



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer	Vårsemesteret, 2012 Åpen
Forfatter: Anders Heramb Johansen (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder(e): Kjell Tore Fosså	
Tittel på masteroppgaven: Duktilitet i fiberarmert lettbetong Engelsk tittel: Ductility in fibrereinforced lightweight concrete	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Duktilitet Fiberarmering Lettbetong Stålfiber Basaltfiber	Sidetall: 91 + vedlegg/annet: 60 Stavanger, 11. juni/2012

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler fiberarmert lettbetong. Den beskriver lettbetongens oppbygging, hvordan fiber påvirker lettbetongens egenskaper og hva som skjer med fiberne etter opprissing under belastning. Den tar også for seg flere forslag for beregning av den strukturelle analysen som enda ikke er innlemmet i standarder, samt bruddmekanikk som benyttes i forsøkene som er utført for å beskrive duktiliteten i fiberarmert lettbetong.

Det er utført forsøk som omhandler trepunkts bøyetest av bjelkelegemer i henhold til NS-EN 14651. I tillegg er det utført trykktesting av terninger og sylindere, spaltstrekprøve av sylindere samt beregninger av bruddmekanikk. Disse forsøkene skal avdekke økte egenskaper og duktilitet i lettbetongen med forskjellig tilsetning av fibermengde og fibertype. To typer fiber, endekrokedde stålfiber og vridde basaltfiber, ble benyttet i forsøkene.

Trykkfastheten ble ikke forbedret ved tilsetning av fiber. Fiberne rettet seg ut og skapte pull-out ved strekkbelastning. Dette bidrar til økt duktilitet i fiberarmert lettbetong som er bevist ved trepunkts bøyetest. Kombinasjonen av stålfiber og basaltfiber viste seg å gi best duktilitet i fiberarmert lettbetong. Spaltstrekfastheten ble noe forbedret ved bruk av stålfiber, men ble lik eller mindre ved bruk av basaltfiber.

Innholdsfortegnelse

Forord	6
Innledning	7
1 Lettbetongens oppbygging	8
1.1 Lettbetong	8
1.2 Historie	8
1.3 Tilslag.....	8
1.3.1 <i>Fint tilslag</i>	10
1.3.2 <i>Grovt tilslag</i>	10
1.3.3 <i>Leca klinker</i>	10
1.4 Eksponeringsklasse.....	10
1.5 Fasthet.....	11
1.5.1 <i>Fasthetsklasse</i>	11
1.6 Sement	11
1.6.1 <i>Norcem Anleggsement</i>	12
1.7 Vann og fuktighet	12
1.8 Armering.....	13
1.9 Tilsetningsstoff	13
1.9.1 <i>Plastifiserende, P/SP-stoff</i>	13
1.9.2 <i>Lufttilførende stoff</i>	14
1.10 Pozzolaner	14
1.10.1 <i>Flyge aske</i>	14
1.10.2 <i>Silikastøv</i>	14
2 Fiberarmert betong	15
2.1 Fibertype	16
2.2 Fiberorientering.....	16
2.2.1 <i>Fiberorienteringsfaktor</i>	16
2.3 Mekanismer etter opprissing	17
2.3.1 <i>Tilslags bruer</i>	17
2.3.2 <i>Fiber bruer</i>	18
2.3.3 <i>Kombinert tilslag og fiber bruer</i>	20
2.4 Mekaniske egenskaper.....	21
2.4.1 <i>Trykk</i>	21
2.4.2 <i>Strekk</i>	22

2.4.3	Skjær	23
3	Bruddmekanikk.....	24
3.1	Parametere for bruddseighet og duktilitet	25
3.1.1	Ekvivalent bøyestrekfasthet	25
3.1.2	Bruddenergi.....	26
3.1.3	Karakteristisk lengde	27
3.1.4	Brittleness number	27
4	Strukturell analyse	28
4.1	Design av armert betong.....	28
4.2	Bruddgrensetilstand(ULS).....	28
4.2.1	Materialfaktor	28
4.2.2	Bøyning.....	28
4.2.3	Skjær.....	35
4.3	Bruksgrensetilstand(SLS).....	38
4.3.1	Minimumsarmering.....	38
4.3.2	Rissvidde.....	41
4.4	Konstruksjonsregler.....	43
4.4.1	Vanlig armert konstruksjon i henhold til EC2	43
4.4.2	Forslag fra Kanstad 2011 med vanlig armering og fiber.....	43
5	Forsøksprogram og prøvemetoder	44
5.1	Prøveprogram.....	44
5.2	Materialer.....	44
5.3	Betong sammensetning.....	47
5.4	Blandeprosedyre	47
5.5	Prøving av fersk betong.....	47
5.5.1	Luftinnhold.....	47
5.5.2	Densitet	48
5.5.3	Synkmål	48
5.6	Støping.....	49
5.7	Måling av herdet betong.....	50
5.7.1	Trykkfasthet.....	50
5.7.2	Spaltestrekfasthet.....	51
5.7.3	Elastisitetsmodul	52
5.8	Bjelkeprøve.....	53

5.8.1	<i>Bøyestrekfasthet og rest bøyestrekfasthet</i>	54
5.8.2	<i>Rest strekkfasthet</i>	55
5.8.3	<i>Teoretisk beregning av rest strekkfasthet</i>	56
5.8.4	<i>Avvik fra NS-EN 14651</i>	56
5.9	Bruddenergi.....	58
5.9.1	<i>Forenkling/antakelse</i>	58
5.10	Karakteristisk lengde.....	59
5.11	Brittleness number.....	59
5.12	Utstyr for måling av last-CMOD kurve.....	60
5.12.1	<i>Betongsag</i>	60
5.12.2	<i>Displacement transducer</i>	60
5.12.3	<i>Lastcelle</i>	60
5.12.4	<i>Tonitech trykkpresse</i>	61
6	Eksperimentelt resultat og diskusjon	62
6.1	Fersk betong.....	62
6.1.1	<i>Densitet</i>	62
6.1.2	<i>Synkmål</i>	63
6.1.3	<i>Luftinnhold</i>	64
6.2	Terning trykkfasthet.....	65
6.3	Sylinder trykkfasthet.....	67
6.4	Spaltestrekfasthet.....	68
6.5	Elastisitetsmodul.....	70
6.6	Bøyestrekfasthet.....	71
6.6.1	<i>Referanser</i>	71
6.6.2	<i>0,5 vol% stålfiber</i>	72
6.6.3	<i>1,0 vol% stålfiber</i>	73
6.6.4	<i>0,5 vol% basaltfiber</i>	74
6.6.5	<i>1,0 vol% basaltfiber</i>	75
6.6.6	<i>0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber</i>	76
6.7	Tilslagsbruer.....	77
6.8	Fiberbruer(Pull-out).....	77
6.9	Antall fiber over riss.....	78
6.10	Bruddenergi.....	80
6.11	Karakteristisk lengde.....	81

6.12	Brittleness number	83
6.13	Feilkilder	84
7	Konklusjon.....	85
8	Figurliste.....	87
9	Tabell liste	89
10	Referanser	90
11	Vedlegg	92

Førord

For det første ønsker jeg å rette en stor takk til min veileder Kjell Tore Fosså for hans kunnskap og støtte under gjennomføringen av denne avhandlingen våsemesteret 2012.

Betonglaben i paviljong 4 på Universitetet i Stavanger har vært flittig brukt, og det er her jeg har gjennomført de eksperimentelle testene. Jeg vil rette en stor takk til personellet som har bistått meg på betonglaben, da spesielt Samdar Kakay, Martin Bae Pedersen og John Grønli. Mange frustrasjoner og problemer har blitt løst takket være deres hjelp og støtte.

Mine medstudenter på UIS har også bidratt med sosialt samvær og god kunnskap, takk for at oppholdet her i Stavanger under masterutdanningen har blitt så morsomt og hyggelig.

Avhandlingen er gjennomført på Universitetet i Stavanger ved Teknisk - Naturvitenskapelig Fakultet, som også har stått for de økonomiske utgiftene. Prosjektet er et resultat av et litteraturstudium, eksperimentelle tester og beregninger som jeg har gjennomført. Den er et bidrag til forskningen innen fiberarmert lettbetong, og baserer seg på å øke duktiliteten i betong.

Stavanger, juni 2012.

Anders Heramb Johansen

Innledning

Betong er i realiteten et sprøtt materiale. For konstruksjoner lokalisert i sismiske aktive områder, så kan betong karakterisert som sprø eller lite duktil medføre et problem. Lite duktil betong medfører blant annet at riss dannes tidligere ved belastning, og derfor er det ønskelig å ha en så duktil betong som mulig. Tilslagssegenskaper og type fiber påvirker også betongens duktilitet og beskrives i denne oppgaven. Oppgaven beskriver oppbyggingen av lettbetong, bruk av fiber i betong og hvordan fiber oppfører seg under belastning på bjelker i henhold til NS-EN 14651. Den vil ta for seg forskjellige forslag som kan benyttes i den strukturelle analysen, og hvilke bruddmekaniske parametere som kan benyttes for å beskrive duktilitet.

I forbindelse med oppgaven er det utført forsøk ved Universitetet i Stavanger. Forsøket er gjort i henhold til NS-EN 14651 der små bjelker er testet ved trepunkts bøyetest, og dette vil eventuelt duktile egenskaper hos fiberarmert betong. En last-CMOD kurve viser tydelige forskjeller mellom de forskjellige blandingene som inneholder forskjellig fibermengde og fiber type. Det er også utført forsøk med spaltestrekkprøve av sylindere og trykktest av terninger og sylindere.

De 4 første kapitlene består av en teoridel. Teoridelen starter med lettbetongens oppbygging, videre beskrives fiberarmert lettbetong der fibertype, orientering og mekanismer etter opprissing inngår. Bruddmekaniske parametere er beskrevet i kap. 3 som kan benyttes til å avdekke duktiliteten i lettbetong. Deretter er det beskrevet flere forslag til den strukturelle analysen som kan benyttes for fiberarmert betong.

Kapittel 5 og utover beskriver eksperimentelt program og metoder, resultat, diskusjon og konklusjon.

Det er lagt vekt på å få økt kunnskap innen fiberarmert lettbetong, bruddmekaniske parametere og den strukturelle analysen som kan benyttes til å beskrive fiberarmert lettbetong og duktilitet. Forsøkene som er gjennomført fokuserer på å oppnå økt duktilitet ved tilsetning av forskjellig mengde fiber og ved bruk av to forskjellige fibertyper.

1 Lettbetongens oppbygging

Betong i seg selv er ikke spesielt duktil. Den er sprø og lite motstandsdyktig mot ytre krefter, som strekk og skjær. Det er komponentene vi tilsetter betongen, som i all hovedsak bestemmer hvor bestandig betongkonstruksjonen skal bli. Da betong består for det meste av vann, sement, tilslag, tilsetningsstoffer og armering, er det viktig å velge riktige produkter for å oppnå ønskede egenskaper.

For å forstå hva duktilitet i betong er, hvordan den påvirker betongkonstruksjonens egenskaper og hva som blir påvirket i betongen under kraftpåføring, vil dette kapittelet omhandle lettbetongens oppbygging og egenskaper. Kapittelet er basert hovedsakelig på bøkene fra Gjerp et.al. [1] og Jacobsen [2], andre bøker er også benyttet.

1.1 Lettbetong

Lettbetong er i all hovedsak betong som inneholder lett tilslag, som leca klinker. Ved bruk av lett tilslag vil densiteten bli lavere, derav navnet lettbetong, og konstruksjonens egenvekt blir lavere sammenlignet med normalbetong.

1.2 Historie

Bruk av lettbetong kan spores helt tilbake til romertiden, da de brukte lett tilslag i mange konstruksjoner. Den mest kjente er nok Pantheonet i Roma, hvor det ble benyttet vulkansk stein. Den moderne lettbetongens far derimot, regnes å være Stephen J. Hayde, som eide en teglsteinsfabrikk. Han brukte ferdig teglstein av dårlig kvalitet, knuste det til akseptabel størrelse og benyttet tilslaget i betong. Han fant også ut at den beste og mest effektive måten å produsere lett tilslag på var i en roterovn.

Den første fabrikken for kun produksjon av lett tilslag fant sted i Kansas City, Missouri, i 1920. Det tok noen år før et helt byggeprosjekt med bruk av lett tilslag slo til for fullt. Den første skyskraperen hvor det ble benyttet lettbetong var ved et påbygg på et kontorbygg i Kansas City i 1929. Samme året i St. Louis ble Chase Park Plaza Hotell bygget. Skyskraperen er på 28 etasjer og lettbetong ble benyttet i bjelker, dekker og som brannbeskyttelse av andre konstruksjonsdeler.

I Yucca Flats i Nevada ble flere bygninger av forskjellige materialer satt opp for så å utføre en atombombetest. Testen gikk ut på å sjekke hvilke bygg av hvilke materialer som klarte seg. Bare 4 bygninger bestod testen, 2 bygninger var av lettbetongblokker og 2 med lettbetongelementer.

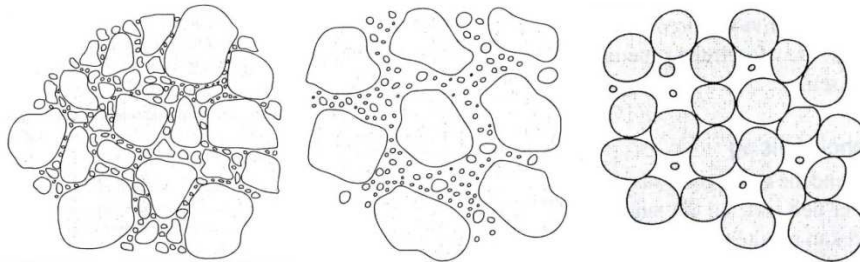
Marina City i Chicago er verdt å nevne som er et kjent lettbetongbygg. Bygget består av to tårn på hver 60 etasjer og er 176 meter høyt. [3]

1.3 Tilslag

Tilslag er sand, stein og grusmaterialer i betongen. Tilslaget utgjør ca. 60-70 vol% av betongen, og det er vanlig å dele opp tilslaget i kornstørrelse, fint- og grovt tilslag. Vanlige fraksjoner er 0-8mm og 8-16mm, disse fraksjonene blir videre delt opp i mindre fraksjoner som for eksempel 0-5mm, 5-8mm, 8-11mm og 11-16mm.

Forskjellige fraksjoner av tilslaget blir produsert for å gi varierende graderingskurver for varierende bruk av betong. En god gradering gir minst mulig hulrom mellom tilslaget, som da bidrar til å gi en

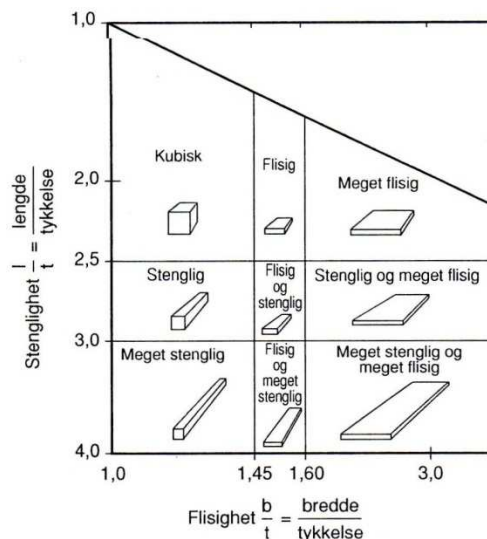
god og rimelig betong. Ved at alle fraksjonene er representert i et visst forhold til hverandre hvor mindre korn fyller tomrommet mellom store korn, oppnås en god gradering, se Figur 1.



Figur 1: Forskjellige tilslagssammensetninger [1]

Tilslagets korngradering oppnås ved å utføre en sikteanalyse av alle fraksjoner man skal benytte i betongblandingen. Det benyttes en siktesats som består av flere rister med forskjellige maskevidder. Man måler opp ca. 0,5kg tilslag for så å helle tilslaget i den øverste sikten. Satsen ristes kraftig, helt til tilslaget ikke flytter seg mer nedover i satsen. Nå er tilslaget delt opp i flere fraksjoner. Hver fraksjon som ligger på ristene veies og beregnes i prosent av den totale masse. Verdiene føres opp i tabell og det lages en siktekurve ut ifra dette. Det må nevnes at tilslaget som benyttes må være overflatetørt. Kornene fester da ikke til hverandre og glir da lett gjennom maskene i satsen. [4]

Formen på partiklene har innvirkning på støpelighet, vannbehov og stabilitet. Runde partikler har positiv effekt, mens flisete avlange partikler har negativ effekt, se Figur 2. Siden tilslaget utgjør så mye av betongsammensetningen har vekten av tilslag stor innvirkning på betongkonstruksjonens egenskaper. Det skiller i hovedsak mellom normal tilslag, lett tilslag og tungt tilslag. Normal tilslag har en korndensitet på mellom $2000\text{kg/m}^3 - 3000\text{kg/m}^3$. Tungt tilslag har en korndensitet på større eller lik 3000kg/m^3 . Lett tilslag har en korndensitet på mellom $800\text{kg/m}^3 - 2000\text{kg/m}^3$. De viktigste egenskapene hos lett tilslag er korndensitet og egenstyrke.



Figur 2: Flisighet [1]

1.3.1 Fint tilslag

I lettbetong blir det benyttet lettvekt sand, naturlig sand eller en kombinasjon av disse. Ved bruk av sand som tilslag har dette en direkte innvirkning på betongens densitet, trykkfastheten og støpelighet. Lettvekt sand gir en grovere blanding som er mye mindre støpelig enn en blanding hvor naturlig sand også inngår. Derimot er det mye enklere å få en lavere densitet med lettvekt sand enn med naturlig sand. Med lettvekt sand er det mulig å komme ned til 1200-1300 kg/m³, og med naturlig sand er det vanskelig å komme under 2000 kg/m³. [5] I dette prosjektet er det benyttet både naturlig sand og lettvekt sand. Leca sand er knust leca klinker som karakteriseres som lettvekt sand. De er kornet og skarpe og har evnen til å absorbere mye vann.

1.3.2 Grovt tilslag

Sand og stein fraksjonen som tilhører grovt tilslag skal være >8mm. Pukk og grus er ofte brukt som grovt tilslag. De absorberer lite vann og utgjør en stor del av styrken til betongen.

1.3.3 Leca klinker

Leca klinker brukes i betong hovedsakelig for å redusere konstruksjonens vekt. Lettbetong er blitt brukt både i offshore plattformer, i bruer og andre vanlige konstruksjoner. Klinkene kommer i forskjellige fastheter, former og størrelser. I dette prosjektet er det benyttet 2 typer runde klinker med høy fasthet og 2 typer knust leca klinker med moderat og høy fasthet.

1.4 Eksponeringsklasse

Fasthetsklassen bestemmes ut ifra blant annet bestandighetsklassen. Bestandighetsklassene bestemmes ut i fra eksponeringsklassene. De forskjellige klassene tar for seg hvilket miljø betongen utsettes eller eksponeres for. Ut i fra miljøet kan kvaliteten på betongen bestemmes og deretter fasthetsklassen. Figur 3 viser et lite utsnitt av eksponeringsklassene som finnes.

Klassebetegnelse	Beskrivelse av miljø	Eksempler på hvor eksponeringsklassene kan forekomme (informativt)
1 Ingen risiko for korrosjon eller angrep		
X0	For betong uten armering eller innstøpt metall: Alle miljøer, unntatt der det er frysing/tining, slitasje eller kjemisk angrep For betong med armering eller innstøpt metall: Meget tørt	Betong inne i bygninger med meget lav luftfuktighet
2 Korrosjon framkalt av karbonatisering		
Der betong som inneholder armering eller annet innstøpt metall utsettes for luft og fuktighet, skal miljøeksponeringen klassifiseres som angitt nedenfor: MERKNAD Fuktforholdet viser til fuktigheten i overdekningen av betong over armeringen eller annet innstøpt metall. I mange tilfeller kan imidlertid forhold i omgivelsene anses representative for forholdene i betongoverdekningen. I slike tilfeller kan en klassifisering av omgivelsene være tilstrekkelig. Dette trenger ikke være tilfellet dersom det finnes en sperre mellom betongen og omgivelsene.		
XC1	Tørt eller permanent vått	Betong inne i bygninger med lav luftfuktighet Betong som permanent er neddykket i vann
XC2	Vått, sjelden tørt	Betongoverflater i kontakt med vann over lengre tid Fundamenter

Figur 3: Utsnitt av eksponeringsklassene[6]

1.5 Fasthet

Trykkfasthet av betong er nok den viktigste materialegenskapen ved design av betongkonstruksjoner. Trykkfastheten bestemmes ut i fra prøvestykker i form av terninger eller sylindere. I Norge er det mest vanlig å benytte 100*100*100mm terninger, som etter 28 døgns herding i et vannbad på $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ blir trykktestet i en trykkpresse til de går til brudd. Det er også vanlig å utføre trykktest ved 7 døgns fasthet som er omkring 75 % av 28 døgns fasthet. Fasthetsklasser angir den laveste fastheten en prøve kan ha, utført etter norsk standard. Jo høyere trykkfasthet man har desto sprøere blir betongen.

Trykkfastheten til lettbetong ligger gjerne i området mellom 15-45MPa, ca. 50-80 % av styrken til normalbetong. Det er mulig å oppnå høyere fasthet ved gode proporsjoner og bruk av forskjellige tilsetningsstoffer. Tilslaget påvirker i høy grad betongens fasthet. Sementpastaen blir som regel ikke fastere enn tilslaget som brukes, men ved bruk av lett tilslag er det ofte motsatt effekt. Trykkfastheten varierer også med sementtype.

1.5.1 Fasthetsklasse

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 sylindrefasthet f_{cck}	10	20	25	30	35	45	55	65	75	85	95
Karakteristisk terningfasthet $f_{ck}^{1)}$	12	25	30	37	45	55	67	80	90	100	110

¹⁾ 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

Tabell NA.3 – Fasthetsklasser: lettbetong

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 sylindrefasthet f_{cck}	12	20	25	30	35	45	55	65	75
Karakteristisk terningfasthet $f_{ck}^{1)}$	13	22	28	33	38	50	60	72	83

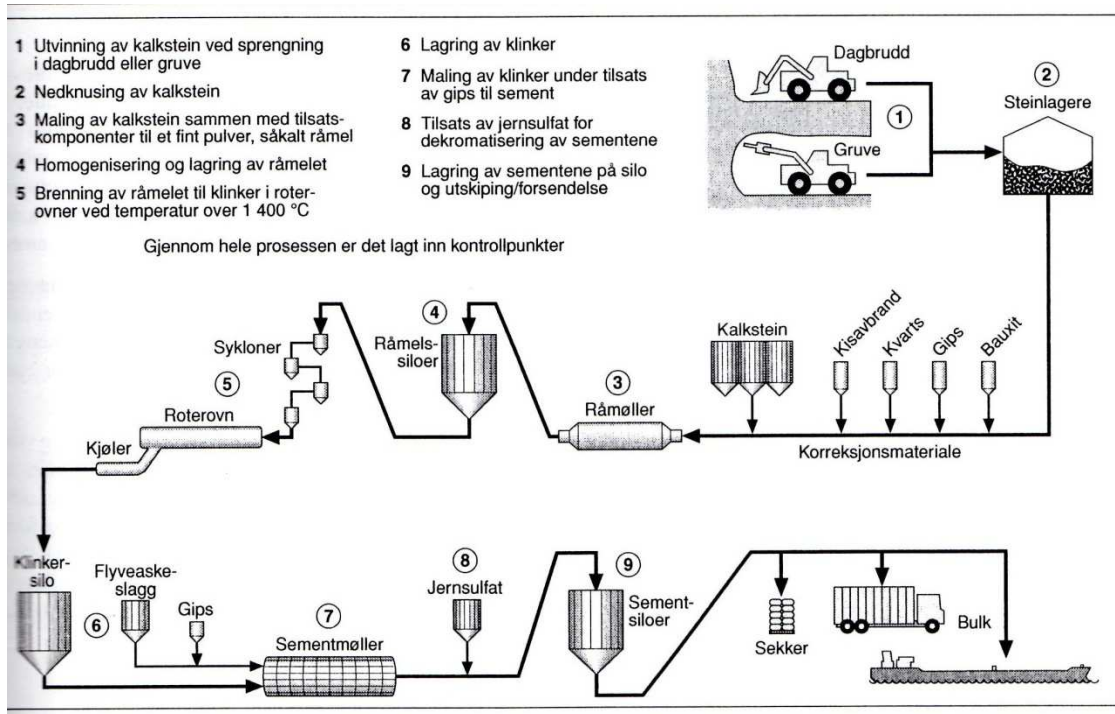
¹⁾ Andre verdier kan benyttes hvis forholdet mellom disse og referansefastheten for sylindere er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen

Figur 4: Fasthetsklasser for lettbetong øverst og normalbetong nederst[6]

1.6 Sement

Romerne og grekerne brukte brent kalk og vulkansk aske som hydraulisk bindemiddel. Byggverkene står i dag som et bevis på kvaliteten på bindemiddelet og utførelsen av arbeidet.[3] I dag benyttes noe som heter portlandsement, som er et fellesnavn for mange sementer i byggebransjen. Utallige varianter og egenskaper av forskjellige sementer fins på markedet i dag. I Norge er det bare noen få av disse sementtypene som er tillat, og som kontrolleres gjennom norsk standard.

Hovedinnholdet i portlandklinker er ca. 90 % naturlig kalk med mindre mengder bauxitt, kvarts og gips. Materialene blir malt ned og brent ved 1450°C , se Figur 5. Det dannes da 4 hoved mineraler fra de bearbejdede materialene, se Tabell 1.



Figur 5: Produksjonsledd ved fremstilling av portlandsement [1]

Tabell 1: Hoved mineraler

Navn	Mineralogisk navn	Kjemisk formel	Forkortelse
Trikalsium silikat	Alite	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Dikalsium silikat	Belite	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Trikalsium aluminat	Aluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsium aluminatferritt	Ferritt	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Hovedreaksjonen under størknings- og herdeprosessen er dannelse av kalsium silikat hydrat, C-S-H gel. C-S-H gel er et bindemiddel som dannes i herdeprosessen. Silisium- og kalsiumholdige bestanddeler i sementen reagerer med vann og tilsetningsstoffer og det skjer en hydratiseringsprosess. Det er disse reaksjonene som gjør at betongen får en temperatur- og fasthetsutvikling. Disse utviklingene skaper grunnlaget for betongens slutfasthet og bidrar til betongens egenskaper.

1.6.1 Norcem Anleggsement

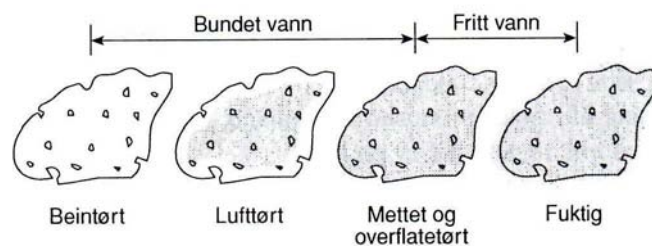
I dette prosjektet benyttes det Norcem anleggsement. Denne typen sement har en moderat fasthetsutvikling noe som gir høy slutfasthet og et moderat alkalieinnhold som gjør at alkalireaktivt tilslag kan benyttes. I henhold til NS-EN 197-1 tilfredsstillt anleggsement kravene som stilles for CEM I 52,5 N. I tekst betyr denne betegnelsen, Portlandsement og fasthetsklasse 52,5 med normal tidligfasthet. Sementen er best egnet for bestandighetsklasse M45 og fasthetsklasse B45. Ved bestandighetsklasse M40 skal det tilsettes 4 % silikastøv.[4]

1.7 Vann og fuktighet

Vann er nødvendig for å starte hydratiseringsprosessen, og har stor innvirkning på betongens konsistens. Økt vannmengde gir større avstand mellom partiklene og dermed også større synkmål.

Noen tilslag, spesielt sandfraksjonen, har mulighet til å binde mye vann pga. stor overflate per vektenhet i forhold til for eksempel grovt tilslag. Fastlegging av denne fuktigheten er kritisk for å motvirke raskt konsistenstap ved tørt tilslag, og for bestemmelse av korrekt v/c-tall. Tilslag som er fuktig på overflaten og inneholder mye vann, fritt vann, vil avgi vann til betongen. Tilslag som er mettet men ikke har en overflatefuktighet vil ikke avgi vann til betongen, se Figur 6. Fuktinnholdet kan enkelt måles ved å tørke tilslaget i en panne, slik at overflatefuktigheten forsvinner. Tilslaget veies før og etter tørking, og vi finner da fuktigheten i tilslaget.

Lett tilslag som Leca er svært porøst og kan absorbere mye vann. Det er da viktig å være klar over hvor mye vann som blir absorbert slik at vannbehovet til betongen er kjent. Dersom Leca tilslaget er tørt ved blanding viser det seg at halvparten av volumet som tapes pga. vannabsorpsjon fås tilbake som luft. [7]



Figur 6: Porøst tilslag [1]

1.8 Armering

Betongen er avhengig av armering for å klare å ta opp ytre krefter som strekk og skjær. Betong har nemlig bare en viss kapasitet mot disse kreftene og riss oppstår når kapasitetene overskrides. Riss i betongen oppstår før mesteparten av kreftene er tatt opp av armeringen fordi betongens strekkfasthet er en størrelsesorden lavere enn armeringen. Riss i betongen er ikke ønskelig fordi det kan føre til redusert bestandighet og kortere levetid til konstruksjonen. Det fins forskjellige typer armering, de mest vanlige er i form av kamstål og fiber. [8]

1.9 Tilsetningsstoff

Tilsetningsstoff er stoff som blir tilsatt under betongmiksing og ikke mer enn 5 % av sementinnholdet. Tilsetningsstoff blir tilsatt for å modifisere egenskapene i fersk eller herdet betong. Ved bruk av tilsetningsstoffer, da spesielt superplastifiserende stoff må vannmengden korrigeres.

1.9.1 Plastifiserende, P/SP-stoff

Lignosulfonat er et biprodukt fra papirindustrien og var det første masseproduserende plastifiserende tilsetningsstoffet på markedet. Den første ligninfabrikken som klarte å utvinne lignin fra papirindustriavfallet var i full drift allerede i 1937, men bruk av plastifiserende stoff startet ikke for fullt før på 1970-tallet. På 1990-tallet kom polymerene, og ved årtusenskiftet var polycarboxylate siste skrik innen vannreducerende tilsetningsstoffer. [3] Plastiserende tilsetningsstoff blir delt inn i 4 grupper, se Tabell 2.

Tabell 2: Type plastifiserende og superplastifiserende tilsetningsstoff

Type tilsetningsstoff	Plastifiserende/Superplastifiserende *	Redusert vannmengde
Lignosulfonat	P	Ca. 8-10 %
Napthalene**	SP	Ca. 15-20 %
Melamine**	SP	Ca. 15-20 %
Polycarboxylate	SP	Ca. 40 %

* P=Plastifiserende, SP=Superplastifiserende

** Sulfonert polymer

Ved bruk av plastifiserende stoff kan man få økt slump, økt fasthet eller økt slump og fasthet. Valg av P eller SP stoff er avhengig av hvilke egenskaper man ønsker. SP stoff benyttes for eksempel når man ønsker en høyfast betong, ved at man kan redusere vannmengden på inntil 40 % for å få høyere fasthet.

1.9.2 Lufttilførende stoff

Historisk sett ble blant annet blod, spekk eller melk benyttet for å gi betongen bedre reologiske egenskaper, men som også gav mer luftporer i betongen. Urin, øl og ris har også blitt benyttet for å få mer luftporer. [3]

I dag blir salt fra harpiks og syntetisk vaskemiddel brukt som lufttilførende stoff. Lufttilførende stoff har en såpelignende effekt ved kontakt med vann og danner små luftbobler som fordeler seg jevnt i hele betongkonstruksjonen. Det går an å bruke vanlig såpe, men luftboblene som dannes er ikke like stabile før og etter blandedprosessen som ved lufttilførende stoff. Ved bruk av lufttilførende stoff øker vi frostbestandigheten og støpelighet. Betong med 4 % luftinnhold eller mer får økt frostmotstand kontra betong med lavere luftinnhold. Betong som inneholder mye luft har derimot lavere trykkfasthet sammenlignet med lik betong uten luft. En tommelfingerregel er med 1 % lufttilførende stoff i betongen gir 5 % redusert trykkfasthet.

1.10 Pozzolaner

Pozzolan er et latent hydraulisk tilsetningsstoff. Dette er tilsetningsstoff som alene ikke har hydrauliske egenskaper. Sammens med den kjemiske forbindelsen kalsiumhydroksid dannes det derimot en forbindelse som er relativt lik forbindelsen mellom vann og sement. Dette kalles pozzolanreaksjoner.

1.10.1 Flyge aske

Flygeaske er et biprodukt fra kullfyrte kraftverk, og er med på å redusere mengde sement i betong. Opp i mot 30-35 % sement kan bli erstattet med flygeaske. Partiklene er ca. 10-20µm og de forbedrer støpeligheten i betongen og øker langtidsfastheten. Betong med flygeaske vil ha relativt lav tidligfasthet (3-7 døgn) pga. lav temperaturutvikling.

1.10.2 Silikastøv

Silikastøv er et biprodukt fra silisium- og ferrosilisium produksjon. Den er en meget god filler pga størrelsen på kornene og ser ut som glassaktige kuler. Partiklene har en størrelse som tilsvarer 1/100 av et sementkorn (0,1µm), og har en spesifikk overflate på 20000m²/kg (Blaine). Silikastøv gjør den ferske betongen stivere og seigere, den binder mye vann. Reaksjonen mellom silikastøv og kalsiumhydroksid øker heften mellom komponentene i betongen og fastheten øker betydelig.

2 Fiberarmert betong

Historisk sett har forskjellige typer stråfiber og hår blitt benyttet for å redusere opprissing. Ved bygging av den kinesiske mur ble det for eksempel brukt bambusfiber som armering. Nyere og mer moderne metoder kom allerede i 1874 da A. Berard benyttet oppkuttete spiker som armering. Det viste seg at strekkfastheten ble 8 doblet. [3]

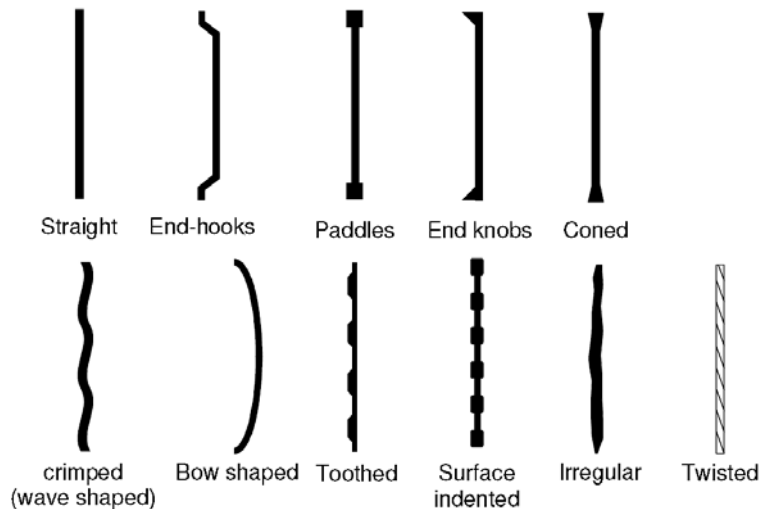
Fiberarmering blir brukt for det meste i industrigulv og som sprøytebetong. Dvs. fiber blir benyttet i bærende og ikke bærende konstruksjoner. Bidraget fra fiber i betong gir primært økt lastbærende effekt og reduksjon av rissdannelser. Fiber kommer i mange former, størrelser og materialer. Noen materialer er for eksempel stål, syntetisk, glass og naturlig forekomster(basalt). Det er for øvrig stål som blir mest brukt for strukturelle formål og syntetiske fibere blir brukt til å kontrollere sprekker som oppstår fra forskjellige typer svinn (plastiske svinn, autogent svinn, kjemisk svinn, uttørkings svinn osv.) og temperatur forskjeller. [9]

Ved bruk av fiber øker man i all hovedsak egenskapene til betongen først etter opprissing. Fiberne fungerer slik at de klarer å overføre strekkspenninger over et riss ved at fiberne danner en bru, kalt fiberbru. Ved dannelse av disse bruene øker betongens seighet eller duktilitet som det også heter, samt at rissvidde hastigheten kan reduseres. Dette er forøvrig svært avhengig av mengde fiber, fiber type, fiberorientering og fiberens mekaniske egenskaper, som beskrives i dette kapitlet.

For å finne mekaniske egenskaper kan man utføre flere typer tester. Den mest vanlige er trepunkts bøyetest av bjelker/prismer, se kap. 5.8. Resultatet av en slik test kan innebære at man får en last-CMOD(crack-mouth-opening-displacement) kurve, som deretter kan transformeres til rest bøyestrekfasthet og rest strekkfasthet. Disse verdiene sier oss noe om hvor duktil betongen er etter opprissing. Det fins selvsagt mange modeller og metoder for beskrivelse av duktilitet. Det er derfor viktig å velge en test metode som beskriver problemet på best mulig måte.

2.1 Fibertype

Det fins mange forskjellige fibertyper, som er lagd i et stort spenn av materialer og geometri. Noen fibertyper er designet for å redusere rissvidde og øke seigheten i betong, mens andre er designet for å redusere riss fra plastisk krymp eller for å unngå avskalling av betong under brann. [10] Vanlige materialer er som nevnt tidligere er stål, syntetisk, glass og naturlige forekomster og de kan være rette, vridde, krokete osv. se Figur 7. Grunnen til at fiberne som regel ikke har en enkel geometri er fordi man ønsker å oppnå stor heft til matriksen. Ved stor heft må fiberne enten deformeres (rettes ut) eller brytes for at betongen skal gå til brudd.[11]



Figur 7: Forskjellig geometri på fiber[11]

2.2 Fiberorientering

Fiber fordeler seg ikke likt i hele betongkonstruksjonen, og orienteringen til fiberne har stor innvirkning på de mekaniske egenskapene. Orientering av fiber i betongen kan opptre på forskjellige måter. Direkte orientering oppnås ved å legge inn armeringsnett eller direkte plassere ut fiber i en bestemt orientering før støping. Tilfeldig orientering karakteriseres når fiber blir tilfeldig fordelt i betongen, det skilles mellom 1, 2 og 3-dimensjonale legemer. Tvungen-tilfeldig orientering skjer når minst 2 geometriske parametere på prøvelegemet, for eksempel høyde og bredde, er fastsatt. Eksempel på tvungen-tilfeldig orientering er bjelker, plater, osv. [10]

2.2.1 Fiberorienteringsfaktor

En fiberorienteringsfaktor tar hensyn til fibernes effektivitet i betongen. Faktoren er i hovedsak avhengig av antall fiber som fungerer over et riss og orienteringen av fiber i forhold til risset. Löfgren 2005[10] beskriver en fibereffektivitetsfaktor, η_b , som tar hensyn til effektiviteten fra fiberbruene som dannes, samt antall fiber og orientering over risset. Ved tilfeldig fordeling er 1-dimensjonale systemer enkle og fibereffektivitetsfaktoren er lik 1. Fibereffektivitetsfaktoren for et 2-dimensjonalt system kan bli estimert til 0,64 og for et 3-dimensjonalt system er fibereffektivitetsfaktoren lik 0,5.[10]

Kanstad 2011[8] bestemmer en fiberorienteringsfaktor ut ifra fiberarealforholdet og er basert på NPG(Norwegian Preliminary Guidelines) [12], og er som følger:

$$\alpha = \frac{\rho}{v_f} \quad (2-1)$$

der

$$\rho = \frac{nA_f}{A_c}; \quad (2-2)$$

v_f er volumandel fiber;

n er antall fiber;

A_f er tverrsnittsarealet av en fiber;

A_c er betongens tverrsnittsareal av aktuelt snitt.

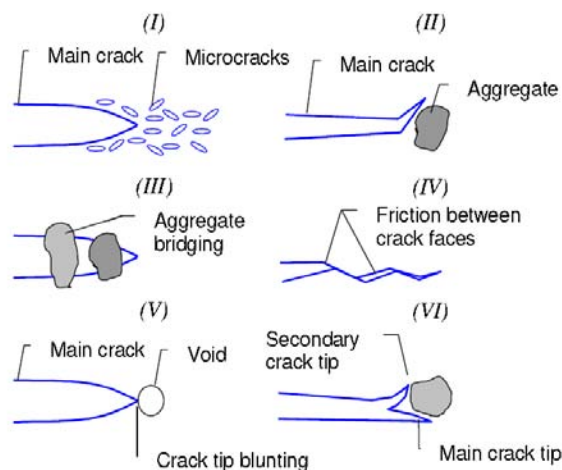
2.3 Mekanismer etter opprissing

I motsetning til betong uten armering, opplever ikke fiberarmert betong sprøbrudd etter første opprissing. Det er fordi fiber aktiveres etter opprissing og da etter hvert virke for fullt. For at betongen skal gå til brudd må fiberne deformeres eller brytes. For at fiberne skal deformeres må det de rives ut (pull-out) av betongen, dette krever en enorm energidissipasjon. Høye mekaniske egenskaper er derfor et krav til fiberne, og det er nettopp derfor stål ofte blir brukt som fiberarmering. Om det skjer fiberbrudd eller pull-out avhenger av styrken til betongen og fiberne.

Før det skjer pull-out eller fiberbrudd danner fiberne bruer over riss som forhindrer og reduserer hastigheten av videre vekst. Dette gjør så betongen blir mer duktil, men for å oppnå høyest mulig duktilitet er det utrivning man ønsker å oppnå. I tillegg til fiber, så har også tilslaget en viss innvirkning på energidissipasjonen, men det er selvsagt fiberne som har den mest avgjørende rollen. Dette kapitlet tar for seg mekanismene etter opprissing i fiberarmert betong under pågående belastning.

2.3.1 Tilslags bruer

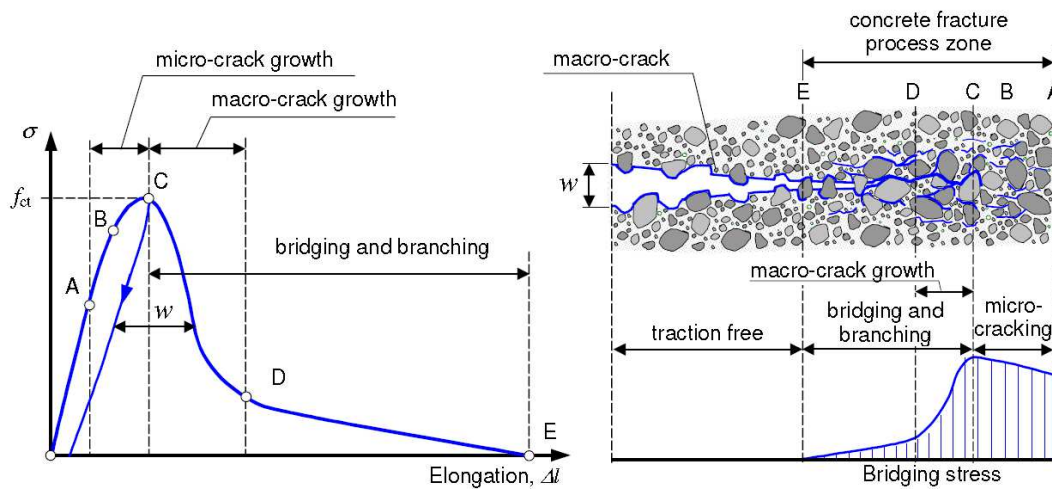
I ren betong uten noen form for armering er mekanismene som inkluderes i brudd prosessen vist i Figur 8. Mekanismen som har størst innvirkning på duktiliteten i ren betong er tilslagets evne til å danne bruer over et riss. Det kan antas at spenning-sprekkåpningsforholdet er avhengig av egenskapene til tilslaget, i tillegg til gradering, stivhet og styrke, overflateruhet, form, såvel som egenskapene til sementen og andre elementer som pozzolaner og tilsetningsstoffer.[10]



Figur 8: Noen seighetsmekanismer i ren betong[10]

Små mikrosprekker fins til enhver tid i betong, også før konstruksjonen blir påført ytre krefter. Indre motstand fra tilslag, kryp og termisk deformasjon er årsaken til dette. Når da spenninger i form av ytre krefter blir påført konstruksjonen vil mikrosprekkene starte og vokse mellom sementpastaen og

tilslaget. Disse mikrosprekkene vil så forplante seg innover i betongen (B-A), se Figur 9. Først når opprissing starter vil mikrosprekken forplantes ustabil i betongen og synlig riss oppstår(D-C). Etter hvert som makrosprekken vokser synker spenningen som betongen kan ta opp(E-D).[10]



Figur 9: Skjematisk beskrivelse av brudd prosessen i en uni-aksielt strekk test og den resulterende spenning - sprekkåpningsforholdet[10]

For normalbetong har tilslaget høyere styrke og stivhet enn heften til tilslag og matriks, mens for lettbetong er styrken og stivheten til tilslaget som regel lavere enn heften mellom tilslaget og matriks. Noen sprekker skjærer derfor rett gjennom tilslaget og resulterer i en jevn overflate på sprekkene i lettbetong, sammenlignet med svingete eller krokete sprekk overflate for normalbetong.

