figur 6.25 ser vi at bjelken med 1,5volum% stålfiber oppnår en rissalast på 80 kN, og at det oppstår færre riss enn ved tidligere prøver. Fra første riss oppstår i strekksonen ved 80 kN opptar stålfiberen her kreftene bedre, og vi ser at det må større last til før rissene vokser. Dette ser vi spesielt fra 110-130 kN hvor det er behov for 20-30 kN mer last før rissene vokser videre.



Figur 6.26 - LWAC-1,5BF

Ved basaltserien med 1,5% registreres første riss ved lik last som LWAC-1,0SF på 50 kN og oppfører seg videre forholdsvis likt som denne, men med noe tettere riss avstand. Vi ser fra figur 6.26 at rissene oppstår med en forholdsvis lik avstand, med start midt i strekksonen og beveger seg utover mot opplagerne etter hvert som lasten øker. Ser vi på avstanden mellom rissene kan dette trekkes i kombinasjon med bøyelavstanden som er c130 mm, noe som er tilfelle for foregående bjelker også. Rissene oppstår normalt på hovedspennretningen og beveger seg vertikalt mot trykkrand av bjelken.



Figur 6.27 - LWAC-3,0BF

For LWAC-3,0BF ser vi en tilnærmet lik rissutvikling som for LWAC-1,5BF, men en høyere bruddlast. Første riss blir registrert ved 50 kN og videre opprører rissene seg likt som tidligere prøver. Samtlige riss beveger seg vertikalt med en avstand tilnærmet lik bøyleavstanden og vi kan se en liten forbedring i rissutvikling ved bruk av 3,0% basalt i forhold til referanse bjelkene.

Resultatene fra bjelkeprøvene viser at fiberarmering gir en vesentlig effekt når det kommer til rissutvikling i lettbetong. Sammenligner vi resultatene fra referanse bjelkene mot bjelkene med fiber ser vi en god reduisering i antall riss. Basaltblandingen viser en svak forbedring, men vi ser at LWAC-1,5SF også her gir best effekt både med vesentlig lavere rissutvikling samt en økt kapasitet.

## 6.7 Feil kilder

- Under måling av luftinnhold hendte det at luftmåleren ikke var helt tett. Det kan derfor være noe avvik i resultatene.
- Fuktinnholdet i tilslaget under støping var variabelt og vanskelig å måle bla. grunnet variabelt klima. Det ble som nevnt i kapittel 6.1.1 gjort forsøk på å ta tilslag inn over natten for å få riktig fuktinnhold. Grunnet tilslagets mulighet til å absorbere mye vann var det ut ifra prøveprosedyren som ble utført vanskelig å oppnå nøyaktig resultat.
- Ved registrering av data under bøyestrekfasthet var det på forhånd lite kunnskap i programmet som ble benyttet, og det ble derfor vanskelig å få mest mulig nødvendig informasjon ut av dataene samt endre akser og verdier på diagrammene.
- Ved dokumentasjon av rissutvikling ble det som nevnt ikke brukt risslupe og det er dermed mulighet for at riss oppsto før de ble oppdaget med det blotte øyet.
- De innstøpte ankrene ved prøving av bjelkene for strekk var ikke helt normalt på bjelken. Dette kan ha ført til en noe skjev lastfordeling og noe usikre resultater.



## 7.0 Konklusjon

For å vise til fiberens oppførsel i lettbetong ble det gjort flere resultater på hvordan de forskjellige fiber doseringene endret duktiliteten og de mekaniske egenskapene i betongen. Fra prøving som er foretatt av lettbetongen i fersk tilstand viser resultatene at fibertilsetningen har en innvirkning på betongens synkmål. Resultatet viser at ved bruk 1,5% og 3,0% fiber i lettbetongen blir synkmålet redusert. Luftinnholdet i den ferske betongen viser å ha en innvirkning ved bruk av fiber og densiteten i den ferske betongen vil øke noe ved økt volum% stålfiber.

Resultatene viser at fiber har ingen effekt på sylindrefastheten i lettbetongen. Samtlige fiberserier viser at fiberen medfører at betongen blir seig og sprekker uten eksplosjonsartede brudd som for referanse seriene.

Spaltestrekkfastheten blir økt ved samtlige lettbetong serier som inneholder fiber. Resultatet er fortsatt noe lavere enn den høyfaste referanse betongen, men viser at spaltestrekkfastheten blir forbedret spesielt ved større doseringer fiber som ved LWAC-1,5SF og LWAC-3,0BF.

Arbeidsdiagrammet for trykk viser at bruddtøyningen for sylindrerne ikke blir noe forbedret ved bruk av fiber, men fiber tilsetning gir en høyere verdi på bruddeformasjon før fullstendig kollaps.

Resultatet fra bøyestrekfasthet prøvingen viser økt strekkfasthet i samtlige prøver med fiber. Basaltprøvene blir de minst duktile, men LWAC-1,5BF og LWAC-3,0BF viser vesentlig forbedring i duktilitet forhold til referanse bjelkene. Stålfiberseriene og LWAC-1,0SF og LWAC-1,5SF oppnår best resultater med tanke på forbedring av de duktile egenskapene.

Resultatene viser at strekkfastheten og bruddtøyningen er forbedret ved økende bruk av fiber. Stålfiberseriene oppnådde den beste effekten i arbeidsdiagrammene og kan sees på som de mest duktile, men basaltfiberen viser også her økt effekt i lettbetongen.

Ved å studere fullskala bjelker mot riss ser vi fra resultatene at fiberen viser liten innvirkning på risslasten for basaltseriene og 1,0% stålfiber, men god forbedring ved LWAC-1,5SF. Resultatene for rissutvikling viser effekt av samtlige fiberdoseringer sammenlignet med referansebjelkene, men LWAC-1,5SF er den serien som reduserer rissutviklingen mest. Verdiene for bruddlast viser at fiberarmeringen øker kapasiteten i bjelkene og bruddlasten blir forbedret for LWAC- 1,0SF, LWAC-1,5SF og LWAC-3,0BF.

Etter samtlige prøver er gjennomført viser resultatene at lettbetongens duktilitet blir vesentlig forbedret ved bruk av fiberarmering. Fra resultatene ser vi at for samtlige prøvingsforløp som er utført har resultatene oppnådd en økt effekt ved bruk av både basalt- og stålfiber, men i sin helhet har LWAC-1,5SF vist størst effekt mot ytre belastninger.

## 8.0 Figur liste

Figur 2.1 – Form på ønsket siktesats [1]	s. 9
Figur 2.2 - Oversikt over flislighet [4]	s. 10
Figur 2.3 – Naturlig sand og to fraksjoner lett tilslag	s. 11
Figur 2.4 – Oversikt over produksjonsprosess for sement [4]	s. 12
Figur 2.5 – Betong med og uten SP-stoff [4]	s. 14
Figur 2.6 – Typisk fasthetsbrudd ved terning og sylinder [1]	s. 16
Figur 2.7 – Fasthetsklasser for normal- og lettbetong [12]	s. 16
Figur 2.8 – Oversikt over fiberformer [5]	s. 18
Figur 3.1 – Forskjell mellom lineærelastisk- og elastisk-plastisk materiale [11]	s. 19
Figur 3.2 – Last forhold for duktil- (a) og sprøtt materiale (b) [6]	s. 20
Figur 3.3 – Prøvningsprosedyre for CMOD i samsvar med NS-EN 14651 [14]	s. 21
Figur 3.4 – Last-CMOD diagram [14]	s. 22
Figur 3.5 – Spennings- deformasjon fordeling for betong under trykk [12]	s. 24
Figur 4.1 – Spennings- og tøyingsfordeling for rektangulært fiberarmert tverrsnitt utsatt for ren bøyning [5]	s. 26
Figur 4.2 – Beregningsmodell for momentkapasitet [9]	s. 27
Figur 4.3 – Verdi for K ved normalarmert B20-B95 [9]	s. 28
Figur 4.4 – Bøyning i uopprikket tverrsnitt [9]	s. 31
Figur 5.1 – Leca 4-8 mm til venstre og 3-6mm til høyre	s. 37
Figur 5.2 – Forsand 0-8mm	s. 37
Figur 5.3 – Stålfiber til venstre, basaltfiber til høyre	s. 38
Figur 5.4 – Tvangsblander som ble brukt under prosjektet	s. 39
Figur 5.5 – Sant- og skjærdeformert synkmål [15]	s. 40
Figur 5.6 – Avlesningsmetode for synkmål [15]	s. 40
Figur 5.7 – Luftinnhold måler ved bruk av trykk-gauge metoden [17]	s. 41
Figur 5.8 – Nominell størrelse på sylinder [18] og sylindere i vannbad	s. 42
Figur 5.9 – Støpeprosedyre for bjelker [14]	s. 42
Figur 5.10 – Nominell størrelse for test bjelker [18] og bjelkeform	s. 43
Figur 5.11 – Armert bjelketverrsnitt	s. 43
Figur 5.12 – Bjelke form med armering og ferdig utstøpt til høyre	s. 44
Figur 5.13 – Bruddform for LWAC-ref etter trykkfasthet prøving	s. 45
Figur 5.14 – Oversikt over tilfredsstillende bruddform ved sylinder [20]	s. 45
Figur 5.15 – Jigg for innfestning av sylinder [21]	s. 46
Figur 5.16 – Spaltestrekkforsøk av LWAC uten fiber til venstre og med stålfiber til høyre	s. 46
Figur 5.17 – Sylinder med strekkklapp etter endt prøving	s. 47
Figur 5.18 – Festeinnretning clip gauge t.v. og innfestet clip gauge på bjelke t.h.	s. 49
Figur 5.19 – Opplager for bjelke til venstre og lastcelle under opplager til høyre	s. 49
Figur 5.20 – Innfestet bjelke i strekkmaskinen	s. 50

Figur 5.21 – Opplagt bjelke med mål	s. 51
Figur 5.22 – Testjigg med plassert bjelke	s. 52
Figur 6.1 – Synkmål	s. 55
Figur 6.2 – Luftinnhold	s. 56
Figur 6.3 – Densitet	s. 57
Figur 6.4 – Sylindrefasthet 7 døgn	s. 58
Figur 6.5 – Sylindrefasthet 28 døgn	s. 59
Figur 6.6 – Spaltetrekkfasthet 28 døgn	s. 60
Figur 6.7 – E-modul fra trykkprøving	s. 61
Figur 6.8 – Arbeidsdiagram trykk	s. 63
Figur 6.9 – CMOD-diagram ND-ref	s. 64
Figur 6.10 – CMOD-diagram LWAC-ref	s. 65
Figur 6.11 – CMOD-diagram for prøvestykke 2 LWAC-1,0SF	s. 66
Figur 6.12 – CMOD-diagram prøvestykke 2 LWAC-1,5SF	s. 67
Figur 6.13 – CMOD-diagram prøvestykke 1 LWAC-1,5BF	s. 68
Figur 6.14 – CMOD-diagram prøvestykke 2 LWAC-3,0BF	s. 69
Figur 6.15 – Strekkfasthet og rest strekkfasthet	s. 71
Figur 6.16 – Arbeidsdiagram strekk, ND-ref til venstre og LWAC-ref til høyre	s. 71
Figur 6.17 – Arbeidsdiagram strekk, LWAC-1,0SF til venstre og LWAC-1,5SF til høyre	s. 72
Figur 6.18 – Arbeidsdiagram strekk, LWAC-1,5BF til venstre, og LWAC-3,0BF til høyre	s. 72
Figur 6.19 – Resultater karakteristisk lengde	s. 74
Figur 6.20 – Brittleness number	s. 75
Figur 6.21 – Brudd- og risslast	s. 76
Figur 6.22 – ND-ref	s. 76
Figur 6.23 - LWAC-ref	s. 77
Figur 6.24 - LWAC-1,0SF	s. 77
Figur 6.25 - LWAC-1,5SF	s. 78
Figur 6.26 - LWAC-1,5BF	s. 78
Figur 6.27 - LWAC-3,0BF	s. 79

