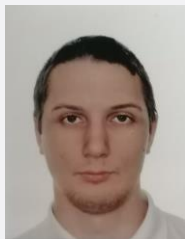


Stålfiber betong konsistens og mekaniske egenskaper



Armeen Ali



Sulumbek Arsamakov

VEILEDERE

Rein Terje Thorstensen

Universitetet i Agder, 2022

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1. Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.

2. Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen:
 - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands.
 - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt.
 - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt.
 - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten.
 - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.

3. Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.

4. Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.

5. Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det foreligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.

6. Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller tausehetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?

JA NEI

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Dette er en masteroppgave utført i fjerde og siste semesteret ved Institutt for Ingeniørvitenskap på det teknologiske fakultet på Universitet i Agder. Oppgaven er en del av studiet master i bygg med emnekode BYG508 som er avsluttende emne for master studiet. Temaet for oppgaven ble valgt ut av interessen for betong som materiale. Omfanget av oppgaven er på 30 studiepoeng.

Bygglab i Universitet i Agder har vært brukt flittig der det ble gjennomført de fleste testforsøkene. Grappa vil rette en stor takk til personell som har bistått oss på bygglaben, da spesielt Rita Sølv Ditlefsen. Mange hindringer og utfordringer har blitt rettet og løst av deres hjelp.

Våre medstudenter i UiA har også bidratt med sosiale samvær og deling av nyttig kunnskap. Vi vil også takke for det lærerike og opplevelsesfulle oppholder i Agder under masterutdanningen.

UiA står også for alle de økonomiske utgiftene i forbindelse med material innkjøp som ble benyttet til produksjon og testing av betong. Hensikten med oppgaven er å øke vår kunnskap om egenskapene til stål fiberarmert betong og også bidra med gode resultater fra denne oppgaven i videre studier.

Summary

In this era of rapid urban, the demand of concrete has also increased. This has given rise to more research on concrete performance and approach towards changes in concrete composition to fight global warming challenges. Addition of steel fiber has for many years been a pivotal point for researchers as a concrete performance enhancing adhesive. Steel fibers can also be added in concrete as a cement replacing adhesive, thus reducing CO_2 releases in the atmosphere.

It has been established that steel fibers reduce workability and consistency in concrete. On the other side, it also improves mechanical behavior in concrete and increase the lifetime of concrete. Residual flexural performance has been an interesting research topic for concrete as to understand and investigate behavior of steel fiber reinforced concrete after fracture. This brings us to the research question of this master`s thesis "How does different steel fiber volume fractions and fiber geometry effect the workability and mechanical properties in concrete". The research question was sub-divided into several methods that were utilized to answer the research question.

Different volume fractions of 0,33%, 0,66% and 1% were chosen along with 4D and 5D steel fiber types with similar aspect ratios. Slump flow test, LCPC box and rheometer test were chosen to investigate the rheological properties of steel fiber reinforced concrete. Compression test, elasticity module test and flexural test were used to determine the mechanical properties of the concrete.

The slump-flow test results indicated decrease in concrete workability with increase in steel fiber volume fractions. The decrease in workability with increasing steel fiber content was also observed for LCPC-box and rheometer test results. The reduction in workability for 4D fiber type concrete was higher than 5D fiber type.

Compression test, elasticity module and residual flexural results showed increase in compressive strength with increase in steel fiber content for both 4D and 5D fiber types. Comparison between the effect of elasticity module for 4D and 5D fibers was inclusive due to low sample size. 4D fiber results showed high compressive strength and 5D fibers, whereas 5D fiber demonstration better results than 4D fiber for the residual flexural strength test.

Based on the results mentioned hereinabove, it can be concluded that concrete reinforcement with steel fibers reduces workability in concrete. Increase in steel fiber content increased elasticity module, but future studies should consider testing more samples for a better conclusion. Residual flexural strength also increases with increase in steel fiber volume fraction, which goes on to answer the research question about effect of steel fiber volume fraction on mechanical properties of concrete.

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	i
Publiseringsavtale.....	ii
Forord.....	iii
Summary	iv
Figurliste	viii
Tabelliste	x
1 Innledning	1
2 Samfunnsperspektiv.....	2
3 Kunnskapsbakgrunn	4
3.1 Betong oppbygging	4
3.2 Fersk betong.....	4
3.3 Betong herding.....	5
3.4 Betong støpelighet.....	6
3.5 Standarder	7
3.6 Fiberarmert betong.....	7
3.6.1 Fibertyper	8
3.6.2 Stålfiber.....	8
3.6.3 Polymerfiber	9
3.6.4 Basaltfiber.....	9
3.7 Fiberarmert betong mekaniske egenskaper	10
3.8 Bruksområder til fiberarmert betong	12
3.8.1 Tunnel	12
3.8.2 Dekker.....	12
3.9 Mekaniske egenskaper til betong	13
3.9.1 Terning trykkfasthet	Feil! Bokmerke er ikke definert.
3.9.2 Bøystrekkfasthet.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
3.10 Teori om rheometer.....	13
4 Forskerspørsmål.....	16
5 Case/Materialer	17
5.1.1.....	18
5.1.2.....	18
6 Metode.....	20
6.1 Litteratursøk.....	34
6.2 Generelt om metode og blandinger	Feil! Bokmerke er ikke definert.

6.3	Proporsjonering av betong	Feil! Bokmerke er ikke definert.
6.4	Betong blandingsprosess uten tilsatt stålfiber	21
6.5	Betong blandingsprosess med tilsatt stålfiber	22
6.6	Herdingsprosess av blandinger	Feil! Bokmerke er ikke definert.
7	Testing etter betong herding	22
7.1	Trykkfasthetstest.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
7.2	Bøyestrekfasthet test.....	26
7.2.1	Bøyestrekfasthet og rest bøyestrekfasthet	29
7.3	Elastisitetsmodul.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
7.4	Testing i fersk tilstand	30
7.4.1	Synkutbredelse test.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
7.4.2	LCPC-BOX.....	30
7.4.3	Rheometer test.....	32
7.5	Avvik fra NS	33
7.6	Statistisk modell for resultatinterpolering.....	33
8	Resultat	35
8.1	Resultater av litteraturstudier	35
8.1.1	Studie 1	Feil! Bokmerke er ikke definert.
8.1.2	Studie 2.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
8.1.3	Studie 3	35
8.1.4	Studie 4.....	36
8.1.5	Studie 5.....	38
8.1.6	Studie 6.....	39
8.1.7	Studie 7.....	41
8.1.8	Studie 8.....	42
8.1.9	Studie 9.....	42
8.2	Fersktester	44
8.2.1	LCPC boks.....	44
8.2.2	Rheometer test.....	45
8.2.3	Synkutbredelse	49
8.2.4	Synkutbredelse	Feil! Bokmerke er ikke definert.
8.3	Mekaniske tester.....	50
8.3.1	Trykkfasthet.....	50
8.3.2	Resultat av elastisitetsmodul.....	52

8.3.3	Resultat av restbøystrekk fasthet.....	53
9	Diskusjon.....	55
9.1	Diskusjon av metoder	55
9.2	Diskusjon av resultater.....	60
9.2.1	Diskusjon av tester i fersk tilstand.....	60
9.3	Diskusjon av i mekaniske tester.....	63
9.3.1	Trykkfasthet.....	63
9.3.2	Elastisitetsmodul	64
9.3.3	Rest bøystrekkfasthet.....	65
10	Konklusjon.....	67
11	Anbefalinger.....	69
	Referanser	70
	Vedlegg.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
	Vedlegg A – Fersk betong prosedyrer	73
	Vedlegg A2- Synkutbredelse.....	75
	Vedlegg A3- LCPC.....	77
	Vedlegg A4 - Rheometer	79
	Vedlegg B – Labrapporter.....	83
	Rapport 1: Uarmerte referanse betong.....	83
	Rapport 2: 0,33% av 4D stålfiberarmert blanding	86
	Rapport 3: 0,66% av 4D stålfiberarmert blanding	90
	Rapport 4: 1% av 4D stålfiberarmert blanding med 10l matriks	94
	Rapport 5: 0,33% av 5D stålfiberarmert blanding	97
	Rapport 6: 0,66% av 5D stålfiberarmert blanding	101
	Rapport 7: 1% av 5D stålfiberarmert blanding med 10l matriks	106
	Vedlegg C – Datablad	110

Figurliste

Figur 3.3.1 Illustrasjon av forhold og porøsitet mellom sement/ vann forhold [11]	6
Figur 3.6.1 Forskjellige varianter av fiberarmering og ulike geometriske utforminger. [16]	8
Figur 3.7.1 Virkemåten til tradisjonell betong og fiberarmert betong etter opprissing [21]	10
Figur 3.7.2 Last-deformasjonsdiagram for fiberarmert betong med forskjellige fibermengder og geometri i trepunkts bøyetest [21]	11
Figur 3.7.3 Fiberarmert betong last-forskyvningsdiagram fra trepunkts bøyetest med forskjellige fibermengder og geometri [16]	11
Figur 3.9.1 Illustrasjon av strekk egenskaper for stålfiberarmert betong.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Figur 3.9.2 Trepunkts bøyetest test oppsett, wedge splitt test og uni-aksial test	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Figur 3.10.1 [24]	14
Figur 3.10.2 Tikotropisk egenskap i fiberarmert betong	15
Figur 6.4.1	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Figur 6.5.1	22
Figur 6.2.1.1	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Figur 7.1.1	26
Figur 7.2.1 Oppstilling for belastning av prismer (standard)	27
Figur 7.2.2	28
Figur 7.2.3 Last-CMOD-diagram. Forventet diagram for fastsettelse av proporsjonalitetsgrensen, (LOP, 1.riss, og forhåndsdefinerte rissviddene (CMOD1-CMOD4).....	29
Figur 7.2.4 Lineær spenningsfordeling i henhold til NS-EN 14651 (Kilde NS)	29
Figur 7.4.1 (Venstre) Begge blandinger har samme flytespenning, men (a) har høyere synkutbredelse flyt enn (b). (Høyere) Flytespenning målt med ulike SCC, alle med samme synkutbredelse flyt på 700+50mm	31
Figur 7.4.2 LCPC-box geometri	31
Figur 7.4.3 Illustrasjon av LCPC-box metoden.....	31
Figur 7.4.4 Korrelasjon mellom spredningslengde L i LCPC-box og forholdet flytespenning/spesifikk gravitet	32
Figur 7.4.5	33
Figur 8.1.1 Rheometer resultater for dynamisk dreiemoment $T_0(s)$. (a) rette fibere (b) endekroket fibere [26]	36
Figur 8.1.2 Rheometer resultater for (a) 1% fiber volumfraksjon (b) 1,5% fiber volumfraksjon (studie 4) [27]	38
Figur 8.1.3 Trykkfasthet resultater for betong terninger CF60 [28]	39
Figur 8.1.4 Trykkfasthet resultater for betong terninger CF50 [28]	39
Figur 8.1.5 Bøyestrekfasthet resultat CF50 [28]	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Figur 8.1.6 Bøyestrekfasthet resultat CF60 [28]	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Figur 8.1.7 Påvirkning av stålfiber voluminnhold på rest bøyestrekfasthet egenskaper	40
Figur 8.1.8 Resultater for rest bøyestrekfasthet med ulike stålfiber volumfraksjoner [29]	41
Figur 8.1.9 Resultater for rest bøyestrekfasthet med ulike stålfiber volumfraksjoner [30]	42
Figur 8.1.10 Synkmål resultater [31]	43
Figur 8.2.1 Grafisk resultat av LCPC test.....	45

Figur 8.2.2 Resultater av Rheometer test	46
Figur 8.2.3 Flow curve regresjonskurver for alle blandinger.....	47
Figur 8.2.4 Viskositets oversikt for blandingsserier	48
Figur 8.2.5 Resultater av Synkmål	49
Figur 8.3.1.....	50
Figur 8.3.2.....	52
Figur 8.3.3 Rest bøyestrekfasthet resultater for alle blandingsserier.....	54
Figur 9.1.1 Feilblanding med betongseperasjon og høyt vanninnhold.....	56
Figur 9.1.2 LCPC test av en feilblanding med tydelig separasjon.....	57
Figur 9.1.3 Ujevn overflate i en av terningene.....	58

Tabelliste

Tabell 3.6.1-1 Oversikt over test typer og standarder de utføres iht.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Tabell 3.6.2-1 Klassifisering av stålfiber [17].....	8
Tabell 3.6.3-1 Blandinger av materialer til polymerfiber	9
Tabell 3.8.2-1 Verdier for noen mekaniske egenskaper (KILDE 1)	13
Tabell 3.9.2-1 Basis resept for fasthetsklasse B30 og bestandighetsklasse M60 selvkomprimerende betong. (Egen tabell)	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Tabell 3.9.2-2 (egen tabell).....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Tabell 0-1 Dimensjoner på elementene (egen tabell).....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Tabell 6.1.2-1 Verdier for noen mekaniske egenskaper	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Tabell 8.1.2-1 Betong blandinger (studie 4) [29].....	37
Tabell 8.1.2-2 Reologiske testresultater (studie 4) [29].....	38
Tabell 8.2.1-1 Rådata for resultater av LCPC.....	45
Tabell 8.2.2-1 Dattsett for resultater av rheometer test.....	46
Tabell 8.2.2-2 Plastisk viskositet oversikt.....	48
Tabell 8.2.3-1 Rådata for resultater av synkmål	49
Tabell 8.3.1-1	50
Tabell 8.3.2-1 Elastisitetmodul resultater for alle blandingsserier	53
Tabell 8.3.3-1 Oversikt for gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet for alle blandingsserier.....	54

1 Innledning

Betong er en av de mest brukte byggematerialene i verden. Det har derfor vært hensiktsmessig å undersøke måter å forsterke betong. Mange år siden ble det benyttet fiberarmering i betong som et forsøke til å oppnå bedre mekaniske egenskaper. Bruksområdet til fiberarmeringen varierte etter måten den brukt på. Fiberarmeringen kan enten brukes som en supplerende forsterkning i tradisjonell armering eller kan brukes som en erstatning av tradisjonell armering. I forskningen som har blitt utført i mange år har det blitt undersøkt mange fibertyper, der stålfiber har vist seg til å ha større bruksområder blant andre fibertypene. Årsaken til det er gode effekten som stålfiberen har på riss begrensningen og forbedringen av betongkapasiteten. Studiene utført i disse mange årene har også vist at stålfiberarmeringen har ledet til materialbesparelser, økonomiske besparelser og har positiv innvirkning på klimaendringen på grunn av sementerstatningen. Det har også blitt vist at enkelte fibertypene har utvidet bruksområder og kan brukes til lastbærende betongkonstruksjoner.

Det utføres stadig forskninger på innvirkningen av fibertilsetningen i betong. Mange studier har vist at fibere forbedrer mekanisk egenskaper i fersk betong med tilsetning av små mengder fibere. Potensialet som fibere innebærer, er gode effekter på betongens styrke og holdbarhet sammenlignet med tradisjonell betong [1]. Fiberens egenskaper som stivheten og energiabsorpsjon er også en essensielle egenskaper som forbedrer betongs bøyestrekfastheten [2]. Det er mange nøkkelparametere som påvirker fiberinnvirkningen som fibergeometri, voluminnhold, matrikseegenskaper og grensesnittegenskaper [3].

Mangel av retningslinjer for dimensjonering med fiberarmert betong har resultert i begrenset bruk av fiberarmering til kun ikke-bærende konstruksjoner. Det har derfor vært stort behov for en formel retningslinje som oppmuntrer byggebransjen til å ta fiberarmering i bruk i større bruksområde enn det er i dag. I mars ble det publisert NB38, publikasjon nummer 38 *Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner* av Norsk Betongforrening. Hensikten med denne publikasjoner er å skaffe felles retningslinjer for dimensjonering og utførelse av fiberarmerte konstruksjoner.

Denne masteravhandlingen ble skrevet for UiA som en del av forskningsprosjektet som undersøker stålfiber innvirkningen på betongs mekaniske egenskaper og spesielt rest bøyestrekfasthet. Tematikken i oppgaven er en replisering av et prosjekt i Fibercon som utgår stålfiberarmert betong mekanisk testing med ulike stålfiber volumfraksjoner. Oppgaven skrives under supervisjonen av Rein Terje som har hatt samarbeid med Fibercon i prosjektet. En stor del av denne masteravhandlingen går ut på testing av kapasiteten og mekaniske holdbarheten til fiberarmert betong med forskjellige fiberinnhold. I oppgaven blir det testet betong terninger for trykkfasthet, betongbjelker for bøyestrekfasthet og restbøyefastheten og sylindere blandinger tester for elastiske modulen. Fibergeometrien som benyttes i prosjektet er av type 3D og 5D. Beregningsmodeller i prosjektet vurderes opp mot litteraturstudier, og mot resultater fra testene som ble utført i laboratoriet. Det ble også innhentet beregningsmetoder fra NB38, Annex L til nye Eurokode 2 of COIN. Hensikten med oppgaven skal være å fremheve kunnskapen om bruk av fiberarmert betong i bærende konstruksjoner ved hjelp av analyseringen beregningsmodellene og resultatene.

2 Samfunnsperspektiv

Tiltak mot klimaendringer har vært et høydepunkt i siste 20 årene. Mange land har kommet i enighet om klimautfordringer og bestemt å skissere en felles arbeidsplan til å kjempe klimaendringer. Denne felles planen omfatter tiltak og retninger som landene skal iverksette for å eliminere klimatrusler. I 2015 ble det introdusert FNs bærekraftsmål som består av 17 mål. Disse målene inkluderer felles tiltakene for å stoppe klimaendringene innen 2030. Parisavtalen ble også introdusert i 2016 som er en internasjonal avtale for å redusere klimaendringene, avtalen gjelder for alle land selv om det forventes større grad av iverksettelse av "rike" land [4]. Denne avtalen omfatter utarbeidelse av en nasjonal plan på tiltak som landene kartlegger for å kutte klimautslipp. Norge har implementert og oppfylt mange av disse FNs bærekraftsmål, klima relaterte mål blant annet. Likevel er det potensial på reduksjon av klimautslippene ved videre innovasjon og klimautslipp reduserende tiltak i andre sektorer som betongproduksjon og bruk.

Norsk regjering beskriver på sin nettside om Norges mål om å redusere klimautslipp av klimagasser med 50 til 55% innen 2030 [5]. Norge samarbeider en EU gjennom klimaavtalen til å redusere klimautslippene. I 2021 la Ex-statsministeren Erna Solberg fram en klimaplan for perioden 2021-2030. Denne klimaplanen innebærer veiledning og spesifikke forslag til politikk for å iverksette tiltak for å oppfylle klimamål. Det ble lagt til grunn lovreguleringer, støtteordninger og andre økonomiske virkemidler som priser utslipp. I FNs klimamål 13 blir det omtalt tiltak i forbindelse med klimaendringer. Norge er i tråd med FNs klimamålet med hensyn på politiske tiltak og klimaplanen, i tillegg har det Norge som mål å satse på forskning og innovasjon sammen med andre virkemidler til å oppnå klimamålet.

Betong blir brukt i fleste konstruksjoner i hele verden. Det er på grunn av god trykkapasitet i betong og andre mekaniske fordeler. Samtidig er det også noen miljømessige aspekter ved bruk av tradisjonell betong i stor grad som leder til store CO₂ utslipp i atmosfæren. Hoved oppbygging av betong består av sement, og ved produksjon av sement slippes det ut store mengder CO₂ ved oppspaltning av kjemiske molekyler i sementen. Sementproduksjon innebærer blanding av grunnstoffer som kalsium (Ca), silisium (Si) og jern (Fe). En av prosessene ved sementproduksjon er kalsinering som forårsaker store mengder av CO₂ utslipp. Et tonn CEM1 sement bidrar med 700/800 kg CO₂ i lufta [4]. Disse utslippene bidrar til globaloppvarmingen og klimaendringene som det understrekes i Parisavtalen og FNs bærekraftsmål. Dette forsøkes stadig å finne sementerstatningsstoffer som kompenserer for sement egenskaper og kan i tillegg bidrar med andre mekaniske egenskaper som betong mangler. En slik sementerstatningsstoff er stålfiber som det undersøkes i denne oppgaven

Miljøaspektet til fiberarmert betong har positive miljøvirkninger med hensyn på direkte reduksjon av klimautslipp ved erstatning av sement i betongen. Materialbesparelse ved fiberarmert betong under utstøping er enda en faktor som bidrar med mindre klimagassutslipp. Forbruk av fiberarmert betong har også vist besparelser i prosjektering med hensyn på tidsforbruk ved prosjekteringen og andre HMS relaterte fordeler. Jernbinding og armerings plassering av stangarmering på byggeplassen har stor tendens til å medføre menneskelige skade og andre HMS relaterte henvendelser. Bruk av fiberarmert betong reduserer behov for stangarmering og dermed god effekt på HMS forholdene. I tillegg er det lettere med transport av fiber enn armeringsjern, dette er på grunn av lagringsplassen og

transportbiler. Fiberarmert betong reduserer derfor behov for lagringsplass og dermed mindre transportvansker som leder til lavere klimautslipp.

3 Kunnskapsbakgrunn

3.1 Betong oppbygging

Det er nyttig å belyse betongens oppbygging, for å forstå hvordan og hvilke betongens deler bidrar til betongens mekaniske egenskaper og ikke minst-bearbeidbarhet. Oppbyggingen av betong består av meste av råvarer fra naturen. Store norske leksikon beskriver oppbyggingen av betong som et kompositt materiale som resultat av å blande sement, vann og tilslag. [6]

Sement er en av hoved materialene til betong og er det materialet som ved blanding ved vann utgjør en kjemisk reaksjon som gjør at massen stivner og betongen blir sterkere. Sement er et kalkholdig materiale som har blitt bearbeidet slik at kalken er knust opp deretter varmet opp.

I en moderne definisjon vil vi kalle betong som en felles betegnelse for slike materialer bestående av de nevnte sammensetningene, tilslag, sement og vann, og i tillegg utvalgte tilsetningsstoffer, som SP stoffer. Av den grunn at den moderne betongen kan ikke karakteriseres med en verdi, siden nå finnes det mange betong blandinger, men alle de har til felles de nevnte basis materialene. Dermed vil vi bruke den definisjonen. Denne definisjonen vil bygge opp på sementholdige materialer.

Dermed er de basis stoffene som utgjør mest av betongen: tilslag, sement/sementlignende materialer og vann.

Ved betongens oppbygging er det krav til hvert materiale. Sement holder betongen sammen, som et lim og kan ansees som det viktigste materialet i betong. Derimot hver tilsetning i betong blandingen påvirker betongens ytelse. Det er det krav for en optimal mengde av hver tilsetning. Noen tilsetninger er avhengige av form og geometri. Tilslag er små partikler/korn av materialer slik som sand og grus. Formen på kornene på tilslaget er avhengig til å passe inn med andre del materialer i betongen slik som vann, dvs. danne et godt vedheft med andre del materialer. For eksempel for runde korn på tilslaget er uønsket for det fyller opp all rom for andre partikler og kan gi en lav friksjon som er uønsket. For da vil det bli verre stabilitet i strukturen, noe som svekker betongens fasthet.

3.2 Fersk betong

Sement i fin pulverform med tilsetningen av vann kalles for sementpasta. Densiteten og viskositeten i sementpastaen avgjøres av vann og sement forhold i blandingen. Dette fenomenet kalles for v/c forhold som er et kritisk aspekt i produksjonen av betong. Konseptet om fersk betong brukes dersom betongblandings ingredienser blandes sammen helt til massen blir stiv nok til at den ikke kan prosesseres. Fersk betong egenskaper er alltid viktig for sluttproduktet.

Fersk betong er et startsteg i betongprosessen når vann blandes sammen med sement til å danne en våt flytende blanding før den begynner å separere, det er derfor betong i fersk tilstand er enkelt å sette i former til å gi dem ønskede skikkelse. Den potensielle styrken og holdbarheten i betong av en spesifikk proporsjon, er avhengig av fasthetsgraden i betongen. Det er derfor essensielt at betongkonsistensen er slik at den er lett transporterbart, plasserbart og herder i forventet tid for å oppnå ønskede styrken og holdbarheten. Første 48 timer er kritiske for blandingens egenskaper i betongkonstruksjoner. Dette kontrollerer langtidsoppførselen i betong og påvirker elastisitetsmodulen, kryp og holdbarheten [7].

Egenskapene i fersk betong [7] inkluderer støpbarhet som tillater fersk betong til å bli transportert and plassert i byggeplasser og deretter komprimert til en tettere form. Måling av støpbarheten gjøres ved hjelp av ulike tester. I denne oppgaven skal det benyttes synkutbredelse test, rheometer test og LCPC box. Indikasjon på når betongen begynner å sette observeres ved plastisk kryp og noen ganger startkryp også. En annet fenomen som det også kan observeres i fersk betong er termisk ekspansjon. Dette skjer når en varmt fersk betong topplag legges over underlagte betongen, dette kan øke temperaturen i underlaget. Innvirkning av vann og sement forholdet også har stor betydning i fersk betong tilstand ettersom en økning i vann og sement forhold fører til forminskning styrken i sementpastaen [8].

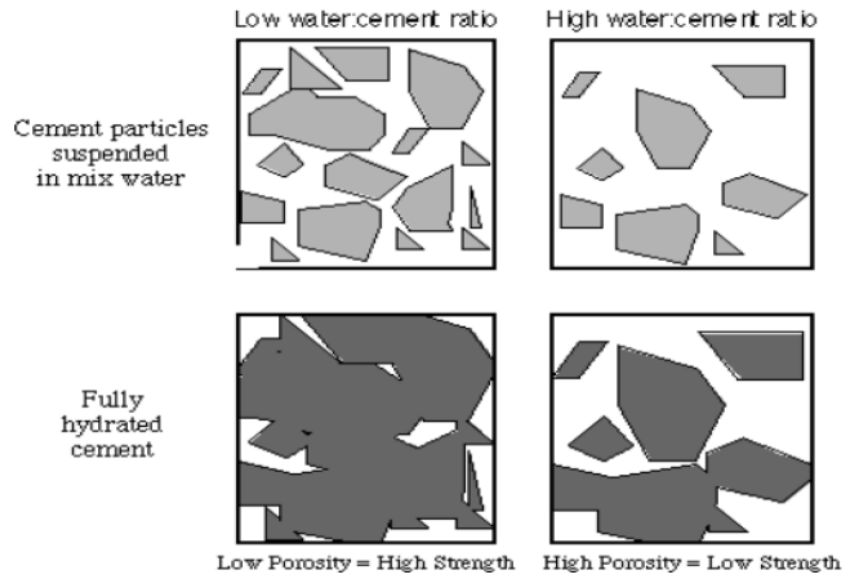
Betongens støpbarhet og konsistens avgjør dersom den er komprimert nok og homogen. Disse to egenskapene i betong har stor viktighet for å gi formen og mobiliteten i betong. I tillegg trykkevnen i betong som kan beskrives som stabiliteten og evnen til fersk betong til å opprettholde homogene egenskaper i hele betongblandingen [9].

3.3 Betong herding

Vann blandes sammen med sement og det resulterer i en kjemisk prosess som kalles for hydrering. Denne prosessen skyldes for herdingen i betong over tid. I prosessen dannes det krystall nøler som gjør sementpastaen myk, stiv og holdbar. Disse krystallene blir ofte kalt for sement gel og består av kalsium silikon hydrat (CSH). Det dannes også Kalsium hydroksid (Cao) i prosessen, men den har ikke innvirkning på mykheten i sementpastaen. Den bidrar til økning av PH verdi i sementpastaen til omtrent 13 som resulterer i beskyttende oksidlag rundt pastaen [10].

For sementen til å reagere fult med vann til å danne en hard blanding, må noen betingelser være bestemte i forkant. Vann og sement forhold må være bestemt før reaksjonen kan startes, teoretisk velges v/c forholdet til 0,4. I praksis blandes reageres/blandes ikke alt vannet med sement, dette fører til "betongblødning". Betongblødningen refereres til gjenstående vannet som ikke har reagert med sementen og settes seg ned i sementpastaen. Varmen som dannes i blandingsprosessen, fordamper vannet og danner porer som også kalles for kapillære porer. Slikt poresystem svekker mykheten i sementpastaen. Økningen i vann og sement forholdet danner større porer mellom sementen. Hulrommet som dannes som konsekvens av det, bidrar til dårlig blanding og derfor forverret mykheten i betong, samtidig forbedres det støpbarheten. På lik måte forbedres det blandingsprosessen i sementpastaen ved lavt v/c forhold, samt mindre hulrom i betongen. Sementen som ikke reagerer i blandingen, blir som aggregat og øker mykheten [10].

Utviklingen av mykheten i sementpastaen kan bli delt opp i to faser; solidifisering og herdingsfase. Solidifiseringsfasen er når blandingen endres fra væskeform til solidform over tid. I denne perioden som tidligere, krystaller begynner å danne i sementpastaen som gir den solidform [3].



Figur 3.3.1 Illustrasjon av forhold og porøsitet mellom sement/ vann forhold [11]

Herdingsfasen begynner etter solidifiseringen. I herdingsfasen danner det sterke bindinger mellom sementpartikler som øker holdfastheten i betong. Den mest viktigste faktoren under herdingsprosessen er temperaturen og fuktigheten fra omgivelsen. Sementpartiklene er harde og faste og derfor tar det lang tid for vanninntegningen i blandingen. Det er grunnen for at herdingen foregår raskt i begynnelsen ved tilsetningen av vann, men prosessen blir treigere over tid. I herdingsprosessen er det også essensielt at sementpastaen har tilstrekkelig vann slik at prosessen ikke forstyrres [11].

NS 3420-L:2010 [12] anbefaler antall dager for herdingen av sementpastaen i vann for 28 dager. Dette forsørger effekten av omgivelsestemperaturen i styrkeutviklingen i sementpastaen. Det oppstår kjemiske reaksjonen ved herding i høye temperaturer som danner sterke bindinger i pastaen, på andre siden blir styrkeutviklingen redusert ved lave temperaturer under herdingsprosessen. Det er derfor det er anbefalt å opprettholde en temperatur på $20 \pm 2^\circ\text{C}$ under herdingsprosessen.

Etter herdingen når betongen har blitt hard og tas ut fra herdekaret etter 28 dager. Det må sørges for at betongen klarer strukturelle og brukslaster som påføres. I tillegg må den være holdbar når utsatt i miljøet som betongen er designet for. Ofte testes det trykkfasthet og bøyestrekfasthet i laboratoriet for å sørge for at betongens fasthetsegenskaper er tilstrekkelige nok til å bære laster.

3.4 Betong støpelighet

Det ble gjennomført litteratursøk om støpelighet der det utføres tester til å bestemme betongkonsisten i fersk betong. Betong er et av de mest brukte byggematerialene, og en av grunnen til det er betongens formbarhet. Betong består av mange materialer som sement, vann, tilslag og tilsetningsstoffer. Sammensetning og mengde av disse materialer har stor påvirkning i betongens fasthet og støpelighetsegenskaper.

Støpeligheten er en betong egenskap som kan også beskrives som betongens konsistens eller flytbarhet og den bestemmes i fersk fasen. Støpeligheten deles inn i tre underelementer:

- Stabilitet
- Mobilitet
- Komprimerbarhet

Stabiliteten i betong er egenskap som beskriver at betong skal være homogen. Dette vil spesielt gjelde under transport, blandingsprosess og stillestående tilstand. Mobiliteten til betong er flytbarheten og evnen til å bevege seg. Komprimerbarheten i betong er betongens evne til å omslutte armering, slippe ut luftklumper/mikro luftbobler og flytte ut hullrom under bearbeiding. [13].

3.5 Standarder

I denne oppgaven utføres det tester til å undersøke mekaniske egenskaper og ferskfase egenskaper i betong. Testprosedyrer og fremgangsmåter for disse testene utføres i henhold til standarder. Tabell 3.5.1 gir oversikt over test typene og standardene som de ble utført i henhold til.

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1

Test typer	Standard
Synkutbredelse	NS-EN 12350-2:2019
LCPC	NB38 og NS-EN 14651:2005
Rheometer	ICAR plus datablad
Trykkfasthet	NS-EN196-1:2016 NS-EN 12390-3:2019
Elastisitetsmodul	NS-EN 12390-13
Rest bøyestrekfasthet	NB38, COIN og NS-EN 14651:2005
Krav til mål og andre krav til prøvelegemer og former	NS-EN 12390-1:2021

3.6 Fiberarmert betong

Med utviklingen av materialteknologien i bygge-bransjen, har betong blitt det mest brukt byggematerialet i hele verden. En av faktorer til stort betongforbruk forårsakes av gode trykkegenskaper, samtidig har det også blitt identifisert mange svakheter med betong som kryp, dårlig stivhet og lav strekkfasthet. Last påføring på betong fører til krypdannelse, disse krypene kan variere i størrelse og skalla. Krypene kan ha betydelig påvirkning på betongens mekaniske egenskaper og langvarigheten i betongkonstruksjoner [14].

Fiber introduseres i betongblandinger til å forbedre mekaniske egenskaper som strekkfasthet langvarighet. Hoved virkemåten av fibere er å fungere som lim i betong når risslasten er nådd, det

kalles for en såkalt brueffekt. Fiber tilsatt betongblandinger kalles også for fiberarmert betong, og egenskapene til fiberarmert betong avgjøres som fibertype, fibergeometri, størrelse og fiberfordeling i betongen. I praksis kan det være krevende å bestemme fiberorientering og fiberfordeling, derfor dimensjoneres fiberarmert betong med tilfeldig fiberorientering og jevn fiberfordeling[15].

I dag brukes det armering i betong til forsterkning av betongsøyler og bjelker. Armeringens hensikt er hovedsakelig forsterkning av strekkapasiteten i betong. Dette kan også oppnås ved fiberarmert betong med lavere kostnader og arbeidsbelastning for betongarbeidere. Det kan være tidskrevende for betongarbeidere å plassere armeringer, ikke minst helseskader som plassering av armering kan tilføre på grunn av tunge løft. Bruk av fiberarmert betong kan derfor redusere arbeidstimer og resultere i effektiv og rask byggeprosess. [16]

3.6.1 Fibertyper

De mest utbredte fibertypene er fibre av glass, stål, syntetiske og naturlige fibermaterialer. Ifølge anbefalinger i NB38 bør det benyttes stålfibere med endekroker og en lengde 30-60mm, og et lengde/diameter-forhold på 50-80. Generelt kan fiberlengdene variere fra få med mer til 80mm avhengig av bruksområde. NB38 gir også anbefalinger for stålfiberens strekkfasthet på over 1000 MPa og E-modul på over 5000 MPa. Det er ikke tillatt å benytte polymerfibre som skjær- og kombinasjonsarmering i NB38 på grunn av usikkerheter og manglende kunnskaper om polymerfibre under langvarig laster. I figur 3.6.1 vises ulike varianter og former av endekroker som kan benyttes i fiberarmering. Disse ulike formene benyttes avhengig av bruksområde og valg av geometrien som tilpasser til bruksformålet. [17]

Material	Shape	Shaped end	Cross - section shape
Steel	Straight	Hooked ends 3D	Round shaped
Polypropylen	Hooked	Button ends	Rectangular shaped
Nylon	Crimped (wave shaped)	Deformed ends	Irregular shaped
Glass	Defromed shaped	4D	
...		5D	

Figur 3.6.1 Forskjellige varianter av fiberarmering og ulike geometriske utforminger. [17]

3.6.2 Stålfiber

Det benyttes NS-EN 14889 – 1 til spesifikasjon for stålfiber. Standarden angir krav og definisjoner av stålfiber for armert betong. I tabell 3.6.1 vises klassifisering av stålfibertypene NS-EN 14889 [18] i ulike grupper.

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1 Klassifisering av stålfiber [19]

Gruppe	Engelsk navn	Norsk navn
1	Cold-drawn wire	Kaldstrukket ståltråd

2	Cut sheet	Stanset fra stålplate
3	Melt extracted	Smelteslagg
4	Haved cold-drawn wire	Splittet kaldstrukket stålråd
5	Milled from blocks	Frest fra stålblokker

Stålfiber er definert med kortlengde stål med lengde/diameter forhold, dette forholdet kan variere mellom 20 til 100. Tilfeldig fordeling av stålfiber i betong kan resultere i tapt effektivitet sammenlignet med tradisjonell armering. I motsetning til det kan nærplassert stålfiber forbedre fastheten og styrkeegenskaper, samtidig også øke krypmotstand i betong. Studier fra 1966 har vist at stålfiber resulterer i gode korrosive egenskaper i homogen betong. Stålfiber korroderer treigere enn konvensjonell armering ved samme betingelser. Stålfiber benyttes i slankere varianter for å effektivisere fiberarmeringen, men alt for slanke fibre kan forverre støpeligheten når blandes i betong.[20]

3.6.3 Polymerfiber

Polymerfiber kommer i rette og formede fibertyper. Krav til blanding av polyfiber i betong er gitt i NS-EN 14889-2[18] som klassifiserer polymerfiber i 2 lengdekategorier. Klasse 1 brukes for polymerfiber ≤ 30 mm og klasse 2 er til polymerfiber > 30 mm. Klasse 1 polymerfiber er ikke dokumentert for bærende konstruksjoner og begrensningen ved bruk av klasse 2 gjelder bruksområder som er tidligere dokumentert. Dette er nødvendig på grunn av noen utpekte svakheter ved polymerfiber under langtidslast. Lave smeltepunktet til polymerfiber er også et aspekt som det må hensyntas ved bruk som bærende konstruksjoner. Fiberform kan velges fritt av produsenten, men geometrien må deklarerer i beskrivelsen sammen med fiber tekstur på overfalte og tverrsnittets formen. Det benyttes optiske instrumenter for å kontrollere polymerfiber. Deklarasjon av polymerfiber gjøres ut fra polymerens sammensetning som vist i tabell 3.6-2 [19].