2.3.2 Fiber bruer

Brudd prosessen for fiberarmert betong er et komplekst fenomen som avhenger av mange parametere. Følgende mekanismer og bidrag til energidissipasjon som antas å skje under en brudd prosess er:

- matriks brudd og matriks avskalling;
- fiber-matriks avbinding;
- avbindings friksjon mellom fiber og matriks;
- fiber brudd;
- fiber slitasje og plastisk deformasjoner av fiber.

De mekaniske egenskapene til fiberarmert betong er ikke bare avhengig av antall og orientering av fiber, men også i stor grad av de individuelle fibernes egenskaper under utrivning (pull-out).

2.3.2.1 Utrivning (Pull-out)

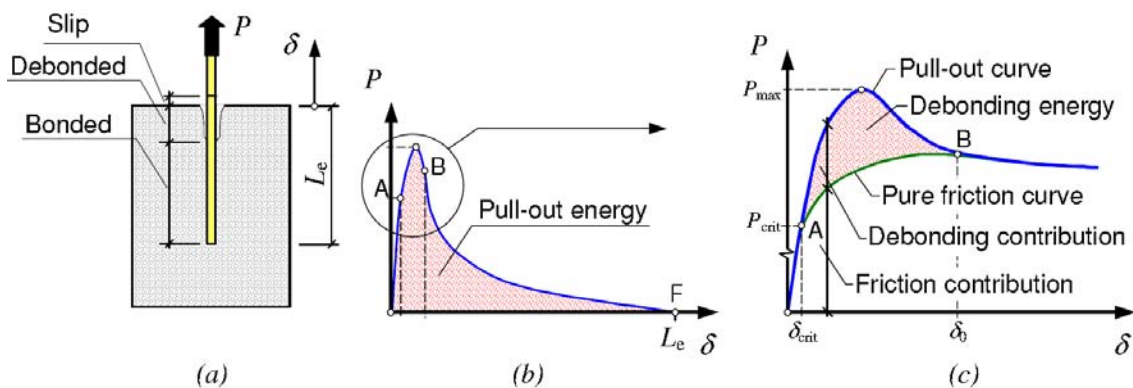
Pull-out oppførselen til fiberne er avhengig av følgende:

- type fiber og dens mekaniske og geometriske egenskaper;
- mekaniske egenskaper til heften mellom fiber og matriks;
- vinkelen av fiber i forhold til retningen på lasten;
- mekaniske egenskaper til matriksen.

Etter opprissing overfører fiber strekkrefter over risset til omkringliggende betong. For å unngå sprøbrudd av betongen, må fiber utrivning (pull-out) være den dominerende mekanismen. Det er da

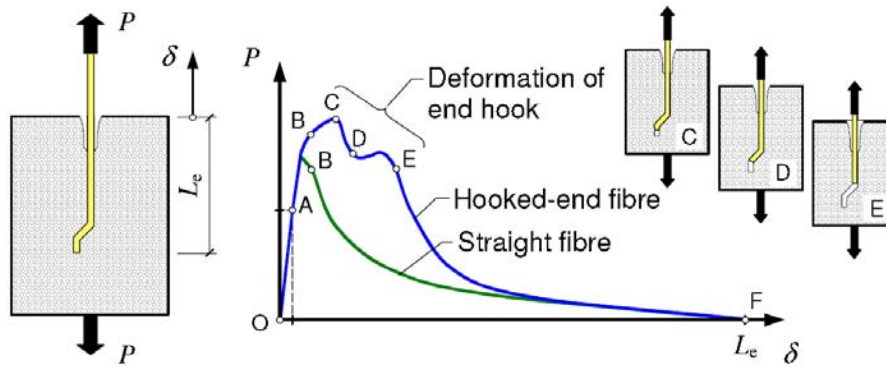
viktig at flytegrensen til fiberne er tilstrekkelig høy nok slik at fiberbrudd unngås. Sannsynligheten for fiberbrudd avhenger hovedsakelig av fiberstyrke, matris styrke, forankringslengde, fiber geometri og vinkel til fiberne i forhold til rissplanet.[11] For å avgjøre fiberens egenskaper bør pull-out tester gjennomføres. Denne testen er fundamental for beskrivelsen av fiberarmert betong, og sammens med kunnskap innen orientering og fordeling av fiber, så kan pull-out testen brukes for å finne middel strekk spenningen over et riss per fiber. For fiber med krok i enden er pull-out egenskapene dominert av den mekaniske forankringen. Ved pull-out må den krokede enden deformeres til en rett ende, slik at fiberbrudd er forhindret.[11]

Figur 10 illustrerer en typisk pull-out oppførsel for en rett stålfiber. Den stigende delen fra origo til A er forbundet med elastisk eller klebende heft. I den neste delen av kurven (A-B) er der avbinding starter og det utvikles til full avbinding ved B. Deretter blir fiberen trukket ut (B-F), og det er kun friksjon som gjør motstand. I dette området (B-F) minker pull-out kraften med økende slipp som et resultat av avtagende forankringslengde og redusert friksjon. Energidissipasjonen, altså brudd energien er lik arealet under last-CMOD kurven eller last-forskyvning(slipp) kurven, se Figur 10(b).



Figur 10: Pull-out for en rett fiber[10]

I Figur 11 er det gjort en sammenligning mellom pull-out kurve for en rett stålfiber og en endekroket stålfiber. Den stigende delen fra origo til A er forbundet med elastisk eller klebende heft. I den neste delen av kurven (A-B), avbinding startes og utvikler seg til full avbinding ved B. Deretter blir fiberen trukket ut, og det er kun friksjon som gjør motstand. Denne delen er for rett fiber representert av (B-F) og for endekroket fiber av (E-F). For endekroket fiber kan belastningen øke (B-C) pga. mekanisk forankring, helt til dette begynner å slippe(C-D), og blir gradvis deformert under pull-out fra matrisen (D-E).

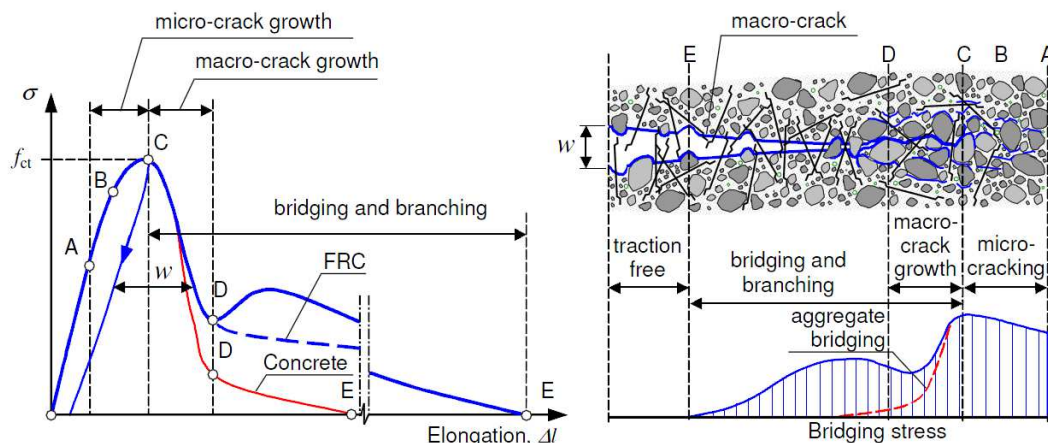


Figur 11: Pull-out for fiber som er rett og fiber med endekrok[10]

2.3.3 Kombinert tilslag og fiber bruer

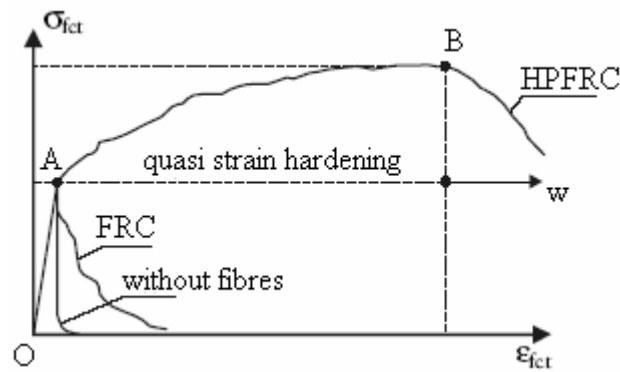
I fiberarmert betong er energidissipasjonen og bruspenningen et resultat av mange mekanismer som pågår samtidig. Sammenlignet med ren betong så gir fiber et bidrag til brumekanismen og den kritiske opprissingen (traction free), se Figur 12, øker med en faktor på 10, det samme gjør bruddenergien. Strekkspenningen til betongen, f_{ct} , er bare så vidt påvirket av fiberne, mens den maksimale fiber bru spenningen er avhengig av det som er beskrevet under kap. 2.3.2.1 som omhandler pull-out. Fiberarmert betong er derfor avhengig av en kombinasjon av tilslag og fiber bruer, se Figur 12, hvor tilslags bruer har en relativt liten virkningsgrad i forhold til fiber bruene. I Figur 12 så er det tre tydelige soner som kan bli forklart som følger:

- en spennings fri sone, som opptrer ved relativt store sprekåpninger;
- en bru sone, hvor spenning blir transportert av fiber pull-out og tilslags bruer;
- en sone med mikrosprekker og mikrosprekk vekst.[10]



Figur 12: Skjematisk beskrivelse av effekten fra fiberne i brudd prosessen ved uni-aksielt strekk[10]

Fordelen med fiber er deres evne til å overføre spenninger over et riss, og dermed øke duktiliteten i betong. Under lastpåføring overfører matriksen deler av lasten til fiberne før makrosprekker starter å vokse. Derfor er det teoretisk mulig å øke styrken av materialet ved å legge til fiber. Avhengig av hvor mange fiber som krysser risset og heften mellom fiber og matriks, så kan spenningen etter opprissing være større enn lasten som førte til opprissing. Det resulterer i noe som heter belastningsherding, og flere riss dannes samtidig, se Figur 13 og Figur 66.[11]



Figur 13: Skjematiske fremvisning av belastningsherding[11]

2.4 Mekaniske egenskaper

Mange forbinder betong med høy motstand mot trykk krefter, og det er selvsagt noe som også stemmer. Måling av trykksfastheten er enkel og man kan benytte trykksfastheten til å bestemme andre mekaniske egenskaper som E-modul, strekksfasthet, permeabilitet, osv. Trykksfastheten kan derimot ikke brukes som erstatning for alle egenskaper, spesielt ikke for økningen av seighet som observeres i fiberarmert betong. Det betyr at for fiberarmert betong trengs det en annen test enn trykk test for å beskrive seighet. Det fins mange tester for å bestemme disse egenskapene, men hvilken man skal benytte kommer an på hvilke egenskaper man ønsker. Så bestemmelse av hvilke egenskaper man behøver for å beskrive et problem, kommer helt an på hvilken grunnleggende modell man benytter for å beskrive materialet i numeriske analyser. Eksempler på mekaniske egenskaper er strekksfasthet f_t , trykksfasthet f_c , elastisitetsmodul E , bruddenergi G_F , karakteristisk lengde l_{ch} , osv., se Tabell 3.[10]

Tabell 3: Vanlige verdier for noen mekaniske egenskaper[10]

Material	f_c [MPa]	f_t [MPa]	E [GPa]	G_F [Nm/m ²]	l_{ch} [mm]
Cement paste	10 – 25	2.0 – 10.0	10 – 30	≈ 10	5 – 15
Mortar		1.0 – 10.0	10 – 30	10 – 50	100 – 200
Normal-strength concrete	20 – 80	1.5 – 5.0	25 – 40	50 – 150	200 – 400
High-strength concrete	> 80	4.0 – 5.5	40 – 50	100 – 150	150 – 250
Fibre-reinforced concrete	20 – 80	1.5 – 5.0	25 – 40	> 500	> 1 000

Det kan antas at betongens trykksfasthet og E-modul er lite påvirket av stålfiberarmering, og det forventes at fiber gir en moderat økning av betongens strekksfasthet (fasthet ved opprissing). Det er derimot ventet en mer markert økning for bøyestrekksfasthet og spaltestrekksfasthet. Etter opprissing har fiberarmert betong en stabil rest strekksfasthet ved økende rissvidde. Denne rest strekksfastheten kan for øvrig være større eller mindre enn betongens strekksfasthet (fasthet ved opprissing), helt avhengig av fibertype, fibermengde og fiberens mekaniske egenskaper. [8]

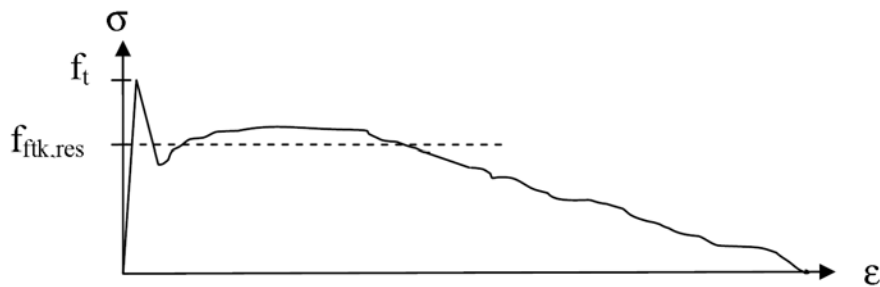
2.4.1 Trykk

Moderate konsentrasjoner av fiber påvirker ikke trykksfastheten i særlig grad. Fiber fører imidlertid til mindre sprøtt brudd ved trykk påkjenning. Brudd i betong ved trykk er knyttet til brudd i strekk, da strekk spenningene virker vinkelrett på retningen av trykklasten. Strekk spenningene forårsaker vekst av allerede eksisterende mikrosprekker i betongen, som til slutt fører til brudd i matriksen ved økende spenningskonsentrasjon.[11] Med tilsetning av fiber vil betongen oppføre seg mer duktil og

effekten av fiber gir høyere motstand mot langsgående sprekk vekst. Effekten av fiber er derimot avhengig av fibertype, størrelse og egenskapene til fiberen, volumfraksjonen og egenskapene til matriksen. Generelt kan man si at vanlig stålfiber med moderate fraksjoner (<1%) ikke bidrar til økt trykkfasthet, men ved bruk av mikrofiber (for eksempel karbon) og høye fiber fraksjoner (>1%) er det mulig å øke trykkfastheten.[10]Trykkfastheten for fiberarmert betong kan bestemmes av enkle tester, enten på sylindere eller terninger.

2.4.2 Strekk

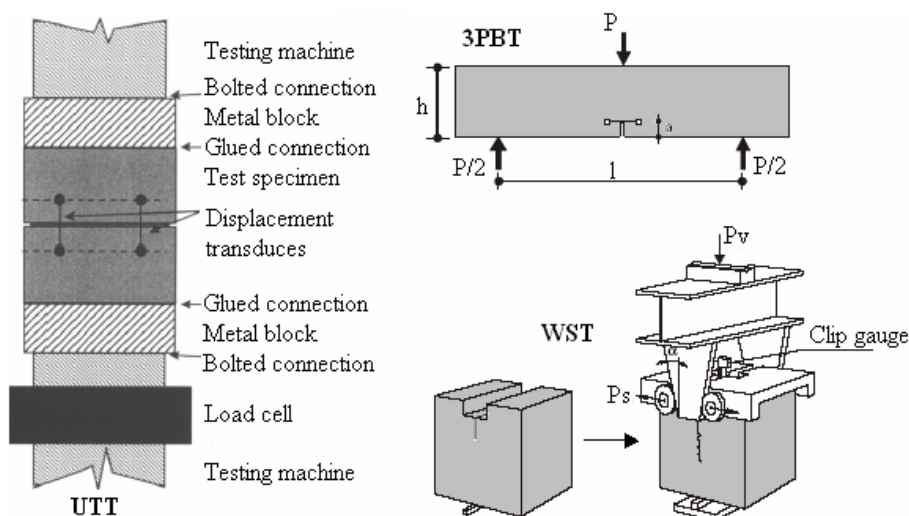
Fiber påvirker betongens oppførsel ved strekk. Det er hovedsakelig duktiliteten som blir mest påvirket og ikke strekkfastheten. Moderate fraksjoner av fiber som tilsettes betongen har vanligvis ingen effekt på betongens strekkfasthet(fasthet ved opprissing).



Figur 14: Typisk strekk oppførsel for stålfiberarmert betong[11]

Det fins mange forskjellige fremgangsmåter for å finne strekkfastheten etter opprissing. Noen av dem er:

- Uni-aksiell strekk test
- Trepunkts bøyetest
- Wedge splitt test
- Fire punkts bøye test



Figur 15: Test oppsett for trepunkts bøyetest, wedge splitt test og uni-aksiell strekk test[11]

I dette prosjektet er det benyttet tre punkts bøyetest for bestemmelse av rest strekkfasthet. Denne testen er basert på NS-EN 14651[13], der legemer med dimensjon på 150*150*550 mm med en

forhåndsdefinert sprekk midt i bjelkespennet benyttes. Fordelen med denne sprekken(notch) er at risset som dannes har en forhåndsdefinert posisjon og risset dannes da ikke i den svakeste delen av bjelken. Denne testen har en tendens til å gi noe høyere verdier av bøyestrekfasthet enn bjelketest uten en forhåndsdefinert sprekk, men som til gjengjeld har en høyere variasjons koeffisient.[11]

2.4.2.1 Rest bøyestrekfasthet

Bøyestrekfastheten og rest bøyestrekfasthet bestemmes fra bøyemomentet ut i fra antakelse av lineær spenningsfordeling over tverrsnittet og i henhold til NS-EN 14651. Dette samsvarer ikke med virkelig spenningsfordeling etter opprissing, men benyttes som en forenkling, se kap. 5.8.1.

2.4.2.2 Rest strekkfasthet ($f_{ftk,res2,5}$)

Rest strekkfasthet av fiberarmert betong er svært avhengig av fordeling og orienteringen av fiberne, som igjen avhenger av støpeprosessen, betongsammensetning, størrelse og geometri av legemet, og andre parametere. [11] Rest strekkfastheten kan beregnes som en prosentandel av rest bøyestrekfastheten, se kap. 5.8.2.

2.4.3 Skjær

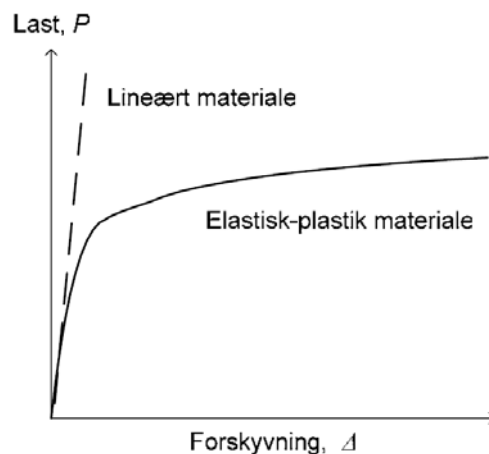
Fiber kan bli brukt til skjærarmoring som en erstatning for bøylearmering i for eksempel bjelker. Flere tester indikerer at fiber øker skjærkapasiteten i betong konstruksjoner og reduserer sprøbrudd til et mer duktilt brudd. Oppførselen til skjærbrudd i fiberarmert betong er krevende pga. mange ukjente parametere. Skjærkapasiteten til fiberarmert betong kan bestemmes ut ifra mange metoder, og kapasiteten er ofte avhengig av rest strekkfasthet eller rest bøyestrekfasthet bestemt fra for eksempel trepunkts bøyetest.[11].

3 Bruddmekanikk

Bruddmekanikk er et eget fagområde som fokuserer på hvordan brudd oppstår og evt. kan forhindres. For å beskrive brudd benyttes det ofte to forskjellige fremgangsmåter, en styrke basert modell og en brudd basert modell. I den styrke baserte modellen antas det at avbinding starter når indre skjærspenning overskrider skjærkapasiteten. Den brudd baserte modellen baserer seg på at konstruksjonen har en indre sprekk lignende feil, og at denne feilen resulterer i at konstruksjonen går til brudd. Hvilken modell som skal benyttes må bestemmes ved grundig evaluering av parametere og mekanismer. Når man så har bestemt parametere som beskriver problemet godt må man benytte seg av bruddmekanisk prøving og eller analyse for å finne disse parametere. Brudd skjer når en funksjon av sprekens dybde og den nominelle spenningen overskrider en viss størrelse. Denne maks verdien er avhengig av materialets egenskaper og kalles for materialets bruddseighet[14].

Betydningen av bruddmekanikk i dag har stor innvirkning på konstruksjonene vi bygger. Alvorlige konsekvenser kan oppstå dersom det går brudd i avanserte konstruksjoner, for eksempel fagdisipliner inne atomenergi, offshore, skipsbygging, rørsystemer, beholdere, osv.

Det må nevnes at anvendelse av bruddmekanikk er ingen eksakt vitenskap. Tidlige forsøk på å relatere bruddmekanikk til betong var mislykkede pga. at de benyttet seg av teorien innen lineær-elastisk bruddmekanikk. Grunnen var at de da neglisjerte virkningen av prosessene som skjer foran makroskopiske sprekker, nemlig dannelsen av mikrosprekker. Siden den gang på 1960-tallet så har bruddmekanikk blitt gradvis utviklet til å gjelde for ikke-lineære materialer og for å ta hensyn til dynamiske effekter. Utviklingen av bruddmekanikkens teoretiske plattform og måling av bruddseighet pågår kontinuerlig, og alle disse nyere teoriene er utvidelser av lineær-elastisk bruddmekanikk.[15, 16]

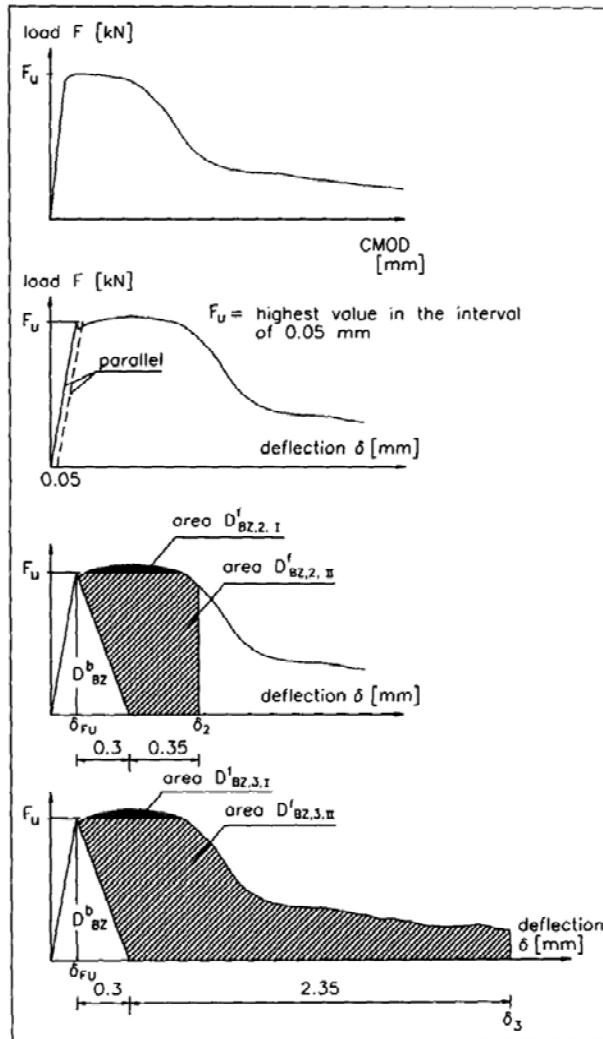


Figur 16: Forskjell mellom lineær-elastisk og elastisk-plastisk oppførsel[17]

3.1 Parametere for bruddseighet og duktilitet

3.1.1 Ekvivalent bøyestrekfasthet

I henhold til NS-EN 14651 kan man finne betongens bøyestrekfasthet og rest bøyestrekfastheter. Disse parametrene kan si oss noe om hvor seig og duktil aktuell betong er. Ved å sammenligne mange prøvestykker kan man da finne den best egnede betongsammensetningen med angitt voluminnhold av fiber, og hvilke fiber som bør benyttes. Denne metoden er beskrevet nærmere i kap. 5.8. Videre kan man benytte seg av last-CMOD kurven man får ut fra bjelketest i henhold til NS-EN 14651, til å finne ekvivalent bøyestrekfasthet.



Figur 17: Diagrammer for beregning av seighets parametere fra RILEM[18]

$$f_{ct,L}^f = \frac{6M_L}{bh_{sp}^2} = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (3-1)$$

Arealet under grafen er delt inn to deler:

- Ren betong som gir D_{BZ}^b
- Virkninger fra fiber:
 - o $D_{BZ,2}^f = D_{BZ,2,I}^f + D_{BZ,2,II}^f$ (Nmm) (3-2)
 - o $D_{BZ,3}^f = D_{BZ,3,I}^f + D_{BZ,3,II}^f$ (Nmm) (3-3)

Dette gir følgende formler for ekvivalent bøyestrekfasthet:

$$f_{eq2} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,2,I}^f}{0,65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0,50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad (3-4)$$

$$f_{eq3} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,3,I}^f}{2,65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2,50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad (3-5)$$

Disse parameterne beskriver hvor seig betongen er ved forskjellige stadier under testing av bjelker. Det må også legges merke til at denne metoden forløper seg til en maks CMOD på kun 2,65mm. For mer utdypende forklaringer på metoden, se Rilem TC 162-TDF, Bending test [18].

3.1.2 Bruddenergi

Bruddenergi er energidissipasjonen per enhetsareal under dannelse av en sprekk. Energien er dissipert (tap) i bruddprosessen som er området foran sprekk tupp der spenningene reduseres med økende sprekkåpning [19]. Bruddenergien kan bestemmes eksperimentelt ved for eksempel uniaksiell strekk test, trepunkts bøyetest eller wedge test. Videre beskrives testmetoden for trepunkts bøyetest. Ved å evaluere energidissipasjonen under brudd, G_F , ved forskjellige CMOD kan testresultater sammenlignes mot hverandre. Arbeidsbrudd (work of fracture), W_F , kan bli beregnet fra arealet under last-CMOD kurven. Den spesifikke energidissipasjonene, G_F , er lik arbeidsbrudd dividert med ligament arealet, A_{lig} [10].

$$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}} \quad (3-6)$$

hvor

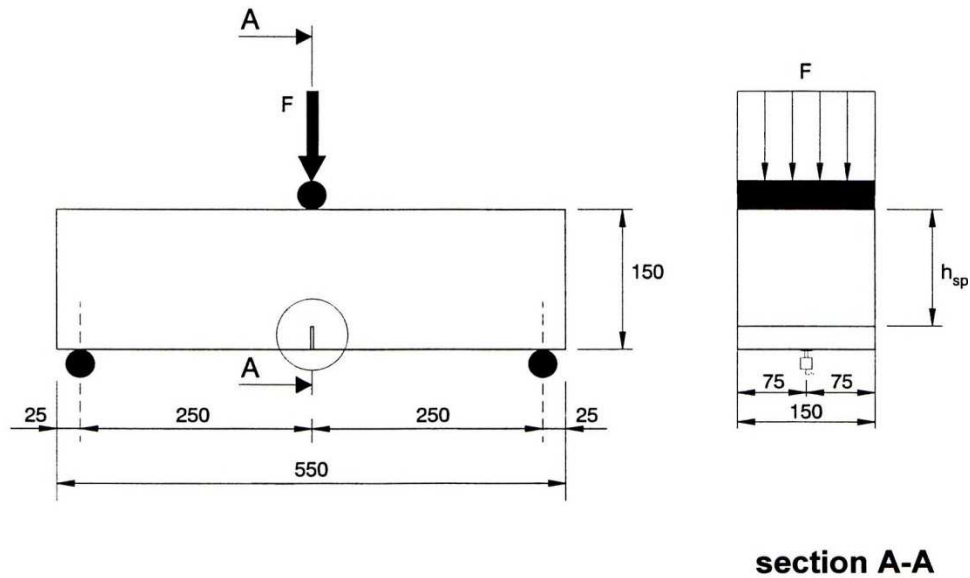
$$A_{lig} = h_{sp} b \quad (3-7)$$

der

W_F er arealet under last-CMOD kurve;

h_{sp} er høyden fra trykkrand til start på forhåndsdefinert sprekk i bjelke;

b er bredden av bjelken.



Figur 18: Illustrerer A_{lig} i henhold til NS-EN 14651 [13]

Test utført etter NS-EN 14651 går ikke prøvestykket helt til brudd, som betyr at det vil alltid være en trykksone. Teoretisk sett skal dette tas med i betraktning av ligament arealet, men som en antakelse så godtas det at hele ligament høyden kan benyttes[10].

3.1.3 Karakteristisk lengde

Den karakteristiske lengden[20] er en indikasjon på materialets sprøhet og er definert som:

$$l_{ch} = \frac{E_c G_F}{f_t^2} \quad (\text{mm}) \quad 3-8)$$

der

E_c er betongens elastisitetsmodul;

G_F er bruddenergi;

f_t er strekkfasthet.

3.1.4 Brittleness number

Denne parameteren[20] beskriver hvor sprøtt materialet er, og er definert som:

$$\beta = \frac{L f_t^2}{G_F E_C} \quad (\text{MPa}) \quad (3-9)$$

der

L er bjelkens lengde.

4 Strukturell analyse

Det er ikke utført beregninger i dette forsøket som knyttes mot forslagene gitt i dette kapitlet. Forslagene er satt opp for å se viktigheten av videre forskning på dette området for etter hvert å kunne innlemme formler for fiberarmert betong i standardene.

4.1 Design av armert betong

Fiberarmert betong har blitt testet i stor grad av tekniske komiteer i flere land, for eksempel Rilem TC 162-TDF og CNR-DT 204/2006, som har resultert i forskjellige veiledninger for design av stålfiberarmert betong. Stålfiberarmerte konstruksjoner er vanlig praksis i dag, men gode design metoder som kan forutsi de mekaniske egenskapene med en god sikkerhetsmargin er ikke utarbeidet. I dette kapitlet er det da satt opp flere forslag angående fiberarmert betong for å dekke en del av den strukturelle analysen som fins i dag.

4.2 Bruddgrensetilstand(ULS)

Denne tilstanden tar for seg konstruksjonens kapasitet mot brudd ved beregning på grunnlag av materialenes tøyningsegenskaper og dimensjonerende fastheter. Dette kapitlet tar for seg de aktuelle lastvirkningene bøyemoment og skjærkraft.

4.2.1 Materialfaktor

I følge Kanstad 2011[8] kan materialfaktoren for rest strekkfastheten ved CMOD lik 2,5mm, $f_{ftk,res2,5}$, settes lik:

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

Den dimensjonerende rest strekkfastheten blir da:

$$f_{ftd,res2,5} = \frac{f_{ftk,res2,5}}{\gamma_{cf}} \quad (4-1)$$

Materialfaktoren γ_{cf} kan reduseres dersom det tas hensyn til avvik i tverrsnittsdimensjonene og at variasjonskoeffisienten for rest strekkfastheten som utarbeides fra trepunkts bøyetest ikke overstiger 10%. Materialfaktoren kan da settes til:

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

4.2.2 Bøyning

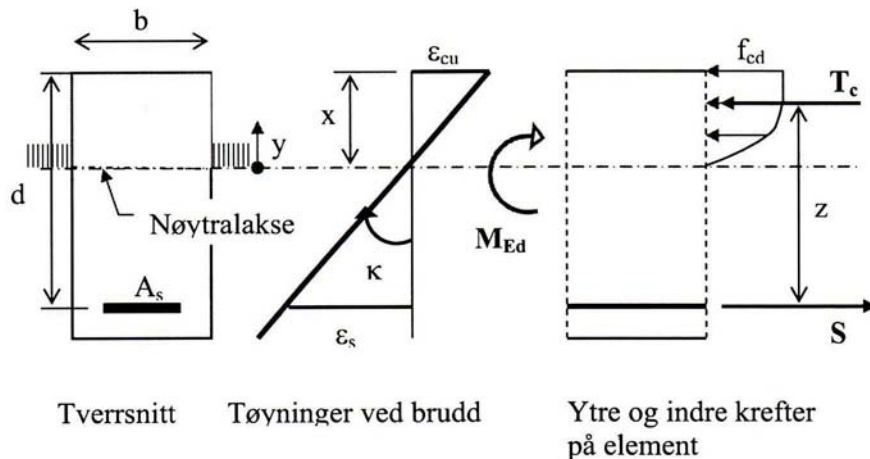
Fiber i betong overfører strekkrefter etter opprissing, som nevnt tidligere. Denne overførselen gjør så trykksonehøyden økes. Økt trykksonehøyde er derfor gunstig med tanke på blant annet momentkapasitet. Momentkapasiteten er en verdi som kan benyttes som en sammenlignes mellom mange varianter av betonger. Det er derfor fordelaktig å komme fram til en formel for momentkapasitet som dekker bruken av fiberarmering. Flere veiledninger fins på markedet men ingen formler for momentkapasitet er innlemmet i standarder enda. Dette kapitlet tar for seg forskjellige forslag med hensyn på momentkapasitet.

4.2.2.1 Momentkapasitet for vanlig armert konstruksjon i henhold til EC2

Beregningene som presenteres her er basert på EC2[21] og Sørensen 2010[22]. Følgende forutsetninger er gjort i henhold til EC2 kap. 6.1(2)P:

- Full heft mellom betong og armering;
- Navier's hypotese gjelder, plane tverrsnitt forblir plane;
- Spennings- og tøyningsegenskaper etter EC2 kap. 7.3.2;
- Betongens strekkfasthet neglisjeres.

Ut ifra forutsetningene som er gjort kan en beregningsmodell lages som vist i Figur 19.



Figur 19: Beregningsmodell for moment[22]

der

d er tverrsnittets effektive høyde fra trykkrand til tyngdepunkt i strekkarmering, i mm;

A_s er tverrsnittsarealet av strekkarmeringen, i mm²;

x er trykksonehøyde, i mm;

S er kraften i strekkarmeringen, i N;

T_c er resultanten av betongspenningene i trykksonen, i N;

z er den indre momentarmen, avstanden mellom S og T_c , i mm;

h er høyden av prøvestykket, i mm;

b er bredden av prøvestykket, i mm;

y_t er avstanden fra nøytralaksen til T_c , i mm.

Vanlig praksis i Norge er å dimensjonere etter et såkalt normalarmert tverrsnitt, når tøyningen i betongtrykksonen er lik ε_{cu2} da ståltøyningen i strekksonen er lik 5‰ ($2\varepsilon_{uk}$)=0,005mm. Å finne trykksonehøyden ved et normalarmert tverrsnitt er gitt av formelen:

$$x = \alpha d \quad (4-2)$$

der

x er trykksonehøyde;

α er trykksonehøydefaktor;

d er tverrsnittets effektive høyde fra trykkrand til tyngdepunkt i strekkarmeringen.

hvor

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + 2\varepsilon_{yk}} \quad (4-3)$$

der

ε_{cu} er det samme som ε_{cu2} i EC2 tabell 3.1, eller for lettbetong ε_{lcu2} i EC2 tabell 11.3.1;

$2\varepsilon_{yk}$ er det samme som $\varepsilon_s = 0,005\text{mm}$ som er armeringstøyning ved brudd.

I henhold til tabell 11.3.1 for lettbetong i EC2 er:

$$\varepsilon_{lcu2} = 0,0035 \times \eta_1 \quad (4-4)$$

hvor

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6 \times \frac{\rho}{2200} \quad (4-5)$$

der

ρ er øvre grense for densiteten for den aktuelle klassen i overensstemmelse med tabell 11.1 i EC2.

Tabell 4 viser verdier for α for et normalarmert tverrsnitt.

Tabell 4: Verdier for α [22]

Fasthetsklasse	B20 – B45	B55	B65	B75	B85 – B95
$\alpha = x/d$	0,412	0,383	0,359	0,346	0,342

Betongtrykksonens dimensjonerende momentkapasitet, M_{Rd} , finnes ved formel gitt som:

$$M_{Rd} = K f_{cd} b d^2 \quad (4-6)$$

der

f_{cd} er dimensjonerende betongtrykkfasthet;

b er bjelkebredde;

d er tverrsnittets effektive høyde fra trykkrand til tyngdepunkt i strekkarmeringen.

Verdien K finnes fra Tabell 5.

Tabell 5: Verdier av K [22]

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

4.2.2.2 Forslag fra Kanstad 2011, momentkapasitet for fiberarmert betong

Forslaget om momentkapasitet ved bruk av kun fiberarmering som presenteres av Kanstad 2011[8] er en forenklet metode med tanke på reel spenningsfordeling. Det er gjort følgende forutsetninger i henhold til EC2 kap. 6.1(2)P:

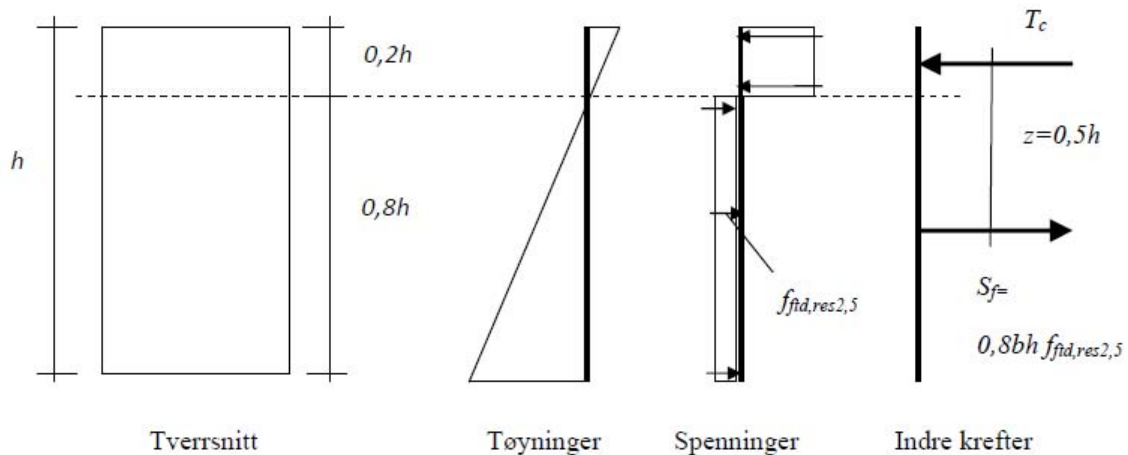
- Navier`s hypotese er gyldig, plane tverrsnitt forblir plane;

- Dimensjonerende spennings- og tøyningssammenheng etter EC2 kap. 3.1.7 og 3.2.7.

Strekksone forenkles ved å anta en uniform spenningsfordeling med spenning tilsvarende rest strekkfasthet, $f_{ftd,res2,5}$, og trykksonehøyden er satt til 20 % av den totale bjelkehøyden.

Spennings- og tøyningfordelingen som er benyttet er vist på Figur 20. Momentkapasiteten blir da for et rektangulært fiberarmert betongtverrsnitt:

$$M_{Rd} = 0,4f_{ftd,res2,5}bh^2 \quad (4-7)$$



Figur 20: Spennings- og tøyningfordeling for et rektangulært tverrsnitt av fiberarmert betong utsatt for ren bøyning[8]

4.2.2.3 Forslag fra Klausen 2009, momentkapasitet med fiber fra NPG

Forslaget er fra Klausen 2009[23] og er basert på Norske foreløpige retningslinjer (NPG)[12]. Momentkapasiteten i dette forslaget tar hensyn til bjelke med kun bruk av stålfiber.

$$M_{ftd} = 0,4f_{ftd,res}bh^2p \quad (4-8)$$

der

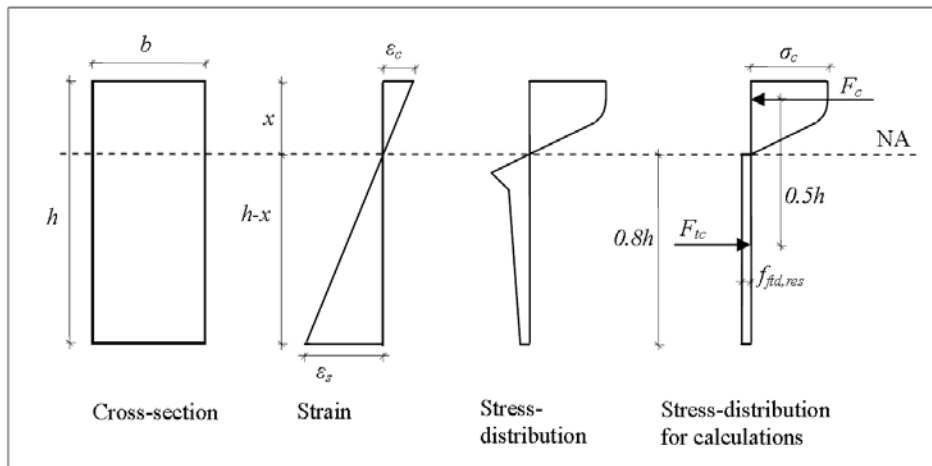
$$f_{ftd,res} = \frac{f_{ftk,res}}{\gamma_m} \quad (4-9)$$

b er bjelkebredde;

h er den effektive bjelkehøyden;

$p = 1,1 - 0,7h > 0,75$ er en faktor tar hensyn til bjelkens dimensjoner; hvor h oppgis i meter.

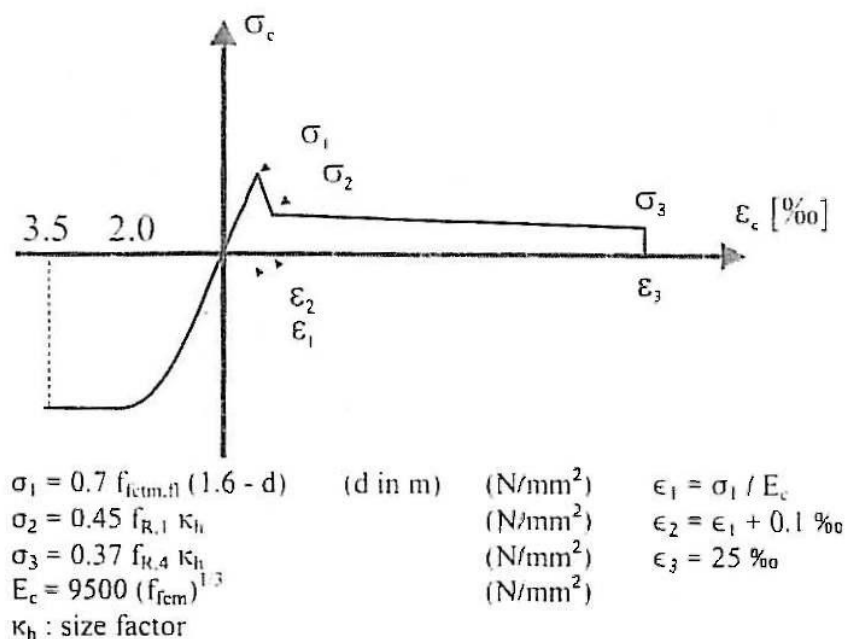
Spennings- og tøyningfordelingen som er benyttet for bestemmelse av ovenfor stående momentkapasitet er gitt av Figur 21.