## 9.0 Tabell liste

Tabell 2.1 – De fire hoved mineralene	s. 13
Tabell 2.2 – SP-stoff	s. 14
Tabell 5.1 – Forsøksoversikt	s. 36
Tabell 5.2 – Blandingsforhold	s. 36
Tabell 5.3 – Forhold CMOD og $\delta$ [ns.-en 14651]	s. 47
Tabell 6.1 – Prøveresultater for fersk betong	s. 55
Tabell 6.2 – Sylindrefasthet 7 døgn	s. 58
Tabell 6.3 – Sylindrefasthet 28 døgn	s. 59
Tabell 6.4 – Spaltestrekkfasthet	s. 60
Tabell 6.5 – Resultater arbeidsdiagram trykk	s. 61
Tabell 6.6 – Målt og beregnet tøyingsverdier	s. 62
Tabell 6.7 – Bøyestrek resultat ND-ref	s. 64
Tabell 6.8 – Bøyestrek resultat LWAC-ref	s. 65
Tabell 6.9 – Bøyestrek resultat LWAC-1,0SF	s. 66
Tabell 6.10 – Bøyestrek resultater LWAC-1,5SF	s. 67
Tabell 6.11 – Bøyestrek resultater LWAC-1,5BF	s. 68
Tabell 6.12 – Bøyestrek resultater LWAC-3,0BF	s. 69
Tabell 6.13 – Gjennomsnittlige strekkprøvningsresultater for de 2 prøvebjelkene	s. 70
Tabell 6.14 – Gjennomsnittlige resultater bruddseighet	s. 73
Tabell 6.15 – Resultater stor bjelke	s. 75

## 10 Referanser

- [1] Jacobsen S. Concrete Technology 1: Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2012
- [2] Jahren P. Betong: Historie og Historier, Trondheim, Tapir akademisk forlag 2011
- [3] Søpler B. Betongboka, Oslo, Norcem: Gyldendal Undervisning, 2004
- [4] Gjerp P, Opsahl M, Smeplass S, Grunnleggende Betongteknologi, Lillestrøm, Byggenæringens forlag, 2004
- [5] Kanstad T. Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner: COIN Project report 29, 2011
- [6] Nawy E. Fundamentals of High performance concrete, New York, John Wiley & sons, 2001
- [7] Aitcin P-C. High Performance Concrete, London/New York, E & FN Spon, 1998
- [8] SN Leksikon, Bruddmekanikk
- [9] Sørensen S. I. Betongkonstruksjoner – Beregning og dimensjonering etter EC2, Trondheim, Tapir akademisk forlag, 2010
- [10] Ulfkjær, Henriksen, Aarup. Fracture behaviour of reinforced ultra high strength concrete beams with stirrups, Ålborg, 1995
- [11] Bratfos HA. Kapittel 2: Lineær-elastisk bruddmekanikk, Forelesningsnotater i MEK 4520 Brudmekanikk, Oslo
- [12] Standard N. NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008, Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger, 2004
- [13] Standard N. NS-EN 206-1:2000+NA:2007: Betong. Del 1: Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og ansvar, 2000
- [14] Standard N. NS-EN 14651:2005+A1:2007, Prøvingsmetode for betong med metalliske fibre. Måling av bøyestrekkefasthet, 2007
- [15] Standard N. NS-EN 12350-2:2000, Prøving av fersk betong, Del 2: Synkmål, 2000
- [16] Standard N. NS-EN 12350-6:2000, Prøving av fersk betong, Del 6: Densitet, 2000
- [17] Standard N. NS-EN 12350-7:2000, Prøving av fersk betong, Del 7: Luftinnhold, 2000

- [18] Standard N. NS-EN 12390-2:2000, Prøving av herdnet betong, Del 1: Form, mål og andre krav til prøvelegemer og former
- [19] Standard N. NS-EN 12390-2:2000, Prøving av herdnet betong, Del 2: Støping og herdning av prøvelegemer for fasthetsprøving
- [20] Standard N. NS-EN 12390-3:2000, Prøving av herdnet betong, Del 3: Prøvelegemets trykkfasthet
- [21] Standard N. NS-EN 12390-3:2000, Prøving av herdnet betong, Del 6: Prøvelegemers spaltestrekkfasthet

## 11 Vedlegg

Vedlegg A: Proporsjonering

Vedlegg B: Datablad

B.1 – Lett tilslag

B.2 – Norcem Anlegg FA

B.3 – Superplastiserende tilsetningsstoff

B.4 – Stålfiber

B.5 – Basaltfiber

Vedlegg C: Testresultater

C.1 – Sylindertrykkfasthet

C.2 - Spaltestrekkfasthet

C.3 – Arbeidsdiagram- trykk

C.4 – Bøyestrekfasthet

C.5 – Arbeidsdiagram- strekk

C.6 – Rissutvikling og bruddlast

Vedlegg D: CMOD-diagram, bøyestrekfasthet

### Vedlegg A: Proporsjonering

Prosj./id.: Navn på serie / blandingsnummer

*Blanding 1: Referanse*

Blandevolum:	90 liter
Dato:	11.02
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Jan Erik Wang
Utført av:	Jan Erik Wang Rob Jess

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg	368,8	33,195			33,195
Elkem Microsilica	29,5	2,656	0	2,656	5,311
Flyveaske	75,6	6,805	0	0,000	6,805
Fritt vann	137,4	12,368		-3,452	8,916
Absorbent vann	0,0	0,000			0,000
Forsand 0/8 mm nat. vask.	907,4	81,664	0,0	0,000	81,664
Ardal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Velde 8/16mm	390,2	35,119	0,5	0,176	35,294
Velde 16/22 mm	471,2	42,407	0,2	0,076	42,483
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon	7,4	0,664	82	0,544	0,664
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

32  
40  
~~33,195~~  
11,572

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"      \*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	220				
Utbredelsesmål					
Luft	1,6				
Densitet	2,486				

høtte m/ 8000 van 19650

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	14:00	17:00			
Terninger	4				
150x300 sylindre	4	4			
100x200 sylindre					
1 stor bjelke	1				
små bjelker	4				

Delark "Blandeskjema"



LWAC referanse

Prosj./id.: Navn på serie / blandingsnummer

Blandevolum:	95 liter
Dato:	13.2.2014 1. blanding
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Robin Simonstad

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg FA	410,3	38,980			38,980
Elkem Microsilica	8,2	0,780	0	0,000	0,780
Flyveaske	84,1	7,991	0	0,000	7,991
Fritt vann	138,1	13,121		-0,886	12,235
Absorbert vann	7,1	0,677			0,677
Årdal 0/8 mm nat. vask.	744,8	70,754	0,8	0,566	71,320
Leca 3-6	387,0	36,760	0,0	0,000	36,760
Leca 4-8	320,2	30,420	0,0	0,000	30,420
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamo XS	4,1	0,390	82	0,320	0,390
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

46,97  
12,912

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"      \*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Synk: 160  
luft: 2,5

8040 + 16531

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	700er				
150x300 sylindre	46/35				
100x200 sylindre					

Delark "Blandeskjema"

LWAC-1% sf

Prosj./id.:	Navn på serie / blandingsnummer
-------------	---------------------------------

Blandevolum:	95 liter
Dato:	19.02.2014 - 2. blanding
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Robin Simonstad

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg FA	410,3	38,980			38,980
Elkem Microsilica	8,2	0,780	0	0,000	0,780
Flyveaske	84,1	7,991	0	0,000	7,991
Fritt vann	138,1	13,121		-3,248	9,873
Absorbert vann	7,0	0,667			0,667
Årdal 0/8 mm nat. vask.	733,9	69,717	4,2	2,928	72,645
Leca 3-6	381,3	36,222	0,0	0,000	36,222
Leca 4-8	315,5	29,974	0,0	0,000	29,974
	0	0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
Dynamo XS	4,1	0,390	82	0,320	0,390
		0,0	100	0,000	0,000
		0,0	100	0,000	0,000
		0,0	100	0,000	0,000
Stålfiber	78,0	7,410			7,410
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

-46,97  
10,540

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering" \*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål					
Utbredelsesmål	200				
Luft	2,1				
Densitet					

Dens:  
17101-vekt  
8011-volum

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	dag 7				
150x300 sylindre	41	46			
100x200 sylindre					

↳ utfine sylindere

Delark "Blandeskjema"

LWA - 1.5% sf

Prosj./id.:	Navn på serie / blandingsnummer
-------------	---------------------------------

Blande volum:	95 liter
Dato:	20.02.2014 - 3. blanding
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Robin Simonstad

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg FA	410,3	38,980			38,980
Elkem Microsilica	8,2	0,780	0	0,000	0,780
Flyveaske	84,1	7,991	0	0,000	7,991
Fritt vann	138,1	13,121		-3,226	9,895
Absorbert vann	7,0	0,662			0,662
Årdal 0/8 mm nat. vask.	728,3	69,192	4,2	2,906	72,098
Leca 3-6	378,4	35,949	0,0	0,000	35,949
Leca 4-8	313,1	29,749	0,0	0,000	29,749
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamo XS	4,1	0,390	82	0,320	0,390
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	117,0	11,115			11,115
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

46,97

10,557

→ 14,82 ved 2%

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"      \*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	12				
Utbredelsesmål					
Luft	1,8				
Densitet					

8011  
17546

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

Delark "Blandeskjema"

1,5% basalt

Prosj./id.: Navn på serie / blandingsnummer

Blandevolum:	95 liter
Dato:	12.03.14 - 4. blanding
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Robin Simonstad

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg FA	410,3	38,980			38,980
Elkem Microsilica	8,2	0,780	0	0,000	0,780
Flyveaske	84,1	7,991	0	0,000	7,991
Fritt vann	138,1	13,121		-1,852	11,269
Absorbent vann	7,0	0,662			0,662
Årdal 0/8 mm nat. vask.	728,3	69,192	2,0	1,384	70,576
Leca 3-6	378,4	35,949	0,0	0,000	35,949
Leca 4-8	313,1	29,749	0,5	0,149	29,897
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamo XS	4,1	0,390	82	0,320	0,390
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	15,0	1,425			1,425

46,97

11,931

2,71

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"      \*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål	13				
Utbredelsesmål					
Luft	1,5				
Densitet					

16688/8017

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

Delark "Blandeskjema"

3.0% basalt

Proj./id.: Navn på serie / blandingsnummer

Blandevolum:	93 liter
Dato:	13.03.2014 - 5. blanding
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Robin Simonstad