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1 Blandinger av materialer til polymerfiber [19]

Polyolefin	pva
Polypropylen	polyakrylsk
Polyetylen	aramider
Polyester	nylon

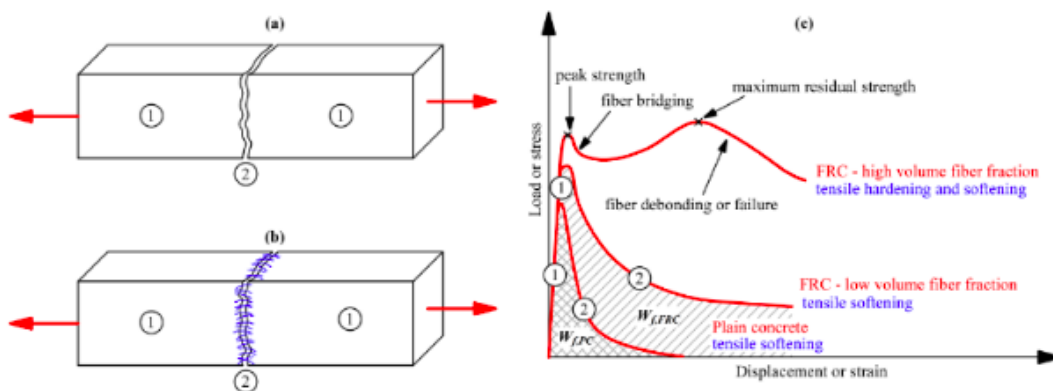
3.6.4 Basaltfiber

Basalt er et generisk navn for størknet lava hentet fra vulkaner. Basaltsteiner er smeltet i 1500-1700 °C, og størknet til glass som et amorft faststoff. Nedkjølingen fører til krystallisering som danner mineraler som plagiocen og pyroksen som omgjør 80% av mange basalttyper. Sammensetningen av basalt består av Al_2O_3 (11-13%), silikon dioksid SiO_2 (43.3-47wt%), kalsiumoksid CaO (10-12%) og magnesium oksid MgO (8-11%). [21]

Basaltfiber har gode egenskaper mot korrosjon. Basaltfiber er en fibertype som er godt egnet til marine miljøer og prioriteres over andre fibertyper der strenge eksponeringsklasser kreves. Langs kystområder i Norge er det ofte problem med rusting av armerings elementer på grunn av høyt fuktinnhold i lufta. Erstatning av tradisjonell armering med basaltfiber betong vil ikke bare gi bedre korrosjonsmotstand, men det vil også være et bedre miljøvennlig alternativ. Dette skal i langsikt også forbedre levetiden til konstruksjonen [22]. Basaltfiber har også vist gode egenskaper i strekkstyrke og i bruddenergien til sementmatrikskomponenter. Elastisitet modulus til i basaltfiber kan være opp til 93-115 Gpa. Dette er betydelig høyere enn kjemikalie basert fibre som polypropylen fiber og polyvinyl alkohol fiber [23]

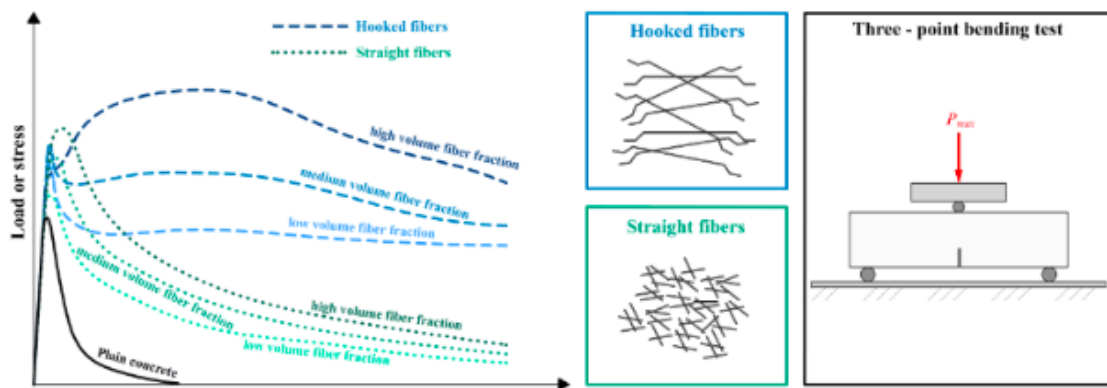
3.7 Fiberarmert betong mekaniske egenskaper

Det er mange varianter av fiberarmert betong som er ulike fra hverandre i material og skikkelse egenskaper av fibre som benyttes i betongen. Det er fordi mekaniske egenskaper til fiberen er avhengig av fiberformen. Resulterende mekaniske egenskaper i fiberbetong er også påvirket av betongresepten, fibervolum og behandlingen av fiberbetong med hensyn på fiberavstander. Påvirkningen omfatter utviklingen av mikro ris, resistans mot temperaturendringer, kryp og slagstyrken.



Figur 3.7.1 Virkemåten til tradisjonell betong og fiberarmert betong etter opprissing [23]

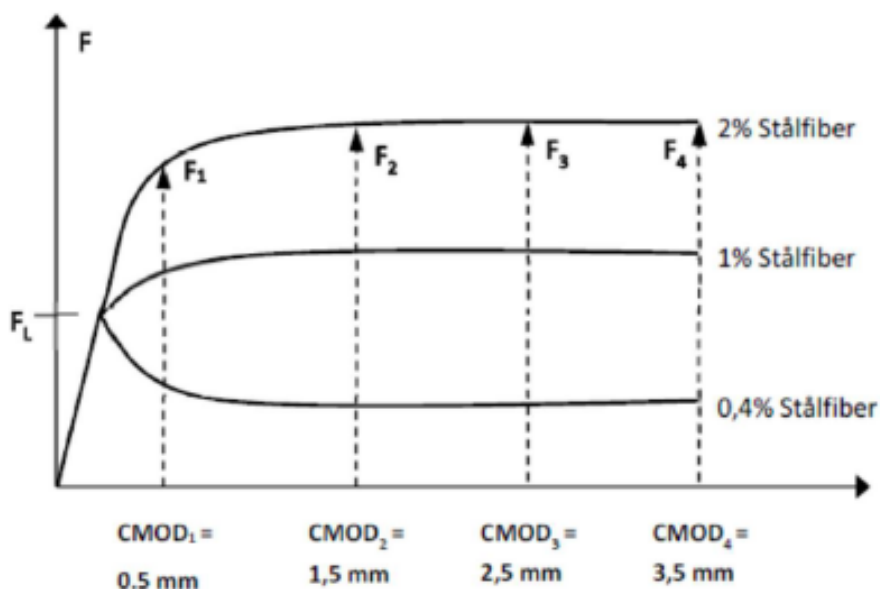
I figur 3.7.1 vises en illustrasjon av forskjellen mellom tradisjonell betong og fiberarmert betong. Last-deformasjonsløp diagrammet for tradisjonell betong viser at når bruddlasten på tradisjonell betong når, knekker betongen umiddelbart. Tilsetning av fiber endrer last-deformasjonsløp diagrammet betydelig. Under bruddlasten dannes det makro-kryp som aktiverer fiber innvirkning som overfører strekkspenninger til fibre. Denne overføringen av strekkspenninger er hovedsakelig påvirket av antall fibre, betongresepten og behandlingsprosessen av fiberarmert betongen. Dette fenomenet resulterer i dannelsen av en annen "peak" i last-deformasjonsløp diagrammet, dette kalles for reststrekkapasitet. For uarmert betong er det ingen restkapasitet etter at risslasten er nådd. Restkapasiteten i fiberarmert betong avhenger av fibertypen og tilførte fibermengden i matriksen. [23]



Figur 3.7.2 Last-deformasjonsdiagram for fiberarmert betong med forskjellige fibermengder og geometri i trepunkts bøyetester [23]

I fig 3.7.2 illustreres last-deformasjon diagram for typisk fiberarmert betong ($f_c < 50\text{MPa}$) med ulike fibermengder av rette fibere og fibere med endekroker. Rett utformet fibere benyttes ofte for å hindre svinnriss og denne fibertypen brukes i størst grad i høyfast betong. I disse tilfellene vil last-deformasjonskurven for rette fibere være ganske like med fiberarmering med endekroker, som vist i fig 3.7.2. [23]

Det kreves store fibermengder for å oppnå tilstrekkelig fasthet i fiberarmert betong. 1% fibervolum i fiberarmert betong som vist i fig 3.7.3 oppnår betong fastningen (strain hardening), dette tilsvarer fibermengde på 80kg/m^3 . Det er viktig å bemerke at store fibermengder som dette kan resultere i utfordringer med hensyn på betong støpeligheten og pumpbarheten.



Figur 3.7.3 Fiberarmert betong last-forskyvningsdiagram fra trepunkts bøyetester med forskjellige fibermengder og geometri [17]

3.8 Bruksområder til fiberarmert betong

Utviklingen i bruksområder til fiberarmering er begrenset og fiberarmeringen brukes derfor i kombinasjon med tradisjonell armering. Det er på for å unngå livsfarlige hendelser som kan forårsakes av sammenbrudd. Det er utført nok forskningen om fiberarmeringen til å forstå at fiberarmeringen forsterker betong og utvider dermed bruksområder - hvor fiberarmert betongen kan ta bøyemomenter. Betongforsterkning ved tilsetning av fiber øker momentkapasiteten, samtidig også øker stivheten og rissene fordeling er jevnere. Forskninger har også påvist at fiberarmeringen kan brukes effektivt til å ta opp skjærkrefter, noe som tradisjonelt gjøres med bøylor blant annet [19].

Det finnes noen bruksområder av fiberarmering der den kan brukes alene i konstruksjonselementer som ikke påkjennes med horisontalkrefter, eller i situasjonen der nedstyrkningsfare er en risiko. Aktuelle bruksområder i dette tilfellet kan inkludere banketter, vegger og sjeldent søyler også. Fiberarmeringen kan også benyttes for fundamentdel, spennarmerte flatdekker og midtfelt av slakk. I tillegg kan fiberarmringen også være fordelaktig uten tradisjonell armering i rør, kummer, kulverter kabelkanal, støttemur, slisserenner og fundamenter for lysmaster, strømstolper, skilt og gjerder [17].

3.8.1 Tunnel

Det ble bygd en 20km lang fyllotunnel mellom Oslo og Ski som er en to-løps motorveitunnel langs E6. Til oppbyggingen av denne tunnelen ble det brukt tradisjonelle stangarmering til å ta laster, men for bedre rissfordeling ble det også brukt stålfiber foringer av prefabrikkerte betongelementer [17].

Det ble også benyttet fiberarmering i Holmestadtunnelen for å sikre tunnelvegger og få de til å være mer vanntett. En annen fordel med fiberarmeringen i tunnelen er frostmotstanden som vanligvis forårsakes av vannlekkasjer. Det hjelper også med jevnfordeling av rissene i betongveggene. I Holmestadtunnelen er det også en "sandwich" løsning med første lag av sprøytebetong, et annet lag av polymermembran og enda et siste lag av fiberarmert sprøytebetong. Hensikten og fordelene med denne løsningen er økonomiske besparelser og mindre materialbruk. Denne løsningen er også benyttet i Bærumstunnelen vest som ligger vest for Sandvika, samt også i Gevingåsen jernbanetunnel [24].

3.8.2 Dekker

Dekker er en av de mer vanlige bruksområder av fiberarmeringen. Fiberarmert dekker brukes ikke alltid i situasjoner der dekker plasseres i grunnen. Betonmast AS for eksempel har brukt dekker som bæres av peler i et av prosjektene på Gulskog senter i Drammen. I det prosjektet ble det vurdert å benytte etterspent dekke i kombinasjon med fiberarmering og selvkomprimerende betong. Dekket som ble benyttet er 10 000 m² og blir fornyet fra det tidligere dekke. Hensikten med fiberarmeringen i dette prosjektet var å erstatte tradisjonell skjær, og lengdearmering. Dette prosjektet ble ferdig utført i første halvdel i 2020 [25].

3.9 Mekaniske egenskaper til betong

Betong er kjent for å ha god toleranse mot trykk påkjenninger. Trykkmotstanden måles med betongs trykkfastheten der trykkfastheten også kan benyttes til å avgjøre andre viktige mekaniske egenskapene som E-modul, strekkfasthet, permeabilitet osv. Likevel kan trykkfastheten ikke erstatte alle andre mekaniske fenomener i betong under lastpåføringen, spesielt ved økt seighet i fiberarmert betong. Dette vil bety at seigheten i fiberarmert betong må defineres med andre måter. Det er mange tester som kan tas til bruk her, men det kan også bestemmes ut fra egenskaper som det ønskes. Det finnes testprosedyrer for betong testing som rest bøyestrekfastheten (f_{Ri}), trykkfasthet (f_c), elastisk modulen (E) som dekkes i denne oppgaven. Andre mekaniske egenskaper som ikke er oppgavens omfang er bruddenergi (G_f), karakteristisk lengde (L_{ch}) osv, se tabell 3.9-1.

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1 Verdier for noen mekaniske egenskaper [26]

Materialer	f_c [MPa]	f_t [MPa]	E [GPa]	G_F [Nm/m ²]	L_{ch} [mm]
Sement pasta	10 - 25	2.0 – 10.0	10 - 30	≈ 10	5 - 15
Mørtel		1.0 – 10.0	10 - 30	10 - 50	100 - 200
Normal styrke betong	20 - 80	1.5 – 10.0	25 - 40	50 - 150	200 - 400
Høy styrke betong	> 80	4.0 – 5.5	40 - 50	100 - 150	150 - 250
Fiber armert betong	20 - 80	1.5 – 5.0	25 - 40	> 500	> 1000

Det kan gjøres en antagelse om liten påvirkningen av fiber tilsetningen i betongs trykkfastheten og E-modul sammenlignet med en relativt større effekt i bøyestrekfastheten ved opprissing. Påvirkning av fiber i trykkfastheten og elastisitetsmodul vil fremdeles være avhengig av fibermengde, fiberretning og betongdensitet, ettersom betong med høyere densitet vil medføre økning i trykkfasthet og elastisitetsmodul på grunn av fibertilsetningen. Det forventes en moderat økning i bøyestrekfastheten og restbøyestrekfastheten. Rissviden øker etter opprissing i fiberarmert betong som også gir betongen en stabil bøyestrekfasthet. Reststrekfastheten kan enten være større eller mindre enn strekkfastheten i betongen avhengig av fiberegnskaper som fiberlengde, mekaniske egenskaper og fibertype [19].

3.10 Teori om rheometer

Utførelsen av en betong rheometer innebærer maskin bruk av selve rheometeret og digitalbruk. Rheometeret består av en mikser med visp som hovedmaskinen også er det er dataverktøy, hvor innsettings verdier bestemmes i. Vispen har bestemte dimensjoner, med høyde 125 mm og diameter det samme. Vispen har også bestemte hastigheter [27]. Prinsippet med en rheometer maskin er registrering av vispen sin torsjonskraft som er nødvendig til å holde vispen i rotasjon i en bestemt hastighet. Det gjøres ved at vispen plasseres i midten av en beholder med betong prøve. I beholderen

er det riller med avstand fra vispebladet som avhengig av kornstørrelse diameter, hvor avstanden skal være lik minst fire ganger enn det største diameter på tilslaget [27].

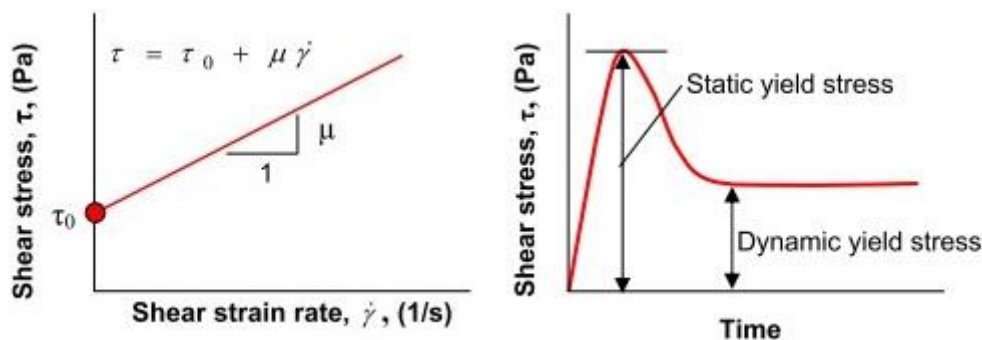
Hensikten med Rheometer er å måle betongens reologiske egenskaper i fersk tilstand, noe den konvensjonelle synk metoden ikke er i stand til å gjøre i spesielt blande fasen, transport og installasjon [27]. Reologiske egenskaper i fersk tilstand korresponderer til konsistensen av betongen. De reologiske egenskapene kan karakteriseres som flyt oppførselen i betongen. Denne flyt oppførselen kan måles som skjærspenning, mellom skjærflytespenning, plastisk viskositet og skjærtøyning rate. Beskrevet i Bingham modellen [27].

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$$

Bingham modell

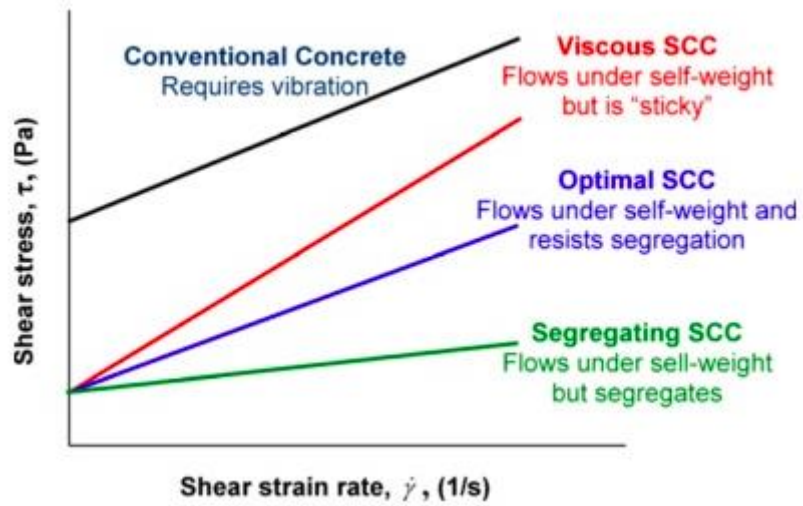
Ligning 3.10.1

(Lik) representerer Bingham modellen: parameteren (τ_0) er flytespenning som representerer skjærstress som trengs til startflyt. Stigningstallet i den lineære funksjonen viser plastisk viskositet, (μ). Denne parameteren påvirker resistansen i flyten etter flytespenning er oppnådd. Disse to parameterne vil definere flytkurven, fig 3.10.1 illustreres flytoppførselen av fluiden [27].



Figur 3.10.1 [27]

Fiberarmert betong er en tiksotropisk fluid som trenger initialt skjærstress til å starte betongflyten dersom den er vært i ro, men det trengs mindre skjærstress til å opprettholde flyten [27]. Denne egenskapen er presentert i fig 3.10.2, som viser at i begynnelsen øker skjærstresset gradvis som resulterer i ingen flyt. Betongflyten begynner når flytskjærstress er oppnådd og skjærstresset som det trengs til å opprettholde flyten reduseres til dynamisk flytespenning. Det observeres "synktap" videre i prosessen som konsekvens av økt statisk og dynamisk flytespenning på grunn av hydrering [27].



Figur 3.10.2 Tikotropisk egenskap i fiberamert betong [27]

4 Forskerspørsmål

Denne oppgaven undersøker betongens egenskaper ved tilsetning av forskjellige stålfiber volumfraksjoner og fibergeometrier. Hensikten med valg av dette temaet dreier seg om å undersøke påvirkning av stålfiber i mekaniske og fersk betong egenskaper. Analyser av resultatene for fiberarmert blandinger skal sammenlignes med uarmert referanse blanding. Valg av stålfiber i betong vil gi et positivt samfunnsperspektiv i oppgaven, hovedsakelig i miljøaspekter ved erstatning av sement med stålfiber i betong. Et annet viktig aspekt ved denne oppgaven vil være å undersøke betongkonsistens ved stålfiber tilsetning ved hjelp av synkutbredelse, LCPC og rheometer test. For mekaniske egenskaper skal det utføres trykkfasthet test, Elastisitetsmodul test og rest bøyestrekfasthet test. Det er spesielt interessant å se på innvirkningen av stålfiber i rest bøyestrekfasthet i betong ettersom det også er et attraktivt tema for byggindustrien.

Hovedspørsmål

Hvordan påvirkes fiberarmert betong med variasjoner av fiberinnhold og fiberens geometri i betongens konsistens og mekaniske egenskaper?

På grunn av tidsbegrensinger og mangel på ressurser velges det å innføre forutsetninger som ellers ville ha vært nyttige for denne oppgaven.

Forutsetninger:

- Gitt betong resept
- Rest bøyestrekfasthet måles ikke på ordinær uarmert betong blanding, men kun på fiberarmerte blandinger
- Synkmål ekskluderes fra fersktestene
- Bestemmelse av fasthetsklasse ekskluderes

Underspørsmål:

For å kunne besvare hovedspørsmålet har vi laget underspørsmål

- Hvordan varierer betongens E-modul med variasjoner i fiberinnhold og fiberens geometri?
- Hvordan påvirkes betongens rest bøyestrekfasthet med variasjoner i fiberinnhold og fiberens geometri under standard prøvebetingelser?
- Hvordan påvirkes betongkonsistens ved stålfiber tilsetning.
- Hvordan påvirkes betongs trykkfasthet ved stålfiber tilsetning.

5 Case/Materialer

Denne oppgaven er del av et større prosjekt som går ut på forskning på stål fiber betong. Prosjektet er et samarbeid mellom UiA, NTNU og en del forskningsinstitusjoner slik som Sintef og Norsk Betong forening. Så derfor er det slik at noen av materialene er etter et fast oppsett fra Sintef og oppgaven bygger på videre arbeidet på anbefalingen fra et forskningsprosjekt fra Sintef utført av en forskningsgruppe kalt Fibercon [28]

Videre, i dette kapitlet presenteres og beskrives materialene benyttet for å gjennomføre oppgaven. Dette vil innebære betong resepten, materialene i resepten og fibreene brukt. Først presenteres reseptutviklingen brukt for å lage hver blanding. Av betongen ble ulike slags prøver laget på ulike elementer, disse vil også presenteres i kapitlet. Her vil proporsjoneringen med antall mengde presenteres også. Bygglaben på UiA, Grimstad ble benyttet til å utføre de praktiske forsøkene. Bygglaben har et utvalg av verktøy og apparater. Utvalgte av disse verktøy og apparatene beskrives også i dette kapitlet.

En resept utviklet av en forskergruppe fra Sintef [28] ble brukt som et utgangspunkt til å utvikle en hoved resept med tilgjengelige materialer. Resepten er for en selvkomprimerende betong med som utgis å være av fasthetsklasse B30 og bestandighetsklasse M60.

En så lik så mulig resept gir et lettere sammenligningsgrunnlag og sikkerhet i resultatene. Derfor ble det utviklet en modifisert resept med like trekk slik som original resepten. Original resepten presenteres i tabell 5.1.

Tabell 5.1 Basis resept for antagende fasthetsklasse B30 og bestandighetsklasse M60 selvkomprimerende betong (egen tabell)

Resept M60	
Materialer	Mengde kg/m³
Norcem Standard FA	308
Elkem Microsilica	20.6
Kalksteinfiller (VK150)	82.1
Fritt vann	191.9
Årdal 0/8 mm	1002.4
Tilslag Årdal 8/16 mm	697.4
Tilslag Årdal 16/22 mm	0
SP stoff Mapei Dynamon Xtend U-100	3.3
Sum mengde	2305.7

Den modifiserte resepten er vist i tabell 5.2. Her ble det gjort tre endringer. En alternativ sement har blitt brukt og finfiller fra VELDE ble benyttet enn kalksteinfiller VK150, i tillegg er det åtti prosent mengden av SP.

Tabell 5.2 (egen tabell)

Resept M60 modifisert	
Materialer	Mengde kg/m ³
Rapid Aalborg FA	308
Elkem Microsilica	0
VELDE finfiller	82.1
Fritt vann	191.9
Årdal 0/8 mm	1002.4
Årdal 8/16 mm	697.4
Årdal 16/22 mm	0
Sp stoff Mapei Dynamon Xtend U-100	3,3*80%
Sum mengde	2305.7

Delmaterialene som har hatt betydning for betongblandingen presenteres i dette delkapitlet. Som følge av mangler og tilgjengelighet av utvalgte materialer skjedde det endringer i hoved resepten og disse endringene kan ha betydning for resultatene. Derfor er det hensiktsmessig å undersøke nærmere delmaterialene som kan ha betydning for resultatene. De fleste materialene

Sementen som ble benyttet er Rapid Aalborg sement. Denne sementen brukes til alternativ av Norcem Standard FA. Ettersom Norcem Standard FA var ikke tilgjengelig ble alternativet Rapid Aalborg benyttet. Dette er en sement med høyere fasthet enn Norcem Standard FA. Sementen har densitet på 3140 kg/m³ I følge dette notatet fra produsenten [29].

Elkem Microsilica av klassen 971u ble brukt. Denne typen silika støv er uidentifisert ifølge databladet for produktet [Vedlegg C], der u står for uidentifisert. [datablad Elkem MS] Densiteten varierer, men har en typisk densitet på 300 kg/m³ og dette velges å benyttes for densitet. For prøveblandingen ble miljøkalk VK50 benyttet og Velde finfiller. Velde finfiller pulveret er så fint med partikkel størrelse på 0,0725 mm og en densitet på 295,5 kg/m³[30].

Tilslaget besto av sand 0/8 mm Årdal og pukk 8/16 Årdal. Sanden hadde en del fuktighet. Det var ikke behov for å sikte sanden, siden sanden ble levert som ferdig siktet. Årdal 8/16 mm er fin kantete pukk. Mapei Dynamon Xtend U-100 [Vedlegg C] er SP stoff som ble brukt i stedet for vanlig SP stoff, slik som Dynamon SN-X. Dette SP-stoffet var et gunstig valg med stor effekt på flyten av betongen, slik beskrevet i Sintef dokumentet[28].

Stålfibrene som ble benyttet var av typen Dramix 4D og Dramix 5D [vedlegg C]. I databladene er de vist med følgende tykkelse og lengde på 65/60. Geometrien mellom fibrene er så lik så mulig, men det er endepunktene som er ulike. En 5D fiber har fem endekroker på hver side, mens 4D – fire stk på hver side.

Elementene var valgt til å følge kravene gitt i standardene, slik beskrevet i teori kapitlet. Dette var meste for bjelkene etter NB 38. Størrelsene på terningene og sylindrer ble valgt også ihht standard, men også for et bredere sammenligningsgrunnlag. Til sammen var det sekstifire elementer i original settet og noen ekstra prøver. Original settet besto av:

- 21 terninger
- 7 sylindere
- 36 bjelker

Dimensjoner og volum av elementene er vist i tabell 5.

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1Dimensjoner på elementene (egen tabell)

En enkel form	Dimensjoner [mm]			Volum		
	Lengde	Bredde/diameter	Høyde	mm ³	m ³	dm ³ eller liter
Terning	100	100	100	1000000	0,003375	3,375
Sylinder		100	200	1325359,4	0,001325	1,325
Bjelker	600	150	150	13500000	0,013500	13,575
Sum volum				14700359,4	0,017075	17,075

Det er seks stålfiber blandinger og en blanding med referanse betong, som er uten stålfiber. Blandingene har en følgende fordeling av elementer:

- Blanding 0 referanse har et sett på 3 terninger og 1 sylinder
- Blanding 1 0,33 % stålfiber 5D. For denne blandingen og resten av stålfiber blandinger følger det et sett med 3 terninger, 1 sylinder og 6 bjelker
- Blanding 2 0,66 % stålfiber 5D
- Blanding 3 Stålfiber 1% + 10 l matriks 5D
- Blanding 4 0,33 % stålfiber 4D
- Blanding 5 0,66 % stålfiber 4D
- Blanding 6 1 % + 10 l matriks 4D

I figur 5-1 illustreres blandingskissen for alle blandingsserier som støpes og testes i denne oppgaven. Blandingene avhenger av flere variabler. Den ene variabelen går ut på variasjon av mengde volum fiber, fra 0,33% til 1%. En annen variabel er fibertype. Det velges å undersøke og å støpe blandinger med 4D og 5D fibergeometrier. Valg av disse variablene gjøres med hensyn på påvirkning av ulike volumfraksjoner i betong og effekten av ulike fibergeometrier i betongs mekaniske og ferske tilstand egenskaper.

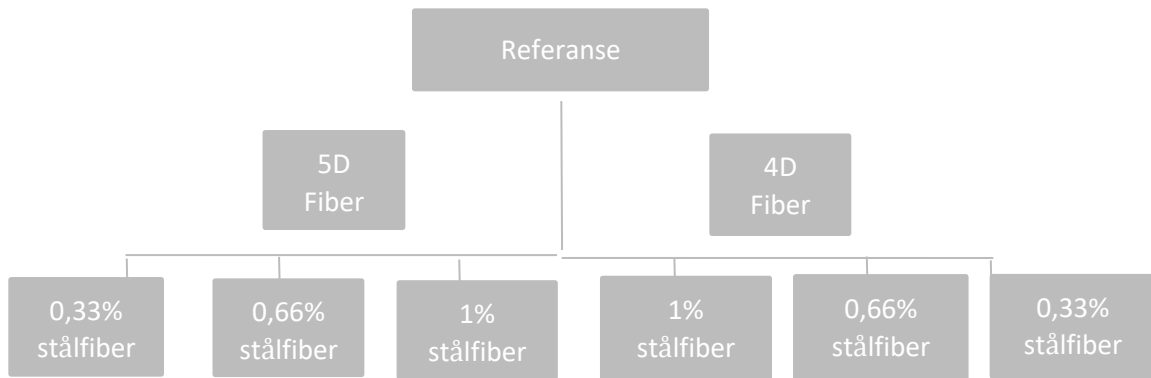


Figure 3.10-1 blandingsskisse

Fiberblandinger deles opp i to grupper bestående av 4D blandinger og 5D blandinger. For hver blandingsgruppe ble det støpt 0,33%, 0,66% og 1 % (+ 10l matris). Det ble støpt i tre ulike former for ulike test formål, terninger, sylindere og bjelker. I tillegg ble det også støpt referanse blanding som vil gi et grunnlag for sammenligning av andre stålfiberarmerte blandinger. Faktorer som tilslagsstørrelse, tilslagsmengde og v/c er faste for alle blandinger.

6 Metode

Metodene som ble benyttet til å besvare forskerspørsmålet til denne masteroppgaven beskrives nærmere i dette kapitlet. I denne masteroppgaven ble det utført praktiske lab arbeid som en hoved metode. Videre, ble litteratursøk benyttet som et vurderingsgrunnlag av empiriske data fra lab arbeidene. Lab arbeidene foregikk i UiA sine lab fasiliteter, i bygglab og mekatronikklab. Lab forsøkene som ble gjort for svare på forskerspørsmålet. Svakheter med metodene beskrives også i dette kapitlet.

6.1 Generelt om metode og blandinger

Bygg laboratoriet ved UiA ble hovedsakelig benyttet for gjennomføring av forsøkene som beskrives og analyseres i denne oppgaven. For testing av restbøystrekkfasthetene ble mekatronikklaben benyttet. I bygg laboratoriet ble ulike blandinger støpt avhengig av type test for utførelsen. Lab arbeidene ble utført med tilgjengelige verktøy og maskineri av det som finnes på UiA sine lab fasiliteter.

6.1.1 Reseptutvikling

Det ble tidligere nevnt i case/materialer at betong resepten fra fibercon prosjektet ble benyttet som et utgangspunkt. Det ble likevel gjort endringer i den opprinnelige resepten, spesielt med endringer i SP stoff. Det ble utført en gradvis iterasjonsprosess for å finne optimal mengde SP mengde for å unngå betongseparasjon og utvikle en velfungerende resept. I case/materialer gis det en oversikt over den endelige betongresepten.

6.1.2 Proporsjonering av betong

I dette delkapitlet vises en oversikt over matematiske formler som legger grunn til proporsjoneringen av materialene i betong resepten. Disse formlene ble ikke benyttet, siden en ferdig resept ble benyttet, men velges å ha med for gjenutførelse av forsøket i denne oppgavens ved en seinere studie med ulike proporsjoner av materialer i betong blanding.

Blandingsproporsjonering kan beregnes med volum (ligning 6.3.1). Deretter er det mulig å finne masse for sement (ligning 6.3.2) og vann (Ligning 6.3.3), fibre (Ligning 6.3.4) og SP stoff (Ligning 6.3.5). [26]

$$V_{tot} = \sum \frac{m_i}{\rho_i} + V_{fibre} \quad \text{Ligning 6.3.1}$$

Der m mass (g), p densitet (kg/m³), V volum (m³). Formler for andre delmaterialer er følgende:

$$m_{cement} = \frac{v_{tot} - v_{fibre}}{\left(\frac{1}{\rho_{cement}} + \frac{k_1 - (k_2 + sp)}{\rho_{water}} + \frac{k_2}{\rho_{sp}}\right)} \quad \text{Ligning 6.3.2}$$

$$m_{water} = k_{water} * m_{sement} - k_{spwater\%} * \rho_{water} \quad \text{Ligning 6.3.3}$$

$$m_{fiber} = V_{tot} * V_{fiber\%} * \rho_{fiber} \quad \text{Ligning 6.3.4}$$

$$m_{sp} = k_{sp} * m_s \quad \text{Ligning 6.3.5}$$

Der k₁ og k₂ er koeffisienter som er forhold mellom vann (k_{vann}), og superplastiserende stoff (k_{sf}) innhold i blanding.[26]

$$K_{vann} = 0,62$$

$$K_{sp} = 0,80$$

De forskjellige koeffisienter beregnes med følgende likninger[26];

$$k_1 = k_{water} - k_{sp,water content} * k_{sp} \quad \text{Ligning 6.3.6}$$

$$k_2 = k_{sp} \quad \text{Ligning 6.3.7}$$

6.2 Betong blandingsprosess uten tilsatt stålfiber

Blandingsprosessen for uarmert betongblandinger var basert på NS-EN 196-1:2016 *Sementprøving – Del 1: Bestemmelse av fasthet*[31]. Krav og beskrivelser for bruk av utstyr og metoder for blanding, herding og testing av mekaniske egenskaper i betong oppgis i den standarden. [31]

Blandeprosedyre:

- Veie alle materialer til blandingen av betong med nøyaktighet +- 1g.
- Tilsette nødvendig sementmengde i ren bøtte.
- Blande materiale i tørr tilstand i ett minutt
- Vann tilsettes over 30 sekunder
- Blande blandingen i lav hastighet for 60 sekunder. Fibere tilsette gradvis.
- Blande sammen blandingen i høyhastighet for 30 sekunder

- Blandemaskinen stoppes og det las blandingen hvile for halvt minutt.
- Blande igjen i lav hastighet for 60 sekunder.

6.3 Betong blandingsprosess med tilsatt stålfiber

Blande prosessen for betong med fiber er lik som for uarmert, men veiledninger fra NB38 og COIN rapport benyttes i motsetning til NS-EN 196-1: 2016



Figur 6.3.1 former fylt med betong

Blandeprosedyre:

- Veie alle materialer til blandingen av betong med nøyaktighet +- 1g.
- Tilsette nødvendig sementmengde i ren bøtte.
- Blande materiale i tørr tilstand i ett minutt
- Vann tilsettes over 30 sekunder
- Blande blandingen i lav hastighet for 60 sekunder. Fibere tilsette gradvis.
- Blande sammen blandingen i høyhastighet for 30 sekunder
- Blandemaskinen stoppes og det las blandingen hvile for halvt minutt.
- Blande igjen i lav hastighet for 60 sekunder.
- Tilsett fibre, gradvis.
- Sett maskinen i henstilling rør om slik at fibre fordeles godt.
- Sett maskinen i blanding igjen.

7 Testing etter betong herding

I dette delkapittelet diskuteres det metoder og tester som skal benyttes i denne oppgaven for betong prøving. Disse testene skal fremheve mekaniske og fysisk-mekaniske egenskapene til betong blandet med ulike stålfiber typer. Testene skal utføres etter 28 dagers herding. Disse ulike fiberarmert betong

egenskapene skal undersøkes ved hjelp av trykktest, bøyestrek test, restbøyestrek og E- modul test.

7.1 Testing av Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul testene ble utført etter retningslinjer beskrevet i NS-EN 12390-13 *Prøving av herdnet betong Del 13: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk*[32]. Det ble gjort noen avvik fra standarden. Avvikene beskrives seinere i metodekapitlet.

I standarden beskrives krav til prøvelegeme og testmaskin. Et av kravene gitt er krav på dimensjoner og form på prøvelegeme, som er enten prisme eller sylinder. [33]

Sylinder plasseres i midten av stampelet, hvor det er markert en firkant under. slik det vises i figur 7-5. Instrumentet festes på prøve med kontakt på alle sensorene. Det er tre sensorer med fire blader hver på instrumentet. Om ikke alle bladene treffer prøven blir det feil med testen.

Figure 7-1 typisk opplegg for elastisitetsmodultest



I dette tilfellet benyttes sylindere med dimensjoner 100 mm i diameter og 200 mm i høyden slik som beskrevet i case/materialer, som er innenfor kravene beskrevet i standarden. Ifølge standarden foregår testen ved å plassere en forbehandlet prøve i en trykkpresse maskin egnet til testen. Videre presses prøven av trykkpressen i flere sykluser. Trykkpresse maskinen som ble benyttet hadde et integrert program ihht. NS-EN 12390-13. I figur 7-6 vises trykkpressen på en startet test. [32]



Figure 7-2 Trykkpresse maskinen

I standarden beskrives metoder [33] for bestemmelse av elastisitetsmodul. I trykkpressen ble metode A gjennomført. I standarden beskrives metode A som bestemmelse av opprinnelig elastisitetsmodul og stabilisert elastisitetsmodul, gjennom tre forbelastningssykluser. Metode A er illustrert i fig 7-1.

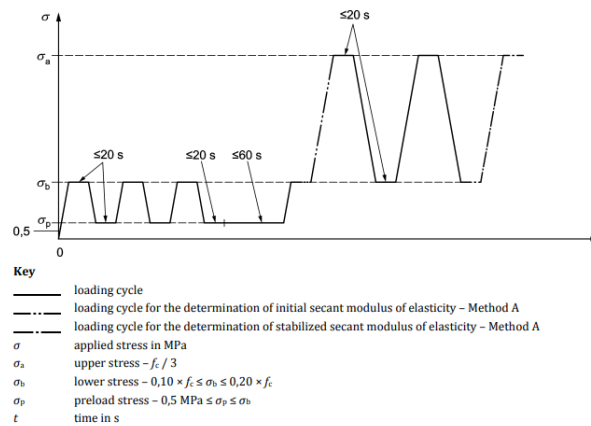


Figure 7.1-3 Metode A illustrert. Sykluser for bestemmelse av initiell og stabilisert sekantmodul for elastisitet. [33]

Før gjennomføring av testen tas sylindere prøver ut av vann fra herding og grove toppflater slipes med en slipemaskin slik vist i fig 7-2. Slipemaskinen sliper sylindere med vann. Deretter ble lengdene målt på sylindere med en skyvelære (figur 7-4).