Figur 21: Spennings- og tøyingsfordeling[23]

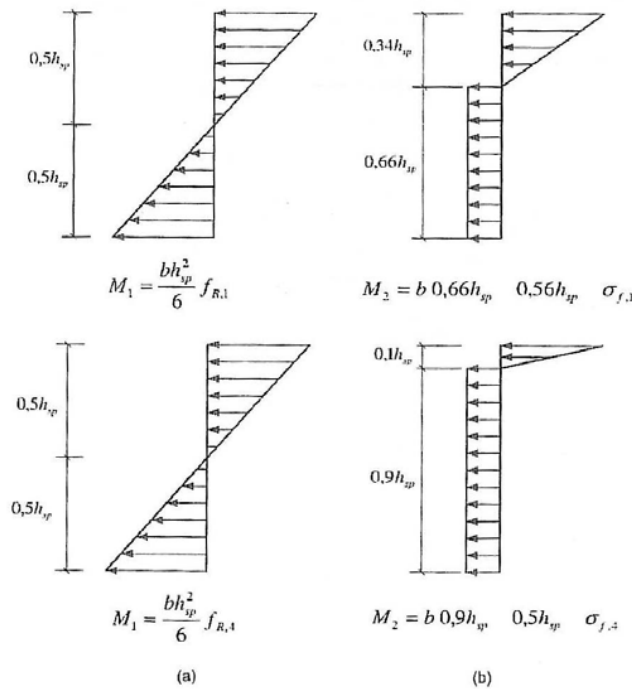
4.2.2.4 Forslag fra Klausen 2009, momentkapasitet fra RILEM 2003

Forslaget er fra Klausen 2009[23] og er basert på veiledningen fra RILEM 2003[24]. Veiledningen baserer seg på bjelketester som benyttes i NS-EN 14651 og resultater som fremkommer fra disse testene. Spenningene som oppstår i strekk og trykksonen ved testing av bjelker etter NS-EN 14651 er utledet fra spenning-tøyingsdiagrammet vist i Figur 22. Ut ifra dette diagrammet kan man da utlede formel for momentkapasitet.



Figur 22: Spenning-tøyingsdiagram fra RILEM 2003[24]

Rest bøyestrekfasthetene $f_{,1}$ og $f_{R,4}$ er beregnet ut i fra antagelsene fra Navier's hypotese om at plane tverrsnitt forblir plane og en lineær spenningsfordeling gjennom tverrsnittet, som også er benyttet videre i prosjektet, se Figur 23a. Spenningsfordelingen er i virkeligheten mer lik Figur 23b.



Figur 23: Spenningsfordeling over tverrsnittet[24]

Rest strekkfasthetene ved CMOD 0,5mm og 3,5mm er beregnet etter Figur 23b. RILEM 2003 bruker også en parameter som tar hensyn til prøvelegemet's størrelse:

$$\kappa_h = 1,0 - 0,6 \frac{h[cm] - 12,5}{47,5} \text{ men } 12,5 \leq h \leq 60[cm] \quad (4-10)$$

4.2.2.5 Forslag fra Klausen 2009, momentkapasitet fra GD of SFRC

Forslaget Klausen 2009[23] baserer seg på GD of SFRC (Guidance for the Design of Steel-Fibre-Reinforced Concrete) og er en forenklet metode for beregning av momentkapasitet.

$$M_p = 0,8 f_{cd} f_{td} b h^2 \frac{\left(0,5 + \frac{0,1 f_{td}}{(0,8 f_{cd} + f_{td})}\right)}{(0,8 f_{cd} + f_{td})} \quad (4-11)$$

der

f_{cd} er trykkfastheten i betongen;

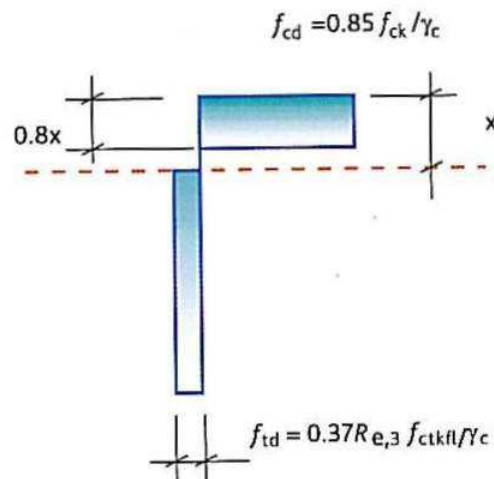
$$f_{td} = \frac{0,37 R_{e,3} f_{ctk,fl}}{\gamma_c} \text{ er dimensjonerende rest strekkfastheten i betongen;} \quad (4-12)$$

$f_{ctk,fl}$ er karakteristisk bøyefasthet;

γ_c er materialfaktor satt til 1,5;

$R_{e,3}$ er ekvivalent bøyefasthet opp til en nedbøyning på 3mm.

Momentkapasiteten følger følgende spennings- og tøyingsfordeling:



Figur 24: Spennings- og tøyingsfordeling fra GD of SFRC[23]

4.2.2.6 Utvidet beregning av momentkapasitet

Dersom man ønsker en utvidet beregning av momentkapasiteten er dette ikke en rett fram metode. Det er store usikkerheter med tanke på den indre momentarmen, z . Momentarmen kan kun beregnes dersom man kjenner stål tøyningen og betong tøyningen i trykksonen. Problemet er å vite eksakt hvor stor trykksonen er, og det er vanskelig å beskrive denne høyden uten å benytte seg av 3.gradsligninger.

Sandbakk 2011[25] har satt opp i sin doktorgrads avhandling en utvidet metode for beregning av momentkapasiteten. Denne metoden skal være kompatibel for alle typer bjelker og plater, med fiberarmering, vanlig armering eller en kombinasjon av disse. Noe som gjør det enkelt å sammenligne resultater mot hverandre. Se vedlegg for full utledning.

4.2.3 Skjær

Beregning av skjærkapasiteten til fiberarmert betong er godt dokumentert, og mange metoder og modeller er tilgjengelig. Skjærkapasiteten er som regel et resultat fra bjelkeprøver med vanlig strekkarmering. Det fins derimot ingen enighet om en beregningsmetode for skjærstrekkkapasiteten med kun fiberarmering. Fiber øker derimot strekkfastheten dersom det er en kombinasjon av vanlig armering og fiber.

4.2.3.1 Skjærstrekkkapasitet med vanlig armering i henhold til EC2

Regler for beregning av skjærstrekkkapasitet er gitt i EC2 kap. 6.2.[21] Reglene her gjelder for bjelker og plater hvor forholdet mellom spennvidde og høyde er minst 3,0 ved tosidig opplegg og minst 1,5 ved utkraget konstruksjonsdel.[22]. Formelen for skjærstrekkkapasiteten som følger brukes når det ikke er beregningsmessig behov for skjærarmering:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \quad (4-13)$$

men

$$V_{Rd,c} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (4-14)$$

der

$$C_{Rd,c} = \frac{0,15}{\gamma_c} \text{ eller } \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (4-15)$$

$$k_1 = 0,15$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b_w d} \quad (4-16)$$

hvor

A_s er tverrsnittsarealet av strekkarmeringen;

b_w er den minste bredde av tverrsnittet i strekksonen;

d er den effektive høyden.

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 f_{cd} \quad (4-17)$$

hvor

N_{Ed} er aksialkraft fra ytre laster og forspenninger ($N_{Ed} > 0$ for trykk);

A_c er arealet av betongtverrsnittet.

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ med } d \text{ i mm} \quad (4-18)$$

$$V_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (4-19)$$

4.2.3.2 Forslag fra Kanstad 2011, skjærstrekkkapasitet for vanlig armering og stålfiber

Forslaget er basert på Kanstad 2011[8]. Forslaget benytter skjærkapasiteten for betong med vanlig strekkarmering, uten tradisjonell bøylearmering i henhold til EC2 kap 6.2.2. Skjærkapasiteten kan finnes fra følgende som er identisk med kap. 4.2.3.1, men med et tillegg for stålfiberen:

$$V_{Rd,c} = V_{Rd,ct} + V_{Rd,cf} \quad (4-20)$$

$$V_{Rd,ct} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \quad (4-21)$$

men

$$V_{Rd,ct} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (4-22)$$

$$V_{Rd,cf} = 0,6 f_{ftd,res2,5} b_w h \quad (4-23)$$

der

$$f_{ftd,res2,5} = \frac{f_{ftk,res2,5}}{\gamma_{cf}} \quad (4-24)$$

hvor

$\gamma_{cf} = 1,5$ er betongens materialfaktor (eller 1,35 som angitt i 4.2.1)

4.2.3.3 Forslag fra Klausen 2009, skjærstrekkkapasitet fra NPG

Denne metoden fra Klausen 2009[23] er basert på Norske foreløpige retningslinjer (NPG)[12]. Dette forslaget baserer seg på skjærkapasiteten for betong med vanlig strekkarmering og stålfiber uten bruk av skjærarmering. Skjærstrekkkapasiteten er gitt som følger:

$$V_d = V_{cd} + V_{fd} + V_{sd} \quad (4-25)$$

der

V_{cd} er skjærkapasiteten i konstruksjonsdel uten skjærarmering som gitt i EC2 kap. 6.2.2;

V_{fd} er skjærkapasitetsbidraget fra stålfiber;

V_{sd} er skjærkapasitetsbidraget fra vanlig armering.

$$V_{fd} = 0,8 f_{ftd,res} b d p \quad (4-26)$$

$$V_{sd} = \frac{f_{sd} A_{sv}}{s} z (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (4-27)$$

der

$$z = 0,8d$$

$$\theta = 45^\circ$$

$$\alpha = \pi/2 - \theta$$

4.2.3.4 Forslag fra Klausen 2009, skjærstrekkkapasitet fra RILEM 2003

Denne metoden baserer seg på konstruksjonsdeler med beregningsmessig behov for skjærarmering inkludert fiberarmering. Metoden er hentet fra Klausen 2009[23] og baserer seg på metoden gitt i RILEM 2003[24]. Skjærstrekkkapasiteten er gitt fra følgende formel:

$$V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} \quad (4-28)$$

der

V_{cd} er skjærkapasiteten i konstruksjonsdel uten skjærarmering som gitt i EC2 kap. 6.2.2;

V_{fd} er skjærkapasitetsbidraget fra stålfiber;

V_{wd} er skjærkapasitetsbidraget fra bølgearmering og/eller skråstilt armering.

Stålfibernes bidrag til skjærkapasiteten er gitt som:

$$V_{fd} = 0,7 k_f k_t \tau_{fd} b_w d \quad (4-29)$$

der

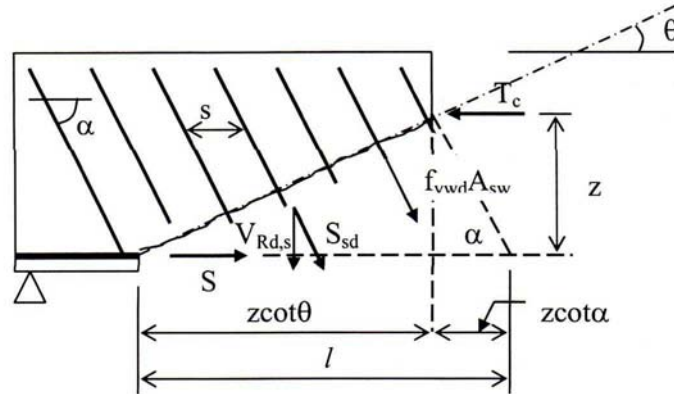
k_f er en faktor som tar hensyn til flensene i et T-tverrsnitt;

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ med } d \text{ i mm;} \quad (4-30)$$

τ_{fd} er en verdi som tar hensyn til økningen i skjærfasthet fra stålfiberne;

b_w er den minste bredde av tverrsnittet i strekksonen;

d er den effektive høyden.



Figur 25: Bjelke med skjærarmoring[22]

4.2.3.5 Forslag fra Klausen 2009, skjærstrekkkapasitet fra GD of SFRC

Metoden som beskrives her er hentet fra Klausen 2009[23] og baserer seg på metoden gitt i GD of SFRC. GD of SFRC benytter RILEM's anbefalinger, men metoden er oppdatert til å samsvare med EC2. Skjærstrekkkapasiteten som beskrives inkluderer skjærarmoring og stålfiber, og er identisk med skjærstrekkkapasiteten gitt av RILEM 2003[24] kap. 4.2.3.4:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} + V_{fd}] b_w d + V_{wd} \quad (4-31)$$

der

V_{fd} er skjærkapasitetsbidraget fra stålfiber;

V_{wd} er skjærkapasitetsbidraget fra bøylearmering og/eller skråstilt armering.

Stålfibernes bidrag til skjærkapasiteten er gitt som:

$$V_{fd} = 0,7 k_f k \tau_{fd} \quad (4-32)$$

der

k_f er en faktor som tar hensyn til flensene i et T-tverrsnitt;

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ med } d \text{ i mm;} \quad (4-33)$$

τ_{fd} er en verdi som tar hensyn til økningen i skjærfasthet fra stålfiberne;

b_w er den minste bredde av tverrsnittet i strekksonen;

d er den effektive høyden.

4.3 Bruksgrensetilstand(SLS)

Denne tilstanden bygger på at konstruksjonen skal tåle dens angitte bruk og formål gjennom sin brukstid. Kravene som stilles i bruksgrensetilstanden skal også påse at konstruksjonens bestandighet er sikret. De kravene som dekkes i dette kapitlet gjelder opprissing av betong.

4.3.1 Minimumsarmering

Dersom det er krav om å begrense rissvidden, kreves det en minste mengde med armering for å begrense opprissing i områder der det kan oppstå strekk, heter det i EC2 kap. 7.3.2. Hensikten med minimumsarmering er å ha en sikkerhet mot skadelig riss som dannes av krefter som hovedsakelig ikke dekkes av den strukturelle analysen, da spesielt effektene fra temperatur, kryp, svinn, osv. Hovedformålet med minimumsarmering er at kapasiteten ved første sprekkdannelse skal være større eller lik som kapasiteten før første sprekkdannelse. I NS-EN 14651 betyr det at rest bøyestrekkefastheten, $f_{R,j}$, skal være større eller lik bøyestrekkefastheten, $f_{ct,L}$, for alle sprekkeåpninger. Ved bruk av fiberarmering vil minimumsarealet og rissvidden bli redusert pga. at fiberne fungerer som en bru i risset, og dermed øker rest strekkefastheten i betongen. Alt dette skjer først etter opprissing, så fiber er med på å begrense skadene betongen kan få.

Videre følger krav til minimumsarmering for begrensnig av rissvidde for vanlig armert konstruksjon i henhold til EC2 og noen forslag for minimumsarmering for å begrense rissvidde når det benyttes en kombinasjon av vanlig armering og fiber.

4.3.1.1 Vanlig armert konstruksjon i henhold til EC2

Beregning av minimumsarmering for begrensnig av rissvidde i henhold til EC2 kap. 7.3.2[21] er uttrykt som følger:

$$A_{s,min}\sigma_s \geq k_c k f_{ct,eff} A_{ct} \quad (4-34)$$

der

$A_{s,min}$ er tverrsnittsarealet av minimumsarmering i strekksonen;

A_{ct} er betongarealet i strekksonen;

σ_s er den største tillatte spenningen i armeringen. Den kan antas lik armeringens flytegrense f_{yk} ;

$f_{ct,eff}$ er midlere strekkefasthet når riss kan forventes;

k_c er koeffisient som tar hensyn til spenningsfordeling innenfor tverrsnittet umiddelbart før opprissing og til endringen i den indre momentarmen. For rent strekk er $k_c = 1,0$

$$\text{For bøyning er } k_c = 0,4 \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}} \right) \leq 1,0 \quad (4-35)$$

der

$$k_1 = 0,6$$

$h/h^* = 1,0$, se EC2 kap. 7.3.2 for ytterligere utledninger;

k er koeffisient som tar hensyn til ujevn spenningsfordeling i tverrsnitt med indre likevekt, noe som fører til en reduksjon av fastholdingskrefter. Lik 1,0 for $h \leq 300$.

4.3.1.2 Forslag fra Kanstad 2011 med vanlig armering og fiber

Forslaget som presenteres her er basert på Kanstad 2011[8]. Beregningen som følger er med vanlig armering og fiberarmering som er i samsvar med EC2 kap.7.3.2, men med noen tillegg for å inkludere fiberarmeringen:

$$A_{s,min}\sigma_s + A_{ct2}f_{ftk,res2,5} \geq k_c k_{fct,eff} A_{ct} \quad (4-36)$$

eller

$$A_{s,min} \geq \frac{(k_c k_{fct,eff} A_{ct} - A_{ct2} f_{ftk,res2,5})}{\sigma_s} \quad (4-37)$$

der

$A_{s,min}$ er tverrsnittsarealet av vanlig armering i strekksonen;

A_{ct} er betongarealet i strekksonen;

A_{ct2} er betongarealet i strekksonen etter opprissing;

σ_s er den største tillatte spenningen i armeringen. Den kan antas lik armeringens flytegrense f_{yk} ;

$f_{ct,eff}$ er midlere strekkfasthet når riss kan forventes;

$f_{ftk,res2,5}$ er karakteristisk rest strekkfasthet relatert til 2,5mm rissvidde;

k_c er koeffisient som tar hensyn til spenningsfordeling innenfor tverrsnittet umiddelbart før opprissing og til endringen i den indre momentarmen. For rent strekk er $k_c = 1,0$

$$\text{For bøyning er } k_c = 0,4 \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}} \right) \leq 1,0 \quad (4-38)$$

der

$$k_1 = 0,6$$

$h/h^* = 1,0$, se EC2 kap. 7.3.2 for ytterligere utledninger;

k er koeffisient som tar hensyn til ujevn spenningsfordeling i tverrsnitt med indre likevekt, noe som fører til en reduksjon av fastholdingskrefter. Lik 1,0 for $h \leq 300$.

4.3.1.3 Forslag fra Klausen 2009 med vanlig armering og fiber fra RILEM

Forslaget som presenteres her er fra Klausen 2009[23] og baserer seg på RILEM 2003[26]. Følgende formel er foreslått som minimumsarmering for å begrense rissvidden:

$$A_{s,min} = (k_c k_p k_{fct,eff} - 0,45 f_{Rm,1}) \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad (4-39)$$

der

$A_{s,min}$ er tverrsnittsarealet av minimumsarmering i strekksonen;

A_{ct} er betongarealet i strekksonen;

f_{yk} er armeringens karakteristiske flytegrense;

$f_{ct,eff}$ er midlere strekkfasthet når riss kan forventes;

$f_{Rm,1}$ er midlere rest strekkfasthet når riss først kan forventes;

k_c er koeffisient som tar hensyn til spenningsfordeling innenfor tverrsnittet umiddelbart før opprissing og til endringen i den indre momentarmen. For rent strekk er $k_c = 1,0$

$$\text{For bøyning er } k_c = 0,4 \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}} \right) \leq 1,0 \quad (4-40)$$

der

$$k_1 = 0,6$$

$h/h^* = 1,0$, se EC2 kap. 7.3.2 for ytterligere utledninger;

k er koeffisient som tar hensyn til ujevn spenningsfordeling i tverrsnitt med indre likevekt, noe som fører til en reduksjon av fastholdingskrefter. Lik 1,0 for $h \leq 300$;
 k_p er en koeffisient som tar hensyn til forspente effekter.

4.3.1.4 Forslag fra Klausen 2009 med vanlig armering og fiber fra GD of SFRC

Forslaget som presenteres her er basert på Klausen 2009[23]. Veiledningen for design av stålfiber armert betong (Guidance for the Design of Steel-Fibre-Reinforced Concrete - GD of SFRC) har benyttet metoden for beregning av minimumsarmering fra Rilem's σ - ϵ metode[26], og oppdatert den slik at den samsvarer med EC2. Minimumsarmering for begrensning av rissvidde kan uttrykkes som angitt:

$$A_{s,min} = A_{ct} \frac{\left(k_c k f_{ct,eff} - \frac{0,45 f_{Rm1}}{1,4}\right)}{\frac{f_{yk}}{1,4}} \quad (4-41)$$

der

$A_{s,min}$ er tverrsnittsarealet av minimumsarmering i strekksonen;

A_{ct} er betongarealet i strekksonen;

f_{yk} er armeringens karakteristiske flytegrense;

$f_{ct,eff}$ er midlere strekkfasthet når riss kan forventes;

f_{Rm1} er midlere rest strekkfasthet når riss først kan forventes;

k_c er koeffisient som tar hensyn til spenningsfordeling innenfor tverrsnittet umiddelbart før opprissing og til endringen i den indre momentarmen. For rent strekk er $k_c = 1,0$

$$\text{For bøyning er } k_c = 0,4 \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}}\right) \leq 1,0 \quad (4-42)$$

der

$k_1 = 0,6$

$h/h^* = 1,0$, se EC2 kap. 7.3.2 for ytterligere utledninger;

k er koeffisient som tar hensyn til ujevn spenningsfordeling i tverrsnitt med indre likevekt, noe som fører til en reduksjon av fastholdingskrefter. Lik 1,0 for $h \leq 300$.

4.3.2 Rissvidde

Videre følger beregning av rissvidde for vanlig armert konstruksjon i henhold til EC2 og noen forslag for beregning av rissvidde når det benyttes vanlig armering og fiber.

4.3.2.1 Beregning av rissvidde for vanlig armert konstruksjon

I samsvar med 7.3.4 i EC2 kan rissvidde beregnes ut ifra følgende uttrykk:

$$w_k = S_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (4-43)$$

der

w_k rissvidden

$S_{r,max}$ er største rissavstand;

ε_{sm} er den midlere tøyningen i armeringen;

ε_{cm} er midlere tøyning i betongen mellom riss;

og

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (4-44)$$

der

σ_s er spenningen i armeringen ved opprisset tverrsnitt;

α_e er forholdet $\frac{E_s}{E_{cm}}$;

$$\rho_{p,eff} = \frac{(A_s + \xi_1^2 A_p')}{A_{c,eff}} \quad (4-45)$$

$A_{c,eff}$, A_p' og ξ_1^2 se 7.3.2 i EC2;

k_t er faktor som avhenger av lastens varighet:

0,6 for kortvarig belastning

0,4 for langvarig belastning.

$$S_{r,max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4}{\rho_{p,eff}} \quad (4-46)$$

der

ϕ er armeringens diameter;

k_1 er 0,8 ved god heft og 1,6 ved glatt overflate på stenger;

k_2 er 0,5 for bøyning og 1,0 for rent strekk;

k_3 er lik 3,4, i henhold til nasjonalt tillegg;

k_4 er lik 0,425, i henhold til nasjonalt tillegg.

4.3.2.2 Forslag fra Kanstad 2011 for fiberarmert konstruksjon

Forslaget er fra Kanstad 2011[8]. Metoden som beskrives er identisk med rissvidde beregningen i kap. 4.3.2.1, men med en koeffisient, k_5 , som tar hensyn til fibertilsetning.

$$w_k = S_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (4-47)$$

der

w_k rissvidden

$S_{r,max}$ er største rissavstand;

ε_{sm} er den midlere tøyningen i armeringen;

ε_{cm} er midlere tøyning i betongen mellom riss;

og

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (4-48)$$

σ_s er spenningen i armeringen ved opprisset tverrsnitt;

α_e er forholdet $\frac{E_s}{E_{cm}}$;

$$\rho_{p,eff} = \frac{(A_s + \xi_1^2 A_p')}{A_{c,eff}} \quad (4-49)$$

$A_{c,eff}$, A_p' og ξ_1^2 se 7.3.2 i EC2;

k_t er faktor som avhenger av lastens varighet:

0,6 for kortvarig belastning

0,4 for langvarig belastning.

$$S_{r,max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 k_5}{\rho_{p,eff}} \quad (4-50)$$

der

ϕ er armeringens diameter;

k_1 er 0,8 ved god heft og 1,6 ved glatt overflate på stenger;

k_2 er 0,5 for bøyning og 1,0 for rent strekk;

k_3 er lik 3,4, i henhold til nasjonalt tillegg;

k_4 er lik 0,425, i henhold til nasjonalt tillegg;

$k_5 = (1 - \frac{f_{ftk,res2,5}}{f_{fctm}})$ er en faktor som tar hensyn til fibertilsetning.

4.4 Konstruksjonsregler

For at fiberarmert betong skal kunne benyttes istedenfor vanlig armerte konstruksjoner utsatt for bøyning, må fiberarmerte konstruksjoner tilfredsstillende konstruksjonskravet til minimumsarmering. Dette kapitlet tar for seg konstruksjonsregler for vanlig armert konstruksjon og forslag til minimumsarmering når det benyttes fiber.

4.4.1 Vanlig armert konstruksjon i henhold til EC2

Konstruksjonsregler for rektangulære bjelker i følge seksjon 9 i EC2, så kan $A_{s,min}$ bestemmes av uttrykket:

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \quad (4-51)$$

men

$$A_{s,min} \geq 0,0013 b_t d \quad (4-52)$$

der

- f_{ctm} er middelverdi av strekkfastheten i betongen evt. f_{lctm} for lettbetong, i MPa;
- f_{yk} er armeringens karakteristiske flytegrense, i MPa;
- b_t er midlere bredde av strekksone, i mm;
- d er effektiv tykkelse av tverrsnittet, i mm.

f_{ctm} finner man i tabell 3.1 for normalbetong og tabell 11.3.1 for lettbetong i EC2.

4.4.2 Forslag fra Kanstad 2011 med vanlig armering og fiber

Konstruksjonsregel for rektangulære bjelker i henhold til Kanstad 2011 med fiberarmering er uttrykt som følger:

$$A_{s,min} = \frac{0,26 b_t d (f_{ctm} - 2,1 f_{ftk,res2,5})}{f_{yk}} \quad (4-53)$$

men

$$A_{s,min} \geq 0,0013 b_t d \left(\frac{1 - 2,1 f_{ftk,res2,5}}{f_{ctm}} \right) \quad (4-54)$$

der

- f_{ctm} er midlere strekkfasthet for aktuell normalbetong, evt. f_{lctm} for lettbetong;
- b_t er midlere bredde av strekksone;
- d er den effektive tverrsnittshøyden.

Dersom konstruksjonsregelen for $A_{s,min}$ blir lik eller mindre enn null, betyr det at man ikke trenger å benytte seg av vanlig armering.

5 Forsøksprogram og prøvemetoder

5.1 Prøveprogram

Tabell 6: Prøveprogram

Prøve nr.	Stålfiber vol%	Basaltfiber vol%	Antall terninger	Antall sylindere	Antall bjelker	Antall liter [L]	Blanding [L]
11-ref	-	-	4	4	1	37,57	50
12-ref	-	-	4	4	1	37,57	50
13-ref	-	-	4	4	2	49,945	60
11-ref-2	-	-	4	4	1	37,57	50
12-ref-2	-	-	4	4	1	37,57	50
13-ref-2	-	-	4	4	2	49,945	60
12_1	0,50	-	4	4	1	37,57	50
12_2	1,00	-	4	4	1	37,57	50
12_3	-	0,50	4	4	1	37,57	50
12_4	-	1,00	4	4	1	37,57	50
12_5	0,50	0,50	4	4	1	37,57	50
13_1	0,50	-	4	4	2	49,945	60
13_2	1,00	-	4	4	2	49,945	60
13_3	-	0,50	4	4	2	49,945	60
13_4	-	1,00	4	4	2	49,945	60
13_5	0,50	0,50	4	4	2	49,945	60
		Sum	64	64	23	687,745	870

5.2 Materialer

- Sement: CEM I 52,5 N (Norcem Anlegg), densitet 3140kg/m³, finhet (Blaine)360m²/kg. Se vedlegg.
- Superplastifiserende: Dynamon SX-N fra Rescon Mapei. Densitet på 1060±20 kg/m³. Tørrestoffinnhold på 18,5±1,0 %. Se vedlegg.
- Lufttilførende: SikaAer-S fra Sika Norge AS. Densitet på 1020±10 kg/m³. Tørrestoffinnhold på 9,0±1,0 %. Se vedlegg.
- Leca: Det ble benyttet 4 fraksjoner av lecaklinker. Se vedlegg.
 - Filtralite MC 0,8-1,6. Partikkeldensitet 1400 kg/m³.
 - Filtralite HC 1,5-2,5. Partikkeldensitet 1600 kg/m³.
 - Filtralite HR 3-6. Partikkeldensitet 1450 kg/m³.
 - Filtralite HR 4-8. Partikkeldensitet 1400 kg/m³.



Figur 26: 0,8-1,5mm til venstre og 1,5-2,5mm til høyre



Figur 27: 3-6mm til venstre og 4-8mm til høyre

- Gneis/granitt: Det ble benyttet følgende fraksjoner.
 - Forsand 0-5.
 - Forsand 5-8.
 - Velde 8-11.
 - Velde 11-16.



Figur 28: 0-5mm til venstre og 5-8mm til høyre



Figur 29: 8-11mm til venstre og 11-16mm til høyre

- Fiber: Det ble benyttet to typer fiber.
 - Stålfiber: Krampe Harex DE 50/1,0 N med krok i begge ender. Lengde 50 ± 10 (mm), strekkfasthet på 1100 ± 15 (MPa). Se vedlegg.
 - Basaltfiber: Lengde 50 ± 10 (mm), basaltfiber surret rundt glassfiber, ingen flere data funnet.



Figur 30: Basaltfiber til venstre og stålfiber til høyre

5.3 Betong sammensetning

Blandingsserie nr. 11 er kun utført som referanse. Serie 11 er utført med normalbetong og uten fiber. Blandingsserie nr. 12 er en miks med densitet som tilsvarer lettbetong. Innenfor denne serien er det benyttet samme proporsjonering, men med varierende mengde fiber og type fiber. Blandingsserie nr. 13 er en miks med densitet tilsvarende lett-lettbetong, som det heter i dette prosjektet. I alle blandingsseriene er det forsøkt å tilfredsstille fasthetsklasse B45 og LB45, se Figur 4, og bestandighetsklasse M60. Referanse blandingsene ble blandet på nytt pga. dårlige resultater. Blandingene refereres som 11-ref-2, 12-ref-2 og 13-ref-2.

5.4 Blandeprosedyre

En tvangsblender av typen med 110 liters kapasitet per blanding ble benyttet for å blande betongen, se Figur 31. Volum per blanding varierte mellom 50l og 60l, avhengig av antall bjelker (1 eller 2) per blanding. Blandeprosedyren var som følger:

- 1 minutt tørr blanding, tilslag og sement;
- 3 minutter blanding med tilsetting av vann, SP-stoff og lufttilførende stoff;
- 1 minutt blanding med tilsetting av fiber;
- 1 minutt blanding.



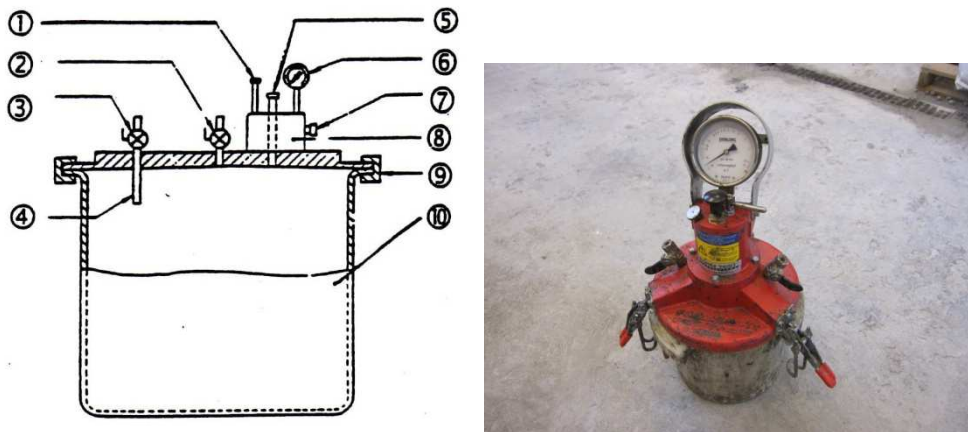
Figur 31: Tvangsblender som ble brukt i prosjektet

5.5 Prøving av fersk betong

Egenskapene til den ferske betongen har stor innvirkning på betongens bestandighet og styrke. De testene som er utført i dette prosjektet er vist i dette kapitlet. All prøvetaking er tatt ut i samsvar med NS-EN 12350-1:2000.

5.5.1 Luftinnhold

Luftinnhold ble utført og målt i samsvar med NS-EN 12350-7:2000. Metoden som benyttes er trykk-gauge-metoden, se Figur 32. Apparatet fylles med betong i 3 forskjellige lag, og for hvert lag stemples det med en komprimeringsstang med 25 støt. Apparatet rengjøres rundt kanten før lokket settes på. Vann sprøytes inn i ventil A til vann pipler ut av ventil B. Ventilene lukkes. Luft pumpes inn i beholderen med pumpen og stabiliseres på start punkt på måler. Deretter åpnes hovedventilen for så å avlese verdiene som vises. [27]



Figur 32: Apparat for trykk-gauge-metoden[27]

der

- 1. Pumpe
- 2. Ventil A
- 3. Ventil B
- 4. Forlengingsrør for kalibrerings sjekk
- 5. Hoved luftventil
- 6. Trykk-gauge
- 7. Luftventil
- 8. Luft kammer
- 9. Fastklemming
- 10. Beholder

5.5.2 Densitet

Densitet ble utført og målt i samsvar med NS-EN 12350-6:2000. Da beholderens volum er kjent, fylles beholderen med betong i 2 lag og komprimeres med komprimeringsstang med 25 støt. Beholder veies og verdi avleses, den avleste verdien deles med vekten av beholderens volum. Densiteten beregnes etter følgende formel:

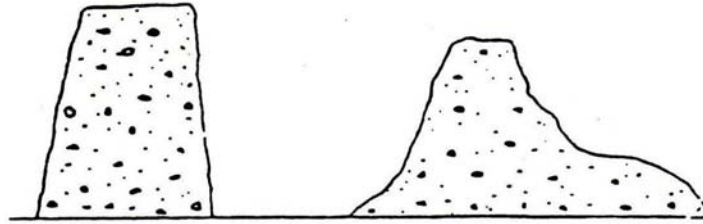
$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (5-1)$$

der

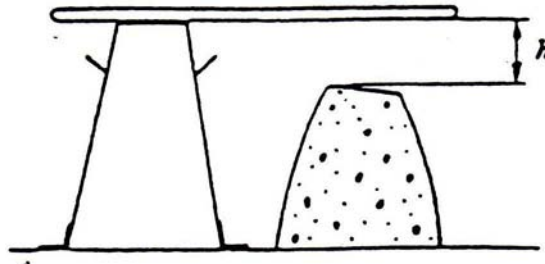
- D er densiteten av den ferske betongen, i kg/m^3 ;
- m_1 er beholderens masse, i kg;
- m_2 er beholderens masse pluss massen av betongprøven i beholderen, i kg;
- V er beholderens volum, i m^3 . [28]

5.5.3 Synkmål

Synkmålet ble utført og målt i samsvar med NS-EN 12350-2:2000. Synkkjeglen og underlaget fuktes, det må påses at underlaget er i vater. Synkkjeglen holdes fast med beina mot underlaget mens man fyller i betong. Det fylles 3 lag og for hvert lag komprimeres det med en komprimeringsstang med 25 støt. Ved lag 2 og 3 skal komprimeringstangen gå så vidt gjennom forrige lag. Toppen avrettes og synkkjeglen løftes i jevn fart uten vridninger og sidebevegelser. Dersom prøven er ujevn har den fått en skjærdeformasjon og en ny prøve må tas, se Figur 33 [29]. Synkmålet blir bestemt ut fra avstanden fra synkkjeglens topp til høyeste punkt på betongoverflaten, se Figur 34.



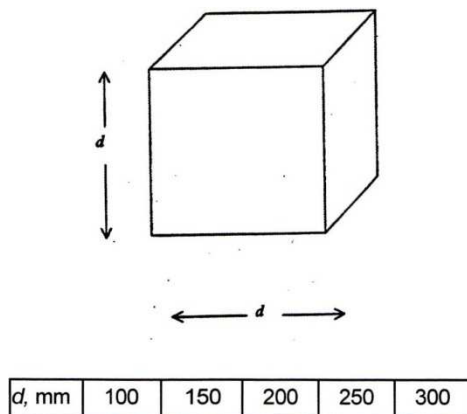
Figur 33: Sant og skjærdeformert synkmål[29]



Figur 34: Synkmåling[29]

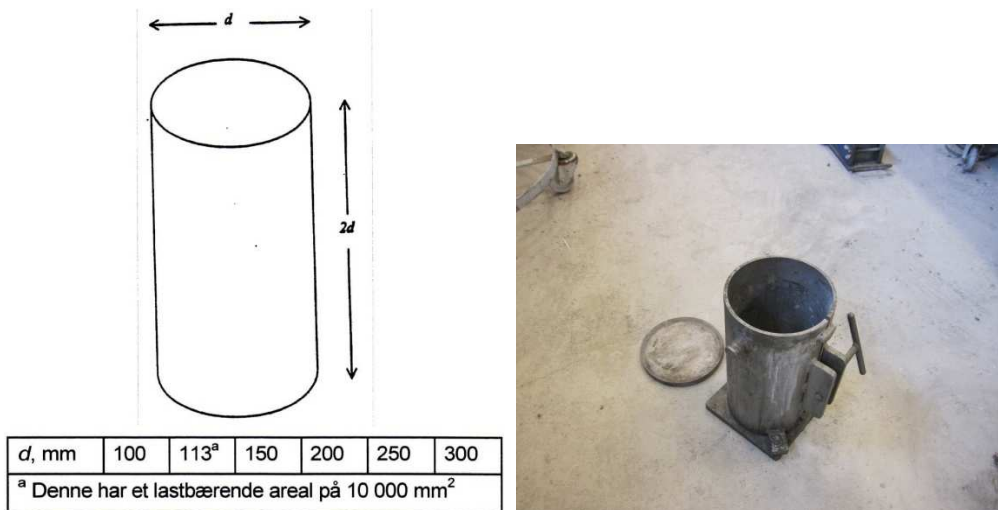
5.6 Støping

Terninger (100*100*100mm), se Figur 35, ble støpt for bestemmelse av trykkfasthet, se 5.7.1. 4 terninger ble utstøpt per blanding hvorav 2 terninger ble trykktestet henholdsvis for 7 og 28 døgnfasthet. Terningene ble utstøpt i 2 porsjon med moderat komprimering, for å motvirke utskilling av fiber og at fiber legger seg på linje. Terningene ble tildekket med plastikk og lagret på et bord i laben i 24 timer ved $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, for så å bli lagret i vannbad på $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ frem til testing. [30]



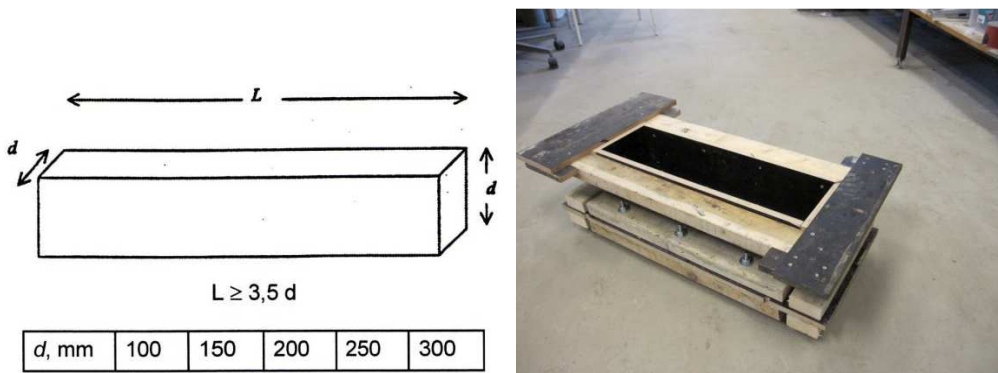
Figur 35: Nominelle størrelser for terninger til venstre[31] og støpeform til høyre

4 sylindere (150*300mm), se Figur 36, ble støpt ut pr blanding, hvorav 2 ble brukt til å finne spaltestrekkfasthet, se 5.7.2, og 2 til bestemmelse av E-modul i form av sylindetrykkfasthet, se 5.7.1 og 5.7.3. Metode for utstøping og lagring var identisk som beskrevet ovenfor for terninger. [30]



Figur 36: Nominelle størrelser for sylindere til venstre[31] og støpeform til høyre

Bjelker (150*150*550mm), se Figur 37, ble støpt for bestemmelse av bøyestrekfasthet, se kap. 5.8. Det ble støpt 1 bjelke per blanding bortsett fra prøver i serie 13, hvor det ble støpt 2 bjelker per blanding. Metode for utstøping og lagring var identisk som beskrevet ovenfor for terninger. [30]



Figur 37: Nominelle størrelser for prismer (bjelker)[31] og støpeform til høyre

5.7 Måling av herdet betong

Det er en forutsetning at betongkonstruksjonen tåler belastningene den blir utsatt for ved ønsket levetid. Krav stilles til betongens bestandighet og styrke. Dette avsnittet tar for seg viktige tester som avdekker betongens styrke samt utførelse av testene.

5.7.1 Trykkfasthet

Trykkfastheten ble utført i samsvar med NS-EN 12390-3:2009. Alle flater på prøvestykket og trykkpressen tørkes og renses for partikler. Prøvestykket plasseres i senter av trykkpressen. Det ble valgt en konstant hastighet for spenningsøkning på 0,5 MPa/s [32]. Trykkfastheten er gitt av følgende formel:

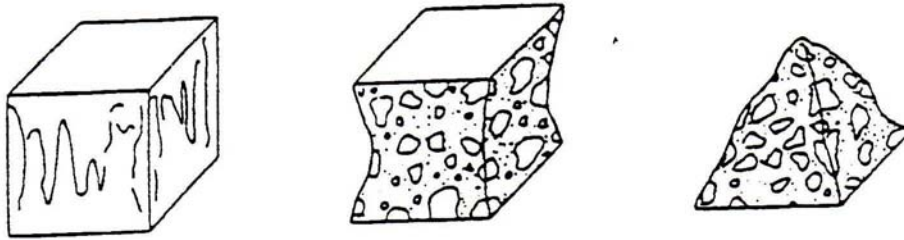
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5-2)$$

der

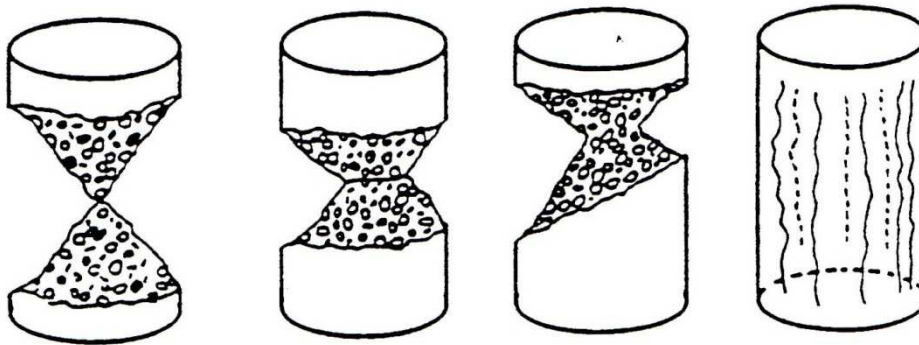
f_c er trykkfastheten, i MPa (N/mm²);
 F er bruddlast, i N;

A_c er tverrsnittsarealet på prøvestykket som trykkraften virker mot, i mm^2 .