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg FA	410,3	38,160			38,160
Elkem Microsilica	8,2	0,763	0	0,000	0,763
Flyveaske	84,1	7,823	0	0,000	7,823
Fritt vann	138,1	12,845		-1,779	11,065
Absorbent vann	6,8	0,633			0,633
Årdal 0/8 mm nat. vask.	711,8	66,195	2,0	1,324	67,519
Leca 3-6	369,8	34,392	0,0	0,000	34,392
Leca 4-8	306,0	28,460	0,5	0,142	28,602
	0	0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
		0,0	0,0	0,000	0,000
Dynamo XS	4,1	0,382	82	0,313	0,382
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	57,0	5,301			5,301

45.98

11,699

x2 = 0,764

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"      \*\* NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

**Fersk betong**

Tid etter vanntilsetning				
Synkmål	11			
Utbredelsesmål				
Luft	1,4			
Densitet				

16916 / 8011

**Prøvestykker (antall)**

Utstøpningstidspunkt				
Teminger				
150x300 sylindre				
100x200 sylindre				

Delark "Blandeskjema"

## Vedlegg B: Datablad

### B.1 – Lett tilslag

#### PRODUCT SPECIFICATION OF FILTRALITE® Filter media

#### FILTRALITE® HR 3-6 mm

Commercial name	FILTRALITE® HR 3-6 mm
Density	Bulk density: 825 kg/m <sup>3</sup> particle density: 1450 kg/m <sup>3</sup>
Type of material	Expanded clay
Appearance	Round particles, smooth surface structure
Manufactured by	maxit Leca Rælingen, Norway

Size and weight	Value	Deviation	Comments
Effective size	3,5 mm	± 0,3 mm	d <sub>10</sub>
Particle size range	3-6 mm	< 2,5 mm max 3 % + Δ < 0,125 mm > 6,0 mm max. 5 %	
Coefficient of uniformity	< 1,5		d <sub>60</sub> / d <sub>10</sub>
Bulk density, dry	825 kg/m <sup>3</sup>	± 75 kg/m <sup>3</sup>	EN 1097-3
Particle density, dry (PDD)	1450 kg/m <sup>3</sup>	± 100 kg/m <sup>3</sup>	Exclay Norm

Other properties	Value	Comments
Floating particles	< 2%	Maximum volume floating particles after 2 days in water.
Particle porosity	46 %	Porosity internal particle: (1-PDD/2700 kg/m <sup>3</sup> )*100
Voids	43 %	EN 1097-3
Acid solubility	< 4 %	EN 12902
Friability loss	< 4 %	EN 12902
Water adsorption 1 day	10 %	Approximately value. Exclay Norm
Water adsorption 28 days	25 %	Approximately value. Exclay Norm
Water adsorption 1 year	30 %	Approximately value. Exclay Norm
Settling velocity	0,2 m/s	Approximately value. Exclay Norm (water saturated)
Mohs' hardness	6	

Chemical composition, average values:

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	C <sub>tot</sub>
62%	18%	7%	4%	3%	3%	2%	0,02%

<b>maxit as</b> P.O. Box 216 Alnabru 0614 Oslo, Norway	<u>Further information:</u> www.filtralite.com E-mail: info@filtralite.com	<u>Telephone:</u> +47 22 88 77 00 <u>Telefax:</u> +47 22 64 54 54
--	--	--



**PRODUCT SPECIFICATION OF FILTRALITE®**  
Filter media

**FILTRALITE® HR 4-8 mm**

Commercial name	FILTRALITE® HR 4-8 mm
Density	Bulk density: 800 kg/m <sup>3</sup> particle density: 1400 kg/m <sup>3</sup>
Type of material	Expanded clay
Appearance	Round particles, smooth surface structure
Manufactured by	maxit Leca Rælingen, Norway

Size and weight	Value	Deviation	Comments
Effective size	4,6 mm	± 0,4 mm	d <sub>10</sub>
Particle size range	4-8 mm	< 4,0 mm max. 5 % +Δ<0,125 mm > 8,0 mm max. 5 %	
Coefficient of uniformity	< 1,5		d <sub>60</sub> / d <sub>10</sub>
Bulk density, dry	800 kg/m <sup>3</sup>	± 75 kg/m <sup>3</sup>	EN 1097-3
Particle density, dry (PDD)	1400 kg/m <sup>3</sup>	± 100 kg/m <sup>3</sup>	Exclay Norm

Other properties	Value	Comments
Floating particles	< 2 %	Maximum volume floating particles after 2 days in water.
Particle porosity	48 %	Porosity internal particle: (1-PDD/2700 kg/m <sup>3</sup> )*100
Voids	43 %	EN 1097-3
Acid solubility	< 4 %	EN 12902
Friability loss	< 4 %	EN 12902
Water absorption 24 hours	11 %	Approximately value. Exclay Norm
Water absorption 28 days	22 %	Approximately value. Exclay Norm
Water absorption 1 year	32 %	Approximately value. Exclay Norm
Settling velocity	0.2 m/s	Approximately value. Exclay Norm (water saturated)
Mohs' hardness	6	

Chemical composition, average values:

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	C <sub>tot</sub>
62%	18%	7%	4%	3%	3%	2%	0,02%

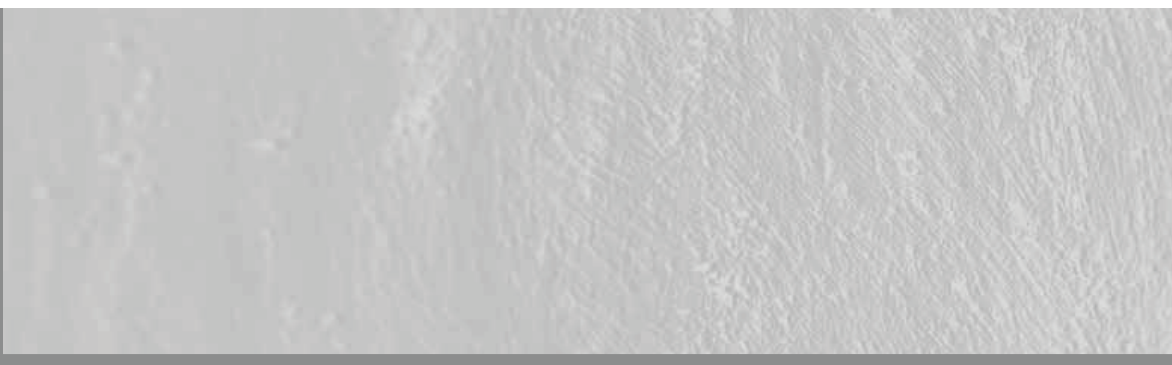
<b>maxit as</b> P.O. Box 216 Alnabru 0614 Oslo, Norway	<u>Further information:</u> www.filtralite.com E-mail: info@filtralite.com	<u>Telephone:</u> +47 22 88 77 00 <u>Telefax:</u> +47 22 64 54 54
--	--	--



## B.2 – Norcem Anlegg FA







### Tekniske data

Norcem Anleggsement FA tilfredsstiller kravene til Portland flygeaskesement.

NS-EN 197-1-CEM II/A-V 42,5 N

#### Kjemiske data

Egenskap	Retningsgivende verdier	Krav ifølge NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	390 m <sup>2</sup> /kg	
Alkali (ekv Na <sub>2</sub> O <sub>ekv</sub> )*	0,6 %	
Flyveaskeinnhold	17%	6 - 20%
Sulfat (SO <sub>3</sub> )	2,7%	≤ 2 - 3 %
Klorid	< 0,0 85 %	≤ 0,1%
Vannløselig Cr <sup>6+</sup>	< 2ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt	2,99 kg/dm <sup>3</sup>	

\*Alkali innhold i klinkerdel

#### Fysikalske data

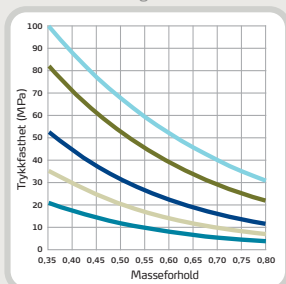
Egenskap	Retningsgivende verdier	Krav ifølge NS-EN 197-1
Trykkfasthet 1 døgn	15 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	24 MPa	≥ 10 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	37M Pa	
Trykkfasthet 28 døgn	55 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende bindetid	165 min	≥ 60 min
Ekspansjon	1mm	≤ 10 mm



www.norcem.no

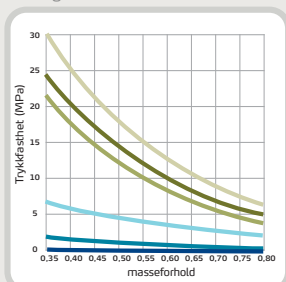


Fasthetsutvikling



Figur 1

Tidligfasthet



Figur 2

## Fasthetsutvikling

Fasthetsutvikling er en sentral egenskap for planlegging, styring og utførelse av alle betongarbeider. Fasthetsutviklingen er avhengig av sementtype, masseforhold, herdebetingelser (temperatur, tid og fuktighet) og eventuell bruk av tilsetningsmaterialer eller -stoffer. I figur 1 er vist trykklfasthetsutviklingen som funksjon av masseforhold og alder ved 20°C vannlagring for betong med Norcem Anleggsement FA.

## Tidligfasthet

Tidligfastheten i betong er meget avhengig av temperatur og eventuell dosering av tilsetningsstoff med retarderende effekt. I figur 2 er vist trykklfasthet i betong etter 1 døgn med forskjellig masseforhold med og uten 1% plastiserende tilsetningsstoff (P-stoff) med Anleggsement FA. Prøvene er lagret ved 95% luftfuktighet ved varierende temperatur.

## Fasthetsklasse – masseforhold

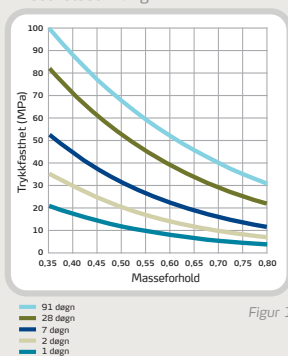
Med normal, god styring av betongproduksjonen er det behov for en overhøyde på ca. 5 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Anleggsement FA gir følgende retningsgivende verdier for største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring.

Fasthetsklasse	B30	B35	B45	B55
Største masseforhold	0,57	0,52	0,45	0,38
Største masseforhold med 5% silika				0,40

Tabell 1



Fasthetsutvikling

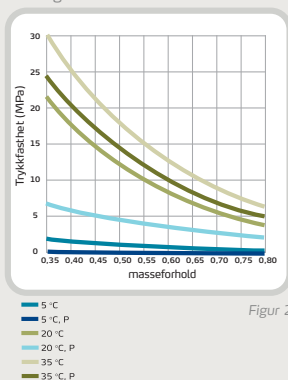


Figur 1

### Fasthetsutvikling

Fasthetsutvikling er en sentral egenskap for planlegging, styring og utførelse av alle betongarbeider. Fasthetsutviklingen er avhengig av sementtype, masseforhold, herdebetingelser (temperatur, tid og fuktighet) og eventuell bruk av tilsetningsmaterialer eller -stoffer. I figur 1 er vist trykfasthetsutviklingen som funksjon av masseforhold og alder ved 20°C vannlagring for betong med Norcem Anleggsement FA.

Tidligfasthet



Figur 2

### Tidligfasthet

Tidligfastheten i betong er meget avhengig av temperatur og eventuell dosering av tilsetningsstoff med retarderende effekt. I figur 2 er vist trykfasthet i betong etter 1 døgn med forskjellig masseforhold med og uten 1% plastiserende tilsetningsstoff (P-stoff) med Anleggsement FA. Prøvene er lagret ved 95% luftfuktighet ved varierende temperatur.