Figure 7.1-4 Slipemaskin

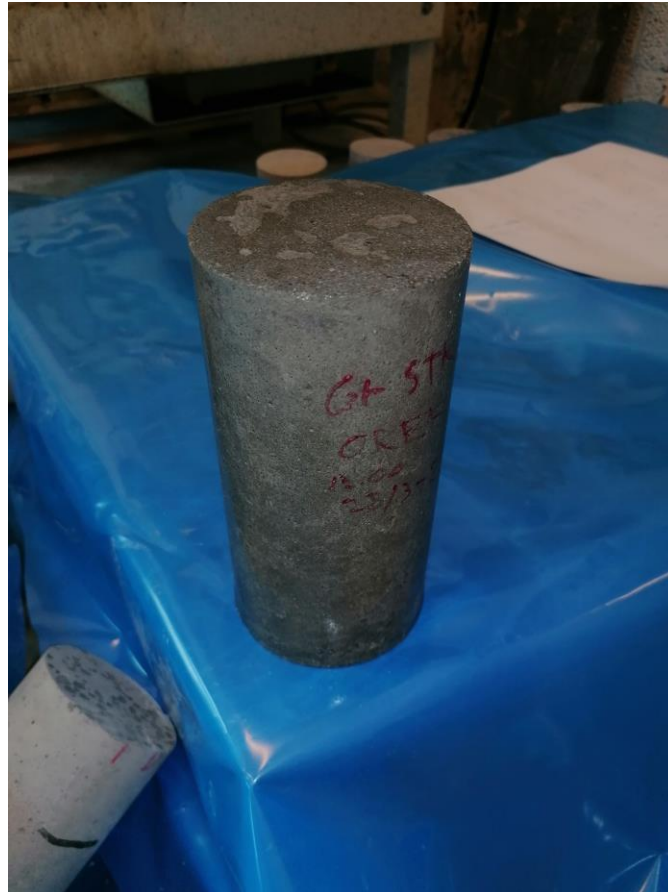


Figure 7.1-5 en ferdig slipt sylinder



Figure 7.1-6 Sylindere målt med skyvelære

Figure 7.1-7 Testillustrasjon av elastisitetsmodul test

7.2 Testing av trykkfasthet

Trykkfasthet ble testet etter standarden NS-EN 12390-3 Prøving av herdnet betong – Del 3 Prøvelegemers trykkfasthet[34]. I denne testen ble det gjort noen unntak fra standarden, som blir beskrevet seinere i metode kapitlet. Trykkpresse maskinen hadde også et integrert program for test av trykkfasthet. Det ble testet terninger med dimensjoner slik som beskrevet i kapittel case/materialer, som er innenfor kravene gitt i standarden. Figur 6.1.2.1 testillustrasjon av trykkfasthet

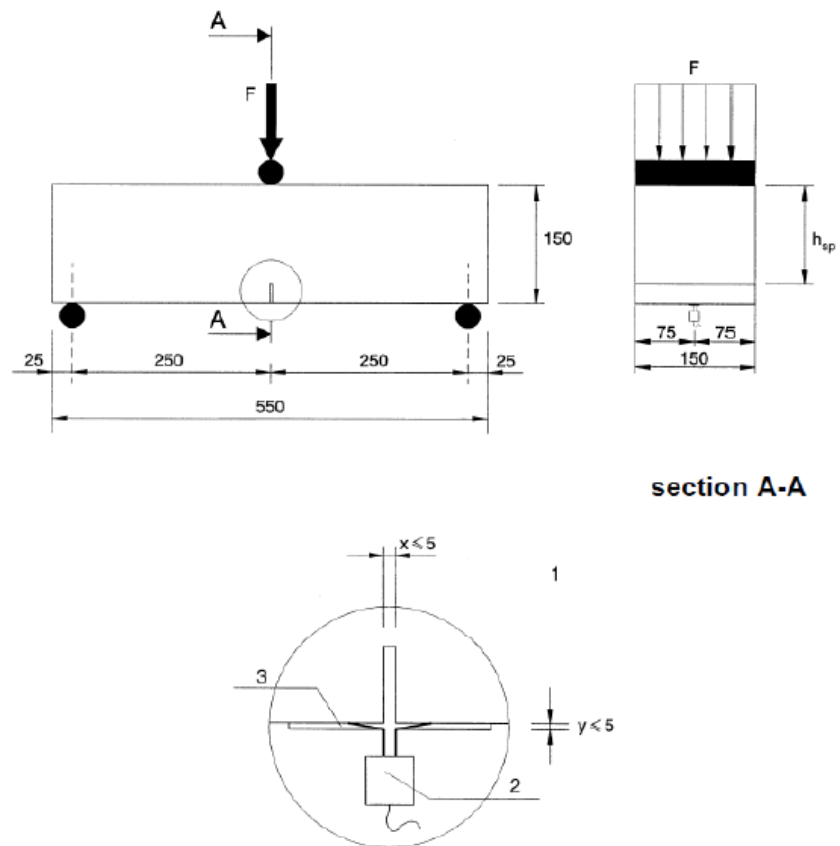


Figur 7.2.2 Testillustrasjon av trykkfasthet

7.3 Bøyestrekfasthet test

Bøyestrekfasthet testen utføres i henhold til NS-EN 14651:2005.på 36 bjelker totalt. Herdet bjelker ble satt i plastfoliene etter de tas ut fra herdekaret. Bjelkene som testes plasseres på oppleggene i trykkpressen. Slik at lengden mellom senteravstandene på opplagerene er på 500 mm. Bjelkene plasseres etter kravene beskrevet i NS-EN 14651:2005[35]. Lastpåføringshastigheten velges til 21 mm/min slik i NS-EN 14651:2005.

Hensikten med bøyestrekfasthet testen er undersøke kraft som påkjennes på bjelkene før bruddet oppstår. Den lastpåføringskraften gir indikasjon på prøvens toleranse og bøyestrekfastheten.



Figur 7.3.1 Oppstilling for belastning av prismer [35]

Fremgangsmåte:

- Før test skal det sages et snitt i midten av bjelkene med en dybde på 25 mm \pm 1mm og en bredde på 4-5 mm.
- Kalibrere slik at dimensjoner på prøven er lesbart med en nøyaktighet på 0,1 mm.
- Dimensjonene skal være lesbart med en nøyaktighet på 1 mm.
- Testmaskinen følger kravene for maskinklasse 1 i henhold til NS EN 12390-4. Det gis krav for at maskinen skal kunne produsere en konstant CMOD og nedbøyning med tilstrekkelig stivhet til å unngå ustabile soner i CMOD kurven.

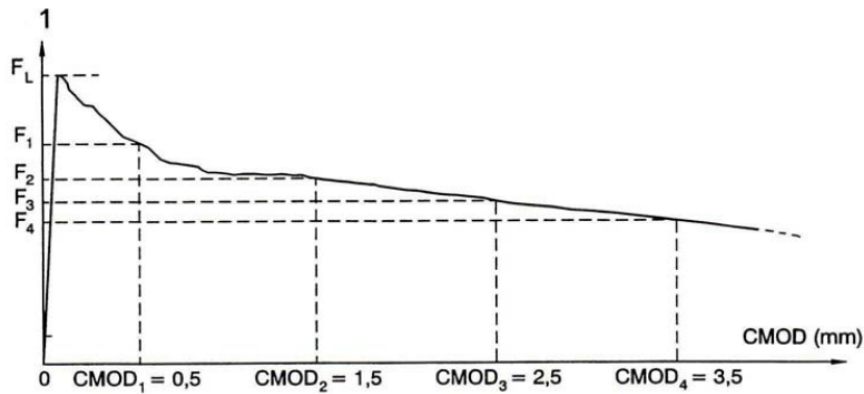


Figur 7.3.2 Testillustrasjon av rest bøyestrekfasthet

Et av parameterne som måles ved bøyestrekfasthet testen er CMOD og påført last som registreres kontinuerlig opp mot en CMOD på 5 mm. CMOD måles med et verktøy, slik som en transducer eller en clipp gauge. I testen ble det bestemt fire ulike rissvidder (CMOD1-CMOD4) for alle bjelker. Den ekvivalente bøyestrekfastheten for proporsjonaliteten representeres som 1. riss i alle bjelkene.

Notasjoner:

- $f_{ct,L}$ Bøyestrekfasthet representert ved 1.riss (proporsjonalitetsgrensen, LOP), eller ved maks rissvidde lik 0,05mm;
- fR1 Rest bøyefasthet tilsvarende 0,5mm rissvidde;
- fR2 Rest bøyefasthet tilsvarende 1,5mm rissvidde;
- fR3 Rest bøyefasthet tilsvarende 2,5mm rissvidde;
- fR4 Rest bøyefasthet tilsvarende 3,5mm rissvidde;



Figur 7.3.3 Last-CMOD-diagram. Forventet diagram for fastsettelse av proporsjonalitetsgrensen, (LOP, 1.riss, og forhåndsdefinerte rissviddene (CMOD1-CMOD4) (NS-EN 14651)[35]

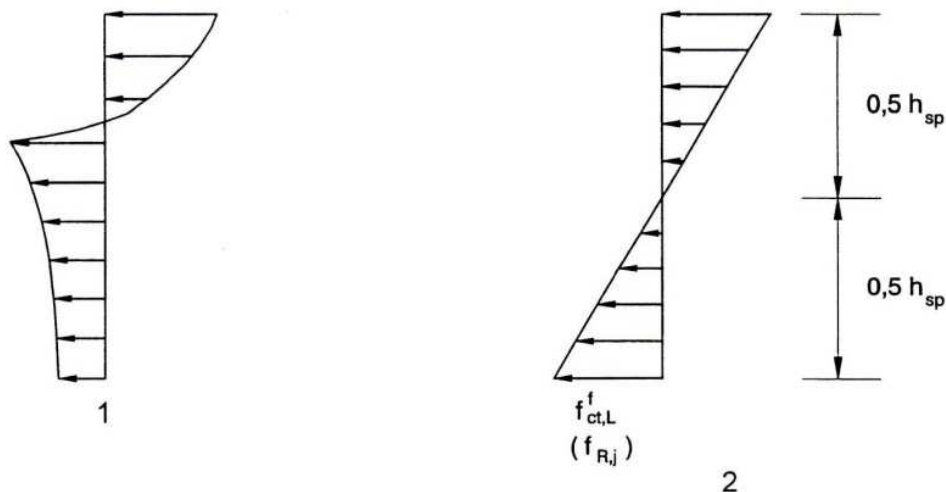
Der

F_j last ved tilsvarende CMOD $_j$ ($j=1,2,3,4$)

F_L last tilsvarende LOP (limit of proportionality).

7.3.1 Bøyestrekfasthet og rest bøyestrekfasthet

Rest bøyestrekfasthet defineres av bøyemomentet som antas av linære spenningsfordelingen over tverrsnittet i henhold til NS-EN 14651[35], se figur 7.3.4. Spenningsfordeling benyttes som en forenkling ettersom i realiteten vil ikke fenomenet følge nøyaktig en presis fordeling vist i figur 7.3.4. Det kan også ses at spenningen fordeles etter en antatt spenningsfordeling og en reell spenningsfordeling.



Figur 7.3.4 Lineær spenningsfordeling i henhold til NS-EN 14651 (NS-EN 14651)[35]

Der

1 Reell spenningsfordeling;

2 Antatt spenningsfordeling;

Følgende uttrykk 7.3.1 benyttes for å definere bøyestrekfastheten:

$$f_{ct,L}^f = \frac{6M_L}{bh_{sp}^2} = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad \text{Ligning 7.3.1}$$

der

F_L Lasten ved tilsvarende LOP;

M_L Bøyemomentet ved tilsvarende last ved LOP;

b Bredden av prøvelegemet;

h_{sp} Avstanden fra sprekken midten på prøvelegemet til toppen av prøvelegemet

[35]

Følgende uttrykk 7.3.2 benyttes for å definere rest bøyestrekfastheten:

$$f_{R,f} = \frac{6M_j}{bh_{sp}^2} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad \text{Ligning 7.3.2}$$

der

F_j Lasten ved tilsvarende CMOD ($j=1,2,3,4$);

M_j Bøyemomentet ved tilsvarende last ved F_j ($j=1,2,3,4$);

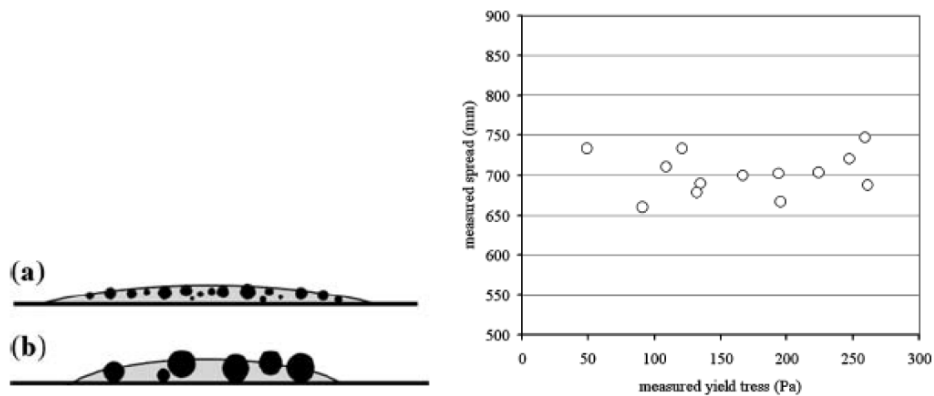
b Bredden av prøvelegemet;

h_{sp} Avstanden fra sprekken midten på prøvelegemet til toppen av prøvelegemet

7.4 Testing i fersk tilstand

7.4.1 LCPC-BOX

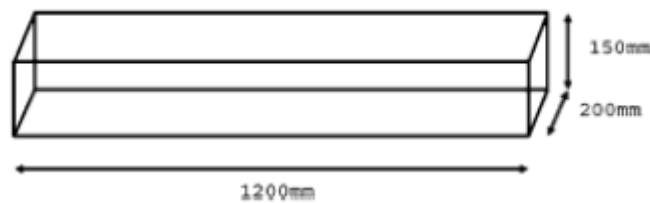
En viktig reologisk parameter som måles er flyte spenning. Synkutbredelse testen har noen svakheter og begrensinger ved høyt flytnivå pga. betongviskositet, og da fortynning av betongflyten blir høyere enn tykkheten til aggregatet. Tykkelsen av prøvelegemet må være fem ganger større enn største partikkelen for å kunne benytte fluid mekanikk ligningen. Det er fordi i tilfellet vil flyten bli definert som homogen flyt blanding pga. tykkelse/partikkel forhold. Det forårsakes også at korrelasjon mellom flyt spenning og spredning ikke finnes. Dermed kan ikke synkutbredelse benyttes til å måle verdien til flytespenning. Slik illustrert i figur 7.4.1, for begge prøvene er flyte spenning samme og stabilt. Første prøven er det mindre sementpasta og høyt innhold av store tilslag. Dette vil resultere i høyere synkutbredelse for første prøven sammenlignet med den andre. Figur 7.4.1 viser at det er ingen korrelasjon mellom flyte spenning og synkutbredelse flyt for blandingene med ulike sammensetninger. [36]



Figur 7.4.1 (Venstre) Begge blandinger har samme flytespenning, men (a) har høyere synkutbredelse flyt enn (b). (Høyere) Flytespenning målt med ulike SCC, alle med samme synkutbredelse flyt på 700+-50mm [36]

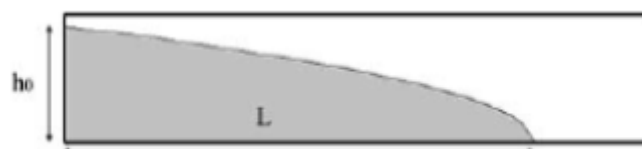
Figur 7.4.1 (venstre) Begge blandinger har samme flytespenning, men (a) har høyere synkutbredelse flyt enn (b). (Høyere) Flytespenning målt med ulike SCC, alle med samme synkutbredelse flyt på 700+-50mm

En alternativ metode til å sammenligne måleverdiene til flytespenning er bruk av en LCPC boks [36]. Det foreslås en løsning til å overkomme svakhetene som det er med bruk av av synkutbredelse ved å tilsette 6 liter til betongen på den ene bredde kanten. Formålet med LCPC boks er å kunne måle flytespenning ved en gitt spredningslengde, noe som ikke er mulig på synkutbredelse.

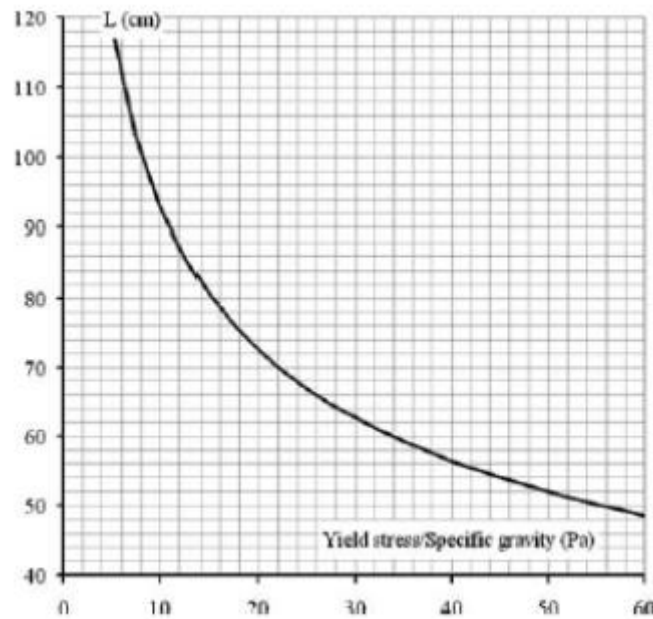


Figur 7.4.2 LCPC-box geometri [36]

I Roussels studie [36](kilde) er det vist at LCPC boks oppfyller kravene til å representere reologiske egenskaper av blandinger og oppfyller kriterier for korrelasjonen mellom flyte spenning og eksisterende spredning. Det er også nevnt at det er ikke mulig å presentere en eksplisitt løsning for flyte spenning som en funksjon av spredningslengde L. Målingen av lengden som er et gjennomsnitt av maksimalspredningslengde og horisontal spredning langs sideveggen, gir et forhold mellom flyte spenning og spesifikk tyngde som kan leses, se figur 7.4.3. Dermed muliggjøres det å beregne flytespenningen.



Figur 7.4.3 Illustrasjon av LCPC-box metoden [36]



Figur 7.4.4 Korrelasjon mellom spredningslengde L i LCPC-box og forholdet flytespenning/spesifikk gravitet [36]

7.4.2 Rheometer test

Det ble benyttet ICAR Plus Rheometer til rheometertesten se figur 7.4.5. Rheometeren består av en beholder som holder betongen, en driver som inkluderer en elektrisk motor og dreiemoment meter; 4 blader som settes på driveren; en ramme som festes med driveren på toppen av beholderen. Det brukes også en pc til å operere driveren, registrerer dreiemomentet under testing og beregning av flykurve parametere. Beholderen består av serier og vertikale stenger rundt perimeteret for å unngå oppsamling av betong rundt veggene i beholderen. Beholderestørrelsen velges ut fra behovet og maksimal nominell tilslagsstørrelse. Driveren har en diameter og høyde på 127 mm. [27]

Det er to tester som utføres; første test er en spenningsvekst test der vispen roterer i en konstant lav hastighet på 0,025 rev/s. Start økningen i dreiemomentet måles som en funksjon av tid. Dne andre testen er flytkurve test som benyttes til å bestemme dynamisk flytespenning og plastisk viskositet. Flytkurvetesten begynner med en nedbrytnings periode hvor vispen roterer med maksimal hastighet. Dette gjøres for å bryte ned tiksotropiske strukturer som eksisterer i blandingen, annen grunn til nedbrytningen er å lage en konsistent skjærhistorikk før Bingham parametere måles. Farten til vispen reduseres deretter stegvis, der er anbefalt å redusere farten i 6 steg. Kurven for dreiemoment vs hastigheten til vispens rotasjon defineres flytkurven, som videre brukes til å definere Bingham parametere. [27]

Test kontrolleres av pc skjermen ved hjelp av ICAR Plus Rheometer programvaren. Alle nødvendige funksjoner som operasjonen av vispen, måling av dreiemoment, datalagring og resultat registrering gjennomføres i pc på programvaren. Brukeren definerer testgeometrien og testparametere til å kjøre flytkurve testen. [27]



Figur 7.4.5 Rheometer ICAR plus

7.5 Avvik fra NS

Her presenteres avvik for metodene.

I de utvalgte standardene beskrives. I hovedsak er det største avviket tiden når prøvene ble testet. NS-EN 14651

- Ikke brukt transducer eller clip gauge pga. mangel på ressurser og verktøy for å gjennomføre det.
- Målt nedbøyning i stedet for CMOD.

7.6 Statistisk modell for resultatinterpolering

I henhold til NS-EN1992-1-1:2004+NA:2008 og NS-EN 206:2013+A1:2016+NA:2017 resultatene fra betongens mekaniske egenskaper er presentert med konfidensintervall for t-student's fordeling. Det er viktig å beregne 95% konfidensintervall til å avgjøre egenskaper av betong i trykk og rest bøyestrekfasthet.

For å avgjøre dersom forskjellige resultater for ulike fiber dimensjonstyper er høye for trykk og bøyestrek, benyttes det høyreside hypotesetesten til å finne gjennomsnittlige verdier for R_f og R_c , med 95% margin. Ettersom standardavvik for blandingenes resultater er ukjent, benyttes det derfor student fordeling.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Ligning 7.6.1

Hvor,

σ	Standardavvik
Σ	Summasjonstegn
X	Enkel verdi i dataset
n	Antall prøver

Gjennomsnittlig verdi

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Ligning 7.6.2

Hvor,

\bar{x}	Gjennomsnitt tegn
Σ	Summasjonstegn
x_i	Enkelt verdi i datasett
n	Antall prøver

7.7 Litteratursøk

Det ble brukt flere databaser og internettressurser til å finne relevant akademiske kilder som søke strategi og Boolske parametere. Metoden som brukes til de brukt litteraturstudiene består av 7 systematiske steg:

- Identifisering av nøkkelord for problemstilling
- Velg databaser
- Finne søkeord til nøkkelordene
- Sammenkobling av søkeord
- Evaluere søket og endre nøkkelord dersom treffene er irrelevante
- Dokumenter søket
- Velge ut relevante studier til oppgaven.

Boolske parametere

Boolske parametere påvirker søket og bidrar til å presisere søket ved å inkludere / ekskludere / bruk av synonymer til å forkorte antall resultater fra søket.

Inklusjonskriterier

- Primærkilder
- Artikler med et eller flere ord av følgende: betong/concrete.
- Mastergrad avhandlinger
- Doktorgrad avhandlinger
- *Open access*/åpne artikler
- Store Norske Leksikon (SNL) artikler

Eksklusjonskriterier

- Nyhetsartikler
- Bacheloroppgaver
- Litteraturstudie artikler

- Litteratur eldre enn 10 år
- Litteratur uten et eneste nøkkelord

8 Resultat

8.1 Resultater av litteraturstudier

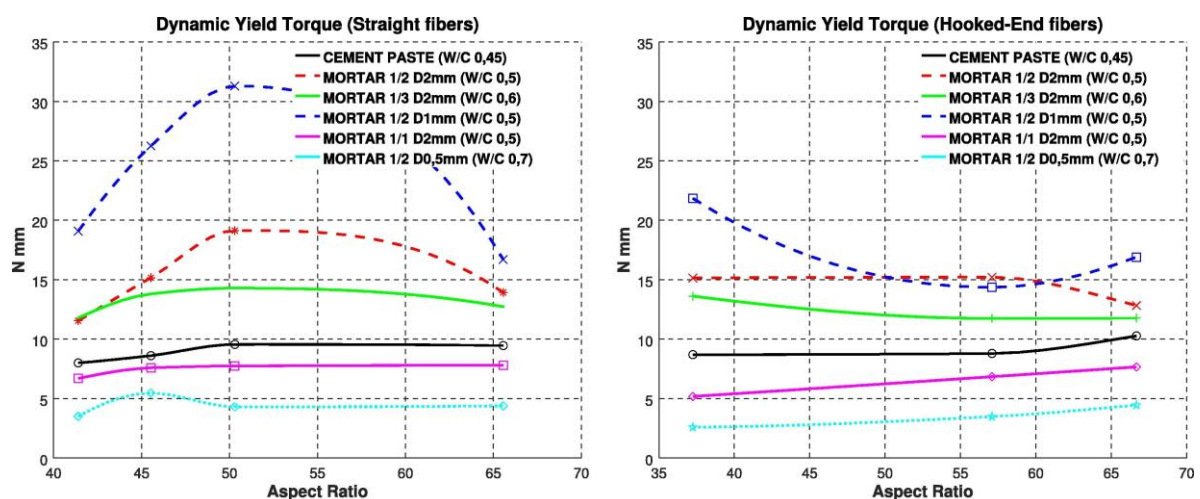
Dette kapitlet omfatter studier som er relevante med oppgavens tema og materialer som det legges til grunn for forsøkene i denne oppgaven. Hovedhensikten med litteraturstudier vil være å ha et sammenlignbart grunnlag for å gi indikasjonen på validiteten og reliabilitet av oppgavens forsøk og problemstillingen. Litteraturstudien vil også tillate for utviklingen av hypotesen til oppgaven basert på tidligere utførte studier og relevante teorien. Det må bemerkes at i noen av litteraturstudiene blir det benyttet andre standarder enn NS. Det brukes ASTM til testprosedyrer for noen av mekaniske og betongkonsistens tester i noen av litteraturstudiene. Hensikten med at disse litteraturstudiene fremdeles inkluderes er for å se påvirkningen av stålfiber tilsetning i betong. Påvirkningen og sammenhengen mellom parametere og variabler vil være det sammen uavhengig av standarden som brukes. Bruk av andre standarder som ASTM kan ha litt annerledes formler og sikkerhetsfaktor verdier enn NS standarder.

8.1.1 Studie 1

Denne studien har som mål å undersøke reologiske parametere som styrer effekten av induisert dreiemoment på fiberrotasjon. Hensikten er å forstå faktorer som innvirker fiberarmert betong konsistens. Forsøket ble utført med industrielle fibere med ulike aspekt forhold og geometrier (endekroket, rette) ved hjelp av en rheometer. Fibere ble blandet sammen med mortar og sementpasta som hadde ulike designblandinger og ulike reologiske parametere. Analysen gikk ut på enkel fiber ettersom fibere i en volumfraksjon på 2% regnes som en fortynnet løsning med lav interaksjons sannsynlighet mellom fibrene. Rheometer testen gir viskøst dreiemoment verdi T og faktorer som har innvirkning på fiber dreiemoment.[37]

Det ble benyttet ordinær portland sement type CEM 1 52.5R i henhold til UNE-EN-197-1:2011 del 1. Sementsammensetning og spesifikasjon ble brukt som tradisjonelle sementer med spesifikk vekt på 3.077g/cm^3 , spesifikk (Blaine) finhet på $3552\text{m}^2/\text{kg}$. Standard CEN quartz sand ble brukt i henhold til DIN EN 196-1 og DIN EN ISO 679 og tilsettes i blandingen i rheometer testen. Tilslagstørrelsen i blandingen varierte mellom 0,08 til 2.00mm. Tilslag fordelingen ble utført ved sikting for å separere maksimale tilslagstørrelser 2mm, 1mm og 0,5mm. [37]

Rheometeren av modelltype VisKomat NT ble benyttet for å måle indusert dreiemoment (T). Rheometeren kan utføre operative målinger på blandingen på opptil maksimal tilslagsstørrelsen D_{max} på 2mm. Rheometer ble fylt med 370ml av betongblandingen for hver test før fiber-rheometer sonde ble innsatt. Rotasjonen i rheometeren ble valgt til 10-4 grader, og fra 0,001rpm til 400rpm i en hastighets-kontrollert modus. Indusert dreiemoment som måles, kan variere mellom -250Nmm til $+250\text{Nmm}$. Fig 8.1.1 presenterer rheometer resultater for dynamisk dreiemoment for rette og endekroket fibere. $To(d)$ verdi vs aspektforhold (l/d) er representert i kurveakser. Det kan observeres at høyeste dreiemomentet når ved aspektforhold på 50. Verdien for dynamisk dreiemoment for endrekroket fibere varierer mellom 1 til 15 Nmm, unntatt for $\frac{1}{2}$ maksimalt tilslag diameter på 1mm. Kurven i figur 8.1.1 gir også indikasjon på innvirkning av tilslag type på dreiemoment, samt betongkonsistensen. Det kan ses et proporsjonalt forhold mellom dreiemoment og tilslagsstørrelser hvor store tilslagsstørrelser gir høyere dreiemoment. Lavt v/c forhold også viser seg til å øke dreiemomentet i rheometer testen. For eksempel sementpasta med v/c forhold på 0,48 gir høyest dreiemoment, samt Mortar $\frac{1}{2}$ med tilslag diameter 0.5mm og v/c forhold 0,7 gir lavest dreiemoment, sett i figur 8.1.1a.[37]



Figur 8.1.1 Rheometer resultater for dynamisk dreiemoment $To(s)$. (a) rette fibere (b) endekroket fibere [37]

Studie[37] konkluderer at fibergeometrien har stor innvirkning på viskositet og dreiemoment. Dreiemoment med endekroket fibere er dobbel så stor sammenlignet med rette fibere. Dreiemomentet er samtidig også avhengig av betongblandingen og tilslagsstørrelser benyttet i blandingene. Tilslagsstørrelse under 0,063 reduserer fiberopprettingen, og tilslagsstørrelser over 2mm øker dreiemomentet for å rotere fibere. Samtidig, høyere volumfraksjoner reduserer nødvendig dreiemoment for å rotere fibere fordi tilslag under 0,063 er forminsknet. Sementpasta volum forhindrer fiberopprettingen. [37]

8.1.2 Studie 2

Dimas Alan [38] i sin studie presenterer resultater av en undersøkelse utført på mekaniske egenskaper av stål fiberarmert betong. Det ble benyttet rette og endekroket stålfibere av ulike lengder og diameter til betong forsterkningen med forskjellige fiber volumfraksjoner av 1,0% og 1,5%. Testene som ble

utført i fersk betong tilstand inkluderer synkutbredelse og L-boks (LCPC). Rheometer test ble også brukt til å determinere plastisk viskositet og skjærstress. Etter herdingen ble også utført trykktest og bøyestrek test på betongblandingene. Det ble også gjennomført andre analyser og tester i studien som ulineær finite element modell til å simulere mekaniske egenskapene til stål fiberarmert betongen, men dette tas ikke med i diskusjon i dette kapitlet ettersom det ikke er relevant til oppgavens omfang. I dette kapitlet fokuseres det kun på analysen og resultater for betong i fersk tilstand i denne studien.

Materialer brukt i betong sammensetningen består av brasiliansk sement type CPIII 40 med 28 dagers trykkfastheten på 40MPa, elv sand i to partikkelstørrelser (ene type fra 0,15mm til 4,8mm og andre 0,15mm til 0,85mm). Blandingen besto av tilslag på maksimal diameter på 9,5mm, flyasker, silica og superplastiserende stoffer med 31,2%. V/C forholdet i betongen var 0,32. To fiber typer ble benyttet i blandingen: rette fibre (SF1) og endekroket fibre (SF2). Rette fibre hadde en strekkapasitet på 1100 MPa og densitet på 7,85g/cm³, mens endekroket fibre hadde en strekkapasitet på 1150 MPa og densitet på 7,85 g/cm³. Lengde og aspektforholdet til SF1 fibre var 12mm og 67, samt 35mm og 65 for SF2, respektivt. Betongblandingene er presentert i tabell 8.1-2.[38]

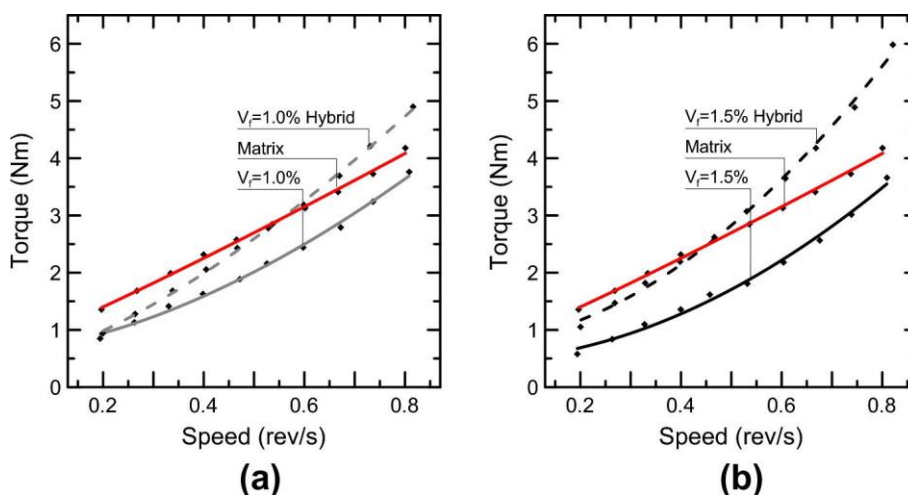
Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1 Betong blandinger \ [38]

Mix composition of concretes.

Constituent	Mixtures				
	Matrix	C1.0%H	C1.0%	C1.5%H	C1.5%
Coarse aggregate (G) (kg/m ³)	494	468	468	454	454
Sand (S1) (kg/m ³)	830	830	830	830	830
*Sand (S2) (kg/m ³)	100	100	100	100	100
Silica mesh 325 (kg/m ³)	70	70	70	70	70
Cement (kg/m ³)	360	360	360	360	360
Fly ash (kg/m ³)	168	168	168	168	168
Silica fume (kg/m ³)	45	45	45	45	45
Superplasticizer (kg/m ³)	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1
Viscosity modifier (kg/m ³)	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
Water (kg/m ³)	150	150	150	150	150
Straight fiber (SF1) (kg/m ³)	0	39	0	39	0
Hooked end fiber (SF2) (kg/m ³)	0	39	78	78	117
Superplasticizer (%)	4	4	4	4	4
Water/binder ratio	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

* Sand (S2): sand (S1) with diameter less than 0.85 mm.

Figur 8.1.2 viser rheometer resultater ved bruk av Herschel-Bulklet modell, $t(\tau)_o$ a og b som representerer reologiske parameter ($t=t_0+a(\gamma^m)$) som beskriver egenskapene til ferske betongblandinger. Det observeres at skjærstress og viskositet er lavere for uarmert stålfiber betong sammenlignet med armerte betongen. For rette 12mm fibre, økes hydralisering av fibre som forbedrer viskositeten i betongen. Denne oppførselen er særlig større for 1,5 volumfraksjonen sammenlignet med 1,0 volumfraksjonen. Fig 8.1.2 viser også at ulinearitet øker etter hastighet 0,5 rev/s, og indikerer dermed at skjærstyrken økes ved økningen av fibervolum i systemet. [38]



Figur 8.1.2 Rheometer resultater for (a) 1% fiber volumfraksjon (b) 1,5% fiber volumfraksjon (studie 4) [38]

Det ses i figur 8.1.2 synkutbredelse diameter varierte fra 620mm til 700mm. Det observeres også at betongen som er armert med 1,5%H ble blokkert i L-boks av 2 stålstenger, mens alle fiberarmert betongblandinger ble blokkert i L-boks med 3 stålstenger. Dette kan forårsakes av liten c/c (senter til senter) avstand mellom stengene, som er uvanlig for fiberarmert betong med 1,0% og 1,5% volumfraksjoner.

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-2 Reologiske testresultater (studie 4) [38]

Results of rheological tests.

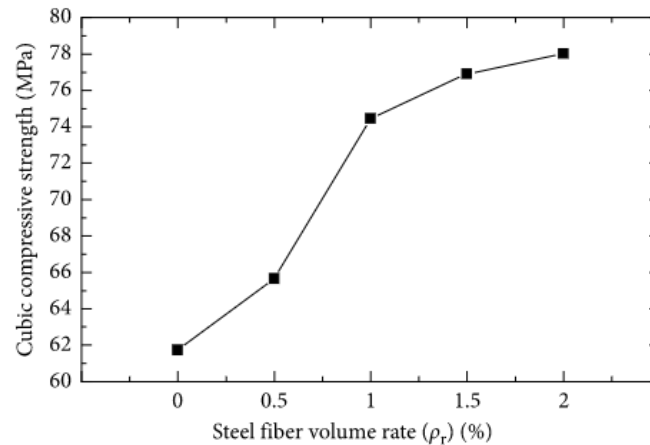
Mixtures	Spread (mm)	V-funnel (s)	L-box (H_2/H_1)			Viscosity (Pa s)	Shear yield stress (Pa)
			I	II	III		
Matrix	620	18.15	0.95	0.90	0.85	187	183
C1.0%H	705	18.39	0.95	0.90	BL	230	111
C1.0%	720	19.28	1.00	0.86	BL	157	178
C1.5%H	620	BL	0.53	BL	BL	341	220
C1.5%	700	19.56	0.86	0.50	BL	156	131

BL = congestion of flow section.
I, II, III = number of steel bars.

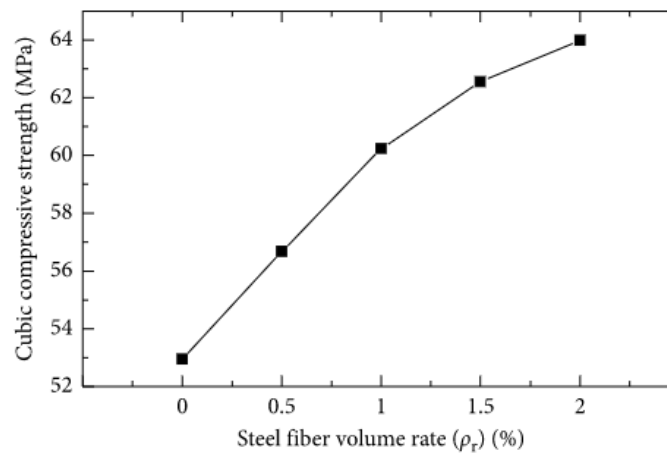
8.1.3 Studie 3

I denne studien [39] (kilde) blandes det C50 og C60 stålfiberarmert betong ved tradisjonell blandingsprosess og vibrasjon blandingsprosess. Det benyttes ulike volumfraksjoner av stålfiber til å lage betongprøver med ulike proporsjoner. Det utføres tester som trykktest, splittingstest og bøyestrekktesten til å bestemme mekaniske egenskapene til betongprøvene. For vår oppgave er det kun relevant å se tradisjonelle blandingsprosessen og ikke vibrasjonsindusert blandingsmetode.

Stålfiber lengden som det benyttes i denne rapporten [39] velges mellom 20mm-60mm, diameter er mellom 0,3mm-12mm og lengde til diameter forholdet mellom 30-65. Det ble brukt ordinær Portland sement P.O 52.5 og sanden som det benyttes i fint tilslaget har en finhetsmodul mellom 2,3-3,0. I tillegg ble det også benyttes andre tilsetningsstoffer som superplastiserende stoff som utgjorde 0,5%-1% av sementinnhold, med vannreduksjonsfaktor på mindre enn 25%. Volumfraksjoner for stålfiber som det brukes i blandinger er 0,5%, 1%, 1,5% og 2%.



