



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer	Vårsemesteret, 2018 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Ruth Helene Brenden	<i>R.H. Brenden</i> (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder(e): Kjell Tore Fosså (UiS) Bernt Kristiansen (AF Gruppen)	
Tittel på masteroppgaven: Stålfiber i selvkomprimerende betong Engelsk tittel: Steel fiber in self compacting concrete	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Betong Selvkomprimerende betong Fiber Stålfiber	Sidetall: 112 + vedlegg/annet: 38 Stavanger, 11.06.2018 dato/år



Universitetet
i Stavanger

Teknisk naturvitenskapelig fakultet

Masteroppgave

Vår 2018

Stålfiber i selvkomprimerende betong

Ruth Helene Brenden

Forord

Denne masteroppgaven ble skrevet våren 2018 og slutfører min mastergrad innen konstruksjoner og materialer, med byggkonstruksjoner som spesialisering, ved Universitetet i Stavanger.

Oppgaven er skrevet i samarbeid med AF Gruppen. Jeg vil gi en stor takk til mine veiledere Bernt Kristiansen i AF Gruppen og Kjell Tore Fosså på Universitetet i Stavanger. I tillegg vil jeg takke Samdar Kakay som har vært veldig behjelpelig under utstøping, testing og med beregninger.

Betonglaben på Ivar Langenshus har vært mye brukt. Jarle Berge har vært til mye hjelp under støping. Vil også takke medstudenter som har hjulpet meg med mange tunge løft.

Ruth Helene Brenden

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler selvkomprimerende betong med fiberarmering. Selvkomprimerende betong skal fylle ut forskalinger og omslutte armering uten behov for vibrering eller komprimering. Hovedfokuset til oppgaven er hvordan stålfiber vil påvirke egenskapene til den ferske betongen.

Testene på fersk betong; synkutbredelsesmål, luftmål, densitet, synkutbredelse med ring og L-boks, vil bli utført i henhold til NS 12350. Det vil bli utført trykktesting av terninger, spaltestrekprøve og elastisitets modulus på sylindere og bøyestrekfasthet på liten bjelke til den herdede betongen i henhold til NS 12390. Rest bøyestrekfasthet og rest strekkfasthet ble utregnet i henhold til COIN Project report 29-2011 og beregning av bruddenergi ble utført i henhold til SINTEF sine retningslinjer.

Målet med testingen er først og fremst å finne ut av hvor mye stålfiber man kan tilsette før betongen mister sine selvkomprimerende egenskaper. Testing på herdet betong ble utført for å undersøke innvirkningen forskjellig fibermengde hadde på betongen. Det ble kun brukt stålfiber fra Dramix i denne oppgaven.

Resultatene viste at fiberen har innvirkning på synkutbredelsesmålet til betongen. For å forbedre flyten til betongen var det nødvendig å øke matriksvolumet. Densiteten og luftinnholdet ble mer påvirket av matriksvolumet enn fiberen.

Trykfasthet ble ikke påvirket av fiberen, men av sementtype, matriksvolum og utfyllingsevne. Spaltestrekfasthet ble forbedret ved et større innhold fiber. For begge testene ble ingen av prøvene delt tvers gjennom siden fiberen holder betongen sammen. Det var vanskelig å få resultater for elastisitets modul på grunn av luftlommene som ble dannet av fiberen. Det var derfor nødvendig å banke ut luftlommene ved utstøpning, selv om det ble brukt selvkomprimerende betong.

For bøyestrekfasthet, rest bøyestrekfasthet og rest strekkfasthet ble de vist at jevn fiberfordeling var viktig. Det var vanskelig å si om fiberinnholdet hadde noe innvirkning på

resultatene, siden det var store forskjeller for blandingene med samme innhold fiber. Testene viste at tilsetning av fiber gir en mer duktil betong enn for betong uten fiber.

Ved å bruke fiber vil betongen ha en betydelig høyere bruddenergi enn det ordinærbetong vil ha. Bruddenergien ble påvirket i stor grad av fiberfordeling. Alle bjelkene oppførte seg forskjellig etter brudd, men generelt øker brudenergien ved å tilsette fiber.

For en selvkomprimerende betong med et v/c-tall på 0.40 er det ikke mulig å tilsette mer enn 0.8 vol% 4D Dramix fiber uten å få et unaturlig høyt matriksvolum. Det høye matriksvolumet vil svekke fastheten til betongen. Resultatene oppnådd i denne oppgaven viser at betongen med 0.8 vol% fiber har bedre mekaniske egenskaper sammenlignet med ordinærbetong.

Abstract

This thesis concerns self-compacting fiber reinforced concrete. Self-compacting concrete should fill the formwork and enclose the reinforcement without any form of vibration or compaction. The main focus is how the steel fibers will affect the properties of the fresh concrete.

The tests on fresh concrete: slump-flow, air content, density, slump-flow with ring and L-box were conducted according to NS 12350. Compressive strength was tested on dices, tensile splitting strength and modulus of elasticity were tested on cylinders and flexural strength was tested on a small beam, all according to NS 12390. Residual flexural strength and residual tensile splitting strength were calculated according to COIN Project report 29-2011 and calculation of fracture energy was conducted according to the guidelines of SINTEF.

The main goal was to figure out how much steel fiber it is possible to use before the concrete loses its self-compacting properties. The testing on the cured concrete was conducted to examine the impact different amounts of fiber has on the concrete. Steel fibers from Dramix were the only type of fiber used in this thesis.

The results show that the fibers had impact on the slump-flow to the concrete. It was necessary to increase the volume of the matrix to improve the flow of the concrete. The density and air content were more affected by the matrix content than the fiber content.

The compressive strength was not affected by the fibers, but by the cement type, matrix volume and filling capacity. The tensile splitting strength was improved when the amount of fibers was increased. None of the test were split right through because the fibers would hold the concrete together. Because of air entrapped by the fibers, it was proven hard to get results when testing the modulus of elasticity. It was therefore necessary to remove the air when casting. This was done by knocking on the framework, even though it was used self-compacting concrete.

An even distribution of the fibers was proven important for flexural strength, residual flexural strength and residual tensile splitting strength. Because of vast differences for the different mixtures, it is hard to decide whether the fiber content had an impact on the results or not. The

test did show that by adding fibers the concrete will be more ductile than concrete without any fibers.

Fracture energy will be significantly improved by using fiber reinforced concrete, instead of using ordinary concrete. The fracture energy was to a great extent affected by the distribution of the fibers. All the beams acted differently after fracture, but the fracture energy will generally be improved by adding fibers.

It is not possible for a self compacting concrete with a w/c-ratio of 0.40 to contain more than 0.8 vol% 4d Dramix fibers without an unnatural high matrix volume. High content of matrix will also decrease the strength of the concrete. The results in this thesis shows that concrete with 0.8 vol% fiber has better mechanical properties compared to ordinary concrete.

Innholdsfortegnelse

Forord	II
Sammendrag	III
Abstract	V
Innholdsfortegnelse	VII
Bildeliste	XI
Tabell-liste	XIV
1. Innledning	1
1.1. <i>Bakgrunn</i>	1
1.2. <i>Formål</i>	1
1.3. <i>Innhold</i>	2
2. Betongteori	3
2.1. <i>Tilslag</i>	3
2.2. <i>Sement</i>	4
2.2.1. <i>V/c-tall</i>	5
2.2.2. <i>Flyveaske</i>	5
2.3. <i>Silikastøv</i>	6
2.4. <i>Tilsetningsstoffer</i>	7
2.4.1. <i>Superplastiserende tilsetningsstoff</i>	8
2.5. <i>Fersk betong</i>	8
2.5.1. <i>Reologiske egenskaper</i>	8
2.5.2. <i>Partikkel-matriks modellen</i>	10
2.6. <i>Selvkomprimerende betong</i>	10
2.6.1. <i>Tiksotropisk tilstivning</i>	11
2.6.2. <i>Proporsjonering</i>	11
2.6.3. <i>Separasjon</i>	12
2.7. <i>Fiberarmering</i>	13
2.7.1. <i>Stålfiber</i>	14
2.8. <i>Fiberarmering i selvkomprimerende betong</i>	15
3. Proporsjonering	18
3.1. <i>Prøveplan</i>	18

3.2.	<i>Referansebetong</i>	19
3.3.	<i>Materialer og proporsjonering</i>	19
3.3.1.	Tilslag	20
3.3.2.	Sement	20
3.3.3.	Silikastøv	21
3.3.4.	Tilsetningsstoff	22
3.3.5.	Stålfiber	22
3.4.	<i>Betongresept</i>	22
3.4.1.	Fremgangsmåte for utvikling av betongresept	23
3.5.	<i>Støping</i>	26
3.6.	<i>Klassifisering</i>	28
4.	Testmetoder	30
4.1.1.	Fuktinnhold	30
4.2.	<i>Fersk betong</i>	31
4.2.1.	Luftinnhold	31
4.2.2.	Densitet	32
4.2.3.	Synkutbredelsesmål	32
4.2.4.	Synkutbredelse med ring	33
4.2.5.	L-boks	34
4.3.	<i>Herdet betong</i>	36
4.3.1.	Trykkfasthet	36
4.3.2.	Spaltestrekkfasthet	37
4.3.3.	Elastisitetens modul	39
4.3.4.	Bøystrekkfasthet	41
4.3.5.	CMOD	42
4.3.6.	Bestemmelse av rest bøystrekkfasthet og rest strekkfasthet	43
4.3.7.	Bruddenergi	45
5.	Testresultater	47
5.1.	<i>Observasjoner</i>	47
5.1.1.	Blanding nr. en	47
5.1.2.	Blanding nr. to	48
5.1.3.	Blanding nr. tre	49
5.1.4.	Blanding nr. fire	50
5.1.5.	Blanding nr. fem	51
5.1.6.	Blanding nr. seks	52
5.1.7.	Blanding nr. syv	53

5.1.8.	Blanding nr. åtte.....	54
5.1.9.	Blanding nr. ni	55
5.1.10.	Blanding nr. ti	56
5.1.11.	Blanding nr. 11	57
5.1.12.	Blanding nr. 12	58
5.2.	<i>Fersk betong</i>	59
5.2.1.	Luftinnhold	60
5.2.2.	Densitet	60
5.2.3.	Synkutbredelse.....	61
5.2.4.	Synkutbredelse med ring	61
5.2.5.	L-boks	62
5.3.	<i>Herdet betong</i>	63
5.3.1.	Trykkfasthet.....	63
5.3.2.	Spaltestrekkfasthet.....	65
5.3.1.	Elastisitetens modulus	66
5.3.2.	Bøyestrekfasthet	67
5.3.3.	Rest bøyestrekfasthet.....	69
5.3.4.	Rest strekkfasthet.....	73
5.3.5.	Bruddenergi	74
6.	Diskusjon	77
6.1.	<i>Fersk betong</i>	77
6.1.1.	Luftinnhold	77
6.1.2.	Densitet	77
6.1.3.	Synkutbredelse.....	77
6.1.4.	Synkutbredelse med ring	78
6.1.5.	L-boks	79
6.2.	<i>Herdet betong</i>	80
6.2.1.	Trykkfasthet.....	80
6.2.2.	Spaltestrekkfasthet.....	81
6.2.3.	Elastisitetens modulus	81
6.2.4.	Bøyestrekfasthet	82
6.2.5.	Rest bøyestrekfasthet.....	83
6.2.6.	Rest strekkfasthet.....	84
6.2.7.	Bruddenergi	85
6.3.	<i>Tanker om fiber</i>	86
6.3.1.	Fiber i fersk betong.....	86

6.3.2. Fiberfordeling	87
7. Konklusjon.....	89
8. Kilder.....	91
Vedlegg.....	95

Bildeliste

Figur 1 - Fiberformer [29].....	15
Figur 2 - Orientering av fiber [37]	16
Figur 3 - Forhold mellom trykkfasthet og v/b-forhold [39].....	21
Figur 4 - Siktkurve	23
Figur 5 - Forhold mellom hulrom i tilslag og steinandel [39]	24
Figur 6 - Fordeling av tilslag	24
Figur 7 - Forhold mellom synkmål og matriksvolum [39]	25
Figur 8 - Proporsjoneringsark	25
Figur 9 - Betongresept	26
Figur 10 - Støpeform terning, 100x100x100 mm	26
Figur 11 - Støpeform sylinder.....	27
Figur 12 - Støpeform bjelke, 150x150x550 mm.....	27
Figur 13 - Last ved fire rissvidder [29].....	29
Figur 14 - Delvis tørket tilslag.....	30
Figur 15 - Bøtte brukt til å måle luftinnhold [46]	31
Figur 16 - Luftmåler.....	32
Figur 17 - Synkutbredelse med ring [49].....	34
Figur 18 - L-boks [50].....	35
Figur 19 - Prøvestykke testes for trykkfasthet	37
Figur 20 - Sylinder plassert i jig	38
Figur 21 - Prøvestykke testes for spaltestrekk	38
Figur 22 - Prøvestykke elastisitetens modul testes	39
Figur 23 - Lastsykluser ved måling av elastisitetens modulus [53].....	40
Figur 24 - Bjelke plassert i maskin [55].....	42
Figur 25 - Forklaring av insnitt.....	42
Figur 26 - Clip gauge	43
Figur 27 - Relasjon mellom karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekfasthet [29]	45
Figur 28 - Forskyving av last-nedbøying graf [56].....	46
Figur 29 - Synkutbredelsesmål blanding en.....	48
Figur 30 - Synkutbredelsesmål blanding to	49

Figur 31 - Betongen fyller ikke ut formen	49
Figur 32 - Synkutbredelse med ring blanding fire	50
Figur 33 - L-boks blanding fire.....	50
Figur 34 - Separasjon blanding fem.....	51
Figur 35 - Steinoppsamling blanding seks.....	52
Figur 36 - Synkutbredelse blanding syv	53
Figur 37 - Fiberen blokkerer, synkutbredelse med ring blanding syv	54
Figur 38 - Synkutbredelsesmål blanding åtte.....	55
Figur 39 - Synkutbredelsesmål blanding ni	56
Figur 40 - Synkutbredelsesmål blanding ti	56
Figur 41 - Synkutbredelsesmål blanding 11	57
Figur 42 - Synkutbredelsesmål blanding 12	58
Figur 43 - Resultater luftinnhold.....	60
Figur 44 - Resultater densitet.....	60
Figur 45 - Resultater synkutbredelse	61
Figur 46 - Venstre: synkutbredelse med ring blanding fire, høyre: synkutbredelse med ring blanding syv	62
Figur 47 - Resultat L-boks blanding 4	63
Figur 48 - Resultater trykkfasthet	64
Figur 49 - Terninger etter brudd	64
Figur 50 - Resultater spaltestrekkfasthet.....	66
Figur 51 - Resultater elastisitetens modulus.....	67
Figur 52 - Resultater bøyestrekfasthet	68
Figur 53 - Prøve ti, last/åpning-kurve	69
Figur 54 - Rest bøyestrekfasthet for 0.5 vol% fiber.....	70
Figur 55 - Rest bøyestrekfasthet for 0.8 vol% fiber.....	71
Figur 56 - Rest bøyestrekfasthet for 1.0 vol% fiber.....	72
Figur 57 - Resultater rest bøyestrekfasthet	72
Figur 58 - Resultater rest strekkfasthet	74
Figur 59 - Resultater bruddenergi	75
Figur 60 - Last/nedbøying-kurve	75
Figur 61 - Sammenligning av fiberlengde og armeringsavstand	78
Figur 62 - Fiberen sperrer utgang, L-boks	79
Figur 63 - Oppsprekking ved spaltestrekkfasthet	81

Figur 64 - Nærbilde, bjelke etter oppsprekking	83
Figur 65 - Bjelke etter oppsprekking	83
Figur 66 - Venstre: prøve to, høyre: prøve åtte.....	86
Figur 67 - Klump med fiber	86
Figur 68 - Dårlig fordeling av fiber	87

Tabell-liste

Tabell 1 - Prøveplan.....	18
Tabell 2 - Materialer	20
Tabell 3 - Fasthetsklasser [29]	28
Tabell 4 - Restfasthets klasse [29]	28
Tabell 5 - Spesifikasjoner blanding en.....	47
Tabell 6 - Spesifikasjoner blanding to	48
Tabell 7 - Spesifikasjoner blanding tre	49
Tabell 8 - Spesifikasjoner blanding fire.....	50
Tabell 9 - Spesifikasjoner blanding fem	51
Tabell 10 - Spesifikasjoner blanding seks	52
Tabell 11 - Spesifikasjoner blanding syv.....	53
Tabell 12 - Spesifikasjoner blanding åtte.....	54
Tabell 13 - Spesifikasjoner blanding ni	55
Tabell 14 - Spesifikasjoner blanding ti	56
Tabell 15 - Spesifikasjoner blanding 11	57
Tabell 16 - Spesifikasjoner blanding 12	58
Tabell 17 - Resultater for fersk betong	59
Tabell 18 - Resultater trykkfasthet.....	63
Tabell 19 - Resultater spaltestrekkfasthet	65
Tabell 20 - Resultater elastisitets modulus	66
Tabell 21 - Resultater bøyestrekfasthet.....	68
Tabell 22 - Resultater for rest bøyestrekfasthet 0.5 vol% fiber	69
Tabell 23 - Resultater rest bøyestrekfasthet 0.8 vol% fiber	70
Tabell 24 - Resultater rest bøyestrekfasthet 1.0 vol% fiber	71
Tabell 25 - Resultater rest strekkfasthet.....	73
Tabell 26 - Resultater bruddenergi	74

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Stålfiber vil i fremtiden bli brukt i tillegg til tradisjonell armering. Bestemmelse av orienteringen til stålfiber er en utfordring. Det er anbefalt at betongen ikke vibreres, som vil si at det må brukes selvkomprimerende betong. Ved bruk av selvkomprimerende fiberbetong vil man kombinere de gode egenskapene til fiber med fordelene til selvkomprimerende betong i fersk tilstand. [1]

Selvkomprimerende betong ble utviklet i Japan på grunn av mangel på arbeidskraft, for å begrense feil og et ønske om å eliminere vibrering av betong. Kjentegnet på selvkomprimerende betong er at den flyter ut på grunn av egen vekt og ikke trenger ytterlig vibrering eller komprimering. Ved bruk av selvkomprimerende betong vil man oppnå større effektivitet på byggeplasser, samt forbedre både kvalitet og utseendet på betongen. [2]

Betong er et sprøtt materiale, og tilsetning av fiber kan påvirke betongen positivt. Ved oppsprekking vil fiberen holde betongen sammen og dermed forsinke sprekprosessen. Stålfiber er den mest uberedte fibertypen som blir brukt. Glass, syntetiske og naturlige fiber blir brukt i en mindre grad. For å optimalisere effekten av fiberen, er det viktig å få fiberen jevnt fordelt i betongen. [2]

1.2. Formål

Hensikten er å undersøke, teste og forske på hvordan stålfiber påvirker selvkomprimerende betong, både i fersk og herdet tilstand. Målet med oppgaven er å lage en stabil betong hvor fibre blir jevnt fordelt i blandingen. Det skal bli undersøkt hvor mye fiber det er mulig å tilsette en blanding uten at betongen mister sine selvkomprimerende egenskaper. I tillegg skal det undersøkes hvordan fibermengden vil påvirke betongens ferske og herdede egenskaper.

For å nå målene forklart i avsnittet over vil det bli utført en rekke labforsøk ved Universitetet i Stavanger. I de forskjellige forsøkene vil det bli tilsatt ulik mengde stålfiber. Det vil bli startet med 0.5 vol% for å så øke til 0.8 vol% og det vil til slutt bli forsøkt med 1.0 vol% fiber. For å oppnå en stabil og optimal betong blanding er det i hovedsak kun matriksvolumet som vil bli endret. Det vil i tillegg bli tilsatt forskjellig mengde med superplastiserende tilsetningsstoffer.

Hovedutfordringen er å få en stabil selvkompimerende betong, samt at fiberen blir jevnt fordelt. Ved bruk av lange fibre med krokede ender kan fibre lett klumpe seg sammen som kan resultere til at deler av konstruksjonen blir uten fiber. For å kunne støpe ut betongen må fiberne kunne flyte rundt armering slik at de ikke blokkerer, noe som kan være vanskelig å få til.

1.3. Innhold

Første delen av oppgaven inneholder et litteratur studium. Teoridelen starter med oppbyggingen til betong for å så ta for seg egenskapene til fersk betong. Deretter vil det bli beskrevet hva selvkompimerende betong er og hva som kjennetegner dette. Videre undersøkes det hvilken innvirkning fiber har på betong. Innvirkningen av stålfiber vil bli nøyere forklart. Skal så se på tidligere informasjon om stålfiberarmert selvkompimerende betong. Det blir så presentert en prøveplan hvor materialvalg og proporsjonering av betong forklares. De ulike testmetodene blir så beskrevet.

Siste del av oppgaven består av test- og beregningsresultater. Resultatene fra hver blanding vil bli presentert for å få en nøyaktig oversikt over stålfiberens effekt på den ferske betongen. Tankene bak hver blanding vil bli forklart. Så vil resultatene bli diskutert før konklusjonen presenteres.

2. Betongteori

Bygg og konstruksjoner som er bygd med betong, bygges for å vare. Betong er et materiale som blir sterkere over tid. Det er langvarig og kan motstå forvitring, erosjon, brann og naturkatastrofer. Betong er økonomisk og gir ofte den mest effektive og kostnadseffektive måten å konstruere strukturer. [3] De overnevnte egenskapene gjør betong til det mest utbredte byggematerialet i verden. [4]

Betong er et strukturelt materiale som i hovedsak består av tre komponenter: tilslag, vann og sement. En god kvalitet på tilslag og sement er avgjørende for kvaliteten på betongen. Vanninnholdet i betongen påvirker trykkfasthet, bøyestrekfasthet, permeabilitet, motstand mot forvitring og heften mellom betong og armering. [4]

I tillegg til disse tre komponentene finnes det en annen måte å påvirke betongens egenskaper i både fersk og herdet tilstand; tilsetningsstoffer. [5] Effektiviteten av tilsetningsstoffene avhenger av blant annet vanninnhold, mengde og type sement, luft og temperatur. Tilsetningsstoffer deles inn i fem hovedklasser: luftinnførende, akselererende, retarderende, plastiserende og superplastiserende. [6]

I denne oppgaven skal det bli brukt tilslag fra NorStone Årdal og Velde, sement fra Norcem, silika fra Elkem og tilsetningsstoff fra Dynamon.

2.1. Tilslag

Ordinærbetong består vanligvis av 60-75% tilslag. For å få en god betongblanding må tilslaget være rent, hardt, sterkt og fri for absorberte kjemikalier. Tilslag blir delt inn i to kategorier: fint og grovt. Det fine tilslaget består av sand eller knust stein hvor partiklene har en diameter under 9 mm. Grovt tilslag er større enn 4.5 mm, men er som regel mellom 9.5 mm til 37.5 mm i diameter. Graderingsgrenser og maksimum tilslagsstørrelse blir spesifisert fordi egenskapene påvirker mengden tilslag som blir brukt, samt støpelighet og varigheten til betongen. [7]

Tilslag har innvirkning på både fersk og herdet betong. Tilslaget form og overflate har størst innvirkning på den ferske betongen og kan også innvirke på vannbehovet og støpeligheten til betongen. Ruglete overflate, kantete og avlange partikler har en negativ innvirkning på de overnevnte egenskapene, samtidig som glatte, kubiske og runde partikler vil innvirke positivt. [8]

Fuktinnholdet til tilslag er en viktig faktor når man skal bestemme forholdet mellom vann og sement, se kapittel 2.2.1 *V/c-tall*. Alt tilslag inneholder fukt, og fuktinnholdet i tilslaget varierer ut ifra lagringsbetingelsene til tilslaget og porøsiteten til partiklene. Tilslag kan finnes i fire forskjellige fukttilstander: [9]

1. Tørket i ovn
2. Lufttørket
3. Overflatetørr
4. Vått

Ved å bruke tilslag som er tørket i ovn og overflatetørt tilslag kan man finne fuktinnholdet i tilslag. Se kapittel 4.1.1 *Fuktinnhold*. [9]

2.2. Sement

Sement er et hydraulisk bindemiddel, som vil si at herdeprosessen starter når det reagerer med vann. [10] Sement består av kalkstein som blir brent til klinker. Klinkeren blir så blandet sammen med gips og deretter malt til ett fint pulver. Når dette pulveret blandes med vann, vil det oppstå en reaksjon som kalles hydratisering som fører til avbinding og herding i betongen. [11]

Det er i hovedsak sementlimet som bestemmer betongens tetthet, styrke og bestandighet. Egenskapene til sementlimet blir igjen bestemt av sementen. De blir påvirket av sementtype, sementmengde og v/c-forhold. Varme, avbindingshastighet og fasthetsutvikling varierer for ulike sementtyper. Den mest brukte sementen i Norge er portlandsement (CEM1), men det har også blitt mer vanlig å bruke en blanding av sement og pozzolane bindemidler, som for eksempel silikastøv (se kapittel 2.3 *Silikastøv*) i betongen. [12]

Størrelsen på sement har en viktig innvirkning på hydratiseringshastigheten. Under reaksjonen vil et lag av hydratiseringsproduktet legge seg rundt sementpartikkelen og isolere den fra vannet. Når dette laget blir tykkere vil hydratiseringsprosessen gå senere. Mindre partikkeler vil derfor ha en mye raskere prosess enn større partikkeler. Vanligvis vil en sement bestå av en partikkelsammensetning hvor 10 wt% av partiklene er større enn 50 μm og 10 wt% mindre enn 2 μm . [13]

2.2.1. V/c-tall

V/c-tallet er forholdet mellom vann og sement i betongen. Mer vann i betongen vil føre til en fortynnet sementpasta. Dette har innvirkning på trykkfastheten, strekkfasthet, bøyestrekfasthet, porøsitet og svinn. For høyere v/c-tall vil sluttstyrken til betongen bli svakere, vannet vil da gi en fortynnet pasta som gjør at betongen blir mer mottagelig for svinn og sprekkdannelse. Svinn oppstår ved volumforandring i betongen og kan føre til mikro-sprekker som skaper svake soner i betongen. [14]

For å fullføre hydratiseringsprosessen trenger sement en vannmengde på 42% av sin egen vekt. Ved bruk av v/c-tall høyere enn 0.42 vil det bli skapt porer som reduserer styrken og øker permeabiliteten til betongen. Sementens hydratiserte produkter blir dannet i den vannfylte delen av den ferske blandingen av sement og vann. Produktene fra hydratiseringen har et større volum enn den uhydratiserte sementen. Denne prosessen gir et lavere volum fylt med vann som skaper porer i betongen. Brukes det et v/c-tall større enn 0.42, vil det gjenværende vannet skape kapillærporer i den herdede betongen. [15] Større mengder overskuddsvann vil gi sammenhengende kapillærporer, som kan gi en øking i væske- og gasstransport og dermed gir økt nedbrytningsfare. [16]

2.2.2. Flyveaske

Flyveaske er et fint pulver som er et biprodukt fra kullproduksjon. Pulveret reagerer kjemisk med biproduktet kalsiumhydroksid fra hydratiseringsprosessen mellom sement og vann, og lager et sementlignende produkt som gir ønskelige egenskaper i betong. Flyveaske fungerer

som et retarderende tilsetningsstoff. Reaksjonen mellom flyveaske og kalsiumhydroksid går tregere enn reaksjonen mellom sement og vann, noe som resulterer i lengre herdetid. [17]

Flyveaske kan bli sett på som et miljøvennlig produkt siden det er et biprodukt. Andre positive effekter ved bruk av flyveaske er: [18]

- Bedre ved bruk i kaldt vær
- Gir bra støpelighet
- Reduserer problemer ved riss
- Reduserer blødning, se kapittel 2.5.1 *Reologiske egenskaper*, og permeabilitet
- Reduserer varme ved hydratisering
- Kan gi samme slump ved lavere v/c-tall sammenlignet med blandinger uten flyveaske

Blandinger som inneholder flyveaske kan oppleve negative effekter som: [18]

- Tregere styrkeutvikling
- Større innhold av salt i betongen
- Økt behov for luftinnførende tilsetningsstoffer

2.3. Silikastøv

Som nevnt tidligere i oppgaven (se kapittel 2.2 *Sement*) har det blitt mer vanlig med en blanding av sement og pozzolane bindemidler i betong. Silikastøv er det mest utbredte pozzolane bindemidlet. [12] Når man bruker silikastøv i betongen forbedres trykkfastheten, bindestyrken og slitestyrken. Silikastøv forbedrer også permeabiliteten og hjelper derfor med å beskytte armeringen fra å korrodere. [19]

Silikastøv er et avfallsprodukt fra produksjonen til ferrosilisium. [20] Ferrosilisium er en legering av jern og silisium som blir brukt til å gi ønskede egenskaper til stål eller støpejern. [21] Silikastøv består av små, runde partikler som blir samlet opp ved å filtrere gassene fra produksjonen. [20] Størrelsen på partiklene er 100 ganger mindre enn vanlig sement (se kapittel 2.2 *Sement*). På grunn av små og fine partiklene er silikastøv et veldig effektivt pozzolant materiale. [19]

Det finnes både ubehandlet og behandlet silikastøv. Behandlet silikastøv blir bearbeidet i en trommel for å øke densiteten. Effektiviteten til silikastøvet blir forbedret når den har gjennomgått denne behandlingen. Ved bruk i betong produksjon gir behandlet silikastøv er jevnere blanding, men det påvirker ikke flyten til betongen. [22]

2.4. Tilsetningsstoffer

Tilsetningsstoffer tilsettes for å endre betongens egenskaper. Effekten av tilsetningsstoffene varierer ut fra forskjellige faktorer, som når det blir tilsatt, blandingstid, mengde og type sement og temperatur. [8] Hovedgrunnene til å bruke tilsetningsstoffer er for å redusere kostnaden, effektivt oppnå ønskede egenskaper og for å opprettholde kvaliteten på betongen gjennom miksing, transport, støpning og herding. [23]

Grunnet offshoreindustrien var Norge tidlig ute med å bruke tilsetningsstoffer sammenlignet med andre land. For å oppnå betong med god støpelighet og styrke var det nødvendig å finne nye løsninger som førte til en utvikling av tilsetningsstoffer. Disse løsningene ble etterhvert introdusert til konstruksjoner på land. [8]

Stoffene er delt inn i klasser basert på hvilke effekter de har på betongen. De vanligste klassene er: [8]

- Plastiserende/vannreducerende tilsetningsstoff
- Superplastiserende/høyt vannreducerende tilsetningsstoff
- Luftinnførende tilsetningsstoff
- Størknings-akselererende tilsetningsstoff
- Retarderende tilsetningsstoff
- Herde-akselererende tilsetningsstoff
- Viskositetsmodifiserende tilsetningsstoff

2.4.1. Superplastiserende tilsetningsstoff

Plastiserende og superplastiserende stoffer er de mest utbredte tilsetningsstoffene i Norge. [8] Stoffene blir brukt for å gjøre betongen mer flytende og bearbeidelig, som fører til at betongen lettere fyller formen uten behov for komprimering eller vibrering. [23]

Bruken av superplastiserende tilsetningsstoff er en stor milepæl i betongens historie og spilte en stor rolle under utvikling av høyfast betong. Tilsetningsstoffet blir tilsatt i betongen i små doser og fører til: [24]

- Økt støpelighet
- Redusert v/c-tall
- Redusert sementinnhold

Endringene kan avhenge av type superplastiserende, betongsammensetning, tidspunkt stoffet blir tilsatt og temperatur. Superplastiserende tilsetningsstoff forbedrer støpeligheten til betongen, men egenskapen beholdes bare i 30-60 minutter. [24]

Superplastiserende tilsetningsstoffer reagerer ikke kjemisk med hydratiserte materialer, men den påvirker fortsatt mikrostrukturen til sementpastaen og betongen. Dette gjør at porøsiteten og blødningen blir betydelig redusert, og uttørkingssvinn og krypdeformasjon blir redusert. I tillegg til dette forbedrer superplastiserende tilsetningsstoffer nedbrytningstiden til betongen. [24]

2.5. Fersk betong

Fersk betong er det stadiet hvor betongen er i den plastiske fasen og hvor betongen kan støpes. Den ferske betongen har krav til egenskaper som skal oppnås, som vil bli diskutert i dette kapitlet.