### Fasthetsklasse – masseforhold

Med normal, god styring av betongproduksjonen er det behov for en overhøyde på ca. 5 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Anleggsement FA gir følgende retningsgivende verdier for største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring.

Fasthetsklasse	B30	B35	B45	B55
Største masseforhold	0,57	0,52	0,45	0,38
Største masseforhold med 5% silika				0,40

Tabell 1

## B.3 – Superplastiserende tilsetningsstoff



### PRODUKTBESKRIVELSE

**Dynamon SX-N** er et svært effektivt superplastiserende tilsetningsstoff basert på modifiserte akrylpolymerer.

Produktet tilhører Dynamonsystemet basert på den Mapeiutviklede DPP-teknologien (DPP = Designed Performance Polymers) der tilsetningsstoffenes egenskaper skreddersys til ulike betongformål.

Dynamonsystemet er utviklet på basis av Mapeis egen sammenstilling og produksjon av monomerer.

### BRUKSOMRADE

**Dynamon SX-N** er et tilnærmet allround-produkt som er anvendelig i all betong for å øke støpeligheten og/eller redusere tilsatt vannmengde.

Noen spesielle bruksområder er:

- Vann tett betong med krav til høy eller svært høy fasthet og med strenge krav til bestandighet i aggressive miljøer.
- Betong med særlige krav til høy støpelighet; i konsistensklasser S4 og S5 etter NS-EN 206-1.
- Selvkomprimerende betong med ønske om lengre åpentid. Om nødvendig kan SKB stabiliseres med en viskositetsøker – f.eks. **Viscofluid TA**.
- Til produksjon av frostbestandig betong – da i kombinasjon med luftinnførende tilsetningsstoffer - f.eks. **Mapeair L** eller **Mapeair 25**. Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.
- Til golvstøp for å oppnå en smidig betong med bedret støpelighet. Store doseringer og lave temperaturer kan retardere betongen noe.

**Dynamon SX-N** skiller seg vesentlig fra superplastiserende tilsetningsstoffer basert på sulfonerte melaminer eller naftalener, og også fra første generasjon akrylbaserte polymerer både gjennom sin effektivitet som vannreducerer og sin forlenging av åpentid/slumptid.

Den doseringsmengde som trengs for å oppnå en bestemt støpelighet vil derfor være lavere for **Dynamon SX-N** enn for tidligere SP-stoffer. Med forlengingen av åpentiden vil det nå ved vanlige leveranser være mulig å gjøre betongen ferdig på betongstasjonen, og "oppfrisking" med SP-stoffer på byggeplass blir mindre aktuelt.

Det er likevel ikke noe problem å etterdosere stoffet direkte i automikser. Doseringstidspunktet for

**Dynamon SX-N** er mindre viktig, men dersom **Dynamon SX-N** tilsettes etter at minst 80% av blandevannet er inne, vil blandetiden generelt være kortest. Det er likevel viktig med utprøvinger tilpasset eget blandeutstyr.



### Produsent:

Rescon Mapei AS  
Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway  
Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99  
post@resconmapei.no  
www.resconmapei.com





#### EGENSKAPER

**Dynamon SX-N** er en vannløsning av aktive akrylpolymerer som effektivt dispergerer (løser opp) sementklaser.

Denne effekten kan prinsipielt utnyttes på tre måter:

1. For å redusere mengden tilsatt vann, men samtidig beholde betongens støpelighet.  
Lavere w/c-forhold gir høyere fasthet, tetthet og bestandighet i betongen.
2. For å forbedre støpeligheten sammenlignet med betonger med samme w/c-forhold. Fastheten forblir dermed den samme, men muliggjør forenklet utstøping.
3. For å redusere både vann og sementmengde uten å forandre betongens mekaniske styrke. Gjennom denne metoden kan en blant annet redusere kostnadene (mindre sement), redusere betongens svinnpotensial (mindre vann) og redusere faren for temperaturgradienter på grunn av lavere hydrasjonsvarme. Spesielt er denne siste effekten viktig ved betonger med større sementmengder.

#### VÆR OPPMERKSOM PÅ

**Dynamon SX-N** lar seg kombinere med andre Rescon Mapei tilsetningsstoffer, som f.eks størkningsakselererende stoffer som **Mapequick SA** og størkningsretarderende stoffer som **Mapetard R**. Produktet lar seg også kombinere med luftinnførende tilsetningsstoffer for produksjon av frostbestandig betong, f.eks. **Mapeair L** eller **Mapeair 25**.

Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.

#### EMBALLASJE

**Dynamon SX-N** leveres i 25 liters kanner, 200 liters fat, i 1000 liters containere og i bulk. Produktet må oppbevares ved temperaturer mellom +8°C og +35°C og bevarer sine egenskaper i minst ett år i lukket emballasje. Fargenyanser kan oppstå i produksjon av polymerene som inngår i **Dynamon EX**, men dette påvirker ikke produktets bruksegenskaper. Produktet bør røres forsiktig om før bruk for å sikre et homogent og likevirkende produkt. Produktet bør ikke utsettes for sollys.

TEKNISKE SPESIFIKASJONER		
Form:	Væske	
Farge:	Gulbrun	
Viskositet:	Lettflytende; <30 mPa · S	
Tørrestoffinnhold, %:	18,5 ± 1,0	
Spesifikk vekt, g/cm <sup>3</sup> :	1,06 ± 0,02	
pH-verdi:	6,5 ± 1	
Kloridinnhold, %:	< 0,01	
Alkaliinnhold (Na <sub>2</sub> O-ekvivalenter) %:	< 2,0	
BRUKSEGENSKAPER I BETONG		
<i>Som vannreducerende stoff (lik konsistens) T 3.1</i>		
Sementmengde kg/m <sup>3</sup> (Norcem standard)	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt)	0	1,0
Masseforhold (w/c-tall)	0,51	0,41
Vannreduksjon (%)	-	20
Trykkfasthet (i N/mm <sup>2</sup> ):		
1 døgn	26	41
7 døgn	42	60
28 døgn	52	68
<i>Som SP-stoff (slumpforbedrer) T 3.2</i>		
Sementmengde, kg/m <sup>3</sup> (Norcem standard sement):	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt):	0	1,0
Masseforhold (w/c-tall):	0,48	0,48
Luftinnhold:	2,1	1,8
Konsistens, mm:		
- synkmål, 5 min	30	220
- synkmål, 30 min	20	200
- synkutbedrelse, 5 min		420
- synkutbedrelse, 30 min		380

**Produsent:**  
Rescon Mapei AS  
Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway  
Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99  
post@resconmapei.no  
www.resconmapei.com





#### DOSERING

**Dynamon SX-N** tilsettes for å oppnå ønsket resultat (styrke, bestandighet, støpelighet, sementreduksjon) ved å variere doseringen mellom 0,3 og 2,0% av sementmengden.

Ved øket dosering økes også betongens åpentid, dvs. tiden betongen lar seg bearbeide.

Større doseringsmengder og lave betongtemperaturer gir en retardert betong. Vi anbefaler alltid prøvestøper med aktuelle parametere.

Til forskjell fra konvensjonelle melamin- eller naftalenbaserte superplastiserende tilsetningsstoffer, utvikler **Dynamon SX-N** maksimal effekt uavhengig av tilsetnings-tidspunkt, men tilsetningstidspunktet kan påvirke nødvendig blandetid.

Dersom **Dynamon SX-N** tilsettes etter at minst 80% av blandevannet er inne vil blandetiden generelt være kortest. Det er likevel viktig med utprøvinger tilpasset eget blandeutstyr.

**Dynamon SX-N** kan også tilsettes direkte i automikser på bygg- eller anleggsplass. Betongen bør da blandes med maksimal hastighet på trommelen i minst 5 minutter, pluss ett minutt pr. m<sup>3</sup> betong i lasset.

#### VERNETILTAK

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon, se eget HMS-datablad. HMS-databladene finnes på [www.resconmapei.com](http://www.resconmapei.com)

#### MERK

*De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene.*

*All ovenstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.*

*Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse*

*Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.*

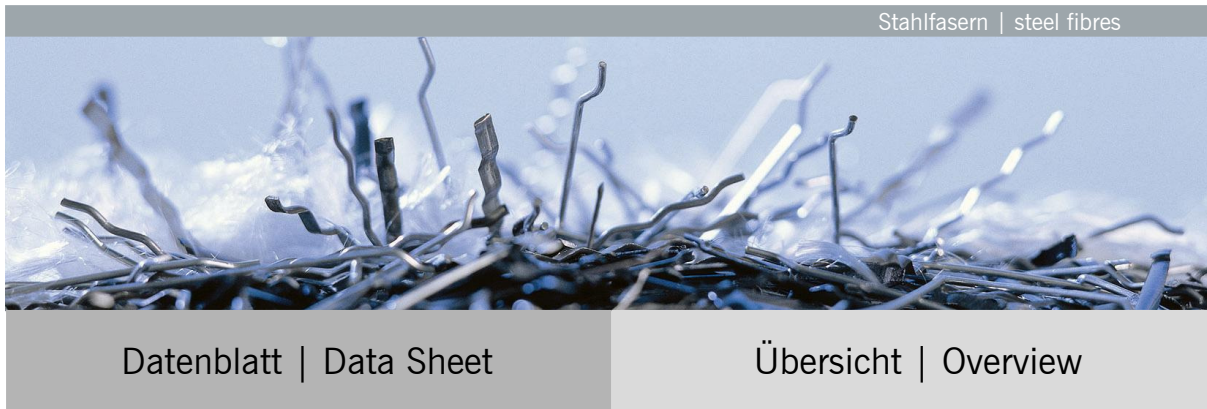
*Alle leveranser fra Rescon Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser, som anses akseptert ved bestilling.*

#### Produsent:

Rescon Mapei AS  
Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway  
Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99  
post@resconmapei.no  
www.resconmapei.com

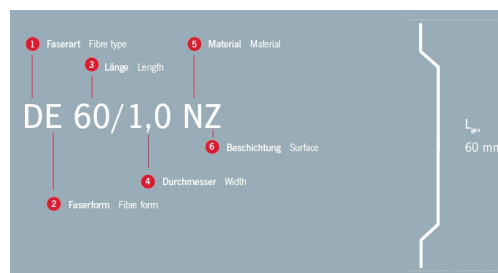


## B.4 – Stålfiber



### KrampeHarex® Stahldrahtfaser mit Endverankerung | steel wire fibre with hooked ends

Bei der Herstellung von Drahtfasern werden Drähte verschiedener Durchmesser und Festigkeiten, je nach gewünschtem Stahlfasertyp, durch zwei gegenläufige Walzen geführt. Hierbei werden je nach verwendetem Segment auf den Walzen die Drähte in ihre spezielle Form gebogen und auf Länge geschnitten. KrampeHarex Stahldrahtfasern werden standardmäßig in 30 mm, 45 mm, 50 mm und 60 mm Länge hergestellt. Die Drahtdurchmesser liegen zwischen 0,5 mm und 1,2 mm. Zur Verankerung in der Betonmatrix besitzen sie entweder Endhaken oder sind über die gesamte Länge gewellt. Die Wahl der jeweiligen Fasertypen wird durch den Anwendungsfall bestimmt. Es gilt jedoch je länger und dünner Drahtfasern sind, desto schwerer sind sie zu dosieren und zu verarbeiten. Da Schlankheiten (Länge/Durchmesser) von mehr als 60 nur mit zusätzlichen Maßnahmen, wie zum Beispiel Einblasgeräten zu dosieren sind, haben sich im üblichen Industriebodenbau und Wohnungsbau die Fasertypen DE 50/1,0 N und DE 60/1,0 N bewährt. Bei höheren Betongüten müssen auch die Festigkeiten der Stahlfasern erhöht werden. Hier können mittelfeste (z.B. DE 60/1,0 M) oder hochfeste Fasern eingesetzt werden (z.B. DE 60/1,0 H) werden. Drahtfasern sind in der Lage Risse zu überbrücken und so Kräfte von Rissufer zu Rissufer zu übertragen. Der Stahlfaserbeton mit Drahtfasern ist duktil und kann im gerissenen Zustand noch Kräfte aufnehmen.