Figur 8.1.3 Trykkfasthet resultater for betong terninger CF60 [39]



Figur 8.1.4 Trykkfasthet resultater for betong terninger CF50 [39]

Resultater i Fig 8.1.4 viser trykkfastheten for betong terninger blandet med tradisjonelle blandingemetoden. Trykkfastheten i stålfiberarmert betong CF50 økes med økning i fiberinnhold. For stålfiber volumfraksjon på 0,5%, 1%, 1,5% og 2%, økes trykkfastheten med 7,05%, 13,79, 18,17% og 20,85% respektivt. Figur 8.1.4 viser også at ved stålfiber innhold mindre enn 1%, øker trykkfastheten i raskere rate. Ved fiberinnhold mer enn 1% (fek 1,5% og 2%) blir økning i trykkfasthete treigere. I figur 8.1.3 observeres det lik trykkfasthet oppførsel som i CF50. Her kan det også ses at økning i voluminnhold av stålfiber gir økt trykkfasthet. Økningen i voluminnhold 0,5%, 1%, 1,5% og 2% tilsvarte resultatene 6,33%, 20,59%, 24,57% og 26,35% henholdsvis. Øknings rate i trykkfastheten observeres også til å være raskere for stålfiber volum mindre enn 1% sammenlignet med resultatene for voluminnhold over 1%. [39]

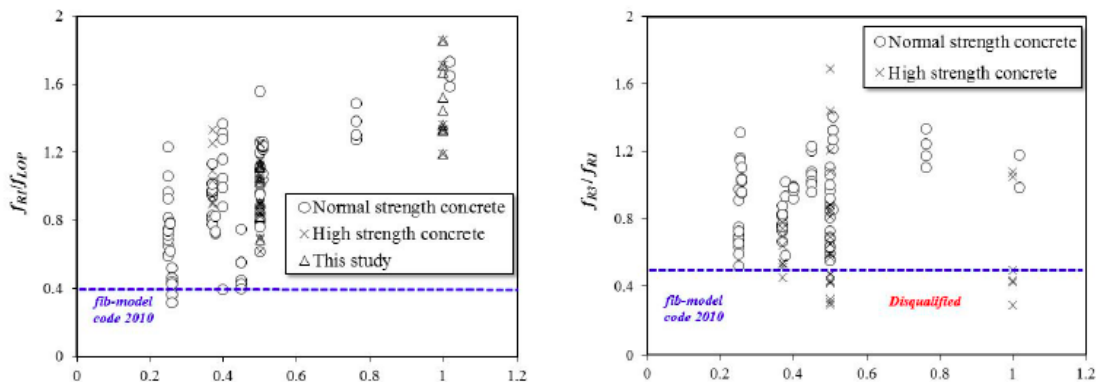
[39]

8.1.4 Studie 4

I denne studien (kilde) undersøkes det påvirkning av stålfiber på rest bøyestrekfasthet egenskaper av høyttelse stålfiberarmert betong. Hensikten med tilsetningen i denne studien [35] er å redusere

krytutviklingen og unngå krypvekst i betong på makroskopisk nivå. Det benyttes dobbelkroket stålfiber med en betong trykkfasthet på 80MPa. Fibrene hadde et aspektforhold på (64,80) med bøyestrekfastheten på 1600 MPa. Studien tester og måler CMOD parameteren til å bestemme rest bøyestrekfastheten i betongbjelker. [35]

Vann til sement (v/c) forhold velges til 25% og stålfiber voluminnholdet benyttes på 0,5% og 1,0%. Det brukes Portland sement Type I (densitet 3,15 g/m³). Til evaluering av påvirkning som stålfiber tilhører i betongen bøyestrekfasthets oppførsel, støpes det 9 bjelker/prismer med dimensjoner 150mm x 150mm x 550mm i henhold til EN-14651 standarden. Det ble laget 5mm bredd og 25mm dyp snitt i bunnen av bjelkene før de settes for herding en herdekar med vanntemperatur på 20±1 grader.[35]



Figur 8.1.5 Påvirkning av stålfiber voluminnhold på rest bøyestrekfasthet egenskaper[35]

Figur 8.1.5 illustrerer hvordan ulike volumfraksjoner av stålfiber påvirker rest bøyestrekfasthet i betong. Det observeres at fiber bøyestrekfastheten er lavere enn heftkraften mellom materialene, slik at dersom stålfiber innholdet er høyere, blir bøyestrekfastheten begrenset på grunn av brudd i fibrene. I henhold til EN-14651 ble det lagt til grunn ligning 8.1.4.1 og ligning 8.1.4.2 som må tilfredsstilles for at bjelke mekanisk bøyestrekfastheten skal være i henhold til standarden.

$$\frac{f_{R1}}{f_{LOP}} > \text{lik } 0.4 \quad \text{Ligning 8.1.4.1}$$

$$\frac{f_{R3}}{f_{R1}} > \text{lik } 0.5 \quad \text{Ligning 8.1.4.2}$$

Der,

f_{R1} Rest bøyestrekfasthet i bruksgrensetilstand (CMOD = 0,5 N/mm²)

f_{R3} Rest bøyestrekfasthet i bruksgrensetilstand (CMOD = 2,5 N/mm²)

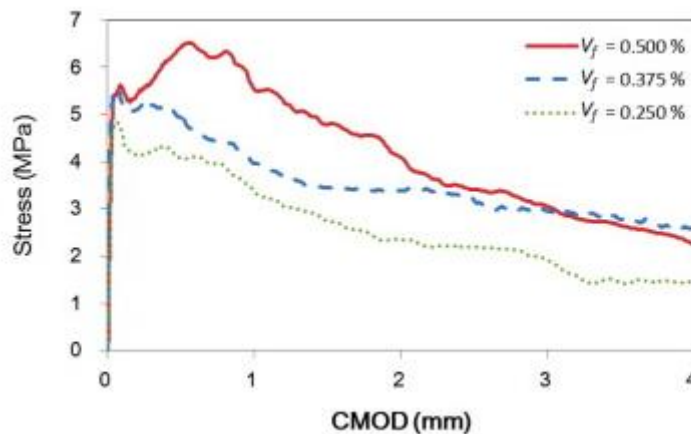
Det kan ses at dere er flere stålfiberarmert betongbjelker som oppfyller kravene i henhold til likning ligning 8.1.4.1 og ligning 8.1.4.2 sammenlignet med normale uarmert betongbjelker.

[35]

8.1.5 Studie 5

Denne studien [40] understreker bygge bransjens etterspørsel for rest bøyestrekfasthet istedenfor ekvivalent rest bøyefasthet forhold. Det foretas derfor et forsøk i denne studien til å undersøke direkte rest bøyefasthet av stålfiberarmert betongbjelke med ulike fastheter; 25, 35 og 45 MPa, samt forskjellige stålfiber volumfraksjoner, 0,25%, 0,375% og 0,50%. I vår masteroppgave har det kun blitt benyttet en type betongfasthet med ulike stålfiber volumfraksjoner. Resultater for ulike betongfastheter vil derfor være irrelevant for vår masteroppgave.

Det ble støpt 9 testserier i forsøket til å sørge for god reliabilitet i resultater. Til sammen ble det støpt 45 betongbjelker med dimensjoner 150mm x 150mm 550mm i henhold til EN 14651 som spesifiserer testmetoder til å måle rest bøyestrekfastheten til stålfiberarmert betong. Det ble brukt endekroket fibre i forsøket med lengde 60mm, diameter 0,63mm og aspekt forhold på 95. Strekkfastheten er fibre var 1200 MPa. Det ble også benyttet superplastiserende stoffer som tilsetningsstoff i betongblandinger som ble herdet i herdekar med temperatur på 23 ± 1 C i 28 dager. EN 14651 krever at til testing av rest bøyestrekfasthet, må det lages et snitt i midtspennet. Det ble derfor laget et snitt i midtspennet med bredde 5mm og dybde 25mm. [40]



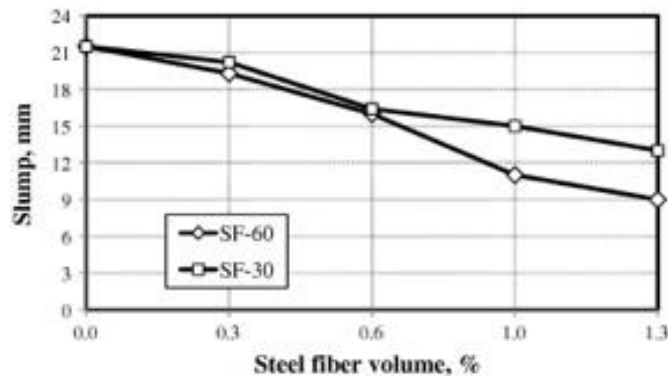
Figur 8.1.6 Resultater for rest bøyestrekfasthet med ulike stålfiber volumfraksjoner [40]

Figur 8.1.8 presenterer rest bøyestrekfasthet og CMOD kurver for alle stålfiberarmerte betongbjelker med varierte stålfiber volumfraksjoner. Det kan sees at kurvene er lineære inntil de når enden av plastiske området og begynner i rest fastheten, og her endres kurvene drastisk. Kurvene indikerer at større stålfiber mengder reduserer dannelsen av sprekk forårsaket av strekk. Det kan observeres at ved økning av stålfiber volumfraksjon fra 0,25% til 0.5% forminskes fasthetsreduksjon med 41% og 5%, respektivt for bjelken med betongfasthet 25MPa, og 41% og 24% for betongbjelker med fasthet på 35MPa. Dette viser at økning i stålfiber volumfraksjon forbedrer rest bøyestrekfasthet. [40]

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316321018?casa_token=RAz0dBa13PwAAAAA:cyS-jYaunZqPCareKDKL04K7hGnIRI4TJRj3QXQ-FOgB3p9eDN7yKJlyK0r0HN3DnaDXMPe8N5w
(kilde) [40]

8.1.6 Studie 6

I studie [41] undersøkes det støpbarheten i betong ved tilsetning av ulike volumfraksjoner av stålfiber. Det benyttes stålfiber voluminnhold på 0,3%, 0,64%, 1% og 1,3% til å lage betongblandinger som testes for synkutbredelse. Det benyttes to fibertyper med lengder 60mm (SF-60) og 30mm (SF-30), med diameter 0,75mm og 0,5mm henholdsvis. Synkutbredelse i studien måles i henhold til EN-12350-2 over en plate med dimensjoner 1000 x 1000mm. [41]

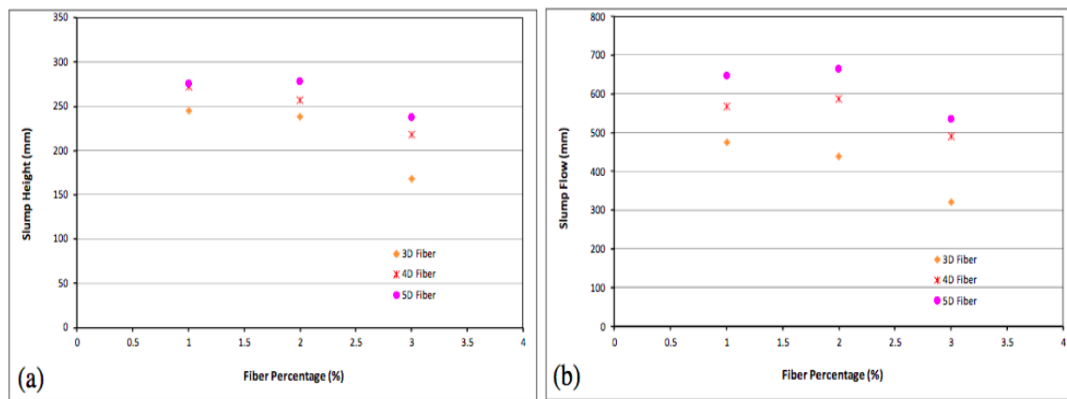


Figur 8.1.7 Resultater for rest bøyestrekfasthet med ulike stålfiber volumfraksjoner [41]

Figur 8.1.9 viser resultater av synkutbredelse gjennomført i [41]. Det observeres et reduserende mønster i synkutbedrelsen ved økning i fiberinnhold i blandinger. Reduksjon i synkutbredelseet tilsvarte 10%, 26%, 49% og 58% ved fiber dosering 0,3%, 0,6%, 1,0% og 1,3% for SF-60. Reduksjon i synkutbredelseet for SF-30 tilsvarte 6%, 24%, 30% og 40% ved fiber dosering 0,3%, 0,6%, 1,0% og 1,3%. En annen viktig observasjon som det gjøres i denne studien er at lengre fibere (SF-60) forminsker støpbarheten relativt mer enn kortere fibere (SF-30), ettersom synkutbredelse reduksjon er høyere for SF-60 blandinger enn SF-30 blandinger for samme stålfiber doseringer. [41]

8.1.7 Studie 7

I studien [42] (kilde) undersøkes det flyt og konsistens i stålfiberarmert betong. Det ble brukt varierte fibervolum doseringer (0%, 1%, 2% og 3%) av ulike fibertyper. Betongblandinger ble herdet i 7, 28, 56 og 90 dager. I vår masteroppgave vil resultater for denne studien etter 28 dagers være interessante. Det ble til sammen støpt 12 blandinger av fibertype 3D, 4D og 5D. Det brukes synkutbredelse til å måle konsistensen og støpbarheten i betongblandingene. [42]



Figur 8.1.8 Synkmål resultater [42]

Resultater for synkutbredelse i figur 8.1.10 viser at synkutbredelse og synkflyt for 2% fiber volumfraksjon blandingen gir like resultater som blandingen med 1% fiber volumfraksjon. Dette indikerer at påvirkningen av stålfiber i fersk betong har en grense og tilsetningen av stålfiber over den grensen vil ikke ha like drastiske effekter på ferske betongen. Resultatene i figur 8.1.10 viser også at høyere dimensjon fibertype som 5D gir mindre reduksjon i synkflyt i fersk betong sammenlignet med mindre fibertyper som 3D og 4D. 3D fibertypen gir laveste synkutbredelse hvor 5D viser høyeste synkutbredelsen i studien. [42]

8.1.8 Studie 8 (Fibercon)

Forsøk i denne studien [29] handler om et forsøksprosjekt som undersøker relevansen av å bruke synkutbredelse som mål på støpelighet av betong med fiber. Det analyseres også påvirkning av trinnvis tilsetning av stålfiber i betongkonsistensen. Fibertilsetningen ble gjort i 3 trinn, det vil 0,33%, 0,67% og 1%. Forutsetningen med dette er at det skal føre til konsistens-tap over tid for betongen. Det ble derfor brukt SP stoff som tilsetningstoff i blandinger. Tabell 8.1-1 gir oversikt over basis-resepten for blandinger. [29]

Table 8.1-1 Basis-resepten [29]

Materialer	kg/m ³
Norcem Standard FA	308.0
Elkem Microsilica	20.6
Kalksteinsfiller (VK150)	82.1
Fritt vann	191.9
Årdal 0/8 mm	1002.4
Årdal 8/16 mm	697.4
Årdal 16/22 mm	0.0
Mapei Dynamon Xtend-U100	3.3

Figur 8.1-1 bekrefter den negative påvirkningen av økende fibertilsetning på betongens støpelighet. Det ble observert størst separasjon med økende fiberinnhold sammen med ujevn omkrets i synkutbredelsen. Resultatene viser at blandingen med 10 liter matriks forbedrer betongkonsistensen, men det er fremdeles ikke signifikant forskjell sammenlignet med blandingene uten 10 liter matriks.

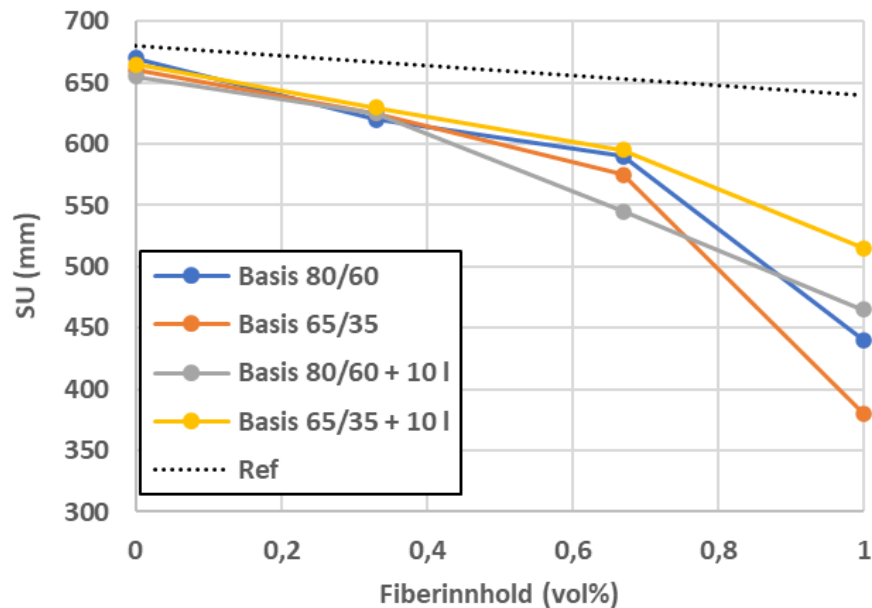
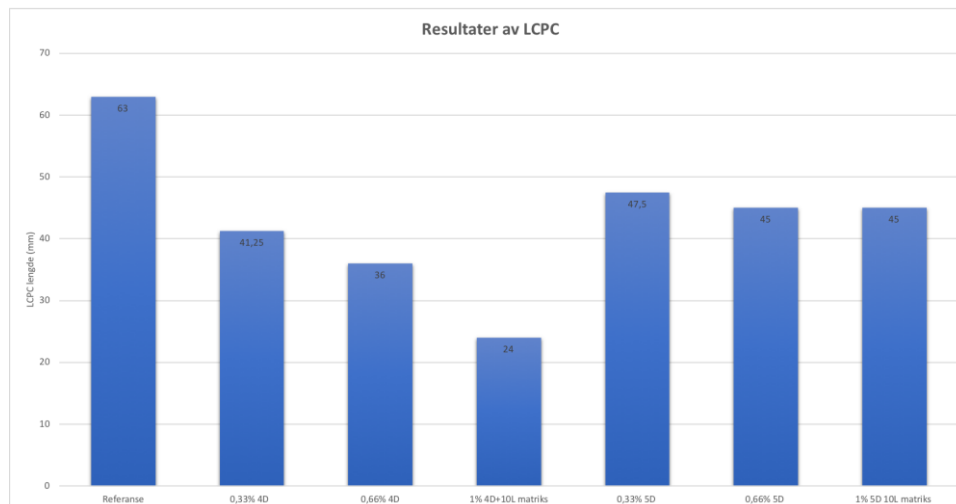


Figure 8.1-1 Resultater av synkutbredelse [29]

8.2 Fersktester

8.2.1 LCPC boks

I delkapittelet sees det på resultater av LCPC lengder utført på referanse betong, stålfiberarmert betong med 5D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 5D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 1% fiber volumfraksjon og 10 liter matriks, stålfiberarmert betong med 4D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 4D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 1% av 4D fiber volumfraksjon og 10 liter matriks, stålfiberarmert rettet betongblanding med 5D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, 1% av 5D fiber volumfraksjon og 10 liter matriks. Det ble til sammen testet 9 ulike blandinger som det kan sees i figur 8.2.1. Testprosedyren beskrives i kapittel 7.4.2 og Vedlegg A i detalj. Noen av blandningene i figur 8.2.1 ble gjenstøpte på grunn av dårlig komprimering, betong blødningen og separasjon, se kapittel 9.1.



Figur 8.2.1 Grafisk resultat av LCPC test

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1 Rådata for resultater av LCPC

Type test	Blandingstyper	LCPC-mål (mm)
LCPC test	Referanse	63.00
	0.33% 4D	41.25
	0.66% 4D	36.00
	1% 4D+10L matriks	24.00
	0.33% 5D	47.50
	0.66% 5D	45.00
	1% 5D+10L matriks	45.00

I figur 8.2.1 vises det resultater av LCPC målinger som illustrerer at stålfiberarmering reduserer LCPC-målet i blandingen. Det sees at alle stålfiberarmerte blandingene gir lavere LCPC-mål enn referansebetongen som gir størst LCPC-mål fra alle blandingene. I alle 5D blandinger gir 0,33% stålfiberarmert betong høyest LCPC-mål sammenlignet med 0,66% og 1% blandingene- hvor 1% 4D blandingen gir lavest LCPC-målet blant alle 5D blandingene. På lik måte, for alle 4D blandingene gir 0,33% stålfiberarmert betong høyest LCPC-mål sammenlignet med 0,66% og 1% blandingene- hvor 1% 4D blandingen gir lavest LCPC-mål blant alle 4D blandingene.

Effekten av fibergeometrien i LCPC-mål er illustrert i tabell 8.2-1. Det observeres at 4D blandingene med samme stålfiber volumfraksjon gir relativt lavere LCPC-mål sammenlignet med alle 5D blandingene med tilsvarende stålfiber innhold. For eksempel ser vi at 1% blandingene for 4D blandingene gir LCPC-målet på 24mm, samtidig gir tilsvarende 1% 5D blandingene 45mm i LCPC-målet. Lignende kan det også observeres for 0,66% blandingene der 0,66% stålfiber 4D blandingene gir lavere LCPC-mål på 36mm sammenlignet med 45mm i 0,66% av 5D stålfiber blandingene.

8.2.2 Rheometer test

Det ble benyttet to metoder til å utføre rheometer testen på. Første metoden kalles Stress Growth Test som måler dreiemomenter i ferske blandingene som funksjon av tid. Testen er tids ubestemt og varigheten av testene er tilfeldige og uavhengige av hverandre. Det er ingen programinnstilling for

denne testen som lar brukeren bestemme tidsvarigheten til testfullførelse. Den andre metoden kalles for Flow Curve Test. Denne testen gir brukeren flere muligheter til å justere og endre innstillingene som tidsvarighet, maksimal slutt og start hastigheten av rotoren og antall punkter for lineær regresjonskurven.

Stress growth test

I dette delkapittelet presenteres det resultater av stress growth testen i betongs ferske tilstand. Testen utføres på referanse betong, stålfiberarmert betong med 5D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 5D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 1% fiber volumfraksjon og 10 liter matriks, stålfiberarmert betong med 4D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 4D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 1% av 4D fiber volumfraksjon og 10 liter matriks, stålfiberarmert rettet betongblanding med 5D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, 0,66% fiber volumfraksjon, 1% fiber volumfraksjon og 10 liter matriks. Noen av blandingene i resultatene er gentestede blandinger på grunn av avvik og dårlig støp.



Figur 8.2.2 Resultater av Rheometer test

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1 Datsett for resultater av rheometer test.

Type test	Blandingstyper	Størst dreiemoment (Nmm)
Stress growth test	Referanse	1127
	0.33% 4D	1499
	0.66% 4D	2466
	1% 4D+10L matriks	3238
	0.33% 5D	1499
	0.66% 5D	2303
	1% 5D 10L matriks	3054

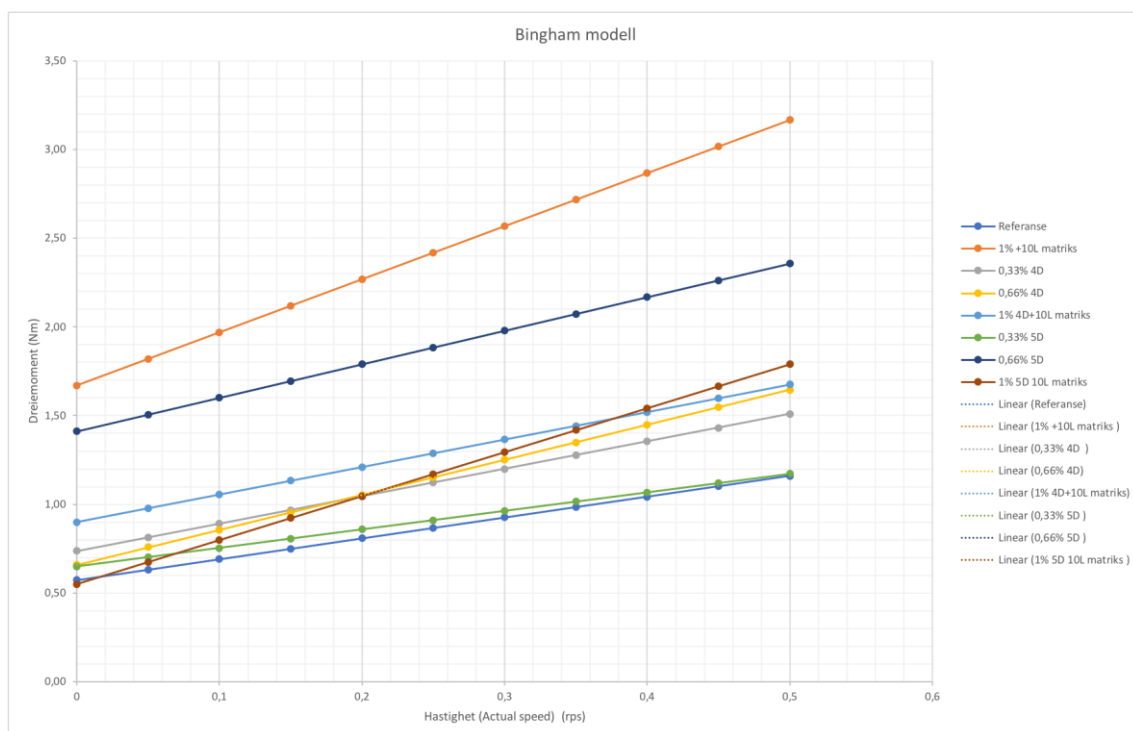
Tabell 8.2-2 viser resultater for rheometer testen. Det kan observeres at største dreiemoment økes ved økning av volumfraksjoner av stålfiber i blandinger. Generelt kan det sees økning i største dreiemoment for alle stålfiberarmert blandinger sammenlignet uarmerte referansebetongen. I 5D

stålfiber blandinger, har 0,33% volumfraksjon det minste dreiemoment sammenlignet 0,66% og 1% volumfraksjoner- hvor 1% blandingen gir størst dreiemoment blant alle 5D blandingerne. 4D fibertype blandinger viser like resultater der 0,33% volumfraksjon av 4D blanding gir det minste dreiemoment sammenlignet 0,66% og 1% volumfraksjoner, samt det noteres størst dreiemoment for 1% blandingen blant alle 4D blandingerne.

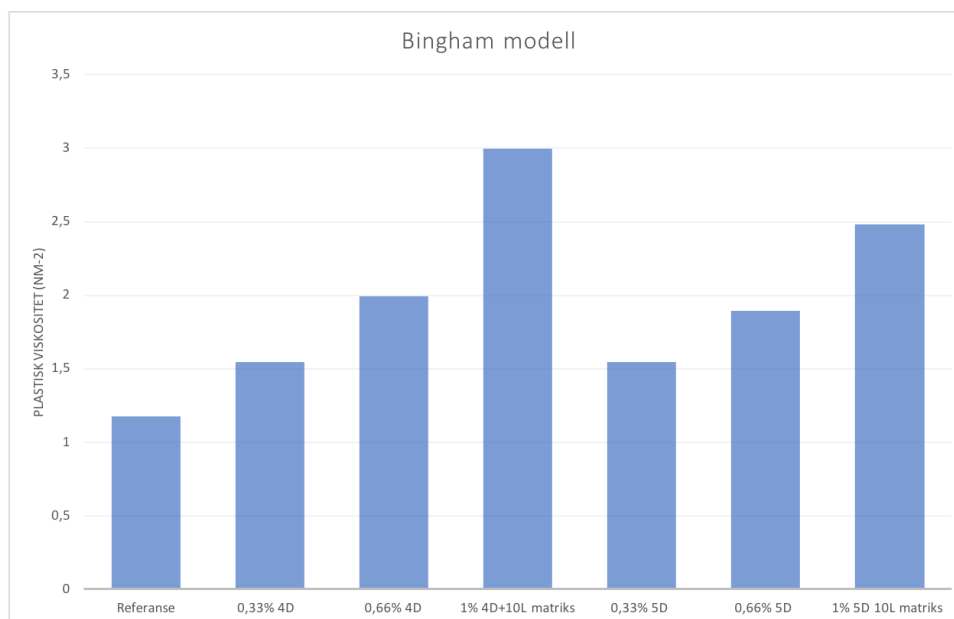
En annen essensiell observasjon gjøres ved sammenligning av dreiemomenter ved ulike fibergeometrier med samme stålfiber volumfraksjon. Resultatene i tabell 8.2-1 viser at økning i fibergeometrien fra 5D til 4D øker også dreiemomentet i rheometeren. Det kan for eksempel sees i 0,33% stålfiber blandingen der dreiemomentet for 5D blandingen er 1499 Nmm og 1910 for 4D blandingen. Det samme kan det observeres for 1% volumfraksjon blandinger der 5D blandingen er 3024 Nmm og 4D blandingen gir dreiemomentet lik 3238 Nmm.

Flow curve test

8.2.3 representerer reologiske resultater for flow curve testen utført på alle blandingsserier. Det illustreres regresjonskurver for hver blandingsserie. Stigningstallet i regresjonskurver representerer plastisk viskositeten i ferske blandinger og skjæringspunktet i y-aksen gir start dreiemoment. Start dreiemomentet er en viktig parameter i bingham modellen som benyttes i flow curve testen som det laveste dreiemomentet som det trengs til å rotere rotoren i rheometer slik at testen igangsettes. Verdier for plastisk viskositet sier mye om konsistensen i blandinger. En lav plastisk viskositet viser at blandingen er relativt mer flytende, men en høy plastisk viskositet viser at blandingen forholdsvis mer seig.



Figur 8.2.3 Flow curve regresjonskurver for alle blandinger



Figur 8.2.4 Viskositets oversikt for blandingsserier

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-2 Plastisk viskositet oversikt

Type test	Blandingstyper	Plastisk viskositet (Stigningstall for regresjonskurver) (Nm-s)
Flow curve test	Referanse	1.174
	1% 5D +10L matriks	1.550
	0.33% 4D	1.546
	0.66% 4D	1.992
	1% 4D+10L matriks	2.995
	0.33% 5D	1.546
	0.66% 5D	1.893
	1% 5D 10L matriks	2.481

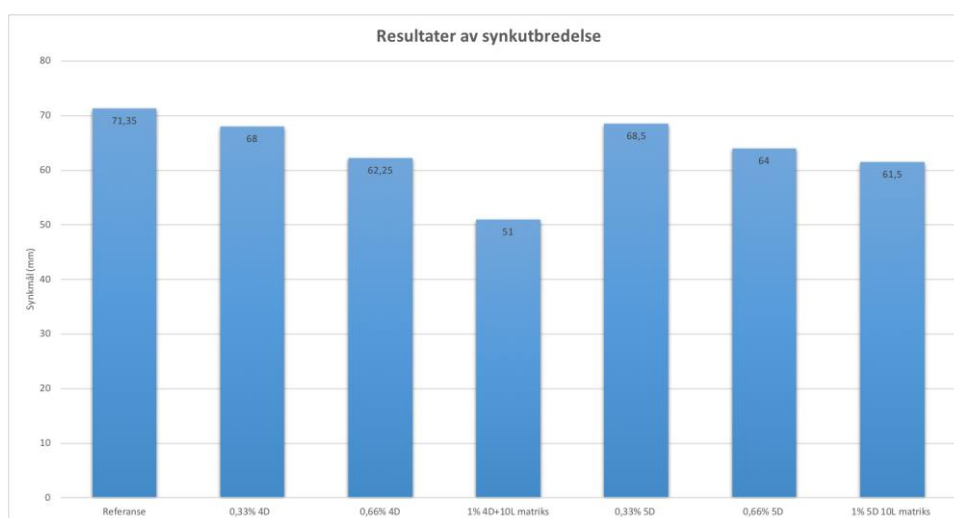
Figur 8.2.4 gir oversikt over plastisk viskositet for alle blandinger. Det kan legges merke til at plastiske viskositeten for alle 4D blandinger er høyere enn referanse blandingen. Samtidig kan det også sees at 0,66% 4D blandinger gir høyere plastisk viskositet enn 0,33% 4D blanding. Likt kan det sies om alle 5D blandinger der 0,66% 5D blanding gir høyere plastisk viskositet enn 0,33% 5D blanding og alle 5D blandinger gir høyere viskositet enn referanse blandingen. 1% stålfiberarmert blandinger for både 4D og 5D fiber gir høyere plastisk viskositet enn 1% referanse blanding med 10 liter matriks. Det bemerkes at 1% 4D blandingen gir unormal høy viskositet sammenlignet med alle andre blandinger, årsaken til denne diskuteres i kap (disk rheo).

Det kan ikke påstås noe om påvirkningen av fibergeometrien på flow curve testen på grunn av liten forskjellen mellom plastisk viskositeter blant 4D og 5D fiber med likt fiberinnhold. Det kan for eksempel sees at 0,33% 4D blandingen gir den samme viskositet som 0,33% 5D blandingen. På lik måte gir 0,66%

4D blandingen i viskositet på 1,992 Nm-s, mens 0,66% 5D blandingen gir 1,893 Nm-s. 1% blandinger gir store variasjoner som kan være forårsaket som avvik som diskuteres i kapittel 9.1.

8.2.3 Synkutbredelse

Dette delkapittelet tar for seg resultater av synkutbredelsen utført på samme tidligere nevnte blandinger. Det ble til sammen testet 9 ulike blandinger som det kan sees i figur 8.2.5. Testen utføres i henhold til NS-EN 12350-2:2019 og testprosedyren beskrives i kapittel 7.4.1 og Vedlegg A i detalj. I figur 8.2.5 kan det sees noen blandinger med betegnelsen "rettet", disse blandningene er gjenstøppte på grunn av dårlig komprimering, betong blødningen og separasjon. Disse resultatene skal derfor ikke brukes i sammenligninger med andre blandinger.



Figur 8.2.5 Resultater av Synkmål

Tabell 8.2 Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1 Rådata for resultater av synkmål

Type test	Blandingstyper	Synkutbredelse (mm)
Synkutbedrelse test	Referanse	71.35
	0.33% 4D	68.25
	0.66% 4D	62.25
	1% 4D+10L matris	51.00
	0.33% 5D	68.50
	0.66% 5D	64.00
	1% 5D + 10L matris	61.50

I tabell 8.2-5 vises det resultater av synkutbedrelsen som illustrerer at stålfiberarmering reduserer synkutbredelse i blandingen. Det sees at alle stålfiberarmerte blandingen gir lavere synkutbredelse enn referanse betongen som gir størst synkutbredelse blant alle blandningene. I alle 4D blandinger gir 0,33% stålfiberarmert betong høyest synkutbredelse sammenlignet med 0,66% og 1% blandingen- hvor 1% 4D blandingen gir lavest synkutbredelse blant alle 4D blandinger. Tilsvarende, for alle 5D blandinger gir også 0,33% stålfiberarmert betong høyest synkutbredelse sammenlignet med 0,66% og 1% blandingen- hvor 1% 5D blandingen gir lavest synkutbredelse blant alle 5D blandinger.

Påvirkning av fibergeometrien i synkutbredelse kan også observeres i tabell 8.2-5. Det viser seg at 4D blandinger med samme stålfiber volumfraksjon gir relativt lavere synkutbredelse sammenlignet med alle 5D blandinger med tilsvarende stålfiber innhold. For eksempel ser vi at 1% blandinger for 4D blandingen gir synkutbredelse på 51mm, samtidig gir tilsvarende 1% 5D blandingen 61,50mm. Lignende kan det også observeres for 0,66% blandingen der 0,66% stålfiber 4D blandingen gir lavere synkutbredelse på 62,25mm sammenlignet med 64mm i 0,66% av 5D stålfiber blandingen.

8.3 Mekaniske tester

8.3.1 Trykkfasthet

I dette delkapittelet gjennomføres det trykkfasthet test på referanse betong, stålfiberarmert betong med 5D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 5D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 1% fiber volumfraksjon og 10 liter matriks, stålfiberarmert betong med 4D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 4D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 1% av 4D fiber volumfraksjon og 10 liter matriks, stålfiberarmert rettet betongblanding med 5D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert rettet betongblanding med 5D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert rettet betongblanding med 5D fiber og 1% fiber volumfraksjon og 10 liter matriks og siste blandingen som er en stålfiberarmert rettet betongblanding med 0,33% fiber volumfraksjon. Det ble testet til sammen 13 x 3 terninger som inkluderer to testsett. Resultater for testsettene er i vedlegg B. Enkelte feilprøvene var ikke fullstendige i formen på grunn av store luftrom, men de ble også tatt med for prøvetesting.



Figur 8.3.1 Grafisk illustrasjon av trykkfasthet resultater

Tabell 8.3-1 Resultater for trykkfasthet resultater

Type fasthet	Blandinger	Symbol	Resultat
		n	3

Trykkfasthet (MPa)	Referanse	Rf	63.2
		σ	14.95
	0.33% 5D	n	3
		Rf	69.1
		σ	1.14
		0.66% 5D	n
	Rf		70.4
		σ	4.65
		1%+10L matriks	n
	Rf		62.9
	σ		7.05
	0.33% 4D	n	3
		Rf	53.6
		σ	1.76
	0.66% 4D	n	3
		Rf	59.7
		σ	1.95
	1% 4D+10L matriks	n	3
		Rf	74.2
		σ	1.00
0.33% 5D (rettet)	n	3	
	Rf	66.8	
	σ	5.25	
0.66% 5D (rettet)	n	3	
	Rf	74.0	
	σ	0.70	
1% 5D (rettet)	n	3	
	Rf	76.0	
	σ	1,08	
0.33% 4D (rettet)	n	3	
	Rf	75.4	
	σ	1.65	

Tabell 8.3.1 viser et økende mønster i trykkfasthet ved økning i volumraksjoner av stålfiber. Det kan sees at for samme fibergeometri, økes det trykkfastheten i 4D stålfiberarmert blanding ved økning i volumfraksjon av stålfiber fra 0,33% til 0,66%. Tilsetning av stålfiber gir generelt høyere trykkfasthet uavhengig av volumfraksjon, sammenlignet med referanse betongen. Det ble også testet 1% av 5D stålfiber volumfraksjon med 10 liter ekstra matriks til å forbedre støpbarheten i blandingen. Volumfraksjon økning til 1% gir størst trykkfastheten sammenlignet med referanse, 0,33% og 0,66% stålfiber mengder av fibergeometri 5D.