Tillatte bruddformer på prøvestykkene er vist på Figur 38 og Figur 39.



Figur 38: Tilfredsstillende bruddform for terninger[32]



Figur 39: Tilfredsstillende bruddform for sylindere[32]



Figur 40: Sylinder trykkfasthet for 13_2 til venstre og 12-ref-2 til høyre

I dette prosjektet ønskes det å oppnå en fasthet som tilsvarer fasthetsklasse LB45 for lettbetong og B45 for normalbetong. Dette tilsvarer en terningfasthet etter 7 døgn på 37,5 MPa for lettbetong og 41,2 MPa for normalbetong.

5.7.2 Spaltestrekkfasthet

Spaltestrekkfastheten ble utført i samsvar med NS-EN 12390-6:2001. Prøvelegemene skal være sylinderformede i samsvar med NS-EN 12390-1:2001. Alle flater tørkes og partikler fjernes.

Prøvestykket sentreres og hastigheten for spenningsøkningen ble satt til 0,05 MPa/s, se Figur 41.[33]

Spaltestrekkfastheten er gitt av følgende formel:

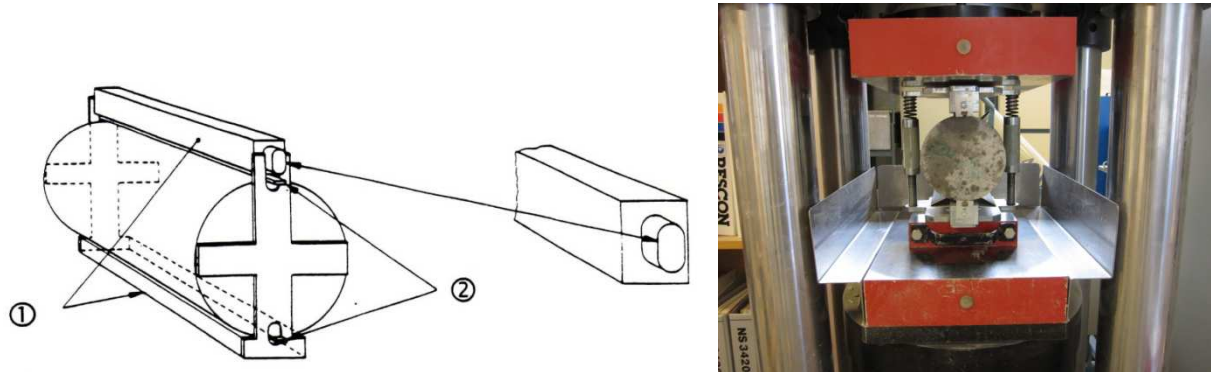
$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (5-3)$$

der

f_{ct} er spaltestrekkfastheten, i MPa eller N/mm^2 ;

- F er største last, i N;
 L er lengden på prøvestykkets kontaktlinje, i mm;
 d er det fastsatte tverrsnittmålet, i mm.

Spaltestrekkfastheten angis til nærmeste 0,05 MPa (N/mm²).



Figur 41: Innfesting av sylinder for testing av spaltestrekkfasthet[33]

der

- 1 er belastningsstykke av stål
 2 er mellomleggslister av hard papp



Figur 42: Spaltestrekkprøve for 12_2 til venstre og 12-ref-2 til høyre

5.7.3 Elastisitetsmodul

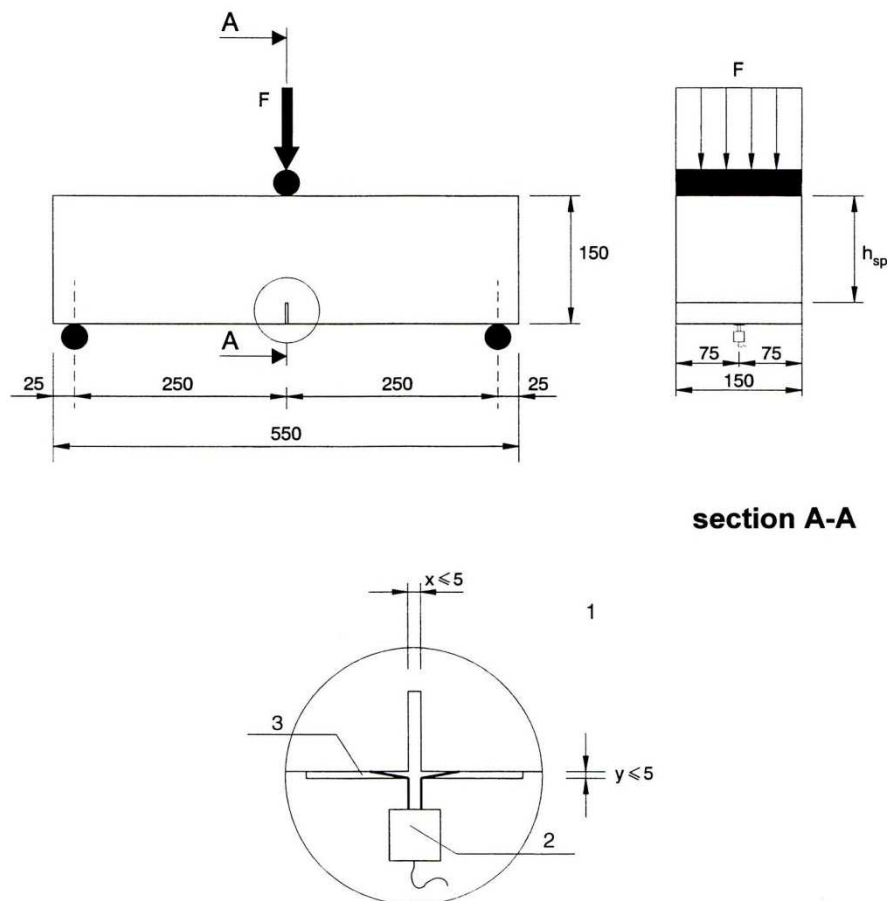
Elastisitetsmodulen avhenger i stor grad av materialene i betongen. Normalbetong har en antatt høyere E-modul enn lettbetong. For fiberarmert betong antas det at E-modulen ligger i intervallet 25-50GPa, se Tabell 3. For hver av de to sylindrerne som ble testet for trykkfasthet ble verdiene for spenning og tøyning benyttet i Hooke's lov for bestemmelse av E-modulen. E-modulen som er beregnet er en gjennomsnittlig verdi fra hele spenning-tøyningskurven. Den E-modulen som er brukt i beregningene av karakteristisk lengde er en gjennomsnittsverdi av de to E-modulene som er beregnet for sylindrerne.

5.8 Bjelkeprøve

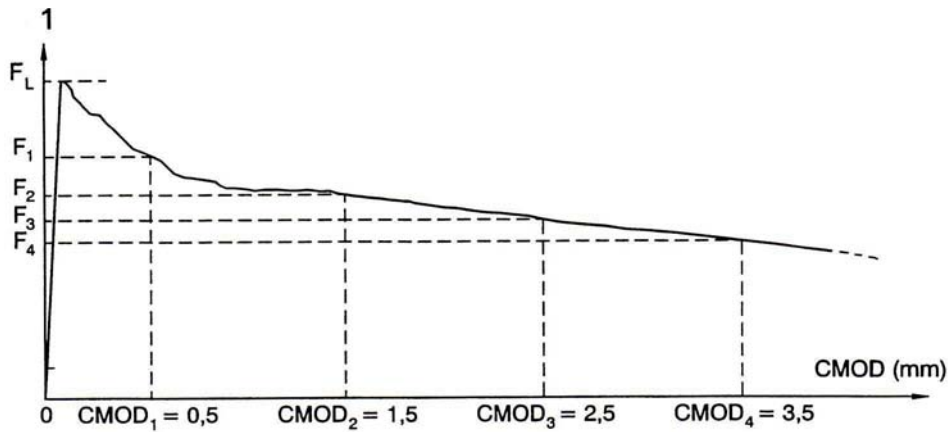
Bøyestrekfastheten ble bestemt ut i fra å teste 150*150*550mm bjelker med en forhåndsdefinert sprekk midt i bjelkespennet. Testen er i samsvar med NS-EN 14651:2005+A1:2007[34], se Figur 43. Spennlengden er 500mm, og lasten ble påført midt i spennet. Under testen ble målinger av CMOD og påført last registrert kontinuerlig opp til en CMOD på 5mm. Målingene av CMOD ble gjort med en displacement transducer, eller clip gauge som det også heter, se kap. 5.12.2. Den ekvivalente bøyestrekfastheten for proporsjonalitetsgrensen (1.riss) og ved 4 forskjellige forhåndsbestemte rissvidder ($CMOD_1 - CMOD_4$), som vist i Figur 44, ble bestemt for alle bjelker inklusiv referansebjelker som ikke inneholdt fiber, serie 11, 12 og 13.

Notasjoner:

- $f_{ct,L}^f$ Bøyestrekfasthet representert ved 1.riss (proporsjonalitetsgrensen, LOP), eller ved maks rissvidde lik 0,05mm;
- $f_{R,1}$ Rest bøyestrekfasthet tilsvarende 0,5mm rissvidde;
- $f_{R,2}$ Rest bøyestrekfasthet tilsvarende 1,5mm rissvidde;
- $f_{R,3}$ Rest bøyestrekfasthet tilsvarende 2,5mm rissvidde;
- $f_{R,4}$ Rest bøyestrekfasthet tilsvarende 3,5mm rissvidde.



Figur 43: Prinsipp for bjelketest i henhold til NS-EN 14651:2007[34]



Figur 44: Last-CMOD diagram. Forventet graf for fastsettelse av proporsjonalitetsgrensen, (LOP, 1.riss) og de forhåndsdefinerte rissviddene (CMOD₁-CMOD₄)[34]

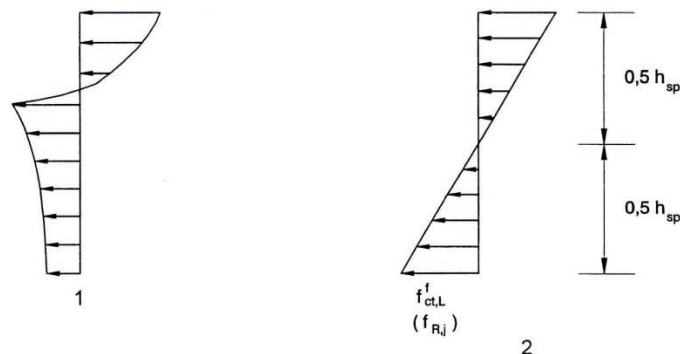
der

F_j er last ved tilsvarende CMOD = CMOD_j (j=1,2,3,4);

F_L er last ved LOP (limit of proportionality).

5.8.1 Bøyestrekfasthet og rest bøyestrekfasthet

Bøyestrekfastheten og rest bøyestrekfasthet bestemmes fra bøyemomentet ut i fra antakelse av lineær spenningsfordeling over tverrsnittet og i henhold til NS-EN 14651, se Figur 45. Dette samsvarer ikke med virkeligheten, men benyttes som en forenkling.



Figur 45: Lineær spenningsfordeling i henhold til NS-EN 14651[34]

der

1 er reel spenningsfordeling;

2 er antatt spenningsfordeling.

Bøyestrekfasthet er gitt av følgende uttrykk:

$$f_{ct,L}^f = \frac{6M_L}{bh_{sp}^2} = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (5-4)$$

der

F_L er lasten ved tilsvarende LOP;

M_L er bøyemomentet ved tilsvarende last ved LOP;

b er bredden av prøvestykket;

h_{sp} er avstanden fra sprekk midt på prøvestykket til topp av prøvestykket.

Rest bøyestrekfasthet er gitt av følgende uttrykk:

$$f_{R,j} = \frac{6M_j}{bh_{sp}^2} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (5-5)$$

der

F_j er lasten med tilsvarende CMOD_j (j=1,2,3,4);

M_j er bøyemomentet ved tilsvarende last ved F_j (j=1,2,3,4);

b er bredden av prøvestykket;

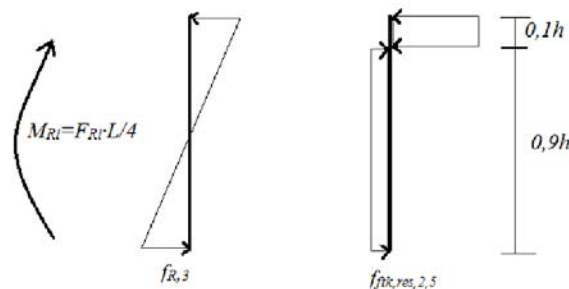
h_{sp} er avstanden fra sprekken midt på prøvestykket til topp av prøvestykket.

5.8.2 Rest strekkfasthet

Kanstad 2011 refererer til en karakteristisk rest strekkfasthet ved en rissvidde på 2,5mm. Verdien er basert på rest bøyestrekfasthet ved en rissvidde på 2,5mm, altså verdien $f_{R,3}$ som angitt i NS-EN 14651. Denne karakteristiske rest strekkfastheten defineres som 0,37 ganger rest bøyestrekfasthet ved samme rissvidde på 2,5mm[8].

$$f_{ftk,res2,5} = 0,37f_{R,3} \quad (5-6)$$

$f_{R,3}$ følger en lineær spenningsfordeling, mens $f_{ftk,res2,5}$ følger en ideell plastisk spenningsfordeling, som vist i Figur 46.



Figur 46: Spenningsfordeling benyttet for rest strekkfasthet[8]

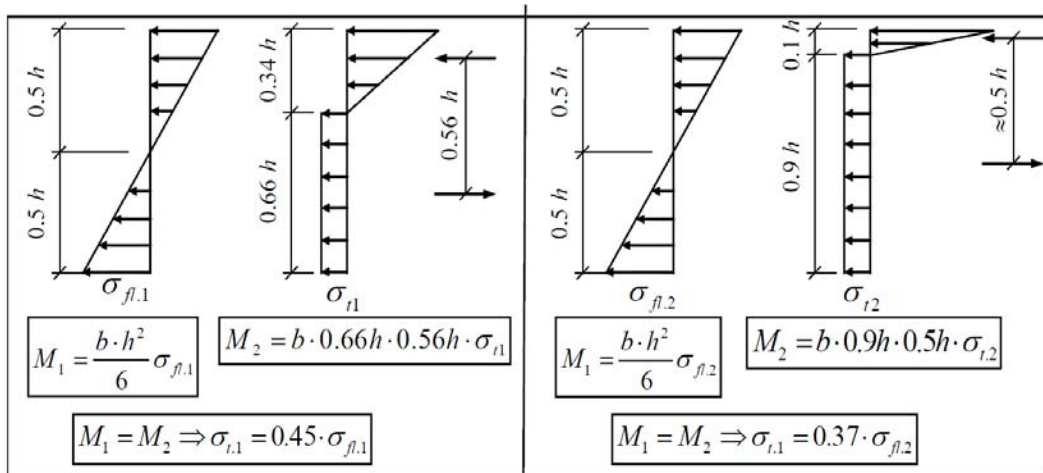
Følges RILEM's veiledning fra 2003[24] skal karakteristisk rest strekkfasthet bestemmes ut ifra to forhåndsbestemte rissvidder, da henholdsvis 0,5mm og 3,5mm.

$$\sigma_2 = \sigma_{f,1} = f_{ftk,res0,5} = 0,45f_{R,1} \quad (5-7)$$

$$\sigma_3 = \sigma_{f,4} = f_{ftk,res3,5} = 0,37f_{R,4} \quad (5-8)$$

Den karakteristiske rest strekkfastheten, $f_{ftk,res0,5}$, benyttes ved bruksgrensetilstand(SLS) og $f_{ftk,res3,5}$ benyttes ved bruddgrensetilstand(ULS)[9].

Formlene er utledet av følgende antagelse av spenningsfordeling gitt i Figur 47, og formelene blir benyttet for å få en mer realistisk spenning i det opprissede tverrsnittet.



Figur 47: Spenningsfordeling over tverrsnittet[9]

5.8.3 Teoretisk beregning av rest strekkfasthet

Det er mulig å beregne en teoretisk rest strekkfasthet for betong med kjent volumforhold av fiber, kombinert med prøving av betong og bestemmelse av fiberorienteringsfaktor. Formelen er basert på Norske foreløpige retningslinjer(NPG)[12].

$$f_{ftk,res2,5} = \eta_0 v_f \sigma_{fk,mid} \quad (5-9)$$

der

v_f er volumandel fiber;

η_0 er kapasitetsfaktoren, dvs. forholdet mellom resultantkraften fra fiberne med tilfeldig fordeling og resultantkraften til ensrettede fordelte fiber med samme spenning;

$\sigma_{fk,mid}$ er gjennomsnittlig spenning i alle fiberne som krysser risset med tilfeldig orientering og forankringslengder.

Kapasitetsfaktoren, η_0 , kan antas lik 1/3 for fiber med tilfeldig romlig retningsfordeling[12].

5.8.4 Avvik fra NS-EN 14651

Resultatene rapportert i dette prosjektet ved Universitetet i Stavanger avviker noe fra NS-EN 14651.

- Veksten av CMOD

I følge NS-EN 14651 "the machine shall be operated so that CMOD increases at a constant rate of 0,05mm/min. When CMOD=0,01mm, the machine shall be operated so that CMOD increases at a constant rate of 0,2mm/min. ...In case of a testing machine controlling the rate of increase of deflection, the above testing procedure shall be applied provided that CMOD related parameters are transformed into deflection related parameters.

The relation between CMOD and deflection may be approximated by:

$$\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04 \text{ ''} \quad (5-10)$$

Følgende tabell som finnes i NS-EN 14651 kan benyttes istedenfor formel 5-10.

Tabell 7: Forholdet mellom CMOD og δ [34]

CMOD (mm)	δ (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

Bjerkene ble testet med påført last som ble kontrollert gjennom nedbøyningshastighet og ikke ved kontroll av veksthastigheten til CMOD. Hastigheten på nedbøyningen ble satt til 0,21mm/min under hele testforløpet[25] for prøvelegemer med fiber og 0,1 mm/min for prøvelegemer uten fiber, altså referansene. Dette ble gjort blant annet for å redusere antall målinger og for å kunne klare å trekke sammenhenger til Tabell 7, mellom CMOD og δ . Sammenhengen mellom δ og CMOD er brukt i eksperimentelt resultat for bestemmelse av bruddenergi, se kap. 5.9 og 6.10.

5.9 Bruddenergi

Bruddenergien er beregnet etter formel angitt og beskrevet i kap. 3.1.2. Arbeidsbrudd, W_F , er definert tidligere som arealet under last-CMOD kurven, se Figur 48, som ble målt direkte ved bruk av lastcelle og Clip Gauge. Det er også beregnet arbeidsbrudd i henhold til målinger i forhold til last- δ som trykkpressen Tonitech gav. Ut i fra de nedbøyningene som ble målt av trykkpressen er det en tredje måling som er gjort. Denne målingen tar for seg den tilnærmede metoden beskrevet i kap. 5.8.4. Alle disse målingene er vist i Tabell 21 og Figur 71. Arbeidsbruddet, W_F , som er benyttet til å beregne bruddenergi er et gjennomsnitt av alle disse målingene.

5.9.1 Forenkling/antakelse

I henhold til standardiserte prøvemetoder beskrevet av Sintef [35], skal bruddenergien også ta hensyn til bidraget fra prøvelegemet's vekt. Formelen for bruddenergi angitt i kap. 3.1.2 skal i følge Sintef være som følger:

$$G_F = \frac{W_F + P_0 \delta_0}{A_{lig}} \quad (5-11)$$

hvor

$$A_{lig} = h_{sp} b \quad (5-12)$$

der

W_F er arealet under last-CMOD kurve;

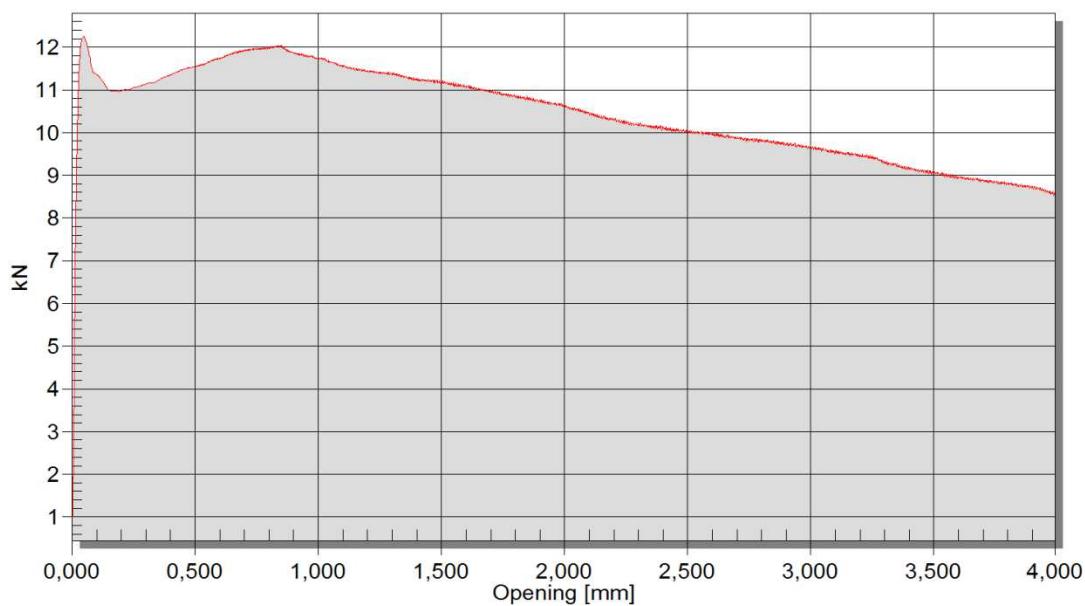
P_0 er prøvelegemet's vekt i kg;

δ_0 er nedbøyning av prøvelegemet ved kollaps;

h_{sp} er høyden fra trykkrand til start på forhåndsdefinert sprekk i bjelke;

b er bredden av bjelken.

Prøvelegemet's vekt og nedbøyning ved kollaps er ikke tatt hensyn til i dette prosjektet. Bidraget er ikke tatt med fordi prøvelegemet ikke ble belastet helt til kollaps, samt at bidraget ikke har stor innvirkning på resultatet.

Figur 48: Definisjon av areal under graf, W_f

5.10 Karakteristisk lengde

Karakteristisk lengde ble målt ut ifra formel gitt i kap. 3.1.3. Elastisitetsmodulen som benyttes fremkommer fra metoden som beskrevet under kap. 5.7.3. Strekkfastheten som benyttes er prøvelegemet's bøyestrekfasthet ved første opprissing under trepunkts bøyetest.

5.11 Brittleness number

Brittleness number ble målt ut i fra formel gitt i kap. 3.1.4. Parameterne som benyttes for å finne brittleness number er de samme som benyttes for å finne karakteristisk lengde, se 5.10.

5.12 Utstyr for måling av last-CMOD kurve

5.12.1 Betongsag



Figur 49: Betongsag

Betongsag ble benyttet til å lage den forhåndsdefinerte sprekken i bjelkelegemene.

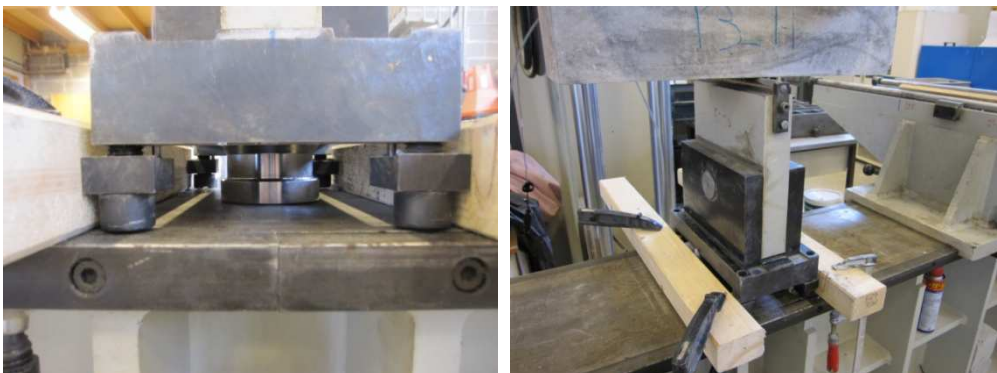
5.12.2 Displacement transducer



Figur 50: Til venstre displacement transducer(Clip Gauge) og til høyre festeanretning på bjelke med Clip Gauge

Instrumentet vist over ble benyttet for bestemmelse av CMOD under trepunkts bøyetest. Festeanretning til clip gauge var av to tapetkniv blader limt sammen og plassert på hver side av den forhåndsdefinerte sprekken i bjelken.

5.12.3 Lastcelle



Figur 51: Til venstre lastcelle under opplager og til høyre opplager for bjelke over lastcelle

Lastcellen som vist i figur over ble benyttet for bestemmelse av last påkjenningen under trepunkts bøyetest. Både lastcellen og clip gaugen gav til sammen last-CMOD kurven som er benyttet i dette prosjektet.

5.12.4 Tonitech trykkpresse



Figur 52: Trykkpressen av typen Tonitech

Trykkpressen ble brukt under trepunkts bøyetest og var av typen Tonitech.

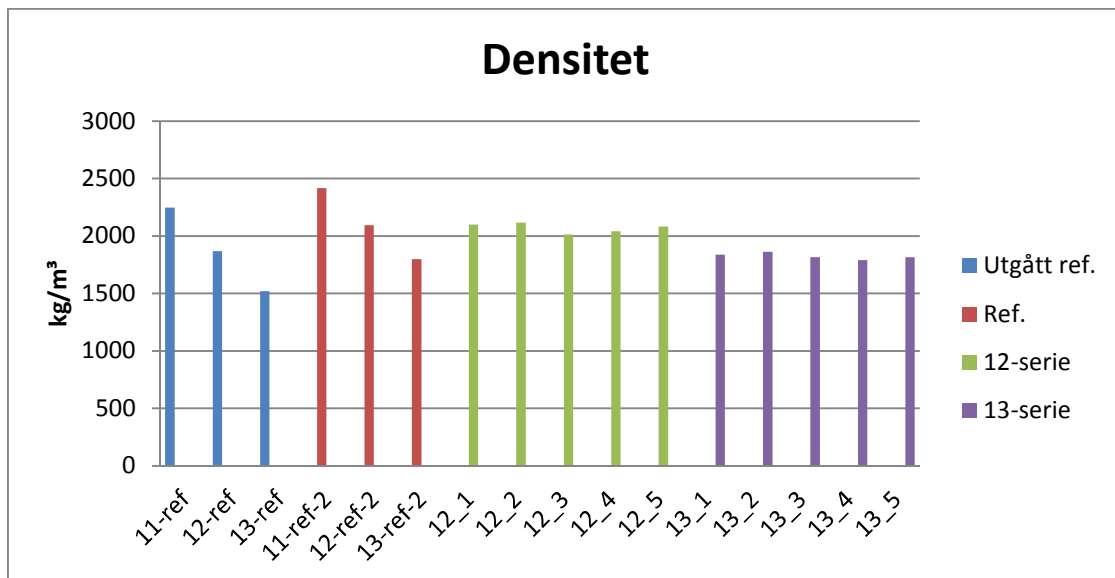
6 Eksperimentelt resultat og diskusjon

6.1 Fersk betong

Tabell 8: Resultat, fersk betong

Prøve nr.	SP-stoff [g]	L-stoff [g]	Synkmål [mm]	Luftinnhold [%]	Densitet [kg/m ³]	Dato	Klokkeslett
11-ref	-	9	180	8	2246	01.03.2012	12:15
11-ref-2	25	-	160	1	2416	09.04.2012	08:15
12-ref	40	9	190	12	1869	02.03.2012	12:45
12-ref-2	19	-	200	3	2094	09.04.2012	10:15
13-ref	-	13	215	17	1520	05.03.2012	12:15
13-ref-2	10	-	160	-	1798	10.04.2012	10:15
12_1	15	-	160	2	2098	06.03.2012	11:30
12_2	15	-	190	2	2117	07.03.2012	14:45
12_3	15	-	180	3	2013	20.03.2012	12:15
12_4	15	-	170	2,5	2040	21.03.2012	13:15
12_5	55	-	210	2,5	2082	22.03.2012	13:15
13_1	125	-	190	-	1837	08.03.2012	10:30
13_2	61	-	120	7	1862	12.03.2012	10:30
13_3	41	-	150	-	1816	23.03.2012	15:45
13_4	42	-	180	-	1791	26.03.2012	13:45
13_5	42	-	170	-	1816	27.03.2012	14:15

6.1.1 Densitet

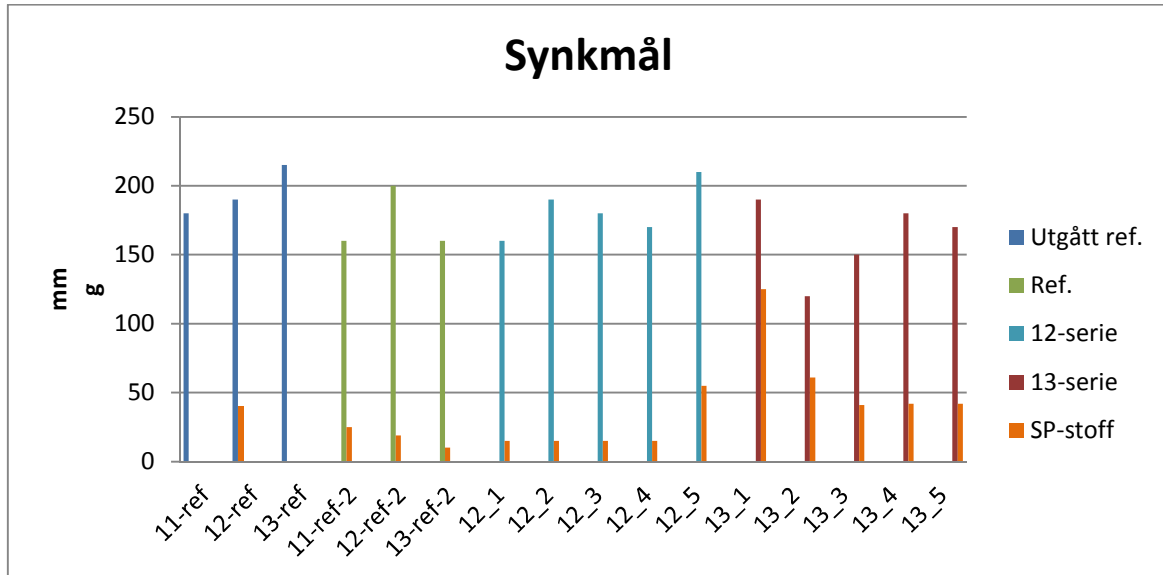


Figur 53: Densitet

Alle blandingene har en densitet som er ca. 200 kg/m³ for høy i forhold til hva som opprinnelig var ønskelig. Det var ønskelig å oppnå en densitet for lett-lettbetong på 1600 kg/m², for lettbetong 1800 kg/m² og for normalbetong 2400 kg/m². Dette kunne vært unngått dersom det hadde blitt utført

prøveblandinger. Blandingsserie 12 har i gjennomsnitt en densitet på 2070 kg/m³ og en variasjonskoeffisient på 1,84%. Blandingsserie 13 har en gjennomsnittlig densitet på 1824 kg/m³ og en variasjonskoeffisient på 1,30%. Det er bevist at det er vanskelig å få densiteten under 2000 kg/m³ ved bruk av naturlig sand som beskrevet i kap. 1.3.1. Seriene seg imellom er meget stabile og det ses på som positivt. Fiberinnhold påvirker ikke densiteten i stor grad da det på det meste ble tilsatt 4,68 kg fiber i en 60L blanding.

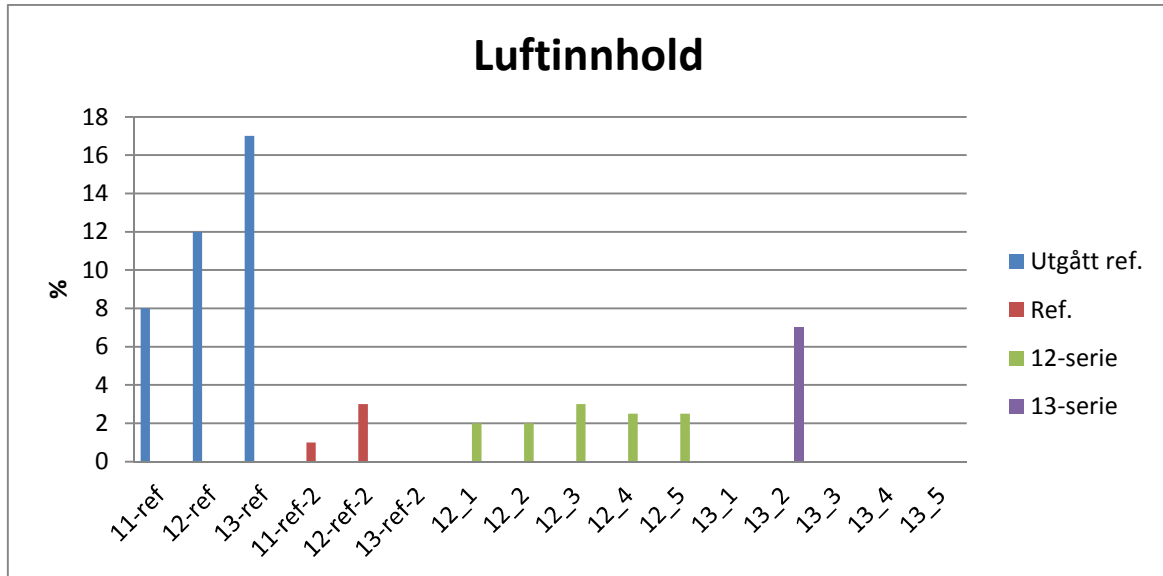
6.1.2 Synkmål



Figur 54: Synkmål

Synkmålet varierte relativt mye for hver blanding. Årsaken er trolig tilslagets vanninnhold. Da leca tilslaget ble lagret ute udekket var tilslaget enkelte ganger relativt fuktig. Det ble for øvrig kjørt inn tilslag i dunker i laben for å tørkes minst 2 dager før blanding. Det var allikevel vanskelig å avgjøre fuktinnholdet pga. mye innesluttet fukt i de porøse leca klinkene. Fuktinnholdet til leca tilslaget ble satt til mellom 6-9 % ved proporsjonering. Denne fukten har en avgjørende effekt på synkmålet, og et så høyt fuktinnhold vil ha en innvirkning på v/c-tallet ved proporsjonering. SP-stoff som ses på figur over ble tilsatt for å få økt synkmål der det trengtes. Som det ses på figur inneholder blanding 13_1 hele 125g med SP-stoff. Dette er meget mye i en liten blanding som dette, og det måtte tilsettes så mye pga. vanskelige forhold med tanke på fuktinnhold i tilslag som nevnt. Det ble ikke registrert utskilling pga. det høye SP-stoff innholdet. Gjennomsnittlig synkmål for serie 12 var 182mm og en variasjonskoeffisient på 9,45%. Gjennomsnittlig synkmål for serie 13 var 162mm og en variasjonskoeffisient på 15,3%. Referanseblandingene og blandingene med fiber har tilsvarende synkmål som blandingene med fiber.

6.1.3 Luftinnhold



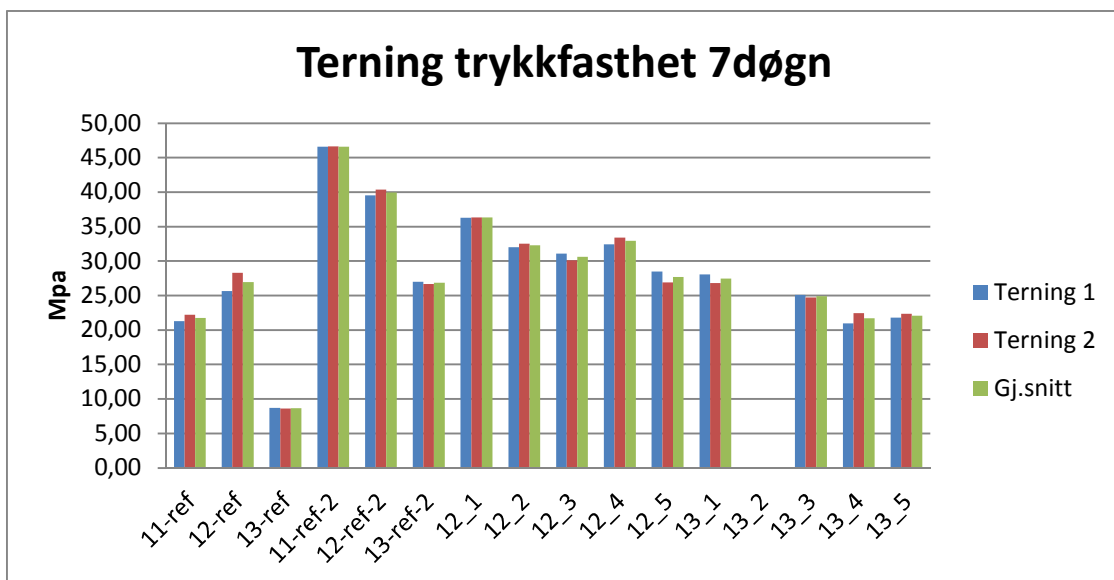
Figur 55: Luftinnhold

Luftinnholdet er som vist i figur over meget dårlig dokumentert. Det er pga. måle utstyret ikke var av god kvalitet. Beholderen var lekk og målingene er da ikke til å stole på. Det er allikevel tatt med for å vise at det er gjort forsøk på utførelse, men resultatene snakker for seg selv. Det ble derimot registrert målinger for serie 11 og 12. Det skyldes muligens at det ikke ble brukt knust leca i disse blandingene, som da kan ha lagt seg mellom beholder og lokket på måle utstyret. De utgatte referansene inneholdt i tillegg luftinnførende stoff, noe som indikeres på de høye verdiene.

6.2 Terning trykkfasthet

Tabell 9: Resultat, terning trykkfasthet ved 7døgn

Prøve nr.	Maks last 1 (7D) [kN]	Maks last 2 (7D) [kN]	Gj.snitt bruddlast (7D) [kN]	Trykkfasthet (7D) [MPa]	Styrke i forhold til ref-2. miks [%]	Styrke i forhold til 11-ref-2 [%]	Variasjonskoeffisient [%]
11-ref	212,73	222,23	217,48	21,75	-	-	2,18
11-ref-2	465,77	466,52	466,15	46,61	-	ref	0,08
12-ref	256,31	282,93	269,62	26,96	-	58	4,94
12-ref-2	395,46	403,58	399,52	39,95	ref	86	1,02
12_1	363,03	363,45	363,24	36,32	91	78	0,06
12_2	320,30	325,33	322,82	32,28	81	69	0,78
12_3	311,02	301,01	306,02	30,60	77	66	1,64
12_4	324,29	334,16	329,23	32,92	82	71	1,50
12_5	284,73	268,91	276,82	27,68	69	59	2,86
13-ref	87,13	86,08	86,61	8,66	-	19	0,61
13-ref-2	270,20	266,87	268,54	26,85	ref	58	0,62
13_1	280,89	268,07	274,48	27,45	102	59	2,34
13_2	-	-	-	-	-	-	-
13_3	251,03	247,10	249,07	24,91	93	53	0,79
13_4	209,62	224,40	217,01	21,70	81	47	3,41
13_5	217,98	223,43	220,71	22,07	82	47	1,23



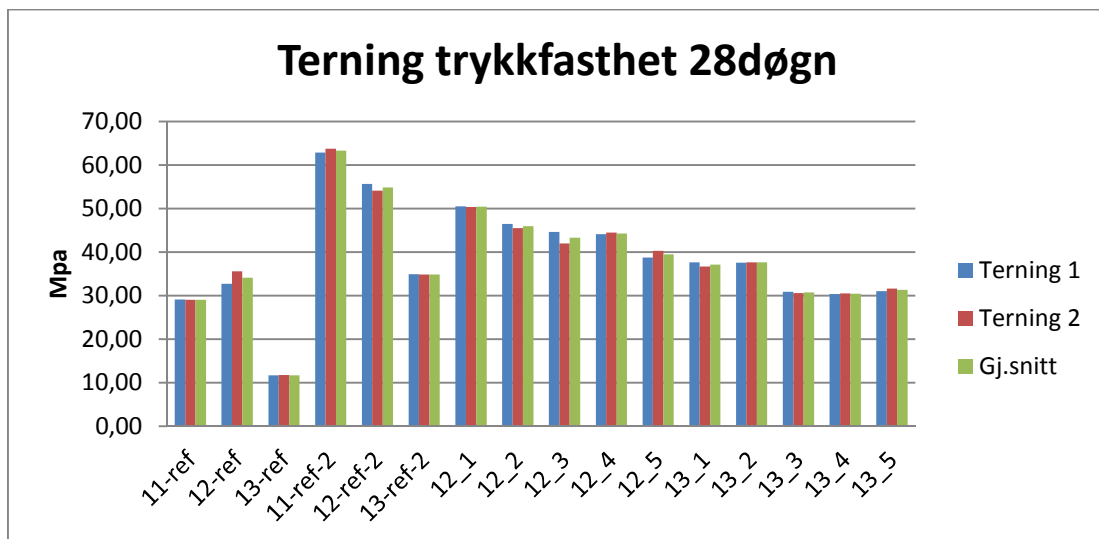
Figur 56: Terning trykkfasthet ved 7døgn

Grunnen til at det ble utstøpt nye referanser ses på figur over. Trykkfastheten for utgåtte referanser(ref) var for lave. De nye referansene(ref-2) er derimot bedre med tanke på trykkfastheten. Det var opprinnelig ønskelig å oppnå samme trykkfasthet for serie 11, 12 og 13. Dette er ikke oppnådd. Dersom det hadde blitt utført prøveblandinger så ville dette blitt tatt hensyn til. Det kan ses på figuren at trykkfastheten ikke blir høyere med tilsetning av fiber etter 7 døgn, og

trykkfastheten er lavere for serie 13 enn serie 12. Trykkfastheten for 11-ref-2, som bestod av normalbetong, hadde som antatt på forhånd den største verdien.