For manufacturing wire fibres, wires of different diameters and strengths according to the desired type of steel fibre are passed through two rollers working in opposite direction. Depending on the segment used on the rollers, the wires are bent to their specific form and cut to length in the course of this operation. KrampeHarex steel wire fibres are normally manufactured in lengths of 30 mm, 45 mm, 50 mm and 60 mm. The wire diameters range from 0.5 mm to 1.2 mm. For anchorage in the concrete matrix, they either possess hooked ends or are corrugated over the whole length. The selection of the respective type of fibre depends on the case of application. However, the longer and thinner the wire fibres, the more difficult they are to be dosed and worked. As aspect ratios (length/diameter) over 60 may only be dosed by means of additional measures, such as injection devices, the fibre types DE 50/1.0 N and DE 60/1.0 N have proved successful in conventional industrial flooring and house building. When using superior concrete grades, also the strengths of the steel fibres should be increased. In this case, fibres of medium strength (e.g. DE 60/1.0 M) or high strength (e.g. DE 60/1.0 H) may be used. Wire fibres are able to bridge cracks, and thus to transmit forces from one crack edge to the other. Concrete reinforced by wire fibres is characterised by ductility and may even accept forces after cracking.



KrampeHarex® GmbH & Co. KG · Pferdekamp 6-8 · 59075 Hamm · Germany  
Phone +49 (0)23 81 · 977 977 · Fax +49 (0) 23 81 · 977 955 · www.krampeharex.com · info@krampeharex.com

KrampeHarex® CZ spol. s.r.o. · Osvořeni 234 · 664 81 Ostrovačice · Czech Republic  
Phone +42 (0) 549 · 245 064 · Fax +42 (0) 0549 · 245 065 · www.krampeharex.cz · info@krampeharex.cz

KrampeHarex® Fibrin Gesellschaft mbH & Co. KG · Lindengasse 20 · 4040 Linz · Austria  
Phone +43 (0) 732 731 011 · Fax +43 (0) 732 · 731 011 73 · www.krampefibrin.com · info@krampefibrin.com



Bezeichnung Name	Länge Length (mm)	Durchmesser Diameter (mm)	Querschnitt Cross section	Form Shape	Material Material	Werkstoff-Nr. Material-No.	Zugfestigkeit Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
DE 60/1,0 N DE 60/1,0 M DE 60/1,0 H	60 ±10%	1,00 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1100 ±15% 1400 ±15% 2400 ±15%
DE 60/0,8 N DE 60/0,8 M DE 60/0,8 H	60 ±10%	0,80 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 60/0,6 N DE 60/0,6 M DE 60/0,6 H	60 ±10%	0,60 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 50/1,0 N DE 50/1,0 M DE 50/1,0 H	50 ±10%	1,00 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1100 ±15% 1400 ±15% 2400 ±15%
DE 50/0,8 N DE 50/0,8 M DE 50/0,8 H	50 ±10%	0,80 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 50/0,6 N DE 50/0,6 M DE 50/0,6 H	50 ±10%	0,60 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 45/1,0 N DE 45/1,0 M DE 45/1,0 H	45 ±10%	1,00 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1100 ±15% 1400 ±15% 2400 ±15%
DE 45/0,8 N DE 45/0,8 M DE 45/0,8 H	45 ±10%	0,80 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 35/0,8 N DE 35/0,8 M DE 35/0,8 H	35 ±10%	0,80 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 35/0,6 N DE 35/0,6 M DE 35/0,6 H	35 ±10%	0,60 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 35/0,5 N DE 35/0,5 M DE 35/0,5 H	35 ±10%	0,50 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 30/0,8 N DE 30/0,8 M DE 30/0,8 H	30 ±10%	0,80 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 30/0,6 N DE 30/0,6 M DE 30/0,6 H	30 ±10%	0,60 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%

KrampeHarex® GmbH & Co. KG · Pferdekamp 6-8 · 59075 Hamm · Germany  
Phone +49 (0)23 81 · 977 977 · Fax +49 (0) 23 81 · 977 955 · www.krampeharex.com · info@krampeharex.com

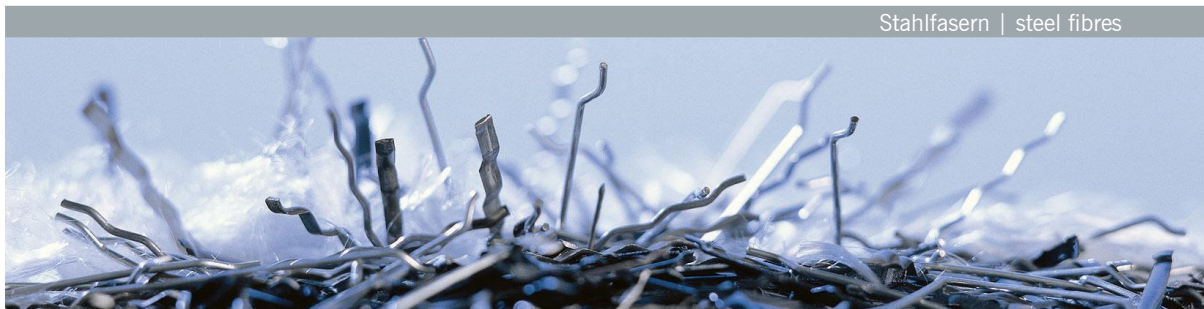
KrampeHarex® CZ spol. s.r.o. · Osvočená 234 · 664 81 Ostrovačice · Czech Republic  
Phone +42 (0) 549 · 245 064 · Fax +42 (0) 0549 · 245 065 · www.krampeharex.cz · info@krampeharex.cz




KrampeHarex® Fibrin Gesellschaft mbH & Co. KG · Lindengasse 20 · 4040 Linz · Austria  
Phone +43 (0) 732 731 011 · Fax +43 (0) 732 · 731 011 73 · www.krampefibrin.com · info@krampefibrin.com





Stahlfasern | steel fibres



Bezeichnung Name	Länge Length (mm)	Durchmesser Diameter (mm)	Querschnitt Cross section	Form Shape	Material Material	Werkstoff-Nr. Material-No.	Zugfestigkeit Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
DE 30/0,5 N DE 30/0,5 M DE 30/0,5 H	30 ±10%	0,50 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 25/0,6 N DE 25/0,6 M DE 25/0,6 H	25 ±10%	0,60 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 25/0,5 N DE 25/0,5 M DE 25/0,5 H	25 ±10%	0,50 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%

KrampeHarex® GmbH & Co. KG · Pferdekamp 6-8 · 59075 Hamm · Germany  
Phone +49 (0)23 81 . 977 977 · Fax +49 (0) 23 81 . 977 955 · www.krampeharex.com · info@krampeharex.com

KrampeHarex® CZ spol. s.r.o. · Osvobocení 234 · 664 81 Ostrovačice · Czech Republic  
Phone +42 (0) 549 . 245 064 · Fax +42 (0) 0549 . 245 065 · www.krampeharex.cz · info@krampeharex.cz

KrampeHarex® Fibrin Gesellschaft mbH & Co. KG · Lindengasse 20 · 4040 Linz · Austria  
Phone +43 (0) 732 731 011 · Fax +43 (0) 732 . 731 011 73 · www.krampefibrin.com · info@krampefibrin.com

## B.5 – Basaltfiber



# ReforceTech™

Basalt Fiber Reinforcement Technology

## CHOPPED BASALT FIBER

**ReforceTech's Chopped Basalt Fiber is an engineered crack control product with high integrity, high thermal resistance and alkali-resistance designed to control shrinkage cracks in concrete.**

ReforceTech's Basalt Fiber's are engineered to have the required properties to process and use the fibers in the aggressive high alkaline concrete applications.

From melted volcanic basalt stone, thin basalt threads are pulled to form continuous filaments at a specified diameter which are coated by a sizing suitable for the concrete applications. These fibres are assembled into basalt strands which are chopped to length as determined by the application..

### FROM RAW MATERIAL TO CHOPPED FIBER

  
*Basalt stone*

⇒

  
*Melted Basalt*

⇒

  
*Fiber*

⇒

  
*Chopped Fiber*

### UNIQUE ADVANTAGES - CHOPPED BASALT FIBERS

<ul style="list-style-type: none"> <li>Non corrosive/ non conductive/ non magnetic</li> <li>High Tensile strength relative to steel, AR glass fibers, and polypropylene</li> <li>Low weight (Density 1/3 of steel)</li> <li>No sharp ends protruding from concrete after mixing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abrasion resistance improved</li> <li>Longer lifetime and lower life cycle costs</li> <li>Improves freeze thaw resistance 1.5 to 2 times</li> <li>Increases chemical resistance due to up to 95% reduction of shrinkage cracks</li> </ul>
--	--

### PROPERTIES

<ul style="list-style-type: none"> <li>Fast and effective mixing</li> <li>Does not float or sink</li> <li>Excellent compatibility with concrete with excellent adhesion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Smooth finish</li> <li>Durable</li> <li>Safe and easy to handle</li> </ul>
--	---

### APPLICATIONS

- Alternative crack control material in commercial and industrial flooring, slabs
- Suitable for aggressive saline environments
- Suitable for areas exposed to high temperatures; airports or industrial floors


---

**Head office:**

ReforceTech Limited (registered no. 470617)  
 Pamdohlen House  
 Dooradoyle Road  
 Limerick  
 Republic of Ireland  
 Phone: +47 66 76 77 80  
 Fax: +47 66 76 77 81  
[www.reforce-tech.com](http://www.reforce-tech.com)

**Subsidiary offices:**

ReforceTech AS  
 Luftveien4  
 NO-3440 Røyken,  
 Norway  
 Org. nr.: NO 957 577 067 MVA



**ReforceTech™** CHOPPED BASALT FIBER  
Basalt Fiber Reinforcement Technology

### MATERIAL PROPERTIES

<p><b>Material - Basalt</b></p> <p><b>Design - Monofilament</b></p> <p><b>Diameter – 13 to 20 µm</b></p> <p><b>Specific Gravity – 2.68 g/cm3</b></p>	<p><b>Color - Bronze</b></p> <p><b>Thermal Operating Range - -260 to + 700 C</b></p> <p><b>Electrical Conductivity - None</b></p> <p><b>Resistance to Corrosion – Non Corrosive</b></p>
--	---

### COMPARISON TO ALTERNATIVE CRACK CONTROL ADDITIVES

	Tensile Strength	E Mod	Density
<b>Basalt Fiber</b>	<b>3200 MPA</b>	<b>90 GPA</b>	<b>2.68</b>
<b>AR Glass Fibers</b>	<b>1700 MPA</b>	<b>72 GPA</b>	<b>1.3</b>
<b>Polypropylene</b>	<b>455 MPA</b>	<b>3.5 GPA</b>	<b>1.34</b>
<b>High Mod Polypropylene</b>	<b>550 MPA</b>	<b>7 GPA</b>	<b>1.14</b>
<b>Steel</b>	<b>1100 MPA</b>	<b>200 GPA</b>	<b>7.2</b>

### DOSAGE

Testing recommended for the specific applicaion, 0.5 to 3.0 Kg per M3 concrete

### PACKAGING

500 Kg bags or alternative sizes as requested

### RECOMMENDATIONS

- Add fibers any time prior to pouring or at site
- Follow ACI or EU design guidelines
- Mix for 3 to 5 minutes
- Do not substitute BF Chopped Fibers for structural reinforcement
- Do not add Water

The information shown here inclusive of all drawings and tables is for informational purposes only. Details are subject to change, every effort has been made to ensure accuracy. The user shall ensure the appropriate guidelines and building codes are followed. ReforceTech has no control over the use of their products and assumes no responsibility for the end products or uses of our materials.