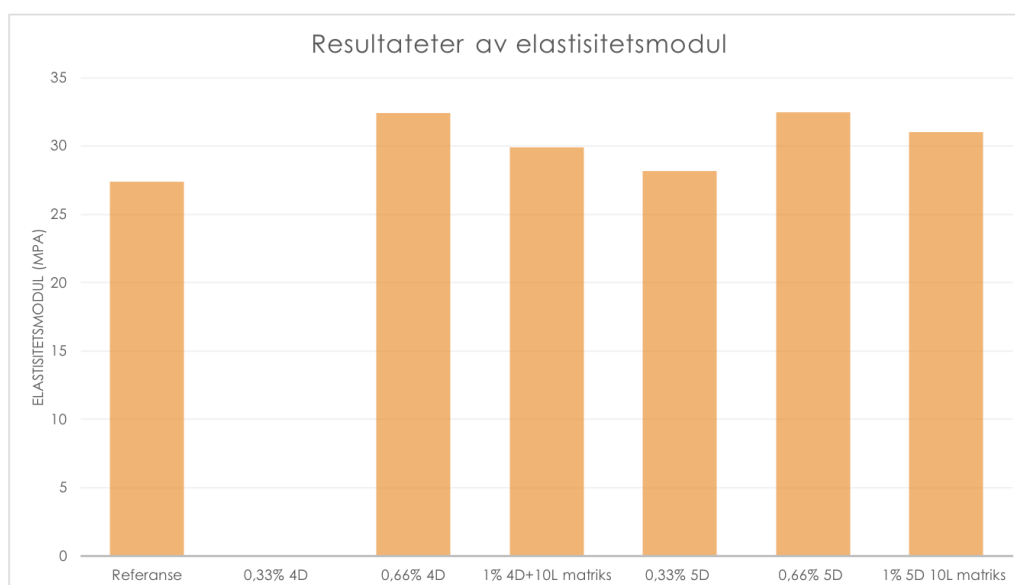
I tabell 8.3-1 observeres det økninger i trykkfastheten ved tilsetning av ulike volumfraksjoner av 4D stålfiber. Det vises at trykkfasthet forbedres ved økning av 4D stålfiber fra 0,33% til 0,66%. På lik måte,

forbedres trykkfastheten alle 4D stålfiberarmert blandinger sammenlignet med uarmert referanseblandingen. I tredje blandingsserien til 4D fiber, ble det testet blanding med 1% 4D stålfiber og 10 liter matriks. Denne blandingen gir størst trykkfasthet blant alle andre betongblandingen med 4D fiber og referansebetongen.

Et annet interessant aspekt i resultatene i figur 8.3.1 og tabell 8.3-1 demonstrerer forskjell mellom fibergeometrier dersom samme volumfraksjoner og ulike fibergeometrier sammenlignes. Det kan observeres fra trykkfasthet resultater at endring fibergeometrier fra 4D til 5D utgjør liten forskjell ved konstant stålfiber volumfraksjon. Det kan for eksempel utpekes trykkfastheten til 1% stålfiber volumfraksjoner til 4D og 5D fibergeometrier. 4D blanding gir en gjennomsnittlig trykkfasthet på 74,2 MPa og tilsvarende gir 5D blandingen en trykkfasthet på 76,0 MPa. På lik måte, er det liten endring i trykkfastheter i 0,33% stålfiber blandinger med 4D og 5D fibergeometrier, forskjellen ligger på 8,6 MPa.

8.3.2 Resultat av elastisitetsmodul

I dette delkapittelet gjennomføres det elastisitetsmodul test på referanse betong, stålfiberarmert betong med 5D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 5D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 1% fiber volumfraksjon og 10 liter matriks, stålfiberarmert betong med 4D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 4D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert betong med 1% av 4D fiber volumfraksjon og 10 liter matriks, stålfiberarmert rettet betongblanding med 5D fiber og 0,33% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert rettet betongblanding med 5D fiber og 0,66% fiber volumfraksjon, stålfiberarmert rettet betongblanding med 5D fiber og 1% fiber volumfraksjon og 10 liter matriks og siste blandingen som er en stålfiberarmert rettet betongblanding med 0,33% fiber volumfraksjon. Det ble testet til sammen 8 x 1 terninger som inkluderer to testsett. Resultater av elastisitetsmodul for testsett ekskluderes fra originale sett som illustreres i figur 8.3.2, se Vedlegg B for detaljer elastisitetsmodul resultater for alle sylindere. En blanding med 0,33% av 4D stålfiber ble ikke registrert av sensorer under elastisitetsmodul testing. Grafiske søylen for denne blandingen vises derfor ikke i figur 8.3.2.



Figur 8.3.2 Grafisk illustrasjon av elastisitetsmodul resultater

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1 Elastisitetmodul resultater for alle blandingsserier

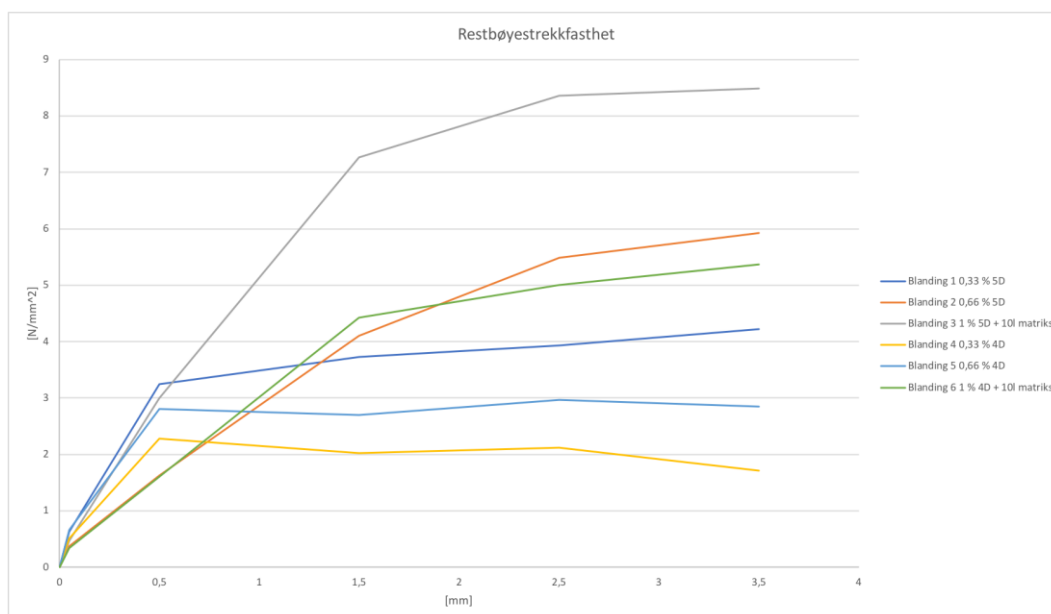
Test type	Blandinger	Initial elastisitetmodul resultat
Elastisitetmodul	Referanse	27.391
	0.33% 5D	-
	0.66% 4D	32.414
	1% 4D+10L matriks	29.922
	0.33% 5D	28.192
	0.66% 5D	32.454
	1% 5D+10L matrik	30.989

Tabell 8.3-1 viser at elastisitetmodulen økes ved fibertilsetning i sylindere uavhengig av fibergeometrien. Resultater viser at alle stålfiberarmert betongblandinger gir høyere elastisitetmodul sammenlignet med referanse sylindere. Innvirkning av høyere 5D stålfibermengde fra 0,33% til 0,66% og 1% gir økning i elastisitetmodulen sammenlignet med referanse sylindere. Like resultater ble det også observert for 4D stålfiberarmert sylindere. Elastisitetmodulen forbedres i sylindere med høyere 4D stålfiber mengder.

Fibergeometrien viser seg til å ikke ha stor påvirkning på elastisitetmodul resultater i noen sylindere, likt som for trykkfasthet resultater. Sylindere med samme fibermengde og ulike fibergeometrier gir omtrent like elastisitetmoduler som for eksempel for sylindere med 0,66% volumfraksjon av 4D og 5D fibergeometrien med 32414 MPa og 32,454 MPa, respektivt. I motsetning til det viser 1% volumfraksjon av 4D og 5D fibergeometrier viser litt større forskjell med elastisitetmodul på 29,922 MPa og 30,989 MPa, henholdsvis.

8.3.3 Resultat av restbøystrekkfasthet

Resultatene av restbøystrekkfastheten beskrives i dette delkapitlet. Det ble testet totalt 59 bjelker, hvorvidt 36 av dem var del av det originale settet. Bjelkene som ikke utgjorde originale settet, var feilprøver. Det ble valgt å ekskludere testene av feilprøvene fra originale blandingsserier vist i figur 8.3.3. Blandingsserier består av sammen blandingstyper som det ble presentert i tidligere resultater i dette kapitlet. Det blir ikke test en referanse bjelke for denne testen, ettersom referanse blandingen er uarmert og rest bøystrekkfastheten for uarmert blanding vil være irrelevant å teste i denne sammenhengen for å sammenligne med fiberarmerte blandinger.



Figur 8.3.3 Rest bøystrekkfasthet resultater for alle blandingsserier.

Tabell Feil! Det er ingen tekst med den angitte stilen i dokumentet.-1 Oversikt for gjennomsnittlig rest bøystrekkfasthet for alle blandingsserier

	Gjennomsnittlig rest bøystrekkfasthet MPa				
	F_ct,L	F_R1	F_R2	F_R3	F_R4
0.33% 4D	0.507	2.286	2.204	2.117	1.717
0.66% 4D	0.661	2.807	2.697	2.964	2.849
1% 4D	0.343	1.602	4.429	5.000	5.370
0.33% 5D	0.630	3.243	3.731	3.933	4.224
0.66% 5D	0.368	1.629	4.108	5.485	5.926
1% 5D	0.464	2.998	7.264	8.350	8.492

Figur 8.3.3 viser resultater for rest bøystrekk for alle blandingsserier. Det observeres at blandingen med 0,33% stålfiberarmert 4D blanding gir lavest rest bøystrekkfasthet blant alle 4D blandinger. 0,66% av 4D blandingen gir nest størst rest bøystrekkfasthet og 1% 4D stålfiberarmerte blandingen gir høyest rest bøystrekkfasthet sammenlignet med alle 4D blandinger. For alle 5D blandinger sees det at 0,33% stålfiberarmert 5D blanding gir lavest rest bøystrekkfasthet blant alle D blandinger. 0,66% av 5D blandingen gir nest størst rest bøystrekkfasthet og 1% 5D stålfiberarmerte blandingen gir høyest rest bøystrekkfasthet sammenlignet med alle 5D blandinger.

Det gis også indikasjon på påvirkning av fibergeometrien i resultatene av rest bøystrekkfasthet. Det vises at 5D fiberblandinger gir høyere rest bøystrekkfasthet sammenlignet med 4D fiberblandinger for samme fiber volumfraksjon. Det kan for eksempel observeres fra figur 8.3.3 at for 0,66% stålfiberarmert blandinger, ligger kurver for 5D høyere i figur 8.3.3 og viser derfor større rest bøystrekkfasthet sammenlignet med 4D 0,66% stålfiber blandingen. Det kan sies det samme for 0,33% blandinger der kurven for 4D blandingen ligger enn 5D blandingen som representerer lavere rest bøystrekkfastheten. Årsaken til dette fenomenet diskuteres i kapittel 9.1. Standardavvik for gjennomsnittlige rest bøystrekkfasthet resultatet er nevnt i laboratoriet rapportert for enkelte blandingsserier i vedlegg B.

9 Diskusjon

9.1 Diskusjon av metoder

Alle fasthetstester og prosedyrer til å avgjøre mekaniske egenskaper er utført i henhold til metoder fra standarder NS-EN 14651:2012, NS-EN 196-1:2016, NS-EN 12390-13, S-EN 12350-2:2019 NB38 og COIN rapporten. Fremgangsmåter for disse testprosedyrer er forklart i detalj i kapittel 7. Hensikten med utførelse av fasthetstester er å undersøkes forbedringspotensial i betongfasthet ved tilsetning av ulike volumfraksjoner av stålfiber. I tillegg vil disse testmetodene også gi indikasjon på innvirkningen som ulike fiber geometrier har i betongfasthet og fersk betong egenskaper. Stålfiber i betong er et sementerstattende stoff som bidrar til mindre CO₂ utslipper på grunn av sementreduksjon og gjør dagens betong forholdsvis mer bærekraftig. Betongresepten som benyttes til å støpe betongen brukes fra Fibercon prosjektarbeid. I resepten benyttes det v/c forhold på 0,62. Det ble likevel gjort noen endringer i opprinnelige resepten for å tilpasse denne oppgavens behov og justeringer i laboratoriet arbeid. Det ble sett på relevant litteraturstudier i denne oppgaven for å ha et sammenligningsgrunnlag av resultatene i denne oppgaven med resultatene i litteraturstudier. Betongresepter i litteraturstudier er ikke helt like som i denne oppgaven. Ulempen med det er at resultatene fra denne rapporten kan ikke direkte sammenlignes med litteraturstudiene, men det gir fremdeles en god indikasjon på påvirkninger som stålfiber har i betongens mekaniske og fersk-tilstand egenskaper.

Det kan også påpekes at resultatene fra denne oppgaven er vanskelig å verken bekrefte eller benekte fordi repetisjoner av testforsøk er et nøkkelelement som bestemmer autentisiteten i oppgaven. Flere repetisjoner av testforsøkene ville derfor forminsknet systematisk og tilfeldige feilkilder.

Til bestemmelsen av stålfiber volumfraksjon ble det benyttet Fibercon prosjektarbeid rapporten som bruker 0,33%, 0,66% og 1% stålfiber. Årsaken til valg av disse stålfiber volumfraksjoner i Fibercon rapporten kan sannsynligvis være fordi høye stålfiber innhold i betong enn det optimale, kan begynne å redusere betongfastheten. I litteraturstudier kan det også sees at det benyttes ofte stålfiber innhold mellom 1%-1,5% for å kunne oppnå optimale resultater i betongfasthet.

Fiberfordeling ved betongblandingen er en essensiell parameter som påvirker betong oppførsel og mekaniske egenskaper. Fiberne ble tilfeldig fordelt i blandingsprosessen som gjorde at det ikke kunne kontrolleres lik fibermengde i hver terning, bjelke og sylinder. Dette resulterer i avvik i testresultater for hver blanding i samme serie og påvirker blandingsfastheten. Det anbefales derfor gjøre noen forhåndstiltak for å unngå dette. For eksempel kan det telles antall fibre eller lage proporsjonering per enkelte blandinger omgangen. Denne prosessen er tidskrevende og trenger relativt mer kontroll, men likevel er det et godt tiltak som en mer korrekt vitenskapelig metode. I tillegg vises det også visuell dokumentasjon av fiberretning og fordeling i alle prismen, som gir en indikasjon på forholdet mellom kraft og fiberfordeling i tverrsnittet.

Herdningstid er et viktig element som har effekt på stålfiberarmert betongs mekaniske egenskaper. Det var vanskelig å kontrollere herdetid med konstant riktig temperatur under herdingsprosessen på grunn

av temperaturvariasjoner fra omgivelsen. I tillegg ble ikke alle blandinger testet ut samme dag på grunn av mange blandinger og begrenset testkapasitet til å teste alle blandinger med lite tidsrom mellom hverandre. Dette gjorde at noen prøver ble herdet lengre enn 28 dager. Det skaper avvik og variasjoner i blandingenes mekaniske egenskaper og forårsaker også større standardavvik. Temperaturvariasjoner er enda en faktor som påvirker mekaniske egenskaper i betong, som det forklares i teori kapittel 3.3 at lavere temperatur leder til lav styrkeutvikling i betong. Disse kan derfor regnes med som systematiske avvik i vår oppgave.

Synkutbredelse brukes til å måle konsistens i betong som forteller noe om støpbarheten. Fibere reduserer støpbarheten i fersk betong og det er derfor essensielt å bestemme riktig fibermengde og fibertype i betong. Synkutbredelse i denne rapporten ble benyttet som en av testene i fersk betong tilstand til å måle betongkonsistensen og støpbarheten. Testen ble utført i henhold til NS-EN 12350-2:2019, og testprosedyren er forklart i detalj i kapittel 7.4.1. Prøveblandinger i begynnelsen var ubrukbare for synkutbredelse på grunn av stor separasjon og ble nesten som en "suppe" betong. Det ble derfor laget flere blandinger i forkant av synkutbredelse med ulike SP stoff prosentandel til å finne optimale sp% innholdet for en "brukbar" stabil betong. Det ble utført en iterasjoner med ulike sp stoff % med 20%, 50%, 70% og 80%. Det viste seg at sp 80% ga gode resultater med hensyn på betongkvaliteten og samtidig unngå betongseparasjon. Figur 9.1.1 viser et eksempel av en slik feilblanding.



Figur 9.1.1 Feilblanding med betongseparasjon og høyt vanninnhold

LCPC boks metode er enda en metode som benyttes for å måle betongkonsistens. Denne metoden er særlig mer egnet for fiberarmerte betong. Alle 8 serieblandinger ble testet i LCPC boks. Denne testen ble utført i henhold til NB38 og COIN rapporten, se kapittel 7.4.2 for flere detaljer om testprosedyren. LCPC bruker en gradient helningskonsept for å bestemme støpbarheten og konsistensen i betong. Som tidligere nevnt, var det støpt noen feilblandinger i som ikke ga fornuftige resultater i LCPC boks, se figur 9.1.2 for eksempel. Det oppsto andre avvik i betonghelnings prosessen. Det er anbefale å hele betong fra enden og la betong flyte langs LCPC boks i lengderetninger. I noen blandinger ble betong

helt utover LCPC boksen og rente ned på gulvet. Dette resulterer i ulike konsistensmålinger i blandinger i samme blandingsserie og leder til høyere standardavvik. Underlaget til LCPC boksen må være ren før neste testen utføres. Noen avvik kan forekomme i dette tilfellet også dersom underlaget er ikke fullstendig rengjort.



Figur 9.1.2 LCPC test av en feilblanding med tydelig separasjon

Den tredje metoden som benyttes til konsistensmåling er rheometer testen. Det benyttes rheometer av type ICAR pluss til å gjennomføre reologiske tester for alle blandinger. Det ble testet alle serieblandinger i rheometeren til å kunne sammenligne konsistensmålinger med LCPC resultater og synkutbredelse som det gjøres i kapittel 9.2.1. Det ble i utgangspunktet brukt to metoder til å måle reologiske egenskaper i blandingene; stress growth test og flow curve test. Testprosedyrene ble det brukt i henhold til brukshenvisningen til ICAR pluss. Mulige avvikskilder med rheometer testen er overflatefuktighet som bidrar til med unøyaktige målinger. I våre tester har det sørget for at overflaten er ikke fuktig, men likevel kan omgivelsesfuktighet påvirke overflatefuktigheten. Posisjonering av rheometer beholder og rheometer rotoren kan også være en avvikskilde. Det er viktig at posisjonen til beholderen er sentrisk med rotoren. Til rheometer testing av alle blandinger har blitt forsøkt å plassere beholderen sentrisk, men likevel ble det gjort med øyemål som ikke er teoretisk nøyaktig. Dette fører til menneskelige/tilfeldige feilkilder i rheometer resultatene i denne oppgaven. Dette avviket kan i fremtidige studier elimineres ved bruk av en stor passer til posisjonering av rheometer beholderen. Andre inkonsistenser i testresultatene kan resulteres av ujevn fiberfordeling, fibersamling og dårlig komprimering som kan gi store variasjoner i rheometer resultatene.

I sammenligningen av begge rheometer test analyser for stress growth og flow curve testen, ble det lagt merke til at resultatdataen fra flow curve testen har større reliabilitet på grunn av testparametere som start dreiemoment og plastisk viskositet som gir bedre forståelse av ferske blandingens konsistens i form av en regresjonskurve. Stigningen av disse regresjonskurver for hver blandingsserie representeres ved plastisk viskositet, og det betyr at blandinger med lav stigningstall gir høy flytbarhet og i motsetning gir blandingenes regresjonskurver med høye stigningstall viser forholdsvis høyere

seighet viskositet. Det lar seg også justere testvarigheten som legger til grunn likt sammenlikningsgrunnlag for alle blandingstester. Stress growth test gir kun høyeste (peak) dreiemoment for hver blandingstest. Dette gir liten indikasjon på konsistensen og flytbarheten til blandingen som en helhet. I tillegg lar ikke programvaren seg å stille inn testvarigheten som leder til ulike sammenlikningsgrunnlag blant alle blandingene.

Det ble testet 33 terninger for trykkfasthet inkludert rettede blandinger på grunn av store avvik. Det ble i tillegg også testet noen testprøver som ekskluderes fra resultatene. For hver terningsserie ble det støpt og testet 3 terninger. Disse terningen ble trykktestet i henhold til NS-EN196-1:2016, test fremgangsmåten er beskrevet i kapittel 7.2. En av svakhetene i trykkresultater er mangel på kvantitative forsøk som har innvirkning på validiteten at trykkfasthet resultater. I henhold til standard NS-EN 14651 :2005 er det anbefalt å bruke 6 terninger per terningsserie til trykkfasthet testen. Dette forårsakes av totalt antall blandinger, tidsbegrensningen og oppgavens omfang at det ble valgt å teste 3 terninger isteden. Trykktesting av 6 terninger ville gitt mindre avvik og dermed beste forståelsen av trykkegenskapene til fiberarmert terningen. Et annet avvik som kan også påpekes er ujevne overflate på noen av terninger, dette leder til ujevn trykklast fordeling over terningsoverflaten og dermed føre til avvik i trykkfasthet resultater, se figur 9.1.3. I tillegg hadde noen terninger ujevne former og store luftporer som danner "hull" i blandinger. Det er forårsaket av dårlig betongkomprimering og betonglanding i fersk tilstand. Disse lufthullene bidrar til reduksjon av trykkfastheten i enkelt terninger.



Figur 9.1.3 Ujevn overflate i en av terningene

Det ble støpt en sylinder av hver blanding for å teste elastisitetsmodulen. Det ble til sammen testet 8 sylindere, en fra hver blanding og noen test sylindere. Elastisitetsmodulen testes i henhold til NS-EN 12390-13 og testprosessen er beskrevet i detalj i kapittel 7.1. Noen av sylindere var "hullete" på grunn av store luftporer på grunn av dårlig blanding og komprimering. Dette resulterer i unøyaktige og lave

verdier i elastisitetsmodul for enkelte blandinger. I tillegg var det noen blandinger som ikke ble registrert av sensoren og det ble dermed ikke registrert noe resultat av elastisitetsmodul for disse sylindrerne.

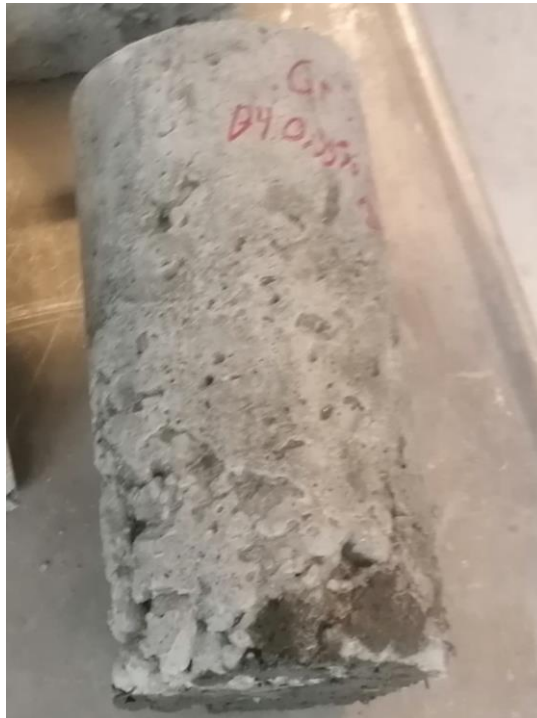


Figure 9.1-1 Eksempel av sylinder med hull

Rest bøyestrekfastheten testen ble utført i henhold til NS-EN 14651-2007 på 6 bjelker i hver blandingsserie. Fremgangsmåte for testprosedyren er beskrevet detaljert i kapittel 7.3. Det ble gjenstøpte ekstra bjelkeblandinger for målinger av rest bøyestrekfasthet. Dette gjøres for å sørge for lavt standard avvik og større validitet i resultatene for rest bøyefasthet. Likevel er det observert varierende standardavvik i testresultatene der noen blandingsresultater gir relativt høyt standardavvik. Noen av avvikene som det kan påpeke under testingsprosessen er ruller i bøyestrek testmaskin som var bevegelig og ikke var fastsatt. Det kan medføre avvik i posisjonering og plassering av bjelken på maskinen. Det ble markert plasseringspunktet, men posisjoneringen ble gjort med øyemål som igjen er en avvikskilde. En annen mulig årsak til feilkilde og avvik kan være forårsaket av ujevn fiberfordeling i blandingsprosessen. Under blandingsprosessen ble observert at det var større fiberkontrasjon i midten av blandingen. Fiberretning kan også lede til avvik, ettersom det er vanskelig å kontrollere at fiberne er parallelle med lengde retningen til bjelken for å få maksimal effekt i rest bøyestrekfastheten til bjelkene. Som det også ble tidligere diskutert i dette kapitlet, kunne fibertelling for hver blanding gi jevnere fiberfordeling i blandinger og dermed mindre avvik.

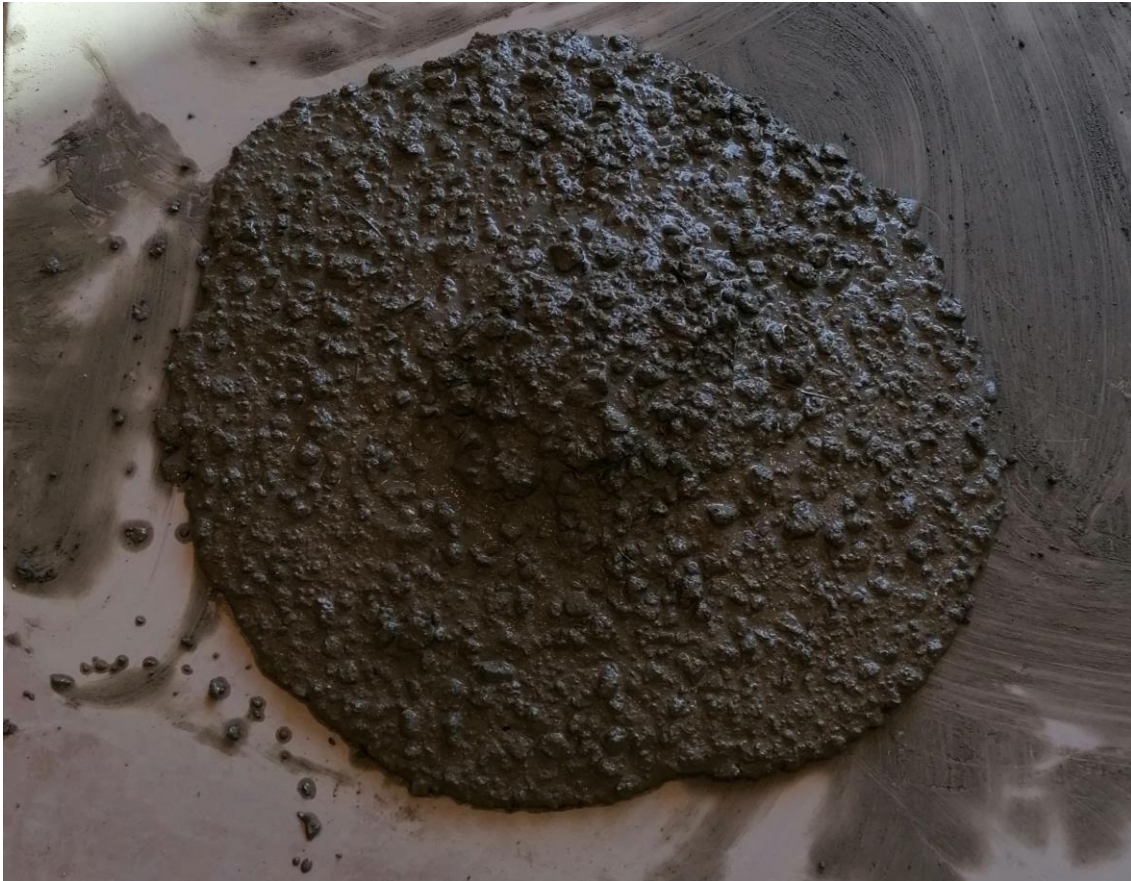


Figure 9.1-2 Eksempel på fibersamlingen i synkutbredelse

9.2 Diskusjon av resultater

9.2.1 Diskusjon av tester i fersk tilstand

Synkutbredelse er den første testen som ble benyttet til å måles konsistensen i uarmert betong og fiberarmert betong med ulike stålfiber volumfraksjoner. Resultatene for synkutbredelse viser klar indikasjon på reduksjon i betongkonsistensen ved økning i fiberinnhold. Synkutbredelseet reduserte med 4,7% og 12,7% for 0,33% og 0,66% av 4D stålfiberarmerte blandinger sammenlignet med referansebetongen. Det ble også observert reduksjon i synkutbredelse for 0,33% og 0,66% av 5D stålfiber betong med 4% og 10,3%, sammenlignet med uarmerte referansebetongen. I blandeprosessen av fiberarmert blandinger med 1% stålfiber, ble det opplevd vanskeligheter med støping og betongkvaliteten. Blandingene var for tørre sammenlignet med 0,33% og 0,66% stålfiber blandinger. Det ble improvisert med tilsetning av 10 liter matriks i 1% stålfiber blandinger til å forbedre konsistensen. 1% 4D stålfiber betong og 1% 5D stålfiber betong ga reduksjonen i synkutbredelse med 28,5% og 13,8% sammenlignet med referanse betong. [41] [42] [29] i sine studier bekrefter sammenhengen mellom reduksjonen i synkutbredelse med økning i stålfiber innhold.

En annen viktig sammenheng resultatene for synkutbredelse viser, er forskjellen og innvirkningen som fibergeometri har på betong konsistens i fersk tilstand. Det ble funnet i resultatene at 4D fibre redusere konsistens mer enn 5D betong. Ved sammenligning av 4D og 5D blandinger med samme stålfiber innhold på 0,33%, kan det sees at 4D 0,33% gir 2,8% lavere synkutbredelse sammenlignet med 5D 0,33% blandingen. Tilsvarende for 1% blandinger av 4D og 5D fibertyper, gir 5D blandingen 20,6% lavere synkutbredelse sammenlignet med 1% 4D blandingen. I studien [42] bekreftes sammenhengen mellom reduksjonen i synkutbredelse med lavere dimensjon av stålfibertype.

I LCPC testresultater kan det legges merke til forholdet mellom økning i fiber volumfraksjoner og LCPC-mål lengde. Resultatene viser at blandinger med mindre stålfiber innhold gir høyere LCPC spredningslengde fordi betongen har høyere konsistens og flytbarhet som leder til bedre og lengre betongflyt i LCPC-boksen. LCPC spredningslengden reduserte med 34,5% og 42,8% for 0,33% og 0,66% av 4D stålfiberarmerte blandinger sammenlignet med referansebetongen. Reduksjon i spredningslengde for 0,33% og 0,66% av 5D stålfiber tilsvarer 24,6% og 28,5%, sammenlignet med uarmerte referansebetongen. 1% 4D stålfiber betong og 1% 5D stålfiber betong ga reduksjonen i LCPC spredning med 61,9% og 28,5% sammenlignet med referanse betong. Ulike fibergeometrier viser også påvirkning i spredningslengden i resultatene for LCPC testen. Det observeres i resultatene at 4D fibre gir lavere konsistens enn 5D fiberbetong. Ved sammenligning av 4D og 5D blandinger med samme stålfiber innhold på 0,33%, kan det sees at 5D 0,33% gir 15,2% lengre LCPC spredning sammenlignet med 4D 0,33% blandingen. Tilsvarende for 1% blandinger av 4D og 5D fibertyper, gir 5D blandingen 87,5% lengre spredningslengde sammenlignet med 1% 4D blandingen. Årsaken til at 5D gir bedre konsistens enn 4D fibertype kan være på grunn av flere 4D fibre i blandinger per volumenhet som leder til større kohesive krefter mellom fiberne og blandingen.

Studier [38] viser at økning i fibermengde fra 1,0% til 1,5% økte skjærstress og viskositeten som resulterte i forminskningen i dreiemoment. Det indikeres fra resultatene i studien at økt fibermengde reduserer konsistensen som vises av dreiemomentet i rheometer testen som reduseres. Resultatene fra stress growth testen i denne masteroppgaven gir lignende indikasjoner. Økningen i fiber innhold viser seg til å øke peak dreiemomentet, det kan sees at dreiemomentet økte med 33% og 92% ved økning av 4D stålfibertype mengde fra 0,33% til 0,66% sammenlignet med referanse betongen. For 5D fiberarmert blandinger økte igjen dreiemomentet for 0,33% fiberinnhold med 69,5% og 104,3 for 0,66% blandingen, sammenlignet med referanse betongen. Blanding med 1% fiber volumfraksjon gir høyeste dreiemoment med 187,3% for 1% 4D blandingen og 170,9% for 1% 5D blandingen, sammenlignet med referanse betong. Fibergeometrien viser også ulike reologiske egenskaper i resultater. Det kan sees at 4D fibre gir relativt høyere dreiemoment i rheometer testen og mindre konsistens enn 5D fibre. For eksempel kan vises resultatene at for 0,33% fiberinnhold gir 5D stålfiberarmert blandingen gir 13,2% lavere dreiemoment sammenlignet med 4D fibertypen med 0,33% fiberinnhold. På lik måte, gir 0,66% fiberinnhold gir 5D stålfiberarmert blandingen gir 6,9% lavere dreiemoment sammenlignet med 4D fibertypen med 0,66% fiberinnhold.

Den andre metoden som ble benyttet til å undersøke reologiske egenskaper i blandningene var Bingham modellens flow curve testen. I stedet for å måle peak dreiemoment som det gjøres i stress growth

test, måles det reologiske egenskaper med plastisk viskositet i flow curve testen. Resultater for flow curve test figur 8.2.4 viser at referansebetongen den laveste plastisk viskositet målingen på 1,174 Nm-s som det forventes på grunn av 0% stålfiber. Fiberarmert blandingen med 0,33% av 4D fiber gir 31,7% høyere plastisk viskositet, og 0,66% fiberarmert blandingen med 4D fiber gir 69,7 høyere plastisk viskositet sammenlignet med uarmerte referanse blandingen. 5D blandinger viser lignende resultater som 4D blandingene. 0,33% av 5D gir 31,7% høyere plastisk viskositet, og 0,66% viser 61,2% økning i plastisk viskositet sammenlignet med referanse betongen. 1% av 5D blanding gir 111,3% høyere plastisk viskositet sammenlignet med referanse blandingen, mens 1% 4D blanding gir ganske høy plastisk viskositet som er ca 21% høyere enn 1% 5D blandingen. Det kan være forårsaket av ujevn 4D fiberfordeling som dannet fiberklumper i blandingen som resulterer i høye viskositeten. Et annet interessant fenomenet bemerkes mellom 1% blandingen med 10 liter blandingen og 0,33% av 4D blandingen. Det observeres at 1% stålfiber blandinger gir relativt ganske høye plastisk viskositetsverdier sammenlignet med 0,33% og 0,66% uavhengig av fibertypen. Det kan være en konsekvens av ekstra 10 liter matriks som tilsettes i alle 1% stålfiber blandinger som leder til ekstra tilslag og tilsetningsstoffer som øker plastiske viskositeten.

En svakhet ved bruk av synkutbredelse test til å bestemme betongkonsistens kommer ved unøyaktigheten forårsaket av samlede fiber i midten av blanding når kjeglen løftes. Det er vanskelig å si noe om validiteten til fiberarmert betong konsistens, spesielt når fibre samles i midten ved synkutbredelsen. Fibere spres ikke rundt jevnt med resten av blandingen som gjør at ytterste delen av blandingen har lavere fiber konsentrasjonen, mens fiberkontrasjon i midten er relativt ganske høy. LCPC boksen er bedre egnet for stålfiberarmert blandinger fordi fibre spres relativt mer jevnt langs spredningslengden i LCPC-boksen, se figur 9.2.1. Det ble ikke observert fibersamling ved LCPC tester. Rheometer testresultatene vil være forholdsvis mest nøyaktige fordi blandingen står rolig i beholderen med jevnere fiberfordeling før testen igangsettes. Det er mindre rom for avvik ved rheometer testen på grunn av begge konsistensmålings metoder i rheometer, stress growth test og flow curve test. En direkte sammenlikning mellom resultater for synkutbredelse, LCPC og rheometerer er ikke mulig på grunn av ulike måleenheter for disse testmetodene. Det kan fremdeles påstås at rheometer testen vil kunne gi nøyaktigere resultater for betongkonsistensen fordi denne metoden er den mest avanserte og kompetansekrevene sammenlignet med synkutbredelse og LCPC. Det fører også til begrenset bruksområde av rheometer test fordi denne testen krever en viss kompetanse og mye utstyr til å utføre. Det kan være derfor være problematisk å utføre rheometer testen på byggeplasser, spesielt dersom arbeiderne ikke har tilstrekkelige kompetansen. Det kan også lede til ekstra kostnader for byggevirkosomheter dersom de bestemmer rheometer test til konsistensmåling på grunn av dyrt utstyr, og ekstra kostnader i forbindelse med opplæring av arbeiderne til å kunne utføre testen på byggeplassen. I motsetning til det, trenger ikke LCPC og synkutbredelse spesiell kompetanse til å utføre disse testene på byggeplassen, samt utstyret for disse testene er lett transporterbare og enklere å bruke for arbeiderne.



Figure 9.2-1 Eksempel av LCPC test

9.3 Diskusjon av i mekaniske tester

9.3.1 Trykkfasthet

I sin studie [39] tester trykkfastheten til betong terninger med ulike fiberlengder og forskjellige fiber volumfraksjoner. Påvirkningen av fiberlengder i den studien vil være irrelevant for denne masteroppgaven, men det vil fremdeles gi en indikasjon på effekten av ulike stålfiber innhold i samme fiberlengde blandinger. Resultater viser en god sammenheng med økning av stålfiber volumfraksjon og trykkfastheten i terningene. Det ble observert en økning i trykkfastheten ved økning av stålfiber til en viss fibermengde. Det legges merke til at etter 1,5% fiberinnhold blir ikke økningen i trykkfastheten like stor som den er ved 1% fiberinnhold. I vår masteroppgave blir det ikke testet blandinger med stålfiber volumfraksjoner over 1% fordi oppgaven forsøkte i utgangspunkt å replisere resepten fra Fibercon som tester den optimale stålfiberarmert blandingen som gir høyest trykkfasthet. Det ville likevel vært interessant å undersøke større fiber volumfraksjoner til å studere årsaker til trykkfasthet reduksjonen ved høye fiberinnhold.

Resultatene i kapittel 8.3.1 er i samsvar med litteraturstudien og viser økningen i trykkfastheten ved økning i stålfiber volumfraksjon i terningene. Resultatene viser at økningen i trykkfastheten tilsvarte 11% for 0,33% stålfiber innhold i 4D terningen, og 18,7% økning for 0,66% stålfiber 5D terningene, sammenlignet med referanse betong. Denne sammenhengen mellom forbedring av trykkfastheten ved økning av fiber volumfraksjon fra 0,33% til 0,66% 4D terningene kan anses til å være valid på grunn av like stor spredning av standardavviket som det kan sees i figur 8.3.1. Det observeres høye standardavvik for 0,66% 4D terninger og 1% 4D terninger. Forankringsevnen og trykkfasthetsresultater i disse terningene kan dermed sees som mindre valide sammenlignet med andre blandingsserier resultater som gir relativt lavt standardavvik. Ternings resultater for 5D blandinger viste lik trend som for 4D ternings resultater for trykkfasthet. 0,33% av 5D terningen gir i gjennomsnitt 5,2% økt trykkfasthet, 0,66% av 5D terninger gir i gjennomsnitt 16,6% høyere trykkfasthet sammenlignet med referanse betong. 1% av 5D terningen gir høyest trykkfasthet blant alle 5D terningers trykkfasthet resultater med 2,62% høyere trykkfasthet enn 0,66% stålfiber av 5D terningene. Reliabilitet av gjennomsnittlige trykkfastheten til 1% 5D fiberarmerte terninger kan sees lavt på grunn av relativt

høyere standard avvik. Det er mange grunner som kan forårsake store variasjoner av trykkfastheten blant samme serieterninger. Ujevn fordeling av fibre i blandingen kan en av årsakene som kan lede til fibersamlingen i enkelte terningene som viser stor variasjon sammenlignet med andre terningene av samme serie. Fibersamlingen kan gi være forårsaket av dårlig komprimering og betongblanding som kan lede til dårlig sementreaksjon i blandingene.