Tabell 10: Resultat, terning trykkfasthet ved 28døgn

Prøve nr.	Maks last 1 (28D) [kN]	Maks last 2 (28D) [kN]	Gj.snitt bruddlast (28D) [kN]	Trykkfasthet (28D) [MPa]	Styrke i forhold til ref-2. miks [%]	Styrke i forhold til 11-ref-2 [%]	Variasjonskoeffisient [%]
11-ref	290,65	289,91	290,28	29,03	-	-	0,13
11-ref-2	628,37	637,58	632,98	63,30	-	ref	0,73
12-ref	326,88	355,27	341,08	34,11	-	54	4,16
12-ref-2	556,48	540,72	548,60	54,86	ref	87	1,44
12_1	504,93	503,51	504,22	50,42	92	80	0,14
12_2	464,33	454,90	459,62	45,96	84	73	1,03
12_3	446,08	419,39	432,74	43,27	79	68	3,08
12_4	440,53	444,65	442,59	44,26	81	70	0,47
12_5	386,89	402,70	394,80	39,48	72	62	2,00
13-ref	116,38	117,49	116,94	11,69	-	18	0,47
13-ref-2	348,91	347,86	348,39	34,84	ref	55	0,15
13_1	375,89	366,83	371,36	37,14	107	59	1,22
13_2	375,66	375,94	375,80	37,58	108	59	0,04
13_3	308,73	305,93	307,33	30,73	88	49	0,46
13_4	303,08	305,20	304,14	30,41	87	48	0,35
13_5	309,68	315,99	312,84	31,28	90	49	1,01



Figur 57: Terning trykkfasthet ved 28døgn

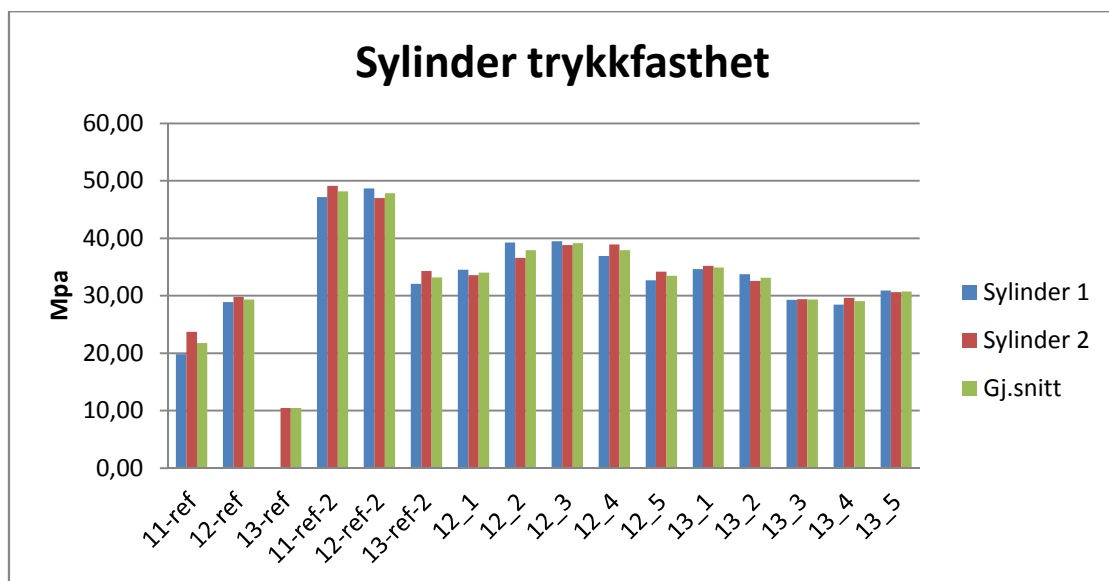
Tilsetning av fiber har heller ingen effekt ved 28 døgns trykkfasthet. Den eneste forskjellen med tilsetning av fiber under trykktesting er at terningene ikke ble knust slik de hadde en tendens til hos referansene. Innenfor serie 12 og 13 skulle trykkfastheten vært identisk fordi det er brukt samme proporsjonering for alle innenfor hver serie, det registreres at den varierer noe. De eneste

parameterne som forandrer seg er fiberinnhold og fuktinnhold. Det betyr at fuktinnholdet har mye å si for trykkfastheten til betongen uten at det kan bekreftes eller avkreftes på noen som helst måte. Eller det kan være en mulig feilkilde ved proporsjoneringsprogrammet som ikke er oppdaget.

6.3 Sylinder trykkfasthet

Tabell 11: Resultat, sylinder trykkfasthet

Prøve nr.	Maks last 1 [kN]	Maks last 2 [kN]	Gj.snitt bruddlast [kN]	Sylindertrykkfasthet [MPa]	Styrke i forhold til ref. miks [%]	Styrke i forhold til 11-ref [%]	Variasjonskoeffisient [%]
11-ref	349,59	418,75	384,17	21,74	-	ref	9,00
11-ref-2	833,88	868,11	851,00	48,16	-	ref	2,01
12-ref	510,24	525,94	518,09	29,32	-	61	1,52
12-ref-2	860,02	830,55	845,29	47,83	ref	99	1,74
12_1	609,98	593,08	601,53	34,04	71	71	1,40
12_2	693,71	646,56	670,14	37,92	79	79	3,52
12_3	697,37	686,26	691,82	39,15	82	81	0,80
12_4	652,29	688,02	670,16	37,92	79	79	2,67
12_5	577,72	603,99	590,86	33,44	70	69	2,22
13-ref	-	185,11	185,11	10,48	-	22	-
13-ref-2	566,64	606,14	586,39	33,18	ref	69	3,37
13_1	611,58	622,13	616,86	34,91	105	72	0,86
13_2	596,32	575,05	585,69	33,14	100	69	1,82
13_3	517,74	519,74	518,74	29,35	88	61	0,19
13_4	502,52	523,77	513,15	29,04	88	60	2,07
13_5	545,59	541,04	543,32	30,75	93	64	0,42



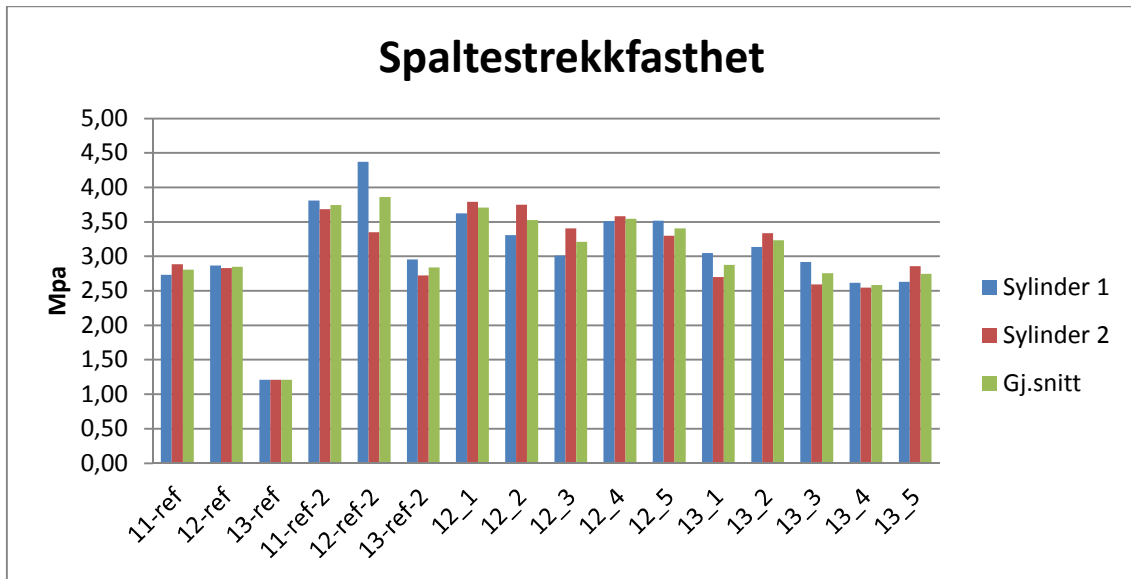
Figur 58: Sylinder trykkfasthet

Blanding 12_3 har den høyeste fastheten av blandingene med fiber. Blanding 12_3 har et fiberinnhold på 0,5 vol% basaltfiber. Blanding 12_5 har den laveste fastheten i serie 12. Denne blandingen inneholder 0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber. I serie 13 er det blanding 13_1 som har den høyeste fastheten mens blanding 13_4 har den laveste. Gjennomsnittlig fasthet for serie 12 var 36,5 MPa og variasjons koeffisient på 6,3%. Gjennomsnittlig fasthet for serie 13 var 31,4 MPa og variasjons koeffisient på 7,2%. Serie 12 og 13 varierer lite i fasthet fra blanding til blanding. Det viser seg at det ikke kan trekkes sammenhenger mellom fiberinnhold og trykkfasthet. Utstøping og ansamling av fiber på fordelaktige steder i formen kan ha en større innvirkning på fastheten enn mengde tilsatt fiber. Det er registrert at den delen av sylindere som har vært øverst i formen under støping sprekker opp under trykktestingen. Mindre fiber i topp en bunn av sylindere er årsaken. Referanse 12-ref-2 har en svært høy verdi i forhold til de andre blandingene i serie 12. Dette kan skyldes lavere v/c-tall, bedre utstøping eller feil ved proporsjoneringsprogram.

6.4 Spaltestrekkfasthet

Tabell 12: Resultat, spaltestrekkfasthet

Prøve nr.	Maks last 1 [kN]	Maks last 2 [kN]	Gj.snitt bruddlast [kN]	Spaltestrekkfasthet [MPa]	Styrke i forhold til ref-2. miks [%]	Styrke i forhold til 11-ref-2. miks [%]	Variasjonskoeffisient [%]
11-ref	192,90	203,84	198,37	2,81	-	-	2,76
11-ref-2	269,09	260,16	264,63	3,75	-	ref	1,69
12-ref	202,51	200,10	201,31	2,85	-	76,07	0,60
12-ref-2	308,75	236,70	272,73	3,86	ref	103,06	13,21
12_1	255,91	268,00	261,96	3,71	96,05	98,99	2,31
12_2	233,87	264,74	249,31	3,53	91,41	94,21	6,19
12_3	212,78	240,64	226,71	3,21	83,13	85,67	6,14
12_4	248,12	253,12	250,62	3,55	91,89	94,71	1,00
12_5	248,45	232,95	240,70	3,41	88,26	90,96	3,22
13-ref	85,62	85,40	85,51	1,21	-	32,31	0,13
13-ref-2	208,88	192,24	200,56	2,84	ref	75,79	4,15
13_1	215,42	190,85	203,14	2,88	101,28	76,76	6,05
13_2	221,48	235,72	228,60	3,24	113,98	86,39	3,11
13_3	206,10	183,30	194,70	2,76	97,08	73,58	5,86
13_4	184,81	180,09	182,45	2,58	90,97	68,95	1,29
13_5	185,88	201,92	193,90	2,74	96,68	73,27	4,14



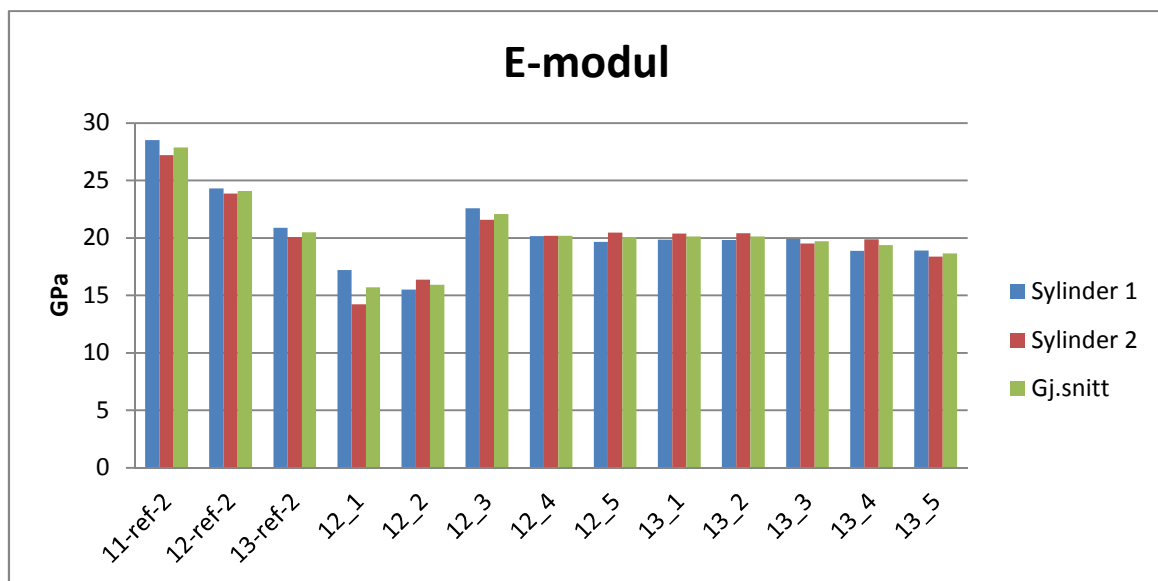
Figur 59: Spaltestrekkfasthet

For fiberarmert betong kan det forventes en økning av spaltestrekkfastheten. Ut i fra resultatene som er gjennomført i dette prosjektet kan det bekreftes. Gjennomsnittlig har fiberne gitt en økt kapasitet mot spaltestrekk. Fiberne skaper fiberbruer og øker kapasiteten mot strekk. Blanding 12_1 har oppnådd den høyeste fastheten for blandingerne med fiber med en gjennomsnittlig verdi på 3,71 MPa. For serie 13 er det 13_2 som har den høyeste verdien med 3,24 MPa. Denne verdien er noe høyere enn de andre i serie 13, og kommer mest sannsynlig av fordelaktig fibermengde i prøvesylindrene. Blandingene med stålfiber har noe forbedret spaltestrekkfasthet enn referansen. Blandingene som inneholder basaltfiber har lik eller lavere spaltestrekkfasthet enn referansen. For serie 12 er den gjennomsnittlige fastheten på 3,5 MPa og variasjons koeffisienten er på 4,77%. For serie 13 er den gjennomsnittlige fastheten på 2,84 MPa og variasjons koeffisienten er på 7,72%. Serie 13 har i snitt en lavere spaltestrekkfasthet enn serie 12. Det kommer av at tilslaget i serie 13 har lavere fasthet enn i serie 12. Serie 13 varierer også mer enn serie 12, som kan bety at tilsetningen av naturlig sand i serie 12 gir mer stabile verdier.

6.5 Elastisitetsmodul

Tabell 13: Resultat, elastisitetsmodul

Prøve nr.	E-modul sylinder 1 [GPa]	E-modul sylinder 2 [GPa]	Gj.snitt	Variasjons koeffisient [%]
11-ref-2	28,52	27,2	27,86	2,37
12-ref-2	24,3	23,86	24,08	0,91
13-ref-2	20,89	20,08	20,49	1,98
12_1	17,2	14,21	15,71	9,52
12_2	15,5	16,37	15,94	2,73
12_3	22,57	21,57	22,07	2,27
12_4	20,17	20,18	20,18	0,02
12_5	19,65	20,47	20,06	2,04
13_1	19,86	20,37	20,12	1,27
13_2	19,83	20,42	20,13	1,47
13_3	19,91	19,52	19,72	0,99
13_4	18,88	19,87	19,38	2,55
13_5	18,91	18,37	18,64	1,45



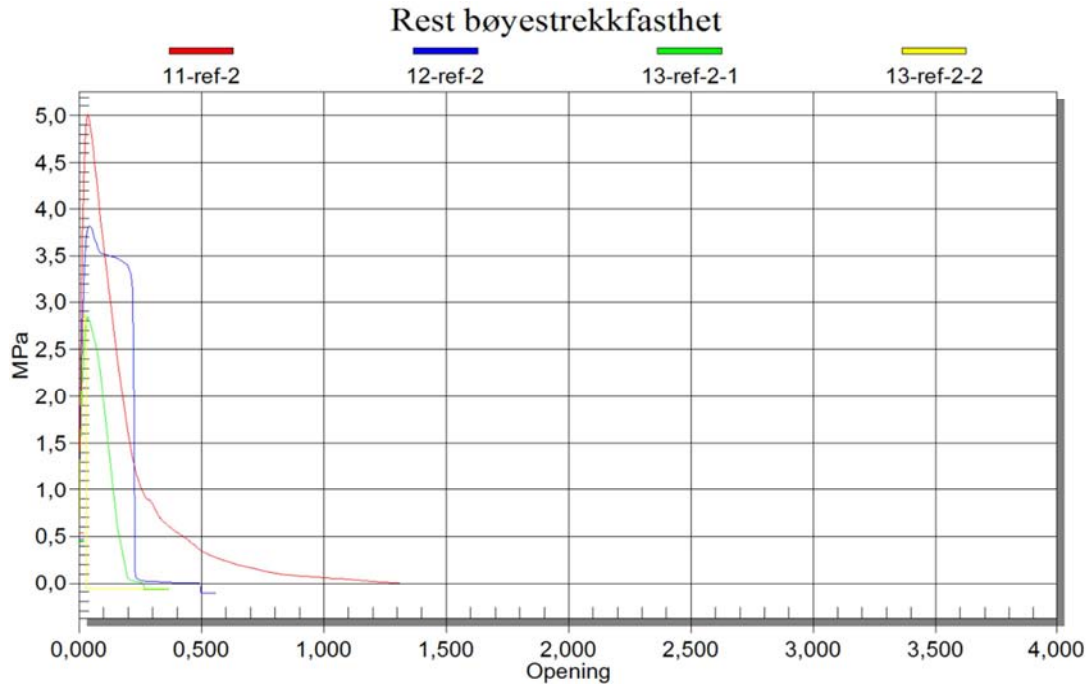
Figur 60: Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodulen ble bestemt som angitt i kap. 5.7.3. Som det kan ses på figur over er e-modulen til både blanding 12_1 og 12_2 lave i forhold til resten av blandingene. Det kan skyldes beregningsmetoden for e-modulen som er brukt, proporsjoneringsprogrammet eller trykkpressens målinger som ikke stemmer. Alle blandingene ligger forøvrig innenfor hva som kan forventes at elastisitetsmodulen skal være for fiberarmert betong, se Tabell 3. Gjennomsnittlig e-modul for serie 12 er 34,1 GPa og variasjons koeffisienten er på 23,2%. For serie 13 er den gjennomsnittlige e-modulen på 36,4 GPa og variasjons koeffisienten er på 4,8%. Det er en stor forskjell mellom disse seriene, og skyldes blanding 12_1 og 12_2. Ser vi bort fra disse to blandingene er e-modulen til de resterende blandingene relativt like. Blandingene i serie 13 med fiber har tilsvarende e-modul som

referansen. I serie 12 er blandingene med fiber lavere enn referansen. Det skyldes at 12-ref-2 har en svært høy sylinder trykkfasthet. 11-ref-2 har den høyeste e-modulen og det kommer blant annet av god heft mellom matriks og tilslag samt at tilslaget har høye mekaniske egenskaper.

6.6 Bøystrekkfasthet

6.6.1 Referanser



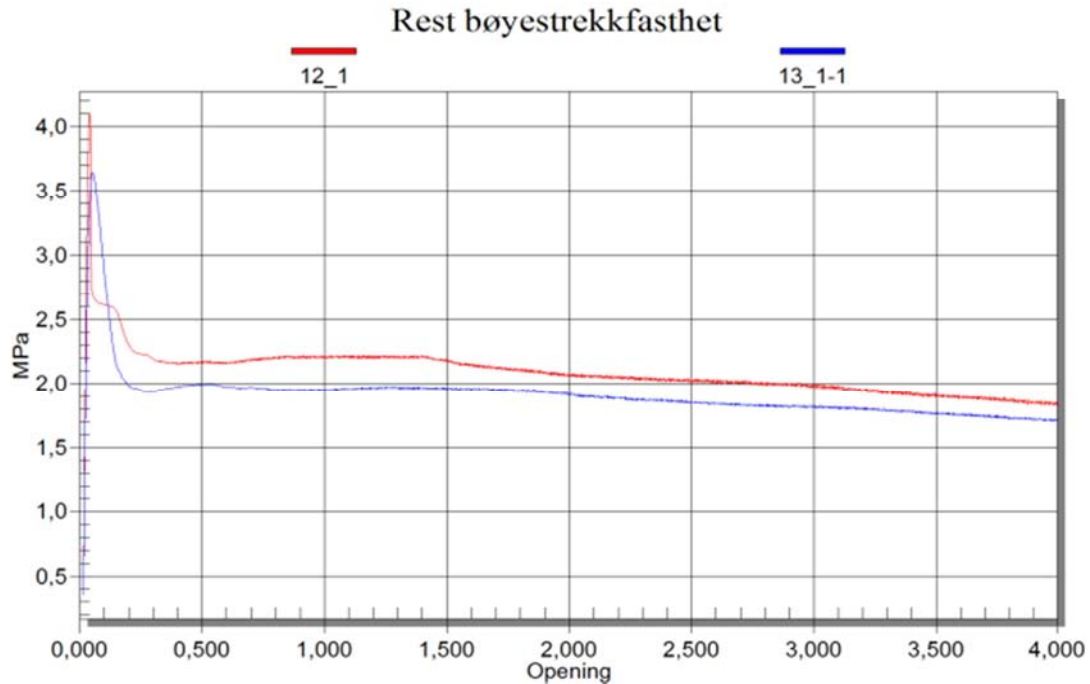
Figur 61: Referanser

Tabell 14: Resultat, referanser

	11-ref-2	12-ref-2	13-ref-2-1	13_ref-2-2	Gj.snitt	Variasjons koeffisient
b [mm]	150	150	150	150	150	0,00
h_{sp} [mm]	125	125	125	125	125	0,00
l [mm]	500	500	500	500	500	0,00
$f_{ct,L}$ [MPa]	5,02	3,82	2,84	2,88	3,64	24,37
$f_{R,1}$ [MPa]	0,34	0,07	0,38	0,29	0,21	57,88
$f_{R,2}$ [MPa]	-	-	-	-	-	-
$f_{R,3}$ [MPa]	-	-	-	-	-	-
$f_{R,4}$ [MPa]	-	-	-	-	-	-

Kurvene fra referansene over illustrerer hvor sprø betongen er uten bruk av fiber. Det ses fra figur at peak spenningen, altså spenningen ved opprissing er høy, noe som viser at fiber ikke har noen virkningskraft før etter opprissing. Etter opprissing går bjelken nesten umiddelbart til total kollaps. Alle referansekurvene er vist i forhold til referanse 11-ref-2 sin CMOD, noe som gir litt rare kurver for de andre referansene. Referansene gav resultater som var forventede.

6.6.2 0,5 vol% stålfiber



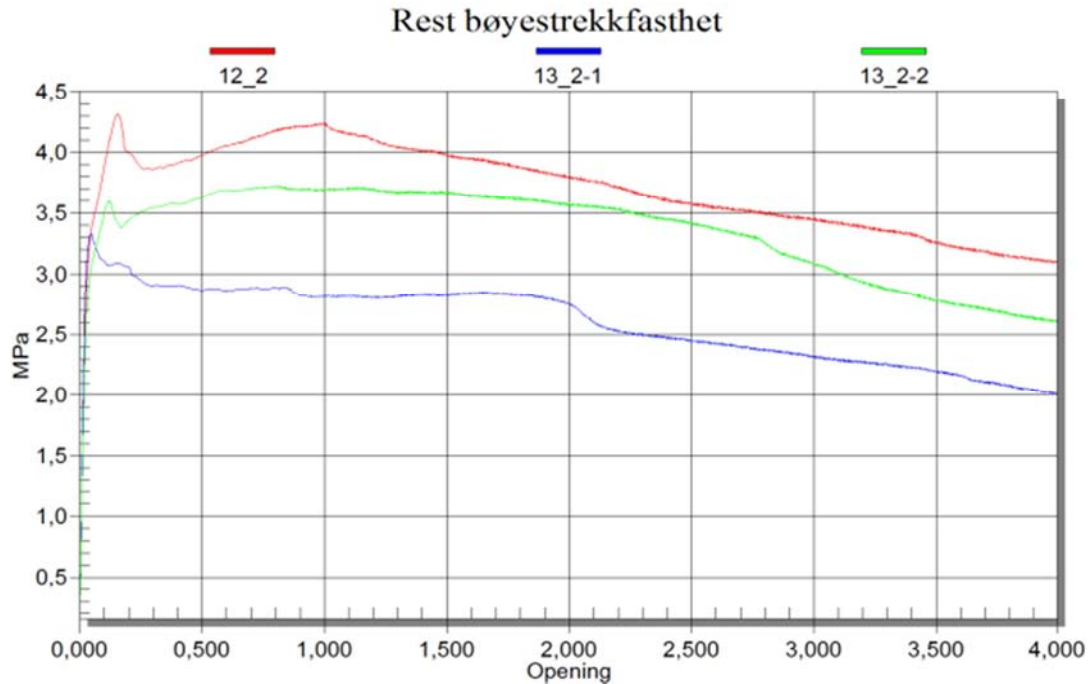
Figur 62: 0,5 vol% stålfiber

Tabell 15: Resultat, 0,5 vol% stålfiber

	13_1-1	12_1	Gj.snitt	Variasjons koeffisient
b [mm]	150	150	150	0,00
h_{sp} [mm]	125	125	125	0,00
l [mm]	500	500	500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,64	4,10	3,87	5,92
$f_{R,1}$ [MPa]	1,99	2,16	2,08	4,12
$f_{R,2}$ [MPa]	1,96	2,20	2,08	5,75
$f_{R,3}$ [MPa]	1,85	2,02	1,94	4,47
$f_{R,4}$ [MPa]	1,76	1,90	1,83	3,85

Fra figur over er blandingene med 0,5 vol% stålfiber sammenlignet. Kurvene viser samme oppførsel, men bjelken i serie 12 har en høyere belastning ved opprissing enn bjelken i serie 13. Dette er som forventet fra referanse bjelkene. Ut fra figur ses det at de har en tilnærmet lik dropp etter opprissing for deretter å følge hverandre parallelt til CMOD lik 4mm. Fordelingen av fiber er god for begge blandingene, men for 12_1 er det en slags bunt av fiber like under den forhåndsdefinerte sprekken og for 13_1-1 er det registrert mer fiber i bunn av bjelken enn ellers. Det må nevnes at variasjonskoeffisienten er meget lav.

6.6.3 1,0 vol% stålfiber



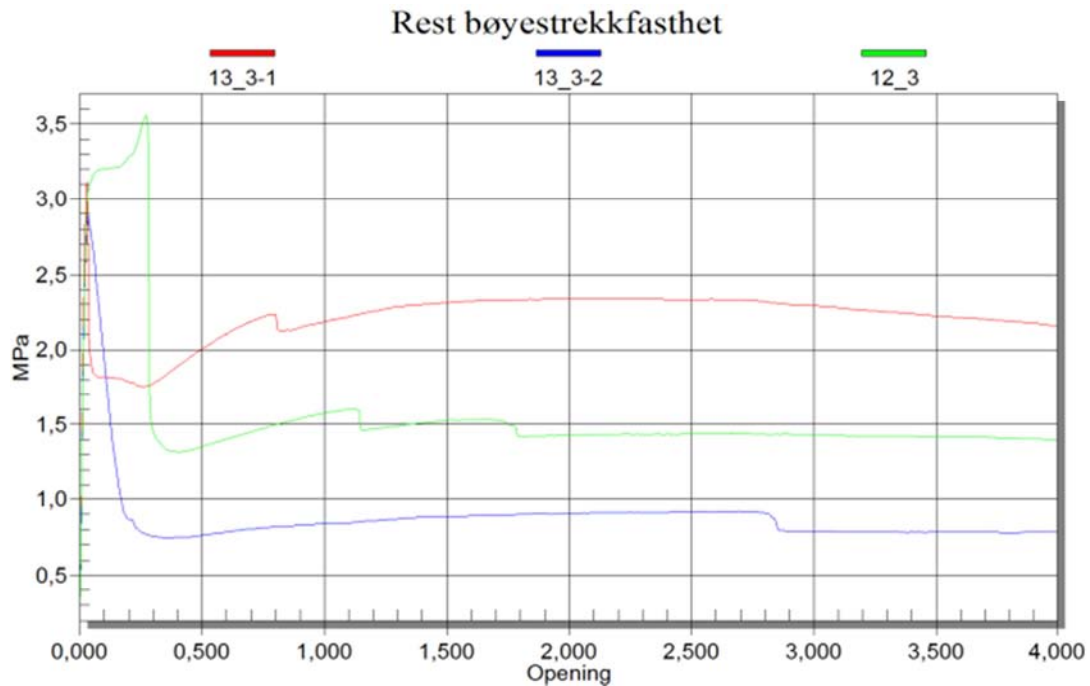
Figur 63: 1,0 vol% stålfiber

Tabell 16: Resultat, 1,0 vol% stålfiber

	13_2-1	13_2-2	12_2	Gj.snitt	Variasjons koeffisient
b [mm]	150	150	150	150	0,00
h_{sp} [mm]	125	125	125	125	0,00
l [mm]	500	500	500	500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,33	3,59	4,31	3,46	12,03
$f_{R,1}$ [MPa]	2,87	3,69	4,06	3,28	15,17
$f_{R,2}$ [MPa]	2,83	3,64	3,94	3,23	14,58
$f_{R,3}$ [MPa]	2,45	3,35	3,53	2,90	16,30
$f_{R,4}$ [MPa]	2,20	2,73	3,19	2,47	16,39

Fra figur over er blandingene med 1,0 vol% stålfiber sammenlignet. Det registreres at belastningen etter opprissing har en tendens til å øke frem til CMOD lik 1mm for deretter å falle forsiktig til CMOD lik 4mm. Kurven for bjelke 13_2-1 er noe lavere enn kurven for bjelken av samme blanding 13_2-2. Det er registrert at fordelingen av fiber over risset for bjelkene i serie 13 med 1,0 vol% stålfiber er god og antall fiber over risset er tilnærmet lik. Årsaken til at kurven til bjelke 13_2-1 er noe lavere kommer av orienteringen og vinkel i forhold til rissplanet. For bjelken i serie 12 er det registrert god fordeling, men et lite felt på den ene siden av bjelken var det lite fiber. Belastningen ved opprissing er som forventet ut ifra referanse bjelkene.

6.6.4 0,5 vol% basaltfiber



Figur 64: 0,5 vol% basaltfiber

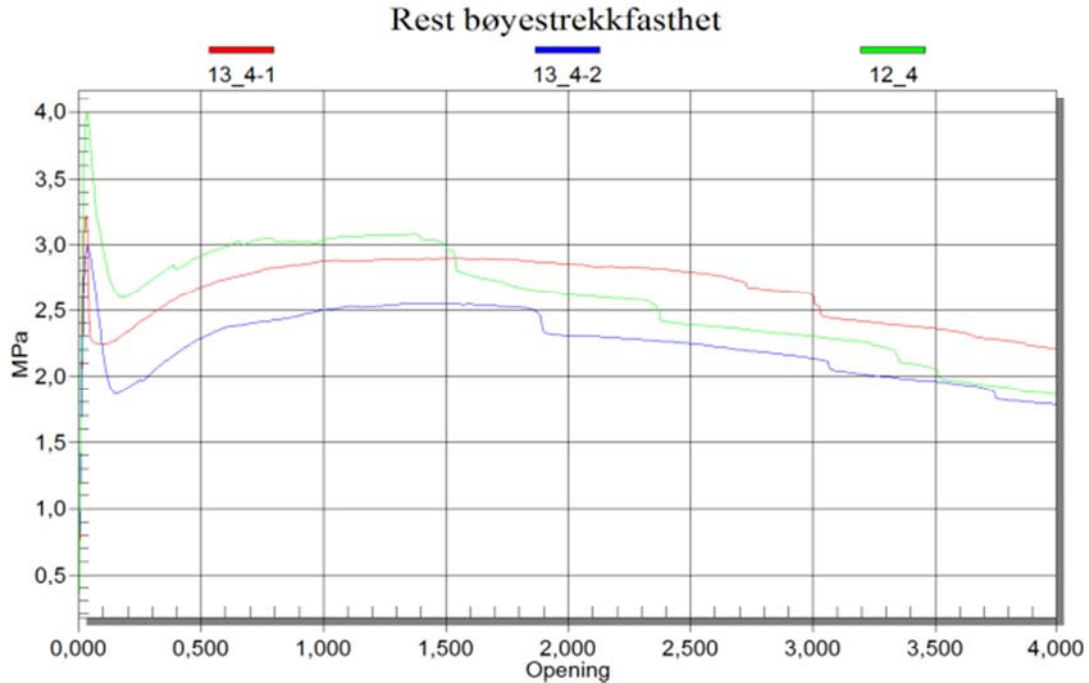
Tabell 17: Resultat, 0,5 vol% basaltfiber

	13_3-1	13_3-2	12_3	Gj.snitt	Variasjons koeffisient
b [mm]	150	150	150	150	0,00
h_{sp} [mm]	125	125	125	125	0,00
l [mm]	500	500	500	500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,11	2,89	3,55	3,00	9,17
$f_{R,1}$ [MPa]	2,12	0,76	1,42	1,44	38,45
$f_{R,2}$ [MPa]	2,32	0,88	1,54	1,60	36,69
$f_{R,3}$ [MPa]	2,33	0,92	1,44	1,62	35,99
$f_{R,4}$ [MPa]	2,20	0,78	1,41	1,49	38,83

For blandingene som inneholdt 0,5 vol% basaltfiber så ses det av figur over at kurvene har en slags trappelignende form etter hvert som CMOD øker. Der kurvene får et fall ble det registrert under bjelke testen at basaltfiberen røk ved et lite smell. Bjelke 12_3 har de fleste fallene grunnet fiberbrudd, noe som også ble registrert ved telling av antall fiber over risset. Årsaken til at 12 serien har flere fall enn 13 serien kommer av at heften mellom matriks og fiber er sterkere for 12 serien enn for 13 serien. Bjelke 13_3-2 har et kraftig fall etter opprissing, grunnet færre fiber over risset enn bjelke 13_3-1, se Tabell 20, og det var få fiber like under den forhåndsdefinert sprekken. Bjelke 13_3-1 skiller seg ut ifra de to andre bjelkene. Denne bjelken hadde nemlig nesten dobbelt så mange basaltfiber over risset enn de to andre bjelkene, noe som har resultert i en kurve som har et lite dropp og etterhvert økt belastning etter opprissing. Alle bjelkene med 0,5 vol% basaltfiber har en økt

belastning etter opprissing, men bjelke 13_3-1 har den høyeste stigningen. Variasjons koeffisienten blir påvirket av de store forskjellene i form på kurvene og blir derfor høy. Belastning ved opprissing er veldig typisk i forhold til referanse bjelkene i den respektive serie.

6.6.5 1,0 vol% basaltfiber



Figur 65: 1,0 vol% basaltfiber

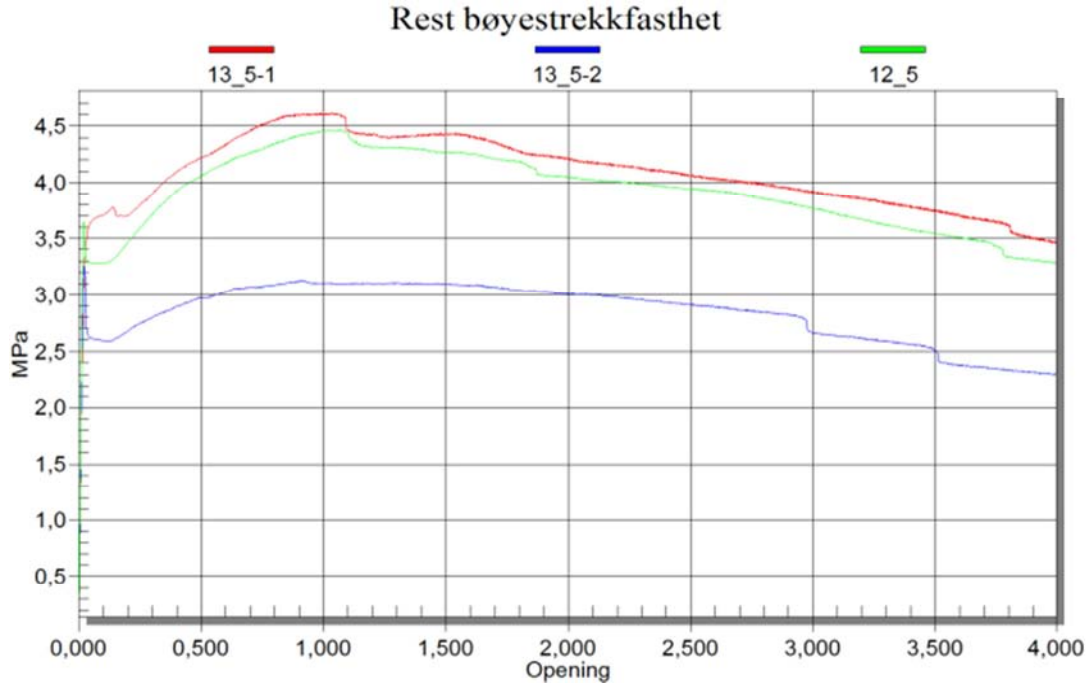
Tabell 18: Resultat, 1,0 vol% basaltfiber

	13_4-1	13_4-2	12_4	Gj.snitt	Variasjons koeffisient
b [mm]	150	150	150	150	0,00
h_{sp} [mm]	125	125	125	125	0,00
l [mm]	500	500	500	500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,22	2,99	3,99	3,10	13,80
$f_{R,1}$ [MPa]	2,66	2,29	2,88	2,47	9,96
$f_{R,2}$ [MPa]	2,89	2,55	3,03	2,72	7,45
$f_{R,3}$ [MPa]	2,79	2,25	2,41	2,52	9,06
$f_{R,4}$ [MPa]	2,36	1,96	2,10	2,16	7,73

I figur over er blandingene med 1,0 vol% basaltfiber sammenlignet. Kurvene har tilnærmet lik form frem til CMOD lik 4mm. Det registreres også her at fallene i kurvene kommer av at basaltfiber ryker, slik som i tilfelle for 0,5 vol% basaltfiber. Kurve for bjelke 12_4 har mange flere fiberbrudd enn bjelkene i serie 13 med 1,0 vol% basaltfiber. På grunn av fiberbrudd får derfor 12_4 en brattere nedgang i belastning etter CMOD lik 1mm enn i serie 13. Kurvene for serie 13 følger hverandre parallelt frem til CMOD lik 4mm. Bjelke 13_4-1 har noe flere fiber over risset enn 13_4-2, noe som

resultater i en høyere belastning for 13_4-1 etter opprissing. I forhold til referanse bjelkene er belastningen ved opprissing veldig typisk. Det er registrert en god fordeling av fiber for alle bjelkene med 1,0 vol% basaltfiber, men som nevnt noe forskjell i antall fiber over risset. Variasjonskoeffisienten er relativt lav, som betyr i dette tilfellet en tilnærmet lik oppførsel for alle bjelkene frem til CMOD lik 4mm.

6.6.6 0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber



Figur 66: 0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber

Tabell 19: Resultat, 0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber

	13_5-1	13_5-2	12_5	Gj.snitt	Variasjonskoeffisient
b [mm]	150	150	150	150	0,00
h_{sp} [mm]	125	125	125	125	0,00
l [mm]	500	500	500	500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,76	3,25	3,62	3,50	6,12
$f_{R,1}$ [MPa]	4,35	2,96	4,08	3,66	16,48
$f_{R,2}$ [MPa]	4,40	3,09	4,27	3,75	15,66
$f_{R,3}$ [MPa]	4,03	2,90	3,93	3,47	14,80
$f_{R,4}$ [MPa]	3,69	2,41	3,52	3,05	18,61

I figur over sammenlignes bjelkene med en kombinasjon av 0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber. Kurvene viser en helt klart forbedret oppførsel etter opprissing, og de har en svært forskjellig form enn kurvene hos de andre bjelkene. Kurven som tilhører bjelke 13_5-2 viser en litt annen utvikling etter opprissing enn hos de to andre kurvene med samme fiberinnhold. Årsaken ligger i vinkel

mellom fiber og rissplanet. Det ble nemlig registrert at fiberne lå mer langs med rissplanet enn tvers over, noe som har resultert i at kurven fikk et dropp og en moderat stigning i belastning etter opprissing. Orienteringen av fiber er en svært viktig faktor for å oppnå god duktilitet, noe som er bevist her. For bjelke 13_5-1 og 12_5 er kurvene tilnærmet identiske. Belastningen er ikke nådd maksimum ved opprissing og for 13_5-1 er rest bøyestrekfastheten lik 13,114 MPa ved CMOD lik 0,873mm, for 12_5 var rest bøyestrekfastheten lik 12,689 MPa ved CMOD lik 1,042mm. Etter opprissing fortsetter altså belastningen å stige mot CMOD lik ca. 1mm for deretter å synke svakt i belastning til CMOD lik 4mm. Kurvene i denne sammenligningen med kombinasjon av fiber, viser en helt klart forbedret duktilitet i forhold til de andre bjelkene med kun en type fiber.

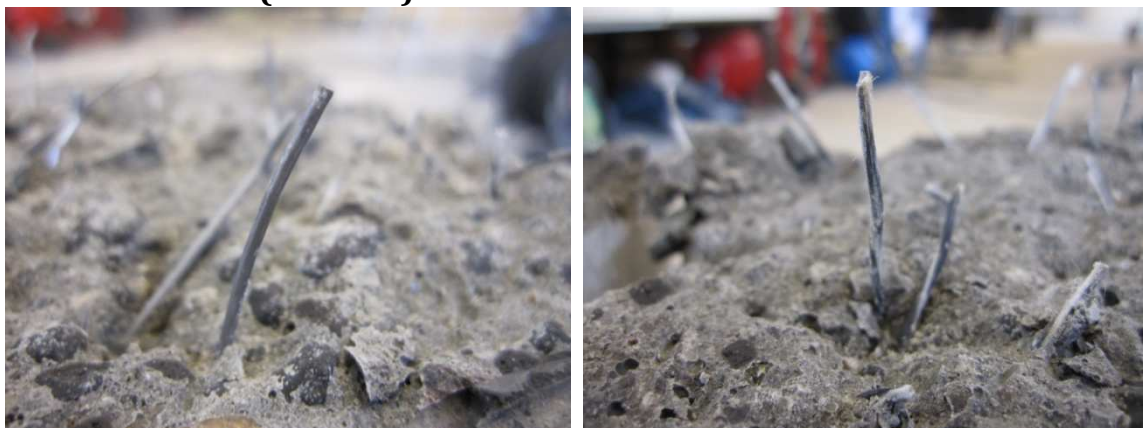
6.7 Tilslagsbruer



Figur 67: Tilslagsbruer, til venstre brudd i lett klinker og til høyre sikksakk mønster rundt pukkk

For serie 12 og 13 var det tydelige brudd i tilslaget som vist i figur til venstre over fordi styrken til lettklinkene(leca) ikke var høy nok til å motstå belastningene betongen ble utsatt for. Serie 11 inneholdt tilslag av pukkk, grus og naturlig sand som har en høyere fasthet og styrke. Tilslaget i denne serien klarte derfor å stå imot belastningen som ble påført, og det dannet seg sikksakk mønsterbrudd rundt tilslaget som vist til høyre i figur over. Det refereres til kap. 2.3.1 om tilslagsbruer, der teorien om at det går brudd i lett tilslaget før matriks og motsatt der normalt tilslag som pukkk og grus er benyttet.

6.8 Fiberbruer(Pull-out)



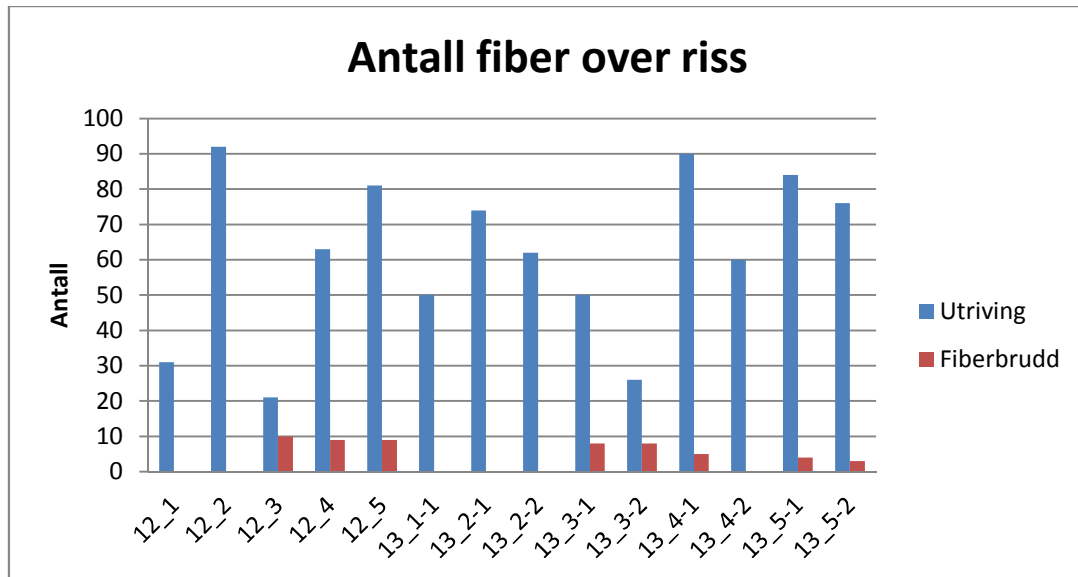
Figur 68: Fiber pull-out, til venstre stålfiber og til høyre basaltfiber

Som vist i figur over skjer det pull-out av fiber ved trepunkts bøyetest. Både endekrokedde stålfiber og spiralformede basaltfiber er rettet ut under denne testen. Som forklart i kap. 2.3.2 om fiberbruer kreves det en enorm energi for at noe slikt skal hende. Det ble bevist at alle stålfiberne som dannet fiberbruer over risset ble revet ut og ikke gikk til brudd, noe som bidrar til å oppnå et duktilt brudd. For basaltfiberne ble nesten alle revet ut, mens noen gikk til brudd. Det tyder på at stålfiberne hadde en høy nok strekkfasthet og styrke, mens basaltfiberne hadde for lav strekkfasthet.

6.9 Antall fiber over riss

Tabell 20: Resultat, antall fiber over riss

Prøve nr.	Fibertype	Utrivning	Brudd	Totalt	Utriving [%]
11-ref-2	-	-	-	-	-
12-ref-2	-	-	-	-	-
13-ref-2-1	-	-	-	-	-
13-ref-2-2	-	-	-	-	-
12_1	Stål	31	0	31	100
12_2	Stål	92	0	92	100
12_3	Basalt	21	10	31	68
12_4	Basalt	63	9	72	88
12_5	Basalt	25	9	34	74
	Stål	56	0	56	100
13_1-1	Stål	50	0	50	100
13_2-1	Stål	74	0	74	100
13_2-2	Stål	62	0	62	100
13_3-1	Basalt	50	8	58	86
13_3-2	Basalt	26	8	34	76
13_4-1	Basalt	90	5	95	95
13_4-2	Basalt	60	0	60	100
13_5-1	Basalt	33	4	37	89
	Stål	51	0	51	100
13_5-2	Basalt	31	3	34	91
	Stål	45	0	45	100



Figur 69: Antall utriving og fiberbrudd per blanding ved trepunkts bøyetest

Som det ses av figur over skjer det pull-out for alle stålfiberne, mens for blandingene som inneholder basaltfiber skjer det også fiberbrudd. Det varierer også mye mellom mengde fiber som danner fiberbruer over risset ved bjelketesten, da også innenfor samme blanding, noe som vil gi utslag for rest bøyestrekfastheten for den enkelte bjelke. Det kan forventes at bjelke 12_2, 12_5, 13_4-1, 13_5-1 og 13_5-2 har de høyeste verdiene for rest bøyestrekfasthet og bruddenergi ut ifra antall fiber over risset. Bjelketesten ble utført i henhold til NS-EN 14651 og bjelken ble belastet til en CMOD på 5mm var nådd. Etter dette ble bjelken kjørt hurtig til total kollaps. Dersom bjelken hadde blitt kjørt til total kollaps med samme belastningshastighet ville dette mest sannsynlig ha påvirket antall pull-outs og fiberbrudd. Spekulasjoner over hvorvidt det ene eller det andre hadde hendt, da enten pull-outs eller fiberbrudd, diskuteres ikke videre.

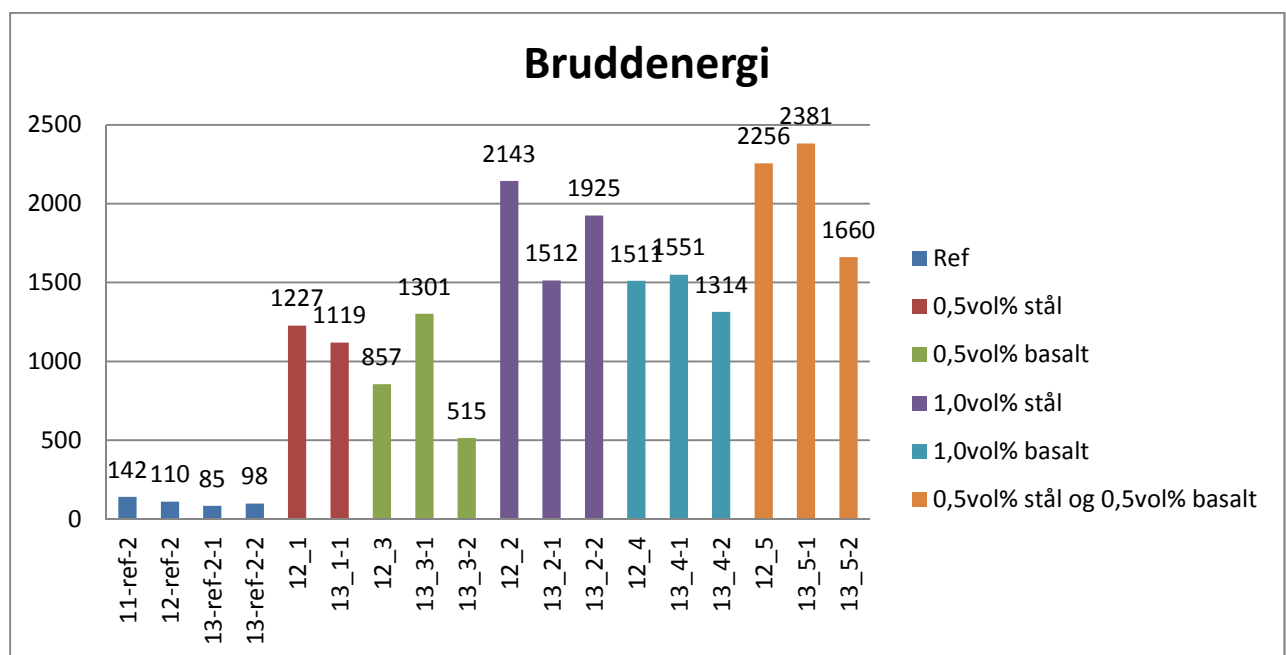


Figur 70: Fiberbruer over riss

6.10 Bruddenergi

Tabell 21: Resultat, bruddenergi

Prøve nr.	W_F σ -CMOD [Nmm]	W_F σ - δ [Nmm]	W_F σ -CMOD v/omgjørings- formel i σ - δ [Nmm]	Gj.snitt [Nmm]	Variasjons koeffisient [%]	G_F [Nm/m ²]
11-ref-2	2785	2503	2698	2662	4,43	142
12-ref-2	2136	1980	2098	2071	3,21	110
13-ref-2-1	1639	1523	1613	1592	3,12	85
13-ref-2-2	1920	1715	1878	1838	4,81	98
12_1	24018	20680	24330	23009	7,18	1227
12_2	41761	36210	42600	40190	7,05	2143
12_3	16859	14391	16931	16060	7,35	857
12_4	29635	25422	29909	28322	7,25	1511
12_5	44333	37943	44639	42305	7,30	2256
13_1-1	21676	18965	22311	20984	6,91	1119
13_2-1	29416	25566	30078	28353	7,02	1512
13_2-2	37694	32438	38163	36098	7,19	1925
13_3-1	25336	21995	25877	24403	7,04	1301
13_3-2	10061	8681	10213	9652	7,14	515
13_4-1	30191	26203	30828	29074	7,04	1551
13_4-2	25455	22271	26201	24642	6,92	1314
13_5-1	46153	40321	47437	44637	6,94	2381
13_5-2	32258	28093	33051	31134	6,98	1660



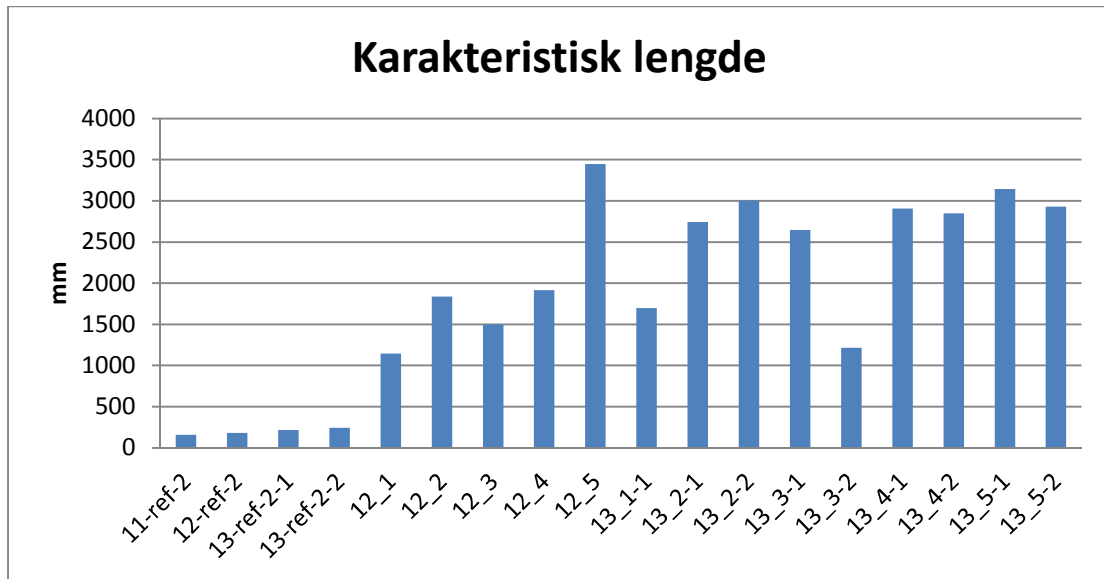
Figur 71: Bruddenergi

Beregning av bruddenergi er utført i henhold til beskrivelsen gitt i kap. 3.1.2 om bruddenergi. Blanding 12_2, 12_5, 13_5-1 og 13_5-2 er blant de som har høyest bruddenergi som antatt i kap. 6.9 om antall fiber over risset foruten 13_4-1 som også var nevnt. Også blanding 13_2-2 har en bruddenergi som er over gjennomsnittet. Selvsagt avhenger bruddenergien av antall fiber over risset, mens også i høy grad av fiberorienteringen i forhold til rissplanet. Blanding 13_2-2 har derfor en høy bruddenergi i motsetning til 13_4-1 som ble forutsett til å ha en høy bruddenergi utfra antall fiber over risset. Det registreres at blandingene i serie 12 har en høyere bruddenergi enn gjennomsnittlig bruddenergi for blandingene i serie 13. Grunnen er forskjellen i type tilslag som er tilsatt i seriene. For serie 12 er det brukt lecaklinker og naturlig sand, mens for serie 13 er det brukt lecaklinker og lett sand i form av knust leca. Serie 12 har derfor en høyere kapasitet mot ytre belastning enn serie 13 pga. høyere styrke på sementpastaen. Blandingene 12_5 og 13_5 som er tilsatt 0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber har de høyeste verdiene for bruddenergi i sin respektive serie. En kombinasjon av fibertypene kan da være fordelaktig fremfor kun en fibertype tilsatt betongen.

6.11 Karakteristisk lengde

Tabell 22: Resultat, karakteristisk lengde

Prøve nr.	E- modul E_c [kN/mm ²]	Bruddenergi G_F [Nm/m ²]	Strekfasthet f_t [N/mm ²]	Kar.lengde l_{ch} [mm]
11-ref-2	27,86	142	5,015	157
12-ref-2	24,08	110	3,821	182
13-ref-2-1	20,49	85	2,842	215
13-ref-2-2	20,49	98	2,876	243
12_1	15,71	1227	4,099	1147
12_2	15,94	2143	4,314	1835
12_3	22,07	857	3,553	1497
12_4	20,18	1511	3,991	1913
12_5	20,06	2256	3,623	3448
13_1-1	20,12	1119	3,64	1698
13_2-1	20,13	1512	3,330	2744
13_2-2	20,13	1925	3,591	3005
13_3-1	19,72	1301	3,114	2646
13_3-2	19,72	515	2,890	1215
13_4-1	19,38	1551	3,216	2905
13_4-2	19,38	1314	2,991	2846
13_5-1	18,64	2381	3,758	3142
13_5-2	18,64	1660	3,251	2929



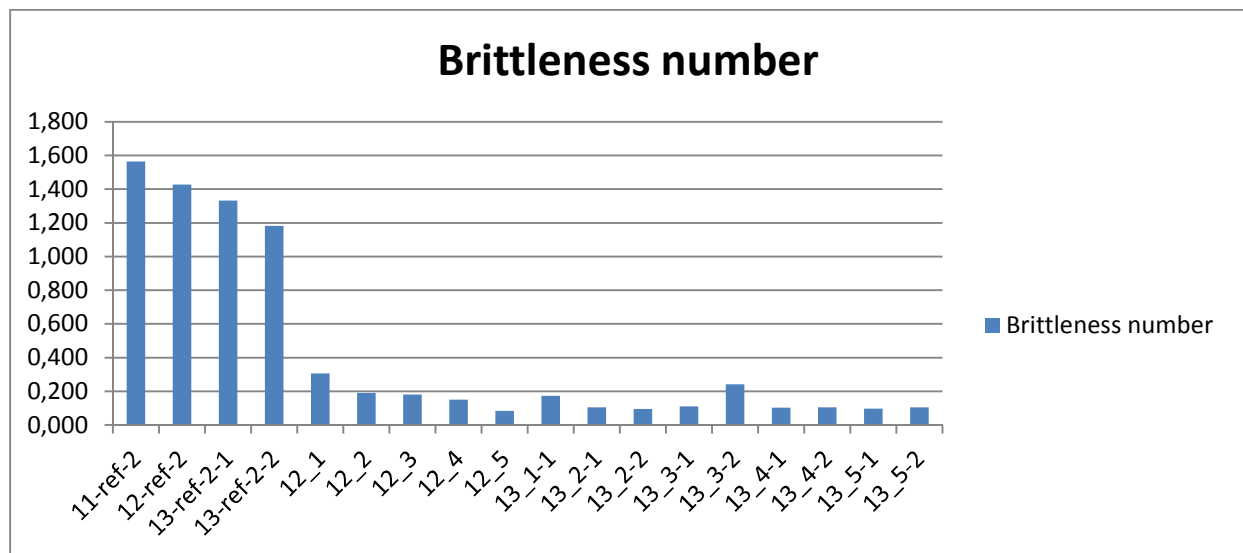
Figur 72: Karakteristisk lengde

Karakteristisk lengde er avhengig av strekkfastheten til betongen. I dette prosjektet er bøyestrekfastheten ved opprissing benyttet som f_t , som er betongens strekkfasthet. Karakteristisk lengde følger formelen gitt i kap. 3.1.3. Karakteristisk lengde beskriver sprøheten i betongen, lav verdi beskriver mer sprø betongen enn høy verdi. Blanding 12_5 har den største karakteristiske lengden og defineres som den mest duktile blandingen. Det registreres at den karakteristiske lengden varierer mye innenfor hver blanding. Det kommer av at fiberorientering og mengde fiber over risset varierer mye fra blanding til blanding. Blandingsserie 13_5 har i gjennomsnitt den høyeste karakteristiske lengden i serie 13. Blandingene som inneholdt en kombinasjon av stålfiber og basaltfiber viste seg å ha de mest duktile egenskapene ut fra denne parameteren. De blandingene som hadde en lav karakteristisk lengde hadde en kraftig dropp i belastning under trepunkts bøyetest rett etter opprissing, mens blandingene med de høye verdiene hadde tendens til økt belastning etter opprissing.

6.12 Brittleness number

Tabell 23: Resultat, brittleness number

Prøve nr.	E- modul E_c [kN/mm ²]	Bruddenergi G_F [Nm/m ²]	Strekkfasthet f_t [N/mm ²]	Brittleness number [N/mm ²]
11-ref-2	27,86	142	5,015	3,497
12-ref-2	24,08	110	3,821	3,019
13-ref-2-1	20,49	85	2,842	2,555
13-ref-2-2	20,49	98	2,876	2,266
12_1	15,71	1227	4,099	0,479
12_2	15,94	2143	4,314	0,300
12_3	22,07	857	3,553	0,367
12_4	20,18	1511	3,991	0,287
12_5	20,06	2256	3,623	0,160
13_1-1	20,12	1119	3,64	0,324
13_2-1	20,13	1512	3,330	0,200
13_2-2	20,13	1925	3,591	0,183
13_3-1	19,72	1301	3,114	0,208
13_3-2	19,72	515	2,890	0,453
13_4-1	19,38	1551	3,216	0,189
13_4-2	19,38	1314	2,991	0,193
13_5-1	18,64	2381	3,758	0,175
13_5-2	18,64	1660	3,251	0,188



Figur 73: Brittleness number

De samme verdiene som er benyttet til å finne karakteristisk lengde er benyttet til å finne brittleness number. Formelen som er benyttet er gitt i kap. 3.1.4. Brittleness number er et mål på hvor sprø betongen er og høye verdier definerer sprø betong og lave verdier definerer duktil betong. Blanding 12_5 er som forventet fra karakteristisk lengde den laveste verdien og derfor den mest duktile

blandingen. Blanding 12_1 og 13_3-2 har de høyeste verdiene og er de sprøeste blandingsene med fiber. Som det ses fra figur har referanse bjelkene svært høye verdier i forhold til bjelkene med fiber. Referanse bjelkene defineres som sprø betong.

6.13 Feilkilder

- Proporsjoneringsprogrammet har vist seg å variere litt for hver blanding, grunnet noe trøbbel med pcen som er benyttet. Dette ble oppdaget etter utstøping var ferdig. Se proporsjoneringsarkene i vedlegg for mer info.
- Komprimering med komprimeringsstang kan ha forårsaket fiber opphopning i bunn av form.
- Fuktinnhold i tilslaget er ikke definert som en sikker verdi, grunnet mye absorbert vann som har vært vanskelig å få målt skikkelig.

7 Konklusjon

Ut ifra de forutsetningene som er satt ved utførelse av forsøkene i dette prosjektet, er følgende konklusjoner tatt:

1. Fersk betongens egenskaper blir ikke mye påvirket med tilsetning av totalt 1,0 vol% fiber som er benyttet i dette prosjektet. Det er bevist at en densitet på under 2000 kg/m³ er vanskelig å få gjennomført med naturlig sand.
2. Tilsetning av fiber påvirker ikke trykkfasthet, verken for terningene eller sylindrerne. Det ble registrert under trykktesting at prøvelegemene for referansene fikk større riss og oppsprekninger enn blandningene med fiber. Det konkluderes da med at under trykktesting vil fiber gi økt strekkstyrke som motvirker opprissing. For sylindetrykkfastheten ble det registrert at sylindrerne risset opp i den delen av sylindrerne som har vært i toppen av formen, pga. komprimering under støping.
3. Spaltestrekkfastheten ble noe forbedret ved tilsetning av stålfiber, men ved tilsetning av basaltfiber ble spaltestrekkfastheten enten lik eller litt dårligere enn for referanseblandingen.
4. Referansebjelkene hadde en spenning ved opprissing som var forventet på forhånd. Da normalbetongreferansen 11-ref-2 hadde den høyeste spenningen ved opprissing av alle bjelkene som ble testet. Det konkluderes ut i fra det at tilslagets strekkstyrke er den avgjørende egenskapen for å oppnå høyest mulig spenning ved opprissing. Etter opprissingen, startet fiber å påvirke lettbetongens duktile egenskaper. I dette prosjektet er det bevist gjennom forsøk at en kombinasjon av fiber er den beste måten for å oppnå høyest mulig duktilitet. Blandingene 12_5 og 13_5 som består av 0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber oppnådd de beste duktile egenskapene. Årsaken er at en kombinasjon av form og mekaniske egenskaper har gitt en betong som er mer motstandsdyktig mot ytre belastning. De minst duktile bjelkene var blandningene med kun basaltfiber. Årsaken er fiberens strekkfasthet som var for lav og forankringsmotstanden til fiberen var den dårligste av de to fibertypene som er benyttet.
5. Ved trepunkts bøyetest og testing av spaltestrekkfasthet er det registrert brudd i lett tilslaget som er benyttet i dette prosjektet. Årsaken til brudd i tilslaget er fordi tilslaget har for lav strekkfasthet. For tilslaget benyttet i normalbetong referansen, 11-ref-2, er det benyttet vanlig pukk og sand. Her dannet det seg sikksakk mønstret brudd rundt tilslaget. Tilslaget har da en høyere strekkfasthet enn heften mellom matriks og tilslaget. Det kan konkluderes med at tilslagsbruer dannes både hos lettbetong og normalbetong, men hos lettbetong går det raskere brudd i tilslaget enn hos normalbetong.
6. Fiberbruer ble dannet i alle blandningene med fiber. Den endekrokedde stålfiberen og den vridde basaltfiberen som ble benyttet, har begge blitt rettet ut under trepunkts bøyetest. Dette er en direkte årsak til økt duktilitet, da det kreves mer energi for å skape en pull-out enn et fiberbrudd. Stålfiberen hadde ingen fiberbrudd i de bjelkene som ble testet, men basaltfiberen var det i gjennomsnitt 16,5% av fiberne som gav fiberbrudd. Dette tyder på at basaltfiberen som er benyttet har hatt litt lav strekkfasthet.

7. Ved bruk av bruddmekanikk, viser kurvene fra trepunkts bøyetest i henhold til NS-EN 14651 at blandingene med kombinasjon av fibertypene, 12_5 og 13_5, har oppnådd de beste duktile egenskapene i lettbetong.

8 Figurliste

Figur 1: Forskjellige tilslagssammensetninger [1]	9
Figur 2: Flisighet [1]	9
Figur 3: Utsnitt av eksponeringsklassene[6]	10
Figur 4: Fasthetsklasser for lettbetong øverst og normalbetong nederst[6]	11
Figur 5: Produksjonsledd ved fremstilling av portlandsement [1]	12
Figur 6: Porøst tilslag [1].....	13
Figur 7: Forskjellig geometri på fiber.....	16
Figur 8: Noen seighetsmekanismer i ren betong[10].....	17
Figur 9: Skjematisk beskrivelse av brudd prosessen i en uni-aksielt strekk test og den resulterende spenning -sprekkåpningsforholdet[10]	18
Figur 10: Pull-out for en rett fiber[10].....	19
Figur 11: Pull-out for fiber som er rett og fiber med endekrok[10].....	20
Figur 12: Skjematisk beskrivelse av effekten fra fiberne i brudd prosessen ved uni-aksielt strekk[10]	20
Figur 13: Skjematisk fremvisning av belastningsherding[11].....	21
Figur 14: Typisk strekk oppførsel for stålfiberarmert betong[11].....	22
Figur 15: Test oppsett for trepunkts bøyetest, wedge splitt test og uni-aksiell strekk test[11]	22
Figur 16: Forskjell mellom lineær-elastisk og elastisk-plastisk oppførsel[18].....	24
Figur 17: Diagrammer for beregning av seighets parametere fra RILEM[19].....	25
Figur 18: Illustrerer <i>Alig</i> i henhold til NS-EN 14651 [13]	27
Figur 19: Beregningsmodell for moment[23].....	29
Figur 20: Spennings- og tøyningfordeling for et rektangulært tverrsnitt av fiberarmert betong utsatt for ren bøyning[8]	31
Figur 21: Spennings- og tøyningfordeling[24]	32
Figur 22: Spennings-tøyingsdiagram fra RILEM 2003[14].....	32
Figur 23: Spenningsfordeling over tverrsnittet[14].....	33
Figur 24: Spennings- og tøyningfordeling fra GD of SFRC[24]	34
Figur 25: Bjelke med skjærarmering[23].....	37
Figur 26: 0,8-1,5mm til venstre og 1,5-2,5mm til høyre	45
Figur 27: 3-6mm til venstre og 4-8mm til høyre	45
Figur 28: 0-5mm til venstre og 5-8mm til høyre	45
Figur 29: 8-11mm til venstre og 11-16mm til høyre	46
Figur 30: Basaltfiber til venstre og stålfiber til høyre.....	46
Figur 31: Tvangsblender som ble brukt i prosjektet.....	47
Figur 32: Apparat for trykk-gauge-metoden[27].....	48
Figur 33: Sant og skjærdeformert synkmål[29].....	49
Figur 34: Synkmåling[29].....	49
Figur 35: Nominelle størrelser for terninger til venstre[31] og støpeform til høyre	49
Figur 36: Nominelle størrelser for sylindere til venstre[31] og støpeform til høyre.....	50
Figur 37: Nominelle størrelser for prismer (bjelker)[31] og støpeform til høyre.....	50
Figur 38: Tilfredsstillende bruddform for terninger[32]	51
Figur 39: Tilfredsstillende bruddform for sylindere[32].....	51
Figur 40: Sylinder trykkfasthet for 13_2 til venstre og 12-ref-2 til høyre	51
Figur 41: Innfesting av sylinder for testing av spaltstrekkfasthet[33].....	52

Figur 42: Spaltestrekkprøve for 12_2 til venstre og 12-ref-2 til høyre.....	52
Figur 43: Prinsipp for bjelketest i henhold til NS-EN 14651:2007[34]	53
Figur 44: Last-CMOD diagram. Forventet graf for fastsettelse av proporsjonalitetsgrensen, (LOP, 1.riss) og de forhåndsdefinerte rissviddene (CMOD ₁ -CMOD ₄)[34].....	54
Figur 45: Lineær spenningsfordeling i henhold til NS-EN 14651[34]	54
Figur 46: Spenningsfordeling benyttet for rest strekkfasthet[8]	55
Figur 47: Spenningsfordeling over tverrsnittet[9].....	56
Figur 48: Definisjon av areal under graf, W_F	59
Figur 49: Betongsag	60
Figur 50: Til venstre displacement transducer(Clip Gauge) og til høyre festeanretning på bjelke med Clip Gauge	60
Figur 51: Til venstre lastcelle under opplager og til høyre opplager for bjelke over lastcelle	60
Figur 52: Trykkpressen av typen Tonitech	61
Figur 53: Densitet	62
Figur 54: Synkmål	63
Figur 55: Luftinnhold	64
Figur 56: Terning trykkfasthet ved 7døgn	65
Figur 57: Terning trykkfasthet ved 28døgn	66
Figur 58: Sylinder trykkfasthet	67
Figur 59: Spaltestrekkfasthet	69
Figur 60: Elastisitetsmodul	70
Figur 61: Referanser	71
Figur 62: 0,5 vol% stålfiber	72
Figur 63: 1,0 vol% stålfiber	73
Figur 64: 0,5 vol% basaltfiber	74
Figur 65: 1,0 vol% basaltfiber	75
Figur 66: 0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber	76
Figur 67: Tilslagsbruer, til venstre brudd i lett klinker og til høyre sikksakk mønster rundt pukke.....	77
Figur 68: Fiber pull-out, til venstre stålfiber og til høyre basaltfiber	77
Figur 69: Antall utrivning og fiberbrudd per blanding ved trepunkts bøyetest.....	79
Figur 70: Fiberbruer over riss	79
Figur 71: Bruddenergi.....	80
Figur 72: Karakteristisk lengde	82
Figur 73: Brittleness number	83

9 Tabell liste

Tabell 1: Hoved mineraler	12
Tabell 2: Type plastifiserende og superplastifiserende tilsetningsstoff.....	14
Tabell 3: Vanlige verdier for noen mekaniske egenskaper[10].....	21
Tabell 4: Verdier for α [23]	30
Tabell 5: Verdier av K[23]	30
Tabell 6: Prøveprogram	44
Tabell 7: Forholdet mellom CMOD og δ [34]	57
Tabell 8: Resultat, fersk betong.....	62
Tabell 9: Resultat, terning trykkfasthet ved 7døgn	65
Tabell 10: Resultat, terning trykkfasthet ved 28døgn.....	66
Tabell 11: Resultat, sylinder trykkfasthet.....	67
Tabell 12: Resultat, spaltestrekkfasthet.....	68
Tabell 13: Resultat, elastisitetsmodul	70
Tabell 14: Resultat, referanser	71
Tabell 15: Resultat, 0,5 vol% stålfiber	72
Tabell 16: Resultat, 1,0 vol% stålfiber	73
Tabell 17: Resultat, 0,5 vol% basaltfiber	74
Tabell 18: Resultat, 1,0 vol% basaltfiber	75
Tabell 19: Resultat, 0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber.....	76
Tabell 20: Resultat, antall fiber over riss.....	78
Tabell 21: Resultat, bruddenergi.....	80
Tabell 22: Resultat, karakteristisk lengde	81
Tabell 23: Resultat, brittleness number	83

10 Referanser

- [1] Gjerp P, Opsahl M, Smeplass S. Grunnleggende betongteknologi. Lillestrøm: Byggenæringens forl., 2004.
- [2] Jacobsen S. Concrete technology 1: Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [3] Jahren P. Betong : historie og historier. Trondheim: Tapir akademisk forl., 2011.
- [4] Sjøpler B. Betongboka. Oslo: Norcem : Gyldendal undervisning, 2004.
- [5] Aitcin P-C, Stern BB. High-performance concrete. London New York: E&FN Spon, 1998.
- [6] Standard N. NS-EN 206-1:2000+NA:2007: Betong. Del 1: Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar, 2000.
- [7] Jørgensen O. Luft i lettbetong. Trondheim: NTH, 1992.
- [8] Kanstad T, al. e. Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner;Coin project report 29. 2011.
- [9] Jansson A, Gylltoft, Kent and Löfgren, Ingemar. Design methods for fibre-reinforced concrete: a state-of-the-art review. 2008.
- [10] Löfgren I. Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction 2005.
- [11] Døssland ÅL. Fibre Reinforcement in Load Carrying Concrete Structures vol. PhD Thesis. Trondheim, Norway: The Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2008.
- [12] Thorenfeldt E. F, S., et al. Stålfiberarmering i betong. Veiledning for prosjektering, utførelse og kontroll, 2006.
- [13] Standard N. NS-EN 14651:2005+A1:2007: Prøvmingsmetode for betong med metalliske fibere, Måling av bøyestrekfasthet(proporsjonalitetsgrense og restfastheter). 2005.
- [14] Leksikon SN. Bruddmekanikk.
- [15] Anderson TL. Fracture mechanics: fundamentals and applications. Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis, 2005.
- [16] Nawy EG. Fundamentals of high-performance concrete. New York: Wiley, 2001.
- [17] Bratfos HA. Kapittel 2: Lineær-elastisk bruddmekanikk Forelesningsnotater i MEK 4520 Bruddmekanikk.
- [18] RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Bending test. Recommendations. Materials and Structures, vol. 33, 2000. p.3.
- [19] Darwin D, Barham S, Kozul R, Luan S. Fracture energy of high-strength concrete. 2001.
- [20] Elfgrén L, Ohlsson U. Anchor bolts modelled with fracture mechanics. In: Carpinteri A, editor. Applications of fracture mechanics to reinforced concrete. Luleå, Sweden, 1992. p.267.

- [21] Standard N. Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, Del 1-1, Allmenne regler og regler for bygninger. Lysaker: Standard Norge, 2008.
- [22] Sørensen SI. Betongkonstruksjoner: beregning og dimensjonering etter Eurocode 2. Trondheim: Tapir akademisk forl., 2010.
- [23] Klausen ABE. Steel fibres in load carrying concrete structures. Guideline survey and practical examples. COIN Project report, vol. 17. Oslo: SINTEF Building and Infrastructure, 2009. p.48.
- [24] RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. s-e design method Final Recommendation. Materials and structures, vol. 36, 2003. p.560.
- [25] Sandbakk S. Fibre reinforced concrete. structural engineering, vol. Doctor thesis: NTNU, 2011.
- [26] RILEM TC 162-TDF(2003): Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. s-e design method Final Recommendation. Materials and structures, vol. 36. p.560.
- [27] Standard N. NS-EN 12350-7: Prøving av fersk betong. Del 7: Luftinnhold, 2000.
- [28] Standard N. NS-EN 12350-6: Prøving av fersk betong. Del 6: Densitet, 2000.
- [29] Standard N. NS-EN 12350-2: Prøving av fersk betong. Del 2: Synkmål, 2000.
- [30] Standard N. NS-EN 12390-2: Prøving av herdet betong. Del 2: Støping og herding av prøvelegemer for fasthetsprøving, 2001.
- [31] Standard N. NS-EN 12390-1: Prøving av herdet betong. Del 1: Form, mål og andre krav til prøvelegemer og former, 2001.
- [32] Standard N. NS-EN 12390-3: Prøving av herdet betong. Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet, 2002.
- [33] Standard N. NS-EN 12390-6: Prøving av herdet betong. Del 6: Prøvelegemers spalttestrekkfasthet, 2001.
- [34] Standard N. NS-EN 14651:2005+A1:2007: Prøvmingsmetode for betong med metalliske fibre. Måling av bøyestrekfasthet (proporsjonalitetsgrense og restfastheter), 2005.
- [35] Smeplass S. Description of test procedures according to SINTEF internal QA Manual. In: Aassved Hansen E, editor, 2004.

11 Vedlegg

Vedlegg Datablad	2
Lett tilslag	2
Anleggsement.....	6
Superplastifiserende tilsetningsstoff.....	10
Stålfiber	12
Displacement transducer	15
Vedlegg Proporsjonering.....	16
Vedlegg Sylinder trykkfasthet	33
Vedlegg Sylinder Spaltestrekkfasthet.....	34
Vedlegg Bøyestrekfasthet.....	36
Vedlegg antall fiber over risset.....	40
Vedlegg Testverdier.....	43
Bøyestrekfasthet	43
Spaltestrekkfasthet	44
Sylindertrykkfasthet	45
Terning trykkfasthet.....	46
Bøyestrekfasthet kurver	48
Vedlegg Prøvedato	56
Vedlegg Forslag fra Sindre Sandbakk 2011 for momentkapasitet	57

Vedlegg Datablad

Lett tilslag

FILTRALITE MC 0,8-1,6

Medium densitet og knuste leireaggregater.

Filtralite MC 0,8-1,6

Commercial name	FILTRALITE MC 0,8-1,6 mm
Density	Bulk density: 500 kg/m ³ particle density: 1400 kg/m ³
Type of material	Expanded clay
Appearance	Crushed particles, porous surface structure
Manufactured by	Weber Leca Rælingen, Norway

Size and weight

Size/weight	Value	Deviation	Comments
Effective size	0,95 mm	±10 %	d10 EN 12905
Particle size range	0,8-1,6 mm	< 0,8 mm max. 5%	EN 12905
		> 1,6 mm max. 5%	N 12905
Coefficient of uniformity	< 1,5		d60 / d10 EN 12905
Bulk density, dry	500 kg/m ³	± 75 kg/m ³	EN 1097-3
Particle density, dry (PDD)	1400 kg/m ³	± 150 kg/m ³	Exclay norm

Other properties

Other properties	Value	Comments
Floating particles	<2 %	Floating particles after 2 days in water.
Particle porosity	48 %	Porosity internal particle: (1-PDD/2700 kg/m ³)*100 %
Voids	63 %	EN 1097-3
Acid solubility	< 5 %	EN 12902
Water adsorption 1 day	32 %	Exclay Norm
Water adsorption 28 days	42 %	Exclay Norm

FILTRALITE HC 1,5-2,5 mm

Høy densitet og knuste leireaggregater.

FILTRALITE HC 1,5-2,5 mm

Commercial name	FILTRALITE HC 1,5-2,5 mm
Density	Bulk density: 750 kg/m ³ particle density: 1600 kg/m ³
Type of material	Expanded clay
Appearance	Crushed particles, porous surface structure
Manufactured by	Weber Leca Rælingen, Norway

Size and weight

Size/weight Value	Deviation	Comments	
Effective size	1,7 mm	± 3 %	d10
Particle size range	1,5-2,5 mm	< 1,4 mm max. 3 % +Δ < 0,125 mm	
		> 2,5 mm max. 5 %	
Coefficient of uniformity	< 1,4		d60 / d10
Bulk density, dry	750 kg/m ³	±75 kg/m ³	EN 1097-3
Particle density, dry (PDD)	1600 kg/m ³	±150 kg/m ³	Exclay Norm

Other properties

Other properties	Value	Comments
Floating particles	< 2 %	Maximum volume floating particles after 2 days in water.
Particle porosity	41 %	Porosity internal particle: (1-PDD/2700 kg/m ³)*100
Voids	53 %	EN 1097-3
Acid solubility	< 5 %	EN 12902
Water adsorption 1 day	20 %	Approximately value. Exclay Norm
Water adsorption 28 days	28 %	Approximately value. Exclay Norm
Water adsorption 1 year	30 %	Approximately value. Exclay Norm

FILTRALITE HR 3-6 mm

Høy densitet og runde leireaggregater.

FILTRALITE HR 3-6 mm

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

Size and weight

Size/weight	Value	Deviation	Comments
Effective size	3,5 mm	± 0,3 mm	d10
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		d60 / d10
Bulk density, dry	825 kg/m ³	± 75 kg/m ³	EN 1097-3
Particle density, dry (PDD)	1450 kg/m ³	± 100 kg/m ³	Exclay Norm

Other properties

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 ³)*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	

FILTRALITE HR 4-8 mm

Høy densitet og runde leireaggregater.

FILTRALITE HR 4-8 mm

Commercial name	FILTRALITE
Density	Bulk density: 800 kg/m ³ particle density: 1400 kg/m ³
Type of material	Expanded clay
Appearance	Round particles, smooth surface structure
Manufactured by	Weber Leca Rælingen, Norway

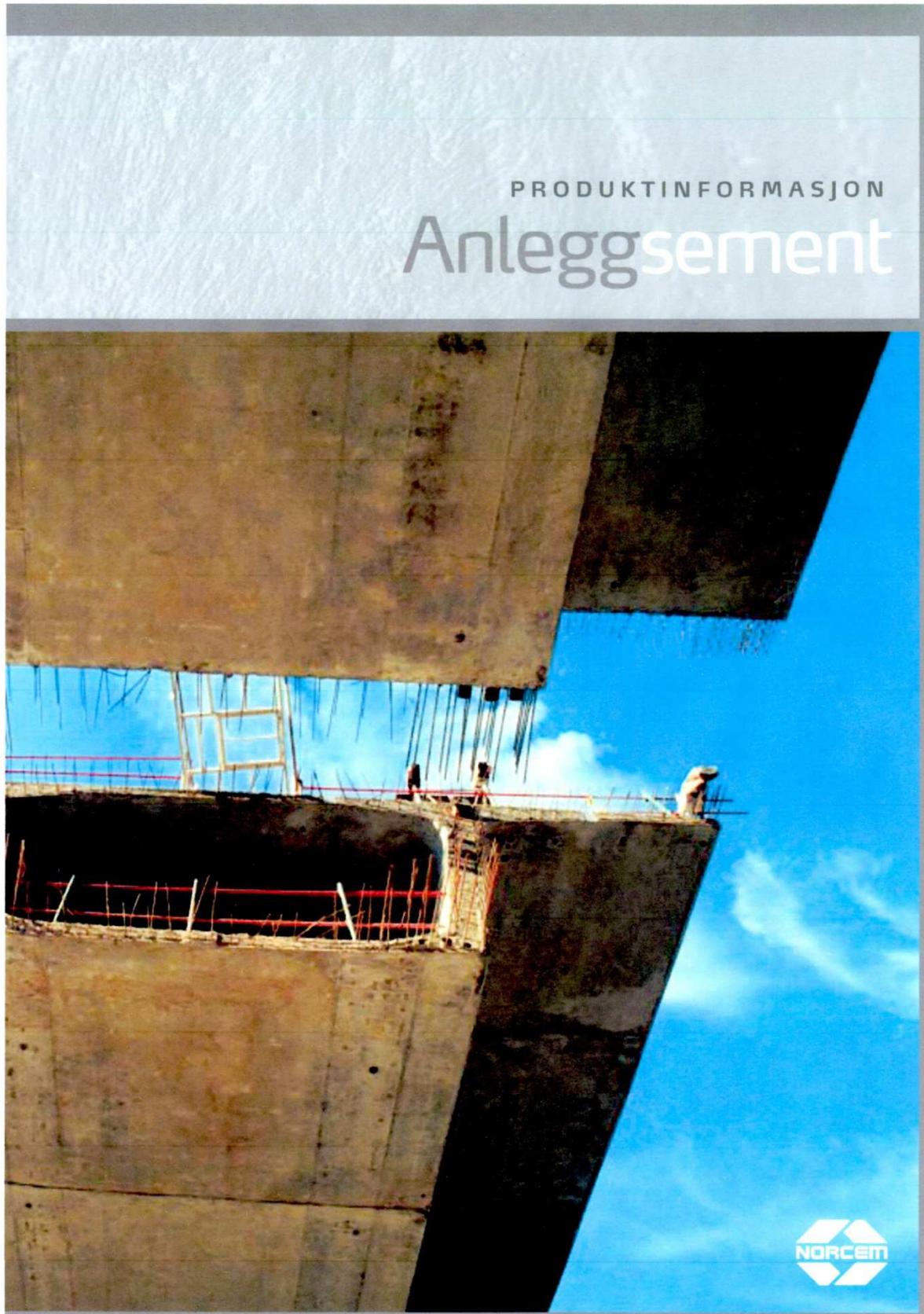
Size and weight

Size/weight	Value	Deviation	Comments
Effective size	4,6 mm	± 0,4 mm	d10
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		d60 / d10
Bulk density, dry	800 kg/m ³	± 75 kg/m ³	EN 1097-3
Particle density, dry (PDD)	1400 kg/m ³	± 100 kg/m ³	Exclay Norm

Other properties

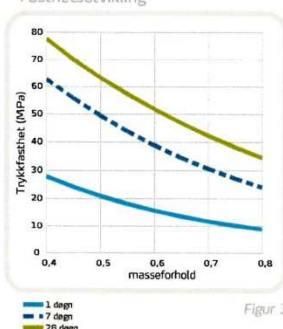
Other properties	Value	Comments
Floating particles	< 2 %	Maximum volume floating particles after 2 days in water.
Particle porosity	48 %	Porosity internal particle: (1-PDD/2700 kg/m ³)*100
Voids	43 %	EN 1097-3
Acid solubility	< 4 %	EN 12902
Friability loss	< 4 %	EN 12902
Water absorption 24 hours	11 %	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	

Anleggsement





Fasthetsutvikling

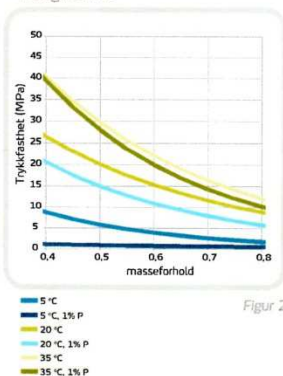


Figur 1

Fasthetsutvikling

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

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 trykkfasthet i betong etter 1 dagn med forskjellig masseforhold med og uten 1% plastiserende tilsetningsstoff (P-stoff) med Anleggsement. 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. 7 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Anleggsement gir følgende retningsgivende verdier for største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring.

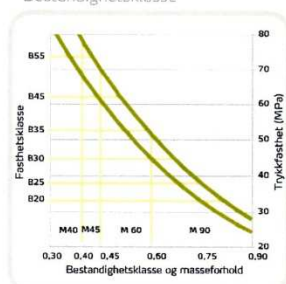
Fasthetsklasse	B30	B35	B45	B55
Største masseforhold	0,68	0,60	0,51	0,42

Tabell 1

Norcem Anleggsement er en spesialsement for anleggskonstruksjoner. Sementen er tilpasset norske forhold for bruk i bestandighetsklasse M45 og MF45 eller strengere, og i konstruksjoner med krav til høy slutfasthet. Anleggsementen har lavt alkaliinnhold, og kan benyttes i kombinasjon med alkalireaktivt tilslag. Sementen har relativt høy tidligfasthet, høy slutfasthet, moderat varmeutvikling, meget god støpelighet og veldokumenterte bestandighetsegenskaper.



Bestandighetsklasse



Figur 3

Bestandighetsklasse

NS-EN 206-1 klassifiserer betongens miljøpåvirkninger i eksponeringsklasser. I nasjonalt tillegg til denne standarden er de ulike eksponeringsklassene gruppert i seks bestandighetsklasser med krav til betongens maksimale masseforhold (se tabell 3). Tabell 2 viser anbefalte kombinasjoner av bestandighets- og fasthetsklasser. Retningsgivende verdier for største masseforhold i de ulike fasthetsklassene er gitt i tabell 1. I figur 3 er vist sammenhengen mellom bestandighetsklasse og fasthetsklasse, i et variasjonsbelte forårsaket av ulike produksjonsforutsetninger. Figuren gjelder for betong med Anleggsement uten luftinnføring.

Anbefalte kombinasjoner

Bestandighetsklasse M60	Fasthetsklasse B30 eller høyere
Bestandighetsklasse M45	Fasthetsklasse B45 eller høyere
Bestandighetsklasse M40	Fasthetsklasse B55 eller høyere

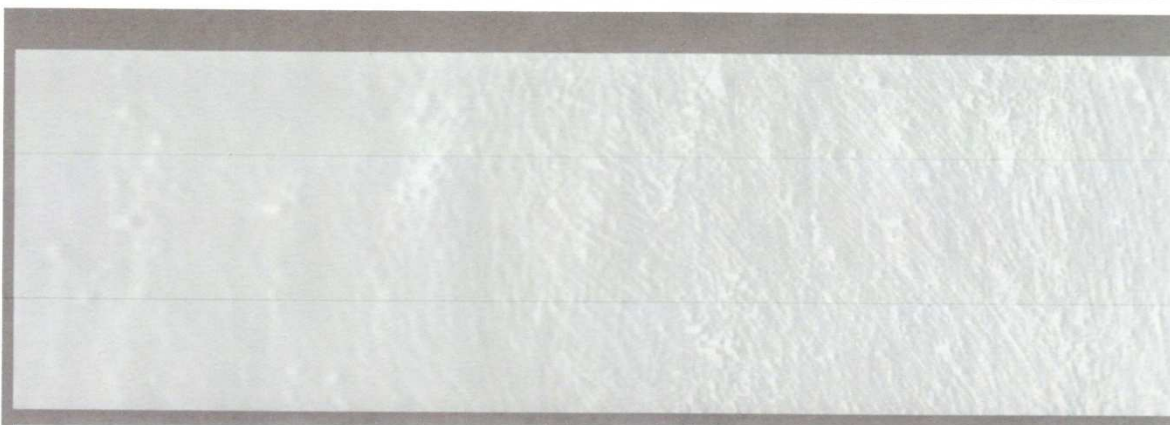
Tabell 2

Valg av bestandighetsklasse (nasjonale krav)

Eksponeringsklasse	M90	M60	M45	MF45*	M40	MF40*
X0	•	•	•	•	•	•
XCI, XC2, XC3, XC4, XF1		•	•	•	•	•
XD1, XS1, XA1, XA2, XA4			•	•	•	•
XF2, XF3, XF4				•		•
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3					•	•
XSA	Betongsammensetning og beskyttelsestiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstille kravene til M40.					
Største masseforhold $v/(c + s_{kp})$	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40

*Minst 4% luft

Tabell 3



Deklarerte data

Norcem Anleggsement tilfredsstiller kravene til Portlandsement
EN 197-1-CEM I 52,5 N

Kjemiske data

Egenskap	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	360m ² /kg	
Trikalsiumaluminat C ₃ A	7 %	
Alkali (ekv Na ₂ O)	0,6 %	≤ 0,6%
Mineralske tilsetninger	4%	≤ 5%
Glødetap	2,5%	≤ 5%
Uløselig rest	0,5%	≤ 5%
Sulfat (SO ₃)	3-4%	≤ 4%
Klorid	< 0,085 %	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt	3,14 kg/dm ³	

Fysikalske data

Egenskap	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1 *
Trykkfasthet 1 døgn	18 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	30 MPa	≥ 20 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	46 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	60 MPa	≥ 52,5 MPa
Begynnende bindetid	120 min	≥ 45 min
Ekspansjon	1 mm	≤ 10 mm



Superplastifiserende tilsetningsstoff



Dynamon SX-N

12.11

Superplastifiserende tilsetningsstoff

PRODUKTBEKRIVELSE

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

Produktet tilhører Dynamonsystemet basert på den Mapei utviklede 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.

BRUKSOMRÅDE

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.
- Selvkompimerende betong med ønske om lengre åpentid. Om nødvendig kan SKB stabiliseres med en viskositetsøker - **Viscofluid** eller **Viscostar**.
- Til produksjon av frostbestandig betong – da i kombinasjon med luftinnførende tilsetningsstoffer - **Mapeair**. 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.

Produsent:

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

EGENSKAPER

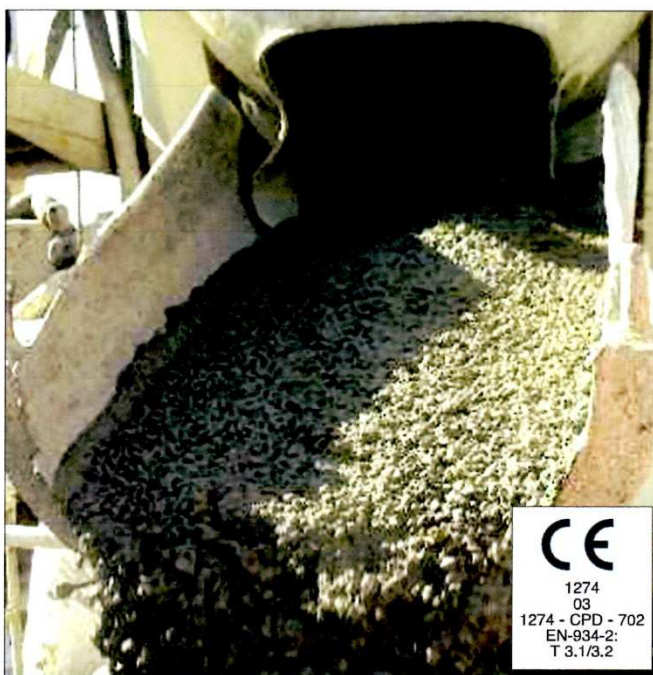
Dynamon SX-N er en vannløsning av aktive akrylpolymerer som effektivt dispergerer (løser opp) sementklaser.

Denne effekten kan prinsipielt utnyttes på tre måter:

1. For å redusere mengden tilsatt vann, men samtidig beholde betongens støpelighet. Lavere v/c-forhold gir høyere fasthet, tetthet og bestandighet i betongen.
2. For å forbedre støpeligheten sammenlignet med betonger med samme v/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 Mapei tilsetningsstoffer, som f.eks styrkningsakselererende stoffer som **Mapequick** og styrkningsretard-erende stoffer som **Mapetard**. Produktet lar seg også kombinere med luftinnførende tilsetningsstoffer, **Mapeair**, for produksjon av frostbestandig betong.



CE

1274
03
1274 - CPD - 702
EN-934-2:
T 3.1/3.2





Dynamon SX-N

12.11

Valg av type lufttinnførende 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 SX-N**, men dette påvirker ikke produktets bruksegenskaper. Produktet bør røres forsiktig om før bruk for å sikre et homogent produkt. Produktet bør ikke utsettes for sollys.

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 økt 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 tilsetningstidspunkt, men tilsetningstidspunktet kan påvirke nødvendig blandetid.

Dersom **Dynamon SX-N** tilsettes etter at minst 80% av blandedvannet 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 ett minutt pr. m³ betong i lasset, men minimum 5 minutter.

VERNILTAK

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon, se eget sikkerhetsdatablad. Sikkerhetsdatabladene finnes på www.mapei.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 Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser, som anses akseptert ved bestilling.

TEKNISKE SPESIFIKASJONER		
Form:	Væske	
Farge:	Gulbrun	
Viskositet:	Lettflytende; <30 mPa · S	
Tørrestoffinnhold, %:	18,5 ± 1,0	
Spesifikk vekt, g/cm ³ :	1,06 ± 0,02	
pH-verdi:	6,5 ± 1	
Kloridinnhold, %:	< 0,05	
Alkaliinnhold (Na ₂ O-ekvivalenter) %:	< 2,0	
BRUKSEGESKAPER I BETONG		
<i>Som vannreducerende stoff (lik konsistens) T 3.1</i>		
Sementmengde kg/m ³ (Norcem standard)	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt)	0	1,0
Masseforhold (v/c-tall)	0,51	0,41
Vannreduksjon (%)	-	20
Trykkfasthet (i N/mm ²):		
1 døgn	26	41
7 døgn	42	60
28 døgn	52	68
<i>Som SP-stoff (slumpforbedrer) T 3.2</i>		
Sementmengde, kg/m ³ (Norcem standard sement):	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt):	0	1,0
Masseforhold (v/c-tall):	0,48	0,48
Luftinnhold:	2,1	1,8
Konsistens, mm:		
- synkmål, 5 min	30	220
- synkmål, 30 min	20	200
- synkutbredelse, 5 min		420
- synkutbredelse, 30 min		380

Produsent:

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



Stålfiber



Stahlfasern | steel fibres



Datenblatt | Data Sheet

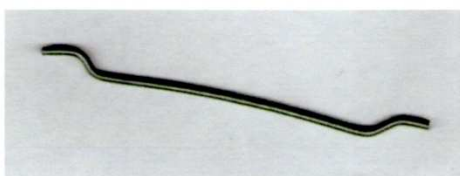
Übersicht | Overview

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 verwendeten 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 Betongütern 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 s.r.o. · Blatného 12 · 61600 Brno · Czech Republic
Phone +42 (0) 541 · 247 773 · Fax +42 (0) 0541 · 247 817 · 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 ²)
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 s.r.o. · Blatného 12 · 61600 Brno · Czech Republic
Phone +42 (0) 541 · 247 773 · Fax +42 (0) 0541 · 247 817 · 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 ²)
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 s.r.o. · Blatného 12 · 61600 Brno · Czech Republic
Phone +42 (0) 541 · 247 773 · Fax +42 (0) 0541 · 247 817 · www.krampeharex.cz · info@krampeharex.cz

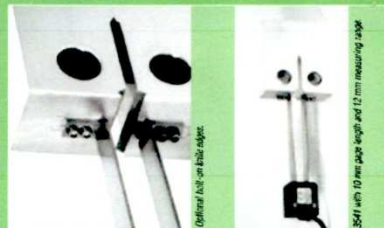
KrampeHarex® Fibrin Gesellschaft mbH & Co. KG · Lindengasse 20 · 4040 Linz · Austria
Phone +43 (0) 732 731 011 · Fax +43 (0) 732 · 731 011 73 · www.krampefibrin.com · info@krampefibrin.com

Displacement transducer

3541 Fracture Mechanics Clip-On Gages



3541 with 3 mm gage length and 4 mm measuring edge



3541 with 10 mm gage length and 12 mm measuring edge

For fracture mechanics studies, these gages are in compliance with standardized test methods, such as ASTM E1820 for determination of fracture toughness properties of metallic materials.

These gages conform to the requirements of ASTM E399 for fracture toughness and E1820 and E813 for J_{IC} and R-curve determination. In addition, the modified groove design complies with E1820 tests where greater stability and accuracy results from the sharper groove root. Clip-on gages are used for a variety of fracture mechanics tests, including compact tension, arc-shaped, disk-shaped, bend specimens or other specimen geometries in compliance with ASTM and other standards organization's test methods. Clip-on gages can be used directly on test specimens where the knife edges are integral with the test specimen or, alternately, with optional bolt-on knife edges mounted on the test specimen.

The Model 3541 extensometers are strain gaged devices, making them compatible with any electronics designed for strain gaged transducers. Most often they are connected to a test machine controller. The signal conditioning electronics for the extensometer is typically included with the test machine controller or may often be added. In this case the extensometer is shipped with the proper connector and wiring to plug directly into the electronics. For systems lacking the required electronics, Epsilon can provide a variety of solutions, allowing the extensometer output to be connected to data acquisition boards, chart recorders or other equipment. See the electronics section of this catalog for available signal conditioners and strain meters.

Contact Epsilon for your special testing requirements.

Features

- Full bridge, 350 ohm strain paper design for compatibility with nearly any test system.
- Fully enclosed gages to protect from accidental damage.
- All standard units meet existing ASTM requirements for accuracy.
- Sharp grooves per ASTM E1820, E813, and E399 for improved stability when mounted.
- Includes high quality foam lined case.
- All capable of high frequency operation (50 Hz or faster, depending on version).

SPECIFICATIONS

Excitation: 5 to 10 VDC recommended, 12 VDC or VAC max.
Output: 2 to 4 mV/V nominal, depending on model
Linearity: 0.15% for measuring ranges less than 0.25 inch (6 mm); 0.20% for greater measuring ranges
Temperature Range: Standard (-S1) is -40°C to +100°C (-40°F to 210°F)
Cable: Ultra-flexible cable, 8 ft. (2.5 m) standard
Operating force: Exerts 2 to 3 lbs (9 to 14 N), depending on model

OPTIONS

Connections to interface to nearly any brand test equipment
Shunt calibration module (see page 98)
Bolt-on knife edges
Available in special versions
Severe environment versions available

Special Model for Other Fracture Mechanics Testing

Special units are available for other fracture mechanics tests. This example shows a gage for ASTM E1304, Standard Test Method for Plane-Strain (Chevron-Notch) Fracture Toughness of Metallic Materials. This example was produced for a 1 inch diameter bar, with 0.4 inches of measuring range. Its performance, design and accuracy is an enhancement of the design recommended in E1304.



ORDERING INFORMATION

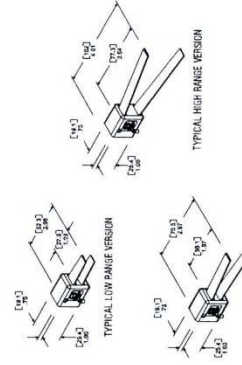
Model 3541 Available Versions: The following combinations of gage length and measuring range listed below are available as standard, except as noted. All are available in any temperature range listed.

Gage Length		Measuring Range	
U.S.A.	0.100"	DESIGNATION	
	0.200"	-100T	+0.1007/0.050"
	0.300"	-150T	+0.1507/0.050"
	0.400"	-200T	+0.2007/0.050"
	0.475"	-250T	+0.2507/0.050"
	0.500"	-500T	+0.5007/0.100"
METRIC	3.0 mm	METRIC	
	5.0 mm	-100M	+0.5 mm/1.0 mm
	8.0 mm	-150M	+0.75 mm/1.0 mm
	10.0 mm	-200M	+1.0 mm/1.0 mm
	12.0 mm	-250M	+1.25 mm/1.0 mm
	30.0 mm	-500M	+2.5 mm/2.0 mm

Model Number 3541-

Temperature Range	
-LT	-265°C to 100°C (-450°F to 210°F)
-ST	-40°C to 100°C (-40°F to 210°F)
-HT	-40°C to 150°C (-40°F to 300°F)
-HT2	-40°C to 200°C (-40°F to 400°F)
-LHT	-305°C to 210°C (-450°F to 400°F)

Example: 3541-0650-200T-1.0-50 clip gage length, +0.20 inch measuring range, low temperature option (-450°F to 210°F)



DIMENSIONS: mm/inches

Vedlegg Proporsjonering

Prosj./id.:	11-ref_2
-------------	----------

Blandevolum:	50 liter
Dato:	09.apr
Tidspunkt for vanntilsetning	08:00
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	365,0	18,248			18,248
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	189,8	9,489		-1,573	7,916
Absorbert vann	11,8	0,588			0,588
0-5 mm	811,9	40,597	2,8	1,137	41,734
5-8 mm	164,5	8,224	0,0	0,000	8,224
8-11 mm	58,3	2,913	2,0	0,059	2,972
11-16 mm	731,0	36,550	1,0	0,365	36,915
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,3	0,015	81,5	0,012	0,015
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000

8,504

0,010

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

Fersk betong	
Tid etter vanntilsetning	15min
Synkmål	160
Utbredelsesmål	
Luft	1%
Densitet	19235 kg

Prøvestykker (antall)	
Utstøpningstidspunkt	08:45
Terninger	4
150x300 sylindre	4
100x200 sylindre	
Bjelke 150*150*550	1

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 12-ref_2

Blandevolum:	50 liter
Dato:	09 10 . apr
Tidspunkt for vanntilsetning	10:00
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	376,4	18,820			18,820
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	188,2	9,410		-3,192	6,218
Absorbent vann	53,9	2,696			2,696
Leca 3-6	473,1	23,656	8,0	1,893	25,549
Leca 4-8	51,0	2,548	7,5	0,191	2,739
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand 0-5	780,8	39,039	2,8	1,093	40,132
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,4	0,019	81,5	0,015	0,019
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000

8,914

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong

Tid etter vanntilsetning	15min			
Synkmål	200			
Utbredelsesmål				
Luft	3%			
Densitet	16669 kg			

Prøvestykker (antall)

Utstøpningstidspunkt	10:45			
Terninger	4			
150x300 sylindre	4			
100x200 sylindre				
Bjelke 150*150*550	1			

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 13-ref_2

Blandevolum:	60 liter
Dato:	11.apr
Tidspunkt for vanntilsetning	10:00
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Anlegg sement	436,1	26,168			26,168	
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Fritt vann	196,3	11,776		-4,091	7,684	13,230
Absorbent vann	92,4	5,545			5,545	
Leca 3-6	215,4	12,926	8,0	1,034	13,961	
Leca 4-8	53,9	3,232	7,0	0,226	3,458	
Leca 1,5-2,5	107,7	6,463	8,5	0,549	7,013	
Leca 0,8-1,6	323,2	19,390	8,5	1,648	21,038	
Forsand 0-5mm	377,0	22,621	2,8	0,633	23,255	
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,0	0,000	81,5	0,000	0,000	0,010
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000	
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000	

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	160				
Utbredelsesmål					
Luft	3%				
Densitet	1426kg				

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	10:45				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	2				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 12_1

Blandevolum:	50 liter
Dato:	06.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	11.15
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	367,5	18,374			18,374
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	191,1	9,555		-3,048	6,507
Absorbent vann	53,5	2,676			2,676
Leca 3-6	469,5	23,475	8,7	2,042	25,517
Leca 4-8	50,6	2,528	8,5	0,215	2,743
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand 0-5	774,8	38,739	2,0	0,790	39,530
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,0	0,000	81,5	0,000	0,000
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
0	0,0	0,000	100	0,000	0,000
0	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	39,0	1,950			1,950
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000

9,183

9,05

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	165				
Utbredelsesmål					
Luft	2%				
Densitet	16197 kg				

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	12.00				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	1				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 12_2

Blandevolum:	50 liter
Dato:	07.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	14:30
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	367,4	18,372			18,372
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	191,1	9,554		-4,174	5,380
Absorbert vann	53,1	2,655			2,655
Leca 3-6	465,9	23,293	8,7	2,027	25,320
Leca 4-8	50,2	2,509	8,5	0,213	2,722
	0	0,0	0,0	0,000	0,000
	0	0,0	0,0	0,000	0,000
Forsand 0-5	768,8	38,440	5,0	1,922	40,362
	0	0,0	0,0	0,000	0,000
	0	0,0	0,0	0,000	0,000
	0	0,0	0,0	0,000	0,000
	0	0,0	0,0	0,000	0,000
	0	0,0	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,3	0,015	81,5	0,012	0,015
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	78,0	3,900			3,900
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000

8,035

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	196				
Utbredelsesmål					
Luft	21%				
Densitet	16855	= 2117 kg/m ³			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	15:00				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	1				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 12_43

Blandevolum:	50 liter
Dato:	20.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	12:00
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	367,4	18,372			18,372
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	191,1	9,554		-3,254	6,299
Absorbent vann	53,5	2,676			2,676
Leca 3-6	469,5	23,475	8,0	1,878	25,353
Leca 4-8	50,6	2,528	8,0	0,202	2,731
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand 0-5	774,8	38,739	3,0	1,162	39,902
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,3	0,015	81,5	0,012	0,015
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
0	0,0	0,000	100	0,000	0,000
0	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	9,5	0,475			0,475

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	180				
Utbredelsesmål					
Luft	3%				
Densitet	16027 kg				

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	12:45				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	1				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 12_43

Blandevolum:	50 liter
Dato:	20.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	12:00
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	367,4	18,372			18,372
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	191,1	9,554		-3,254	6,299
Absorbent vann	53,5	2,676			2,676
Leca 3-6	469,5	23,475	8,0	1,878	25,353
Leca 4-8	50,6	2,528	8,0	0,202	2,731
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand 0-5	774,8	38,739	3,0	1,162	39,902
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,3	0,015	81,5	0,012	0,015
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
0,0	0,000	100	0,000	0,000	
0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	9,5	0,475			0,475

8,975

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	180				
Utbredelsesmål					
Luft	3%				
Densitet	16027 kg				

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	12:45				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	1				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 12_4

Blandevolum:	50 liter
Dato:	21.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	1300
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	367,4	18,372			18,372
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	191,1	9,554		-3,100	6,453
Absorbent vann	53,1	2,655			2,655
Leca 3-6	465,9	23,293	7,5	1,747	25,040
Leca 4-8	50,2	2,509	7,5	0,188	2,697
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand 0-5	768,8	38,440	3,0	1,153	39,593
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,3	0,015	81,5	0,012	0,015
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	19,0	0,950			0,950

9,108

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	170				
Utbredelsesmål					
Luft	25%				
Densitet	16230	=2040 kg/m ³			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	13:45				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	1				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 12_5

Blandevolum:	50 liter
Dato:	22.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	13:00
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	367,3	18,366			18,366
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	191,0	9,550		-3,250	6,301
Absorbert vann	53,1	2,655			2,655
Leca 3-6	465,9	23,293	8,0	1,863	25,157
Leca 4-8	50,2	2,509	7,5	0,188	2,697
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand 0-5	768,8	38,440	3,0	1,153	39,593
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	1,1	0,055	81,5	0,045	0,055
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	39,0	1,950			1,950
Basaltfiber	9,5	0,475			0,475

8,955

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	20				
Utbredelsesmål					
Luft	2,5%				
Densitet	16571 kg				

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	1345				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	1				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 13_1

Blandevolum:	60 liter
Dato:	08.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	10.15
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt** %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	436,1	26,164			26,164
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	196,2	11,774		-4,278	7,497
Absorbert vann	91,7	5,501			5,501
Leca 3-6	213,7	12,823	8,7	1,116	13,939
Leca 4-8	53,4	3,206	8,5	0,272	3,478
Leca 1,5-2,5	106,9	6,412	7,2	0,462	6,873
Leca 0,8-1,6	320,6	19,235	6,7	1,289	20,523
Forsand 0-5mm	374,0	22,440	5,0	1,122	23,562
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,3	0,021	81,5	0,017	0,021
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	39,0	2,340			2,340
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000

12,998

20+15+45+25
E125 kg

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	196				
Utbredelsesmål					
Luft	=	Fumerte ikke			
Densitet	14625	-1857 kg/m ³			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	11.00				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	2				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 13_2

Blandevolum:	60 liter
Dato:	12.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	10.15
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt** %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	436,2	26,173			26,173
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	196,3	11,778		-3,623	8,154
Absorbert vann	90,9	5,456			5,456
Leca 3-6	212,0	12,717	8,7	1,106	13,823
Leca 4-8	53,0	3,179	8,5	0,270	3,450
Leca 1,5-2,5	106,0	6,359	6,0	0,382	6,740
Leca 0,8-1,6	317,9	19,076	5,0	0,954	20,029
Forsand 0-5mm	370,9	22,255	4,0	0,890	23,145
Forsand pukk 8-16mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 8-16	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 5-8	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 0-5	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 11-16	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,4	0,026	81,5	0,021	0,026
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	78,0	4,680			4,680
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000

13,610

+35 = 906kg

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	120				
Utbredelsesmål					
Luft	7%				
Densitet	14828 kg				

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	11.05				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelker 150*150*550	2				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 13_3

Blandevolum:	60 liter
Dato:	23.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	15:30
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	436,1	26,164			26,164
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	196,2	11,774		-3,367	8,407
Absorbert vann	36,1	2,167			2,167
Leca 3-6	213,7	12,823	7,5	0,962	13,785
Leca 4-8	53,4	3,206	7,5	0,240	3,446
Leca 1,5-2,5	106,9	6,412	5,0	0,321	6,732
Leca 0,8-1,6	320,6	19,235	6,0	1,154	20,389
Forsand 0-5mm	374,0	22,440	3,0	0,673	23,114
Forsand pukk 8-16mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 8-16	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 5-8	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 0-5	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 11-16	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,3	0,021	81,5	0,017	0,021
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	9,5	0,570			0,570

10,574
13,912

+0,000

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	150				
Utbredelsesmål					
Luft	2,5				
Densitet	14458 kg				

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	14:15				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	2				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 13_4

Blandevolum:	60 liter
Dato:	26.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	13:30
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	436,2	26,170			26,170
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	196,3	11,777		-3,356	8,420
Absorbert vann	90,9	5,456			5,456
Leca 3-6	212,0	12,717	7,5	0,954	13,671
Leca 4-8	53,0	3,179	7,5	0,238	3,418
Leca 1,5-2,5	106,0	6,359	5,0	0,318	6,676
Leca 0,8-1,6	317,9	19,076	6,0	1,145	20,220
Forsand 0-5mm	370,9	22,255	3,0	0,668	22,923
Forsand pukkk 8-16mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 8-16	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 5-8	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 0-5	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 11-16	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,7	0,042	81,5	0,034	0,042
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	19,0	1,140			1,140

13,876

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	180				
Utbredelsesmål					
Luft	-				
Densitet	14,254 kg				

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	14:45				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelker 150*150*550	2				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 13_5

Blandevolum:	60 liter
Dato:	27.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	1400
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	436,2	26,170			26,170
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	196,3	11,777		-3,356	8,420
Absorbert vann	90,9	5,456			5,456
Leca 3-6	212,0	12,717	7,5	0,954	13,671
Leca 4-8	53,0	3,179	7,5	0,238	3,418
Leca 1,5-2,5	106,0	6,359	5,0	0,318	6,676
Leca 0,8-1,6	317,9	19,076	6,0	1,145	20,220
Forsand 0-5mm	370,9	22,255	3,0	0,668	22,923
Forsand pukk 8-16mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 8-16	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 5-8	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 0-5	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Forsand Forsøk 11-16	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,7	0,042	81,5	0,034	0,042
Luft - SikaAer	0,0	0,000	91	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	39,0	2,340			2,340
Basaltfiber	9,5	0,570			0,570

13,876

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	170				
Utbredelsesmål					
Luft	-				
Densitet	14457 kg				

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	14:45				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelker 150*150*550	2				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 11-ref

Blandevolum:	50 liter
Dato:	01.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	12.00
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	352,4	17,619			17,619
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	193,8	9,691		-1,187	8,503
Absorbent vann	11,8	0,588			0,588
0-5 mm	811,9	40,597	2,0	0,828	41,425
5-8 mm	164,5	8,224	0,0	0,000	8,224
8-11 mm	58,3	2,913	2,0	0,059	2,972
11-16 mm	731,0	36,550	0,8	0,292	36,842
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,0	0,000	81,5	0,000	0,000
Luft - SikaAer	0,2	0,009	91	0,008	0,009
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000

9,091

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong

Tid etter vanntilsetning	15 min			
Synkmål	180			
Utbredelsesmål				
Luft	8%			
Densitet	2246 kg/m ³			

Prøvestykker (antall)

Utstøpningstidspunkt	12.40			
Terninger	4			
150x300 sylindre	4			
100x200 sylindre				
Bjelke 150*150*550	1			

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 12-ret **Grunnkurs i betongteknologi**
B50 SKB Proporsjoneringseksempel

Blandevolum:	50 liter
Dato:	02.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	12.30
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	367,5	18,374			18,374
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	191,1	9,554		-5,071	4,483
Absorbent vann	53,9	2,696			2,696
Leca 3-6	473,1	23,656	16,1	3,797	27,453
Leca 4-8	51,0	2,548	18,4	0,470	3,018
Forsand 8-11	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Forsand 11-16	0,0	0,000	0,8	0,000	0,000
Forsand 0-5	780,8	39,039	2,0	0,796	39,835
Leca 1,5-2,5	0,0	0,000	1,8	0,000	0,000
Leca 0,8-1,6	0,0	0,000	1,8	0,000	0,000
Forsand 5-8	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,0	0,000	81,5	0,000	0,000
Luft - SikaAer	0,2	0,009	91	0,008	0,009
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15 min				
Synkmål	10				
Utbredelsesmål					
Luft	12%				
Densitet	1869	= 1869 kg/m ³			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	13.20				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	1				

Delark "Blandeskjema"

Prosj./id.: 13-ref

Blandevolum:	60 liter
Dato:	05.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	12.00
Ansvarlig:	Kjell Tore Fosså
Utført av:	Anders Heramb Johansen

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Anlegg sement	436,1	26,167			26,167
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Flyveaske	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	196,3	11,775		-4,150	7,625
Absorbert vann	92,4	5,545			5,545
Leca 3-6	215,4	12,926	8,7	1,125	14,051
Leca 4-8	53,9	3,232	8,5	0,275	3,506
Leca 1,5-2,5	107,7	6,463	9,2	0,595	7,058
Leca 0,8-1,6	323,2	19,390	8,7	1,687	21,077
Forsand 0-5mm	377,0	22,621	2,0	0,457	23,078
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
0	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-stoff - Dynamon SX-N	0,0	0,000	81,5	0,000	0,000
Luft - SikaAer	0,2	0,013	91	0,012	0,013
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber DE/50	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	0,0	0,000			0,000

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15min				
Synkmål	2,5				
Utbredelsesmål					
Luft	17%				
Densitet	2405	=1520kg/m ³			

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt	12.45				
Terninger	4				
150x300 sylindre	4				
100x200 sylindre					
Bjelke 150*150*550	2				

Delark "Blandeskjema"

Vedlegg Sylindrer trykkfasthet





Vedlegg Sylindrer Spaltestrekkfasthet

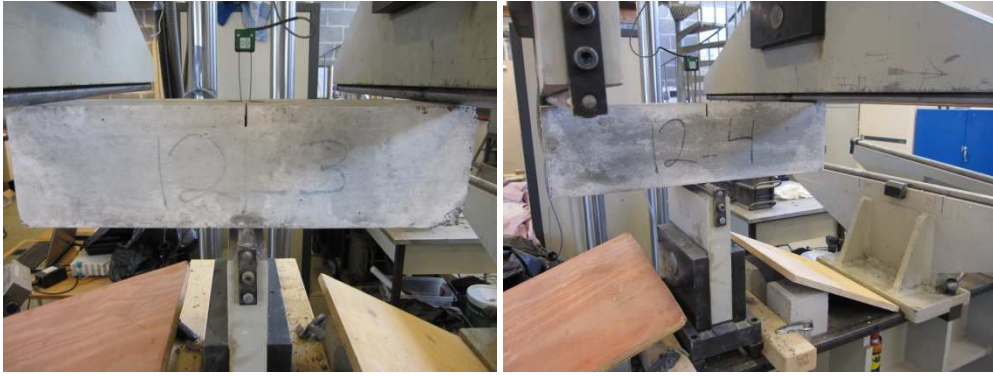


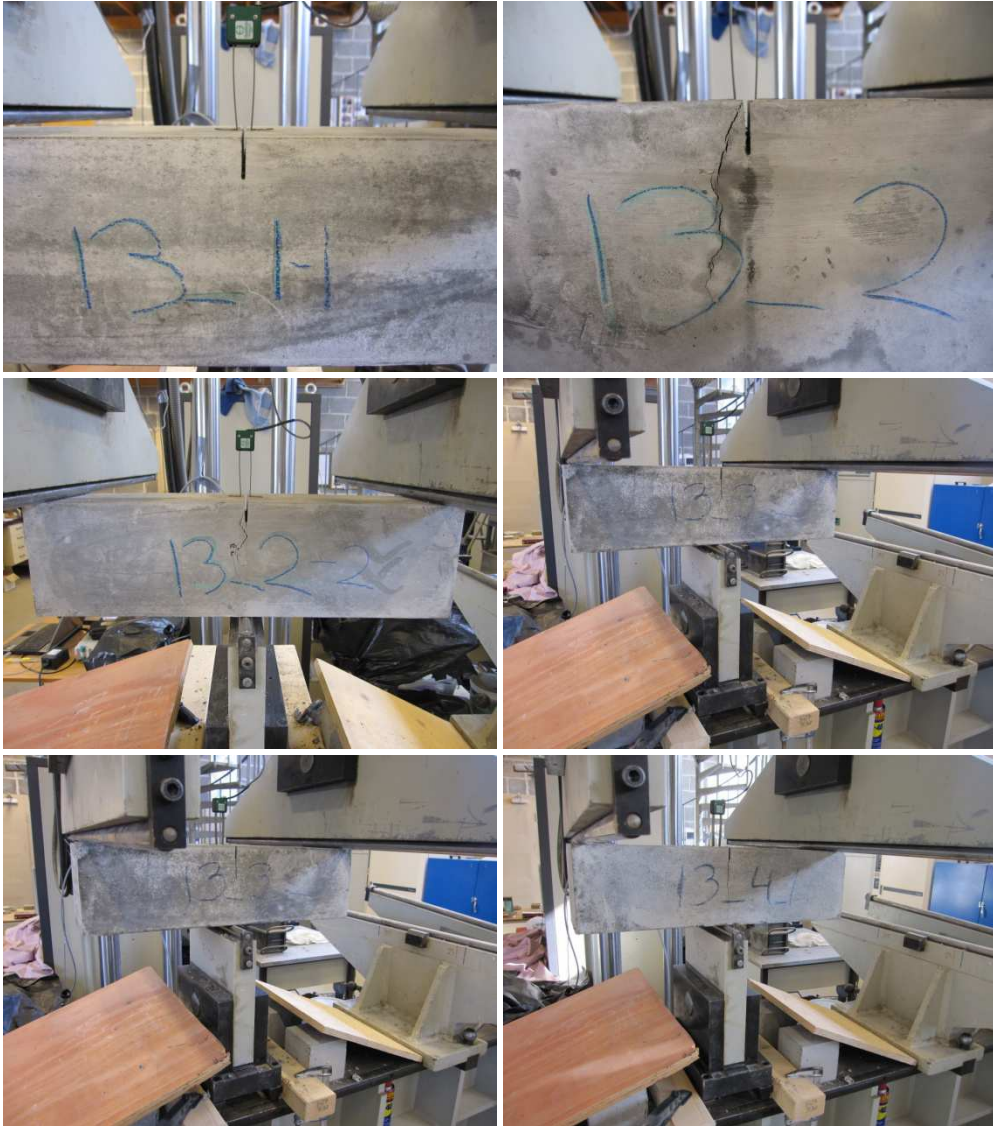




Vedlegg Bøystrekkfasthet









Vedlegg antall fiber over risset



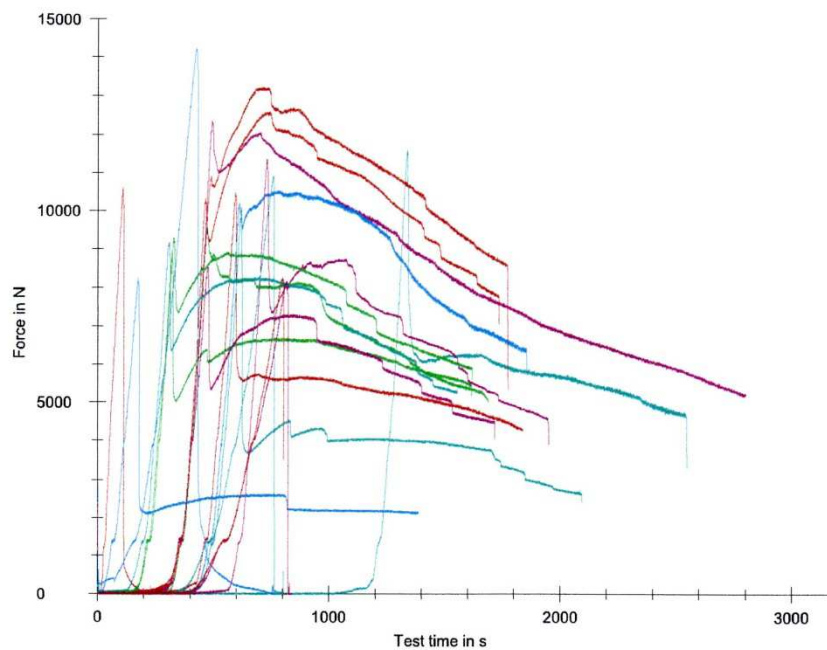




Vedlegg Testverdier

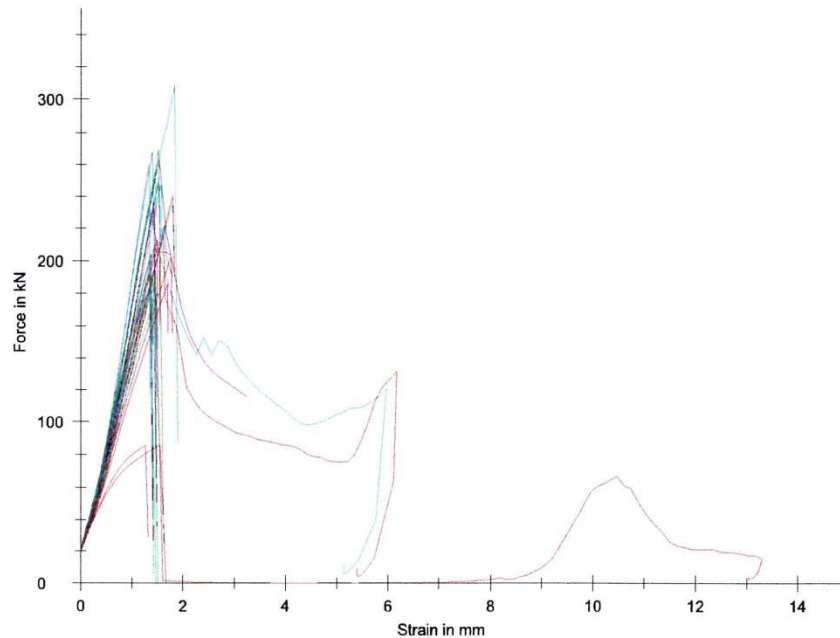
Bøyestrekfasthet

Nr	a mm	b mm	F _m kN	ID
1	150,0	550,0	10,61	11-ref 30.03.2012 11:15
2	150,0	550,0	6,36	13-ref 02.04.2012 14:20
3	150,0	550,0	6,32	13-ref 02.04.2012 14:40
4	150,0	550,0	11,61	12_1 03.04.2012 16:00
5	150,0	550,0	12,35	12_2 04.04.2012 10:30
6	150,0	550,0	10,46	13_1-1 05.04.2012 10:40
7	150,0	550,0	9,56	13_2-1 09.04.2012 13:45
8	150,0	550,0	10,53	13_2-2 09.04.2012 14:35
9	150,0	550,0	10,07	12_3 17.04.2012 13:30
10	150,0	550,0	11,37	12_4 18.04.2012 09:40
11	150,0	550,0	12,61	12_5 19.04.2012 09:55
12	150,0	550,0	8,94	13_3-1 20.04.2012 09:39
13	150,0	550,0	8,26	13_3-2 20.04.2012 10:19
14	150,0	550,0	9,16	13_4-1 23.04.2012 09:47
15	150,0	550,0	8,58	13_4-2 23.04.2012 10:23
16	150,0	550,0	13,23	13_5-1 24.04.2012 09:51
17	150,0	550,0	9,28	13_5-2 24.04.2012 10:38
18	150,0	550,0	14,23	11-ref-2 07.05.2012 11:15
19	150,0	550,0	10,91	12-ref-2 07.05.2012 11:43
20	150,0	550,0	8,17	13-ref-2-1 0.05.2012 10:50
21	150,0	550,0	8,27	13-ref-2-2 08.05.2012 11:25



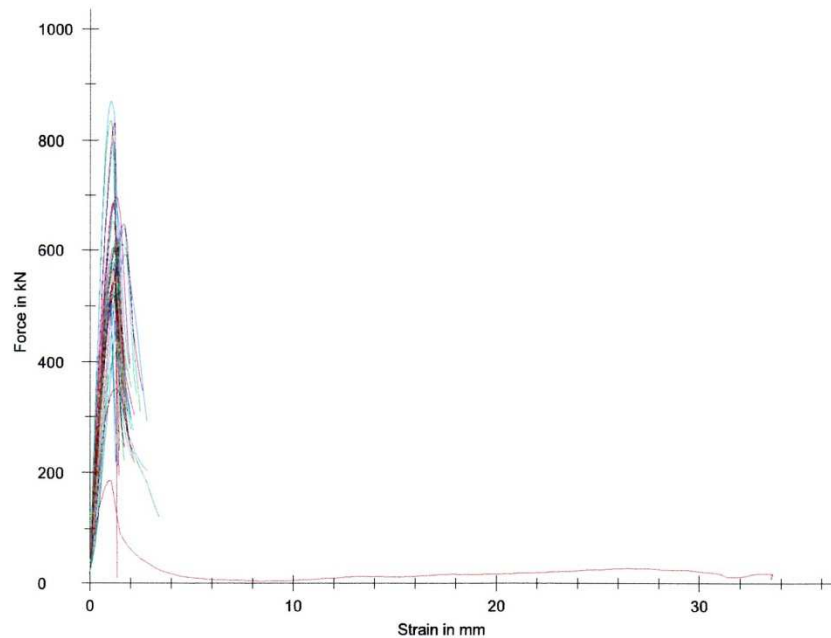
Spaltestrekfasthet

Nr	ID	F _m kN	m N/mm ²	d mm	h mm
1	11-ref 29.03.2012 14:45	192,90	10,92	150,0	300,0
2	11-ref 29.03.2012 14:45	203,84	11,54	150,0	300,0
3	12-ref 30.03.2012 09:30	202,51	11,46	150,0	300,0
4	12-ref 30.03.2012 09:30	200,10	11,32	150,0	300,0
5	13-ref 02.04.2012 09:00	85,62	4,85	150,0	300,0
6	13-ref 02.04.2012 09:00	85,41	4,83	150,0	300,0
7	12_1 03.04.2012 09:30	255,91	14,48	150,0	300,0
8	12_1 03.04.2012 09:30	268,00	15,17	150,0	300,0
9	12_2 04.04.2012 09:05	233,87	13,23	150,0	300,0
10	12_2 04.04.2012 09:10	264,74	14,98	150,0	300,0
11	13_1 05.04.2012 10:00	215,42	12,19	150,0	300,0
12	13_1 05.04.2012 10:00	190,85	10,80	150,0	300,0
13	13_2 09.04.2012 13:25	221,48	12,53	150,0	300,0
14	13_2 09.04.2012 13:30	235,72	13,34	150,0	300,0
15	12_3 17.04.2012 10:30	212,78	12,04	150,0	300,0
16	12_3 17.04.2012 10:35	240,64	13,62	150,0	300,0
17	12_4 18.04.2012 09:00	248,12	14,04	150,0	300,0
18	12_4 18.04.2012 09:02	253,12	14,32	150,0	300,0
19	12_5 19.04.2012 09:17	248,45	14,06	150,0	300,0
20	12_5 19.04.2012 09:22	232,95	13,18	150,0	300,0
21	13_3 20.04.2012 09:03	206,10	11,66	150,0	300,0
22	13_3 20.04.2012 09:06	183,30	10,37	150,0	300,0
23	13_4 23.04.2012 09:22	184,81	10,46	150,0	300,0
24	13_4 23.04.2012 09:24	180,09	10,19	150,0	300,0
25	13_5 24.04.2012 09:24	185,88	10,52	150,0	300,0
26	13_5 24.04.2012 09:27	201,92	11,43	150,0	300,0
27	11-ref-2 07.05.2012 10:36	269,09	15,23	150,0	300,0
28	11-ref-2 07.05.2012 10:50	260,16	14,72	150,0	300,0
29	12-ref-2 07.05.2012 10:55	308,75	17,47	150,0	300,0
30	12-ref-2 07.05.2012 10:59	236,70	13,39	150,0	300,0
31	13-ref-2 08.05.2012 10:21	208,88	11,82	150,0	300,0
32	13-ref-2 08.05.2012 10:26	192,24	10,88	150,0	300,0



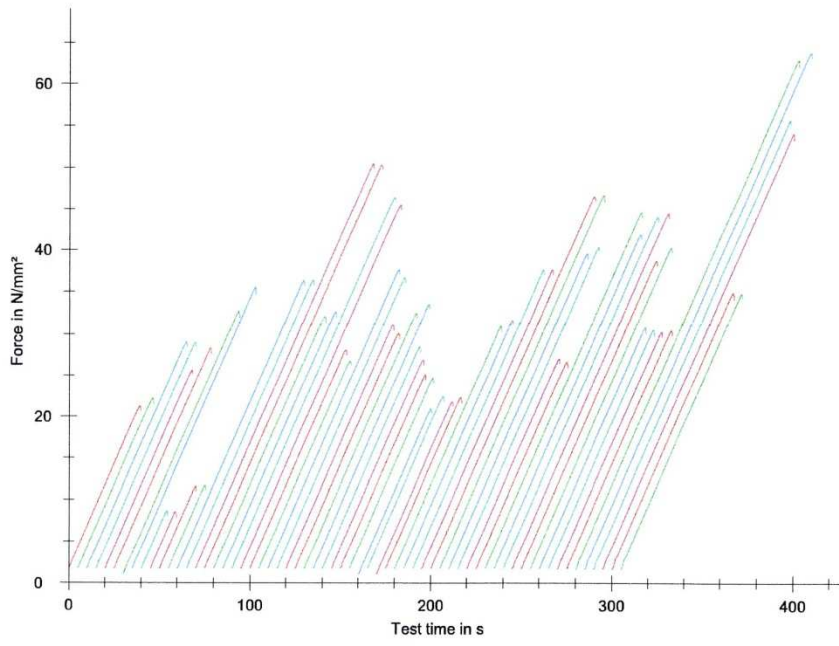
Sylindertrykkfasthet

Nr	ID	F _m kN	m N/mm ²	d mm	h mm
1	11-ref 29.03.2012 15:15	349,59	19,78	150,0	300,0
2	11-ref 29.03.2012 15:15	418,75	23,70	150,0	300,0
3	12-ref 30.03.2012 09:00	510,24	28,87	150,0	300,0
4	12-ref 30.03.2012 09:00	525,94	29,76	150,0	300,0
5	13-ref 02.04.2012 09:00	-	-	150,0	300,0
6	13-ref 02.04.2012 09:00	185,11	10,48	150,0	300,0
7	12_1 03.04.2012 09:15	609,98	34,52	150,0	300,0
8	12_1 03.04.2012 09:15	593,08	33,56	150,0	300,0
9	12_2 04.04.2012 09:00	639,71	36,20	150,0	300,0
10	12_2 04.04.2012 09:00	646,56	36,59	150,0	300,0
11	13_1 05.04.2012 10:00	611,58	34,61	150,0	300,0
12	13_1 05.04.2012 10:00	622,13	35,21	150,0	300,0
13	13_2 09.04.2012 10:20	596,32	33,74	150,0	300,0
14	13_2 09.04.2012 10:20	575,05	32,54	150,0	300,0
15	12_3 17.04.2012 10:20	697,37	39,46	150,0	300,0
16	12_3 17.04.2012 10:20	686,26	38,83	150,0	300,0
17	12_4 18.04.2012 08:52	652,29	36,91	150,0	300,0
18	12_4 18.04.2012 08:55	688,02	38,93	150,0	300,0
19	12_5 19.04.2012 09:10	577,72	32,69	150,0	300,0
20	12_5 19.04.2012 09:12	603,99	34,18	150,0	300,0
21	13_3 20.04.2012 08:55	517,74	29,30	150,0	300,0
22	13_3 20.04.2012 08:57	519,74	29,41	150,0	300,0
23	13_4 23.04.2012 09:15	502,52	28,44	150,0	300,0
24	13_4 23.04.2012 09:17	523,77	29,64	150,0	300,0
25	13_5 24.04.2012 09:18	545,59	30,87	150,0	300,0
26	13_5 24.04.2012 09:20	541,04	30,62	150,0	300,0
27	11-ref-2 07.05.2012 10:22	833,88	47,19	150,0	300,0
28	11-ref-2 07.05.2012 10:24	868,11	49,12	150,0	300,0
29	12-ref-2 07.05.2012 10:27	800,02	45,27	150,0	300,0
30	12-ref-2 07.05.2012 10:30	830,55	47,00	150,0	300,0
31	13-ref-2 08.05.2012 10:11	566,64	32,07	150,0	300,0
32	13-ref-2 08.05.2012 10:14	606,14	34,30	150,0	300,0



Terning trykkfasthet

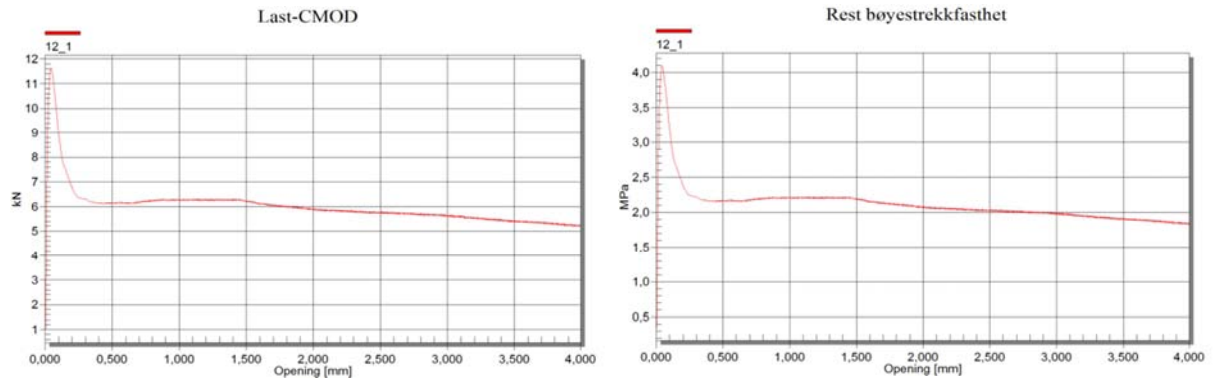
Nr	a mm	b mm	F _m kN	h mm	ID
1	100,0	100,0	212,73	100,0	11-ref 08.03.2012 12:00
2	100,0	100,0	222,23	100,0	11-ref 08.03.2012 12:00
3	100,0	100,0	290,65	100,0	11-ref 28D 29.03.2012 12:00
4	100,0	100,0	289,91	100,0	11-ref 28D 29.03.2012 12:00
5	100,0	100,0	256,31	100,0	12-ref 09.03.2012 11:00
6	100,0	100,0	282,93	100,0	12-ref 09.03.2012 11:00
7	100,0	100,0	326,88	100,0	12-ref 28D 30.03.2012 09:00
8	100,0	100,0	355,27	100,0	12-ref 28D 30.03.2012 09:00
9	100,0	100,0	87,13	100,0	13-ref 12.03.2012 11:30
10	100,0	100,0	86,08	100,0	13-ref 12.03.2012 11:30
11	100,0	100,0	116,38	100,0	13-ref 28D 02.04.2012 08:30
12	100,0	100,0	117,49	100,0	13-ref 28D 02.04.2012 08:30
13	100,0	100,0	363,03	100,0	12_1 13.03.2012 14:30
14	100,0	100,0	363,45	100,0	12_1 13.03.2012 14:30
15	100,0	100,0	504,93	100,0	12_1 28D 03.04.2012 09:00
16	100,0	100,0	503,51	100,0	12_1 28D 03.04.2012 09:00
17	100,0	100,0	320,30	100,0	12_2 14.03.2012 10:30
18	100,0	100,0	325,33	100,0	12_2 14.03.2012 10:30
34	100,0	100,0	464,33	100,0	12_2 28D 04.04.2012 09:00
35	100,0	100,0	454,90	100,0	12_2 28D 04.04.2012 09:00
19	100,0	100,0	280,89	100,0	13_1 15.03.2012 12:00
20	100,0	100,0	268,07	100,0	13_1 15.03.2012 12:00
36	100,0	100,0	375,89	100,0	13_1 28D 05.04.2012 09:45
37	100,0	100,0	366,83	100,0	13_1 28D 05.04.2012 09:45
21	100,0	100,0	311,02	100,0	12_3 27.03.2012 11:45
22	100,0	100,0	301,01	100,0	12_3 27.03.2012 11:45
23	100,0	100,0	324,29	100,0	12_4 28.03.2012 14:15
24	100,0	100,0	334,16	100,0	12_4 28.03.2012 14:15
25	100,0	100,0	284,73	100,0	12_5 29.03.2012 12:00
26	100,0	100,0	268,91	100,0	12_5 29.03.2012 12:00
27	100,0	100,0	251,03	100,0	13_3 03.04.2012 09:00
28	100,0	100,0	247,10	100,0	13_3 03.04.2012 09:00
29	100,0	100,0	209,62	100,0	13_4 02.04.2012 08:30
30	100,0	100,0	224,40	100,0	13_4 02.04.2012 08:30
31	100,0	100,0	217,98	100,0	13_5 03.04.2012 09:00
32	100,0	100,0	223,43	100,0	13_5 03.04.2012 09:00
57	100,0	100,0	309,68	100,0	13_5 28D 24.04.2012 09:10
58	100,0	100,0	315,99	100,0	13_5 28D 24.04.2012 09:11
38	100,0	100,0	375,66	100,0	13_2 28D 09.04.2012 13:10
39	100,0	100,0	375,94	100,0	13_2 28D 09.04.2012 13:10
41	100,0	100,0	465,77	100,0	11-ref-2 16.04.2012 09:40
42	100,0	100,0	466,52	100,0	11-ref-2 16.04.2012 09:41
43	100,0	100,0	395,46	100,0	12-ref-2 16.04.2012 09:45
44	100,0	100,0	403,58	100,0	12-ref-2 16.04.2012 09:48
45	100,0	100,0	270,20	100,0	13-ref-2 17.04.2012 10:05
46	100,0	100,0	266,87	100,0	13-ref-2 17.04.2012 10:05
47	100,0	100,0	446,08	100,0	12_3 28D 17.04.2012 10:10
48	100,0	100,0	419,39	100,0	12_3 28D 17.04.2012 10:10
49	100,0	100,0	440,53	100,0	12_4 28D 18.04.2012 08:45
50	100,0	100,0	444,65	100,0	12_4 28D 18.04.2012 08:48
51	100,0	100,0	386,89	100,0	12_5 28D 19.04.2012 09:00
52	100,0	100,0	402,70	100,0	12_5 28D 19.04.2012 09:05
53	100,0	100,0	308,73	100,0	13_3 28D 20.04.2012 08:47
54	100,0	100,0	305,93	100,0	13_3 28D 20.04.2012 08:47
55	100,0	100,0	303,08	100,0	13_4 28D 23.04.2012 08:56
56	100,0	100,0	305,20	100,0	13_4 28D 23.04.2012 08:58
59	100,0	100,0	628,37	100,0	11-ref-2 28D 07.05.2012 10:07
60	100,0	100,0	637,58	100,0	11-ref-2 28D 07.05.2012 10:10
61	100,0	100,0	556,48	100,0	12-ref-2 28D 07.05.2012 10:13
62	100,0	100,0	540,72	100,0	12-ref-2 28D 07.05.2012 10:16
63	100,0	100,0	348,91	100,0	13-ref-2 28D 08.05.2012 09:57
64	100,0	100,0	347,86	100,0	13-ref-2 28D 08.05.2012 09:59



Bøyestrekfasthet kurver

Referanser

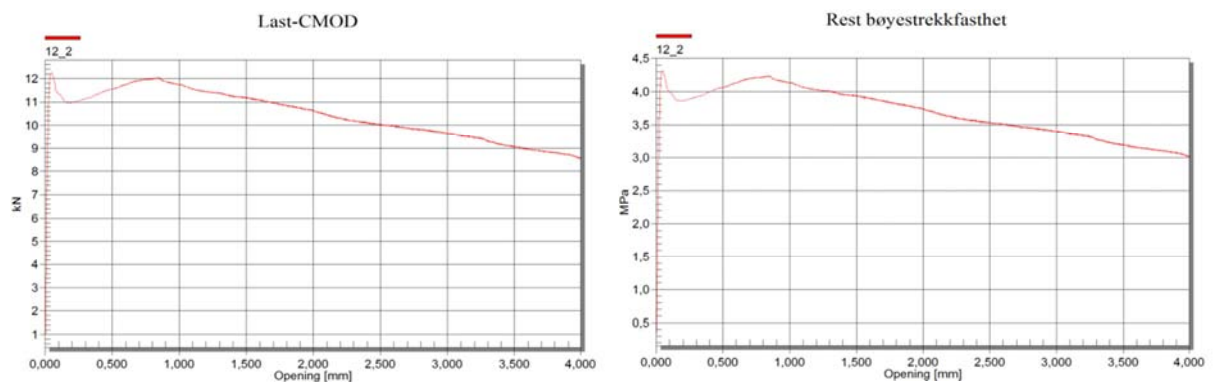
Serie 12



Blanding 12_1

Resultat, blanding 12_1

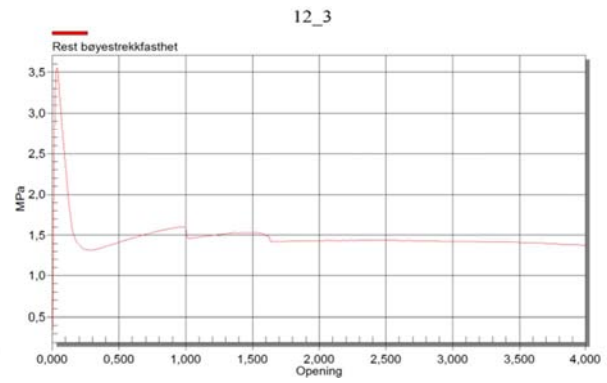
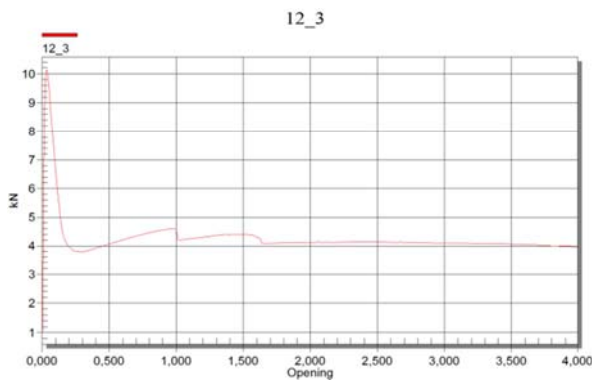
12_1		
	1	Last v/gitt bøyestrekfasthet [kN]
b [mm]	150	
h_{sp} [mm]	125	
l [mm]	500	
$f_{ct,L}^t$ [MPa]	4,10	11,64
$f_{R,1}$ [MPa]	2,16	6,15
$f_{R,2}$ [MPa]	2,20	6,24
$f_{R,3}$ [MPa]	2,02	5,75
$f_{R,4}$ [MPa]	1,90	5,40



Serie 12_2

Resultat, serie 12_2

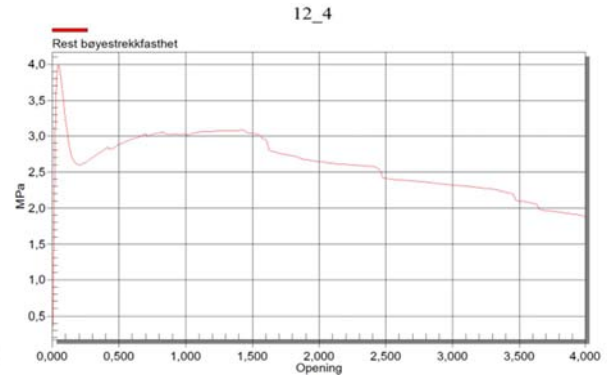
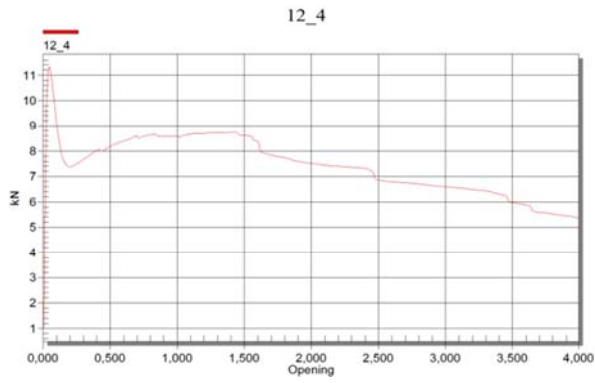
12_2		
	1	Last v/gitt bøyestrekfasthet [kN]
b [mm]	150	
h_{sp} [mm]	125	
l [mm]	500	
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	4,31	12,26
$f_{R,1}$ [MPa]	4,06	11,54
$f_{R,2}$ [MPa]	3,94	11,20
$f_{R,3}$ [MPa]	3,53	10,04
$f_{R,4}$ [MPa]	3,19	9,06



Serie 12_3

Resultat, serie 12_3

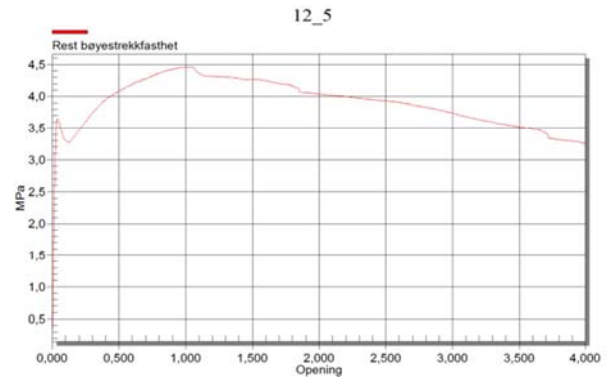
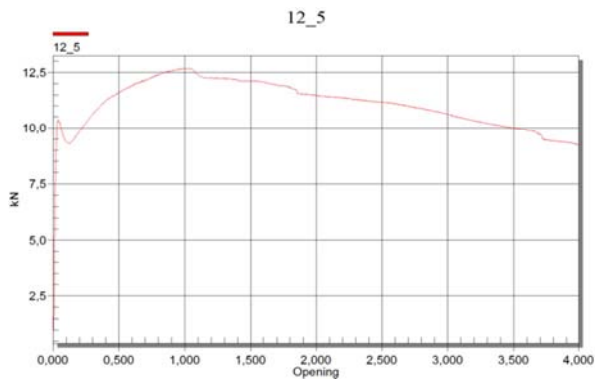
12_3		
	1	Last v/gitt bøyestrekfasthet [kN]
b [mm]	150	
h_{sp} [mm]	125	
l [mm]	500	
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,55	10,10
$f_{R,1}$ [MPa]	1,42	4,02
$f_{R,2}$ [MPa]	1,54	4,36
$f_{R,3}$ [MPa]	1,44	4,09
$f_{R,4}$ [MPa]	1,41	4,02



Serie 12_4

Resultat, serie 12_4

12_4		
	1	Last v/gitt bøyestrekkefasthet [kN]
b [mm]	150	
h_{sp} [mm]	125	
l [mm]	500	
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,99	11,34
$f_{R,1}$ [MPa]	2,88	8,19
$f_{R,2}$ [MPa]	3,03	8,62
$f_{R,3}$ [MPa]	2,41	6,85
$f_{R,4}$ [MPa]	2,10	5,96

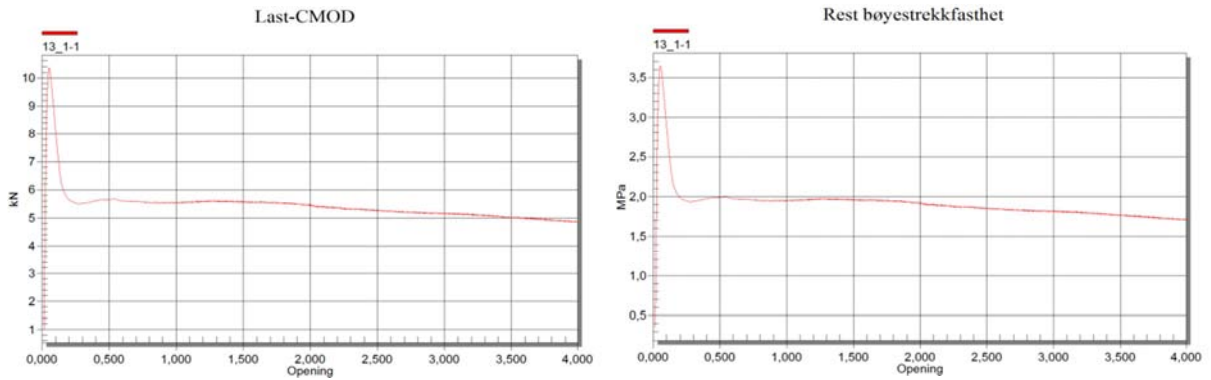


Serie 12_5

Resultat, serie 12_5

12_5		
	1	Last v/gitt bøyestrekkefasthet [kN]
b [mm]	150	
h_{sp} [mm]	125	
l [mm]	500	
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,62	10,29
$f_{R,1}$ [MPa]	4,08	11,60
$f_{R,2}$ [MPa]	4,27	12,12
$f_{R,3}$ [MPa]	3,93	11,18
$f_{R,4}$ [MPa]	3,52	10,00

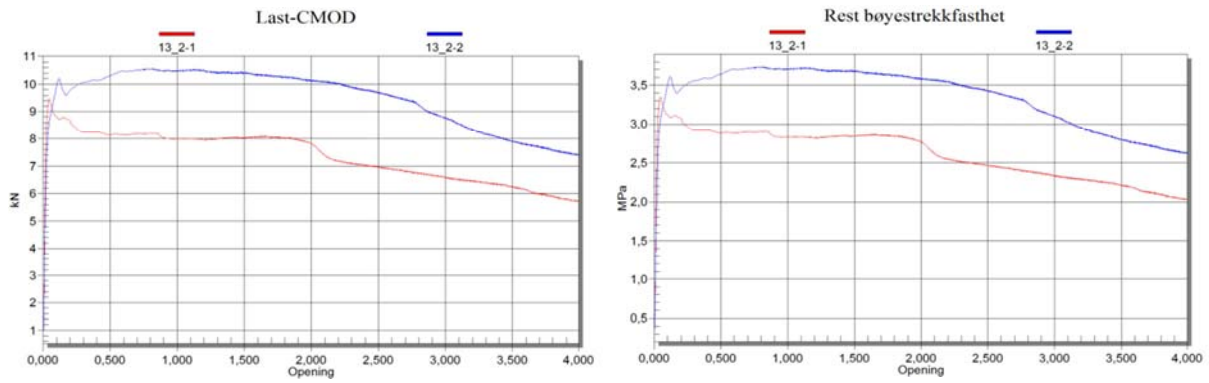
Serie 13



Serie 13_1

Resultat, serie 13_1

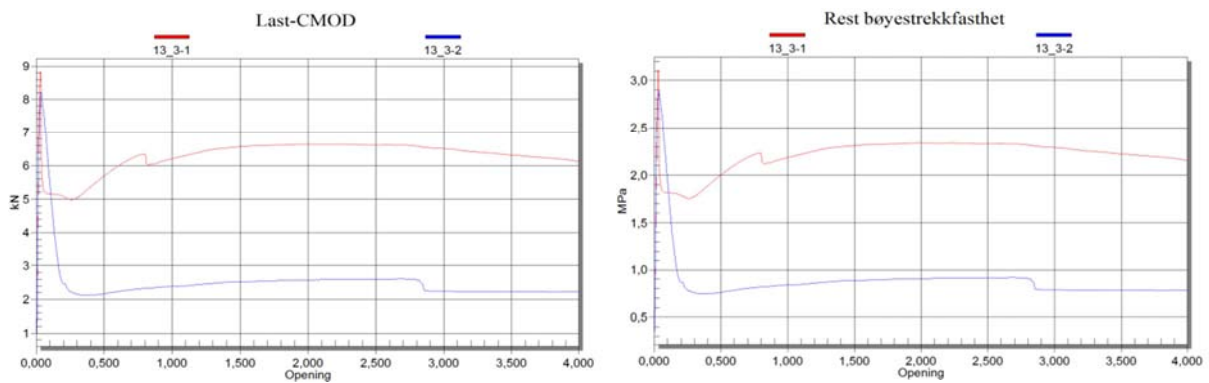
13_1						
	1	Last v/gitt bøyestrekkefasthet [kN]	2	Last v/gitt bøyestrekkefasthet[kN]	Gj.snitt	Variasjonskoeffisient [%]
b [mm]	150		150		150	0,00
h_{sp} [mm]	125		125		125	0,00
l [mm]	500		500		500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,64	10,34	-	-	-	-
$f_{R,1}$ [MPa]	1,99	5,66	-	-	-	-
$f_{R,2}$ [MPa]	1,96	5,56	-	-	-	-
$f_{R,3}$ [MPa]	1,85	5,25	-	-	-	-
$f_{R,4}$ [MPa]	1,76	5,00	-	-	-	-



Serie 13_2

Resultat, serie 13_2

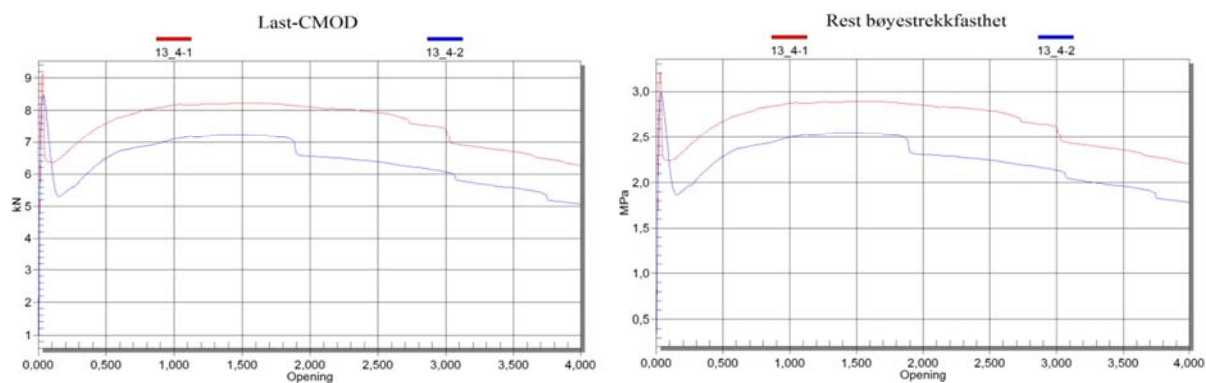
13_2						
	1	Last v/gitt bøyestrekkefasthet [kN]	2	Last v/gitt bøyestrekkefasthet [kN]	Gj.snitt	Variasjonskoeffisient [%]
b [mm]	150		150		150	0,00
h_{sp} [mm]	125		125		125	0,00
l [mm]	500		500		500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,33	9,46	3,59	10,20	3,46	3,77
$f_{R,1}$ [MPa]	2,87	8,15	3,69	10,47	3,28	12,45
$f_{R,2}$ [MPa]	2,83	8,03	3,64	10,34	3,23	12,56
$f_{R,3}$ [MPa]	2,45	6,96	3,35	9,52	2,90	15,50
$f_{R,4}$ [MPa]	2,20	6,25	2,73	7,76	2,47	10,77



Serie 13_3

Resultat, serie 13_3

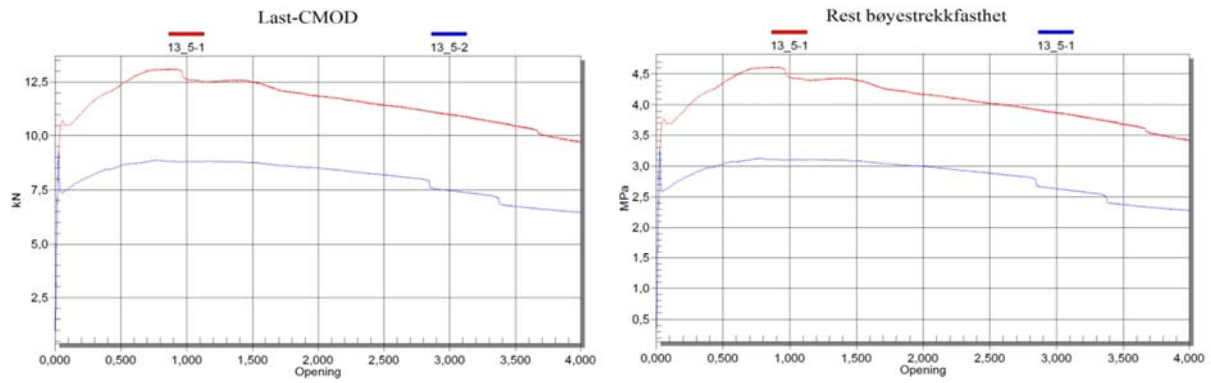
13_3						
	1	Last v/gitt bøyestrek- fasthet [kN]	2	Last v/gitt bøyestrek- fasthet[kN]	Gj.snitt	Variasjons- koeffisient [%]
b [mm]	150		150		150	0,00
h_{sp} [mm]	125		125		125	0,00
l [mm]	500		500		500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,11	8,85	2,89	8,21	3,00	3,73
$f_{R,1}$ [MPa]	2,12	6,02	0,76	2,16	1,44	47,08
$f_{R,2}$ [MPa]	2,32	6,61	0,88	2,51	1,60	44,87
$f_{R,3}$ [MPa]	2,33	6,62	0,92	2,60	1,62	43,58
$f_{R,4}$ [MPa]	2,20	6,24	0,78	2,22	1,49	47,46



Serie 13_4

Resultat, serie 13_4

13_4						
	1	Last v/gitt bøyestrek- fasthet [kN]	2	Last v/gitt bøyestrek- fasthet[kN]	Gj.snitt	Variasjons- koeffisient [%]
b [mm]	150		150		150,00	0,00
h_{sp} [mm]	125		125		125,00	0,00
l [mm]	500		500		500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,22	9,32	2,99	8,50	8,91	1,26
$f_{R,1}$ [MPa]	2,66	7,56	2,29	6,49	7,03	2,67
$f_{R,2}$ [MPa]	2,89	8,22	2,55	7,25	7,73	2,21
$f_{R,3}$ [MPa]	2,79	7,94	2,25	6,39	7,16	3,81
$f_{R,4}$ [MPa]	2,36	6,72	1,96	5,57	6,14	3,28

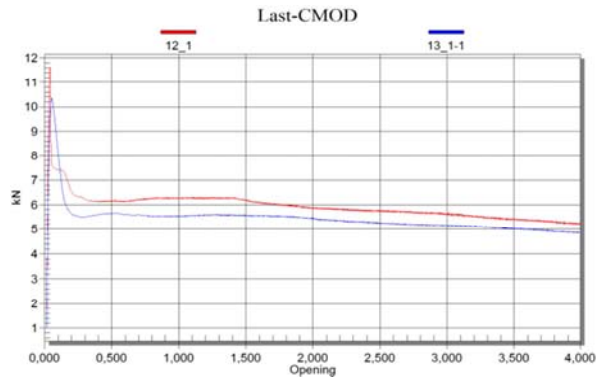


Serie 13_5

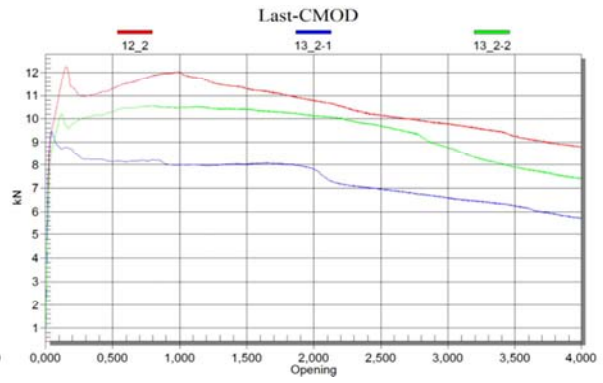
Resultat, serie 13_5

13_5						
	1	Last v/gitt bøyestrekke- fasthet [kN]	2	Last v/gitt bøyestrekke- fasthet[kN]	Gj.snitt	Variasjons- koeffisient [%]
b [mm]	150		150		150	0,00
h_{sp} [mm]	125		125		125	0,00
l [mm]	500		500		500	0,00
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	3,76	10,68	3,25	9,24	3,50	7,23
$f_{R,1}$ [MPa]	4,35	12,36	2,96	8,41	3,66	19,02
$f_{R,2}$ [MPa]	4,40	12,50	3,09	8,79	3,75	17,43
$f_{R,3}$ [MPa]	4,03	11,46	2,90	8,24	3,47	16,36
$f_{R,4}$ [MPa]	3,69	10,48	2,41	6,84	3,05	20,96

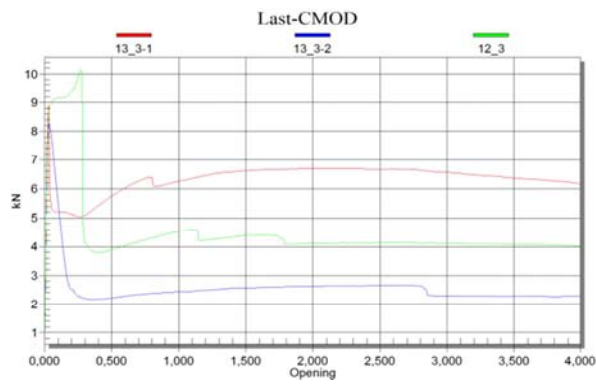
Last-CMOD kurve delt etter fiberinnhold



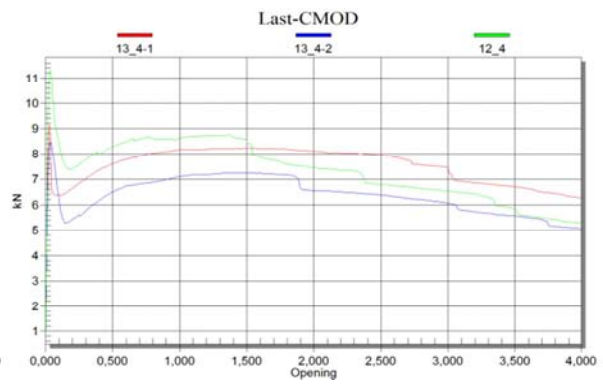
0,5 vol% stålfiber



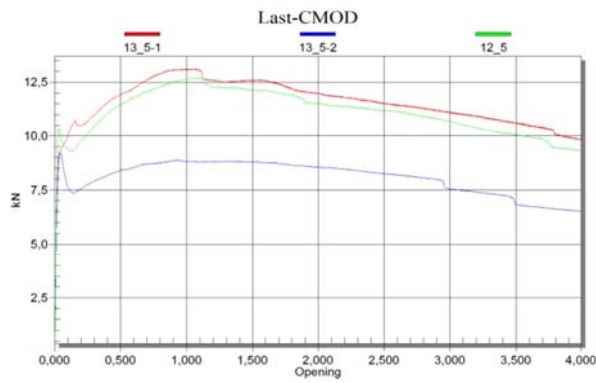
1,0 vol% stålfiber



0,5 vol% basaltfiber



1,0 vol% basaltfiber



0,5 vol% stålfiber og 0,5 vol% basaltfiber

Vedlegg Prøvedato

Prøve nr.	Utstøping	7døgnsfasthet	28døgnsfasthet, spaltestrekkfasthet og bøyestrekfasthet
11-ref	01.03.2012	08.03.2012	29.03.2012
12-ref	02.03.2012	09.03.2012	30.03.2012
13-ref	05.03.2012	12.03.2012	02.04.2012
12_1	06.03.2012	13.03.2012	03.04.2012
12_2	07.03.2012	14.03.2012	04.04.2012
13_1	08.03.2012	15.03.2012	05.04.2012
13_2	12.03.2012	19.03.2012	09.04.2012
12_3	20.03.2012	27.03.2012	17.04.2012
12_4	21.03.2012	28.03.2012	18.04.2012
12_5	22.03.2012	29.03.2012	19.04.2012
13_3	23.03.2012	30.03.2012	20.04.2012
13_4	26.03.2012	02.04.2012	23.04.2012
13_5	27.03.2012	03.04.2012	24.04.2012
11-ref-2	09.04.2012	16.04.2012	07.05.2012
12-ref-2	09.04.2012	16.04.2012	07.05.2012
13-ref-2	10.04.2012	17.04.2012	08.05.2012

Vedlegg Forslag fra Sindre Sandbakk 2011 for momentkapasitet

Følgende kommer en metode for å beregne momentkapasitet i henhold til EC2 for alle bjelker og plater, også hvis konstruksjonen er armert med fiber i tillegg til vanlig armering. [26] [24]

Det er gjort følgende forutsetninger i henhold til EC2 6.1(2)P:

- Full heft mellom betong og armering;
- Navier`s hypotese er gyldig, plane tverrsnitt forblir plane;
- Dimensjonerende spennings- og tøyningssammenheng etter EC2, 3.1.7;
- Betongens strekkfasthet neglisjeres.

Spennings- og tøyningforholdet for betong utsatt for trykk som er vist i figur 3.3 i EC2 er benyttet, og forholdet er beskrevet som følger i henhold til 3.1.7 i EC2:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{for } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{for } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (2)$$

der

n er eksponent gitt i tabell 3.1 i EC2;

ε_c er tøyning i betongen ved trykkrand;

ε_{c2} er tøyningen idet maksimalspenning nås, gitt i tabell 3.1 i EC2;

ε_{cu2} er tøyningsgrensen i bruddtilstanden, gitt i tabell 3.1 i EC2.

I henhold til 3.1.6 i EC2:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3)$$

der

α_{cc} er en koeffisient som tar hensyn til virkninger av langtidslast på trykkfastheten, samt ugunstige virkninger som er en følge av måten lasten påføres;

γ_c er partialfaktoren for betong.

Ved spennings-tøyningforhold for armeringsstål blir det benyttet en perfekt plastisk oppførsel uten en tøyningsgrense, som gir følgende sammenheng:

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s \quad \text{for } 0 \leq \varepsilon_s \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (4)$$

$$\sigma_s = f_{yd} \quad \text{for } \varepsilon_s \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (5)$$

hvor

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (6)$$

der

f_{yk} er armeringens karakteristiske flytegrense, i MPa;

γ_s er partialfaktoren for armeringsstål;

ε_s er stål tøyning.

De forskjellige faktorene som er beskrevet enten i standard teksten eller i nasjonalt tillegg.

Partialfaktorer etc. for normalbetong

n	ϵ_{c2}	ϵ_{cu2}	α_{cc}	γ_c	γ_s
2	0,002	0,0035	0,85	1,5	1,15

Partialfaktorer etc. for lettbetong

n	ϵ_{lc2}	ρ	ϵ_{lcu2}	α_{cc}	γ_c	γ_s
2	0,002	1800	0,00312	0,85	1,5	1,15

I henhold til tabell 11.3.1 i EC2 er:

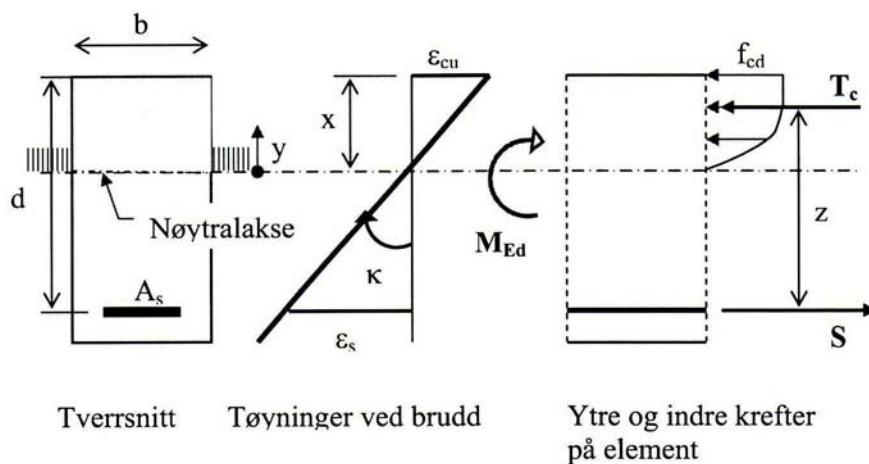
$$\epsilon_{lcu2} = 0,0035 \times \eta_1 \quad (7)$$

hvor

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6 \times \frac{\rho}{2200} \quad (8)$$

der

ρ er øvre grense for densiteten for den aktuelle klassen i overensstemmelse med tabell 11.1 i EC2.



Beregningsmodell for moment[24]

der

d er tverrsnittets effektive høyde fra trykkrand til tyngdepunkt i strekkarmering, i mm;

A_s er tverrsnittet av strekkarmeringen, i mm²;

x er trykksonehøyde, i mm;

S er kraften i strekkarmeringen, i N;

T_c er resultatanten av betongspenningene i trykksonen, i N;

z er momentarmen, avstanden mellom S og T_c , i mm;

h er høyden av prøvestykket, i mm;

b er bredden av prøvestykket, i mm;

y_t er avstanden fra nøytralaksen til T_c , i mm.

Resultanten av betongspenningene i trykksonen kan finnes av:

$$T_c = \int_{A_T}^0 \sigma_c dA_T \quad (9)$$

der

A_T er arealet av trykksonen.

Med spennings-tøyingsforholdet som beskrevet i formel (2) og (3), og bjelke­dimensjoner som beskrevet i beregningsmodellen, T_c kan skrives som:

$$T_c = 1000f_{cd}bK \left(\frac{1}{2}X^2 - \frac{250}{3}KX^3 \right) \quad \text{for } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (10)$$

$$T_c = 1000f_{cd}bK \left(\frac{1}{2}X_1^2 - \frac{250}{3}KX_1^3 \right) + f_{cd}b(X - X_1) \quad \text{for } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (11)$$

der

$$K = \frac{\varepsilon_c}{d-x} \quad (12)$$

$$X_1 = \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_c} X \quad (13)$$

Kraften i strekkarmeringen skrives som:

$$S = \varepsilon_s E_s A_s \quad \text{for } 0 \leq \varepsilon_s \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (14)$$

$$S = f_{yd} \quad \text{for } \varepsilon_s \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (15)$$

Avstanden y_t er beskrevet av følgende formel:

$$T_c y_t = \int_{A_T} \sigma_c y dA_T \quad (16)$$

Ved løsning av dette integralet finner man et uttrykk for y_t :

$$y_t = \frac{X(2-375KX)}{3-500KX} \quad \text{for } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (17)$$

$$y_t = \frac{1000KX_1^3(2-375KX_1)+3(X^2-X_1^2)}{1000K_1^2(3-500KX_1)+6(X-X_1)} \quad \text{for } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (18)$$

Momentkapasiteten finnes ved å kreve at $T_c=S$, og dette gir en 4 forskjellige muligheter:

1. $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$ og $0 \leq \varepsilon_s \leq \frac{f_{yd}}{E_s}$
2. $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$ og $\varepsilon_s \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$
3. $\varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$ og $0 \leq \varepsilon_s \leq \frac{f_{yd}}{E_s}$
4. $\varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$ og $\varepsilon_s \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$

Kombinasjon 4 gir den høyeste kapasiteten fordi denne utnytter materialene mest.

Momentkapasiteten, M_{kap} , for de forskjellige tøyingsgrensene kan da finnes ved:

$$M_{kap} = T_c z = S z \quad (19)$$

Ved bruk av formelen 2.5-20 og kombinasjonene 1-4, kan en $M_{kap} - \varepsilon_s$ kurve beregnes. Denne kurven vil bli gyldig også etter riss, fordi kapasiteten er beregnet etter teorien med opprissede betongtverrsnittet.

Beregningsmodellen kan lett endres slik at den også er gyldig for tverrsnitt med kun fiberarmering. Dette gjøres ved å tilføre en strekk blokk av tilfeldig form i strekksone.

For uarmert betong kan momentkapasiteten beregnes etter elastisk teori:

$$M_{kap}(X) = \frac{2}{3} b X^2 \sigma_{ct} \quad (20)$$

der

σ_{ct} er betongspenningen ved strekkrand eller ved sprekketopp i opprisset tilstand.

Betongtøyning ved trykkrand er gitt av:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_{cm}} \quad (21)$$

der

σ_c er betongspenningen ved trykkranden og er lik σ_{ct}

Strekktøyningen ved armeringen kan beregnes som følger:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_c (d - X)}{X} \quad (22)$$