---

<p><b>Head office:</b></p> <p>ReforceTech Limited (registered no. 470617) Pamdohlen House Dooradoyle Road Limerick Republic of Ireland Phone: +47 66 76 77 80 Fax: +47 66 76 77 81 www.reforceotech.com</p>	<p><b>Subsidiary offices:</b></p> <p>ReforceTech AS Luffveien4 NO-3440 Røyken, Norway Org. nr.: NO 957 577 067 MVA</p>
---	--

## Vedlegg C: Testresultater

### C.1 – Sylindertrykkfasthet



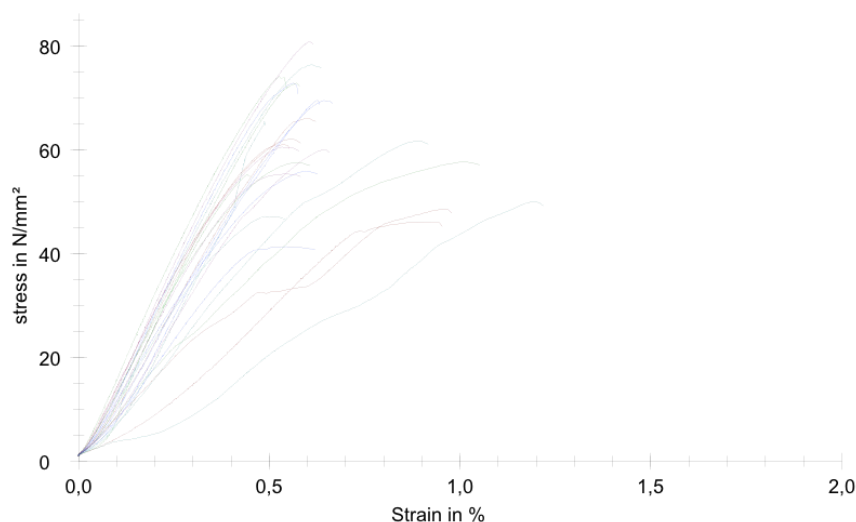
Universitetet i Stavanger

10.04.14

#### Resultater:

Nr	ID	$F_m$ kN	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	d mm	h mm
1	LWAC-ref-dag7	814,49	46,09	150,0	300,0
2	LWAC-ref-dag7	977,83	55,33	150,0	300,0
3	LWAC-1%sf-dag7	730,26	41,32	150,0	300,0
4	LWAC-1%sf-dag7	834,06	47,20	150,0	300,0
5	LWAC-1,5%sf-dag7	978,34	55,36	150,0	300,0
6	LWAC-1,5%sf-dag7	1077,42	60,97	150,0	300,0
7	LWAC-ref-dag28	1310,50	74,16	150,0	300,0
8	LWAC-ref-dag28	1287,28	72,85	150,0	300,0
9	LWAC-ref-dag28	1157,17	65,48	150,0	300,0
10	LWAC-1,5%bf-dag7	1070,29	60,57	150,0	300,0
11	LWAC-1,5%bf-dag7	1097,28	62,09	150,0	300,0
12	LWAC-3,0%bf-dag7	1016,21	57,51	150,0	300,0
13	LWAC-3,0%bf-dag7	987,40	55,88	150,0	300,0
14	LWAC-1,0%sf-dag28	883,50	50,00	150,0	300,0
15	LWAC-1,0%sf-dag28	1061,50	60,07	150,0	300,0
16	LWAC-1,0%sf-dag28	858,29	48,57	150,0	300,0
17	LWAC-1,5%sf-dag28	1019,40	57,69	150,0	300,0
18	LWAC-1,5%sf-dag28	1230,25	69,62	150,0	300,0
19	LWAC-1,5%bf-dag28	1349,86	76,39	150,0	300,0
20	LWAC-1,5%bf-dag28	1430,11	80,93	150,0	300,0
21	LWAC-1,5%bf-dag28	1168,05	66,10	150,0	300,0
23	LWAC-3,0%bf-dag28	1287,05	72,83	150,0	300,0
24	LWAC-3,0%bf-dag28	1228,58	69,52	150,0	300,0
25	LWAC-3,0%bf-dag28	1090,74	61,72	150,0	300,0

#### Grafisk fremstilling:



## C.2 – Spaltestrekkfasthet



Universitetet  
i Stavanger

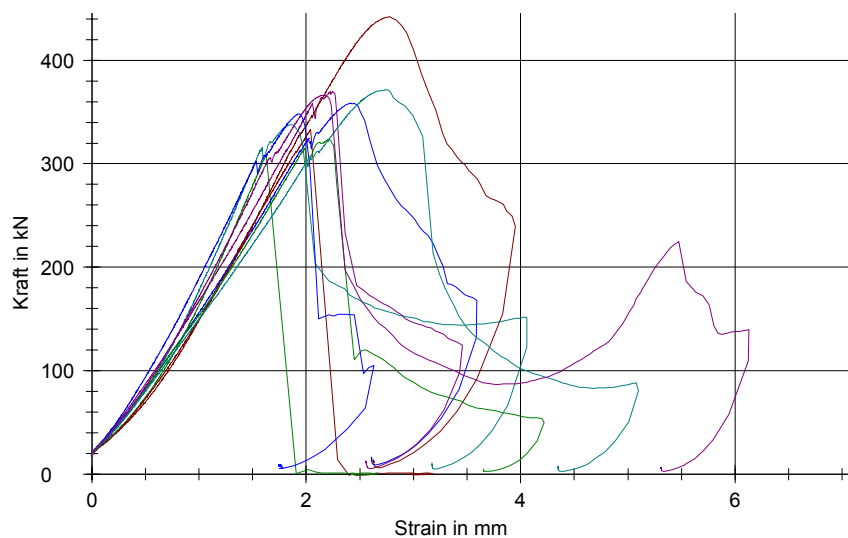
Universitetet i Stavanger

10.04.14

### Resultater:

Nr	d mm	F <sub>m</sub> kN	h mm	ID
1	150,0	333,05	300,0	LWAC-ref-dag28
2	150,0	308,64	300,0	LWAC-ref-dag28
3	150,0	358,49	300,0	LWAC-1,0SF-dag28
4	150,0	337,72	300,0	LWAC-1,0SF-dag28
5	150,0	369,98	300,0	LWAC-1,5SF-dag28
6	150,0	441,95	300,0	LWAC-1,5SF-dag28
7	150,0	323,51	300,0	LWAC-1,5BF-dag28
8	150,0	348,39	300,0	LWAC-1,5BF-dag28
9	150,0	371,42	300,0	LWAC-3,0BF-dag28
10	150,0	366,29	300,0	LWAC-3,0BF-dag28

### Grafisk fremstilling:



Belastningshastigheten = 2,8 kN/s -NS-EN12390-6

### C.3 – Arbeidsdiagram -trykk



Universitetet  
i Stavanger

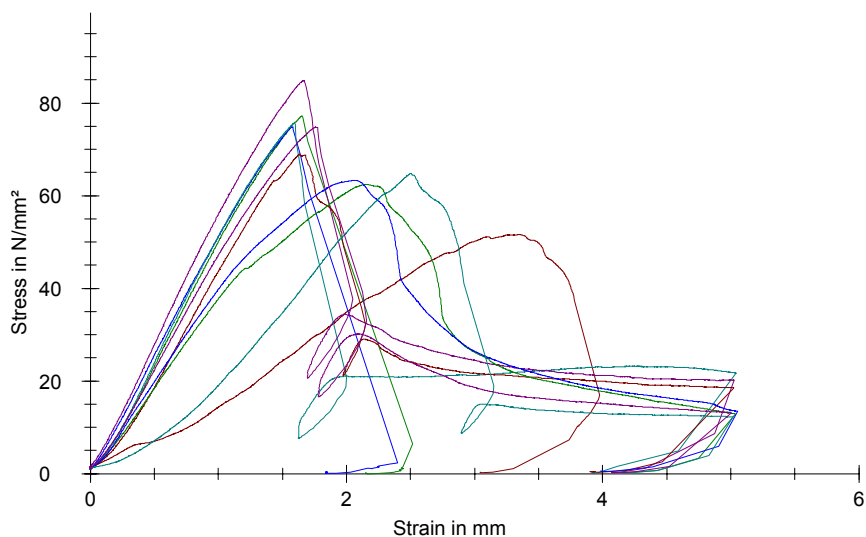
Universitetet i Stavanger

10.04.14

#### Resultater:

Legends	Nr	ID	$F_m$ kN	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	d mm	h mm
	1	Blanding 2 - 02.04	911,89	51,60	150,0	300,0
	2	Blanding 1 - 02.04	1364,93	77,24	150,0	300,0
	3	Blanding 1 - 02.04	1322,66	74,85	150,0	300,0
	4	Blanding 2 - 02.04	1336,86	75,65	150,0	300,0
	5	Blanding 3 - 04.04	1500,27	84,90	150,0	300,0
	6	Blanding 3 - 04.04	1219,17	68,99	150,0	300,0
	7	Blanding 5 - 10.04	1103,37	62,44	150,0	300,0
	8	Blanding 5 - 10.04	1118,66	63,30	150,0	300,0
	9	Blanding 4 - 10.04	1145,44	64,82	150,0	300,0
	10	Blanding 4 - 10.04	1322,07	74,81	150,0	300,0

#### Grafisk fremstilling:



#### Statistikk:

Series n = 10	$F_m$ kN	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	d mm	h mm
$\bar{x}$	1234,53	69,86	150,0	300,0
s	168,80	9,55	0,0	0,0
v	13,67	13,67	0,00	0,00