Fibergeometrien har også vist seg til å ha påvirkning på trykkfasthet resultatene. 4D fiberterninger gir høyere trykkfasthet sammenlignet med 5D fiberterninger med likt fiberinnhold. For 0,33% stålfiberarmert terninger gir 4D terningene 5,4% høyere trykkfasthet sammenlignet med 5D terningene. Det kan observeres likt for 0,66% fiberarmert terninger der 4D terningene gir 2% høyere trykkfasthet enn 5D terningene. Standardavviket i 0,66% stålfiberarmert 4D terninger er relativt høyere enn andre 0,66% 5D terninger som kan påvirke sammenligningen av påvirkning som fibertypene har for 0,66% fiberinnhold blandingene.

9.3.2 Elastisitetsmodul

[43] i sin studie konkluderer at det er direkte proporsjonalt forhold mellom stålfiberinnhold og elastisitetsmodulen. Resultatene i studien (kilde) viser at størst elastisitetsmodul ble det målt for stålfiberarmert sylindere med 6% fiber innhold. Elastisitetsmodul ble økt med 42,6 GPa for 6% stålfiber innhold sylindere sammenlignet med uarmerte sylindere. Det legges også merke til direkte proporsjonalitet mellom densitet og elastisitetsmodulen, ettersom høyere fiberinnhold bidrar til økning i blandingsdensitet, som det også forklares i kapittel 9.9.

Resultater for elastisitetsmodulen i kapittel 8.3.2 gir lik relasjon mellom stålfiber innhold og elastisitetsmodulen som det også observeres i litteraturstudien [43]. Elastisitetsmodulen i 0,66% 4D sylindere gir 18,3% høyere elastisitetsmodul sammenlignet med referanse sylindere. Det bemerkes også at 1% stålfiber av 4D sylindere gir lavere elastisitetsmodul sammenlignet med 0,66% 4D sylindere. Samme kan det også observeres for 0,66% 5D sylindere og 1% 5D sylindere. Dette resultatet motstrider det forventede resultatet ettersom det forventes at 1% stålfiber sylindere skal gi høyest elastisitetsmodul blant alle 4D og 5D sylindere på grunn av høyere dens. Det kan være forårsaket av avvik i enkelte sylindreblandinger som dårlig komprimering og "hullede sylindere" som det diskuteres i kapittel 9.1. En annen faktor som spiller rolle i dette fenomenet, er få sylindere per blandingsserie som testes. Det testes kun en sylindere for hver blandingsserie som skaper lite reliabilitet og mindre validiteten for resultater av enkelte blandingsserier. Det samme kan påstås om 1% 5D sylindere testresultatet som gir uforventet mindre elastisitetsmodul sammenlignet med 0,66% av 5D testresultatet. Elastisitetsmodul testresultater for 5D blandinger viser lik trend som 4D blandinger. 0,33% av 5D sylindere gir 2,9% høyere elastisitetsmodul, og 0,66% av 5D sylindere gir 18,5% høyere elastisitetsmodul sammenlignet med referanse sylindere. Det legges merke til forhold mellom densitet og elastisitetsmodul for alle testresultater i alle blandingsserier. Det kan observeres at økning i blandingsdensitet som konsekvens av økt stålfiber innhold gir bedre forankring i sylindere og forbedrer elastisitetsmodulen som nevnt i kapittel 3.6.

Det er noen sylindere som ikke kunne testes for elastisitetsmodulen på grunn av problemer med sensoren i maskin som ikke registrerte noen sylindere. Noen av disse sylindere ble testet på nytt på

grunn av dette systematiske avviket for å kunne gi sammenlignbare resultater for elastisitetsmodulen. Et eksempel av en slik sylindertest er 0,33% 4D sylindertesten som ikke ble registrert og resultatet for denne sylindertesten vises derfor ikke blant andre resultater i fig. (res. Elas.). Opprinnelig originale sylindertestprøver som forkastes på grunn av avvik i resultatet eller ved testing ekskluderes fra resultatene. Resultater for disse forkastede sylindertestprøver er vist i vedlegg B.

Det kan ikke bekreftes eller avkreftes sammenhengen mellom fibergeometrien av 4D og 5D blandinger ut fra resultatene i denne oppgaven. Det er fordi det er enten få eller ingen sylindertestprøver per blandingsserie og resultatene for disse sylindertestprøvene eller at resultater for enkelte blandingsserier mangler. Dette fører til inkonsistens som gjør at det er vanskelig å dra en konklusjon om påvirkning av ulike fibergeometrier i elastisitetsmodul. For eksempel kan det sees at det er ingen data for 0,33% 4D sylindertest til å kunne sammenlignes med 0,33% 5D sylindertesten.

9.3.3 Rest bøyestrekfasthet

I [40] diskuteres det påvirkning av stålfiber i rest bøyestrekfastheten til betong. Studien finner ut at rest bøyestrekfastheten forbedres med 41% og 24 i betongbjelker med fasthet 35 MPa ved økning av stålfiber volumfraksjoner fra 0,25% til 0,5%, henholdsvis. I en annen litteraturstudie (kilde 2) blir det funnet at høyere volumfraksjoner av stålfiber i betong kan også føre til redusert restbøyestrekfasthet på grunn av fiberbrudd ved fiberkonsentrasjoner, spesielt ved f_{R1} (CMOD=0,5mm) og f_{R3} (CMOD=2,5mm). Dette kan ha store påvirkninger spesielt dersom fiberne er ujevnt fordelt.

Resultatene for rest bøyestrekfasthet i kapittel 8.3.3 gir lignende relasjon mellom økning av stålfiber volumfraksjon og rest bøyestrekfasthet som det diskuteres i [40]. Det kan observeres en økning i gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet f_{R4} (CMOD=3,5mm) for 0,66% 4D fiberarmerte bjelken med 65,9% sammenlignet med 0,33% 4D bjelken. 1% av 4D bjelken gir størst gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet blant alle 4D bjelker med 212,8% økning sammenlignet med 0,33% 4D bjelken. Det kan også sees lik relasjon mellom økning av stålfiber og rest bøyestrekfasthet i 5D bjelker. Resultatene i 8.3.3 viser en økning i gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet f_{R4} (CMOD=3,5mm) for 0,66% 5D fiberarmerte bjelken med 40,2% sammenlignet med 0,33% 5D bjelken. 1% av 5D bjelken gir størst gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet blant alle 5D bjelker med 101,0% økning sammenlignet med 0,33% 5D bjelken. Det kan også bemerkes at 1% av 5D bjelker rest bøyestrekfasthets gjennomsnittresultater gir høyest standardavvik sammenlignet andre blandingsserier på 3,37, se vedlegg B. Et slikt høyt standardavvik kan redusere validiteten og reliabiliteten til bjelkeresultatet.

I rest bøyestrekfasthet resultater for f_{R1} (CMOD=0,5mm) kan det sees 1% av 5D fiberbjelke gir 7,5% lavere gjennomsnittlig restbøyestrekfasthet sammenlignet med 0,33% 5D bjelken, selv om 1% 5D bjelken har høyere stålfiber volumfraksjon. Det samme kan det sees om 1% 4D bjelken som gir 42,9% lavere gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet sammenlignet med 0,66% 4D bjelken. Dette kan være forårsaket av fiberbrudd på grunn av høyt fiberinnhold i bjelker og høy fiberkonsentrasjon i enkelte bjelkesnitt, som det diskuteres i (kilde 2). En annen mulig årsak til det kan være ujevn fiberfordeling i blandingprosessen.

Fibergeometrien viser en betydelig påvirkning i rest bøyestrekfasthet. Det viser seg i resultater at 5D bjelker gir høyere gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet enn 4D bjelker. Det er på grunn av større "brueffekten" som 5D fibere med et ekstra "fibertrinn" gir ved det oppstår brudd i bjelken. Denne såkalte brueffekten virker som lim i bjelkene etter bruddet som det også beskrives i kapittel 3.9. Dersom det analyseres gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet for f_{R4} (CMOD=3,5mm) gir 5D bjelken med 0,33% stålfiber volumfraksjon 146% høyere gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet sammenlignet med 0,33% 4D bjelken. Likt kan det observeres for 0,66% bjelker der 5D bjelken gir 108,0% høyere gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet enn 4D bjelken. For 1% 5D bjelker vises det 58,1% høyere gjennomsnittlig rest bøyestrekfasthet sammenlignet med 1% 4D bjelken.

10 Konklusjon

Formålet med denne oppgaven er å undersøke “*Hvordan påvirker fiberarmert betong med variasjoner av fiberinnhold og fiberens geometri i betongens konsistens og mekaniske egenskaper?*”. Til besvarelse av forskerspørsmålet ble det valgt å ha underspørsmålene til å spisse oppgaven. For å ha en solid forståelse for valg av underspørsmålene, er det essensielt å se oppgaven i en større sammenheng. Det ble valgt å se på strategiske og relevante litteraturstudier om fiberarmerte blandinger med ulike volumfraksjoner og fibergeometrier. Dette gjordes for å validere resultater i denne oppgaven til å besvare forskerspørsmålet. Det første underspørsmålet bidro med sammenligning av elastisitetsmodul ved ulike fiberinnhold og fibergeometri i fiberarmert betong. Det andre underspørsmålet bidro med påvirkning og sammenligning av rest bøyestrekfasthet i ulike stålfiber volumfraksjoner og fibergeometrier. Den tredje og fjerde er underspørsmålet omhandler påvirkning av ulike volumfraksjoner og fibergeometrier i betongs konsistens og trykkfasthet.

Hvordan varierer betongens Elastisitetsmodul med variasjoner i fiberinnhold og fiberens geometri?

- Tilsetning av 0,66% 4D fiber forbedrer elastisitetsmodul sammenlignet med uarmert referanse betong med 18,3 % prosent.
- Størst økning i elastisitetsmodul for 4D sylindere ble det observert for 1% 4D sylindere blant alle 4D sylindere.
- Tilsetning av 0,33% 5D fiber forbedrer elastisitetsmodul sammenlignet med uarmert referanse betong med 2,92% prosent.
- Størst økning i elastisitetsmodul for 5D sylindere ble det observert for 0,66% 5D sylindere med 32,414 MPa blant alle 5D sylindere.
- Det var vanskelig bestemme påvirkning av fibergeometri i elastisitetsmodul resultater på grunn av store avvik og kun en sylindere som ble testet for hver blandingsserie. Testing av flere sylindere per blandingsserie ville redusert avvikene.
- Det ble opplevd vanskeligheter ved testing av sylindere på grunn av sensorfeil i maskinen som ikke registrerte noen sylindereprøver som 0,33% 4D sylindere.

Hvordan påvirkes betongens rest bøyestrekfasthet med variasjoner i fiberinnhold og fiberens geometri under standard prøvebetingelser?

- Tilsetning av 0,66% 4D fiber forbedrer rest bøyestrekfasthet (f_{R4}) sammenlignet med 0,33 4D bjelken med 65,9% prosent.
- Størst økning i rest bøyestrekfasthet (f_{R4}) for 4D bjelker ble det observert for 1% 4D bjelker blant alle 4D bjelkene.
- Tilsetning av 0,66% 5D fiber forbedrer rest bøyestrekfasthet (f_{R4}) sammenlignet med 0,33% med 40,2% prosent.
- Størst økning i rest bøyestrekfasthet (f_{R4}) for 5D bjelker ble det observert for 1% 5D med 8,49 MPa blant alle 5D bjelkene.
- Bjelker med 5D fibergeometri gir høyere rest bøyestrekfasthet sammenlignet med bjelker av 4D geometri på grunn av større “brueffekt” som virker som lim i bjelkene etter at bruddet oppstår

- Ujevn fiberfordeling og avvik med bjelkeplassering i bøyestrekmaskinen ledet til avvik i noen resultatet og resultater i store standardavvik som for 1% 5D bjelken, men størst standardavvik på 3,370.

Hvordan påvirkes betongkonsistens ved stålfiber tilsetning?

- I LCPC-boks testen ble det funnet at tilsetning av fiber i betong reduserte støpbarheten og betongkonsistensen. Det ble sett at spredningslengden reduserte for blandinger med høyere fiberinnhold sammenlignet med uarmerte blandinger.
- LCPC resultater viste også at 4D blandinger gir lavere spredningslengde sammenlignet med 5D blandinger med samme volumfraksjon.
- Tilsetning av stålfiber i blandinger reduserte synkutbredelsen. 0,66% stålfiberarmerte blandinger ga minst synkutbredelse for både 4D og 5D fibertyper, sammenlignet ned referansen, 0,33% og 1% blandinger. 1% stålfiber blandinger gir høyere synkutbredelse enn 0,66% stålfiber blandinger på grunn av ekstra 10 liter matriks i alle 1% blandinger.
- Generelt gir 4D blandinger lavere konsistens med lave målinger for synkutbredelse sammenlignet med 5D blandinger.
- I stress growth testen for rheometer forsøk ble det målt høyere størst dreiemoment for blandinger med høyere fiberinnhold. Det viste seg at høyere fiberinnhold reduserer konsistensen i blandinger. Høyest størst dreiemoment ble målt for blandinger med høyest fiberinnhold på 1% for både 4D og 5D blandinger, sammenlignet med referanse blanding, 0,33% og 0,66% blandinger.
- I flow curve testen for rheometer forsøk ble det målt høyere plastisk viskositet for blandinger med høyere fiberinnhold. Det viste seg at høyere fiberinnhold reduserer konsistensen i blandinger for denne rheometer testmetoden også. Høyest plastisk viskositet ble målt for blandinger med høyest fiberinnhold på 1% for både 4D og 5D blandinger, sammenlignet med referanse blanding, 0,33% og 0,66% blandinger.

Hvordan påvirkes betongs trykkfasthet ved stålfiber tilsetning?

- Tilsetning av 0,33% 4D fiber forbedrer trykkfastheten sammenlignet med uarmert referanse betong med 11% prosent.
- Størst økning i trykkfasthet for 4D terninger ble det observert for 1% 4D terninger blant alle 4D terningene.
- Tilsetning av 0,33% 5D fiber forbedrer trykkfastheten sammenlignet med uarmert referanse terninger med 5,2% prosent.
- Størst økning i trykkfasthet for 5D terninger ble det observert for 1% 5D terninger med 76 MPa blant alle 5D terningene.
- Det observeres ganske liten forskjell i trykkfasthet resultater for 4D og 5D fibergeometrier for samme fiberinnhold.

11 Anbefalinger

I denne oppgaven ble det valgt å bruke stålfiber volumfraksjoner 0,33%, 0,66% og 1%. Det anbefales i senere studier å utføre forsøk på stålfiber med høye stålfiber volumfraksjon. Dette vil gi god indikasjon på hvordan mekaniske og fersk betong egenskaper påvirkes ved høye fiberinnhold. Dette vil også bidra til bedre forståelse av optimalt fiberinnhold i blandinger. For høyt fiberinnhold leder til reduksjon i mekaniske egenskaper, og det er derfor det er viktig å velge fibermengde som ikke forminsker mekaniske egenskapen i betong. I tillegg blir det undersøkt to fibergeometrier (4D, 5D) i denne oppgaven. Det kan være hensiktsmessig å undersøke flere andre fibergeometrier som 3D fibre.

Ulike fiberlengder kan gi forskjellige påvirkninger i betongs egenskaper. I denne oppgaven har det blitt bruk samme fiberlengde. Forsøk med ulike fiberlengder kan legge til en ny dimensjon i forsøk, som kan gi fordypet forståelse over stålfiber innvirkning i betong. Ulike fiberlengde kan også kombineres med ulike fibergeometrier til å undersøke optimale fibergeometri med tilsvarende fiberlengde for å forbedre ytelsen i fiberarmert betong.

I litteratursøk for denne oppgaven, har det blitt stort sett blir benyttet google scholar der det også velges litteraturstudier som benytter andre standarder enn europeiske til å utføre mekaniske egenskaper og betongkonsistens tester i fersk tilstand. Det anbefales i fremtidige studier å finne litteratursøk med relevant NS-standarder for å gi et likt sammenlikningsgrunnlag for forsøksresultater.

Ujevn fiberfordeling var en av store avvikskilder i forsøkene i denne oppgaven i både mekaniske teste og betongkonsistens tester i fersk tilstand. Det anbefaler å gjøres forhåndstiltak for jevnfordeling av fibre i blandinger får redusere avvik og oppnå nøyaktigere resultater. Et slikt tiltak kan være telling av antall fibre per blanding slik at fibermengde blir lik i alle blandinger.

Fiberarmering kan fører til reduksjon i miljøutslipp dersom den brukes som sementerstatning i betong, samtidig vil bruk av fiberarmering også lede til mer bestandige konstruksjoner med lengre levetid. Andre miljøfaktorer ved bruk av fiberarmering kan være mindre materialbehov og enkel transport. Økonomiske besparelser er enda en faktor som fiberarmering kan gi en fordel for. Ved erstatning av tradisjonell armering og bruk av mindre materialer på grunn av fiberarmering kan det føre til lave kostnader. I senere studier kan det gjøres økonomiske analyser om dette aspekt som vil være ganske nyttig informasjon for byggebransjen.

Referanser

- [1] D. joo Kim, A. E. Naaman, and S. El-Tawil, "Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, no. 10, pp. 917–928, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.08.002>.
- [2] A. E. Naaman, "Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960," in *Advances in Construction Materials 2007*, 2007, pp. 181–202.
- [3] K. Kovler and N. Roussel, "Properties of fresh and hardened concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 7, pp. 775–792, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.009>.
- [4] FN-SAMBANDET, "CO2-utslipp." <https://www.fn.no/Statistikk/co2-utslipp> (accessed Apr. 12, 2022).
- [5] Regjeringen, "Klimaendringer og norsk klimapolitikk," Oct. 22, 2021. <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/klimaendringer-og-norsk-klimapolitikk/id2636812/> (accessed Dec. 04, 2022).
- [6] J. V. Thue, "betong," *Tekst fra Store norske leksikon*. Store norske leksikon, 2007. Accessed: Jan. 28, 2022. [Online]. Available: <https://snl.no/betong>
- [7] Y. Zhao, Y. Duan, L. Zhu, Y. Wang, and Z. Jin, "Characterization of coarse aggregate morphology and its effect on rheological and mechanical properties of fresh concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 286, p. 122940, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122940>.
- [8] S. Popovics, "Analysis of Concrete Strength Versus Water-Cement Ratio Relationship," *ACI Materials Journal*, vol. 87, no. 5, doi: 10.14359/1944.
- [9] P. B. and v Ramakrishnan, "Properties of Fiber Reinforced Concrete: Workability, Behavior Under Long-Term Loading, and Air-Void Characteristics," *ACI Materials Journal*, vol. 85, no. 3, doi: 10.14359/1849.
- [10] "Chemical Admixtures," *PCA - The Portland Cement Association*. <https://www.cement.org/cement-concrete/concrete-materials/chemical-admixtures> (accessed Mar. 02, 2022).
- [11] P. K. Mehta, *CONCRETE- STRUCTURE, PROPERTIES AND MATERIALS*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Incorporated, 1986.
- [12] *Beskrivelsestekster for bygg, anlegg og installasjoner - Del I: Betongarbeider*. 2019. Accessed: Feb. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1104952>
- [13] M. Maage, *Betong - regelverk, teknologi og utførelse*. Byggnæringens forl, 2015.
- [14] P. Zhang, S. Han, S. Ng, and X.-H. Wang, "Fiber-Reinforced Concrete with Application in Civil Engineering," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, pp. 1–4, Sep. 2018, doi: 10.1155/2018/1698905.
- [15] T. Egeland, "Fiberarmert betong - Analyse av fiberorienteringens påvirkning på mekaniske egenskaper ved bruk av computertomografi," Mastergradavhandling, Universitet i Stavanger, Stavanger, 2021. Accessed: Feb. 07, 2022. [Online]. Available: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/bitstream/handle/11250/2774699/no.uis:inspera:78873759:23128715.pdf?sequence=1>
- [16] E. W. Price, "Concrete Fibermesh Vs. Rebar," *hunker*. Accessed: Feb. 07, 2022. [Online]. Available: <https://www.hunker.com/13425091/concrete-fibermesh-vs-rebar>

- [17] T. Kanstad *et al.*, "Publikasjon nr 38: Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner," Mar. 2020.
- [18] *Fibere for betong - Del 1: Stålfibere - Definisjoner, krav og samsvar*. 2006. Accessed: Feb. 05, 2022. [Online]. Available: <https://www.standard.no/nettbutikk/sokeresultater/?search=ns+en+14889>
- [19] T. Kanstad and *et.al*, "Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner: COIN Project report 29 - 2011," Oslo, 2011.
- [20] E. Nordström, "Steel Fibre Corrosion in Cracks: Durability of Sprayed Concrete," Lilcentiate thesis, LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Alvkarleby, 2000. Accessed: Feb. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991256/FULLTEXT01.pdf>
- [21] J. Militký, V. Kovačič, and J. Rubnerová, "Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 69, no. 9, pp. 1025–1033, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(01\)00119-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(01)00119-9).
- [22] The Nordic concrete federation, "Nordic Concrete Research," *NO. 52*. Norsk Betongforening, pp. 1–103, Jan. 2015. Accessed: Mar. 09, 2022. [Online]. Available: <https://nordicconcrete.net/wp-content/uploads/2016/06/NCR-nr.-52.pdf#page=50>
- [23] D. Wang, Y. Ju, H. Shen, and L. Xu, "Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber," *Construction and Building Materials*, vol. 197, pp. 464–473, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.181>.
- [24] N. Hagen, "Utfordrende jernbanetunnel i Trøndelag," Dec. 16, 2010. Accessed: Mar. 09, 2022. [Online]. Available: https://www.tungt.no/article/view/754034/utfordrende_jernbanetunnel_i_trondelag#:~:text=Deler%20av%20jernbanestrekningen%20mellom%20Trondheim,reise%20p%C3%A5%20Nordlandsbanens%20s%C3%B8ndre%20del.
- [25] CCL Norway, "SPESIALISERTE LØSNINGER FOR BYGNINGSKONSTRUKSJONER." <https://cclnorway.no/> (accessed Mar. 09, 2022).
- [26] I. Lofgren, "Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction," THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, 2005. Accessed: Apr. 23, 2022. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/70560762.pdf>
- [27] Germann Instruments, "ICAR Plus Rheometer," 2022. <https://germann.org/products-by-application/rheology-of-concrete/icar-rheometer> (accessed Feb. 13, 2022).
- [28] T. A. Martius-Hammer and Skjølsvold Ola, "Notat: Fibercon AP1 Materialløsninger, resultater per des 2021," Trondheim, 102026125, Jan. 2022.
- [29] J. S. Damtoft, "GREEN CONCRETE II," Aalborg, 2019. Accessed: Mar. 21, 2022. [Online]. Available: https://www.danskbetonforening.dk/media/arrangement_2019/04_jesper_damtoft.pdf
- [30] T. Schjelderup, S. I. Idarsdottir, and Piotr Stanislawski, "Skjærkapasitet av ultrahøyfast fiberarmert betong - verifikasjon av designstandard," Mastergradavhandling, Universitet i Agder, Grimstad, 2018. Accessed: Mar. 19, 2022. [Online]. Available: <https://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/bitstream/handle/11250/2562903/Idarsdottir%2C%20Svava%20Iselin%20-%20Schjelderup%2C%20Tonje%20og%20Stanislawski%2C%20Piotr.pdf?shttps://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/bitstream/handle/11250/2562903/Idarsdottir%2C%20Svava%20Iselin%20-%20Schjelderup%2C%20Tonje%20og%20Stanislawski%2C%20Piotr.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [31] *Sementprøving - Del 1: Bestemmelse av fasthet*. 2016. Accessed: Apr. 21, 2022. [Online]. Available:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=824230>
- [32] *Prøving av herdnet betong Del 13: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk*. Accessed: Jun. 10, 2022. [Online]. Available:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1367313>
- [33] *Prøving av herdnet betong - Del 13: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk*. 2021. Accessed: Feb. 10, 2022. [Online]. Available:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1367313>
- [34] *Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet*. 2019. Accessed: Jun. 10, 2022. [Online]. Available:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1107001>
- [35] *Prøvmetsmetode for betong med metalliske fibere - Måling av bøyestrekfasthet*. 2007. Accessed: Jun. 10, 2022. [Online]. Available:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=312614>
- [36] N. Roussel, "The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC," *Materials and Structures*, vol. 40, no. 9, pp. 889–896, Oct. 2007, doi: 10.1617/s11527-007-9230-4.
- [37] V. P. Villar, N. F. Medina, M. M. Alonso, S. G. Diez, and F. Puertas, "Assessment of parameters governing the steel fiber alignment in fresh cement-based composites," *Construction and Building Materials*, vol. 207, pp. 548–562, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.036>.
- [38] D. A. S. Rambo, F. de A. Silva, and R. D. Toledo Filho, "Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: Materials and structural aspects," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 54, pp. 32–42, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.014>.
- [39] Y. Zheng, X. Wu, G. He, Q. Shang, J. Xu, and Y. Sun, "Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete by Vibratory Mixing Technology," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, pp. 1–11, Jul. 2018, doi: 10.1155/2018/9025715.
- [40] J.-H. Lee, "Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete," *Composite Structures*, vol. 168, pp. 216–225, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.052>.
- [41] T. Uygunoğlu, "Effect of fiber type and content on bleeding of steel fiber reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 766–772, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.008>.
- [42] Md. H. Sobuz, D. Oehlers, P. Visintin, N. Hasan, M. Hoque, and A. Akid, "Flow and Strength Characteristics of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete: Influence of Fiber Type and Volume-fraction," *Journal of Civil Engineering and Construction*, vol. 6, pp. 15–21, Mar. 2017.
- [43] S. Abbas, A. M. Soliman, and M. L. Nehdi, "Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages,"

Construction and Building Materials, vol. 75, pp. 429–441, 2015, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017>.

Vedlegg A – Fersk betong prosedyrer

Vedlegg A1- Fersk betong prosess

Forsøkene som utføres i denne oppgaven omfatter måling av konsistens og støpbathet. Det brukes betongkonsistens tester som synkutbredelse, LCPC-boks og rheometer test til å måle konsistensen in betong blandingsserier.

Støpligheten til fersk betong kontrolleres vanligvis ved å utføre en synkutbredelse test. Denne metoden å måle betongkonsisten på brukes overalt i verden på byggeplasser Synkutbredelse er ganske effektiv til å gi indikasjon på variasjoner i konsistens i uarmert fersk betong med samme proporsjoner. Tilsetningen av stålfiber i blandinger introduserer kompleksiteter som gjør at synkutbredelse testen blir ikke alltid like effektiv til å måle konsistensen. Det benyttes derfor andre konsistens målingsmetoder som LCPC boks og rheometer test.

Blandingsrekkefølge, støping og herding av blandinger:

Blandingsprosessen er basert på NS-EN 196-1:2016. Standarden beskriver prosedyrer for bruk av utstyr og metoden for blanding og støping. Det beskrives også testmetoder i standarden for testing av mekaniske egenskaper for sementpastaen uten fiber. Denne standard er ikke egnet for fiberarmerte blandinger og det måtte derfor benyttes andre kilder rapporter som NB38 og COIN rapporten til å studere blanding og testprosedyrer for fiberarmerte blandinger.

Det benyttes NB38 for prosedyrer av utsyr og metoden for blanding og støping av fiberarmert blandinger. NB38 beskriver også prosedyrer for mekanisk testing av fiberarmert blandinger.

Blandingsprosedyre

- Veie alle materialer til blandingen av betong med nøyaktighet +- 1g.
- Tilsette nødvendig sementmengde i ren bønne.
- Blande materiale i tørr tilstand i ett minutt
- Vann tilsettes over 30 sekunder
- Blande blandingen i lav hastighet for 60 sekunder. Fibere tilsette gradvis.
- Blande sammen blandingen i høyhastighet for 30 sekunder
- Blandemaskinen stoppes og det las blandingen hvile for halvt minutt.
- Blande igjen i lav hastighet for 60 sekunder.



Vedlegg A2- Synkutbredelse

Synkutbredelse testen utføres til finne ut beton støpbarhet og konsistens. Forsøkene i denne rapporten måler konsistensen til fersk sementpasta og fiberarmert betongblandinger før settes i formene for herding. Forsøket utføres i henhold til Norsk Standard NS-EN 12350-2:2019. Denne metoden å måle betongkonsisten på brukes overalt i verden på byggeplasser Synkutbredelse er ganske effektiv til å gi indikasjon på variasjoner i konsistens i uarmert fersk betong med samme proporsjoner.

I standarden står det at synkutbredelse teste er sensitiv ved endringer i konsistensen av betong som tilsvarer en synkutbredelse mellom (10mm-210mm). Synkutbredelse resultater som ikke er mellom den gitte grensen forkastes og det benyttes andre metoder å måle betongkonsisten. I tillegg dersom synkutbredelse fortsetter å endre over periode av 30 sekund etter støping, er ikke synkutbredelse den adekvate målemetoden for konsistens.

Underlaget til synkkjeglen fuktes og kjeglen plasseres på et jevnt og stivt underlag. Blandingen skal fylles inn i kjeglen, og det sørges for at i prosessen unngås det mekanisk komprimering eller håndkomprimering under innfylling av kjeglen eller etter at kjeglen er fylt. Det skal også rettes av betongoverflater på topper av kjeglen og overvannet fjernes fra underlaget. Under prosessen av fjerning av sølt vann, skal dette ikke ta lengre enn 30 sekunder. Kjeglen løftes jevn oppover, mens det forsøkes å unngå horisontal torsjon på blandingen for å opprettholde betongstrømmen

Utstyr

1) Kjegle:

Kjeglemetall skal ikke være tynnere enn 1,5mm med jevne overflate innvendig og utvendig uten bulker. Følgende er interne dimensjoner i henhold til NS-EN 12350-2:2009:

- Diameter i bunn: (200 ± 2) mm.
- Diameter på topp: (100 ± 2) mm
- Høyde: (300 ± 2) mm.

Det bemerkes at bunnen og toppen må åpninger parallelle med hverandre med 90 grader til aksen.

2) Stål stang:

En lang stålstang med lengde 600mm x 16mm diameter brukes til å eliminere luftinnhold i blandingen. Kjeglen skal treffes med stålstangen 30 ganger når kjeglen er fylt med blandingen til toppen.

3) Linjal:

Linjalen skal brukes med forsiktighet slik at nullpunktet må nøyaktig være på enden for å unngå og minimalisere avvik i målinger. Linjal skal ideelt sett være mellom 0mm til 300mm.

4) Underlagplate:

En stiv underlagplate brukes med jevn overflate der blandingen plasseres etter kjeglen er løftet.

5) Fuktig klut :

En fuktig klut brukes til rensing og tørke overflaten til kjeglen innvendig og utvendig og underlagplaten.

6) Måleskje:

Det brukes en måleskje til å fylle kjeglen blanding. Bredden på måleskje skal være 100mm.

7) Stoppeklokke:

Standarden sier at testen skal utføres innen 150 sekunder for nøyaktige resultater.



Prosedyre:

1) Blanding:

Forberede alle blandinger som testes.

2) Rensing og tørking:

Første steg er å tørke og rens kjeglen innvendig og utvendig sammen med underlagsplaten med en våt klut. Underlagplaten settes under kjeglen før blandingen tilsettes i kjeglen.

3) Fylle kjeglen:

Kjeglen fylles i 3 lag med 1/3 av høyde for hvert lag. Ved innfylling av hvert lag, komprimerer blandingen med en stålstang. Det gis 25 treffslag med stålstangen for hvert lag. Dette hjelper til med jevn spredning av blandingen, og at det utjevner topplaget ved å eliminere luftinnhold i blandingen.

4) Fylle lag:

Ved fylling av andre laget, skal sørges for at andre laget ikke penetrerer første laget, ettersom det har blitt eliminert luft og bobler fra første laget. Vannet som overskrider kjegletoppen fjernes.

5) Utjevning av topplaget av blandingen i kjeglen:

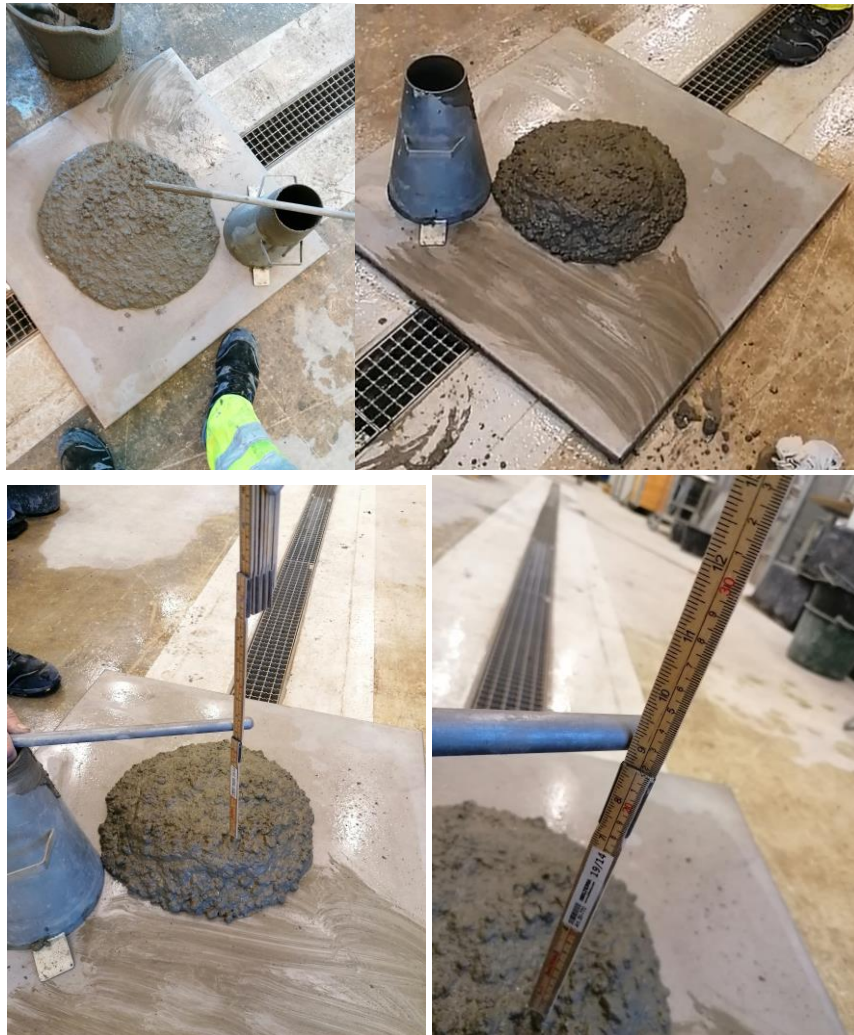
Ved fylling av siste laget i kjeglen, er det anbefalt å fylle inn litt ekstra på toppen som fjernes for å jevne ut topplaget av blandingen i kjeglen.

6) Løfte kjeglen:

Kjeglen løftes sakte og forsiktig vertikalt opp. Det sørges for at det ikke oppstår horisontal torsjonsbevegelse mens kjeglen løftes. Testen skal utføres innen 150 sekunder og det er derfor anbefalt å igangsette måling med engang kjeglen er løftet.

7) Måle og registrer synkutbredelse:

Kjeglen inverteres og stangen plasseres på 90 grader med akse på kjeglen til å måle avstanden. Linjal brukes til å måle høyde til stangen til høyeste punkt til blandingen. Resultatet registreres og utstyr vaskes.



Vedlegg A3- LCPC

LCPC-boks er den andre metoden til å måle konsistensen. Denne metoden er mer egnet for måling av konsistens for stålfiberarmert betong. Det brukes litteraturstudier og rapporter til testprosedyren, ettersom denne metoden er ikke nevnt i standarder.

Det vist at LCPC-box oppfylder kravene til å representere reologiske egenskaper av blandinger og oppfylder kriterier for korrelasjonen mellom flytespenning og eksisterende spredningen. Det er også nevnt at det er ikke mulig å presentere en eksplisitt løsning for flytespenning som en funksjon av spredningslengde L , spredningslengde er måleparameteren i LCPC boks. Måling av lengden som er et gjennomsnitt av maksimal spredningslengde og horisontal spredning langs sideveggen, gir et forhold mellom flytespenning og spesifikk gravitet som kan leses. Dermed muliggjøres det å beregne flytespenning N .

Utstyr:

- 1) LCPC-boks:
Det lages lcpc boks ved å bruke en stiv underlagplate som settes sammen med pleksi glass på hver side på lengderetning. Pleksiglasset brukes til å kunne se og måle spredningslengden etter blandingen tilsettes.
- 2) Måleteip:
Det teipes eller limes en måleteip på lengderetningen til LCPC-boks for å kunne måle spredningsvinkelen

**Prosedyre:**

- 1) Blanding:
Forberede alle blandinger som testes.
- 2) Rensing og tørking:
Første steg er å tørke og rense underlaget til LCPC boksen, spesielt om flere tester utføres etter hverandre.
- 3) Blanding tilsetning i LCPC-boks:
Det tilsettes blandingen sakte og gradvis i LCPC boksen, omtrent 30 sekunder. Det må bemerkes at blandingen tilsettes ikke midten, men en av endene. Det sørges for at blandingen i søler ut av boksen ved tilsetningen.
- 4) Måling:
Etter at blandingen er tilsatt i LCPC boksen, ventes det litt til blandingen er spredt seg fullstendig i LCPC-boksen. Spredningslengden måles og registreres. LCPC-boksen vaskes og tørkes for testen av neste blanding.



Vedlegg A4 - Rheometer

Rheometer testen er den tredje metoden som brukes i denne oppgaven til å måle konsistensen. Denne metoden er også ganske effektiv for måling av konsistens for stålfiberarmert betong. Det brukes ICAR plus databad for rheometer testmaskinen til testprosedyren, ettersom denne metoden er ikke nevnt i standarder.

Utførelsen av en betong rheometer innebærer maskin bruk av selve rheometeret og digitalbruk. Rheometeret består av en mikser med visp som hovedmaskinen også er det er dataverktøy, hvor innsettings verdier bestemmes i. Vispen har bestemte dimensjoner, med høyde 125 mm og diameter det samme. Vispen har også bestemte hastigheter. Prinsippet med en rheometer maskin er registrering av vispen sin torsjonskraft som er nødvendig til å holde vispen i rotasjon i en bestemt hastighet. Det gjøres ved at vispen plasseres i midten av en beholder med betong prøve. I beholderen er det riller med avstand fra vispebladet som avhengig av kornstørrelse diameter, hvor avstanden skal være lik minst fire ganger enn det største diameter på tilslaget.

Utstyr:

- 1) ICAR plus:
Rheometer av type ICAR plus ble brukt til alle rheometer test.
- 2) Datamaskin:

Testen styres ved hjelp av et program på pc. Programmet brukes til å registrere resultater og stille inn parametere.

(Bilder av rheometer og pc)



Prosedyre:

Første del går ut på å ordne verdier i dataverktøyet. De første stegene er bruk av dataverktøyet og når det er gjort, går det over til den praktiske delen. I begynnelsen skal man ikke legge den ferske betongen i beholderen. Det gjøres etter hvert, etter noen justeringer av maskinen.

- 1) Sett komponentene sammen av rheometeret.
 - Begynn med å feste vispen på mikseren
 - Deretter fest sammen stativet på beholderen
 - Også slå sammen mikseren inn i stativet. Stroppene festes sammen, slik at mikseren holdes godt fast på stativet.
- 2) Koble PC til rheometeret med gitt USB kabel.
- 3) Deretter koble maskinen til strømmettet
- 4) Åpne opp dataverktøyet og opprett ny fil for dataene, med ønsket navn.
- 5) Gå videre på fanen merket Geometry.
 - Her er det gitte verdier for Vane radius og Vane Height (høyde og radius på vispe vingene?)
 - Container radius skal forandres til beholderen sin radius
- 6) Videre til Torque fanen.
 - Denne prosessen gjøres i begynnelsen på en dag og mellom tester
 - Trykk på knappen Reset, når det ikke lyser grønt betyr det at den er torsjonen er nullstilt.
 - Alternativt kan man trykke knappen «Abort test»
 - Det er grønt lys når en test foregår
- 7) Type test: Stress Growth Test og Flow Curve Test

- Stress Growth Test à statisk flytespenning. På denne testen beveger vispen seg sakte. Så kan det sees på data verktøyet torsjon kraften
 - Flow Curve Test à vispen spinner i ulike hastigheter (fra 0 til 0,6 rotasjoner/s). Den er brukt til måling av skjærspenningen av materialet. Dette er for konsistensen.
- 8) Før testing med prøven er det viktig å kalibrere maskinen. Det er en prosess som beskrevet i punkt 6.
- 9) Ta mikseren ut av stativet og legg prøven med fersk betong i beholderen.
- 10) Deretter fest inn rheometer mikseren tilbake i beholderen.
- Betongen er for stiv om det er vanskelig å sette vispen inn i den. Da er prøven ikke god nok til testen. Det kan fikses ved å slå på sidene i stativet med et lett materiale hammer
- 11) Test først den statiske flytespenning. Stress Growth Test
- Tiden skal være konsistent, dvs. samme tidsmengde for fordel til sammenligning med andre tester.
 - Sett hastigheten på 0,025 rotasjoner/s
 - I dataverktøyet dukker det opp en kurve for denne testen.
 - Stopp testen når kurven har nådd maksimum og daler ned. Det gjøres ved å trykke på knappen Finish.
 - Maksimum torsjon og flytespenning blir vist under diagrammet.
 - Ferdig test. à la den stå i 10 min før en ny test
- 12) Neste, utfør Flow Curve Test for å beregne skjærspenningen.
- I denne testen gis det innsatte verdier fra før av og andre verdier settes inn. Likevel er det anbefalt å benytte de innsatte verdiene fra før av en anbefaling av produsenten. Siden produsenten har testet fra før av ulike betong blandinger, er det sikre verdier:
 - Denne testen er med hensikt å beregne dynamisk flyte spenning og plastisk viskositet.
 - I begynnelsen vises det i dataverktøyet Breakdown time (nedbrytningstid) og Breakdown speed (nedbrytningshastighet). Dette er første fase i testen og er en nedbrytningsperiode. I denne fasen roterer vispen med full hastighet (0,6 rotasjoner/s). I nedbrytningsfasen er hensikten å oppnå en konsistent oversikt over skjærpåvirkning til å videre brukes til bestemmelse av verdiene i Bingham modellen, noe gjøres ved nedbrytning av tiksotropiske sammensetninger.
 - Velg antall steg hastighet vispen skal reduseres i. Det er anbefalt å bruke minst 6 steg. Velg 6 steg. I hvert steg reduseres hastigheten og holdes konstant, dermed registreres gjennomsnittshastigheten og gjennomsnittstorsjon.
 - Flyt kurven vil vise seg etter å ha gjort testen ferdig. I flytkurven vises to variabler: torsjon i y-aksen og antall rotasjoner/s i x-aksen.
 - Testen utgir også en verdi for hvor nøyaktig lineære kurven er, et R2 tall som beveger seg til 1,0. Jo nærmere R2 tallet er til 1,0 betyr det at den lineære kurven er mer nøyaktig tilpasning. I tillegg gis for det motsatte feil margin i mse (mean squared error). Når feil marginen er så nærme som mulig null viser det nøyaktigheten av tilpasningen.

- De andre verdiene for Bingham modellen oppgis også i data verktøyet, flytegrense, plastisk viskositet
- 13) Dokumenter resultatene. Ved å lage et diagram
- Eksporter resultatene til Excel. Måten å gjøre det på er å lagre som filen en ny fil med nytt navn, bare som xlsx fil (filformat for excel).
 - Velg dataene til utvalg og lag graf.

Vedlegg B – Labrapporter

Rapport 1: Uarmerte referanse betong

Dato: 03.03.2022 - 12.04.2022

Hensikten med dette forsøket: Formålet med denne lab-forsøket var å støpe en uarmert referanse blanding uten tilsetningen av stålfiber. Referanse blandingen skal benyttes som et sammenligningsgrunnlag for å kunne sammenligne andre blandingsresultater. Denne sammenligningen vil kunne gi indikasjon på påvirkningen av stålfiber i fersk betong egenskaper og mekaniske egenskaper i ulike blandingsserier i denne oppgaven.

Utstyr

- Vektmaskin
- Blandingsbeholder (bøtte)
- Vannkanne
- Hansker
- Blandingsmaskin
- Standardiserte stål former

Materialmengde

Materialer	Mengde (kg/m ³)	Mengde (kg)
Norcem Standard FA	300	13.37
Elkem Mikrosillica	20.6	0.89
Kalksteinfiller (VK150)	82.1	3.56
Fritt vann	191.9	8.33
Årdal 0/8mm	1002.4	43.50
Årdal 8/16mm	697.4	30.27
Årdal 16/22mm	0	
Mapei Dynamon	3.3	0.14
Stålfiber	0	0
Sum mengde	2305.7	100.0

Tabell vedlegg B1 rapport 1: Materialmengde lab rapport 1

Blandingsprosedyre:

1. Veie alle materialene med nøyaktighet på $\pm 0,1g$.
2. Sett sement og de tørre materialer i blandingsbeholder og bland de i 60 sekunder. Etterpå tilsett vann i beholderen. Tilsetting av vann i blanding bør ikke foregå mer enn 10 sekunder.

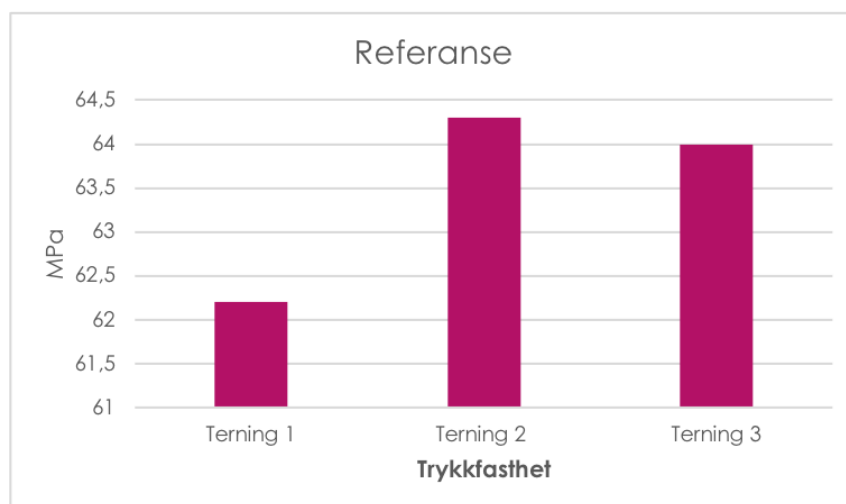
3. Bland blandingen manuelt i 60 sekunder.
4. Start blandingsmaskinen, og la blandingen blande i lav hastighet i 60 sekunder.
5. Stopp blandingsmaskinen, og la blandingen hvile i 30 sekunder.
6. Start blandingsmaskinen igjen, og la blandingen blande i høy hastighet i 60 sekunder.
7. Etter at betong blandingen ble blandet godt og støpet, sett den i prisme med størrelse på 40x40x160 mm. Dekk prismene med plast folie og la det stå i 24t.
8. Til slutt ta blandingen ut fra prisme etter ca. 24t og dekk blandingene med plast folie og la de stå for 28 herdingsdager.

Resultater

Trykkfasthet resultater etter 28 dages herding

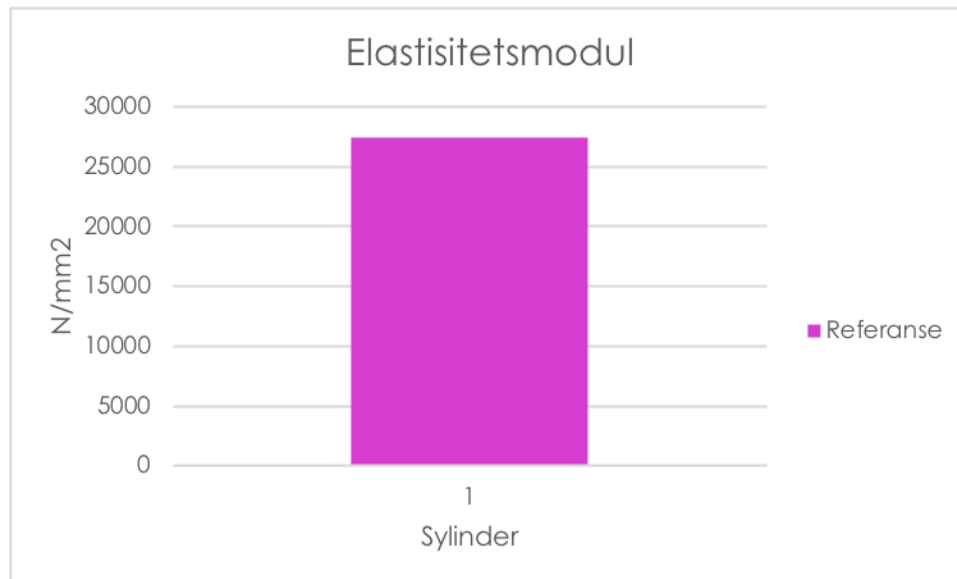
Uarmert referanse betong		(N/mm ²)
Trykkfasthet	Terning 1	62.2
	Terning 2	64.3
	Terning 3	64
Gjennomsnittlig trykkfasthet	Σ (T1, T2, T3)	63.5
Standardavvik	-	0.93

Tabell vedlegg B rapport 1: Resultater fra trykkfasthetstest etter 28 dages herding



Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul resultater	
Blandingstype	N/mm ²
Referanse	27.291



Analyse og konklusjon

Blandingen i dette lab-forsøket besto av uarmert kun sement betongblanding. Resultatene for trykkfasthet for denne blandingen viser at målinger er ganske konsistente med lite standardavvik. Trykkfasthete for denne blandingen var laveste sammenlignet med andre stålfiberarmert blandingene. Elastisitetsmodul testen ble det utført på kun en sylinder som gjør at reliabiliteten i elastisitetsmodul resultatet er lav og det er vanskelig å påstå noe om avvik ettersom testing av flere sylindere ville gitt bedre indikasjon på faktorer som standardavvik og gjennomsnitts elastisitetsmodul.

Rapport 2: 0,33% av 4D stålfiberarmert blanding

Dato: 04.03.2022 - 13.04.2022

Hensikten med dette forsøket: Formålet med denne lab-forsøket var å støpe en 0,33% av 4D stålfiberarmert blanding. Denne blandingen viser påvirkning av stålfiber tilsetningen i betong. Det skal undersøkes påvirkningen av stålfiber i fersk betong egenskaper (synkutbredelse, LCPC, rheometer test) og mekaniske egenskaper (trykkfasthet, elastisitetsmodul og restbøyestrek). Resultatene for denne blandingen skal sammenlignes med andre blandingsserien som inneholder ulike stålfiber volumfraksjoner.

Utstyr

- Vektmaskin
- Blandingsbeholder (bøtte)
- Vannkanne
- Hansker
- Blandingsmaskin
- Standardiserte stål former

Materialmengde

Materialer	Mengde (kg/m ³)	Mengde (kg)
Norcem Standard FA	308	13.4
Elkem Mikrosillica	20.6	0.8
Kalksteinfiller (VK150)	82.1	3.3
Fritt vann	191.9	7.7
Årdal 0/8mm	1002.4	40.1
Årdal 8/16mm	697.4	27.9
Årdal 16/22mm	0	0
Mapei Dynamon	3.3	0.13
Stålfiber	-	0.3
Sum mengde	2305.7	95.23

Blandingsprosedyre:

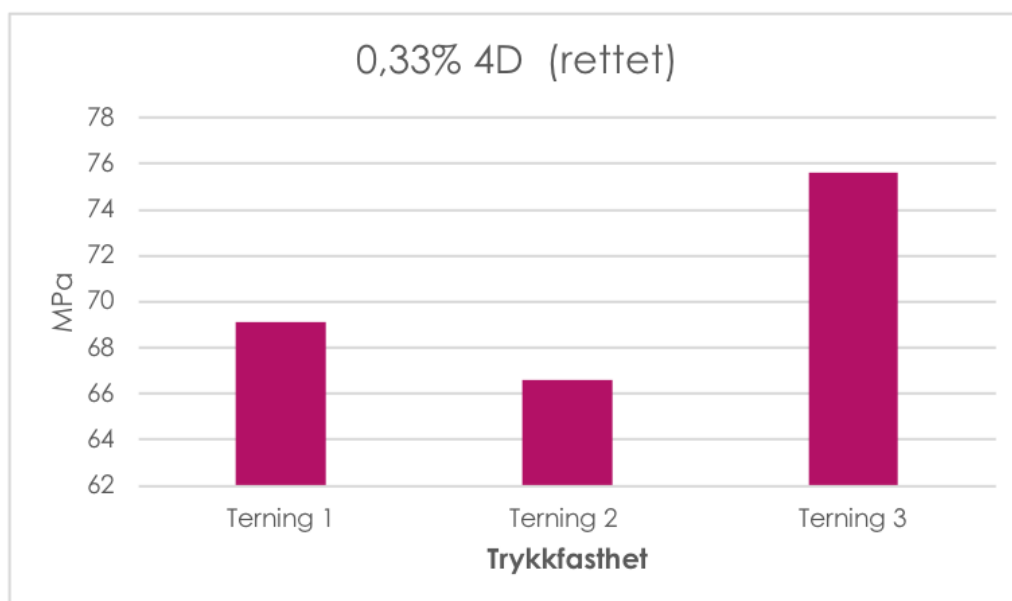
1. Veie alle materialene med nøyaktighet på $\pm 0,1g$.
2. Sett sement og de tørre materialer i blandingsbeholder og bland de i 60 sekunder. Etterpå tilsett vann i beholderen. Tilsetting av vann i blanding bør ikke foregå mer enn 10 sekunder.
3. Bland blandingen manuelt i 60 sekunder.
4. Start blandingsmaskinen, og la blandingen blande i lav hastighet i 60 sekunder.
5. Stopp blandingsmaskinen, og la blandingen hvile i 30 sekunder.

6. Start blandingsmaskinen igjen, og la blandingen blande i høy hastighet i 60 sekunder.
7. Etter at betong blandingen ble blandet godt og støpet, sett den i prismer med størrelse på 40x40x160 mm. Dekk prismene med plast folie og la det stå i 24t.
8. Til slutt ta blandingen ut fra prismer etter ca. 24t og dekk blandingene med plast folie og la de stå for 28 herdingsdager.

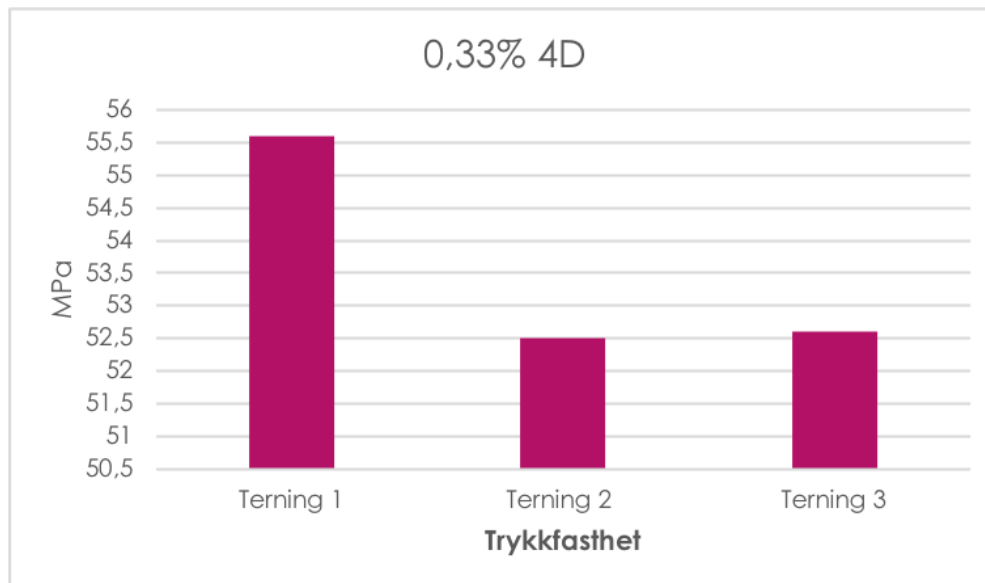
Resultater

Trykkfasthet resultater etter 28 dagers herding

0,33% 4D (rettet)		(N/mm²)
Trykkfasthet	Terning 1	69.1
	Terning 2	66.6
	Terning 3	75.6
Gjennomsnittlig trykkfasthet	Σ (T1, T2, T3)	70.4
Standardavvik	-	3.79



0,33% 4D fiber		(N/mm²)
Trykkfasthet	Terning 1	55.6
	Terning 2	52.5
	Terning 3	52.6
Gjennomsnittlig trykkfasthet	Σ (T1, T2, T3)	53.6
Standardavvik	-	1.44



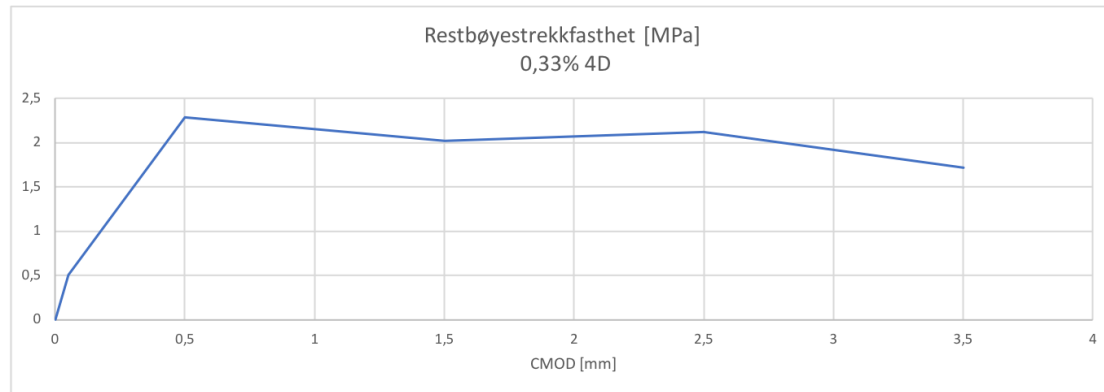
Elastisitetsmodul

Sylinderen ble ikke registrert av sensoren i trykkprøvingsmaskin.

Elastisitetsmodul resultater	
Blandingstype	N/mm ²
0,33% 4D	0

Restbøyestrek fasthet

Bjelke	Bruddstyrke	f _{ct,L}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
1	17.1	0.578	2.900	1.025	1.031	0.957
2	18.9	0.651	2.680	1.848	1.773	1.264
3	18.9	0.569	2.818	2.365	2.372	1.510
4	18.4	0.291	1.062	2.365	2.911	3.075
5	18.0	0.610	2.503	2.595	2.420	1.856
6	18.9	0.344	1.750	1.943	2.198	1.638
Standard avvik	0.712	0.151	0.727	0.565	0.647	0.734
Gjennomsnitt	18.366	0.507	2.286	2.024	2.117	1.717



Analyse og konklusjon

Blandingen i dette lab-forsøket besto av 0,33% av 4D betongblanding. Resultatene for trykkfasthet for denne blandingen viser at noen målinger er inkonsistente med litt standardavvik. Trykkfastheten for denne blandingen var høyere sammenlignet med andre stålfiberarmert blandingene. Elastisitetsmodul testen ble det utført på kun en sylindere som gjør at reliabiliteten i elastisitetsmodul resultatet er lav og det er vanskelig å påstå noe om avvik ettersom testing av flere sylindere ville gitt bedre indikasjon på faktorer som standardavvik og gjennomsnitts elastisitetsmodul.

Rest bøyestrekfasthet resultater for 0,33% 4D blanding gir den laveste rest bøyestrekfasthet sammenlignet med alle 4D blanding. Standardavvik for resultatene er relativt lavt for denne blandingsserien.

Rapport 3: 0,66% av 4D stålfiberarmert blanding

Dato: 06.03.2022 - 14.04.2022

Hensikten med dette forsøket: Formålet med denne lab-forsøket var å støpe en 0,66% av 4D stålfiberarmert blanding. Denne blandingen viser påvirkning av stålfiber tilsetningen i betong. Det skal undersøkes påvirkningen av stålfiber i fersk betong egenskaper (synkutbredelse, LCPC, rheometer test) og mekaniske egenskaper (trykkfasthet, elastisitetsmodul og restbøystrekk). Resultatene for denne blandingen skal sammenlignes med andre blandingsserien som inneholder ulike stålfiber volumfraksjoner.

Utstyr

- Vektmaskin
- Blandingsbeholder (bøtte)
- Vannkanne
- Hansker
- Blandingsmaskin
- Standardiserte stål former

Materialmengde

Materialer	Mengde (kg/m ³)	Mengde (kg)
Norcem Standard FA	308	4.7
Elkem Mikrosillica	20.6	0.3
Kalksteinfiller (VK150)	82.1	1.3
Fritt vann	191.9	3.0
Årdal 0/8mm	1002.4	15.4
Årdal 8/16mm	697.4	10.7
Årdal 16/22mm	0	0
Mapei Dynamon	3.3	0.05
Stålfiber	-	0.2
Sum mengde	2305.7	38

Blandingsprosedyre:

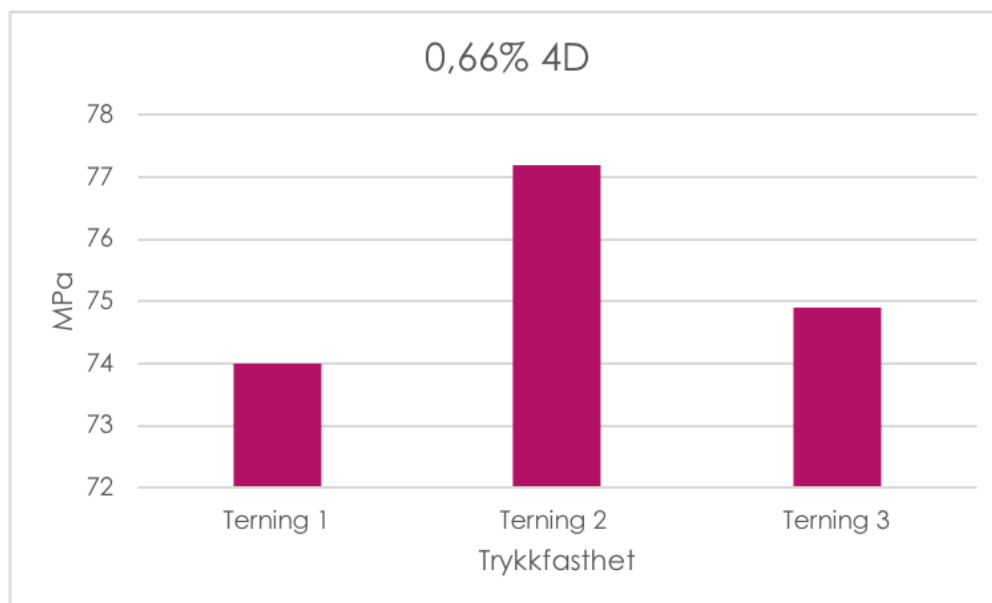
1. Veie alle materialene med nøyaktighet på $\pm 0,1g$.
2. Sett sement og de tørre materialer i blandingsbeholder og bland de i 60 sekunder. Etterpå tilsett vann i beholderen. Tilsetning av vann i blanding bør ikke foregå mer enn 10 sekunder.
3. Bland blandingen manuelt i 60 sekunder.
4. Start blandingsmaskinen, og la blandingen blande i lav hastighet i 60 sekunder.

5. Stopp blandingsmaskinen, og la blandingen hvile i 30 sekunder.
6. Start blandingsmaskinen igjen, og la blandingen blande i høy hastighet i 60 sekunder.
7. Etter at betong blandingen ble blandet godt og støpet, sett den i prisme med størrelse på 40x40x160 mm. Dekk prismene med plast folie og la det stå i 24t.
8. Til slutt ta blandingen ut fra prisme etter ca. 24t og dekk blandingene med plast folie og la de stå for 28 herdingsdager.

Resultater

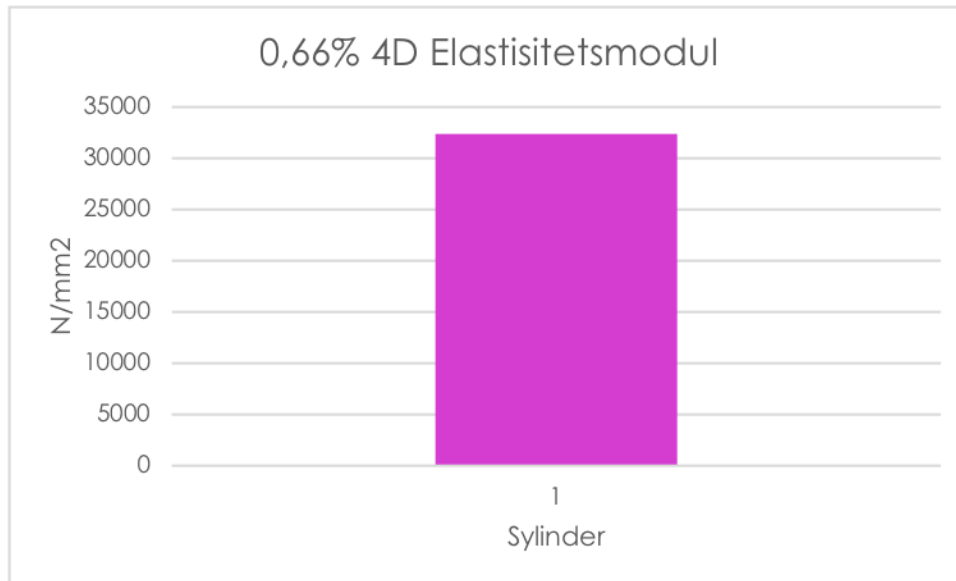
Trykkfasthet resultater etter 28 dagers herding

0,66% 4D fiber		(N/mm ²)
Trykkfasthet	Terning 1	74.0
	Terning 2	77.2
	Terning 3	74.9
Gjennomsnittlig trykkfasthet	Σ (T1, T2, T3)	75.3
Standardavvik	-	1.35



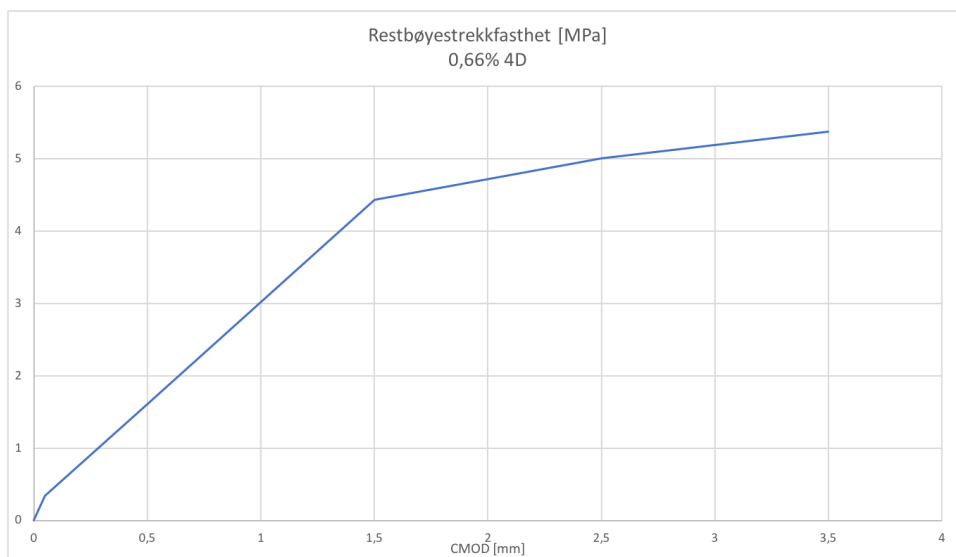
Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul resultater	
Blandingstype	N/mm ²
0,66% 4D	32414



Restbøyestrek fasthet

Bjelke	Bruddstyrke	f _{ct,L}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
1	13,9	0,604	2,984	2,333	2,311	2,212
2	16,0	0,630	1,445	4,095	4,026	3,834
3	16,6	0,548	3,581	3,805	4,434	3,915
4	15,6	0,565	2,641	1,434	1,521	1,250
5	15,6	0,957	5,454	1,548	1,500	1,526
6	15,7	0,662	0,737	2,971	3,993	4,357
Standard avvik	0,909	0,151	1,662	1,123	1,342	1,349
Gjennomsnitt	15,545	0,661	2,807	2,697	2,964	2,849



Analyse og konklusjon

Blandingen i dette lab-forsøket besto av 0,66% av 4D betongblanding. Resultatene for trykkfasthet for denne blandingen viser lav variasjon med lite standardavvik. Trykkfastheten for denne blandingen var høyere sammenlignet med andre stålfiberarmert blandingene og 0,33% stålfiberarmerte blandingen. Elastisitetsmodul testen ble det utført på kun en sylinder som gjør at reliabiliteten i elastisitetsmodul resultatet er lav og det er vanskelig å påstå noe om avvik ettersom testing av flere sylindere ville gitt bedre indikasjon på faktorer som standardavvik og gjennomsnitts elastisitetsmodul.

Rest bøyestrekfasthet resultater for 0,66% 4D blanding gir den høyere rest bøyestrekfasthet sammenlignet med 0,33% 4D blanding. Standardavvik for resultatene er relativt høyt for denne blandingsserien.

Rapport 4: 1% av 4D stålfiberarmert blanding med 10l matriks

Dato: 06.03.2022 - 14.04.2022

Hensikten med dette forsøket: Formålet med denne lab-forsøket var å støpe en 1% av 4D stålfiberarmert blanding med 10 liter matriks. Denne blandingen viser påvirkning av stålfiber tilsetningen i betong med fiber volumfraksjon 1% og fibergeometri 4D. Det skal undersøkes påvirkningen av stålfiber i fersk betong egenskaper (synkutbredelse, LCPC, rheometer test) og mekaniske egenskaper (trykkfasthet, elastisitetsmodul og restbøyestrek). Resultatene for denne blandingen skal sammenlignes med andre blandingsserien som inneholder ulike stålfiber volumfraksjoner.

Utstyr

- Vektmaskin
- Blandingsbeholder (bøtte)
- Vannkanne
- Hansker
- Blandingsmaskin
- Standardiserte stål former

Materialmengde

Materialer	Mengde (kg/m ³)	Mengde (kg)
Norcem Standard FA	308	31.6
Elkem Mikrosilica	20.6	2.1
Kalksteinfiller (VK150)	82.1	8.4
Fritt vann	191.9	19.7
Årdal 0/8mm	1002.4	100.2
Årdal 8/16mm	697.4	69.7
Årdal 16/22mm	0	0
Mapei Dynamon	3.3	0.3
Stålfiber	-	2.3
Sum mengde	2305.7	234.5

Blandingsprosedyre:

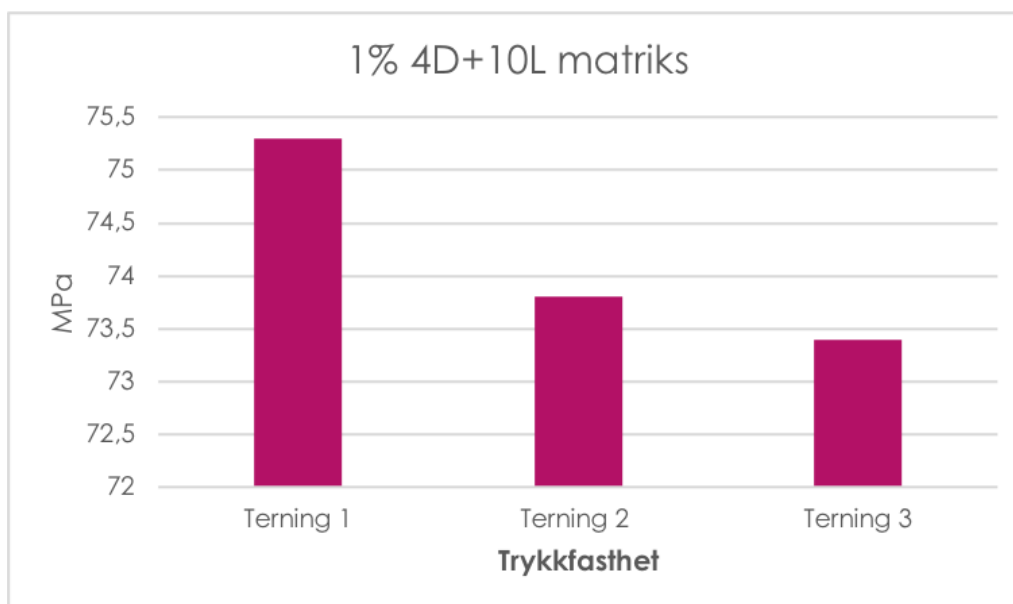
1. Veie alle materialene med nøyaktighet på $\pm 0,1g$.
2. Sett sement og de tørre materialer i blandingsbeholder og bland de i 60 sekunder. Etterpå tilsett vann i beholderen. Tilsetting av vann i blanding bør ikke foregå mer enn 10 sekunder.
3. Bland blandingen manuelt i 60 sekunder.
4. Start blandingsmaskinen, og la blandingen blande i lav hastighet i 60 sekunder.
5. Stopp blandingsmaskinen, og la blandingen hvile i 30 sekunder.

6. Start blandingsmaskinen igjen, og la blandingen blande i høy hastighet i 60 sekunder.
7. Etter at betong blandingen ble blandet godt og støpet, sett den i prismer med størrelse på 40x40x160 mm. Dekk prismene med plast folie og la det stå i 24t.
8. Til slutt ta blandingen ut fra prismer etter ca. 24t og dekk blandingene med plast folie og la de stå for 28 herdingsdager.

Resultater

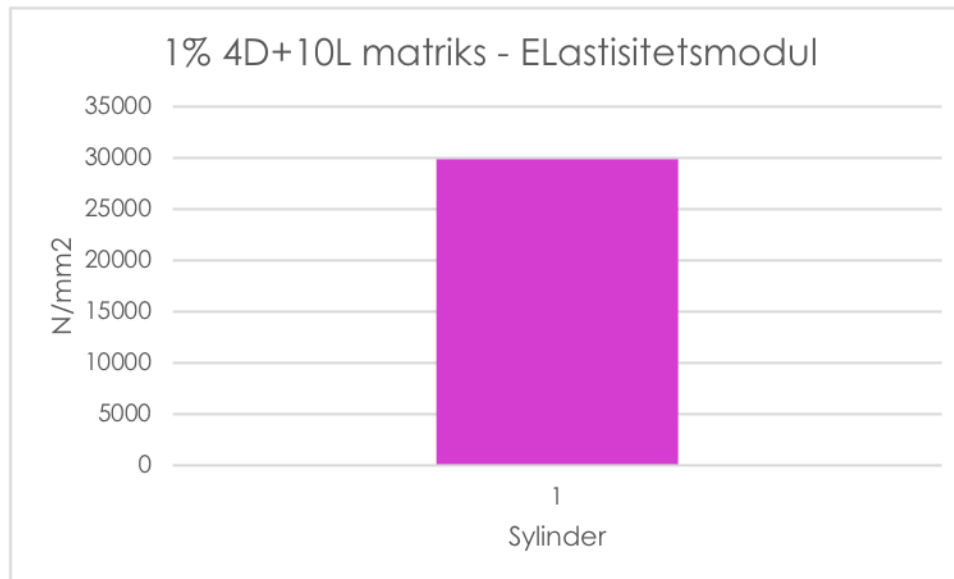
Trykkfasthet resultater etter 28 dagers herding

1% 4D fiber + 10l matriks		(N/mm ²)
Trykkfasthet	Terning 1	75.3
	Terning 2	73.8
	Terning 3	73.4
Gjennomsnittlig trykkfasthet	Σ (T1, T2, T3)	74.1
Standardavvik	-	0.82



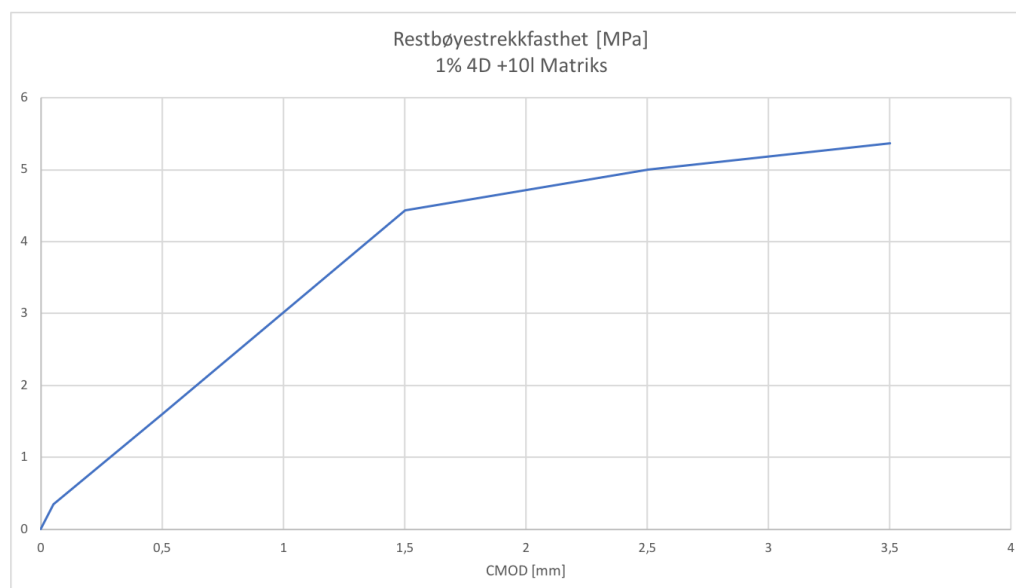
Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul resultater	
Blandingstype	N/mm ²
1% 4D fiber + 10l matriks	29922



Restbøyestrek fasthet

Bjelke	Bruddstyrke	f _{ct,L}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
1	18,1	0,313	0,799	3,514	4,128	4,193
2	18,8	0,364	1,043	6,253	5,067	6,033
3	17,3	0,193	0,703	3,081	3,887	4,506
4	18,7	0,022	0,717	7,097	9,571	10,136
5	18,0	0,491	1,629	3,947	4,747	4,874
6	18,3	0,673	4,721	2,684	2,599	2,480
Standard avvik	0,523	0,227	1,567	1,810	2,397	2,603
Gjennomsnitt	18,199	0,343	1,602	4,429	5,000	5,370



Analyse og konklusjon

Blandingen i dette lab-forsøket besto av 1% 4D fiber + 10l matriks betongblanding. Resultatene for trykkfasthet for denne blandingen viser lav variasjon med lite standardavvik. Trykkfastheten for denne blandingen var høyere sammenlignet med andre stålfiberarmert blandingene, 0,33% og 0,66% stålfiberarmerte blandingen. Elastisitetsmodul testen ble det utført på kun en sylindere som gjør at reliabiliteten i elastisitetsmodul resultatet er lav og det er vanskelig å påstå noe om avvik ettersom testing av flere sylindere ville gitt bedre indikasjon på faktorer som standardavvik og gjennomsnitts elastisitetsmodul.

Rest bøyestrekfasthet resultater for 1% 4D blanding gir den høyeste rest bøyestrekfasthet sammenlignet med alle 4D blanding. Standardavvik for resultatene er relativt høyt for denne blandingsserien.

Rapport 5: 0,33% av 5D stålfiberarmert blanding

Dato: 04.03.2022 - 13.04.2022

Hensikten med dette forsøket: Formålet med denne lab-forsøket var å støpe en 0,33% av 5D stålfiberarmert blanding. Denne blandingen viser påvirkning av stålfiber tilsetningen i betong. Det skal undersøkes påvirkningen av stålfiber i fersk betong egenskaper (synkutbredelse, LCPC, rheometer test) og mekaniske egenskaper (trykkfasthet, elastisitetsmodul og restbøyestrek). Resultatene for denne blandingen skal sammenlignes med andre blandingsserien som inneholder ulike stålfiber volumfraksjoner.

Utstyr

- Vektmaskin
- Blandingsbeholder (bøtte)
- Vannkanne
- Hansker
- Blandingsmaskin
- Standardiserte stål former

Materialmengde

Materialer	Mengde (kg/m ³)	Mengde (kg)
Norcem Standard FA	308	12.4
Elkem Mikrosilica	20.6	0.8
Kalksteinfiller (VK150)	82.1	3.3

Fritt vann	191.9	7.7
Årdal 0/8mm	1002.4	40.1
Årdal 8/16mm	697.4	27.9
Årdal 16/22mm	0	0
Mapei Dynamon	3.3	0.13
Stålfiber	-	0.3
Sum mengde	2305.7	95.5

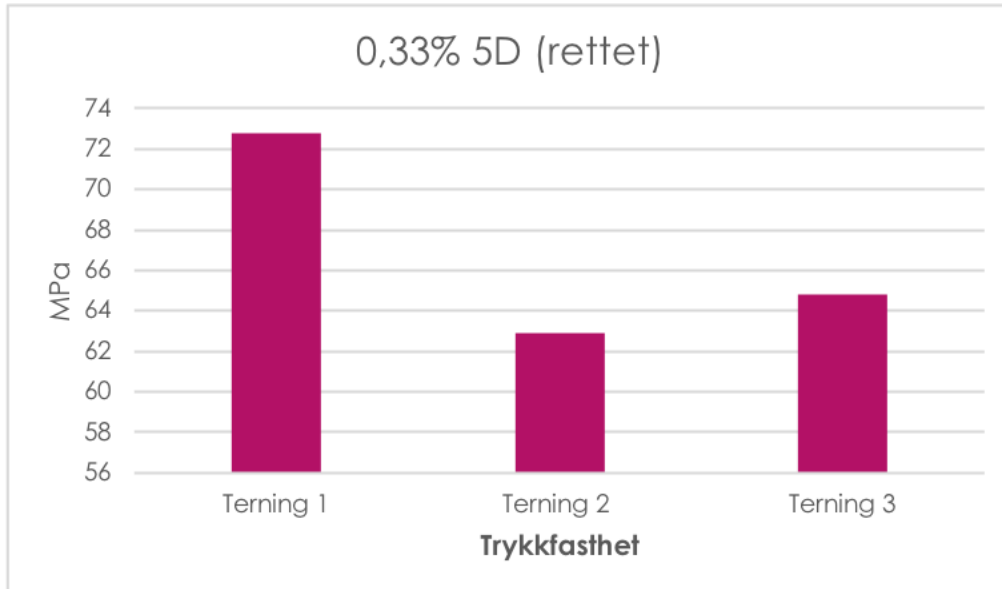
Blandingsprosedyre:

1. Veie alle materialene med nøyaktighet på $\pm 0,1g$.
2. Sett sement og de tørre materialer i blandingsbeholder og bland de i 60 sekunder. Etterpå tilsett vann i beholderen. Tilsetting av vann i blanding bør ikke foregå mer enn 10 sekunder.
3. Bland blandingen manuelt i 60 sekunder.
4. Start blandingsmaskinen, og la blandingen blande i lav hastighet i 60 sekunder.
5. Stopp blandingsmaskinen, og la blandingen hvile i 30 sekunder.
6. Start blandingsmaskinen igjen, og la blandingen blande i høy hastighet i 60 sekunder.
7. Etter at betong blandingen ble blandet godt og støpet, sett den i prismer med størrelse på 40x40x160 mm. Dekk prismene med plast folie og la det stå i 24t.
8. Til slutt ta blandingen ut fra prismer etter ca. 24t og dekk blandingene med plast folie og la de stå for 28 herdingsdager.

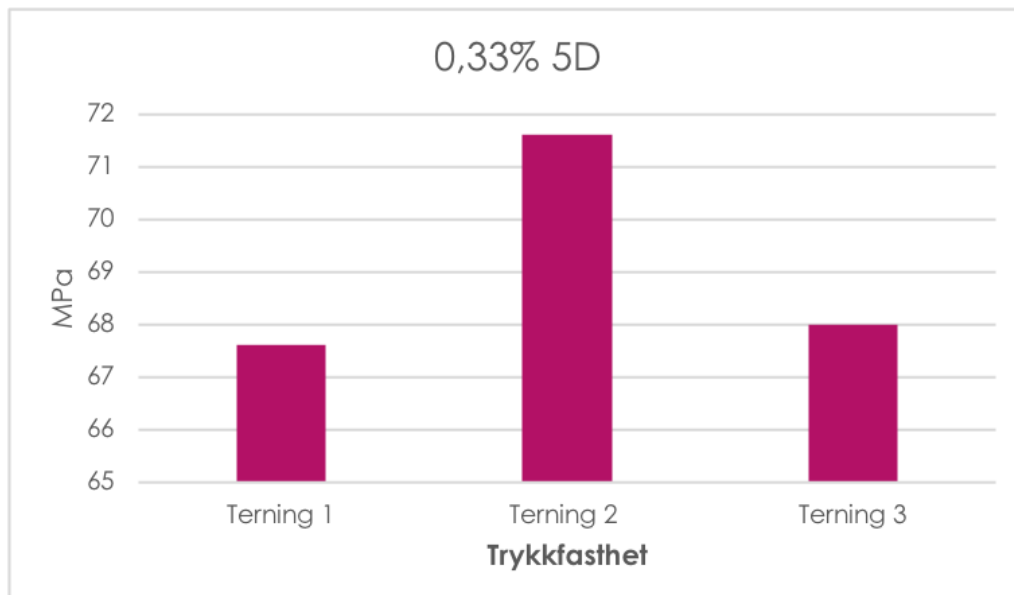
Resultater

Trykkfasthet resultater etter 28 dagers herding

	0,33% 4D (rettet)	(N/mm²)
Trykkfasthet	Terning 1	72.8
	Terning 2	62.9
	Terning 3	64.8
Gjennomsnittlig trykkfasthet	$\Sigma (T1, T2, T3)$	66.8
Standardavvik	-	4.3



0,33% 5D fiber		(N/mm ²)
Trykkfasthet	Terning 1	67.6
	Terning 2	71.6
	Terning 3	68.0
Gjennomsnittlig trykkfasthet	$\Sigma (T1, T2, T3)$	69.1
Standardavvik	-	1.80



Elastisitetsmodul

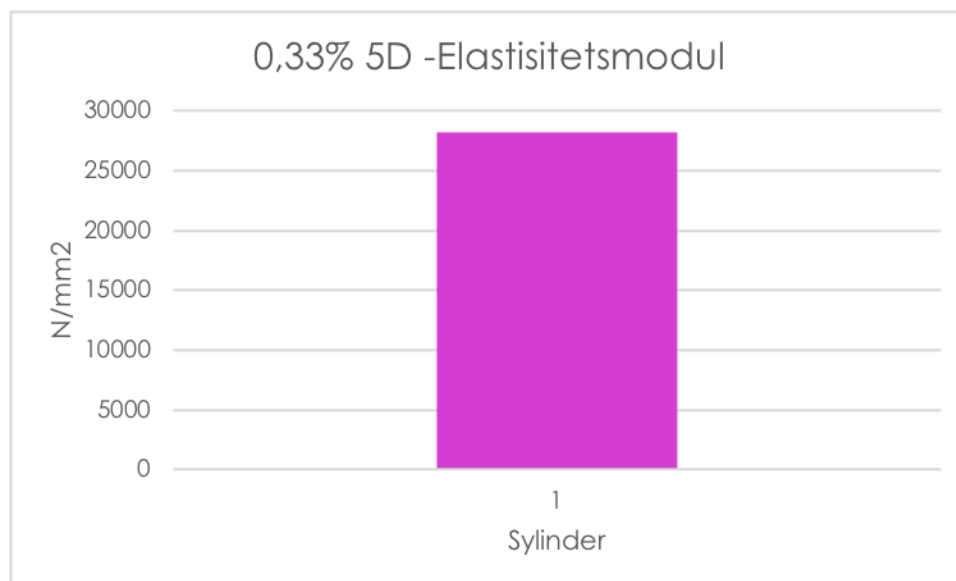
Elastisitetsmodul resultater

Blandingstype

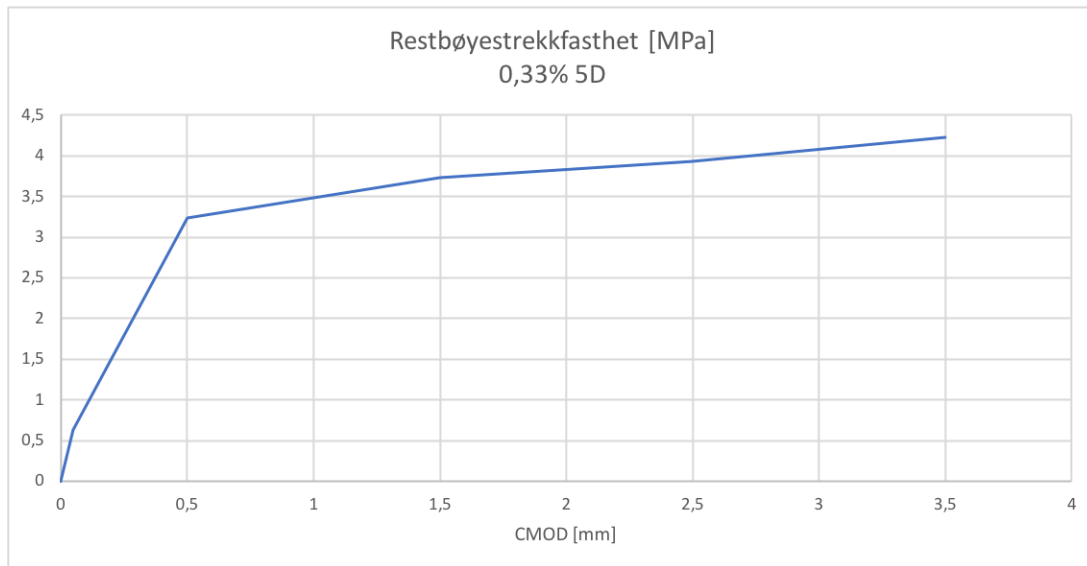
0,33% 4D

N/mm²

28192

**Restbøyestrek fasthet**

Bjelke	Bruddstyrke	f _{ct,L}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
1	15,2	0,620	3,047	2,520	3,280	3,554
2	15,9	0,615	2,726	2,264	2,751	3,048
3	19,1	0,587	2,756	4,728	1,147	1,445
4	18,6	0,557	3,487	5,166	6,722	7,234
5	17,2	0,949	5,810	4,311	5,030	4,932
6	14,3	0,452	1,631	3,400	4,665	5,129
Standard avvik	1,886	0,168	1,399	1,193	1,955	1,997
Gjennomsnitt	16,733	0,630	3,243	3,731	3,933	4,224



Analyse og konklusjon

Blandingen i dette lab-forsøket besto av 0,33% av 5D betongblanding. Resultatene for trykkfasthet for denne blandingen viser at noen målinger er inkonsistente med litt standardavvik. Trykkfastheten for denne blandingen var høyere sammenlignet med andre stålfiberarmert blandingene. Elastisitetsmodul testen ble det utført på kun en sylinder som gjør at reliabiliteten i elastisitetsmodul resultatet er lav og det er vanskelig å påstå noe om avvik ettersom testing av flere sylindere ville gitt bedre indikasjon på faktorer som standardavvik og gjennomsnitts elastisitetsmodul.

Rest bøyestrekfasthet resultater for 0,33% 5D blanding gir den laveste rest bøyestrekfasthet sammenlignet med alle 5D blanding og 0,33% 4D blandingen. Standardavvik for resultatene er relativt lavt for denne blandingsserien.

Rapport 6: 0,66% av 5D stålfiberarmert blanding

Dato: 06.03.2022 - 14.04.2022

Hensikten med dette forsøket: Formålet med denne lab-forsøket var å støpe en 0,66% av 5D stålfiberarmert blanding. Denne blandingen viser påvirkning av stålfiber tilsetningen i betong. Det skal undersøkes påvirkningen av stålfiber i fersk betong egenskaper (synkutbredelse, LCPC, rheometer test) og mekaniske egenskaper (trykkfasthet, elastisitetsmodul og restbøyestrek). Resultatene for denne blandingen skal sammenlignes med andre blandingsserien som inneholder ulike stålfiber volumfraksjoner.

Utstyr

- Vektmaskin
- Blandingsbeholder (bøtte)
- Vannkanne
- Hansker
- Blandingsmaskin
- Standardiserte stål former

Materialmengde

Materialer	Mengde (kg/m ³)	Mengde (kg)
Norcem Standard FA	308	4.7
Elkem Mikrosilica	20.6	0.3
Kalksteinfiller (VK150)	82.1	1.3
Fritt vann	191.9	3.0
Årdal 0/8mm	1002.4	15.4
Årdal 8/16mm	697.4	10.7
Årdal 16/22mm	0	0
Mapei Dynamon	3.3	0.05
Stålfiber	-	0.2
Sum mengde	2305.7	38

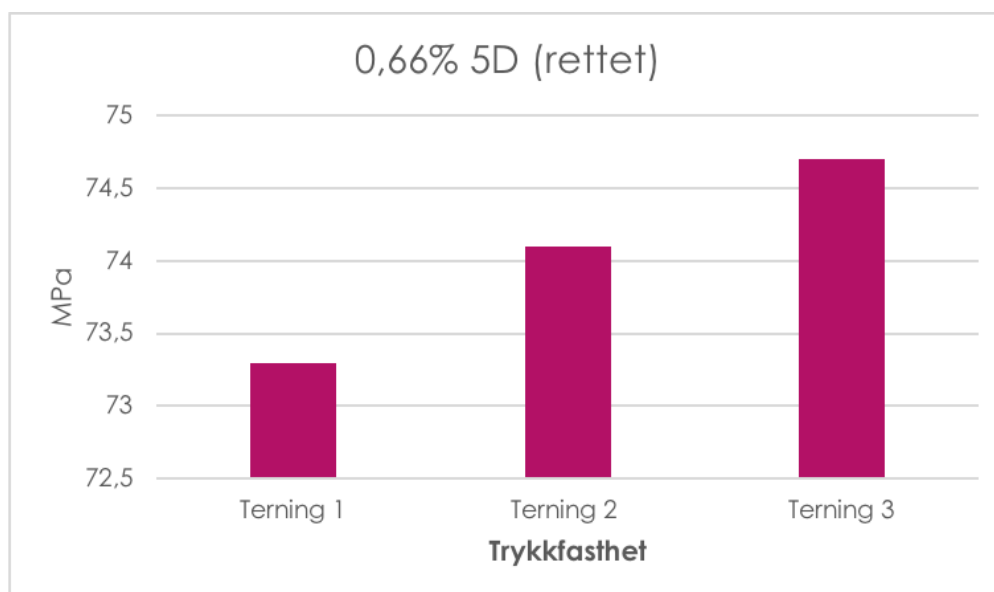
Blandingsprosedyre:

1. Veie alle materialene med nøyaktighet på $\pm 0,1g$.
2. Sett sement og de tørre materialer i blandingsbeholder og bland de i 60 sekunder. Etterpå tilsett vann i beholderen. Tilsetting av vann i blanding bør ikke foregå mer enn 10 sekunder.
3. Bland blandingen manuelt i 60 sekunder.
4. Start blandingsmaskinen, og la blandingen blande i lav hastighet i 60 sekunder.
5. Stopp blandingsmaskinen, og la blandingen hvile i 30 sekunder.
6. Start blandingsmaskinen igjen, og la blandingen blande i høy hastighet i 60 sekunder.
7. Etter at betong blandingen ble blandet godt og støpet, sett den i prisme med størrelse på 40x40x160 mm. Dekk prismene med plast folie og la det stå i 24t.
8. Til slutt ta blandingen ut fra prisme etter ca. 24t og dekk blandingene med plast folie og la de stå for 28 herdingsdager.

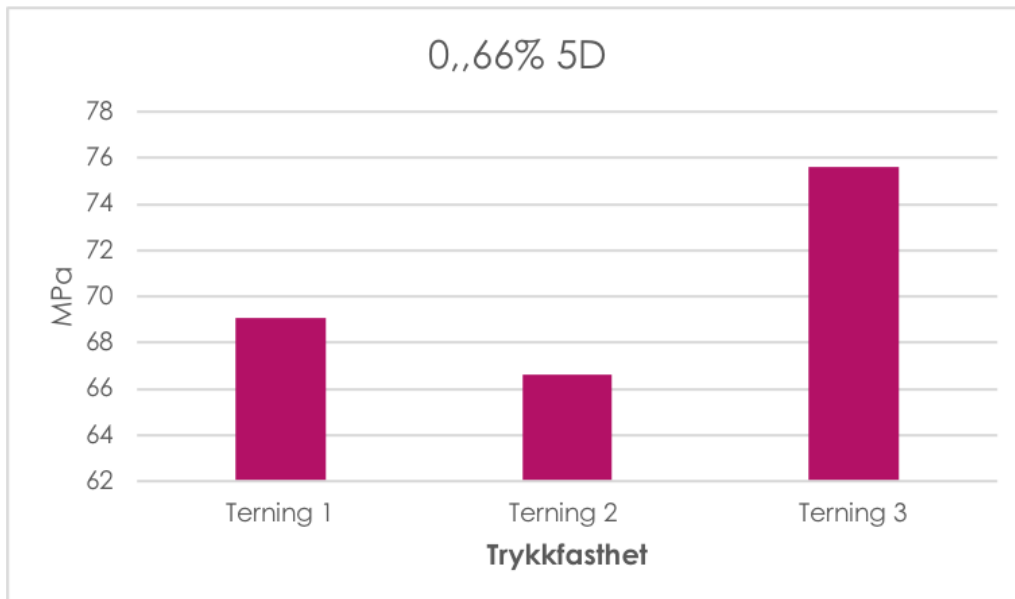
Resultater

Trykkfasthet resultater etter 28 dagers herding

0,66% 4D fiber		(N/mm ²)
Trykkfasthet	Terning 1	73.3
	Terning 2	74.1
	Terning 3	74.7
Gjennomsnittlig trykkfasthet	Σ (T1, T2, T3)	74.0
Standardavvik	-	0.57

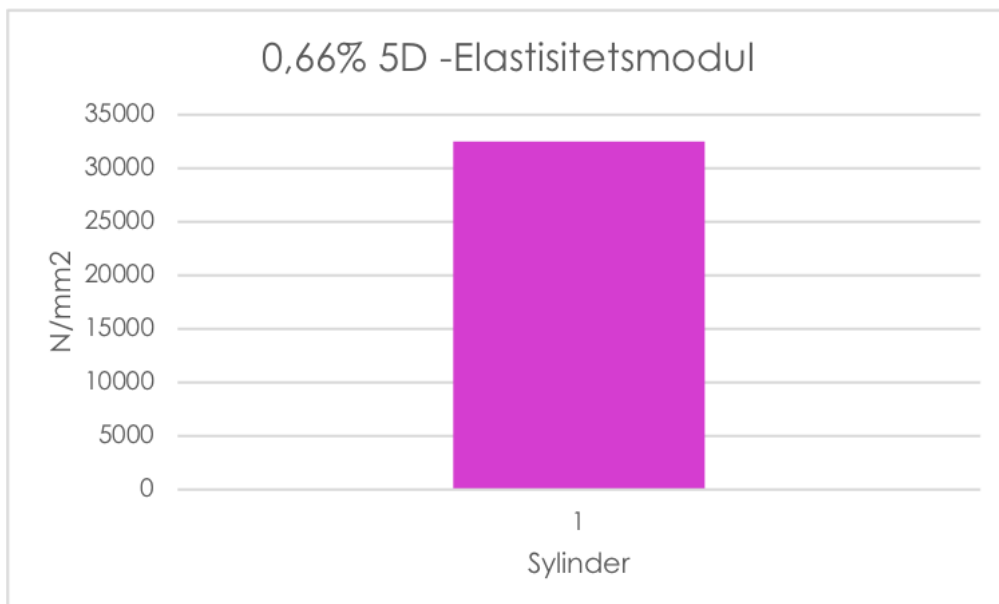


0,66% 4D fiber		(N/mm ²)
Trykkfasthet	Terning 1	69.1
	Terning 2	66.6
	Terning 3	75.6
Gjennomsnittlig trykkfasthet	Σ (T1, T2, T3)	70.4
Standardavvik	-	3.79



Elastisitetsmodul

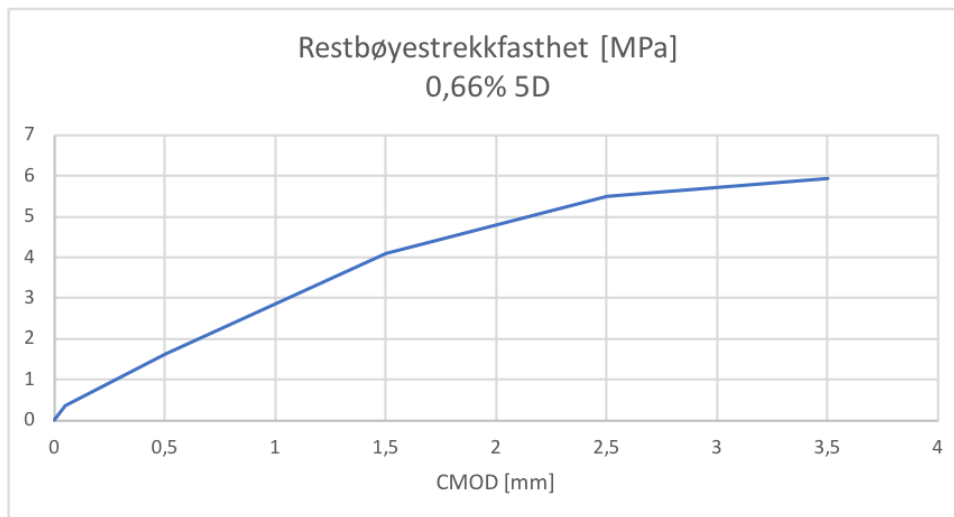
Elastisitetsmodul resultater
 Blandingstype N/mm²
 0,66% 5D 32454



Restbøystrekk fasthet

Tabell (): Rest bøystrekkfasthet resultater for hver bjelke.

Bjelke	Bruddstyrke	f _{ct,L}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
1	16,3	0,399	2,083	3,108	4,465	4,987
2	17,3	0,144	0,685	2,683	3,705	4,578
3	18,1	0,260	1,110	3,748	4,966	4,905
4	16,0	0,595	3,299	5,376	6,449	6,862
5	20,2	0,456	1,368	6,436	8,560	9,197
6	18,2	0,354	1,231	3,297	4,764	5,027
Standard avvik	1,528	0,156	0,936	1,473	1,754	1,796
Gjennomsnitt	17,683	0,368	1,629	4,108	5,485	5,926



Analyse og konklusjon

Blandingen i dette lab-forsøket besto av 0,66% av 5D betongblanding. Resultatene for trykkfasthet for denne blandingen viser lav variasjon med lite standardavvik. Trykkfastheten for denne blandingen var høyere sammenlignet med andre stålfiberarmert blandingene og 0,33% stålfiberarmerte blandingen. Elastisitetsmodul testen ble det utført på kun en sylinder som gjør at reliabiliteten i elastisitetsmodul resultatet er lav og det er vanskelig å påstå noe om avvik ettersom testing av flere sylindere ville gitt bedre indikasjon på faktorer som standardavvik og gjennomsnitts elastisitetsmodul.

Rest bøystrekkfasthet resultater for 0,66% 5D blanding gir den høyere rest bøystrekkfasthet sammenlignet med 0,33% 5D blanding og 0,66% 4D blandingen. Standardavvik for resultatene er relativt lavt for denne blandingsserien.

Rapport 7: 1% av 5D stålfiberarmert blanding med 10l matriks

Dato: 06.03.2022 - 14.04.2022

Hensikten med dette forsøket: Formålet med denne lab-forsøket var å støpe en 1% av 5D stålfiberarmert blanding med 10 liter matriks. Denne blandingen viser påvirkning av stålfiber tilsetningen i betong med fiber volumfraksjon 1% og fibergeometri 5D. Det skal undersøkes påvirkningen av stålfiber i fersk betong egenskaper (synkutbredelse, LCPC, rheometer test) og mekaniske egenskaper (trykkfasthet, elastisitetsmodul og restbøyestrek). Resultatene for denne blandingen skal sammenlignes med andre blandingsserien som inneholder ulike stålfiber volumfraksjoner.

Utstyr

- Vektmaskin
- Blandingsbeholder (bøtte)
- Vannkanne
- Hansker
- Blandingsmaskin
- Standardiserte stål former

Materialmengde

Materialer	Mengde (kg/m ³)	Mengde (kg)
Norcem Standard FA	308	31.6
Elkem Mikrosilica	20.6	2.1
Kalksteinfiller (VK150)	82.1	8.4
Fritt vann	191.9	19.7
Årdal 0/8mm	1002.4	100.2
Årdal 8/16mm	697.4	69.7
Årdal 16/22mm	0	0
Mapei Dynamon	3.3	0.3
Stålfiber	-	2.3
Sum mengde	2305.7	234.5

Blandingsprosedyre:

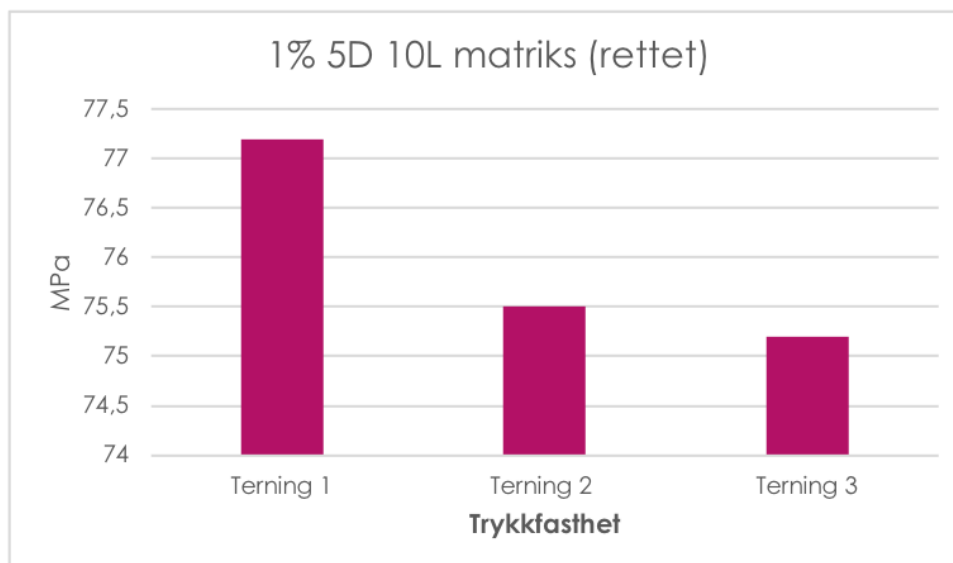
1. Veie alle materialene med nøyaktighet på $\pm 0,1g$.
2. Sett sement og de tørre materialer i blandingsbeholder og bland de i 60 sekunder. Etterpå tilsett vann i beholderen. Tilsetting av vann i blanding bør ikke foregå mer enn 10 sekunder.
3. Bland blandingen manuelt i 60 sekunder.
4. Start blandingsmaskinen, og la blandingen blande i lav hastighet i 60 sekunder.

5. Stopp blandingsmaskinen, og la blandingen hvile i 30 sekunder.
6. Start blandingsmaskinen igjen, og la blandingen blande i høy hastighet i 60 sekunder.
7. Etter at betong blandingen ble blandet godt og støpet, sett den i prisme med størrelse på 40x40x160 mm. Dekk prismene med plast folie og la det stå i 24t.
8. Til slutt ta blandingen ut fra prisme etter ca. 24t og dekk blandingene med plast folie og la de stå for 28 herdingsdager.

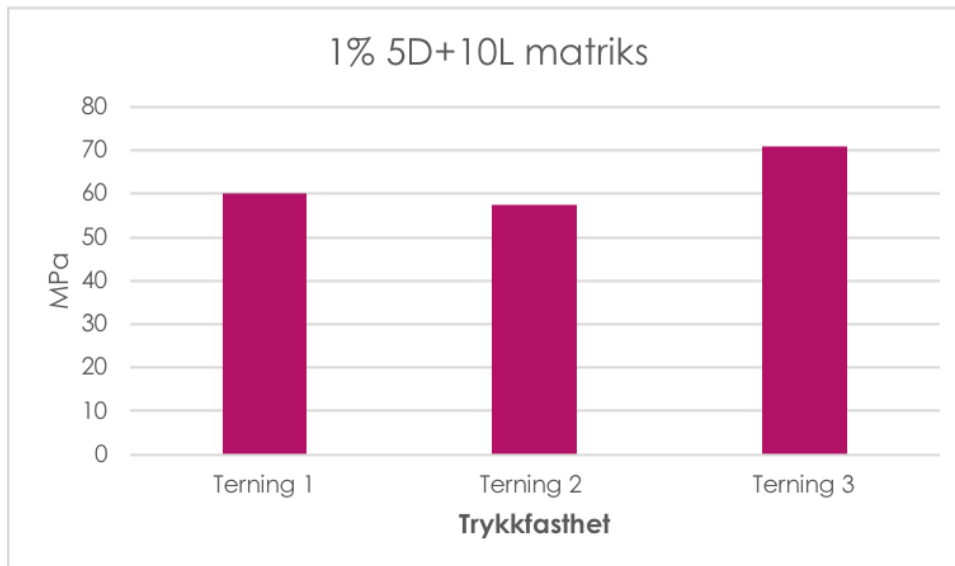
Resultater

Trykkfasthet resultater etter 28 dagers herding

1% 5D fiber + 10l matriks		(N/mm ²)
Trykkfasthet	Terning 1	77.2
	Terning 2	75.5
	Terning 3	75.2
Gjennomsnittlig trykkfasthet	Σ (T1, T2, T3)	76
Standardavvik	-	0.88



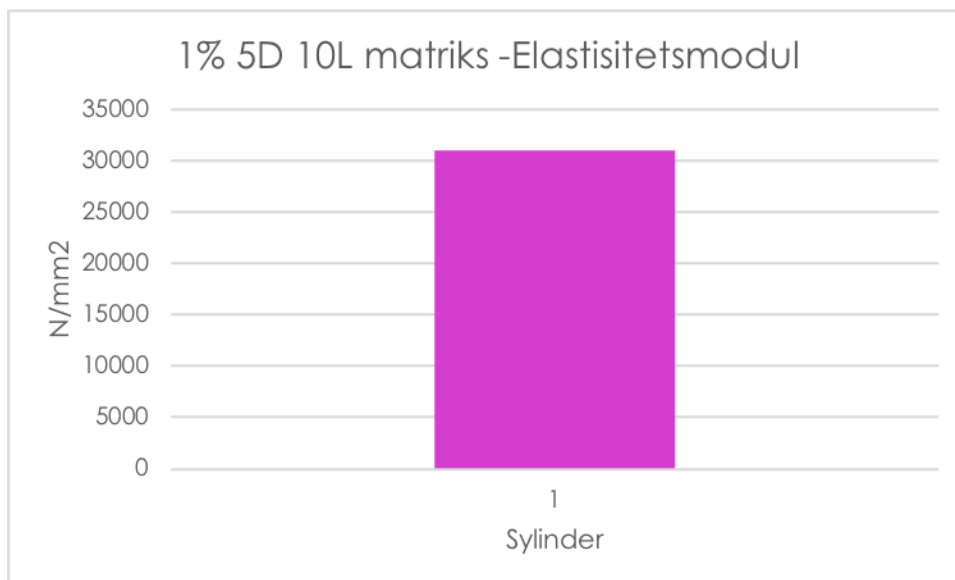
1% 5D fiber + 10l matriks		(N/mm ²)
Trykkfasthet	Terning 1	60.2
	Terning 2	57.6
	Terning 3	70.9
Gjennomsnittlig trykkfasthet	Σ (T1, T2, T3)	62.9
Standardavvik	-	5.76



Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul resultater

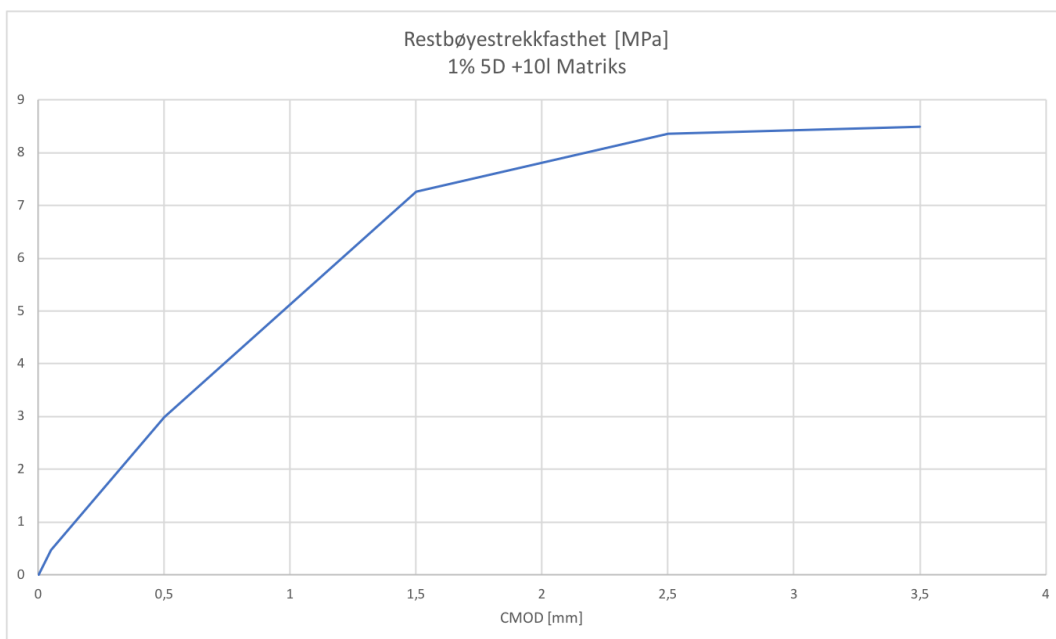
Blandingstype	N/mm ²
1% 5D fiber + 10l matriks	30989



Restbøyestrekfasthet

Tabell (): Rest bøyestrekfasthet resultater for hver bjelke.

Bjelke	Bruddstyrke	f _{ct,L}	f _{R,1}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,4}
1	13,1	0,363	1,692	3,856	4,142	4,481
2	16,7	0,597	2,754	10,306	12,665	13,371
3	15,3	0,485	4,676	4,228	4,874	4,794
4	14,0	0,624	3,727	7,099	8,572	8,984
5	14,5	0,301	2,376	7,838	9,763	10,008
6	16,0	0,416	2,761	10,257	10,133	9,316
Standard avvik	1,313	0,129	1,054	2,807	3,275	3,370
Gjennomsnitt	14,962	0,464	2,998	7,264	8,35	8,492



Analyse og konklusjon

Blandingen i dette lab-forsøket besto av 1% 5D fiber + 10I matriks betongblanding. Resultatene for trykkfasthet for denne blandingen viser lav variasjon med lite standardavvik. Trykkfastheten for denne blandingen var høyere sammenlignet med andre stålfiberarmert blandingene, 0,33% og 0,66% stålfiberarmerte blandingen. Elastisitetsmodul testen ble det utført på kun en sylindere som gjør at reliabiliteten i elastisitetsmodul resultatet er lav og det er vanskelig å påstå noe om avvik ettersom testing av flere sylindere ville gitt bedre indikasjon på faktorer som standardavvik og gjennomsnitts elastisitetsmodul.

Rest bøyestrekfasthet resultater for 1% 5D blanding gir den høyeste rest bøyestrekfasthet sammenlignet med alle 5D blanding og 1% 4D blandingen. Standardavvik for resultatene er relativt høyt for denne blandingsserien.

Vedlegg C – Datablad