2.5.1. Reologiske egenskaper

De reologiske egenskapene til fersk betong kan bli forklart med støpeligheten til blandingen. [8] For fersk betong kan støpeligheten karakteriseres ved hvor lettvisnt det er å jobbe med

blandingen uten at den mister homogeniteten sin, som vil si at alle materialene er jevnt fordelt i betongen. Støpelighet kan deles inn i tre deler: [25]

1. Stabilitet
2. Mobilitet
3. Kompresjonsevne

Stabilitet er betongens evne til å forbli homogen, enten den ligger i ro eller er i bevegelse. Ved dårlig stabilitet kan betongen separeres. [8] Separasjon i betong er når materialene i betongen skilles fra hverandre. Det er betydelig forskjell i densitet og størrelse på komponentene i betongen, som gjør at de separeres. Det finnes tre typer separasjon: [25]

1. Grovt tilslag som separerer seg fra matriksen
2. Pasta som separeres fra tilslaget
3. Blødning

Blødning i betong oppstår når noe av vannet fra betongen kommer ut på overflaten. Dette er fordi vann har den laveste densiteten av alle komponentene i betongen. Blødning forekommer som regel i blandinger med mye vann, dårlig proporsjonert og utilstrekkelig blandet betong. [25]

Mobilitet er betongens evne til å bevege seg når det blir påsatt last. Høy mobilitet blir oppnådd ved å ha mye vann og lite grovt tilslag i betongen. På grunn av høy vannandel må man tilsette mye sement. Høyt nivå av sementpasta gir stort potensiale for svinn og derfor større mulighet for sprekkdannelse. [8]

Kompresjonsevne er betongens evne til å fylle former og slippe ut luft. Hvor mye energi som blir brukt til å komprimere betongen avhenger på mobiliteten, men også hvor bra betongen fester seg til formen, densitet, luftbobler og sjokkabsorberende evne. Luftbobler er svake soner i betongen som gjør at effektiv komprimeringsevne er en av de viktigste faktorene for å bestemme hvor sterk betongen er. [8]

2.5.2. Partikkel-matriks modellen

For å forklare forholdet mellom støpelighet og design er partikkel-matriksmodellen en ofte brukt modell. En betongresept består ofte av 7-8 delmaterialer. For å forenkle forholdet deles materialene inn i to grupper: partikkelfasen og matriksfasen. [26]

- **Matriksfasen** består vann, tilsetningsstoffer og materialer med partikkelstørrelse mindre enn 0.125 mm. Den kan bli ansett som en flytende væske.
- **Partikkelfasen** består av det resterende tilslaget, partiklene som er større enn 0.125 mm.

Selvkomprimerende betong er matriksdominant, det vil si at betongen har et stort volum av viskøs matriks fase. Matriksvolumet er stort nok til å øke avstanden mellom tilslagspartiklene som reduserer kontakt, friksjon og blokkeringseffekter. Kornform får mindre innflytelse på betongens oppførsel. [26]

Partikkel-matriksmodellen sier lite om betongens stabilitet. Betongens største hinder for å oppnå selvkomprimerende egenskaper er separasjon. [26]

2.6. Selvkomprimerende betong

Utviklingen av selvkomprimerende betong startet i Japan grunnet mangel på arbeidskraft, ønske om å eliminere vibrering av betong og for å begrense antall feil på grunn av dårlig konstruksjon. [2] Selvkomprimerende betong skal fylle forskalingene og omslutte armeringen uten behov for vibrering eller annet komprimeringsarbeid. Dette skal også forekomme uten at det oppstår separering. [26]

De viktigste kjennetegnene for selvkomprimerende betong er motstand mot segregasjon, utfyllingsevne og passeringsevne . [2]

- **Segregasjonsmotstand** er komponentenes evne til å motstå separasjon. Segregasjonsmotstanden kan være annerledes under statiske og dynamiske forhold. Blandinger med litt separasjon gir en glatt overflate siden sementpastaen blir segregert og fyller ut formene. [2]

- **Utfyllingsevne** er hvor bra betongen flyter ut. Betongen skal uten vibrasjon fylle ut hele formen, og må flyte uten at noe luft blir fanget inne i betongen, eller på toppen. Utfyllingsevnen blir bestemt av vekten til betongen og støpeenergien. [2]
- **Passeringsevne** er hvor lett betongen flyter rundt hindringer. For å garantere en homogen fordeling av komponentene i betongen er det nødvendig med en god passeringsevne. Det som påvirker om betongen blir blokkert eller ikke er flyteevnen til betongen, sementpasta innhold og fordeling, maks tilslagsstørrelse og størrelse til tilslaget. [2]

2.6.1. Tiksotropisk tilstivning

Når selvkomprimerende betong står i ro, mister den flyteevnen, men ved omrøring blir den gjenvunnet. Dette kalles tiksotropisk tilstivning. Tiksotropisk tilstivning kan gi sjiktdeling ved pauser i støpning siden det oppstår en type overflateskorpe. Ulempene som kommer ved tiksotropisk tilstivning kan unngås ved å mikse betongen på nytt når den skal brukes og ved kontinuerlig utstøping. Ved å bruke pumpe slang vil man holde betongen i bevegelse og derfor redusere tendensen til tiksotropisk tilstivning. [26]

2.6.2. Proporsjonering

Ved proporsjonering av selvkomprimerende betong kan man følge de samme prinsippene som for vanlig betong, men man må ha mer fokus på matriksens egenskaper. Proporsjonering av selvkomprimerende betong er en balanse mellom å oppnå riktig flyt og stabilitet. [8]

De herdede egenskapene i betong er de viktigste ved proporsjonering av betong. Selv om proporsjonering av selvkomprimerende betong er lagt til rette for utstøping og komprimering, settes ferske egenskapene i andre rekke, bak kravene til herdede egenskaper som trykkfasthet, uttørkingssvinn og E-modul. Det er disse kravene som bestemmer begrensningene til materialene brukt i blandingene. [27]

Maksimum størrelse på tilslaget, D_{max} , vil ha innflytelse på segregasjons potensiale, passeringsevne og robustheten til blandingen. Større tilslag vil gi et høyere potensiale til segregasjon og mindre tilslag vil øke robustheten. [27] For å optimere den granulære delen av betongen burde den grove andelen reduseres, den maksimale tilslagsstørrelsen minskes og bruke avrundet, rent og bra gradert tilslag. Deler av sement blir erstattet av vann og tilslag. [2] Matriksen er viktig ved proporsjonering av selvkomprimerende betong. Uten tilstrekkelig proporsjonert matriks vil ikke blandingen opptrå som ønsket, uansett hvor optimalt tilslaget er. Man må ha to hovedfokus ved proporsjonering av sementpasta: [27]

1. Hvor stort matriksvolum som trengs
2. Reologien til matriksen

Høyere matriskvolum gir bedre flyt som fører til lavere mulighet for blokkering og separasjon. [27]

Den egnede matriksmengden kan bli estimert ved å bruke forholdet mellom vann og pulver (v/p-tallet). Pulver er definert som alle solide materialer i matriksen, unntatt sement, pozzolaner og fillere. V/p-tallet forklarer sammenhengen mellom vann og overflatearealet i matriksen som trenger å bløtlegges. For selvkomprimerende betong burde v/p-tallet være mellom 0.30 og 0.45. Ved v/p-tall større enn 0.45 er det vanskelig å oppnå høy nok flyt i matriksen, og ved v/p-tall mindre enn 0.30 blir det derimot for mye flyt i matriksen. [8]

2.6.3. Separasjon

Separasjon i selvkomprimerende betong blir delt inn i to typer: statisk og dynamisk. Statisk separasjon oppstår når betongen står i ro og det grove tilslaget synker ned i pastaen. Separasjon kan også oppstå når betongen flyter, ved at det grove tilslaget blir liggende igjen bak sementpastaen. Dette kalles dynamisk separasjon. [28]

Statisk separasjon er hovedsakelig kontrollert av: [28]

- densitetsforskjellen mellom tilslaget og pastaen
- de reologiske egenskapene til pastaen
- volum, gradering og form til tilslaget

Dynamisk separasjon er hovedsakelig kontrollert av: [28]

- hastigheten betongen flyter
- drivkraften til flyten, som hydraulisk trykk og pumpetrykk
- friksjonen til overflaten betongen flyter på

Vanligvis blir motstand mot separasjon oppnådd ved å redusere vannmengden og tilsette finstoffer som flyveaske og silikastøv for å øke volumet og viskositeten til pastaen. Dårlig separasjonsmotstand kan føre til en ujevn distribusjon av grovt tilslag, blokkering rundt armering, høyt nivå uttørkingssvinn, og ujevn trykkfasthet. [28]

2.7. Fiberarmering

Betong som inneholder fiber blir kalt fiberarmert betong. Det har siden oldtiden blitt brukt fiber i form av strå og hestehår for å armere sprø materialer. De mest utbredte fibertypene som blir brukt i dag er stål, glass, syntetisk og naturlige fibermaterialer. [29]

Fiber er ofte kategorisert i både størrelse og type materiale som blir brukt. Fiber blir i hovedsak bli delt inn i to kategorier:

- **Mikrofiber** er små, hårlignende fiber som oftest er laget av plastikk, glass eller basalt. Mikrofiber forhindrer primært krymp- og mikrosprekker som oppstår i starten av herdeprosessen.
- **Makrofiber** er større fiber som oftest er laget av stål. Disse fibrene gir bærende styrke når sprekker har oppstått.

Begge kategoriene har forskjellige fibertyper og størrelser med forskjellige egenskaper. [30]

I betongen blir fibrene tilfeldig distribuert. Det er kort avstand mellom fibrene som fører til bedre kontroll av sprekkdannelse enn det tradisjonell armering gir. [31] Ved å erstatte tradisjonell armering med fiberarmering vil det forekomme fordeler som mindre arbeidstid, større fugefrie areal og mindre opprissing. Ved bruk av fiberarmering i vegger oppnås mye tynnere vegger sammenlignet med uarmert betong. [29] Mikrofiber blir ikke brukt til å erstatte tradisjonell armering, men makrofiber kan bli brukt til å erstatte deler av eller hele den

tradisjonelle armeringen i store konstruksjoner. Erstatningene blir kun brukt i gulv på grunn, på grunn av manglende dimensjoneringsgrunnlag for fiberarmerte konstruksjoner. [30]

Det finnes mange forskjellige materialer og kjennetegn på fibre. Fibre velges ut i fra hvilken effekt som er ønsket. Noen fibre er beregnet for å ta opp last og kontrollere sprekker, andre blir brukt for å redusere risikoen for plastisk svinn. Fiberens mekaniske egenskaper, geometrien, struktur og forankringstype har stor betydning for hvordan fiberen presterer. [32] Når betongen har herdet og fibre er skikkelig bundet til betongen, vil de danne en ”bro” mellom sprekke. Dette fører til stressoverføring som hindrer at sprekke vokser ustabil. Ved høyt fibervolum vil de forbedre betongens strekkfasthet. [33]

Hvordan fiberen innvirker støpeligheten til betongen er delt inn i fire hovedområder: [2]

- Fibrene er mer avlange sammenlignet med tilslaget. Samme volum vil gi større overflateareal.
- Stive fibre vil endre strukturen til det granulære skjelettet, mens fleksible fibre vil fylle rommet mellom dem. Stive fibre dytter partikler vekk fra hverandre, selv om størrelsen på fibre er mye mindre enn partiklene. Dette øker porøsiteten i det granulære skjelettet.
- Overflaten til fibre er ulik fra sement og tilslag.
- Stålfibre har ofte forskjellig form for å forbedre forankringen mellom fiberen og matriksen. Friksjon mellom stålfiber med endeforankring og tilslag er større sammenlignet med rett stålfiber. [2]

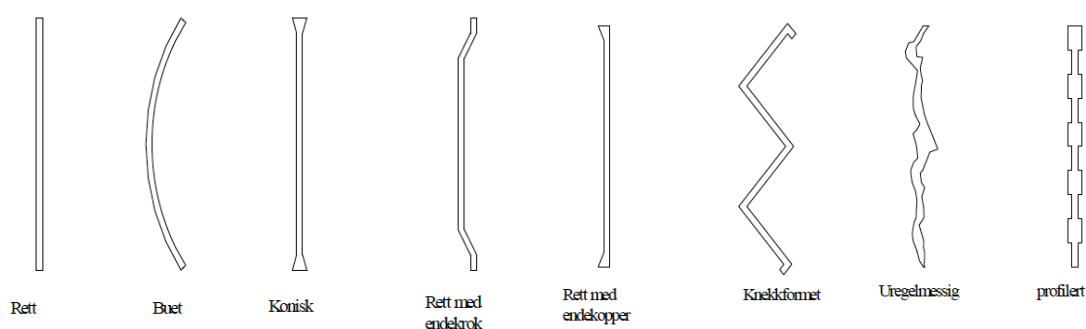
2.7.1. Stålfiber

Stålfiber er den mest utbredte fibertypen som blir brukt til forsterkning av betong. I utgangspunktet blir stålfiber brukt til å kontrollere eller unngå plastisk- og uttørkingssvinn. Stålfiber i betong forbedrer blant annet duktil oppførsel før brudd, bøyestrekfasthet, reduserer sprekke og forbedrer nedbrytningstiden. [31] Ved små doseringer av stålfiber vil ikke dette ha stor innvirkning på konsistensen til betongen, men det vil redusere flyten noe. Hvis doseringen av stålfiber er over 40 kg/m^3 , ca. 0.5 vol%, vil fiberen ha stor innvirkning på konsistensen. [29]

Stålfiber har som regel et rundt tverrsnitt med en diameter på 0.5-1.0 mm og en lengde på 30-60 mm. Den mest anvendte typen har en endeforankring som forbedrer koblingen mellom fiber og matriks. Den kurvede enden gir større friksjon enn hvis fiberen er helt rett. [32] [2] Stålfiber

egner seg for en homogen innblanding i betong. Spesifikasjoner og krav til stålfiber for betong er gitt i NS-EN 14889-1. [29]

For at fiberen skal få en god heft med matriksen blir de ofte deformert, med for eksempel en endekrok eller bølgete form. For at betongen skal gå til brudd må fiberen enten bli brutt i to, eller bli rettet ut for å bli dratt ut av betongen. *Figur 1 - Fiberformer* viser en oversikt over forskjellige fiberformer. [34]



Figur 1 - Fiberformer [29]

Korrosjon i stålfiberarmert betong er mindre skadelig enn korrosjon i tradisjonelt armert betong, grunnet størrelsen til fiberen. Stålfiber har en mindre størrelse enn det armeringsjern har, og vil derfor bli bedre beskyttet av det alkaliske miljøet til betongen. [35] Hvis fibre som binder sammen sprekkene blir utsatt for korrosjon vil konstruksjonen bli svakere. Korrosjon av stålfiber kan også føre til rustflekker i overflaten, noe som ikke påvirker styrken, bare utseende til konstruksjonen. [36]

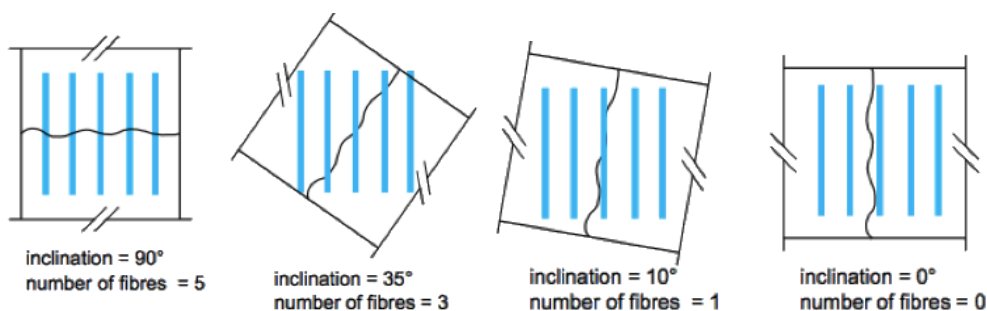
2.8. Fiberarmering i selvkomprimerende betong

Selvkomprimerende fiberarmert betong kombinerer fordelene til selvkomprimerende betong i fersk tilstand med fordelene fibre gir i herdet tilstand. [1] Selv om det blir tilsatt fiber kan betongen beholde selvkomprimerbarheten, men fibre vil påvirke egenskapene i den ferske fasen. [1] [2] Ved å tilsette fiber vil både plastisk viskositet og flytespenning bli påvirket. Synkutbredelsesmålet blir lavere og betongen får dårligere flyt. De reologiske egenskapene blir ikke bare påvirket av mengden (volumprosent) fiber som blir tilsatt men også størrelsen på

fiberen. Ved en gitt volumprosent og fiberlengde, vil en tynnere fiber gi i større mengde fiber enn en tykkere fiber. Dette resulterer i en stivere betong. [37]

Når synkutbredelsen blir redusert, kan stålfibrene skape blokkering fordi de ikke klarer å passere gjennom gitteret i tradisjonell armering. Dette fører til dårlig distribusjon av fibrene og dårlig kvalitet på overflaten. [1] [37] Blokkeringen kan også føre til at fibrene blir separert fra betongen. [1] For å unngå blokkering må avstanden mellom armeringsjernene i den tradisjonelle armeringen må økes. En tommelfingerregel basert på forsøk sier at åpningen mellom armeringsjernene som er vinkelrett på strømningsretningen burde være to ganger så stor som lengden til fiberen. [1] [37]

Fibrene i selvkompimerende betong orienterer seg på linje med strømretningen til den ferske betongen. Lengre fibre følger strømretningen bedre enn små fibre. [2] En bedre orientering av fibre fører til at styrken mot sprekkdannelse øker. [1] Orientering av fibre vil også ha en innvirkning når sprekkene har oppstått. Et høyere antall fiber som krysser gjennom bruddflaten gir en bedre motstand mot videre oppsprekking. *Figur 2 - Orientering av fiber* viser innvirkningen orienteringen på fiberen har ved oppsprekking. Dette vil også bli forbedret ved bruk av mer fiber. Ved en høy fiberdosering vil det være fler fiber som går gjennom bruddflaten som gir en høyere mekanisk ytelse. [37]



Figur 2 - Orientering av fiber [37]

Ved å tilsette fiber i selvkompimerende betong endrer man strukturen til det granulære skjelettet. Pakningsdenisteten blir redusert, og for å kompensere for dette trengs det et høyere innhold av fine korn. [2]

Når en stabil selvkomprimerende betong blir tilsatt stålfiber, vil det resultere i en stivere og tørrere blanding. For å kompensere er det vanlig å tilsette superplastiserende stoffer for å en betong med bedre flyt. Dette fører til en større risiko for separasjon av betongen. [37]

3. Proporsjonering

I denne oppgaven vil det bli utført flere labforsøk på selvkomprimerende betong tilsatt stålfiber. Det er et ønske om å finne en optimal sammensetning av materialer for å oppnå en mest mulig stabil betong. Følgende tester skal bli utført for alle betongblandingene:

- Fersk betong:
 - o SU-test
 - o SUR-test
 - o L-boks-test
- Herdet betong:
 - o Trykkfasthet
 - o Spaltestrekkfasthet
 - o E-modul
 - o Bøyestrekfasthet

Det vil i tillegg bli utført beregninger for å finne:

- Rest bøyestrekfasthet
- Rest strekkfasthet
- Bruddenergi

De overnevnte beregningene vil bruke resultatene fra testen utført for bøyestrekfasthet.

3.1. Prøveplan

Tabell 1 - Prøveplan viser prøveplanen for oppgaven. Det vil totalt støpes ut 12 resepter:

Tabell 1 - Prøveplan

	Stålfiber [vol%]	Matriksvolum [l/m ³]	Antall terninger	Antall sylindere	Antall bjelker
Ref.	0	340	3	0	0
Resept 1	0.5	340	3	0	0
Resept 2	0.5	340	3	4	2
Resept 3	0.8	340	0	0	0

Resept 4	0.8	355	3	4	2
Resept 5	0.8	370	3	2	1
Resept 6	0.8	380	3	2	1
Resept 7	0.8	385	3	2	1
Resept 8	1.0	600	3	2	1
Resept 9	1.0	600	3	2	1
Resept 10	1.0	600	3	2	1
Resept 11	1.0	600	3	2	1
Resept 12	1.0	600	3	2	1

Referansebetong og resept 1 vil bli utført i samarbeid med en medstudent hvor det vil bli brukt Norcem Anlegg FA. De andre reseptene vil bruke Norcem Standard FA, som vil føre til en forskjell i trykkfasthet mellom disse reseptene.

3.2. Referansebetong

Det vil bli laget en betongblanding uten tilsatt stålfiber. Synkutbredelsesmål vil bli utført for å se om blandingen er kvalifisert som selvkomprimerende betong. Blandingens vil også bli støpt ut i tre terninger for å så bli trykktestet, se resept 1 i *Tabell 1 - Prøveplan*.

Resultatene fra referansebetongen vil bli sammenlignet med betong tilsatt 0.5 vol% fiber, se resept 2 i *Tabell 1 - Prøveplan*. Det vil bli undersøkt hvordan tilsetning av fiber innvirker på synkutbredelsen til den ferske betongen. I tillegg vil det bli undersøkt om fiberen har en innvirkning på trykkfastheten til betongen.

3.3. Materialer og proporsjonering

Se *Tabell 2 - Materialer* for en oversikt over materialene brukt i betongblandingene.

Tabell 2 - Materialer

Materiale	Type
Grus 0/8mm	NorStone Årdal
Stein 8/16mm	NorStone Årdal
Stein 16/22mm	Velde AS
Sement	Norcem Standard FA Norcem Anlegg FA
Bindemiddel	Elkem Microsilica
Tilsetningsstoff	Dynamon SX-N
Vann	-

3.3.1. Tilslag

Tilslaget som blir brukt i blandingene er NorStone Årdal: 0/8 mm og 8/16 mm. Tilslag fra Årdal gir ofte lite hulrom på grunn av avrundet partikkelform. [8]

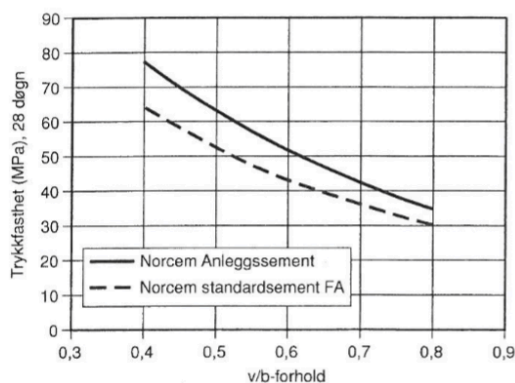
I tillegg til tilslaget fra NorStone Årdal vil det bli brukt tilslag fra Velde i størrelse 16/22. Velde er knust tilslag av granitt. [38] Siden tilslaget er knust vil det ikke være like avrundet som tilslaget fra Årdal. Skarpe kanter kan ha en påvirkning på blandingen, se kapittel 2.1 *Tilslag*.

3.3.2. Sement

I denne oppgaven vil det i hovedsak bli brukt Norcem Standard FA. Sementen inneholder 20% flyveaske. Standardsement er utviklet for å bli brukt i ordinære konstruksjoner. Standardsementen er relativt finmalt og har en lav vekt som gir den gode arbeidsegenskaper. [8]

Den første blandingen inneholder Norcem Anlegg FA. Anleggssement inneholder 20% flyveaske. Sementen er utviklet for å bli brukt i større konstruksjoner som broer og havner. Ved lave v/c-tall vil denne sementen ha veldig bra støpelighet. [8]

Sement med flyveaske er mer finmalt enn ren Portland sement som vil føre til høyere flytmotstand. FA sement vil derfor gi en sement med bedre stabilitet, men med lavere flytegenskaper enn ren Portland sement. [8]



Figur 3 - Forhold mellom trykkfasthet og v/b-forhold [39]

Figur 3 - Forhold mellom trykkfasthet og v/b-forhold viser hvilken innvirkning v/c-tallet har på trykkfastheten til betongen etter 28 døgn. I figuren blir det også vist at trykkfastheten til anleggssement er høyere enn trykkfastheten til standardsement. Det vil si at blandingen som bruker Norcem Anlegg FA vil få en høyere trykkfasthet enn blandingene som bruker Norcem Standard FA.

3.3.3. Silikastøv

Silikastøvet brukt i denne oppgaven er Elkem Microsilica 940U. Mikrosilika fra Elkem gir betongen en tettere mikrostruktur, lavere permeabilitet og høy elektrisk motstand, som fører til forbedret holdbarhet. Siden mikrosilikaen gir en lavere permeabilitet, vil det ta lenger tid for klorid å trenge inn i betongen, og det vil derfor ta lenger tid før korrosjon initieres. [40]

Gjennom bruk av Elkem Microsilica kan man forbedre de reologiske egenskapene til betong. Disse egenskapene kan forhindre både blødning og separasjon. Dette gjør at mikrosilika er godt egnet i selvkompimerende betong, siden den gir en mer robust blanding. [40]

Elkem Microsilica 940U er ubehandlet silikastøv. Ved bruk vil det forbedre egenskapene og ytelsen til betongen. Det er et høyt reaktivt pozzolant materiale som optimerer pakningen til partiklene i blandingen. [41]

3.3.4. Tilsetningsstoff

Dynamon SX-N er et effektivt superplastiserende stoff fra Mapei. Den kan bli brukt på tre forskjellige måter: [42]

1. Reduserer mengde tilsatt vann uten å endre støpeligheten.
2. Forbedrer støpeligheten sammenlignet med betong med samme v/c-tall.
3. Reduserer vannmengde og sementmengde uten å forandre betongens mekaniske styrke.

Det er anbefalt å bruke mellom 0.3-2.0% av sementmengden. Betongen vil være mer bearbeidelig over lengre tid ved økt dosering. [42]

3.3.5. Stålfiber

Dramix 4D er laget spesielt for å påvirke sprekker på 0.1-0.3 mm. [43] Ved bruk av Dramix 4D oppnås det: [44]

- **Optimalisert sprekkekontroll:** Fiberen har krokete ender og høyt lengde-diameter forhold. Dette fører til ett tett nettverk av fiber som forbedrer kapasiteten til å tåle laster som beskytter mot oppsprekking.
- **Langvarig ytelse:** Fiberen er limt sammen, noe som skal forhindre fibre fra å klumpe seg sammen til en ball. Dette fører til at fibre blir homogent fordelt, som kan gi en tynnere, men sterkere betong.
- **Mer økonomisk:** Tykkelsen til betongen blir optimalisert, som fører til redusert behov for materialer. Behovet for dyrere og tidkrevende løsninger ved tradisjonell armering blir eliminert. [44]

3.4. Betongresept

For å utrede betongresepten blir regnearket ”*Proporsjonering av betong*” brukt. Regnearket er utviklet av Sverre Smeplass. En enkel hovedregel som kan følges når betongen skal proporsjoneres er som følger: [39]

- **Matrikssammensetningen** styrer egenskapene til herdet betong. Siden sementlimet har mindre bestandighet og styrke enn tilslaget vil matrikssammensetningen bestemme betongens bestandighet og fasthet.
- **Tilslagssammensetningen** styrer egenskapene til fersk betong. Egenskapene til tilslaget bestemmer hvor stor mengde matriks som må til for å gi riktig støpelighet.

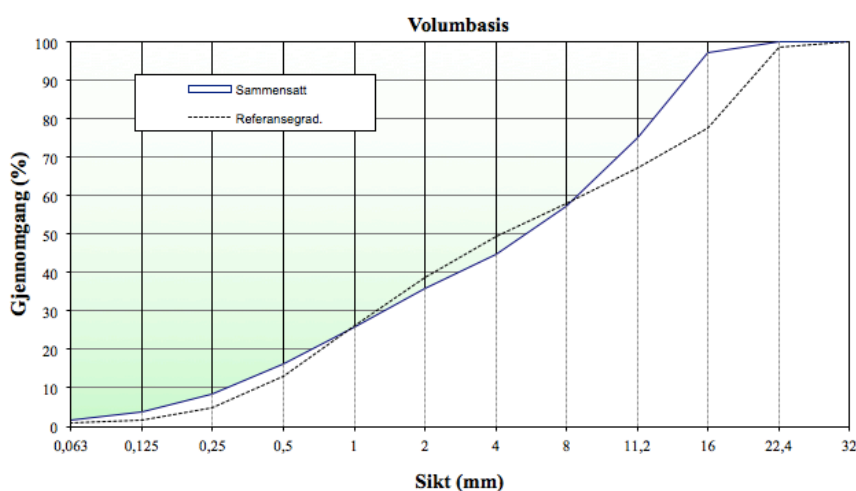
Ved å følge denne regelen kan resepten utarbeides på følgende måte: [39]

1. **Tilslagets sammensetning:** forholdet mellom det grove og fine tilslaget bestemmes
2. **Bindemiddelsammensetning og tilsetningsstoffer:** mengde og type bindemiddel og tilsetningsstoff blir bestemt
3. **Matriksvolum:** når de overnevnte punktene er bestemt vil matriksvolumet gi seg selv

3.4.1. Fremgangsmåte for utvikling av betongresept

1. Siktkurver

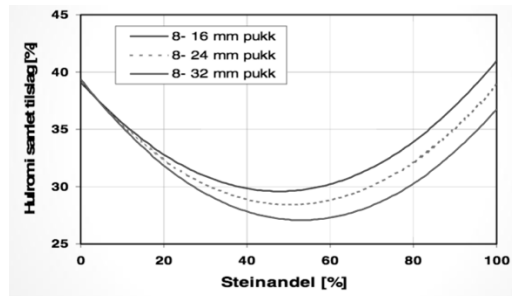
Tilslaget har blitt siktet av leverandør og det har blitt utarbeidet siktkurver for de ulike tilslagene. Siktkurvene blir så importert til regnearket ”Proporsjonering av betong”. De ulike tilslagene blir proporsjonert opp for å lage en sammensatt kurve som ligger så nært referansegraden som mulig. Se *Figur 4 - Siktkurve*.



Figur 4 - Siktkurve

2. Tilslag

For å bestemme sammensetningen av tilslag brukes grafen i *Figur 5 - Forhold mellom hulrom i tilslag og steinandel*. Ved største steinstørrelse på 16 mm, vil man oppnå minimalt hulrom ved en steinandel på 46.5%.



Figur 5 - Forhold mellom hulrom i tilslag og steinandel [39]

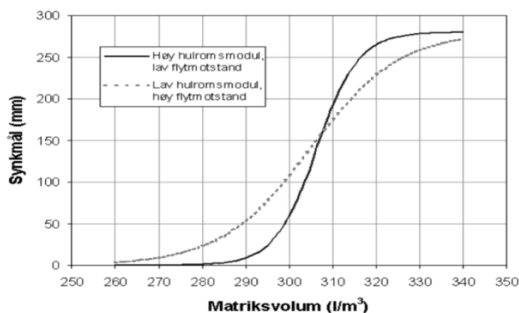
Steinandelen blir ført inn i proporsjoneringsarket. Resterende prosent blir ført inn på sandandelen. Se *Figur 6 - Fordeling av tilslag* for andel av tilslag.

Fraksjon	Navn	Densitet [kg/m ³]	Abs. fukt [%]	Alk. reakt. [%]	Klorider [%]	Andel		Bruk
						volum	vekt	
I	Ardal 0/8 mm nat. vask.	2650	0,5	0,0	0,00	0,535	0,530	ok
II	Ardal 0/2 mm nat. vask	2650	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
III	Ardal 8/16mm	2700	0,5	0,0	0,00	0,465	0,470	ok
IV	Ardal 16/22 mm	2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
V		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VI		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VIII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
IX		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
X		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
Sammensatt		2673		0,0	0,00	1,000	1,000	

Figur 6 - Fordeling av tilslag

3. Matriksvolum

Valg av matriksvolum bestemmes ved prøveblanding. For ordinær konstruksjonsbetong ligger matriksvolumet mellom 300 og 320 l/m³. Grafen i *Figur 7 - Forhold mellom synkmål og matriksvolum* viser at det trengs et matriksvolum på 340 l/m³ for å få en synkmål på over 250 mm.



Figur 7 - Forhold mellom synkmål og matriksvolum [39]

Det skal i denne oppgaven lages selvkomprimerende betong, som gjenkjennes med synkmål på 250 mm. Det blir på grunnlag av dette brukt et matriksvolum på 340 l/m³. Matriksvolumet vil derimot endres underveis, for å oppnå bedre støpelighet på betongen og forsikre at betongen får selvkomprimerende egenskaper.

4. V/c-tall

Figur 3 - Forhold mellom trykkfasthet og v/b-forhold viser at trykkfastheten etter 28 døgn blir høyere ved bruk av lavere v/c-tall. [8] Som skrevet kapittel 2.2.1 V/c-tall vil styrken reduseres og permabiliteten økes når det blir brukt v/c-tall høyere enn 0.42. På bakgrunn av dette vil det bli brukt et v/c-tall på 0.40.

Legg så overnevnte verdier inn i proporsjoneringsarket, som vist i Figur 8 - Proporsjoneringsark, i tillegg til andre ønskelige egenskaper som silikainnhold og fiberinnhold.

Initialparametre	Verdi	k
$v/(c+\Sigma k_p)$	0,40	-
s/c (silikastøv) [%]	5,0	1,00
f/c (filler, flyveaske) [%]	0,0	0,00
Luftinnhold [%]	2,0	-
Tilsetningsstoff	% av C	% av S
Dynamon SX-N	1,50	0,00
	0,00	0,00
	0,00	0,00
	0,00	0,00
Fiber	Vol %	
Stålfiber	0,5	
PP-fiber	0,0	
Matriks	Verdi	
Ønsket matriksvolum [l/m ³]	340	
Oppnådd matriksvolum** [l/m ³]	340	
Volum sementlim [l/m ³]	316	
v/p	0,35	

Figur 8 - Proporsjoneringsark

5. Resept

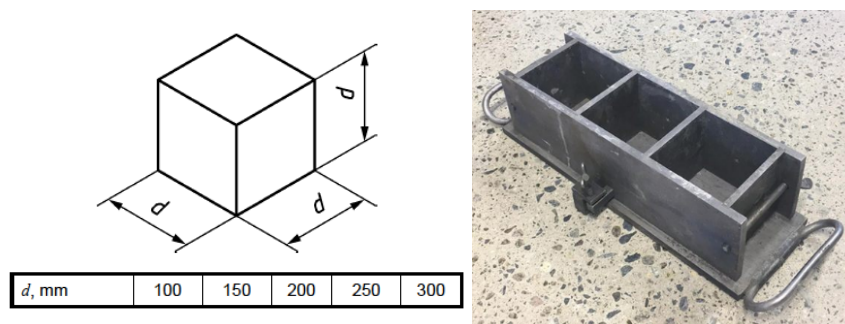
Med alle verdiene satt inn i proporsjoneringsarket vil arket generere en betong resept som vist i *Figur 9 - Betongresept*.

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem standard FA	402,4	20,122			20,122
Elkem Microsilica	20,1	1,006	50	1,006	2,012
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	169,0	8,451		-2,924	5,527
Absorbert vann	8,8	0,441			0,441
Ardal 0/8 mm nat. vask.	934,2	46,709	3,4	1,588	48,297
Ardal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Ardal 8/16mm	828,4	41,421	0,0	0,000	41,421
Ardal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
SP-SKB fiber	8,0	0,402	82	0,330	0,402
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	39,0	1,950			1,950
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

Figur 9 - Betongresept

3.5. Støping

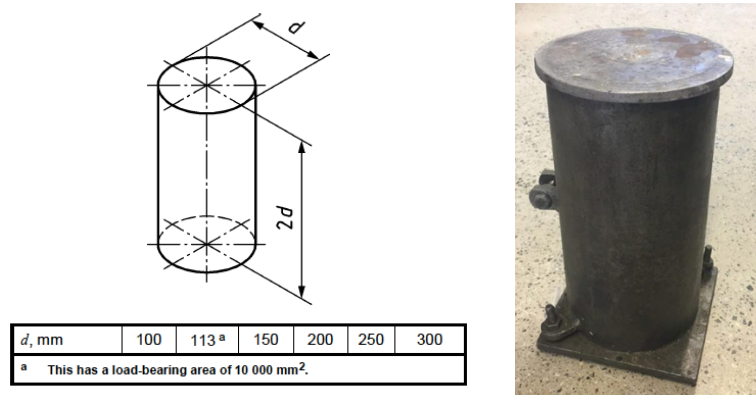
Terninger blir støpt ut i en form med dimensjonen 100x100x100 mm, se *Figur 10 - Støpeform terning, 100x100x100 mm*. Det vil bli støpt ut tre terninger som brukes til å bestemme trykkfastheten, se kapittel 4.3.1 *Trykkfasthet*, til betongen. Terningene vil bli avformet etter et døgn for å så bli lagt i vannbad på ca. 20°C. Etter 28 døgns herding skal trykkfastheten testet.



Figur 10 - Støpeform terning, 100x100x100 mm

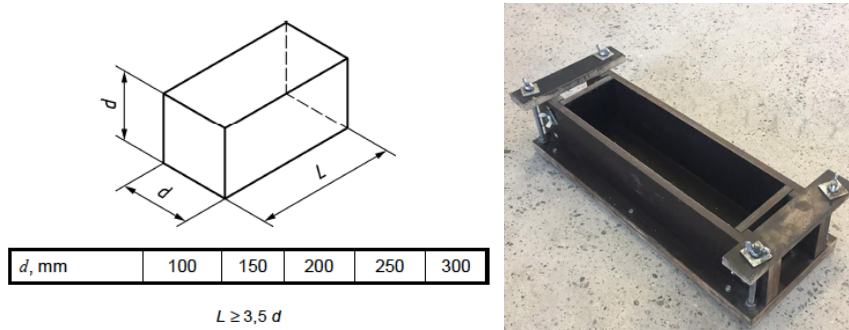
Sylindere blir støpt ut i en form med dimensjonen på 150x300 mm, se *Figur 11 - Støpeform sylinder*. Det vil bli støpt ut to sylindere hvorav en brukes til å bestemme spalttestrekkfastheten, se kapittel 4.3.2 *Spalttestrekkfasthet*, og en brukes til å måle E-modul, se kapittel 4.3.3

Elastisitetts modul. Sylinderne vil bli avformet etter et døgn for å så bli lagt i vannbad på ca. 20°C. Etter 28 døgns herding skal spaltstrekkfasthet og E-modul testet.



Figur 11 - Støpeform sylinder

Bjelken blir støpt ut i en form med dimensjonen 150x150x550 mm, se *Figur 12 - Støpeform bjelke, 150x150x550 mm*. Det vil bli støpt ut en bjelke som brukes til å bestemme bøyestrekfastheten, se kapittel 4.3.4 *Bøyestrekfasthet*, til betongen. Bjelken vil bli avformet etter et døgn for å så bli lagt i vannbad på ca. 20°C. Etter 28 døgns herding skal bøyestekfastheten testet.



Figur 12 - Støpeform bjelke, 150x150x550 mm

3.6. Klassifisering

Fiberbetong blir klassifisert på samme måte som ordinærbetong, ved trykfasthet med antagelse av samme forhold mellom strekkfasthet og trykkfasthet. Valg av fasthetsklasse og bestandighetsklasse skal være i overenstemmelse med Eurocode 2, som vist i *Tabell 3 - Fasthetsklasser*. I tillegg vil fiberbetong klassifiseres i henhold til betongens karakteristiske rest strekkfasthet for 2.5 mm rissvidde, sett i *Tabell 4 - Restfasthets klasse*. [29]

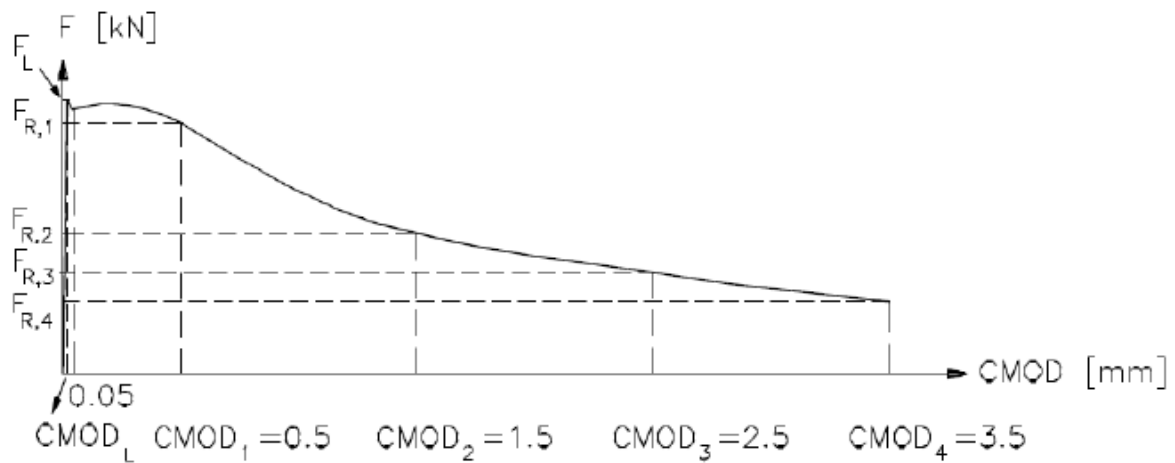
Tabell 3 - Fasthetsklasser [29]

	Fasthetsklasser							
	B20	B25	B30	B35	B40	B50	B60	B70
Sylinder trykkfasthet	20	25	30	35	40	50	60	70
Terning trykkfasthet	25	30	37	45	55	67	68	78
Strekkfasthet (aksial strekk) $F_{ctk,0,05}$	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.9	3.1	3.2

Tabell 4 - Restfasthets klasse [29]

Restfasthets Klasse	R0.5	R0.75	R1.0	R1.5	R2.0	R2.5	R3.0	R3.5
$F_{ftk,res2,5}$	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
$F_{R,3}$ (2.5mm)	1.3	2.0	2.7	4.0	5.4	6.7	8.1	10.8

For å kunne bestemme rest bøyestrekfasthet må proporsjonalitetsgrensen og last ved fire spesifiserte rissvidder (CMOD), som vist i *Figur 13 - Last ved fire rissvidder*, være funnet. [29]



Figur 13 - Last ved fire rissvidder [29]

De fire spesifiserte rissviddene er:

- $F_{Rk,1}$ – last ved 0.5 mm rissvidde
- $F_{Rk,2}$ – last ved 1.5 mm rissvidde
- $F_{Rk,3}$ – last ved 2.5 mm rissvidde
- $F_{Rk,4}$ – last ved 3.5 mm rissvidde

Se kapittel 4.3.6 *Bestemmelse av rest bøyestrekfasthet og rest strekkfasthet* for beregning av rest bøyestrekfasthet og rest strekkfasthet.

4. Testmetoder

4.1.1. Fuktinnehold

Fuktinnhold til tilslaget blir målt i henhold til ”Statens Vegvesen 14.621-Fremstilling av betong i laboratoriet”. [45] For å oppnå best mulig resultat vil fuktinnholdet i tilslaget bli målt før hver blanding.



Figur 14 - Delvis tørket tilslag

Start ved å ta en prøve av tilslaget. Pass på at prøven blir tatt fra midten av posen som tilslaget ligger i, tilslaget på toppen kan være uttørket og derfor gi et galt fuktinnhold. Plasser prøven i ett jevnt lag i en form. Vei deretter tilslaget for å finne vekten av vått tilslag. Varm opp tilslaget til alt er tørket ut, det vil få en lys gråfarge, se *Figur 14 - Delvis tørket tilslag*. Vei deretter det tørre tilslaget. Fuktprosenten regnes ut på følgende måte: [45]

$$FP = \frac{F_T}{M_t} \times 100 \quad (4-1)$$

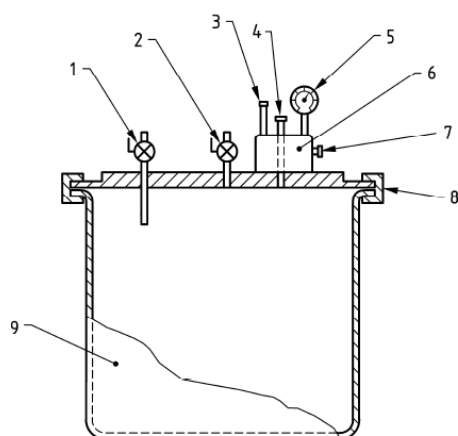
Hvor

- FP – fuktprosent [%]
- F_T – total fukt i tilslaget [g]
- M_t – masse av helt tørt tilslag [g]

4.2. Fersk betong

4.2.1. Luftinnhold

Luftinnholdet i betong blir målt i henhold til NS-EN 12350-7. [46] En åtte liters bøtte fylles opp med betong, se *Figur 15 - Bøtte brukt til å måle luftinnhold* og *Figur 16 - Luftmåler*.



Figur 15 - Bøtte brukt til å måle luftinnhold [46]

Tegnforklaring:

1. Kuleventil
2. Kuleventil
3. Luftpumpe
4. Hevarm-ventil
5. Trykkmåler
6. Luftkammer
7. Justeringsventil
8. Klemme
9. Bøtte

Betongen er selvkomprimerende, og det er derfor ikke behov for å komprimere lagene. Kanten på bøtten må rengjøres grundig slik at lokket blir sittende helt tett inntil bøttekanten. Når lokket er klemt fast til bøtten skal begge kuleventilene åpnes. Det blir deretter sprøytet vann inn i den ene ventilen, helt til en jevn strøm med vann kommer ut av den andre, da blir begge ventilene lukket. Pump opp trykket til måleren ligger stabilt på null. Trykk ned hevarmen og les direkte av lufttrykket. [46]



Figur 16 - Luftmåler

4.2.2. Densitet

Densitet i betong blir målt i henhold til NS-EN 12350-6. [47] Bøtten som ble brukt til å måle luftinnhold i fersk betong, blir også brukt her. Først veies bøtten, som deretter blir fylt med vann og blir veid på nytt for å finne bøttens volum. Deretter fylles bøtten med betong og veies. Densitet regnes ut på følgende måte: [47]

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4-2)$$

Hvor

- D – densitet til den ferske betongen [kg/m^3]
- m_1 – vekt av tom beholder [kg]
- m_2 – vekt av beholder med betong [kg]
- V – volum av beholderen [m^3]

4.2.3. Synkutbredelsesmål

Synkutbredelsesmål blir målt i henhold til NS-EN 12350-8. [48] Plasser en flat og glatt stålplate på en horisontal flate. Fukt stålplaten og kjeglen før testing. Plasser kjeglen i midten av stålplaten og hold den på plass ved å stå på fotstykkene, slik at ingen betong renner ut. Fyll opp

kjeglen med betong, uten noe form for komprimering. Vask så vekk betong fra stålplaten. Pass på at den fylte kjeglen ikke står stille i mer enn 30 sekunder. Kjeglen løftes deretter forsiktig rett opp uten å forstyrre flyten til betongen. Vent til utbredelsen av betongen har stabilisert seg og mål den største diameteren, d_1 , og diameteren rettvinklet på d_1 , kalt d_2 . Synkutbredelse regnes ut på følgende måte: [48]

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4-3)$$

Hvor

- SF – synkutbredelse [mm]
- d_1 – største diameter av utspredningen [mm]
- d_2 – diameteren vinkelrett på d_1 [mm]

For at betongen skal bli kvalifisert som selvkomprimerende betong må synkutbredelsen være større eller lik 650mm. [48]

4.2.4. Synkutbredelse med ring

Synkutbredelse med ring blir målt i henhold til NS-EN12350-12. [49] Plasser en flat og glatt stålplate på en horisontal flate. Fukt stålplaten og kjeglen før testing. Plasser kjeglen i midten av stålplaten og hold den på plass ved å stå på fotstykkene, slik at ingen betong renner ut. Se *Figur 17 - Synkutbredelse med ring* for å se plassering av ring og kjegle. Fyll opp kjeglen med betong, uten noe form for komprimering. Vask så vekk betong fra stålplaten. Pass på at den fylte kjeglen ikke står stille i mer enn 30 sekunder. Kjeglen løftes deretter forsiktig rett opp uten å forstyrre flyten til betongen. Vent til utbredelsen av betongen har stabilisert seg og mål den største diameteren, d_1 , og diameteren rettvinklet på d_1 , kalt d_2 . Synkutbredelse med ring regnes ut på følgende måte: [49]

$$SF_J = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4-4)$$

Hvor

- SF_J – synkutbredelse for J-ring [mm]
- d_1 – største diameter av utspredningen [mm]
- d_2 – diameteren vinkelrett på d_1 [mm]

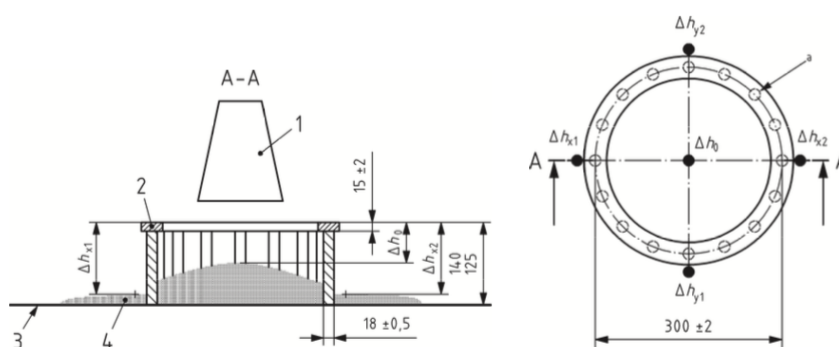
Synkutbredelse med ring kan i tillegg bli brukt for å måle passeringsevnen til betongen, altså hvor godt betongen beveger seg rundt hindringer. Dette er et alternativ til L-boks testen, selv om resultatene ikke kan bli direkte sammenlignet. Passeringsevnen regnes ut på følgende måte: [50]

$$PJ = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} - \Delta h_0 \quad (4-5)$$

Hvor

PJ – passeringsevnen [mm]

Δh – målte høyder [mm]



Figur 17 - Synkutbredelse med ring [49]

4.2.5. L-boks

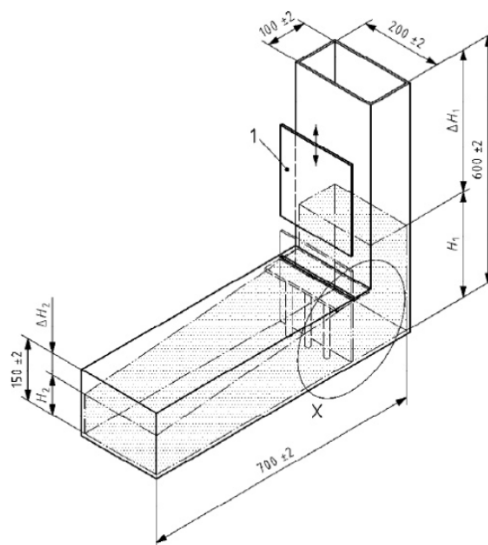
L-boks blir målt i henhold til NS-EN 12350-10. [50] Sett L-boksen, se *Figur 18 - L-boks*, på en rett overflate og fukt apparatet. Steng åpningen mellom den horisontale og vertikale delen

med en skillevegg. Fyll opp betong i den vertikale beholderen, uten noe vibrering eller komprimering. Løft så opp skilleveggen og la betongen flyte ut. Passeringsevnen regnes ut på følgende måte: [50]

$$PL = \frac{H_2}{H_1} \quad (4-6)$$

Hvor

- PL – passeringsevne forholdet [mm]
- H_1 – gjennomsnittsdypde av betongen i den vertikale boksen [mm]
- H_2 – gjennomsnittsdypde av betongen i enden av den horisontale boksen [mm]



Figur 18 - L-boks [50]

L-boksen blir brukt til å måle passeringsevnen til selvkomprimerende betong. L-boksen blir brukt til å vurdere hvor bra betongen flyter gjennom små åpninger uten segregering og blokkering. L-bokser kan inneholde armeringsstenger for å se hvor godt betongen flyter rundt armering. L-boksen som blir brukt i denne oppgaven er uten armering. [50]

4.3. Herdet betong

4.3.1. Trykkfasthet

Trykkfastheten blir bestemt i henhold til NS-EN 12390-3. [51] Det vil bli støpt ut tre terninger av hver betongblanding, se kapittel 3.5 *Støping*. Etter ett døgn blir disse tatt ut av formen og lagt i vannbad i ca. 20°C. Etter 28 døgns herding vil terningene bli trykktestet.

Testen går ut på å belaste prøvestykket til den betongen går til brudd. Maksimum lasten som prøvestykket tåler blir registret, og resultatet kan brukes til å regne ut trykkfastheten. Trykkfasthet regnes ut på følgende måte: [51]

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4-7)$$

Hvor

- f_c – trykkfastheten [N/mm²]
- F – maksimumlast ved svikt [N]
- A_c – tverrsnittsarealet av prøvestykket [mm²]

Rengjør maskinen før bruk og se til at det ikke ligger igjen rester fra tidligere prøver. Tørk av prøvestykket og tilse at det ikke er noen ujevnheter eller misdannelser, dette kan føre til feil resultat. Plasser prøven slik at belastningen påføres vinkelrett på avstøpningsretningen, se *Figur 19 - Prøvestykke testes for trykkfasthet*. Maskinen belaster prøvestykket med en konstant hastighet på 0.5 MPa/s frem til brudd. Noter maksimum last i kN. [51]



Figur 19 - Prøvestykke testes for trykkfasthet

4.3.2. Spaltestrekkfasthet

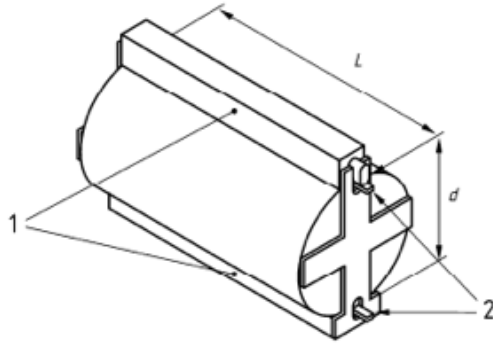
Spaltestrekkfasthet blir bestemt i henhold til NS-EN 12390-6. [52] Det vil bli støpt ut en sylinder av hver blanding, se kapittel 3.5 *Støping*. Etter ett døgn blir denne tatt ut av formen og lagt i vannbad i ca. 20°C. Etter 28 døgns herding vil spaltestrekkfastheten bli testet.

”Et sylindrisk prøvestykke utsettes for en trykkraft påført på et smalt område i lengderetningen. Den resulterende strekkraften vinkelrett på trykkretning fører til strekkbrudd i prøvelegemet.” Spaltestrekkfasthet regnes ut på følgende måte: [52]

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (4-8)$$

Hvor

- f_{ct} – spaltestrekkfastheten [MPa]
- F – maksimum last [N]
- L – lengden til prøvestykkets kontaktlinje [mm]
- d – fastsatt tverrsnitt [mm]



Figur 20 - Sylinder plassert i jig

Rengjør maskinen før bruk og påse at det ikke ligger igjen rester fra tidligere prøver. Tørk av prøvestykket og påse at det ikke er noen ujevnheter eller misdannelser, dette kan føre til feil resultat. Plasser prøven i sentrum av jiggen, avvik med tanke på plassering kan ha stor innvirkning på resultat, se *Figur 20 - Sylinder plassert i jig* og *Figur 21 - Prøvestykke testes for spaltetrekk*. Påse at øvre og nedre belastningsplate er parallelle. Maskinen belaster prøvestykket med en konstant hastighet på 0.5 MPa/s frem til brudd. Noter maksimum last i kN. [52]



Figur 21 - Prøvestykke testes for spaltetrekk

4.3.3. Elastisitetens modul

Elastisitetens modul blir bestemt i henhold til NS-EN 12390-13. [53] Det vil bli støpt ut en sylinder av hver blanding, se kapittel 3.5 *Støping*. Etter ett døgn blir denne tatt ut av formen og lagt i vannbad i ca. 20°C. Etter 28 døgns herding vil elastisitetens modulen bli testet.

”Et prøvestykke utsettes for aksial kompresjon, spenning og tøying blir registret, og stigningstallet til sekanten til spennings-tøynings kurven blir bestemt etter tre lastningscykluser.” Stabilisert elastisitetens modul regnes ut på følgende måte: [53]

$$E_{C,S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (4-9)$$

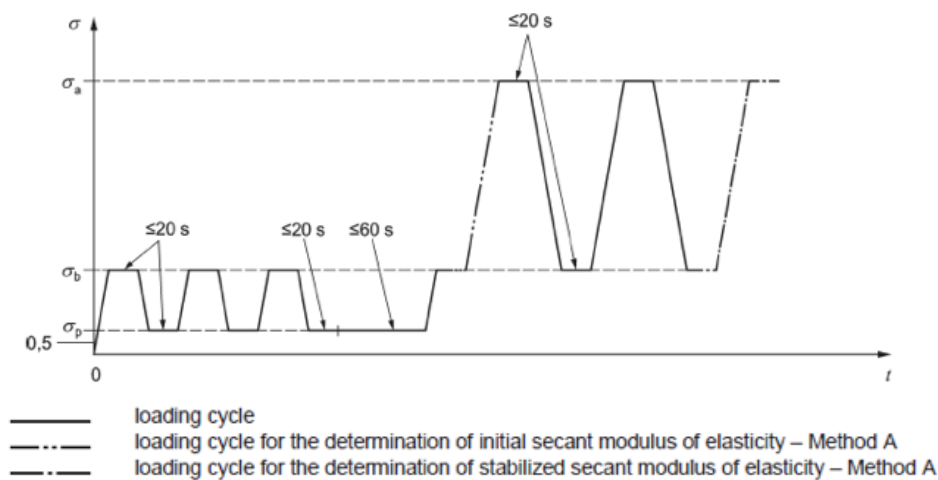
Hvor

- σ_a^m – øvre spenning
- σ_b^m – nedre spenning
- $\varepsilon_{a,3}$ – gjennomsnittstøying ved øvre spenning for tredje lastsyklus
- $\varepsilon_{b,2}$ – gjennomsnittstøying ved nedre spenning for andre lastsyklus



Figur 22 - Prøvestykke elastisitetens modul testes

Rengjør maskinen før bruk og påse at det ikke ligger igjen rester fra tidligere prøver. Tørk av prøvestykket og påse at det ikke er noen ujevnheter eller misdannelser, dette kan føre til feil resultat. Prøvelegemet blir plassert i en stående posisjon på en horisontal overflate. En elastisitetmåler blir så montert på prøvelegemet før den blir plassert sentralt i maskinen, se *Figur 22 - Prøvestykke elastisitets modul testes*. Før testen starter, blir elastisitetmåleren kalibrert slik at den er i nullposisjon. [53]



Figur 23 - Lastsykluser ved måling av elastisitets modulus [53]

Spenningene som vil bli brukt av testmaskinen bestemmes på følgende måte: [53]

$$\text{Øvre spenning, } \sigma_a: \quad \frac{f_c}{3} \quad (4-10)$$

$$\text{Nedre spenning, } \sigma_b: \quad 0.10 \times f_c \leq \sigma_b \leq 0.15 \times f_c \quad (4-11)$$

$$\text{Forhåndslast spenning, } \sigma_p: \quad 0.5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b \quad (4-12)$$

Det vil bli utført tre lastsykluser med maks spenning lik nedre spenning, se *Figur 23 - Lastsykluser ved måling av elastisitets modulus*. Spenningen vil bli økt med en hastighet på 0.6 MPa/s fra forhåndslast spenning til nedre spenning. Hold nedre spenning over en periode som ikke overskrider 20 sekunder. På slutten av perioden registreres tøyningen og gjennomsnittstøyningen, $\varepsilon_{b,m}$, blir så regnet ut. Det blir gjennomført tre lastsykluser. [53]

Øk så spenningen med en hastighet på 0.6 MPa/s frem til øvre spenning σ_a er nådd og hold spenningen i en periode som ikke overskrider 20 sekunder. Ved første og andre syklus blir spenningen redusert med en hastighet på 0.6 MPa/s ned til nedre spenning og hold i en periode som ikke overskrider 20 sekunder. På slutten av perioden med øvre spenning i første og tredje syklus registreres tøyningen og gjennomsnittstøyningen, $\varepsilon_{a,1}$ og $\varepsilon_{a,3}$ blir deretter regnet ut. På slutten av perioden med nedre spenning i andre syklus registreres tøyningen og gjennomsnittstøyningen, $\varepsilon_{b,2}$ blir deretter regnet ut. [53]

4.3.4. Bøystrekkfasthet

Bøystrekkfasthet blir bestemt i henhold til RILEM TC 162-TDF - ”*Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*” og NS-EN 12390-5. [54] [55] Det blir støpt ut en bjelke av hver blanding, se kapittel 3.5 *Støping*. Etter ett døgn blir denne tatt ut av formen og lagt i vannbad i ca. 20°C. Etter 28 døgns herding blir bøystrekkfasthet testet.

Testen kan utføres på bjelker med ett tverrsnitt på 150x150mm, og en lengde på minimum 550mm. Det kan ikke benyttes fiber som er lengre enn 60mm og tilslag større enn 36mm. I denne oppgaven brukt en bjelke med tverrsnitt på 150x150mm og lengde på 550mm. Fiberen har en lengde på 60mm og D_{\max} er på 16mm. [54]

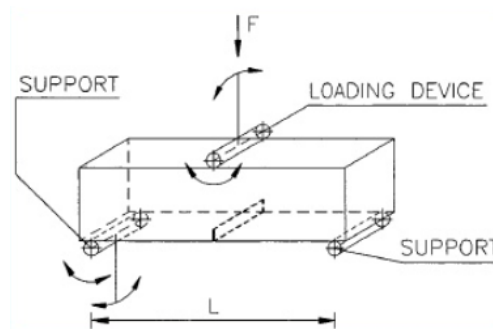
”*Et prøvestykke utsettes for et bøyemoment ved påføring av en last via øvre og nedre ruller. Den største lasten som prøvelegemet motstår registreres, og prøvelegemets bøystrekkfasthet beregnes.*” Bøystrekkfasthet regnes ut på følgende måte: [55]

$$f_{cf} = \frac{F \times I}{d_1 \times d_2^2} \quad (4-13)$$

Hvor

- f_{cf} – bøystrekkfastheten [MPa]
- F – maksimumlast [N]
- I – avstand mellom oppleggssrullene [mm]

- d_1 og d_2 – tverrsnittsmålene [mm]



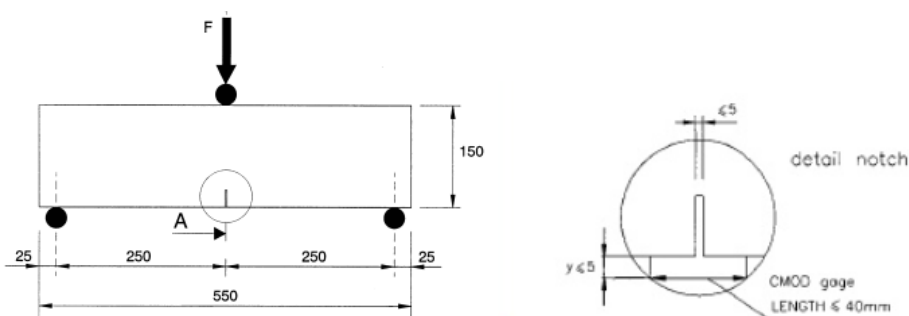
Figur 24 - Bjelke plassert i maskin [55]

Rengjør maskinen før bruk og påse at det ikke ligger igjen rester fra tidligere prøver. Tørk av prøvestykket og påse at det ikke er noen ujevnheter eller misdannelser, dette kan føre til feil resultat. Plasser prøvestykket sentrert i maskinen. De nedre rullene skal være plassert 500 mm fra hverandre, markert som L på *Figur 24 - Bjelke plassert i maskin*. Påfør belastning frem til brudd. Noter maksimum last. [55]

4.3.5. CMOD

CMOD, Crack Mouth Opening Displacement, blir bestemt i henhold til RILEM TC 162-TDF - "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete". [54] Det blir brukt samme bjelke som i kapittel 4.3.4 *Bøyestrekfasthet*.

Bjelkene får ett innsnitt på 25 mm ved bruk av sag på midten av bjelken dagen før testing, se *Figur 25 - Forklaring av innsnitt*. Den tørker i romtemperatur frem til testingen. [54]



Figur 25 - Forklaring av innsnitt

Rengjør maskinen før bruk og påse at det ikke ligger igjen rester fra tidligere prøver. Tørk av prøvestykket og påse at det ikke er noen ujevnheter eller misdannelser, dette kan føre til feil resultat. Plasser prøvestykket sentrert i maskinen. De nedre rullene skal være plassert 500 mm fra hverandre. Pass på at øverste rulle er plassert rett over innsnittet i bjelken. Deretter plasseres clip gauge-apparatet, se *Figur 26 - Clip gauge*, i innsnittet for å måle utviklingen i sprekkeåpningen. Påfør belastning frem til brudd og registrer sprekkestørrelsen. [54]



Figur 26 - Clip gauge

4.3.6. Bestemmelse av rest bøyestrekfasthet og rest strekkfasthet

Rest bøyestrekfasthet blir bestemt i henhold til COIN Project report 29-2011 ”*Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner*”. [29] Bruker resultatene fra kapittel 4.3.4 *Bøyestrekfasthet*.

”Den fiberarmerte betongens rest bøyestrekfasthet bestemmes fra bøyemomentet i standardiserte prøvebjelker ved aktuell rissvidde under antakelse av lineær spenningsfordeling over tverrsnittshøyden.” Rest bøyestrekfastheten regnes ut på følgende måte: [29]

$$f_{R,i} = \frac{6 \times M_{Ri}}{b \times h^2} \quad (4-14)$$

Hvor

- $f_{R,i}$ – rest bøyestrekfasthet [MPa]
- $M_{Ri} = \frac{F_{Ri} \times L}{4}$ [Nmm]
- b – bredden av prøvestykket [mm]
- h – lengden på prøvestykket [mm]

Rest strekkfasthet blir bestemt i henhold til COIN Project report 29-2011 ”Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner”. [29] Bruker resultatene fra kapittel 4.3.4 Bøyestrekfasthet.

”Den fiberarmerte betongens karakteristiske rest strekkfasthet defineres som resulterende trekkraftresultant per arealenhet over et gjennomgående riss i betongen. I forbindelse med klassifisering av betong i rest strekkfasthetsklasser refererer rest strekkfasthet til en rissvidde på 2.5 mm.” Den karakteristiske verdien regnes ut på følgende måte: [29]

$$f_{Rk,i} = f_{R,i} \times s \times k \quad (4-15)$$

Hvor

- $f_{Rk,i}$ – karakteristisk verdi [MPa]
- s – standardavvik
- k – koeffisient lik 1.7

Standardavvik blir i denne oppgaven antatt til å være 1.5.

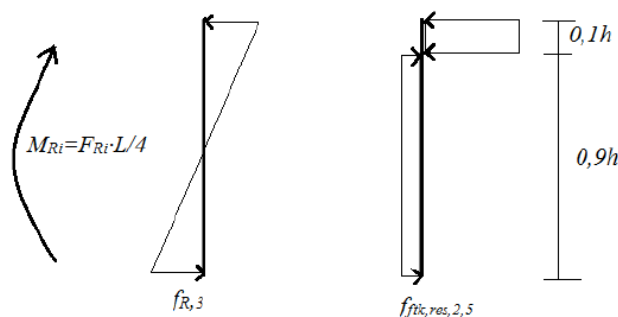
Rest strekkfasthet regnes ut på følgende måte: [29]

$$f_{ftk,res,2.5} = 0.37 \times f_{Rk,3} \quad (4-16)$$

Hvor

- $f_{ftk,res,2.5}$ – rest strekkfasthet ved 2.5 mm rissvidde [MPa]
- $f_{Rk,3}$ – karakteristisk rest bøyestrekfasthet ved 2.5 mm rissvidde [MPa]

Relasjonen mellom karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekkfasthet blir illustrert i *Figur 27 - Relasjon mellom karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekkfasthet*. [29]



Figur 27 - Relasjon mellom karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekkfasthet [29]

4.3.7. Bruddenergi

Bruddenergi blir bestemt i henhold til SINTEF ”Bruddenergi ved 3-punkts prøving av prismer med kjerv.” [56] Bruker resultatene fra 4.3.4 Bøyestrekfasthet og 4.3.5 CMOD.

Bruddenergi regnes ut på følgende måte: [56]

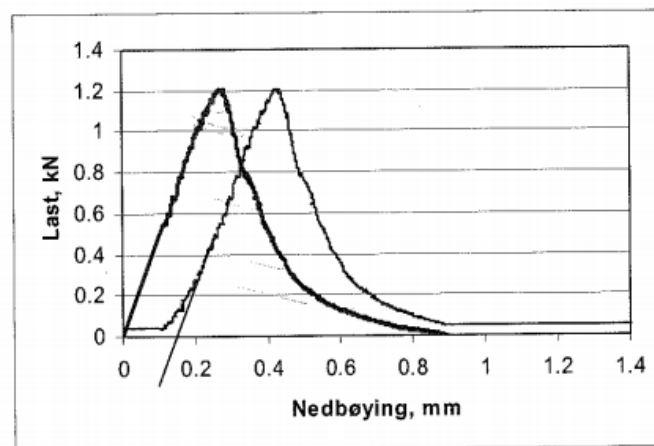
$$G_F = \frac{W_o \times m \times g \times \delta \times \frac{L}{L_0}}{A_{net}} \quad (4-17)$$

Hvor

- G_F – bruddenergi [N/mm]
- W_o – arealet under last/deformasjons-kurven [Nmm]
- m – vekten til bjelken [kg]
- g – gravitasjonen
- δ – nedbøying av prøvelegemet [mm]

- L – lengden til bjelken [mm]
- L_0 – lengden mellom de nedre rullene [mm]
- A_{net} – arealet av tverrsnittet [mm²]

Ved utregning av arealet under last/deformasjons-kurven må krummingen i starten utelates, for å så forskyve kurven til origo, se *Figur 28 - Forskyving av last-nedbøying graf*. Fra kurven leses deformasjon ved brudd. [56]



Figur 28 - Forskyving av last-nedbøying graf [56]

5. Testresultater

5.1. Observasjoner

Se *Tabell 1 - Prøveplan* for å se prøveplanen til oppgaven.

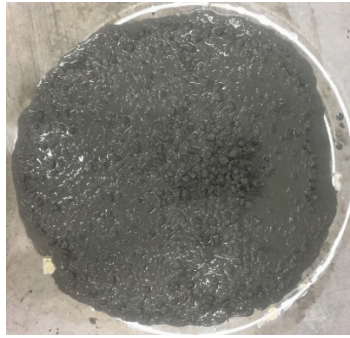
5.1.1. Blanding nr. en

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 5 - Spesifikasjoner blanding en*.

Tabell 5 - Spesifikasjoner blanding en

Dato	25.01.2018
Mengde	16 liter
Matriksvolum	340 l/m ³
Fiber	0.5 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	2.6%
Målt fuktprosent	4.3%

Det ble først laget en liten blanding for å ha et utgangspunkt for de større blandingene. I første omgang ble det ikke tilsatt fiber i blandingen, dette var for å få en oversikt over oppførselen til den ferske betongen. Blanding en ble i utgangspunktet proporsjonert med 2.0% superplastiserende tilsetningsstoffer. Synkutbredelsen ble 550 mm og tilfredsstilte derfor ikke egenskapene som kreves for å være en selvkomprimerende betong. Det ble derfor tilsatt ytterligere 0.6% superplastiserende samtidig som fiberen ble tilsatt. Synkutbredelsen ble målt til 700 mm, se *Figur 29 - Synkutbredelsesmål blanding en*, og det ble bestemt å bruke denne resepten på en større blanding.



Figur 29 - Synkutbredelsesmål blanding en

5.1.2. Blanding nr. to

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 6 - Spesifikasjoner blanding to*.

Tabell 6 - Spesifikasjoner blanding to

Dato	31.01.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	340 l/m ³
Fiber	0.5 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	2.0%
Målt fuktprosent	4.3%

Resepten for blanding to var identisk som resepten brukt i blanding en. Blanding to ble derimot veldig tørr og det ble derfor antatt at fuktprosenten som ble brukt var feil. Den ble derfor endret fra 4.3% til 1.0%. Dette ga større mengde tilsatt vann, og dermed en bløtere blanding. Endringen i fuktprosent ble ikke målt, bare antatt. Betongen tilfredsstilte da kravene for en selvkomprimerende betong, se *Figur 30 - Synkutbredelsesmål blanding to*. Utstøpingen viser at fiberen kan klumpe seg og at betongen ikke fyller ut hele formen, se *Figur 31 - Betongen fyller ikke ut formen*.



Figur 30 - Synkutbredelsesmål blanding to



Figur 31 - Betongen fyller ikke ut formen

5.1.3. Blanding nr. tre

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 7 - Spesifikasjoner blanding tre*.

Tabell 7 - Spesifikasjoner blanding tre

Dato	07.02.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	340 l/m ³
Fiber	0.8 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	4.0%
Målt fuktprosent	4.3%

Fiberandelen ble økt fra 0.5 vol% til 0.8 vol%. Blandingen ble tørr, tilsvarende blanding to. Fuktprosent ble målt dagen før. Resepten ble proporsjonert for 2.0% superplastiserende tilsetningsstoffer, men det ble tilsatt 2.0% ekstra for å gjøre den mer bearbeidelig. Dette viste seg dessverre å være for mye og blandingen skilte seg. Betongblandingen ble kastet og ingen målinger ble utført.

5.1.4. Blanding nr. fire

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 8 - Spesifikasjoner blanding fire*.

Tabell 8 - Spesifikasjoner blanding fire

Dato	07.02.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	355 l/m ³
Fiber	0.8 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	2.6%
Målt fuktprosent	4.3%

Dette var første gang det ble utført synkutbredelse med ring. Fiberen blokkerte alle utgangene, se *Figur 32 - Synkutbredelse med ring blanding fire* og det ble bestemt å ikke utføre denne testen før blandingen har god nok flyt. L-boks test ble også utført, igjen blokkerte fiberen hele utgangen, se *Figur 33 - L-boks blanding fire*. Siden den vertikale boksen ikke ble fylt ut i det hele tatt, ble det enighet om at denne testmetoden ikke egnet seg for denne typen fiber.



Figur 32 - Synkutbredelse med ring blanding fire



Figur 33 - L-boks blanding fire

5.1.5. Blanding nr. fem

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 9 - Spesifikasjoner blanding fem*.

Tabell 9 - Spesifikasjoner blanding fem

Dato	22.02.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	370 l/m ³
Fiber	0.8 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	2.7%
Målt fuktprosent	3.4%

Blanding fem skilte seg siden det ble tilsatt for mye superplastiserende tilsetningsstoff. For å redusere separasjonen stod betongen i ro i ca. 15 minutter, og ble deretter blandet på nytt. Dette ble gjort fordi effekten av det superplastiserende stoffet reduseres over tid. Siden effekten ble redusert ble det mindre separasjon. Synkutbredelse ble så målt, hvor det kunne sees en separasjonskant på ca. 4 cm, se *Figur 34 - Separasjon blanding fem*.



Figur 34 - Separasjon blanding fem

5.1.6. Blanding nr. seks

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 10 - Spesifikasjoner blanding seks*.

Tabell 10 - Spesifikasjoner blanding seks

Dato	27.02.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	380 l/m ³
Fiber	0.8 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	2.0%
Målt fuktprosent	3.4%

Blanding seks brukte samme resept som blanding fem. Siden blanding fem viste separasjon ble det denne gangen tilsatt mindre superplastiserende tilsetningsstoffer. Synkutbredelsesmålet tilfredsstilte minstekravet, se *Tabell 17 - Resultater for fersk betong*. Det ble registrert at mye av fiberen og tilslaget blir liggende igjen i midten av blandingen og ikke spredte seg utover, se *Figur 35 - Steinoppsamling blanding seks*.



Figur 35 - Steinoppsamling blanding seks

5.1.7. Blanding nr. syv

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 11 - Spesifikasjoner blanding syv*.

Tabell 11 - Spesifikasjoner blanding syv

Dato	28.02.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	385 l/m ³
Fiber	0.8 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	1.9%
Målt fuktprosent	3.3%

I blanding seks ble det registrert en klump av fiber og stein i midten av synkutbredelsen. Matriksvolumet ble derfor økt i forsøk på å få spredt fiberen bedre ut i blandingen. En forbedring ble observert ved at fiber og tilslag ble dratt bedre ut til kantene, se *Figur 36 - Synkutbredelse blanding syv*.



Figur 36 - Synkutbredelse blanding syv

Blanding syv hadde god flyt, det ble derfor utført synkutbredelse med ring. Tilslag og matriks fløt gjennom armeringsjernene, men all fiberen ble sperret inne i ringen, se *Figur 37 - Fiberen blokkerer, synkutbredelse med ring blanding syv*. Distansen mellom jernene er for små for denne fiberstørrelsen.



Figur 37 - Fiberen blokkerer, synkutbredelse med ring blanding syv

5.1.8. Blanding nr. åtte

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 12 - Spesifikasjoner blanding åtte*.

Tabell 12 - Spesifikasjoner blanding åtte

Dato	06.03.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	600 l/m ³
Fiber	1 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	1.15%
Målt fuktprosent	4.8%

Erfaringene hittil viser at det trengs et høyt matriksvolum for å oppnå en god støpelighet. Dette gjorde det usikkert om det ville fungere å få en selvkomprimerende betong med 1 vol% fiber. Det ble derfor bestemt å starte med en sandblanding med et matriksvolum på 600 l/m³. Hvis det ikke var mulig å få en blanding med god nok flyt med et så høyt matriksvolum, i kombinasjon med sand, ville det ikke fungere i en betong med vanlig tilslag.

Resepten ble proporsjonert for å bruke 2.0% superplastiserende, men det ble bare brukt 1.15%. Dette førte til at synkutbredelsen ble for lav, se *Tabell 17 - Resultater for fersk betong* og *Figur 38 - Synkutbredelsesmål blanding åtte*. Fibrene klumpet seg mer sammen enn tidligere forsøk, noe som kan være grunnet at fiberen ble tilsatt under blandingen, ikke før blanding som i tidligere forsøk.



Figur 38 - Synkutbredelsesmål blanding åtte

5.1.9. Blanding nr. ni

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 13 - Spesifikasjoner blanding ni*.

Tabell 13 - Spesifikasjoner blanding ni

Dato	08.03.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	600 l/m ³
Fiber	1 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	1.4%
Målt fuktprosent	4.8%

Blanding ni har lik sammensetning som blanding åtte med kun sand som tilslag, men det ble i denne omgangen tilsatt 1.4% superplastiserende. Dette førte til at blanding ni fikk en godkjent synkutbredelse, se *Tabell 17 - Resultater for fersk betong*. Det er registrert at det ligger en stor klump med fiber i midten, se *Figur 39 - Synkutbredelsesmål blanding ni*.



Figur 39 - Synkutbredelsesmål blanding ni

5.1.10. Blanding nr. ti

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 14 - Spesifikasjoner blanding ti*.

Tabell 14 - Spesifikasjoner blanding ti

Dato	13.03.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	600 l/m ³
Fiber	1 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	1.1%
Målt fuktprosent	3.9%

Fiberoppsamlingen i blanding ni kunne tenkes å være grunnet mangel på grovt tilslag. Det ble derfor tilført 25% grovt tilslag i denne blandingen. Fiberen fordelte seg bedre utover enn tidligere blandinger men viser fortsatt tendenser til oppsamling i midten, se *Figur 40 - Synkutbredelsesmål blanding ti*.



Figur 40 - Synkutbredelsesmål blanding ti

5.1.11. Blanding nr. 11

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i *Tabell 15 - Spesifikasjoner blanding 11*.

Tabell 15 - Spesifikasjoner blanding 11

Dato	14.03.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	600 l/m ³
Fiber	1 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	1.1%
Målt fuktprosent	3.9%

Siden fiberen fortsatt klumpet seg i midten ble andelen grovt tilslag økt til 47%. Det ble observert at mer fiber tilsynelatende ble dratt med ut til kantene av det grove tilslaget, selv om fiberen fremdeles klumpet seg i midten, se *Figur 41 - Synkutbredelsesmål blanding 11*.



Figur 41 - Synkutbredelsesmål blanding 11

5.1.12. Blanding nr. 12

Spesifikasjonene til blanding en er gitt i Tabell 16 - *Spesifikasjoner blanding 12*.

Tabell 16 - *Spesifikasjoner blanding 12*

Dato	15.03.2018
Mengde	50 liter
Matriksvolum	600 l/m ³
Fiber	1 vol%
V/c-tall	0.4
Tilsetningsstoff	1.1%
Målt fuktprosent	3.9%

D_{max} ble endret fra 16 mm til 22 mm. Blandingen bestod nå av 23.5% 8/15 mm grus og 23.5% 16/22 mm grus. Fiberen lå fortsatt i en stor klump i midten, se *Figur 42 - Synkutbredelsesmål blanding 12*, og synkutbredelsen når ikke kravet, se *Tabell 17 - Resultater for fersk betong*. Blandingen er nær å skille seg langs kanten, som betyr at det ikke kan tilsettes mer superplastiserende tilsetningsstoffer.



Figur 42 - Synkutbredelsesmål blanding 12

Grunnet et urealistisk matriksvolum og en blanding som ikke oppnår kravene for selvkomprimerende betong, ble det konkludert at det er uoppnåelig med 1 vol% for betong med denne materialsammensetningen.

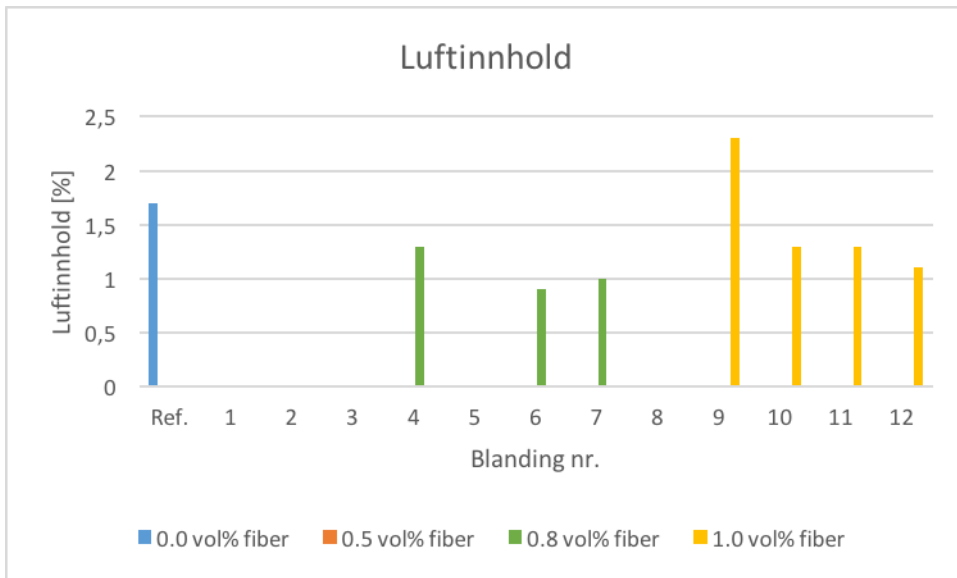
5.2. Fersk betong

Resultatene fra testene utført på den ferske betongen blir presentert i *Tabell 17 - Resultater for fersk betong*.

Tabell 17 - Resultater for fersk betong

Blanding	Dato	Luftinnhold [%]	Densitet [kg/m³]	Synkutbredelse [mm]
Ref.	25.01.18	1.7	2454	550
1	25.01.18	-	-	700 OK
2	31.01.18	-	-	660 OK
3 Separert	07.02.18	-	-	-
4	07.02.18	1.3	-	550
5 Separert	22.02.18	-	-	900 OK
6	27.02.18	0.9	2426	685 OK
7	28.02.18	1.0	2433	700 OK
8	06.03.18	-	-	520
9	08.03.18	2.3	2313	695 OK
10	13.03.18	1.3	2317	670 OK
11	14.03.18	1.3	2290	600
12	15.03.18	1.1	2303	600

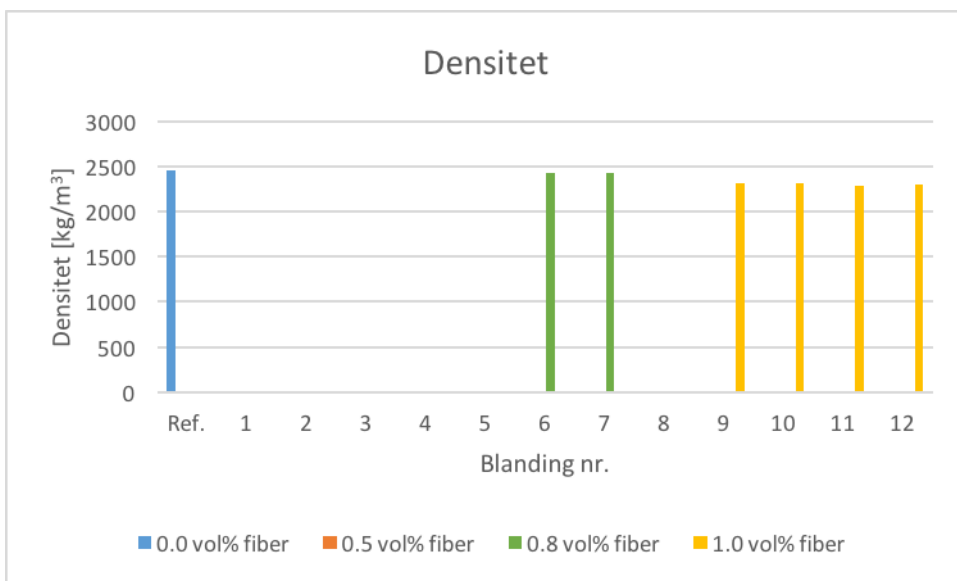
5.2.1. Luftinnhold



Figur 43 - Resultater luftinnhold

Figur 43 - Resultater luftinnhold viser luftinnholdet til alle blandingene, inndelt i mengde fiber tilsatt. Blanding ni har høyere luftinnhold enn resten av blandingene som inneholder 1 vol% fiber. De resterende blandingene har tilnærmet likt luftinnhold i forhold til tilsatt fiber mengde. Luftinnhold varierer lite med tanke på fibervolum.

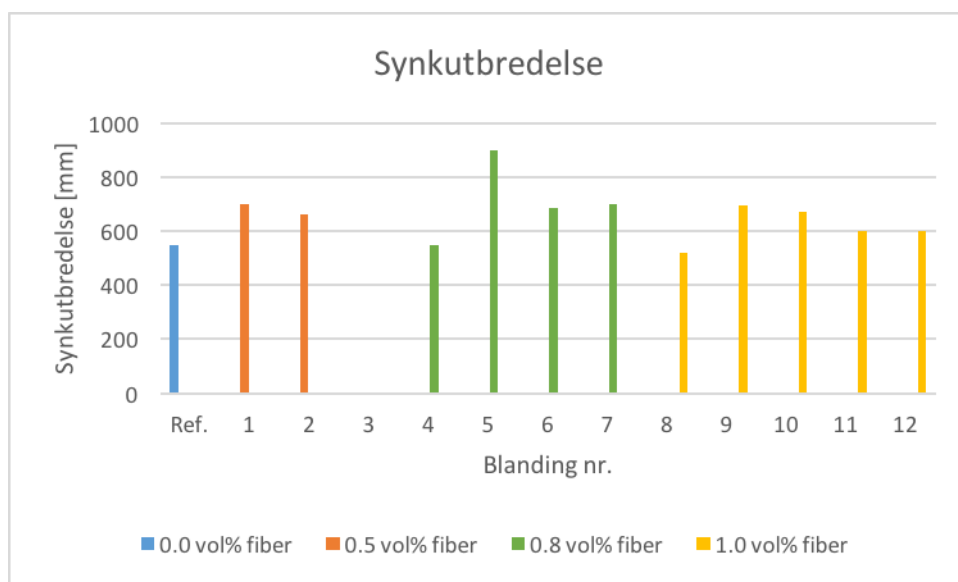
5.2.2. Densitet



Figur 44 - Resultater densitet

Måling av densitet ble kun utført på syv av de tolv blandingene. *Figur 44 - Resultater densitet* viser målingene som ble tatt. Prøvene med et matriksvolum på 600 l/m^3 har lavest densitet.

5.2.3. Synkutbredelse



Figur 45 - Resultater synkutbredelse

Synkutbredelsesmåling ble utført for alle blandingene bortsett fra blanding tre, som separerte seg. *Figur 45 - Resultater synkutbredelse* viser at synkutbredelsen reduseres for hver øking av fiberinnhold. Referansebetongen har ett lavere synkutbredelsesmåling enn blanding en siden det ble tilsatt ekstra superplastiserende til blanding en, se kapittel 5.1.1 *Blanding nr. en*.

5.2.4. Synkutbredelse med ring

Testen var planlagt å utføre på alle blandingene, men ble først tatt i bruk for første gang på blanding fire. Resultatet av testen var dårlig hvor lite betong fløt ut gjennom armeringsjernene. Det ble først antatt at dette var grunnet dårlig flyt i betongblandingen. På grunn av dette ble det bestemt at testen bare skulle bli utført på blandinger som viste gode flytegenskaper.



Figur 46 - Venstre: synkutbredelse med ring blanding fire, høyre: synkutbredelse med ring blanding syv

Synkutbredelse med ring ble så utført på blanding syv som viste gode selvkomprimerende egenskaper og hadde god flyt. Beklageligvis ble ikke resultatet forbedret fra sist forsøk, selv om betongen viste en bedre utflytningsevne.

Ved begge testene ble det observert at fiberen ble liggende igjen innenfor armeringsjernene. I Figur 46 - Venstre: synkutbredelse med ring blanding fire, høyre: synkutbredelse med ring blanding syv vises det at det bare er tilslag og matriks som flyter forbi armeringen.

5.2.5. L-boks

Denne testen ble bare utført på blanding fire. Det ble fort observert at dette var en testmetode som ikke egnet seg for betong med fiber på denne størrelsen. For å kunne måle passeringsevnen til betongen må den horisontale boksen være utfylt, som ikke var tilfellet, se Figur 47 - Resultat L-boks blanding 4.



Figur 47 - Resultat L-boks blanding 4

5.3. Herdet betong

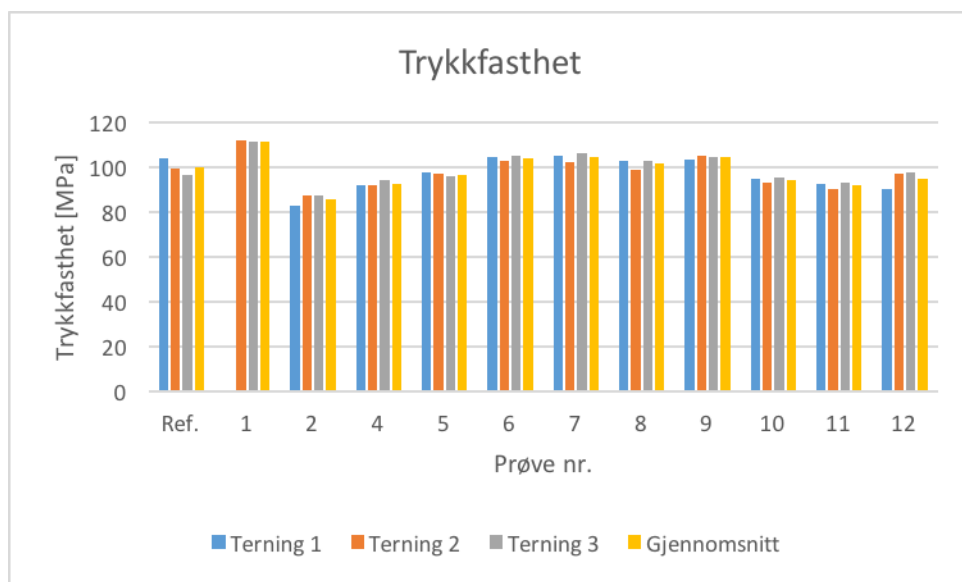
5.3.1. Trykkfasthet

Tabell 18 - Resultater trykkfasthet og Figur 48 - Resultater trykkfasthet viser en oversikt over resultatene til trykkfasthet.

Tabell 18 - Resultater trykkfasthet

Nummer	Dato	Maks last 1 [kN]	Maks last 2 [kN]	Maks last 3 [kN]	Gjennomsnitt maks last [kN]	Trykkfasthet [MPa]
Ref.	05.03.18	1040	991	965	999	99
Prøve 1	23.02.18	-	1119	1112	1115	112
Prøve 2	01.03.18	828	872	873	858	86
Prøve 4	09.03.18	916	918	942	925	93
Prøve 5	21.03.18	975	960	958	964	96
Prøve 6	05.04.18	1046	1027	1050	1040	104
Prøve 7	06.04.18	1048	1020	1062	1044	104
Prøve 8	06.04.18	1028	988	1028	1015	101

Prøve 9	10.04.18	1032	1050	1043	1041	104
Prøve 10	10.04.18	948	928	952	943	94
Prøve 11	10.04.18	923	902	928	918	912
Prøve 12	12.04.18	904	969	973	948	95



Figur 48 - Resultater trykkfasthet

Resultatene for trykkfasthet oppnådd i denne oppgaven er mye høyere enn det som er oppgitt i Norcem sitt datablad for Standard FA sement. Betong med v/c-tall på 0.4 skal i følge databladet ha gi trykkfasthet på ca. 75 MPa. [57] Det er i denne oppgaven oppnådd i en gjennomsnittelig trykkfasthet på ca. 97 MPa. Det samme gjelder for prøvene som bruker Anlegg FA. [58]

Ved å sammenligne referansebetongen og prøve en ses en økning i trykkfastheten. Det ble også registrert en øking i trykkfasthet fra prøve to til prøve syv.



Figur 49 - Terninger etter brudd

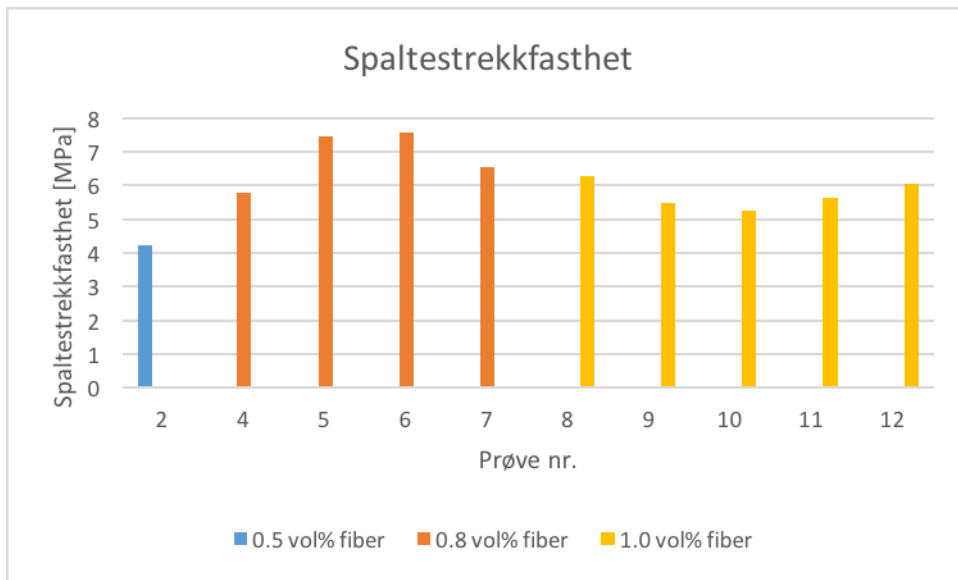
Figur 49 - Terninger etter brudd viser terningene etter brudd, hvor terning en er uten fiber, terning 2 inneholder 0.5 vol% fiber og terning 3 har en fibermengde på 1.0 vol%. Det observeres mindre oppsprekking på betongen ved høyere fibervolum.

5.3.2. Spaltestrekkfasthet

Tabell 19 - Resultater spaltestrekkfasthet og Figur 50 - Resultater spaltestrekkfasthet viser en oversikt over resultatene fra måling av spaltestrekkfasthet.

Tabell 19 - Resultater spaltestrekkfasthet

Nummer	Dato	Maks last 1 [kN]	Maks last 2 [kN]	Gj.snitt bruddlast [kN]	Spaltestrekkfasthet [MPa]
Prøve 1	-	-	-	-	-
Prøve 2	01.03.18	296	299	297	4.2
Prøve 4	09.03.18	409	-	409	5.8
Prøve 5	21.03.18	527	-	527	7.5
Prøve 6	06.04.18	536	-	536	7.6
Prøve 7	06.04.18	464	-	464	6.6
Prøve 8	06.04.18	443		443	6.3
Prøve 9	10.04.18	387	-	387	5.5
Prøve 10	10.04.18	371		371	5.3
Prøve 11	10.04.18	397		397	5.6
Prøve 12	12.04.18	427		427	6.0



Figur 50 - Resultater spaltestrekkfasthet

Prøve seks har fått den høyeste spaltestrekkfastheten. Fastheten øker med 44.5% fra prøve to til prøve seks. Prøvene med 1 vol% fiber har en lavere spaltestrekkfasthet enn prøvene med 0.8 vol% fiber.

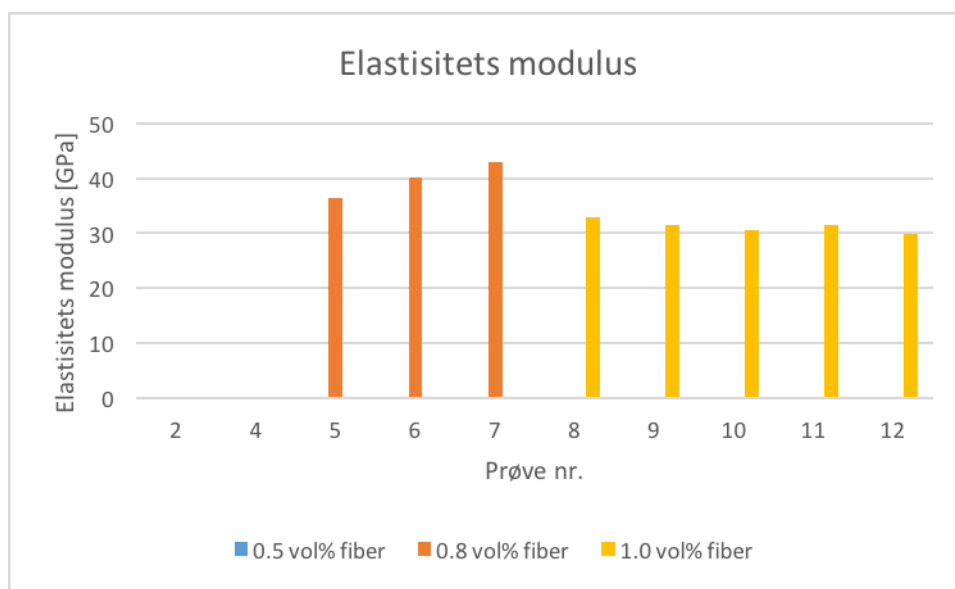
5.3.1. Elastisitetens modulus

Tabell 20 - Resultater elastisitetens modulus og Figur 51 - Resultater elastisitetens modulus viser en oversikt over resultatene fra måling av elastisitetens modulus.

Tabell 20 - Resultater elastisitetens modulus

Nummer	Dato	Elastisitetens modul [GPa]
1	-	-
2	01.03.18	-
4	09.03.18	-
5	21.03.18	36.4
6	06.04.18	40.2
7	06.04.18	43.0
8	06.04.18	32.9
9	10.04.18	31.5
10	10.04.18	30.6

11	10.04.18	31.4
12	12.04.18	29.8



Figur 51 - Resultater elastisitetens modulus

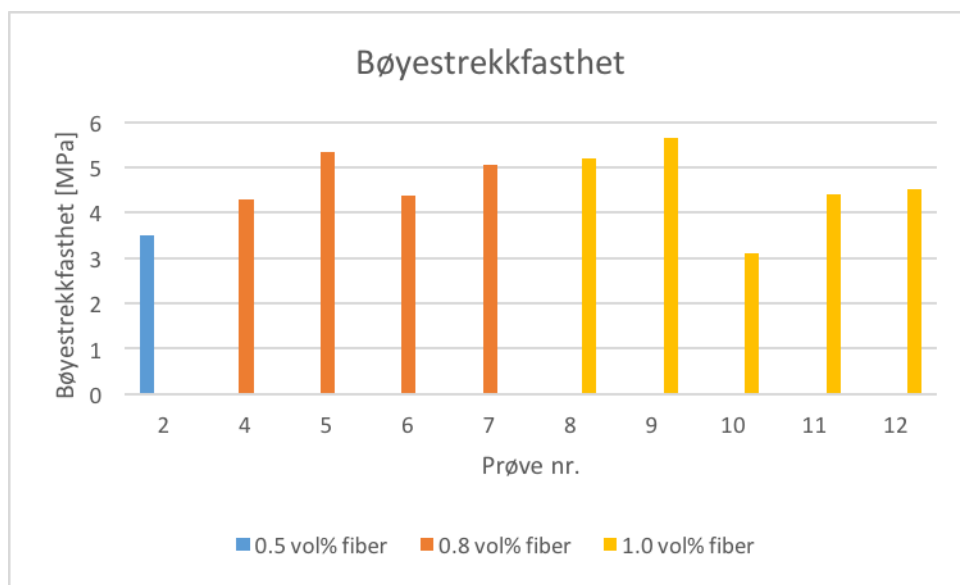
Elastisitetens modulen er tilnærmet lik for alle prøvene med 1.0 vol% fiber. For prøvene som inneholder 0.8 vol% fiber øker elastisitetens modulen ved en mer optimal blanding. Grunnet feil ved testing er det ingen resultater for 0.5 vol% fiber.

5.3.2. Bøystrekkfasthet

Tabell 21 - Resultater bøystrekkfasthet og Figur 52 - Resultater bøystrekkfasthet viser en oversikt over resultatene fra måling av bøystrekkfasthet.

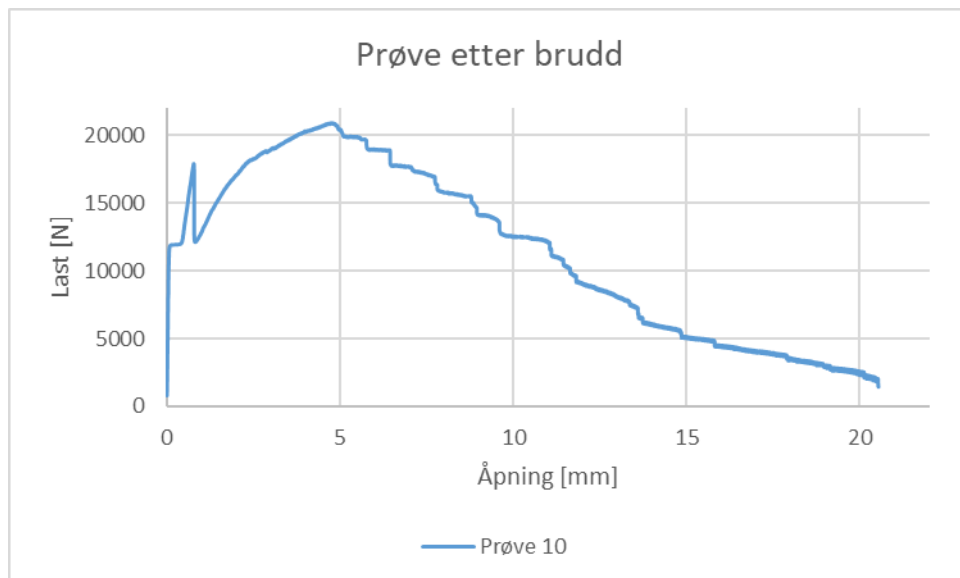
Tabell 21 - Resultater bøyestrekfasthet

Nummer	Dato	Maks last 1 [kN]	Maks last 2 [kN]	Gj.snitt bruddlast [kN]	Bøyestrekfasthet [MPa]
Prøve 1	-	-	-	-	-
Prøve 2	01.03.18	21.7	25.6	23.6	3.5
Prøve 4	09.03.18	32.3	25.6	29.0	4.3
Prøve 5	21.03.18	36.1	-	36.1	5.4
Prøve 6	06.04.18	29.6	-	29.6	4.4
Prøve 7	06.04.18	34.2	-	34.2	5.1
Prøve 8	06.04.18	35.1	-	35.1	5.2
Prøve 9	10.04.18	38.2	-	38.2	5.7
Prøve 10	10.04.18	20.9	-	20.9	3.1
Prøve 11	10.04.18	29.8	-	29.8	4.4
Prøve 12	12.04.18	30.6	-	30.6	4.5



Figur 52 - Resultater bøyestrekfasthet

Prøve ni har den høyeste bøyestrekfastheten. For prøvene med høyt matriksvolum er det store forskjeller i bøyestrekfasthet. Det er varierende resultater for prøvene tatt med samme vol% fiber og det ble heller ikke registrert store forbedringer ved høyere andel fiber.



Figur 53 - Prøve ti, last/åpning-kurve

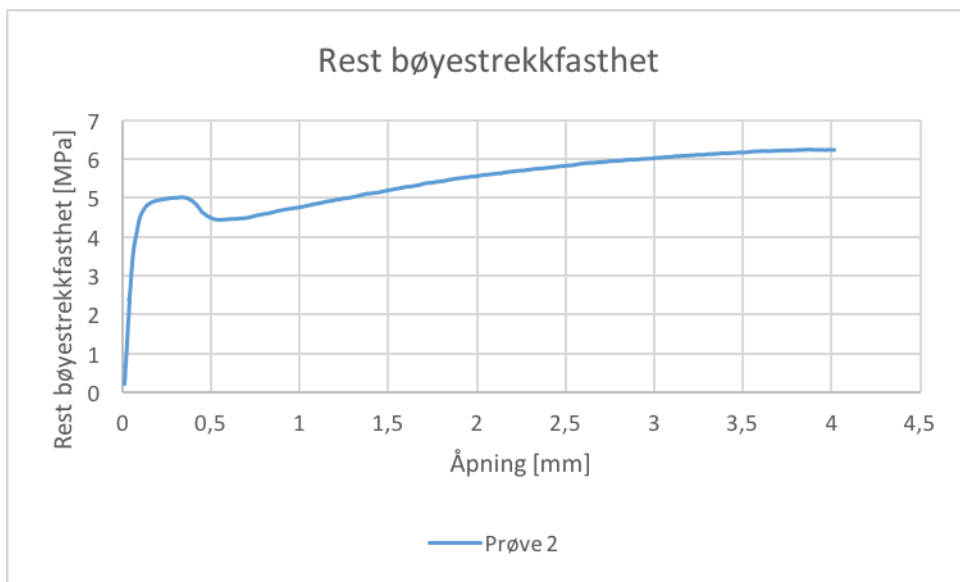
Figur 53 - Prøve ti, last/åpning-kurve viser et eksempel på hvordan betong med tilsatt fiber oppfører seg etter brudd. Effekten av fiberen gjør at bjelken ikke går rett til brudd.

5.3.3. Rest bøyestrekfasthet

Tabell 22 - Resultater for rest bøyestrekfasthet 0.5 vol% fiber og Figur 54 - Rest bøyestrekfasthet for 0.5 vol% fiber viser en oversikt over resultatene til rest bøyestrekfasthet ved 0.5 vol% fiber.

Tabell 22 - Resultater for rest bøyestrekfasthet 0.5 vol% fiber

Prøve	f_L [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,2}$ [MPa]	$f_{R,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]
2	3.1	4.5	5.2	5.8	6.2

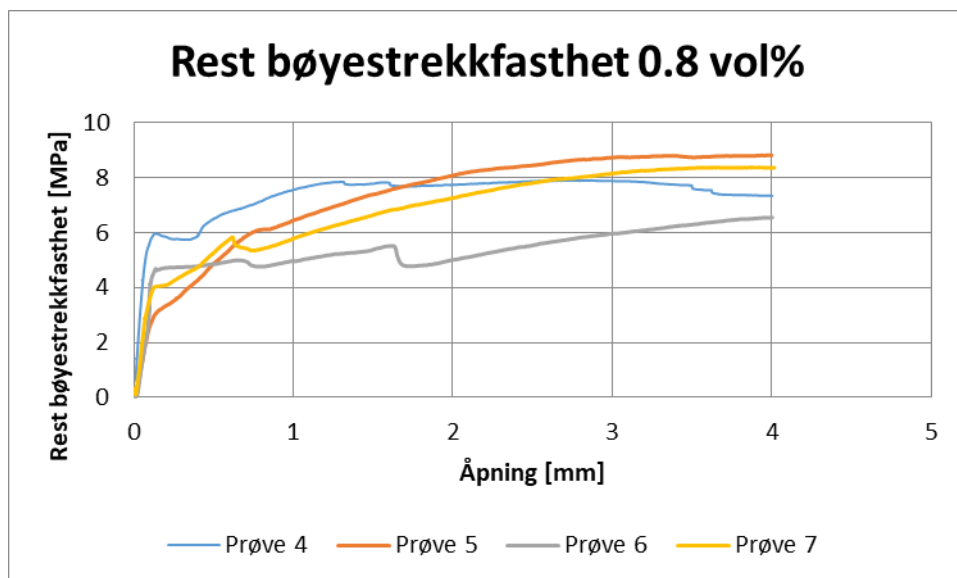


Figur 54 - Rest bøyestrekfasthet for 0.5 vol% fiber

Tabell 23 - Resultater rest bøyestrekfasthet 0.8 vol% fiber og Figur 55 - Rest bøyestrekfasthet for 0.8 vol% fiber viser en oversikt over resultatene til rest bøyestrekfasthet ved 0.8 vol% fiber.

Tabell 23 - Resultater rest bøyestrekfasthet 0.8 vol% fiber

Prøve	f_L [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,2}$ [MPa]	$f_{R,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]
4	3.8	6.5	7.8	7.9	7.6
5	1.2	4.9	7.4	8.4	8.7
6	1.2	4.9	5.4	5.5	6.3
7	1.9	4.3	6.6	7.8	8.4

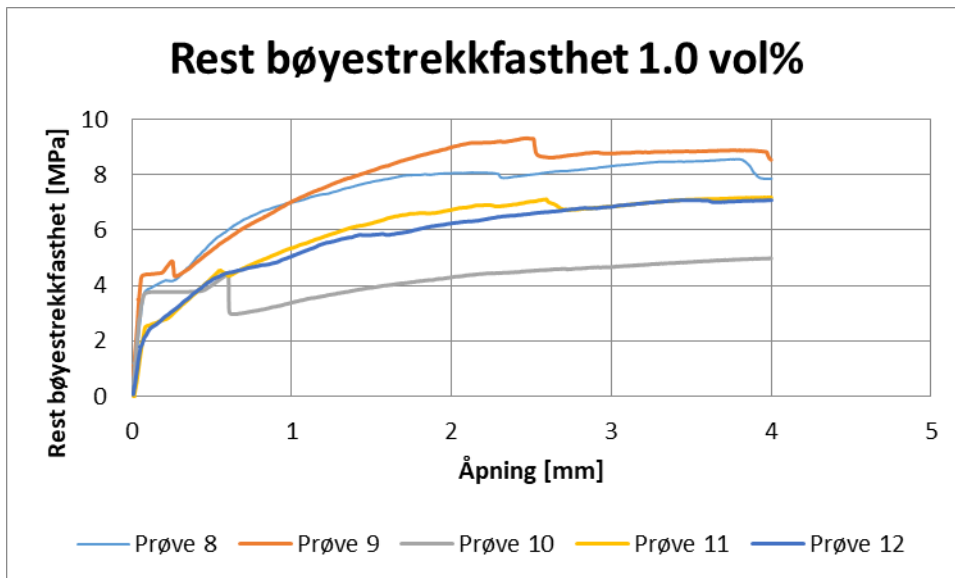


Figur 55 - Rest bøyestrekfasthet for 0.8 vol% fiber

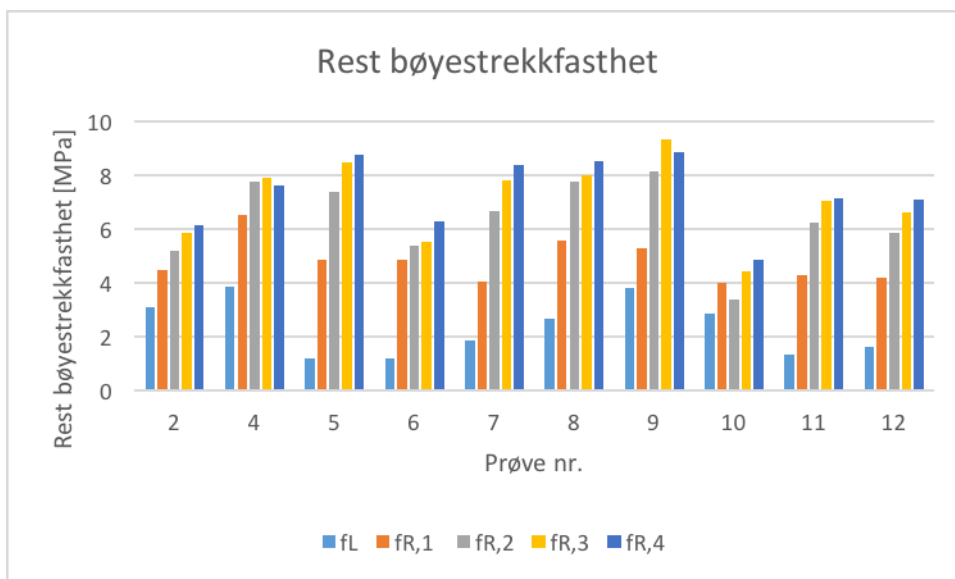
Tabell 24 - Resultater rest bøyestrekfasthet 1.0 vol% fiber og Figur 56 - Rest bøyestrekfasthet for 1.0 vol% fiber viser en oversikt over resultatene til rest bøyestrekfasthet ved 1.0 vol% fiber.

Tabell 24 - Resultater rest bøyestrekfasthet 1.0 vol% fiber

Prøve	f_L [MPa]	$f_{R,1}$ [MPa]	$f_{R,2}$ [MPa]	$f_{R,3}$ [MPa]	$f_{R,4}$ [MPa]
8	2.7	5.6	7.8	8.0	8.5
9	3.8	5.3	8.2	9.3	8.9
10	2.9	4.0	3.4	4.5	4.9
11	1.4	4.3	6.3	7.0	7.1
12	1.6	4.2	5.8	6.6	7.1



Figur 56 - Rest bøyestrekfasthet for 1.0 vol% fiber



Figur 57 - Resultater rest bøyestrekfasthet

Figur 57 - Resultater rest bøyestrekfasthet viser bøyestrekfastheten ved åpninger på 0.5, 1.5, 2.5 og 3.5 mm. I 4.3.6 Bestemmelse av rest bøyestrekfasthet og rest strekkfasthet ble det forklart at rest bøyestrekfasthet regnes ut ved å bruke bøyestrekfastheten. Dette gjør at resultatene har de samme tendensene som hos bøyestrekfastheten.

Prøve ni har igjen den høyeste verdien og prøve ti har den laveste. Blandingene som har et matriksvolum på 600 l/m^3 og inneholder tilslag har lavere rest bøyestrekfasthet enn de uten

tilslag. Prøve seks har et lavere resultat enn de andre blandinger med 0.8 vol% fiber. I tillegg er det registrert en økning i rest bøyestrekfasthet fra 0.5 vol% fiber til 0.8 vol% fiber.

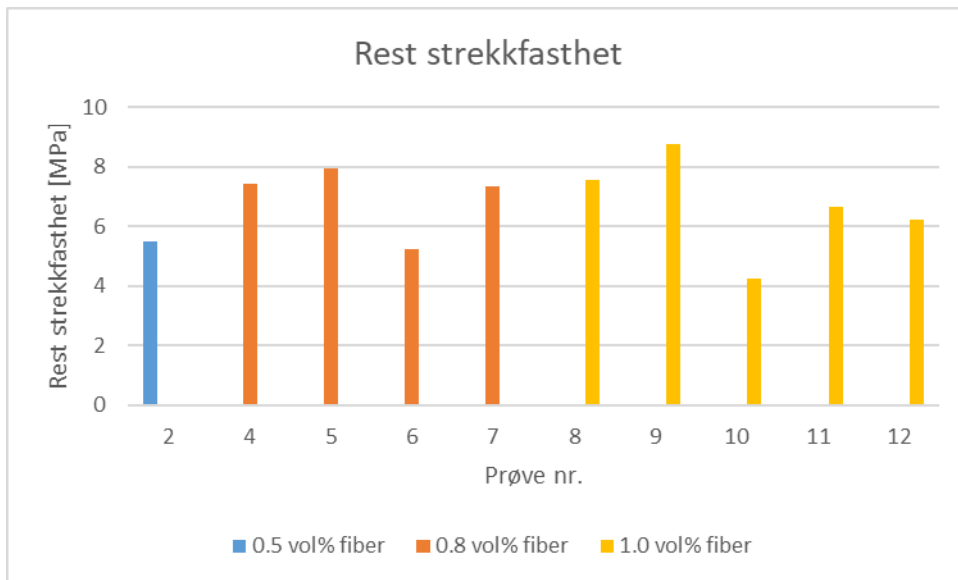
Grafene i *Figur 54 - Rest bøyestrekfasthet for 0.5 vol% fiber*, *Figur 55 - Rest bøyestrekfasthet for 0.8 vol% fiber* og *Figur 56 - Rest bøyestrekfasthet for 1.0 vol% fiber* viser at opprissing skjer ved en CMOD på ca. 0.05 mm. Etter opprissing vil belastningen øke for alle prøvene. For prøve to, fem, syv, ti og tolv fortsetter økingen forbi 4 mm åpning. De resterende prøvene når maks last på en CMOD mellom en og tre mm.

5.3.4. Rest strekkfasthet

Tabell 25 - Resultater rest strekkfasthet og *Figur 58 - Resultater rest strekkfasthet* viser en oversikt over resultatene til rest strekkfasthet.

Tabell 25 - Resultater rest strekkfasthet

Prøve	f_{R3} [MPa]	$f_{Rk,3}$ [MPa]	$f_{itk,res,2.5}$ [MPa]
2	5.8	14.8	5.5
4	7.9	20.1	7.4
5	8.4	21.5	8.0
6	5.5	14.1	5.2
7	7.8	19.9	7.4
8	8.0	20.4	7.6
9	9.3	23.7	8.8
10	4.5	11.6	4.3
11	7.0	18.0	6.6
12	6.6	16.8	6.2



Figur 58 - Resultater rest strekkfasthet

Rest strekkfasthet er 0.37 ganger karakteristisk rest bøyestrekfasthet, som vil si at resultatene er lignende de for rest bøyestrekfasthet. Prøve seks og prøve ti skiller seg ut siden de har betydelig lavere verdier enn prøvene med samme fiberinnhold.

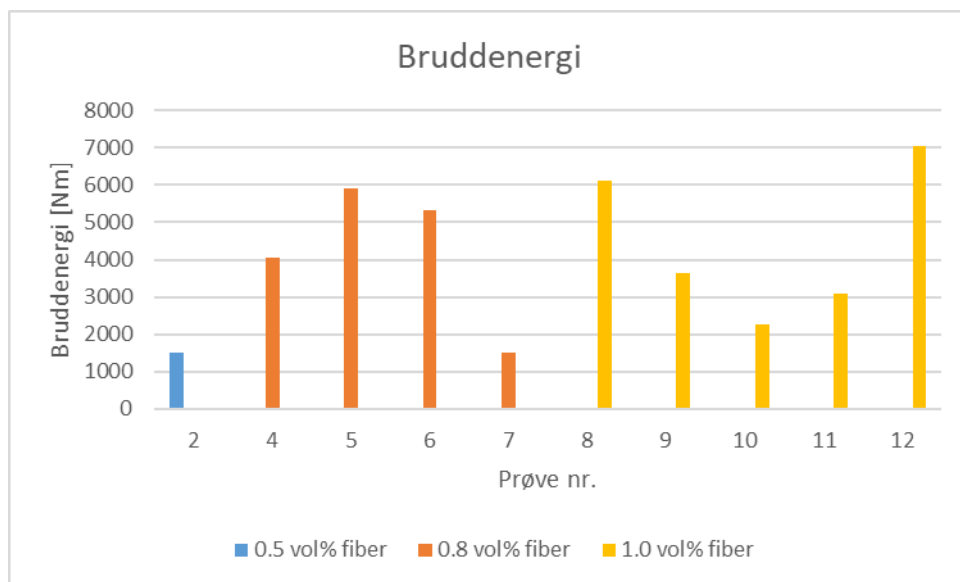
5.3.5. Bruddenergi

Tabell 26 - Resultater bruddenergi og Figur 59 - Resultater bruddenergi viser en oversikt over resultatene til bruddenergi.

Tabell 26 - Resultater bruddenergi

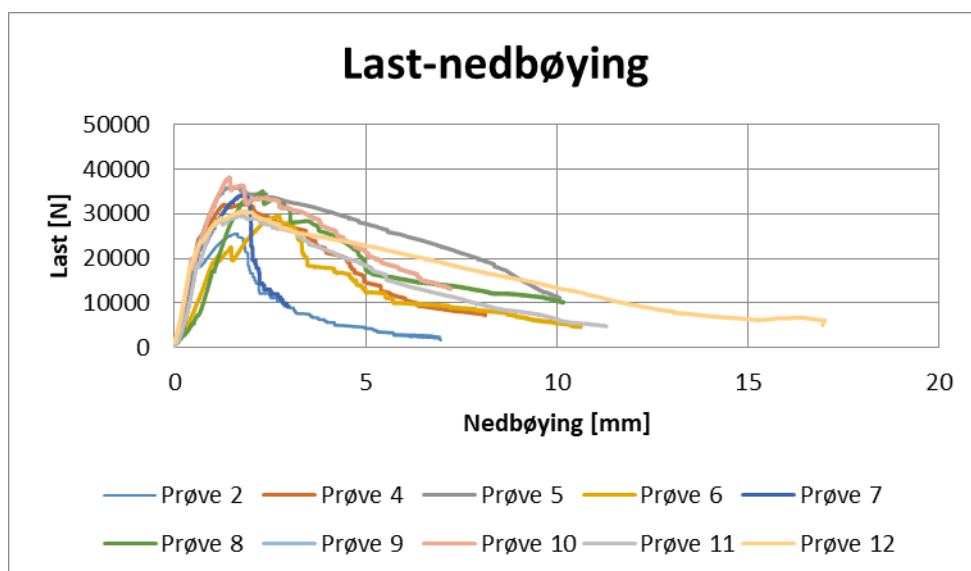
Prøve	Areal under graf [Nmm]	Nedbøying ved brudd [mm]	Bruddenergi [N/mm]
2	66675	1.6	1515
4	151805	1.9	4057
5	249839	1.7	5927
6	142003	2.6	5338
7	59109	1.8	1521
8	186746	2.3	6112
9	176657	1.4	3636
10	88604	1.8	2279

11	176706	1.2	3081
12	273318	1.8	7031



Figur 59 - Resultater bruddenergi

Figur 59 - Resultater bruddenergi viser at det er store variasjoner i bruddenergi fra prøve til prøve. Prøve to og prøve syv har de laveste verdiene, mens prøve 12 har den desidert høyest bruddenergien.



Figur 60 - Last/nedbøying-kurve

Grafene i *Figur 60 - Last/nedbøying-kurve* viser last-nedbøying for de forskjellige prøvene. Prøve 12 har størst areal under grafen, og prøve to og syv har de minste arealene.

6. Diskusjon

6.1. Fersk betong

6.1.1. Luftinnhold

Betongen ble proporsjonert for å ha et luftinnhold på 2.0%, som ingen av blandingene oppnådde. Resultatene viser at blanding ni, som kun inneholdt sand og ingen grove tilslag, hadde det høyeste luftinnholdet. Blandingene med grovt tilslag ligger stabilt rundt 1.0%.

6.1.2. Densitet

Blanding en til syv hadde en forventet densitet på ca. 2400 kg/m³ og blanding ni til 12 hadde en forventet densitet på ca. 2200 kg/m³. Dette er regnet ut i regnearket ”Proporsjonering av betong”. Tabell 17 - Resultater for fersk betong viser at blanding ni til 12 hadde en litt høyere densitet enn forventet.

Blandingene ni til 12 har lavere densitet enn de andre blandingene. Dette er fordi matriks veier mindre enn det grove tilslaget, og disse blandingene har et høyt matriksinnhold, 600 l/m³.

Det ble tatt for få prøver til å se om stålfiberen hadde en innvirkning på densiteten.

6.1.3. Synkutbredelse

For å forbedre synkutbredelsesmålet ved tilsatt fiber ble det i denne oppgaven kun fokusert på å endre matriksvolumet, samt andel superplastiserende tilsetningsstoff. Dette resulterte i blandinger med høyt matriksvolum, men det ble beholdt et lavt v/c-tall. Et lavere v/c-tall gir en sterkere herdet betong som er en viktig egenskap for betongen.

Resultatene viser at ved å øke fibermengden i betongen vil synkutbredelsen minske, som leses ut fra *Tabell 17 - Resultater for fersk betong*. Blanding to og fire har samme matriksvolum men en økning på 0.3 vol% fiber. Denne økingen av fibermengde har ført til at synkutbredelsesmålet har sunket med 110 mm. Det samme forekommer for blanding syv og åtte, hvor det er en økning på 0.2 vol% fiber og en reduksjon av synkutbredelse på 180 mm.

Verken blanding 11 eller 12, som er blandingene med 1.0 vol% fiber og inneholder 47% grovt tilslag, oppnådde en synkutbredelse på 650 mm (tilfredsstilte kravet for selvkomprimerende betong). I kapittel 5.1.12 *Blanding nr. 12* ble det skrevet at blanding 12 var nær separasjon. På grunn av dette og et høyt matriksvolum (600 l/m^3) var det ikke mulig å få en betong med bedre flyt uten å endre v/c-tallet. Det var derfor ikke gjennomførbart med 1.0 vol% fiber for denne materialsammensetningen.

6.1.4. Synkutbredelse med ring

Kapittel 5.2.4 *S* viste at resultatene av synkutbredelse med ring ikke fungerte for betong med denne type fiber. Tidligere i oppgaven (kapittel 2.8 *Fiberarmering i selvkomprimerende betong*) nevnes en tommelfingerregel som sier at avstanden mellom armeringsjernene burde være to ganger lengden av fiberen. Ringen som var tilgjengelig hadde en avstand på 30 mm, det er halve lengden til fiberens som er på 60 mm, se *Figur 61 - Sammenligning av fiberlengde og armeringsavstand*. Dette førte til at fiberen ble stoppet av jernene og hopet seg opp. Ved bruk av fiberbetong burde avstanden mellom armeringsjern være større enn lengden til fiberen.



Figur 61 - Sammenligning av fiberlengde og armeringsavstand

6.1.5. L-boks

Figur 62 - Fiberen sperrer utgang, L-boks viser hvordan en stor klump av fiber ligger i åpningen og sperrer betongen fra å flyte utover.

Det ble brukt en blanding som ikke tilfredstilte kravet til selvkomprimerende betong, og det er mulig at en betong med bedre flyt kunne ha hindret fiberen fra å flette seg sammen i samme grad. Betongen fløt så vidt ut i den horisontale boksen, noe som indikerte at en blanding med bedre flyt fremdeles ikke ville gi en godkjent test.

Ved måling av synkutbredelse ble det registret en opphoping av fiber i midten av ringen ved blandinger med god flyt, noe som tilsa at fibrene ville sperre for åpningen til L-boksen. Med dette tatt i betraktning ble det bestemt at L-boks testen ikke var en passende metode for å måle passeringsevnen til denne typen fiberbetong.



Figur 62 - Fiberen sperrer utgang, L-boks

6.2. Herdet betong

6.2.1. Trykkfasthet

Prøve en og to viser store forskjeller i prøveresultatene i og med at de har tilnærmet lik resept. Dette skyldes at det er brukt ulike sementtyper. Som nevnt i kapittel 3.3.2 *Sement*, brukes det Norcem Anlegg FA i prøve en og Norcem Standard FA i prøve to, som fører til at prøve en vil ha en høyere trykkfasthet.

Prøve en har samme sementtype og sammensetning som referansebetongen. Det er en øking i trykkfasthet på 10 MPa. Det ble nevnt i kapittel 5.1.1 *Blanding nr. en* at referansebetongen har en synkutbredelse på 500 mm og prøve en har en synkutbredelse på 700 mm. Forbedring av trykkfasthet er mest sannsynlig grunnet at formene ble bedre utfylt for prøve en enn for referanse betongen, ikke tilsetning av fiber.

Det er en øking i trykkfasthet fra prøve fire til prøve syv. Disse prøvene har samme fiberinnhold, 0.5 vol%, men ikke samme matriksvolum. *Tabell 17 - Resultater for fersk betong* viser at prøve fire ikke nådde kravene for selvkomprimerende betong. Dette kan ha gjort at betongen ikke har fylt formen like bra som de andre prøvene, og derfor fått en lavere trykkfasthet. Prøve fem ble separert, og dette kan ha medført til en lavere trykkfasthet.

I kapittel 3.4 *Betongresept* står det at matriksen er det svakeste leddet i betongen og er derfor bestemmende for styrken. Prøve åtte til 12 inneholder et matriksvolum på 600 l/m^3 , som er et unaturlig høyt volum. Det høye volumet gjør at trykkfastheten ikke øker, men reduseres, selv om prøvene inneholder den høyeste fibermengden, (1.0 vol%).

Tidligere forskning sier at fiber ikke har stor innvirkning på trykkfastheten. Dette kan støttes opp i denne oppgaven. Endringer i trykkfasthet er grunnet utfyllingsevne og matriksvolum, ikke fibertilsetning.

Fiberen har en derimot en tydelig innvirkning på bruddet til terningene. Høyere fiberinnhold gir mindre skade på betongen. For betong med høy trykkfasthet vil betongen være sprøere, som gir eksplosive brudd. For fiberbetong ble det bare sprekker i betongen. Det kunne også

observeres mindre oppsprekking ved høyere fiberinnhold. Ved dårlig fordeling av fiber kan det registreres større biter betong som faller av i delen uten fiber.

6.2.2. Spaltestrekkfasthet

Det er forventet at fiber skal ha en positiv innvirkning på spaltestrekkfastheten. Dette kan sees i forskjellen på prøve to og syv, hvor styrken øker med 3.4 MPa. Prøve åtte til 12 vil ha en lavere fasthet grunnet høyere matriksvolum, 600 l/m^3 , så det er vanskelig å si om fibervolumet har en betydning for spaltestrekkfastheten.

Selv med liten forskjell i resepten til prøve seks og syv er det en forskjell på 1.2 MPa. Dette kan være grunnet plassering i jiggen, som kan gi forskjell i resultater. Nevnt i kapittel 4.3.2 *Spaltestrekkfasthet* er plassering av prøven viktig for å få et nøyaktig resultat.

Ved bruk av fiber vil ikke sylindren bli delt i to ved brudd, se *Figur 63 - Oppsprekking ved spaltestrekkfasthet*. Fiberen vil holde betongen sammen og det vil bli en gjennomgående sprekk i sylindren. Ved dårlig fordeling av fiber kan det oppstå større sprekker, og deler av sylindren kan deles i to.



Figur 63 - Oppsprekking ved spaltestrekkfasthet

6.2.3. Elastisitetens modulus

Ved testing av prøve to ble det gjort en feil, som gjorde at sylindren ble utsatt for tre ganger så mye trykk som den egentlig skulle bli utsatt for. Dette resulterte i et eksplosivt brudd under første pålastning. Prøve fire opplevde brudd før første last syklus, sannsynligvis grunnet mye luft i betongen, som igjen førte til at det ikke ble noen resultater for denne prøven. På grunn av dette er det ingen resultater for betong med 0.5 vol% fiber.

Det er ikke forventet at fiberinnhold skal ha en innvirkning på elastisitetens modulen, men det var vanskelig å få et resultat ved bruk av fiberbetong. Dette kan være grunnet ekstra hulrom i betongen skapt av fiberen, som gjør at betongen går til brudd før testen ble ferdig. For å få ut luften som ble dannet mellom fibrene ble formene hamret litt på utsiden når de var fylt opp med betong. Dette ble utført på blanding fem til 12, som gjorde at testene fungerte og ga resultater.

Prøve åtte til 12 har en betydelig lavere elastisitetens modulus enn de andre prøvene. Fiberinnhold skal ikke ha en stor innvirkning på elastisitetens modulen så denne reduksjonen er mest sannsynlig grunnet det høye matriksvolumet som de fem prøvene har.

Sammenligning av betongen i denne oppgaven med informasjon fra tabell 3.1 i NS-EN 1992-1-1:2004, viser at resultatene ligger litt lavere enn det standarden tilsier. [59] Dette er sannsynligvis grunnet et høyt matriksvolum, ikke fiberinnhold.

6.2.4. Bøystrekkfasthet

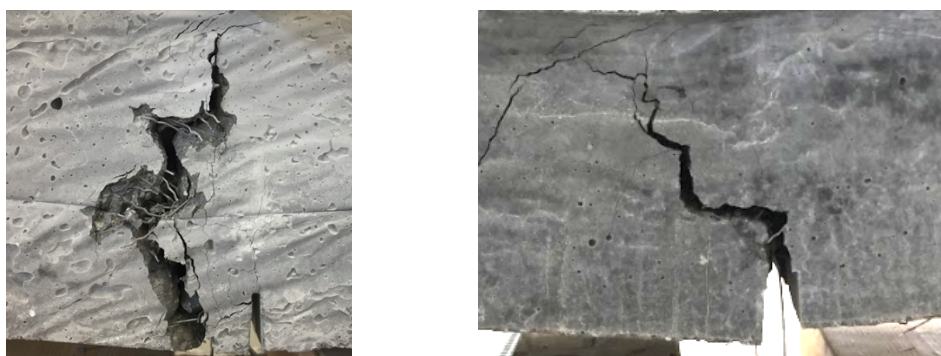
For fiberbetong er det forventet å oppnå en bedre bøystrekkfasthet enn for ordinærbetong. Det var også forventet at bøystrekkfastheten skal bli positivt påvirket av et høyere fiberinnhold.

Bøystrekkfastheten opplever en nedgang ved prøve ti. Den burde i utgangspunktet hatt en høyere fasthet enn prøve ni og åtte, på grunn av tilsatt tilslag. Det dårlige resultatet kan være grunnet dårlig fordeling av fiber, men også menneskelige feil som at prøven er plassert feil på maskinen. Små feil ved plassering kan ha negative konsekvenser for resultatet.

Ordinærbetong ville ha knekt i to når den når bruddlast. *Figur 53 - Prøve ti, last/åpning-kurve* viser hvordan fiberbetongen vil sprekke opp sakte siden fiberen vil holde betongen sammen. For ordinærbetong ville lasten gått rett til null etter bruddlast var oppnådd, ikke sakte nedover.

Figur 64 - Nærbilde, bjelke etter oppsprekking viser hvordan fiberen stopper betongen fra å sprekke opp. Den samme figuren viser at sprekken ikke startet ved innhakknet. Sprekken vil gå langs de svakere punktene i betongen og kan derfor unngå fiberen. Det er derfor viktig med en jevn fordeling av fiber.

Hver gang fiberen enten blir dratt fra hverandre eller ut av betongen er det en tydelig reduisering i bøyestrekkefastheten, se *Figur 53 - Prøve ti, last/åpning-kurve*. Ingen av bjelkene som ble testet i denne oppgaven ble knekt i to, se *Figur 65 - Bjelke etter oppsprekking*.



Figur 64 - Nærbilde, bjelke etter oppsprekking



Figur 65 - Bjelke etter oppsprekking

6.2.5. Rest bøyestrekkefasthet

Fiberbetong er i stand til å motstå krefter etter brudd, noe ordinærbetong ikke er. Ved bruk av fiberbetong vil en last/åpning-kurve være som vist i *Figur 54 - Rest bøyestrekkefasthet for 0.5 vol% fiber*, *Figur 55 - Rest bøyestrekkefasthet for 0.8 vol% fiber* og *Figur 56 - Rest*

bøyestrekfasthet for 1.0 vol% fiber. Her vises det at betongen er seig og kan motstå krefter høyere enn den originale bruddlasten. Man kan se et tydelig knekk etter bruddlasten hvor betongen får sin første sprekk. Etter det vil belastningen øke og fiberen vil holde betongen sammen. Dette betyr at stålfiberen beskytter betongen fra en rask kollaps.

Figur 57 - Resultater rest bøyestrekfasthet viser at prøve ti har lavest rest bøyestrekfasthet. Forklaringen på dette har blitt diskutert i kapittel 6.2.4 *Bøyestrekfasthet*. Prøve ti, 11 og 12 burde ha en høyere rest bøyestrekfasthet enn prøve åtte og ni grunnet tilsatt tilslag, men resultatene viser det motsatte. Fiberen er vanskelig å få jevnt fordelt, se kapittel 6.3 *Tanker om fiber*, noe som kan føre til lite fiber over snittet laget i bjelken. Som et resultat av dette kan bjelken ha tålt mindre enn de tidligere prøvene.

Prøve seks har også en lavere rest bøyestrekfasthet enn de andre prøvene med 0.8 vol% fiber. Dette kan være av den samme grunnen som diskutert i avsnittet over.

Hvis resultatene for prøve seks, ti, 11 og 12 blir utelukket, vil det være en stigning i rest bøyestrekfasthet ved høyere volum fiber. Fra prøve to til prøve fem er det en økning på 2.57 MPa, og fra prøve fem til prøve ni er det en økning på 0.11 MPa. Økningen 0.8 vol% til 1.0 vol% hadde sikkert vært større om prøvene på 1.0 vol% hadde hatt et lavere matriksvolum. Det har blitt diskutert tidligere i oppgaven at matriksvolumet på 600 l/m^3 gir en svakere betong, og er derfor vanskelig å sammenligne med de andre blandingene.

6.2.6. Rest strekkfasthet

Resultatene for rest strekkfasthet er lignende resultatene for rest bøyestrekfasthet. Dette er fordi rest strekkfasthet blir regnet ut fra rest bøyestrekfasthet.

Hvis prøve seks blir sett bort fra, har prøvene med 0.8 vol% fiber en rest strekkfasthet som er omtrent lik. Nedgangen i rest strekkfasthet for prøve seks er diskutert i kapittel 6.2.5 *Rest bøyestrekfasthet*.

Prøvene med 1.0 vol% kan deles i to, hvor prøve åtte og ni er rene sandblandinger, mens prøve 10 til 12 er tilsatt tilslag. De rene sandblandingene har en høyere rest strekkfasthet enn de tilsatt

tilslag. Her skiller prøve ti seg ut, med desidert lavest resultat. Potensielle grunner til dette er diskutert i kapittel 6.2.4 *Bøyestrekfasthet* og 6.2.5 *Rest bøyestrekfasthet*.

6.2.7. Bruddenergi

Det er en direkte sammenheng mellom bruddenergien og last-nedbøying-grafen. Arealet under grafen har størst innvirkning på bruddenergien, noe som vil si at prøvene med høyest areal under grafen vil få den høyeste bruddenergien. Det er ikke stor forskjell i maksimum last for de forskjellige prøvene, men prøvene med høyest bruddenergi er de som har mistet kapasitet over lengst tid. I *Figur 60 - Last/nedbøying-kurve* er det tydelig at grafen for prøve 12 har størst areal. Samme figur viser at prøve fem og åtte tåler større deformering lenger enn de andre prøvene. Dette gjenspeiles i bruddenergien hvor de tre prøvene har de høyeste resultatene. Prøve fem, åtte og tolv er også de prøvene som tåler mest nedbøying før brudd, dette fører til et større areal under graf.

Prøve 11 har også stor deformasjon før brudd, men nedbøying ved brudd var liten, noe som fører til lavere bruddenergi. *Tabell 26 - Resultater bruddenergi* viser at prøve 11 har den laveste deformasjonen ved brudd, sammenlignet med prøve åtte som har en av de høyeste. Selv om disse to prøvene har tilnærmet likt areal under graf vil bruddenergien endres drastisk.

Det var forventet at prøvene med høyest innhold fiber ville ha høyest bruddenergi. Bruddenergien avhenger veldig mye av fiberfordelingen, ikke bare fiberinnhold. Ved å studere bruddet til bjelkene var det tydelig at prøvene med en mer komplisert bruddlinje hadde mye høyere bruddenergi enn de med en rett bruddlinje. *Figur 66 - Venstre: prøve to, høyre: prøve åtte* viser hvordan sprekken i prøve åtte måtte finne de svake punktene i betongen, og dermed ga en høyere bruddenergi.



Figur 66 - Venstre: prøve to, høyre: prøve åtte

6.3. Tanker om fiber

6.3.1. Fiber i fersk betong

Stålfiberen som ble brukt i oppgaven er veldig lang (60 mm) som ga problemer ved blanding og støpning. I blandemaskinen ble fiberen klumpet sammen ved delen av blandemaskinen som skrapper betong fra kantene. Den store klumpen av fiber som ble samlet av delen faller så ned i blandingen når maskinen blir stoppet, se *Figur 67 - Klump med fiber*. Det var derfor nødvendig å finne denne klumpen for å så manuelt separere den. En annen løsning var å løfte toppen av blandemaskinen og la trommelen gå rundt uten denne i noen sekunder før utstøpning.



Figur 67 - Klump med fiber

Ved tilsetning av fiber ble betongen vanskelig å bearbeide. De krokede endene til fiberen koblet seg sammen i hverandre og gjorde den ferske betongen seig. Dette ga mye motstand når betongen ble spadd i formene, og fiberen måtte bli dratt opp på spaden for å få de med. Resultatet av motstanden gjorde at det ble en ujevn fordeling av fiber i utstøpingen.

6.3.2. Fiberfordeling

Hvis betongen ble liggende i ro en liten stund, falt mye av fiberen ned i bunnen av blandingen. På grunn av dette var det vanskelig å oppnå en jevn fordeling av fiber under utstøping. Dette førte til at noen utstøpninger hadde en høy fibermengde og andre hadde mindre. Fiberen samlet seg også i klumper når den ble blandet inn, som førte til områder i utstøpingen med lite fiber. Det var derfor nødvendig å manuelt dele opp fiberen for å fordele den rundt i betongen. *Figur 68 - Dårlig fordeling av fiber* viser et stort område uten fiber. Mangelen på fiber gjør at betongen blir delt i to under mekanisk prøving. Hadde det vært fiber i dette området ville betongen holdt seg sammen.



Figur 68 - Dårlig fordeling av fiber

Orienteringen til fiberen var så godt som umulig å bestemme når den blir støpt ut for hånd. Som nevnt i kapittel 2.8 *Fiberarmering i selvkompimerende betong*, orienterer fiberen seg etter flyteretningen til betongen. Ved manuell utstøping blir det derimot kort flytavstand som førte til at fiberen ikke fikk tid til å bli orientert.

7. Konklusjon

Fiberbetong er tungvint å jobbe med manuelt i en fersk tilstand. Når betongen stod i ro hadde fiberen en tendens til å synke og klumpe seg sammen, som gjorde det vanskelig å få en homogen fordeling av fiberen. På grunn av dårlig fordeling av fiber var det vanskelig å forutse hvordan den herdede betongen ville oppføre seg. Ved bruk av sprøytebetong vil det muligens oppnås en større kontroll over fiberorientering og -fordeling siden fiberen er i bevegelse. Ut i fra resultatene som er oppnådd i denne oppgaven vil man få en mer duktil betong ved bruk av stålfiber, så lenge fiberen er jevnt fordelt og ikke samlet i klumper.

Verken densitet eller luftinnhold ble påvirket mye av stålfiberen. Her var det i hovedsak et høyere matriksvolum som førte til endringer. Den ferske betongen ble påvirket av fiber ved at betongen fikk en forverret støpelighet. For å beholde et v/c-tall på 0.40 var det matriksvolumet som måtte økes for å oppnå en blanding som møtte kravene til selvkomprimerende betong.

Som nevnt i avsnittet over medfører stålfiberen generelt at støpeligheten ble redusert. For å oppnå god flyt var det nødvendig å bruke superplastiserende tilsetningsstoff. På grunn av dette var det vanskelig å få en stabil betong. Små endringer i mengde tilsetningsstoff gjorde store forskjeller på blandingsene.

For denne betong sammensetningen er det ikke mulig å oppnå et fiberinnhold på 1.0 vol%. Selv med et matriksvolum på 600 l/m^3 , var det ikke mulig å oppnå en betong med selvkomprimerende egenskaper.

Trykfasthet ble ikke påvirket av fiberen, men av sementtype, matriksvolum og utfyllingsevne. Fiberen hadde størst innvirkning på måten terningene gikk til brudd. Terningene uten fiber hadde en eksplosiv bruddmekanisme i motsetning til terningene med fiber, som kun sprakk opp.

Spaltestrekkfasthet ble forbedret ved et høyere fiberinnhold. Igjen førte fiberen til at betongen kun sprakk opp, ikke ble delt i to. Elastisitetens modulen ble ikke påvirket av fiberinnholdet men

i større grad av et økende matriksvolum. For blandinger med bedre flyt vil det oppnås et bedre resultat.

Bøyestrekfasthet er bedre for fiberbetong enn for ordinærbetong. Ved økt fibermengde får betongen en forbedret bøyestrekfasthet. Dette gjelder også for rest bøyestrekfasthet og rest strekkfasthet. I alle de tre prøvene spiller fiberfordeling en viktig rolle for å få et godt resultat.

Bruddenergien ble påvirket i stor grad av fiberfordeling. Hvis prøven gikk lett til brudd ble bruddenergien lavere, som skyldtes lite fiber ved spalten. Alle bjelkene oppførte seg forskjellig etter brudd, men generelt øker brudenergien ved å tilsette fiber. Fiberbetongen har en betydelig høyere bruddenergi enn ordinærbetong.

For en selvkomprimerende betong med et v/c-tall på 0.40 er det ikke mulig å tilsette mer enn 0.8 vol% 4D Dramix fiber uten å få et unaturlig høyt matriksvolum. Det høye matriksvolumet vil svekke fastheten til betongen. Resultatene oppnådd i denne oppgaven viser at betongen med 0.8 vol% fiber har bedre mekaniske egenskaper sammenlignet med ordinærbetong.

8. Kilder

- [1] L. Vandewalle, G. Heirman og F. V. Rickstal, «Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete,» RILEM Publications SARL, Belgia, 2008.
- [2] S. Grunewald, «Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete,» DUP Science, Nederland, 2004.
- [3] Concrete Sask, «Why concrete is better,» [Internett]. Available: <http://www.concretesask.org/resources/why-is-concrete-better>. [Funnet 17 01 2018].
- [4] S. Roy, «Concrete: Worlds most used construction material,» 17 08 2015. [Internett]. Available: <http://www.thedailystar.net/science-arts-construction-materials/concrete-worlds-most-used-construction-material-144694>. [Funnet 18 01 2018].
- [5] Byggforsk, «Tilsetningsstoffer for betong,» 08 2010. [Internett]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/590/tilsetningsstoffer_for_betong. [Funnet 18 01 2018].
- [6] Americas Cement Manufacturers, «Chemical Admixtures,» [Internett]. Available: <http://www.cement.org/cement-concrete-applications/concrete-materials/chemical-admixtures> . [Funnet 18 01 2018].
- [7] Americas Cement Manufacturers, «Aggregates,» [Internett]. Available: <http://www.cement.org/cement-concrete-applications/concrete-materials/aggregates> . [Funnet 22 01 2018].
- [8] S. Jacobsen, M. Maage, S. Smeplass, K. O. Kjellsen, E. J. Sellevold, J. Lindgård, R. Cepuritis, R. Myrdal, Ø. Bjøntegaard og M. R. Geiker, «TKT 4215 - Concrete Technology 1,» Norwegian University of Science and Technology, Norge, 2010.
- [9] PennState - College of Engineering, «The Effect of Aggregate Properties on Concrete,» [Internett]. Available: <http://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/materials/aggregate/aggregatesmain.htm>. [Funnet 19 03 2018].
- [10] C. M. Goncalves og F. Margarido, Materials for Construction and Civil Engineering, Springer, 2012.
- [11] Understanding cement, «Cement manufacturing: components of a cement plant,» [Internett]. Available: <https://www.understanding-cement.com/manufacturing.html> . [Funnet 19 01 2018].
- [12] Norcem, «Herdeteknologi,» Norcem, 2016.
- [13] Infrastructure Technology Institute, «The fineness and particle size distribution of Portland cement,» [Internett]. Available: http://www.iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph3_7.html. [Funnet 06 04 2018].

- [14] Concrete Countertop Institute, «The importance of water/cement ratio,» [Internett]. Available: <http://www.concretecountertopinstitute.com/the-importance-of-watercement-ratio/> . [Funnet 23 01 2018].
- [15] W. R. Malisch, «Water-cement ratio, water reducers, and finishability,» The Aberdeen Group, USA, 1992.
- [16] Norcem, «God betong er bestandig,» Heidelberg Cement Group, Norge.
- [17] K. D. Basham, M. Clark, T. France og P. Harrison, «What is fly ash?,» 07 12 2007. [Internett]. Available: http://www.concreteconstruction.net/how-to/materials/what-is-fly-ash_o. [Funnet 16 03 2018].
- [18] J. Rodriguez, «Uses, Benefits and Drawbacks of Fly Ash in Construction,» 07 04 2017. [Internett]. Available: <https://www.thebalance.com/fly-ash-applications-844761>. [Funnet 16 03 2018].
- [19] M. Iqbal Khan og R. Siddique, «Utilization of silica fume in concrete: review of durability properties,» Elsevier B.V., Saudi Arabia, 2011.
- [20] V. M. Malhotra og G. G. Carrette, «Silica Fume Concrete - Properties, Applications and Limitations,» Concrete international, Canada, 1983.
- [21] Finnfjord, «Ferrosilisium,» [Internett]. Available: <http://www.finnfjord.no/ferrosilisium>. [Funnet 06 04 2018].
- [22] Superior, «WHAT IS DENSIFIED SILICA FUME?,» [Internett]. Available: <http://www.microsilica-fume.com/densified-silica-fume.html>. [Funnet 16 03 2018].
- [23] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff og W. C. Panarese, Design and control of concrete structures, USA: Portland Cement Association, 2003.
- [24] I. Papayianni, G. Tsohos, N. Oikonomou og P. Mavria, «Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures,» Elsevier, Greece, 2005.
- [25] H. Jamal, «Properties of Fresh Concrete and Factors Affecting Properties,» 17 03 2017. [Internett]. Available: <https://www.aboutcivil.org/Properties-of-concrete-factors-affecting-them.html>. [Funnet 23 01 2018].
- [26] Norsk betongforening , «Spesifikasjon og produksjonsveiledning for selvkomprimerende betong,» Norsk betongforening, Norge, 2007.
- [27] J. A. Daczko, Self-Consolidating Concrete: Applying what we know, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2012.
- [28] W. Li, L. Shen, . H. Bahrami Jovein, Z. Sun og . Q. Wang, «Testing dynamic segregation of self-consolidating concrete,» Elsevier, Hawai, 2014.
- [29] T. Kanstad, «Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner,» SINTEF Building and Infrastructure, Norge, 2011.

- [30] E. Herman, «Is Fiber-Reinforced Concrete the Material of the Future?,» AQUA Magazine, 04 2016. [Internett]. Available: <https://aquamagazine.com/builder/is-fiber-reinforced-concrete-the-material-of-the-future.html>. [Funnet 26 03 2018].
- [31] H. Behbahani og B. Nematollahi, «Steel fiber reinforced concrete: a review,» i *International Conference on Structural Engineering Construction and Management*, Sri Lanka, 2011.
- [32] M. Gustafsson og S. Karsson, «Fiberarmerade betongkonstruksjoner,» Chalmers, Göteborg, 2006.
- [33] N. Banthia, «Fiber reinforced concrete,» Detroit, 1994.
- [34] Å. L. Døssland, «Fibre Reinforcement in Load Carrying Concrete Structures,» Norwegian University of Science and Technology, Norge, 2008.
- [35] E. Nordström, «Steel Fibre Corrosion in Cracks,» Luleå University Of Technology, Sverige, 2000.
- [36] S. U. Balouch, J. Forth og J. Granju, «Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete,» Cement and Concrete Research, England, 2009.
- [37] L. Nyholm Thrane, O. Svec, M. Strøm og T. Kasper, «Guideline for execution of steel fibre reinforced SCC,» Danish Technological Institute, Danmark, 2013.
- [38] Velde AS, «Grovt tilslag 16/22 mm,» Velde, Sandnes, 2016.
- [39] P. Gjerp, D. Keeping, M. Opsahl og S. Smeplass, *Grunnleggende betongteknologi*, Norge: Byggnæringens forl., 2004.
- [40] Elkem, «Benefits of Elkem Microsilica® in Concrete,» [Internett]. Available: <https://www.elkem.com/no/elkem-silicon-materials/high-performance-concrete/>. [Funnet 16 03 2018].
- [41] Elkem, «Grade 940 for Concrete,» [Internett]. Available: <https://www.elkem.com/silicon-materials/high-performance-concrete/microsilica-concrete-grades/microsilica-grade-940-construction/>. [Funnet 16 03 2018].
- [42] Mapei, «Dynamon SX-N,» Mapei, Norge, 2011.
- [43] Bekaert, «Dramix - Reinforcing the future,» Bekaert, Belgia, 2012.
- [44] Bekaert, «Dramix 4D,» Bekaert, Marietta, 2018.
- [45] Statens Vegvesen, «14.621 - Fremstilling av betong i laboratoriet,» Statens Vegvesen, Norge, 1996.
- [46] Standard Norge, «Prøving av fersk betong - Del 7: Luftinnhold - Trykkmetoder,» Standard Norge, Norge, 2010.
- [47] Standard Norge, «Prøving av fersk betong - Del 6: Densitet,» Standard Norge, Norge, 2010.
- [48] Standard Norge, «Prøving av fersk betong - Del 8: Selvkompimerende betong - Synkutbredelsesmetode,» Standard Norge, Norge, 2010.

- [49] Standard Norge, «Prøving av fersk betong - Del 12 - Selvkomprimerende betong J-ring metode,» Standard Norge, Norge, 2010.
- [50] Standard Norge, «Prøving av fersk betong - Del 10: Selvkomprimerende betong - L-boksmetode,» Standard Norge, Norge, 2010.
- [51] Standard Norge, «Prøving av herdnet betong - Del 3: prøvelegemers trykkfasthet,» Standard Norge, Norge, 2009.
- [52] Standard Norge, «Prøving av herdnet betong - Del 6: Prøvelegemers spaltestrekfasthet,» Standard Norge, Norge, 2009.
- [53] Standard Norge, «Prøving av herdnet betong - Del 13: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk,» Standard Norge, Norge, 2014.
- [54] RILEM, «RILEM TC 162-TDF - Test and design methods for steel fibre reinforced concrete,» RILEM Publications SARL, 2000.
- [55] Standard Norge, «Prøving av herdnet betong - Del 5: Prøvelegemers bøyestrekfasthet,» Standard Norge, Norge, 2009.
- [56] O. Skjølvold, «Bruddenergi ved 3-punkts prøving av prizmer med kjerv.,» SINTEF Byggeforsk, Norge, 2007.
- [57] Norcem AS, «Produktinformasjon Standardsement FA,» Norcem AS, Norge.
- [58] Norcem AS, «Produktinformasjon Anleggsement FA,» Norcem AS, Norge.
- [59] Standard Norge, «Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger,» Standard Norge, Norge, 2008.
- [60] A. Hilleborg, «Concrete fracture energy tests performed by 9 laboratories according to a draft RILEM recommendation : Report to RILEM TC50-FMC,» Lund University, Sverige, 1983.
- [61] N. Van Chanh, «Steel fibre reinforced concrete,» Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam.

Vedlegg

Innholdsfortegnelse

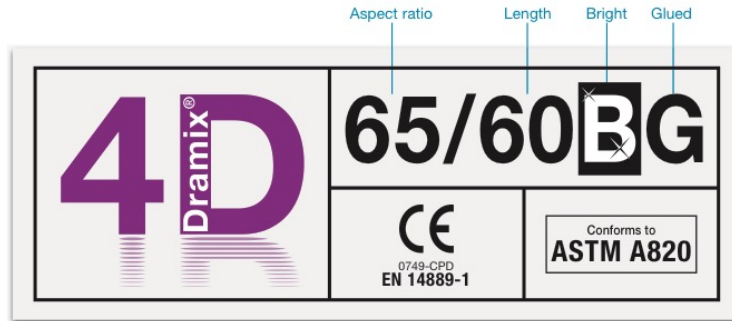
Vedlegg 1 - Stålfiber.....	2
Vedlegg 2 - Anlegg FA.....	3
Vedlegg 3 - Standard FA	4
Vedlegg 4 - Microsilica	5
Vedlegg 5 - Mapei SX-N.....	6
Vedlegg 6 - Resept blanding en.....	6
Vedlegg 7 - Resept blanding to.....	8
Vedlegg 8 - Resept blanding tre.....	9
Vedlegg 9 - Resept blanding fire	10
Vedlegg 10 - Resept blanding fem.....	11
Vedlegg 11 - Resept blanding seks.....	12
Vedlegg 12 - Resept blanding syv	13
Vedlegg 13 - Resept blanding åtte.....	14
Vedlegg 14 - Resept blanding ni.....	15
Vedlegg 15 - Resept blanding ti.....	16
Vedlegg 16 - Resept blanding 11.....	17
Vedlegg 17 - Resept blanding 12.....	18
Vedlegg 18 - Resultater trykkfasthet	19
Vedlegg 19 - Resultater spalttestekkkfasthet.....	21
Vedlegg 20 - Resultater elastisitetens modulus	23
Vedlegg 21 - Resultater bøyestrekfasthet	24
Vedlegg 22 - Beregning bøyestrekfasthet.....	25
Vedlegg 23 - Beregning rest bøyestrekfasthet.....	26
Vedlegg 24 - Beregning rest strekkfasthet.....	36
Vedlegg 25 - Beregning bruddenergi.....	38

Dramix®

 **BEKAERT**

better together

Data Sheet



DRAMIX® 4D



The Dramix® 4D series is designed with optimal serviceability in mind. Tensile strength and anchorage are engineered specifically to affect cracks between 0,1 and 0,3 mm, enabling you to create durable and liquid-tight structures. The 4D series is also a perfect solution for combined reinforcement.

- > optimised anchorage
- > high L/D ratio, glued fibre
- > high tensile strength

Dramix® 4D is a cost efficient solution for SLS applications

- > seamless floors
- > combislab (Dramix® 4D + mesh)
- > underwater concrete
- > motorways
- > harbour pavements

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support. Go to www.bekaert.com/dosingdramix for our recommendations on handling, dosing and mixing.



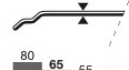

Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For detailed information, product specifications available on request.

PERFORMANCE

Material properties

Tensile strength: $R_{m, nom}^*$: 1.600 N/mm²
Tolerances: ± 7,5% Avg
Young's Modulus: ± 200.000 N/mm²

Geometry

Fibre family	4D	
Length (l)	60 mm	
Diameter (d)	0,90 mm	
Aspect ratio (l/d)	65	

Fibre network

2,9 km per m³ (for 15 kg/m³)
2.314 fibres/kg
Minimum dosage:
15 kg per m³ (according to CE)

Dramix® range

5D 4D 3D

Tensile strength	
Wire ductility	
Anchorage strength	

PRODUCT CERTIFICATES



Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

PACKAGING



BAGS 20 kg

BIG BAG 800-1100 kg

STORAGE



Vedlegg 2 - Anlegg FA

PRODUKTDATABLAD
ANLEGGSEMENT FA
CEM II/A-V
 SIST REVIDERT AUGUST 2017

Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portland-flygeaskesement CEM II/A-V 42,5 N.

Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m ² /kg)		390	
Spesifikk vekt (kg/dm ³)		3,02	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnende størkning (min)		165	≥ 60
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	15	
	2 døgn	24	≥ 10
	7 døgn	37	
	28 døgn	55	≥ 42,5 ≤ 62,5
Sulfat (% SO ₃)		≤ 3,5	≤ 3,5
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,085	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalier (% Na ₂ O _{ekv}) ²		0,6	
Klinker (%)		81	80-94
Flygeaske (%)		15	6-20
Kalkmel (sekundær bestanddel %)		4	< 5

1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII punkt 47 krom VI forbindelser.
 2. Beregnet uten bidraget fra flygeasken ihh til NB21.
 I betong beregnes alkalibidraget fra sementdelen slik: Sementmengde x 0,6%

NORCEM
 HEIDELBERGCEMENT Group

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

PRODUKTDATABLAD

STANDARDSEMENT FA

CEM II/B-M

SIST REVIDERT AUGUST 2017

Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portland blandingssement CEM II/B-M 42,5 R.

Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m ² /kg)		450	
Spesifikk vekt (kg/dm ³)		3,00 (B) / 2,99 (K)	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnende størkning (min)		140	≥ 60
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	20	
	2 døgn	31	≥ 20
	7 døgn	42	
	28 døgn	55	≥ 42,5 ≤ 62,5
Sulfat (% SO ₃)		≤ 4,0	≤ 4,0
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,085	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalier (% Na ₂ O _{ekv})		1,4 (B) / 1,5 (K)	
Klinker (%)		78	65-79
Flygeaske (%)		18	21-35
Kalkmel (%)		4	

1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII point 47 krom VI forbindelser.

B = Brevik og K = Kjølsvik

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

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

Elkem Microsilica® Grade 940

Fibre Cement

FC2-01 Products

General

Elkem Microsilica® Grade 940 is dry silica fume available in two main forms:

- Undensified - 940 U with a typical bulk density of 200 - 350 kg/m³
- Densified - 940 D with a typical bulk density of 500 - 700 kg/m³

Packaging

The products are supplied in a range of packaging:

- 25 kg paper bags
- Big bags in a variety of designs and sizes depending on product and production plant.
- Bulk in road tanker

Special packaging can be supplied on request.

Storage & Handling

Elkem Microsilica® Grade 940 should be kept in dry storage. Products that have been subjected to moisture and allowed to dry again may result in inferior performance.

Quality Control

Elkem Materials is certified according to ISO 9001.

The chemical composition and physical properties are regularly tested.

Elkem Microsilica® Grade 940		
Chemical and physical requirements	Specification (characteristic values)	Frequency
SiO ₂ (%)	> 90	Weekly
H ₂ O (moisture content when packed, %)	< 1,0	Weekly
Loss on Ignition, LOI (%)	< 3,0	Weekly
Retained on 45 micron sieve (tested on Undensified, %)	< 1,5	Weekly
Bulk Density - Undensified (when packed, kg/m ³)	200 - 350	Weekly
Bulk Density - Densified (when packed, kg/m ³)	500 - 700	Weekly

The above Elkem specification refers to analysis performed using the Elkem Standard Test Methods for Microsilica. Elkem Standard Test Methods for Microsilica are available upon request.

DISCLAIMER:

The information given on this datasheet is based on many years of research and field experience and is accurate to the best knowledge of Elkem Materials. However, due to the numerous factors that can affect the performance of a fibre cement, with or without microsilica, Elkem Materials offers this information without guarantee and accepts no liability for any direct or indirect damages from its use.

Elkem Microsilica® is a registered trademark and belongs to Elkem Materials



Elkem ASA, Materials
P.O.Box 8126, Vaagsbygd
N-4675 Kristiansand - Norway

Telephone: +47 38 01 75 00
Telefax: +47 38 01 49 70
Internet: www.fibrecement.elkem.com
E-mail: fibrecement.materials@elkem.no





BESKRIVELSE

Dynamon SX-N er et svært effektivt superplastiserende tilsetningsstoff basert på modifiserte akrylpolymerer. Produktet tilhører **Dynamon-systemet** basert på den Mapei-utviklede DPP-teknologien (DPP = Designed Performance Polymers), der tilsetningsstoffenes egenskaper skreddersys til ulike betongformål. **Dynamon-systemet** er utviklet på basis av Mapeis egen sammenstilling og produksjon av monomerer.

BRUKSOMRÅDER

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:

- Vanntett 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.
- Selvkomprimerende 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.

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.

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

Blandevolum:	16 liter
Dato:	25.01.2018
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Ruth Helene Brenden

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg FA	413,6	6,617			6,617
Elkem Microsilica	20,7	0,331	50	0,331	0,662
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	173,7	2,779		-1,013	1,767
Absorbert vann	8,8	0,141			0,141
Årdal 0/8 mm nat. vask.	934,2	14,947	4,3	0,649	15,596
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	828,4	13,255	0,3	0,033	13,288
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	0,0	0,000	82	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	39,0	0,624			0,624
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

1,908

Vedlegg 8 - Resept blanding tre

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

Blandevolum:	50 liter
Dato:	07.02.2018
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Ruth Helene Brenden

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem standard FA	402,6	20,129			20,129	
Elkem Microsilica	20,1	1,006	50	1,006	2,013	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Fritt vann	169,1	8,454		-1,801	6,653	7,091
Absorbert vann	8,8	0,439			0,439	
Årdal 0/8 mm nat. vask.	929,8	46,488	1,0	0,465	46,953	
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Årdal 8/16mm	824,5	41,225	0,0	0,000	41,225	
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	8,1	0,403	82	0,330	0,403	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	62,4	3,120			3,120	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

Vedlegg 10 - Resept blanding fem

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

Blandevolum:	50 liter
Dato:	22.02.2018
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Ruth Helene Brenden

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem standard FA	441,8	22,089			22,089	
Elkem Microsilica	22,1	1,104	50	1,104	2,209	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Fritt vann	185,5	9,277		-3,130	6,147	6,565
Absorbert vann	8,4	0,418			0,418	
Årdal 0/8 mm nat. vask.	885,6	44,282	3,5	1,537	45,818	
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Årdal 8/16mm	785,4	39,269	0,0	0,000	39,269	
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	11,9	0,596	82	0,489	0,596	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	62,4	3,120			3,120	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

Vedlegg 12 - Resept blanding syv

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

Blandevolum:	50 liter
Dato:	28.02.2018
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Ruth Helene Brenden

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem standard FA	455,2	22,762			22,762	
Elkem Microsilica	22,8	1,138	50	1,138	2,276	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Fritt vann	191,2	9,560		-3,097	6,463	6,874
Absorbert vann	8,2	0,411			0,411	
Årdal 0/8 mm nat. vask.	870,9	43,546	3,5	1,511	45,057	
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Årdal 8/16mm	772,3	38,616	0,0	0,000	38,616	
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	10,9	0,546	82	0,448	0,546	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	62,4	3,120			3,120	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

Vedlegg 14 - Resept blanding ni

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

Blandevolum:	50 liter
Dato:	08.03.2018
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Ruth Helene Brenden

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem standard FA	732,6	36,629			36,629
Elkem Microsilica	36,6	1,831	50	1,831	3,663
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	307,7	15,384		-4,776	10,609
Absorbert vann	5,2	0,262			0,262
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1049,3	52,467	4,8	2,524	54,991
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon SX-N	10,3	0,513	82	0,421	0,513
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	78,0	3,900			3,900
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

10,871

Vedlegg 16 - Resept blanding 11

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

Blandevolum:	50 liter
Dato:	14.03.2018
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	
Utført av:	Ruth Helene Brenden

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem standard FA	747,8	37,389			37,389	
Elkem Microsilica	37,4	1,869	50	1,869	3,739	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Fritt vann	314,1	15,704		-3,269	12,435	12,692
Absorbent vann	5,1	0,257			0,257	
Årdal 0/8 mm nat. vask.	544,6	27,228	3,9	1,062	28,290	
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Årdal 8/16mm	482,9	24,146	0,0	0,000	24,146	
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon SX-N	8,2	0,411	82	0,337	0,411	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	78,0	3,900			3,900	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

Parameter table:

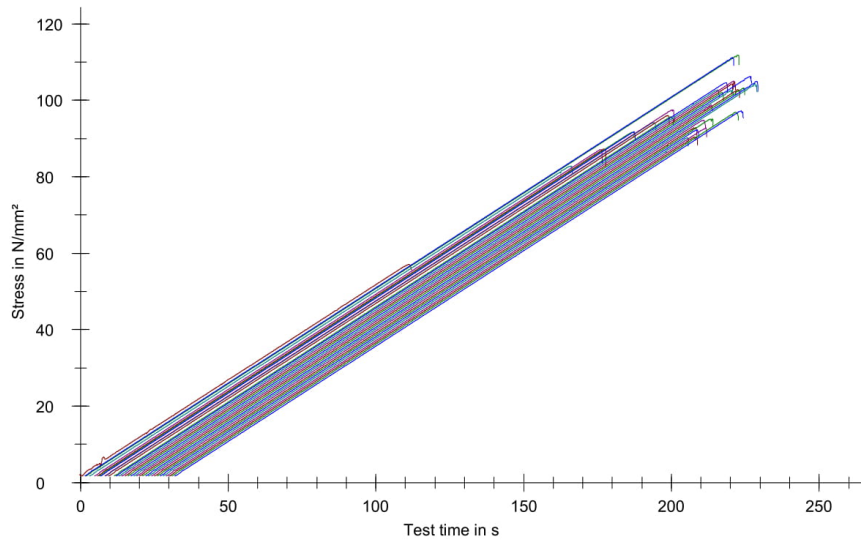
Tester: Ruth Helene
Other :

Type strain extensometer:
Machine data : Controller TT1412
PistonStroke
LoadCell 3 MN

Results:

Legends	Nr	Date	ID	a mm	b mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
	1	23.02.2018	1Prove1	100,0	100,0	570,92	57,09
	2	23.02.2018	1Prove2	100,0	100,0	1118,72	111,87
	3	23.02.2018	1Prove3	100,0	100,0	1111,53	111,15
	4	01.03.2018	2Prove1	100,0	100,0	828,45	82,85
	5	01.03.2018	2Prove2	100,0	100,0	871,55	87,16
	6	01.03.2018	2Prove3	100,0	100,0	872,97	87,30
	7	09.03.2018	4Prove1	100,0	100,0	916,35	91,63
	8	09.03.2018	4Prove2	100,0	100,0	917,98	91,80
	9	09.03.2018	4Prove3	100,0	100,0	942,19	94,22
	10	21.03.2018	5Prove1	100,0	100,0	975,16	97,52
	11	21.03.2018	5Prove2	100,0	100,0	960,22	96,02
	12	21.03.2018	5Prove3	100,0	100,0	957,58	95,76
	13	05.04.2018	6Prove1	100,0	100,0	1046,35	104,64
	14	05.04.2018	6Prove2	100,0	100,0	1027,05	102,70
	15	05.04.2018	6Prove3	100,0	100,0	1050,28	105,03
	16	05.04.2018	7Prove1	100,0	100,0	1048,06	104,81
	17	05.04.2018	7Prove2	100,0	100,0	1020,41	102,04
	18	05.04.2018	7Prove3	100,0	100,0	1062,40	106,24
	19	06.04.2018	8Prove1	100,0	100,0	1027,60	102,76
	20	06.04.2018	8Prove2	100,0	100,0	988,07	98,81
	21	06.04.2018	8Prove3	100,0	100,0	1028,25	102,83
	22	10.04.2018	9Prove1	100,0	100,0	1031,85	103,18
	23	10.04.2018	9Prove2	100,0	100,0	1049,64	104,96
	24	10.04.2018	9Prove3	100,0	100,0	1042,65	104,26
	25	10.04.2018	10Prove1	100,0	100,0	948,43	94,84
	26	10.04.2018	10Prove2	100,0	100,0	928,21	92,82
	27	10.04.2018	10Prove3	100,0	100,0	951,78	95,18
	28	10.04.2018	11Prove1	100,0	100,0	923,14	92,31
	29	10.04.2018	11Prove2	100,0	100,0	901,95	90,20
	30	10.04.2018	11Prove3	100,0	100,0	927,53	92,75
	31	12.04.2018	12Prove1	100,0	100,0	904,09	90,41
	32	12.04.2018	12Prove2	100,0	100,0	968,68	96,87
	33	12.04.2018	12Prove3	100,0	100,0	972,71	97,27

Series graphics:



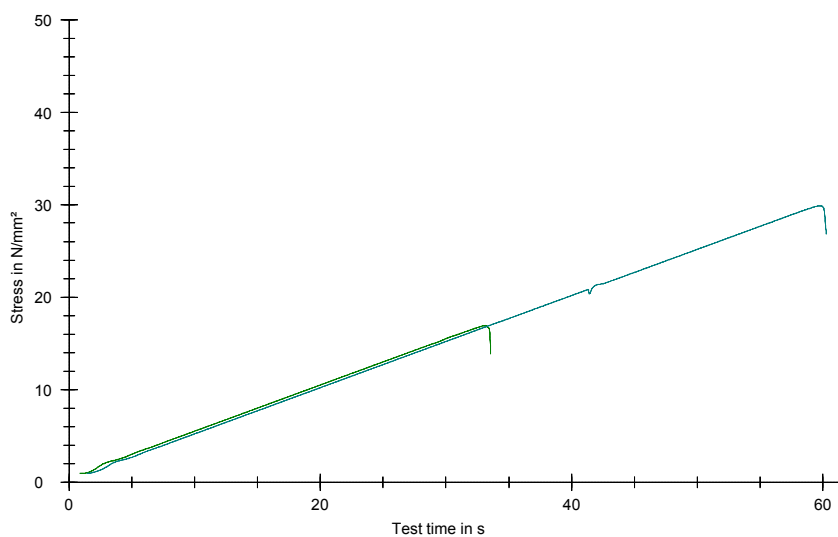
Parameter table:

Test protocol :	Type strain extensometer :
Tester :	Machine data : Controller TT1412
Customer :	PistonStroke
Test standard :	LoadCell 3 MN
Strength grade:	
Creation date :	
Age : 0 T	
Other :	

Results:

Legends	Date	ID	F _m kN	σ _m N/mm ²
	01.03.2018	stålfiber0,5%	298,82	16,91
	21.03.2018	stålfiber0,8%	527,35	29,84

Series graphics:



Parameter table:

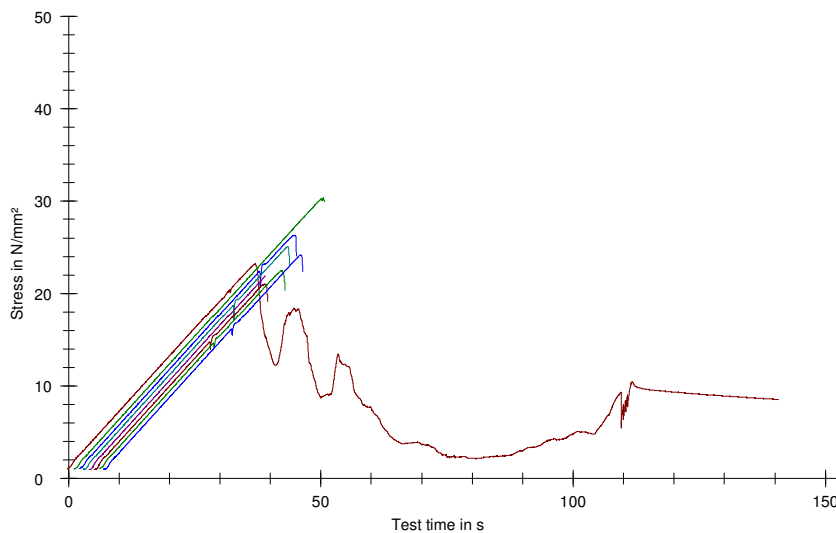
Tester : Ruth Helene
 Creation date: 13.04.2018

Type strain extensometer:
 Machine data : Controller TT0322
 PistonStroke
 LoadCell 3 MN
 Extensometer
 Extensometer2

Results:

Nr	Date	ID	F _m kN
1	09.03.2018	Blanding4	409,28
2	06.04.2018	Blanding6	535,80
3	06.04.2018	Blanding7	463,99
4	06.04.2018	Blanding8	443,31
5	10.04.2018	Blanding9	386,71
6	10.04.2018	Blanding10	371,18
7	10.04.2018	Blanding11	397,10
8	12.04.2018	Blanding12	427,04
11			-

Series graphics:



Statistics:

Series	F _m kN
n = 8	
\bar{x}	429,30
s	52,61
v	12,26

Parameter table:

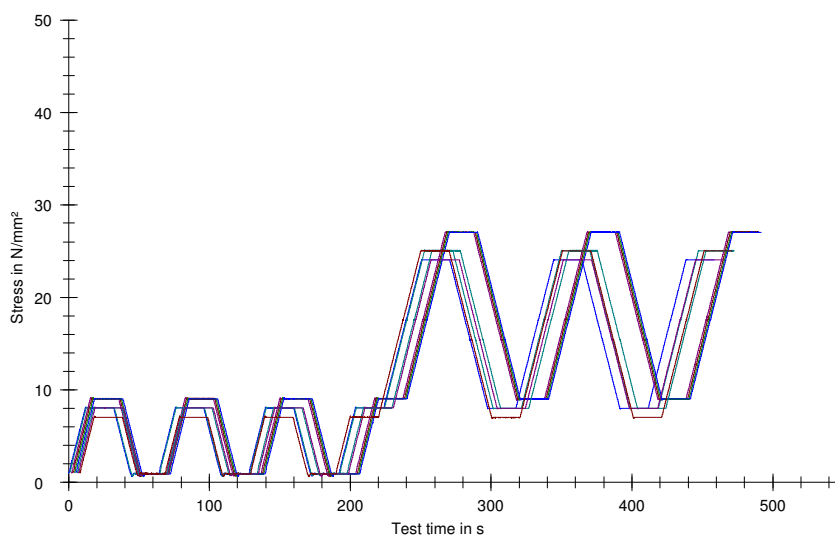
Tester : Ruth Helene
Test standard: EN12390-13 method A
Creation date : 13.04.2018

Type strain extensometer :

Results:

Nr	$\epsilon_{b2,E1}$ mm	$\epsilon_{b2,E2}$ mm	$\epsilon_{b3,E1}$ mm	$\epsilon_{b3,E2}$ mm	$\Delta\epsilon_{b23,E}$ %	$\Delta\epsilon_{b23,E}$ %	$\Delta\epsilon_{b3,E1}$ %	$\sigma_{m,a,1}$ N/mm	$\sigma_{m,b,0}$ N/mm	$\epsilon_{a,1}$ mm	$\epsilon_{b,0}$ mm	$E_{C,0}$ N/mm	$\sigma_{m,a,3}$ N/mm	$\sigma_{m,b,2}$ N/mm	$\epsilon_{a,3}$ mm	$\epsilon_{b,2}$ mm	$E_{C,S}$ N/mm
max.					10,0	10,0	20,0										
min					-10,0	-10,0	-20,0										
3	0,056	0,039	0,055	0,040	0,42	0,45	8,2	24,02	8,02	0,141	0,041	3197	24,03	7,98	0,143	0,056	36731
4	0,054	0,047	0,053	0,047	0,15	0,05	3,3	25,03	8,03	0,149	0,047	33151	25,02	7,97	0,151	0,057	36366
5	0,055	0,036	0,055	0,037	0,1	0,55	9,71	27,04	9,02	0,143	0,038	34417	27,02	8,99	0,145	0,055	40212
6	0,043	0,047	0,044	0,046	0,52	0,45	1,25	27,02	9,04	0,143	0,045	36751	27,04	8,98	0,144	0,060	43033
7	0,054	0,048	0,054	0,049	0,03	0,14	2,55	27,02	9,02	0,170	0,049	29625	27,02	8,97	0,173	0,064	32890
8	0,030	0,055	0,030	0,055	0,35	0,17	14,24	27,02	9,01	0,187	0,054	27043	27,02	8,98	0,190	0,076	31522
9	0,040	0,055	0,041	0,054	0,55	0,31	6,62	25,03	8,01	0,181	0,053	26572	25,02	7,96	0,185	0,073	30580
10	0,050	0,054	0,051	0,054	0,02	0,01	1,61	24,01	8,02	0,165	0,054	28835	24,02	7,97	0,167	0,065	31422
11	0,037	0,056	0,037	0,056	0,05	0,12	10,17	25,03	7,02	0,191	0,056	26705	25,01	6,98	0,193	0,072	29802

Series graphics:



Statistics:

Series	σ_m N/mm ²	$E_{C,0}$ N/mm ²	$E_{C,S}$ N/mm ²
n = 9			
\bar{x}	25,75	30564,19	34729,14
s	1,32	3688,83	4634,08
v	5,14	12,07	13,34

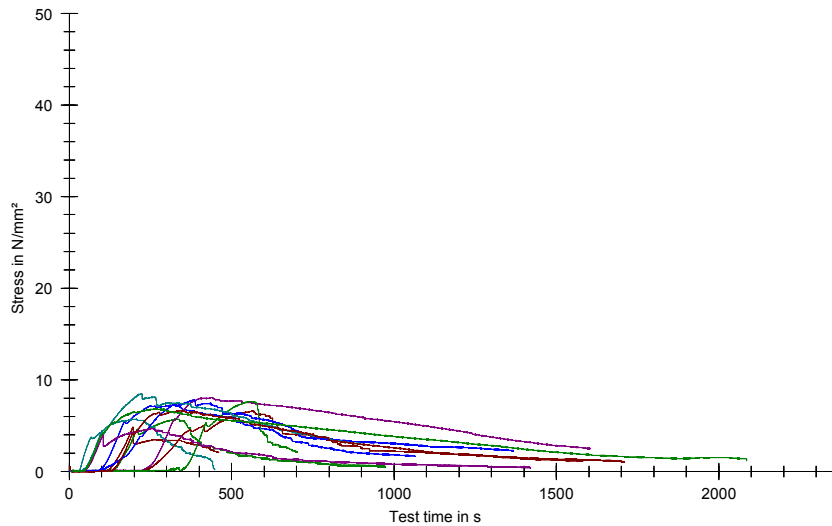
Parameter table:

Test protocol :	Type strain extensometer:
Tester :	Machine data : Controller TT1412
Customer :	
Test standard :	
Strength grade :	
Creation date :	
Age : 0 T	
Other :	

Results:

Legends	Nr	Date	ID	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN
	1	01.03.2018	Blanding2_0,5%1	150,0	550,0	82500,0	150,0	21,65
	2	01.03.2018	Blanding2_0,5%2	150,0	550,0	82500,0	150,0	25,55
	3	09.03.2018	Blanding4_0,8%1	150,0	550,0	82500,0	150,0	32,32
	4	09.03.2018	Blanding4_0,8%2	150,0	550,0	82500,0	150,0	25,64
	5	21.03.2018	Blanding5_0,8%	150,0	550,0	82500,0	150,0	36,08
	7	06.04.2018	Blanding6_0,8%	150,0	550,0	82500,0	150,0	29,58
	8	06.04.2018	Blanding7_0,8%	150,0	550,0	82500,0	150,0	34,24
	9	06.04.2018	Blanding8_1%	150,0	550,0	82500,0	150,0	35,07
	10	10.04.2018	Blanding9_1%	150,0	550,0	82500,0	150,0	38,17
	11	10.04.2018	Blanding10_1%	150,0	550,0	82500,0	150,0	20,93
	12	10.04.2018	Blanding11_1%	150,0	550,0	82500,0	150,0	29,75
	13	12.04.2018	Blanding12_1%	150,0	550,0	82500,0	150,0	30,60

Series graphics:



Statistics:

Series n = 12	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN
x	150,0	550,0	82500,0	150,0	29,97
s	0,0	0,0	0,0	0,0	5,59
v	0,00	0,00	0,00	0,00	18,66

Vedlegg 22 - Beregning bøystrekkfasthet

$$f_{cf,2} = \frac{23.60 \times 500}{150 \times 150^2} = 3.50 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,4} = \frac{28.98 \times 500}{150 \times 150^2} = 4.29 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,5} = \frac{36.08 \times 500}{150 \times 150^2} = 5.35 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,6} = \frac{29.58 \times 500}{150 \times 150^2} = 4.38 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,7} = \frac{34.24 \times 500}{150 \times 150^2} = 5.07 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,8} = \frac{35.07 \times 500}{150 \times 150^2} = 5.19 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,9} = \frac{38.17 \times 500}{150 \times 150^2} = 5.65 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,10} = \frac{20.93 \times 500}{150 \times 150^2} = 3.10 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,11} = \frac{29.75 \times 500}{150 \times 150^2} = 4.41 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,12} = \frac{30.60 \times 500}{150 \times 150^2} = 4.53 \text{ MPa}$$

$$M_{L,2} = \frac{12776 \times 550}{4} = 1756700.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,2} = \frac{6 \times 1756700}{150 \times 150^2} = 3.12 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,2} = \frac{18319.3 \times 550}{4} = 2518903.75 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,2} = \frac{6 \times 2518903.75}{150 \times 150^2} = 4.47 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,2} = \frac{21258.4 \times 550}{4} = 2923030.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,2} = \frac{6 \times 2923030}{150 \times 150^2} = 5.20 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,2} = \frac{23813.5 \times 550}{4} = 3274356.25 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,2} = \frac{6 \times 3274356.25}{150 \times 150^2} = 5.82 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,2} = \frac{25219.8 \times 550}{4} = 3467722.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,2} = \frac{6 \times 3467722.5}{150 \times 150^2} = 6.16 \text{ MPa}$$

$$M_{L,4} = \frac{15701.5 \times 550}{4} = 2158956.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,4} = \frac{6 \times 2158956}{150 \times 150^2} = 3.84 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,4} = \frac{26600.5 \times 550}{4} = 3657569.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,4} = \frac{6 \times 3657569}{150 \times 150^2} = 6.50 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,4} = \frac{3185.8 \times 550}{4} = 4374673.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,4} = \frac{6 \times 4374673}{150 \times 150^2} = 7.78 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,4} = \frac{32191.7 \times 550}{4} = 4426359.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,4} = \frac{6 \times 4426359}{150 \times 150^2} = 7.87 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,4} = \frac{31177.4 \times 550}{4} = 4286893.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,4} = \frac{6 \times 4286893}{150 \times 150^2} = 7.62 \text{ MPa}$$

$$M_{L,5} = \frac{4937.41 \times 550}{4} = 678893.88 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,5} = \frac{6 \times 678893.88}{150 \times 150^2} = 1.21 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,5} = \frac{19908.1 \times 550}{4} = 2737363.80 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,5} = \frac{6 \times 2737363.8}{150 \times 150^2} = 4.87 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,5} = \frac{30232.6 \times 550}{4} = 4156982.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,5} = \frac{6 \times 4156982.5}{150 \times 150^2} = 7.39 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,5} = \frac{34545.7 \times 550}{4} = 4750033.80 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,5} = \frac{6 \times 4750033.8}{150 \times 150^2} = 8.44 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,5} = \frac{35732.8 \times 550}{4} = 4913260.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,5} = \frac{6 \times 4913260}{150 \times 150^2} = 8.73 \text{ MPa}$$

$$M_{L,6} = \frac{4968.59 \times 550}{4} = 683181.13 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,6} = \frac{6 \times 683181.13}{150 \times 150^2} = 1.21 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,6} = \frac{19871.7 \times 550}{4} = 2732358.80 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,6} = \frac{6 \times 2732358.8}{150 \times 150^2} = 4.86 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,6} = \frac{22006.4 \times 550}{4} = 3025880.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,6} = \frac{6 \times 3025880}{150 \times 150^2} = 5.38 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,6} = \frac{22629.3 \times 550}{4} = 3111528.80 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,6} = \frac{6 \times 3111528.8}{150 \times 150^2} = 5.53 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,6} = \frac{25717.3 \times 550}{4} = 3536128.80 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,6} = \frac{6 \times 3536128.8}{150 \times 150^2} = 6.29 \text{ MPa}$$

$$M_{L,7} = \frac{768939 \times 550}{4} = 1057291.10 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,7} = \frac{6 \times 1057291.1}{150 \times 150^2} = 1.88 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,7} = \frac{21534.8 \times 550}{4} = 2961035.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,7} = \frac{6 \times 2961035}{150 \times 150^2} = 5.26 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,7} = \frac{27155 \times 550}{4} = 3733812.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,7} = \frac{6 \times 3733812.5}{150 \times 150^2} = 6.64 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,7} = \frac{31909.9 \times 550}{4} = 4387611.30 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,7} = \frac{6 \times 4387611.3}{150 \times 150^2} = 7.80 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,7} = \frac{34149.5 \times 550}{4} = 4695556.30 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,7} = \frac{6 \times 4695556.3}{150 \times 150^2} = 8.35 \text{ MPa}$$

$$M_{L,8} = \frac{10851.8 \times 550}{4} = 1492122.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,8} = \frac{6 \times 1492122.5}{150 \times 150^2} = 2.65 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,8} = \frac{22732.9 \times 550}{4} = 3125773.75 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,8} = \frac{6 \times 3125773.75}{150 \times 150^2} = 5.56 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,8} = \frac{31704.1 \times 550}{4} = 4359313.75 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,8} = \frac{6 \times 4359313.75}{150 \times 150^2} = 7.75 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,8} = \frac{32780.4 \times 550}{4} = 4507305.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,8} = \frac{6 \times 4507305}{150 \times 150^2} = 8.01 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,8} = \frac{34715.4 \times 550}{4} = 4773367.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,8} = \frac{6 \times 4773367.5}{150 \times 150^2} = 8.49 \text{ MPa}$$

$$M_{L,9} = \frac{15653.9 \times 550}{4} = 2152411.25 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,9} = \frac{6 \times 2152411.25}{150 \times 150^2} = 3.83 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,9} = \frac{21583.8 \times 550}{4} = 2967772.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,9} = \frac{6 \times 2967772.5}{150 \times 150^2} = 5.28 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,9} = \frac{33356.8 \times 550}{4} = 4586560.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,9} = \frac{6 \times 4586560}{150 \times 150^2} = 8.15 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,9} = \frac{38086.7 \times 550}{4} = 5236821.25 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,9} = \frac{6 \times 5236821.25}{150 \times 150^2} = 9.31 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,9} = \frac{36195.3 \times 550}{4} = 4976853.75 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,9} = \frac{6 \times 4976853.75}{150 \times 150^2} = 8.85 \text{ MPa}$$

$$M_{L,1,10} = \frac{11669.2 \times 550}{4} = 1604515.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,1,10} = \frac{6 \times 1604515}{150 \times 150^2} = 2.85 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,10} = \frac{16408.9 \times 550}{4} = 2256223.75 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,10} = \frac{6 \times 2256223.75}{150 \times 150^2} = 4.01 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,10} = \frac{16060.6 \times 550}{4} = 2208332.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,10} = \frac{6 \times 2208332.5}{150 \times 150^2} = 3.93 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,10} = \frac{18546 \times 550}{4} = 2550075.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,10} = \frac{6 \times 2550075}{150 \times 150^2} = 4.53 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,10} = \frac{19866.8 \times 550}{4} = 2731685.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,10} = \frac{6 \times 2731685}{150 \times 150^2} = 4.86 \text{ MPa}$$

$$M_{L,11} = \frac{5539.1 \times 550}{4} = 761626.25 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,11} = \frac{6 \times 761626.25}{150 \times 150^2} = 1.35 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,11} = \frac{17536.6 \times 550}{4} = 2411282.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,11} = \frac{6 \times 2411282.5}{150 \times 150^2} = 4.29 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,11} = \frac{25571.6 \times 550}{4} = 3516095.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,11} = \frac{6 \times 3516095}{150 \times 150^2} = 6.25 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,11} = \frac{28804.4 \times 550}{4} = 3960605.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,11} = \frac{6 \times 3960605}{150 \times 150^2} = 7.04 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,11} = \frac{29081.4 \times 550}{4} = 3998692.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,11} = \frac{6 \times 3998692.5}{150 \times 150^2} = 7.11 \text{ MPa}$$

$$M_{L,1,12} = \frac{6663.67 \times 550}{4} = 916254.63 \text{ Nmm}$$

$$f_{L,12} = \frac{6 \times 916254.63}{150 \times 150^2} = 1.63 \text{ MPa}$$

$$M_{R,1,12} = \frac{17189.2 \times 550}{4} = 2363515.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,1,12} = \frac{6 \times 2362515}{150 \times 150^2} = 4.20 \text{ MPa}$$

$$M_{R,2,12} = \frac{23840.4 \times 550}{4} = 3278055.00 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,2,12} = \frac{6 \times 3278055}{150 \times 150^2} = 5.83 \text{ MPa}$$

$$M_{R,3,12} = \frac{27007.9 \times 550}{4} = 3713586.25 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,3,12} = \frac{6 \times 3713586.25}{150 \times 150^2} = 6.60 \text{ MPa}$$

$$M_{R,4,12} = \frac{28966.6 \times 550}{4} = 3982907.50 \text{ Nmm}$$

$$f_{R,4,12} = \frac{6 \times 3982907.5}{150 \times 150^2} = 7.08 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,2} = 5.82 \times 1.5 \times 1.7 = 14.84 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,2} = 0.37 \times 14.84 = 5.49 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,4} = 7.87 \times 1.5 \times 1.7 = 20.07 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,4} = 0.37 \times 20.07 = 7.43 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,5} = 8.44 \times 1.5 \times 1.7 = 21.52 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,5} = 0.37 \times 21.52 = 7.96 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,6} = 5.53 \times 1.5 \times 1.7 = 14.10 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,6} = 0.37 \times 14.10 = 5.22 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,7} = 7.80 \times 1.5 \times 1.7 = 19.89 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,7} = 0.37 \times 19.89 = 7.36 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,8} = 8.01 \times 1.5 \times 1.7 = 20.43 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,8} = 0.37 \times 20.43 = 7.56 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,9} = 9.31 \times 1.5 \times 1.7 = 23.74 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,9} = 0.37 \times 23.74 = 8.78 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,10} = 4.53 \times 1.5 \times 1.7 = 11.55 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,10} = 0.37 \times 11.55 = 4.27 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,11} = 7.04 \times 1.5 \times 1.7 = 17.95 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,11} = 0.37 \times 17.95 = 6.64 \text{ MPa}$$

$$f_{Rk,12} = 6.60 \times 1.5 \times 1.7 = 16.83 \text{ MPa}$$

$$f_{ftk,res2.5,12} = 0.37 \times 16.83 = 6.23 \text{ MPa}$$

$$G_{F,2} = \frac{66675.16 \times 29.8 \times 9.81 \times 1.59 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 1515.15 \text{ N/mm}$$

$$G_{F,4} = \frac{151804.72 \times 29.8 \times 9.81 \times 1.87 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 4057.24 \text{ N/mm}$$

$$G_{F,5} = \frac{249838.70 \times 29.8 \times 9.81 \times 1.66 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 5927.38 \text{ N/mm}$$

$$G_{F,6} = \frac{142002.47 \times 29.8 \times 9.81 \times 2.63 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 5337.61 \text{ N/mm}$$

$$G_{F,7} = \frac{59108.71 \times 29.8 \times 9.81 \times 1.80 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 1520.62 \text{ N/mm}$$

$$G_{F,8} = \frac{186746.47 \times 29.8 \times 9.81 \times 2.29 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 6111.99 \text{ N/mm}$$

$$G_{F,9} = \frac{176657.47 \times 29.8 \times 9.81 \times 1.44 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 3635.72 \text{ N/mm}$$

$$G_{F,10} = \frac{88604.28 \times 29.8 \times 9.81 \times 1.80 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 2279.41 \text{ N/mm}$$

$$G_{F,11} = \frac{176706.30 \times 29.8 \times 9.81 \times 1.22 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 3081.11 \text{ N/mm}$$

$$G_{F,12} = \frac{273317.81 \times 29.8 \times 9.81 \times 1.80 \times \frac{550}{500}}{150 \times 150} = 7031.30 \text{ N/mm}$$