#### Testen utført av:

## C.4 – Bøyestrekfasthet



Simple standard protocol

03.04.2014

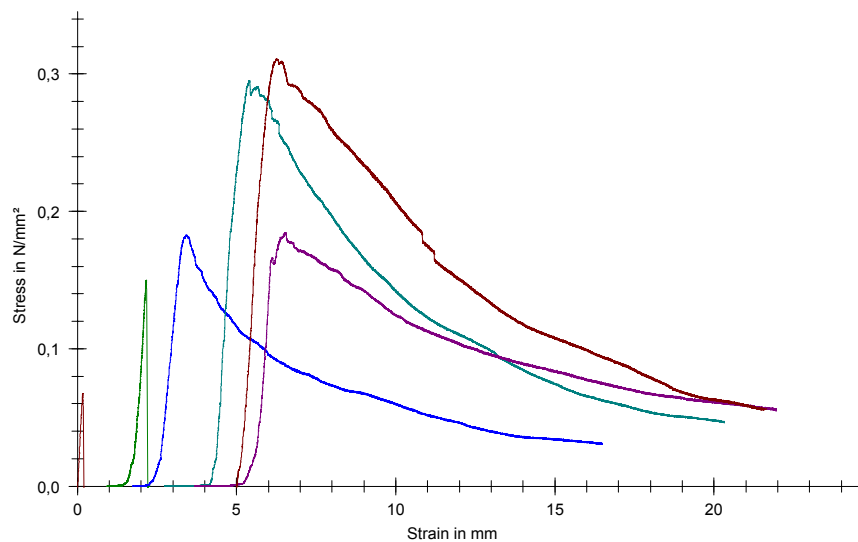
### Parameter table:

Test protocol :	Type strain extensometer :
Tester :	Machine data : Controller TT0322
Customer :	PistonStroke
Test standard :	LoadCell 400 kN
Strength grade :	
Creation date :	
Age : 0 T	
Other :	

### Results:

Nr	a mm	b mm	F <sub>m</sub> kN	ID
1	150,0	550,0	5,58	blanding 1 misslykka
2	150,0	550,0	12,36	blanding1 20.03
3	150,0	550,0	15,07	blanding 2 24.03
4	150,0	550,0	24,34	blanding 3 24.03
5	150,0	550,0	15,22	blanding 2 25.03
6	150,0	550,0	25,66	blanding 3 25.03

### Series graphics:



### Statistics:

Series n = 6	a mm	b mm	F <sub>m</sub> kN
$\bar{x}$	150,0	550,0	16,37
s	0,0	0,0	7,55
v	0,00	0,00	46,13

## C.5 - Arbeidsdiagram -strekk

ND-ref:



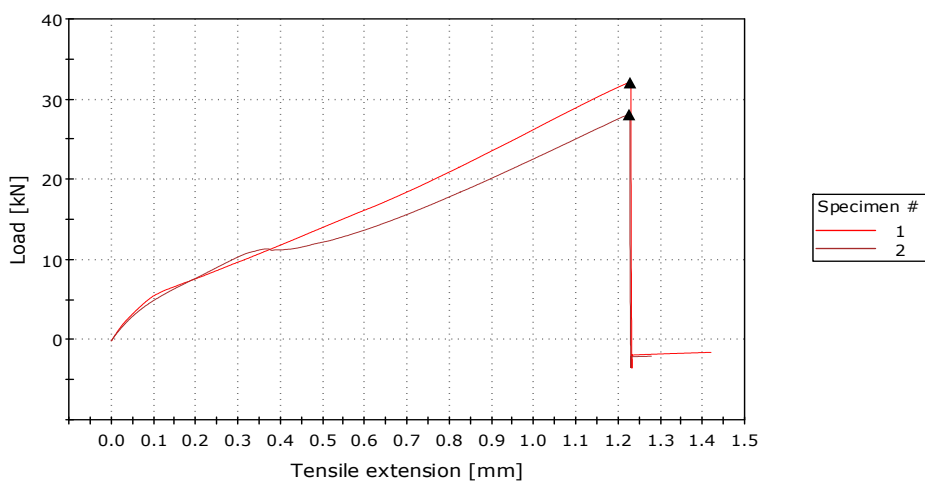
02 May 2014

### Instron Applications Laboratory

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



	Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
	1	> 32.07	0.000	-----	> 1	> 1.22865	> 3.20671	> 1.00000
	2	> 28.11	0.000	-----	> 2	> 1.26133	> 2.81122	> 1.00000
Mean		30.09	0.000	-----	2	1.24499	3.00896	1.00000
Std Dev		2.797	0.000	-----	0.707	0.023	0.280	0.000
Maximum		32.07	0.000	-----	2	1.26133	3.20671	1.00000



LWAC-ref:



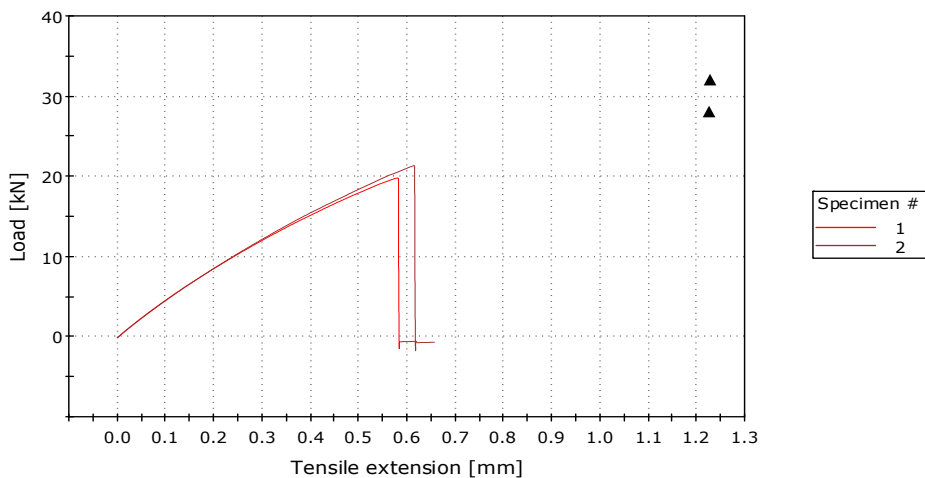
02 May 2014

**Instron Applications Laboratory**

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



	Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
	1	> 19.85	0.000	-----	> 1	> 0.62185	> 1.98505	> 1.00000
	2	> 21.39	0.000	-----	> 2	> 0.67869	> 2.13872	> 1.00000
Mean		20.62	0.000	-----	2	0.65027	2.06188	1.00000
Std Dev		1.087	0.000	-----	0.707	0.040	0.109	0.000
Maximum		21.39	0.000	-----	2	0.67869	2.13872	1.00000

LWAC-1,0SF:



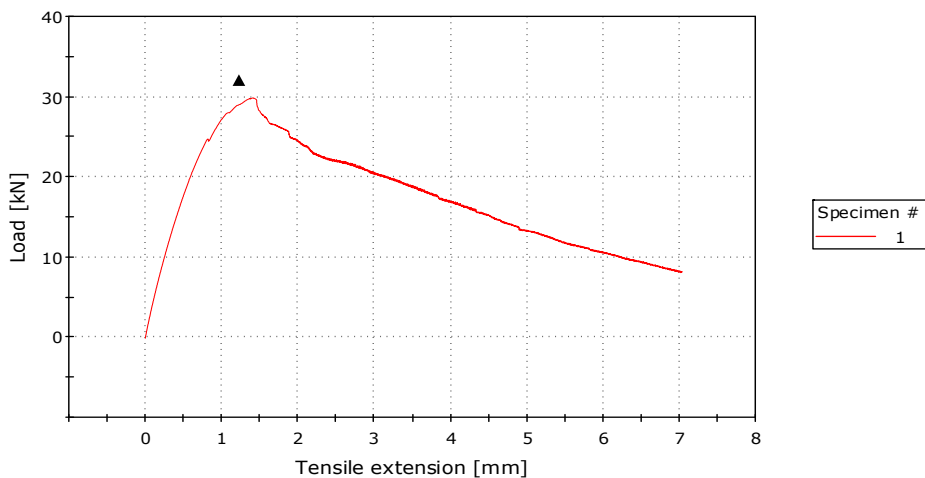
02 May 2014

**Instron Applications Laboratory**

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 1



	Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
	1	> 29.87	0.000	-----	> 1	> 1.44178	> 2.98694	> 1.00000
Mean		29.87	0.000	-----	1	1.44178	2.98694	1.00000
Std		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Dev		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Maximum		29.87	0.000	-----	1	1.44178	2.98694	1.00000

LWAC-1,5SF:



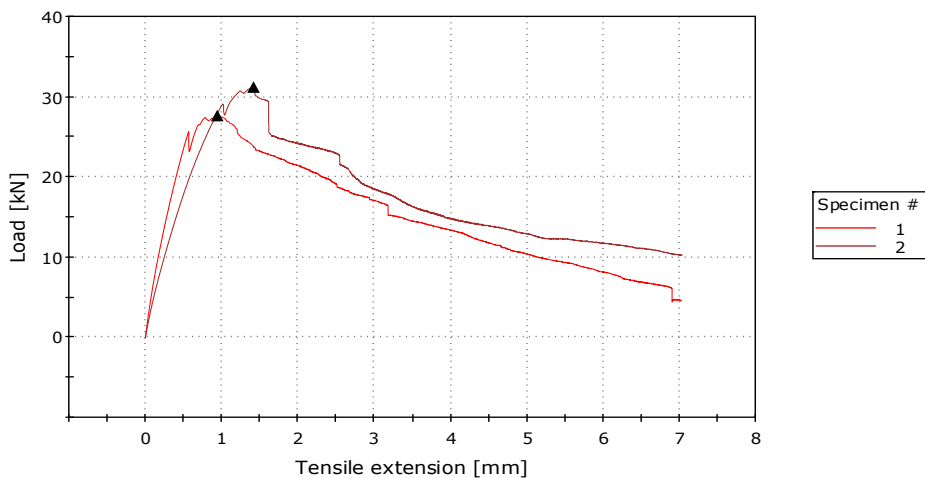
02 May 2014

**Instron Applications Laboratory**

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



	Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
	1	> 27.68	0.000	-----	> 1	> 0.94579	> 2.76776	> 1.00000
	2	> 31.21	0.000	-----	> 2	> 1.47767	> 3.12128	> 1.00000
Mean		29.45	0.000	-----	2	1.21173	2.94452	1.00000
Std Dev		2.500	0.000	-----	0.707	0.376	0.250	0.000
Maximum		31.21	0.000	-----	2	1.47767	3.12128	1.00000

LWAC-1,5BF:



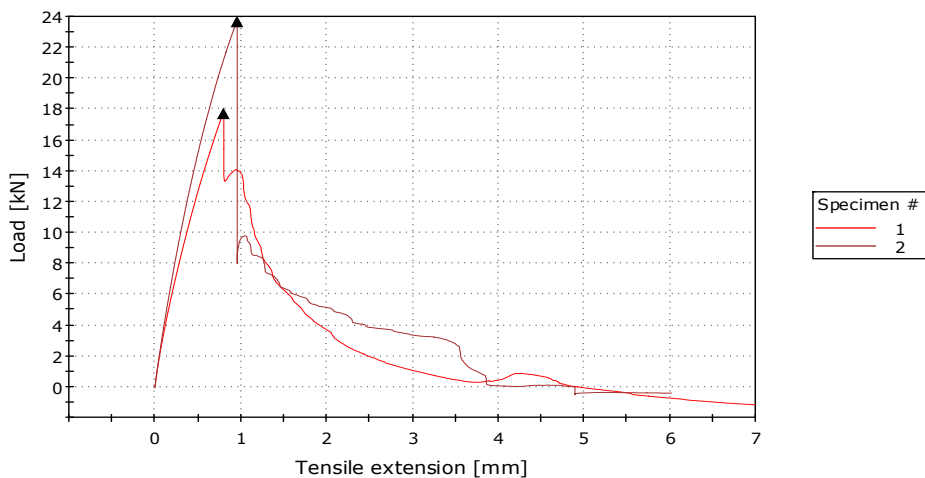
02 May 2014

**Instron Applications Laboratory**

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



	Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
	1	> 17.73	0.000	-----	> 1	> 0.80295	> 1.77250	> 1.00000
	2	> 23.67	0.000	-----	> 2	> 1.02209	> 2.36680	> 1.00000
Mean		20.70	0.000	-----	2	0.91252	2.06965	1.00000
Std Dev		4.202	0.000	-----	0.707	0.155	0.420	0.000
Maximum		23.67	0.000	-----	2	1.02209	2.36680	1.00000

LWAC-3,0BF:



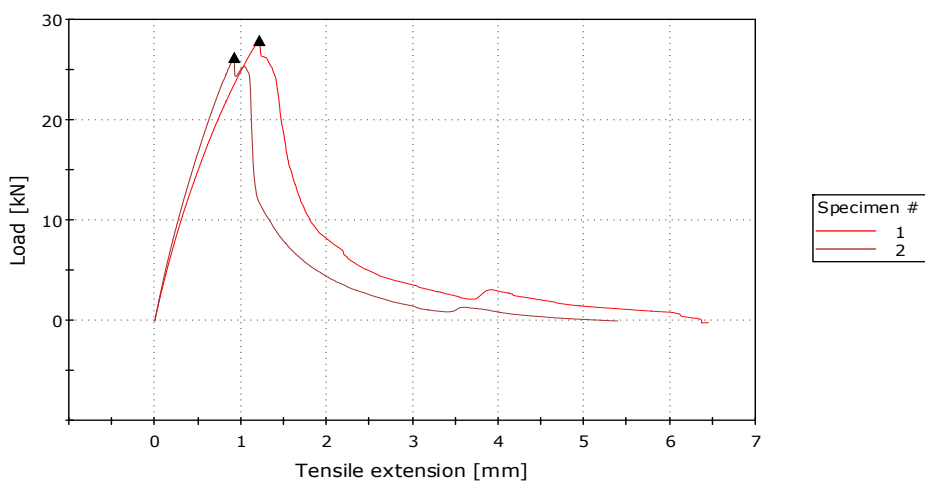
05 May 2014

**Instron Applications Laboratory**

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



	Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
	1	> 27.92	0.000	-----	> 1	> 1.24395	> 2.79208	> 1.00000
	2	> 26.22	0.000	-----	> 2	> 0.92402	> 2.62216	> 1.00000
Mean		27.07	0.000	-----	2	1.08399	2.70712	1.00000
Std Dev		1.202	0.000	-----	0.707	0.226	0.120	0.000
Maximum		27.92	0.000	-----	2	1.24395	2.79208	1.00000

## C.6 – Rissutvikling og bruddlast:



Simple standard protocol

26.05.2014

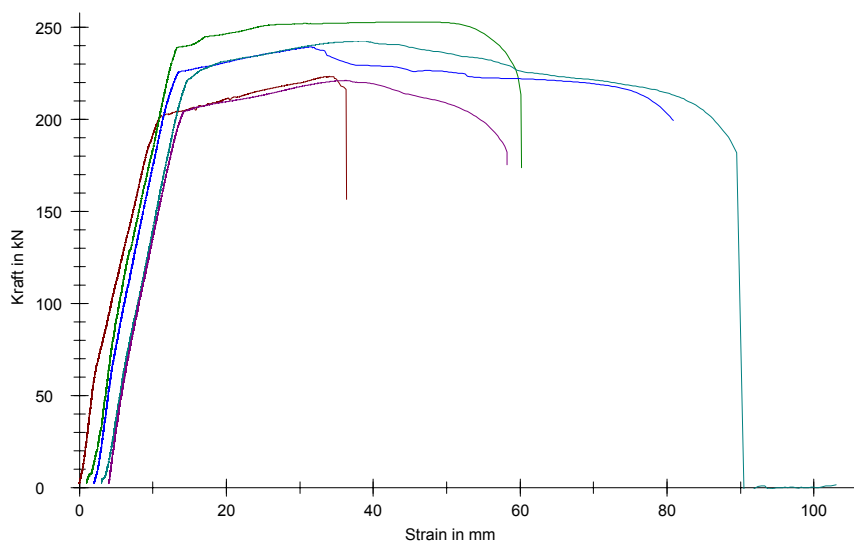
### Parameter table:

Test protocol	:	Type strain extensometer:
Tester	:	Machine data
Customer	:	: Controller TT0322
Test standard	:	PistonStroke
Strength grade	:	LoadCell 400 kN
Creation date	:	
Age	:	0 T
Other	:	

### Results:

Nr	a mm	b mm	F <sub>m</sub> kN	h mm	ID
1	250,0	2200,0	223,33	300,0	Bjelke 1-LWAC ref 13.03
2	250,0	2200,0	252,92	300,0	Bjelke 3-LWAC 1,5SF 26.03
3	250,0	2200,0	239,38	300,0	Bjelke 2-LWAC 1,0SF 26.03
4	250,0	2200,0	242,50	300,0	Bjelke 5-LWAC 3,0BF 08.04
5	250,0	2200,0	221,12	300,0	Bjelke 4-LWAC 1,5BF 08.04

### Series graphics:

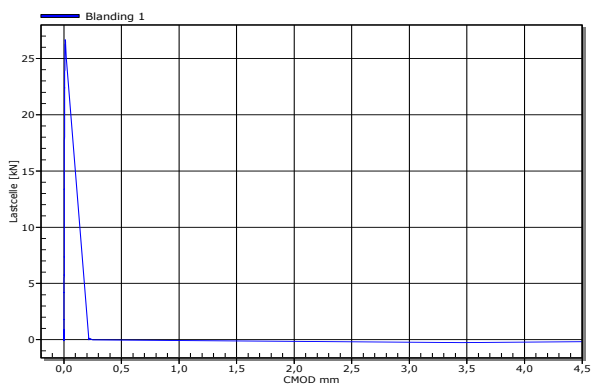


### Statistics:

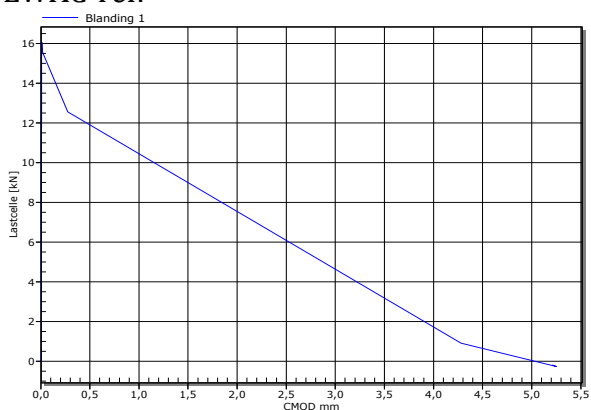
Series n = 5	a mm	b mm	F <sub>m</sub> kN	h mm
$\bar{x}$	250,0	2200,0	235,85	300,0
s	0,0	0,0	13,43	0,0
v	0,00	0,00	5,70	0,00

## Vedlegg D - CMOD-diagram, bøyestrekfasthet

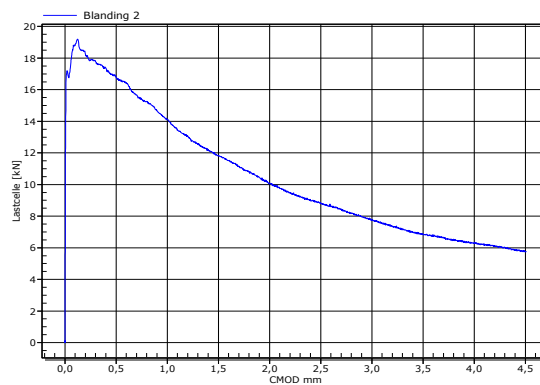
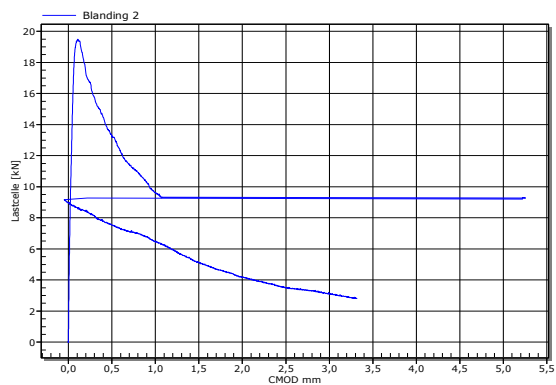
ND-ref:



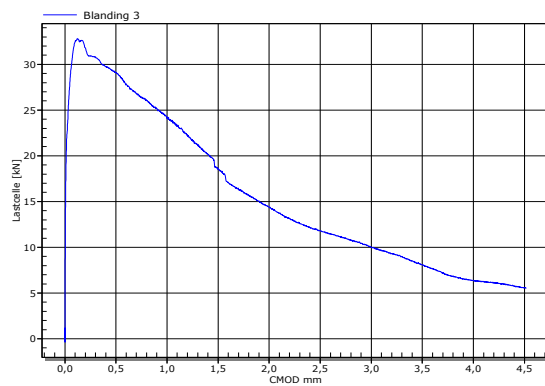
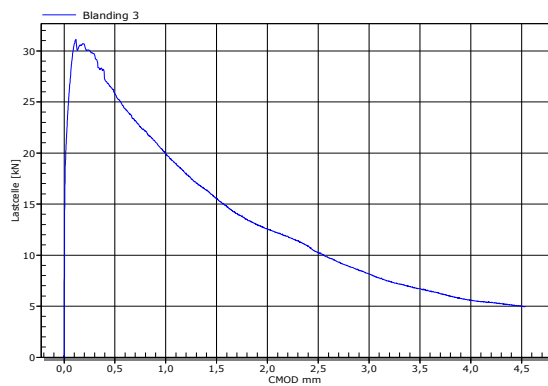
LWAC-ref:



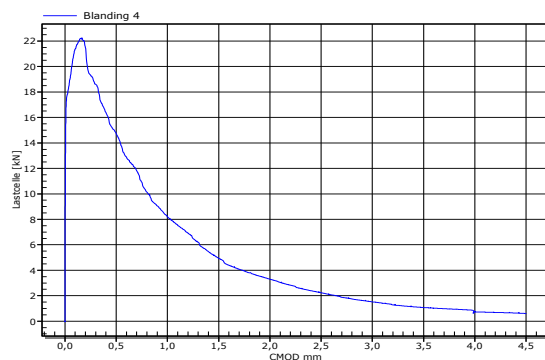
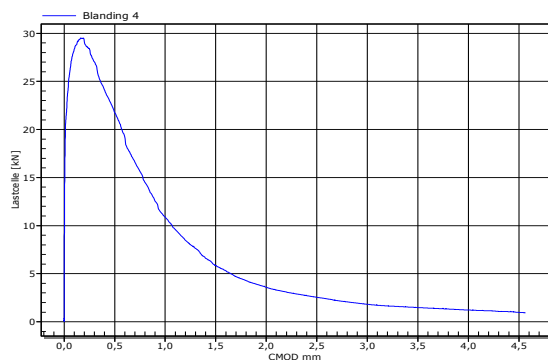
LWAC-1,0SF:



LWAC-1,5SF:



LWAC-1,5BF:



LWAC-3,0BF:

