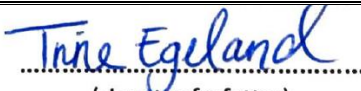




Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer Byggkonstruksjoner	Vårsemesteret, 2021 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Trine Egeland	 (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså	
Veileder(e): Kjell Tore Fosså, UiS Guillermo Rojas, UiS Bodil Krogedal, Sweco	
Tittel på masteroppgaven: Fiberarmert betong - Analyse av fiberorienteringens påvirkning på mekaniske egenskaper ved bruk av computertomografi Engelsk tittel: Fibre-reinforced concrete - Analysis of the influence of fibre orientation on the mechanical properties using computerized tomography	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Fiberarmert betong Stålfiber Computertomografi Fiberorientering Effektivitetsindeks	Sidetall: 84 + vedlegg/annet: 46 Stavanger, 24.06.2021

Sammendrag

Denne oppgaven omhandler stålfiberarmert betong. Stålfiberarmert betong er et konstruksjonsmateriale sammensatt av betong og stålfiber, hvor de to materialene jobber sammen for å oppnå ønsket kapasitet. Oppgaven tar for seg prøvestykker med tre ulike mengder stålfiber for å sjekke utnyttelsen av fibrene og for å sjekke eventuelle endringer i kapasiteten til konstruksjonselementene basert på fiberorienteringen. Ønsket er å presentere en automatisert metode som raskt og pålitelig lokaliserer orienteringen til alle fibere i et konstruksjonselement.

Computertomografi (CT) er en ikke-destruktiv teknikk som, basert på røntgenabsorbering, tillater visualisering av materialets interne struktur. I denne oppgaven er CT-skann brukt for å bestemme orienteringene og posisjonene til fibrene inni stålfiberarmerte betongelementer. Resultatene fremstiller distribusjonen av alle fiberorienteringene i et prøvestykke som videre benyttes til å beregne fibrenes effektivitetsindeks. Det fremkommer en sterk sammenheng mellom både kapasitet og prøvestykkets oppførsel ved lastpåføring og effektivitetsindeks. Dette gir muligheten til å forutse oppførselen under lasting basert på effektivitetsindeksen før testing utføres. Denne metoden kan brukes for alle typer fibere, så lenge det er stor forskjell mellom densiteten til fiberen og densiteten til betongmatriksen.

Støping og testing ble utført på Universitetet i Stavanger. Alle prøvestykker ble testet ved bruk av trepunkts bjelketest, hvor CMOD og bøyestrekfasthet ble registrert. Kapasitetene varierer med både fibermengde og støpemetode. Kapasiteten øker med økende fiberinnhold, og støpemetode kontrollerer fiberorienteringen. Jo bedre fiberorientering, jo høyere kapasitet. To ulike støpemetoder ble brukt, hvor den ene gir stabil orientering uavhengig av fibermengde, mens den andre gir dårligere orientering med økende fibermengde.

For en fiberarmert betongkonstruksjon benyttes tilgjengelige dimensjoneringsveiledninger gitt av SINTEF og Norsk Betongforening, hvor hensikten er å sammenligne dimensjonerende kapasitet med virkelig kapasitet fra prøvoforsøk. Resultatene i studiet viser at stålfiber har en mye bedre effekt under testing sammenlignet med hva som er forventet basert på beregningene. Retningslinjene for dimensjonering av fiberarmerte konstruksjoner er svært konservative og tar ikke nok hensyn til fiberens orientering.

Konklusjonene fra denne oppgaven er svært relevante for videre forskning innen dette emnet.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet våren 2021 og markerer min avslutning på en 5-årig utdanning innen konstruksjoner og materialer, med byggkonstruksjoner som spesialisering, ved Universitetet i Stavanger. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Sweco. Jeg vil rette en stor takk til mine veiledere Bodil Krogedal i Sweco og Kjell Tore Fosså ved Universitetet i Stavanger, for all støtte og kunnskap under gjennomføringen av denne oppgaven.

Flere personer har bidratt til at denne oppgaven har blitt gjennomført. Jeg vil uttrykke min takknemlighet til Alvaro Muñoz Beltran og Stein Arild Maudal hos Stratum Reservoir for muligheten til å skanne prøvestykkene mine, Andreas Staude og Julien Roussel fra Thermo Fisher for lisensen og all hjelp til gjennomføring av analyser i Avizo software, og Gunnar Valsson fra Fakta Bygg AS for hjelp til bygging av forskaling.

Jeg vil også takke Jarle Berge og Samdar Kakay som alltid var behjelpelige til støping og testing på universitetet, samt alle mine medstudenter som hjalp meg med alle tunge løft og logistikk.

Til slutt vil jeg uttrykke min evige takknemlighet til Guillermo Rojas, universitetslektor ved UiS og rådgivende ingeniør hos Multiconsult. Jeg vil takke for all tid, støtte og inspirasjon han har bidratt med igjennom dette krevende arbeidet. Uten hans engasjement og veiledning ville ikke oppgaven blitt den samme. Jeg ønsker han også lykke til med sin doktorgradsavhandling innen fiberarmerte betongkonstruksjoner.

Stavanger, Juni 2021

Trine Egeland

Innhold

Sammendrag	i
Forord	ii
Figurliste	vi
Tabelliste	viii
Forkortelser og symbol	ix
1 Innledning	1
1.1 <i>Bakgrunn</i>	1
1.2 <i>Formål</i>	2
1.3 <i>Innhold</i>	2
2 Generelt om betong	3
2.1 <i>Sement</i>	3
2.2 <i>Tilslag</i>	4
2.3 <i>Tilsetning</i>	5
2.4 <i>Egenskaper til fersk betong</i>	5
2.5 <i>Utvikling av fasthet og modenhet</i>	7
2.6 <i>Selvkomprimerende betong</i>	8
3 Fiberarmert betong	10
3.1 <i>Fibertyper</i>	10
3.1.1 <i>Stålfiber</i>	11
3.1.2 <i>Glassfiber</i>	13
3.1.3 <i>Syntetisk fiber</i>	13
3.1.4 <i>Basaltfiber</i>	14
3.2 <i>Fiberens virkemåte</i>	14
3.3 <i>Effekt av fiber i betong</i>	15
3.4 <i>Fiberens bruksområde</i>	17
3.5 <i>Regelverk</i>	17
3.6 <i>Dimensjonering av fiberarmert betong</i>	19
3.6.1 <i>Momentkapasitet</i>	20
4 Ikke-destruktiv testing (NDT)	21
4.1 <i>Bruksområder</i>	21
4.2 <i>Testmetoder</i>	22

4.3	<i>Computertomografi (CT)</i>	23
4.3.1	Avizo computer software	24
5	Prøveplan og testmetoder	25
5.1	<i>Proporsjonering og materialer</i>	26
5.2	<i>Tilslag</i>	28
5.3	<i>Tilsetningsstoff</i>	29
5.4	<i>Forberedende arbeid</i>	29
5.5	<i>Støpemetode</i>	31
5.6	<i>Prøving av fersk betong</i>	33
5.6.1	Densitet	33
5.6.2	Luftinnhold	34
5.6.3	Synkmål og utbredelsesmål	34
5.7	<i>Prøving av herdet betong</i>	36
5.7.1	Trykkfasthet.....	36
5.7.2	Spaltestrekkfasthet	36
5.7.3	Elastisitetsmodul	37
5.7.4	Bøyestrekfasthet	39
5.7.5	CMOD test	40
5.8	<i>Computertomografi</i>	43
5.8.1	Fiberorientering	44
5.8.2	Effektivitetsindeks	45
6	Dimensjoneringsprinsipp	46
6.1	<i>Bruddgrensetilstand – ULS</i>	46
6.1.1	Momentkapasitet for fiberarmert betong	46
7	Eksperimentelt resultat	49
7.1	<i>Fersk betong</i>	49
7.1.1	Densitet	49
7.1.2	Luftinnhold	49
7.1.3	Synkmål og utbredelsesmål	50
7.2	<i>Herdet betong</i>	51
7.2.1	Trykkfasthet.....	51
7.2.2	Spaltestrekkfasthet	54
7.2.3	Elastisitetsmodulus	56
7.2.4	Bøyestrekfasthet	57
7.2.5	CMOD test	60
7.3	<i>Computertomografi</i>	66
7.3.5	Fiberorientering	69
7.3.6	Effektivitetsindeks	74
8	Konklusjon	79
9	Forslag til videre arbeid	82

Referanser	83
Vedlegg A. Betongmaterialer	85
<i>Vedlegg A-1. Stålfiber</i>	<i>85</i>
<i>Vedlegg A-2. Dynamon SX-N.....</i>	<i>86</i>
Vedlegg B. Proporsjoneringsark	89
<i>Vedlegg B-1. B35 betong</i>	<i>89</i>
<i>Vedlegg B-2. 0,4% fiber, Blanding 1.....</i>	<i>90</i>
<i>Vedlegg B-3. 0,4% fiber, Blanding 2.....</i>	<i>91</i>
<i>Vedlegg B-4. 0,8% fiber, Blanding 1.....</i>	<i>92</i>
<i>Vedlegg B-5. 0,8% fiber, Blanding 2.....</i>	<i>93</i>
<i>Vedlegg B-6. 1,2% fiber, Blanding 1.....</i>	<i>94</i>
<i>Vedlegg B-7. 1,2% fiber, Blanding 2.....</i>	<i>95</i>
Vedlegg C. Momentkapasitet.....	96
Vedlegg D. Kalkulasjoner	108
<i>Vedlegg D-1. Spaltetrekkfasthet</i>	<i>108</i>
<i>Vedlegg D-2. Bøyestrekfasthet</i>	<i>110</i>
<i>Vedlegg D-3. CMOD.....</i>	<i>112</i>
<i>Vedlegg D-4. Elastisitetsmodulus.....</i>	<i>120</i>
Vedlegg E. Avizo	122
<i>Vedlegg E-1. Analyse.....</i>	<i>122</i>
<i>Vedlegg E-2. Bilder.....</i>	<i>123</i>

Figurliste

Figur 2.1: Fersk betong.....	6
Figur 3.1: Vanlige fiberformer [3].....	11
Figur 3.2: Stålfiber med endeforankring	12
Figur 3.3: Forhold mellom påsatt last og deformasjon for (1) uarmert betong og (2) fiberarmert betong	14
Figur 3.4: Myk (a) og hard (b) oppførsel ved aksiell spenning [7]	16
Figur 3.5: Spennings- og tøyingsfordeling for rektangulært tverrsnitt utsatt for ren bøyning [3]	20
Figur 4.1: Magnetisk partikkeltesting.....	21
Figur 4.2: CT-bilde av fiberarmert betong.....	23
Figur 5.1: Fiberlengden skal være minst 2 ganger maksimal tilslagsstørrelse	28
Figur 5.2: Fordelingskurve for tilslag brukt i betongblandingen	29
Figur 5.3: Støpeform for terning 150x150x150mm [6]	30
Figur 5.4: Støpeform til bjelke 150x150x550mm [6].....	30
Figur 5.5: Støpeform til plate 480x480x100mm.....	31
Figur 5.6: Illustrasjon av støpemetode for bjelker	32
Figur 5.7: Illustrasjon av støpemetode for søyler	32
Figur 5.8: Illustrasjon av støpemetode for plater.....	33
Figur 5.9: Utstyr brukt til å måle luftinnhold.....	34
Figur 5.10: Synk- og utbredelsesmål	35
Figur 5.11: Sylinder plassert i jigg.....	37
Figur 5.12: Lastsykluser ved prøving av elastisitetsmodulsen	38
Figur 5.13: Lastordning på prøvestykket	39
Figur 5.14: Forsøksoppsett for CMOD test.....	40
Figur 5.15: Prinsipp for bestemmelse av proporsjonalitetsgrensen og last ved spesifiserte rissvidder [16]	41
Figur 5.16: Relasjonen mellom karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekkfasthet [3]	43
Figur 5.17: Eksempler på fiberorienteringer: (a) Horisontalt, (b) Vertikalt og (c) Tilfeldig	44
Figur 6.1: Free-Body Diagram.....	47
Figur 7.1: Utbredelsesmål ved 0,8% fibermengde (blanding 1)	51
Figur 7.2: Testmaskin for trykkprøving.....	51
Figur 7.3: Trykkfasthet til terninger ved 28 døgn	53
Figur 7.4: Prøving av spaltstrekfasthet - Betong uten fiber vs betong med fiber	54
Figur 7.5: Spaltstrekkest ved 28 døgn	55
Figur 7.6: Prøving av elastisitetsmodulus ved 28 døgn	56
Figur 7.7: Prøving av bøyestrekfasthet.....	57
Figur 7.8: Forskjellig bøyestrekfasthet m.h.p. fibermengde	58
Figur 7.9: Bøyestrekfasthet – bjelker	59
Figur 7.10: Bøyestrekfasthet - søyler.....	59
Figur 7.11: Bøyestrekfasthet – plater	60
Figur 7.12: Prøving ved 3-punkts bjelketest.....	60
Figur 7.13: Last vs. nedbøyning og CMOD - bjelker	62
Figur 7.14: Last vs. nedbøyning og CMOD – søyler	63
Figur 7.15: Rest bøyestrekfasthet vs. Fibermengde	64
Figur 7.16: Visualisering av fiberfordeling. (Bjelke 4).....	67

Figur 7.17: Analyse av plater	68
Figur 7.18: Lokalt koordinatsystem for prøvestykker analysert i Avizo	69
Figur 7.19: Fiberorientering.....	70
Figur 7.20: Alle fibere vs effektive fibere i sentraltverrsnitt, Bjelke 2.....	72
Figur 7.21: Alle fibere vs effektive fibere i sentraltverrsnitt, Bjelke 4.....	72
Figur 7.22: Alle fibere vs effektive fibere i sentraltverrsnitt, Bjelke 6.....	72
Figur 7.23: Alle fibere vs effektive fibere i sentraltverrsnitt, Søyle 2.....	73
Figur 7.24: Alle fibere vs effektive fibere i sentraltverrsnitt, Søyle 4.....	73
Figur 7.25: Alle fibere vs effektive fibere i sentraltverrsnitt, Søyle 6.....	73
Figur 7.26: Effektivitetsindeksens variasjon med fibermengde	75
Figur 7.27: Effektivitetsindeks, plater vs bjelker	76
Figur 7.28: Effektivitetsindeks, plater og bjelker vs søyler.....	76
Figur 7.29: Bøyestrekfasthet vs effektivitetsindeks	77
Figur 7.30: Rest bøyestrekfasthet vs effektivitetsindeks.....	78
Figur 8.1: Prøvestykkets oppførsel under lastpåføring ved $0 < \alpha < 0,5$	79
Figur 8.2: Prøvestykkets oppførsel under lastpåføring ved $0,5 < \alpha < 1$	79

Tabelliste

Tabell 2.1: Typiske verdier for funksjonsrate $H(\theta)$ i temperaturspennet 0-40 °C.....	8
Tabell 3.1: Klassifisering av stålfiber [3]	12
Tabell 3.2: Polymermaterialer [3]	13
Tabell 3.3: Tommelfingerregel for å erstatte slakkarmering med stålfiber [6].....	15
Tabell 5.1: Prøvestykker støpt fra blanding 1.....	25
Tabell 5.2: Prøvestykker støpt fra blanding 2.....	26
Tabell 5.3: Eksempel på proporsjonering.....	27
Tabell 5.4: Tilslag inndeling	28
Tabell 6.1: Dimensjonerende momentkapasitet.....	47
Tabell 6.2: Dimensjonerende- vs reell bruddlast	48
Tabell 7.1: Betongens densitet.....	49
Tabell 7.2: Luftinnhold i betongblandinger	49
Tabell 7.3: Resultater fra utbredelsesmål	50
Tabell 7.4: Resultat fra trykktest	52
Tabell 7.5: Resultat fra spaltestrekktesting.....	54
Tabell 7.6: Resultat ved prøving av elastisitetsmodulus	56
Tabell 7.7: Resultat fra bøyestrekkefasthetsprøving	58
Tabell 7.8: Rest bøyestrekkefasthet fra CMOD test.....	61
Tabell 7.9: Kapasitetsreduksjon ved bruk av støpemetode for søyler over bjelker.....	65
Tabell 7.10: Karakteristiske verdier for rest bøye- og rest strekkefasthet.....	66
Tabell 7.11: Antall fiber i prøvestykkene gitt av Avizo/XFiber	67
Tabell 7.12: Mengde fiber orientert i ønsket retning.....	71
Tabell 7.13: Global og lokal effektivitetsindeks, hvor ønsket verdi = 1.....	74

Forkortelser og symbol

Forkortelser

CMOD	<i>Crack mouth opening displacement</i>
COIN	<i>Concrete Innovation Centre</i>
CT	<i>Computertomografi</i>
FIB	<i>The International federation for structural concrete</i>
NDT	<i>Non-destructive testing</i>
RILEM	<i>International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures</i>
SINTEF	<i>Stiftelsen for industriell og teknisk forskning ved Norges tekniske høgskole</i>
SKB	<i>Selvkompimerende betong</i>
SP	<i>Superplastiserende tilsetningsstoff</i>
v/c-forhold	<i>Vann-sement forhold</i>

Store bokstaver

A_c	<i>Betongens tverrsnittsareal</i>
D	<i>Betongens densitet</i>
$E_{c,s}$	<i>Stabilisert sekant elastisitetsmodulus</i>
P	<i>Punktlast</i>
F	<i>Last</i>
F_i	<i>Last ved spesifikk rissvidde</i>
F_L	<i>Last tilhørende proporsjonalitetsgrense</i>
L	<i>Lengde</i>
M_{Rd}	<i>Dimensjonerende momentkapasitet</i>
M_{Ri}	<i>Moment ved spesifikk rissvidde</i>
V	<i>Volum av beholder</i>

Små bokstaver

b	<i>Tverrsnittets bredde</i>
---	-----------------------------

d	<i>Tverrsnittsdimensjon</i>
d_g	<i>Maksimal tilslagsstørrelse</i>
f_c	<i>Betongens trykkfasthet</i>
f_{cd}	<i>Dimensjonerende betongtrykkfasthet</i>
f_{ck}	<i>Betongens karakteristiske trykkfasthet</i>
f_{cm}	<i>Betongens midlere trykkfasthet</i>
f_{ct}	<i>Spaltestrekkfasthet</i>
$f_{ct,fl}$	<i>Bøyestrekfasthet</i>
$f_{ct,L}^f$	<i>Proporsjonalitetsgrense</i>
f_{ctk}	<i>Betongens karakteristiske aksialtrekkfasthet</i>
$f_{ftd,res,2,5}$	<i>Dimensjonerende rest strekkfasthet</i>
$f_{ftk,res,2,5}$	<i>Karakteristisk rest strekkfasthet</i>
$f_{R,i}$	<i>Rest bøyestrekfasthet</i>
$f_{Rk,i}$	<i>Karakteristisk rest bøyestrekfasthet</i>
h	<i>Tverrsnittshøyden</i>
m_1	<i>Vekten av tom beholder</i>
m_2	<i>Vekten av beholder fylt med betong</i>

Greske bokstaver

α	<i>Effektivitetsindeks</i>
γ_{cf}	<i>Fiberens materialfaktor</i>
Δt	<i>Tidsperiode</i>
δ	<i>Nedbøyning</i>
ϵ	<i>Tøyning</i>
ϵ_a	<i>Gjennomsnittstøyning ved øvre spenning</i>
ϵ_b	<i>Gjennomsnittstøyning ved nedre spenning</i>
θ_z	<i>Vinkel til fiber formet med z-aksen</i>
σ	<i>Spenning</i>
σ_a	<i>Øvre spenning</i>
σ_b	<i>Nedre spenning</i>
σ_p	<i>Forhåndslast spenning</i>

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Betong er et av de mest viktige og mest brukte konstruksjonsmaterialene i dagens samfunn og er kjent for sin høye motstand mot trykk, brann, aldring og mekaniske påkjenninger [1]. Betong kan benyttes i plasstøpte konstruksjoner, så vel som prefabrikkerte elementer, da den kan formes og brukes i flere ulike geometrier. På grunn av samfunnets stadige utvikling øker etterspørselen av nye materialer og sammensetninger for å forenkle arbeidsdagen og forbedre økonomien. Det er ønskelig å bruke minst mulig tid på utførelsen av arbeider da tid koster penger, og man er alltid på jakt etter løsninger som gir like gode, eller bedre, resultater som samtidig er tidsbesparende.

Bruken av fiber som erstatning for, eller i tillegg til, vanlig armering er i nyere tid blitt en vanlig måte å øke strekkstyrken til betongen på [2]. Det er mange fordeler med å bruke fiber, blant annet at de tilsettes den ferske betongblandingen slik at kostnad og tid reduseres for støpeprosessen. Duktiliteten til betongen blir også forbedret i herdet fase. Effektiviteten til fiberen avhenger av mange faktorer, inkludert deres slankhet, fordeling i elementet og, ikke minst, deres orientering. Selv i tilfeller hvor betongelementer har samme dimensjoner og samme fibermengde, vil variasjonene i fiberorientering ha en sterk påvirkning på elementets kapasitet.

En utfordring ved bruk av fiber som armering er den manglende tilgjengeligheten av standarder med tilstrekkelige dimensjoneringsgrunnlag. Dermed er det vanskelig å vise til sikker bruk av fiberarmering i bærende konstruksjonselementer. I Norge finnes det i dag ingen standard for fiberarmerte betongkonstruksjoner, men SINTEF og Norsk Betongforening har publisert to forslag til retningslinjer, COIN Project rapport 29 [3] og NB38 [2]. Likevel er det fortsatt en lang veg å gå når det kommer til utviklingen av metoder og designprosedyrer for å forbedre påliteligheten av fiberarmert betong som konstruksjonsmateriale.

1.2 Formål

Formålet med oppgaven er å studere og utføre testing på fiberarmerte betongelementer med ulike fibermengder og dimensjoner for å undersøke fiberorienteringen i prøvestykkene og dens påvirkning på kapasiteten til prøvestykket. Det er også ønskelig å prøve ulike støpemetoder i et forsøk på å kontrollere fiberorienteringen.

Målet er at oppgaven skal kunne bidra til utvikling av mer pålitelige dimensjoneringsmetoder ved bruk av fiberarmerte betongkonstruksjoner slik at anvendelsen av dette byggematerialet vil være tryggere og mer økonomisk. For å undersøke fibrenes utnyttelse i henhold til publiserte veiledninger vil det utføres en beregningsdel som sammenlignes med resultatene gitt fra prøveforsøk.

1.3 Innhold

Første del av oppgaven består av et litteraturstudium om fiberarmert betong. Det er vesentlig for å oppnå god kunnskap om materialene og deres oppførsel, egenskaper, styrker og eventuelle svakheter. I denne delen vil også dimensjoneringsmetoden for momentkapasitet ved bruk av fiberarmerte betongkonstruksjoner basert på tilgjengelige retningslinjer bli presentert. Videre vil oppgaven inneholde en beskrivende prøveplan hvor de ulike materialvalgene og selve proporsjoneringen av betongen vil bli forklart. Testene og analysene utføres på prøvestykker med tre ulike fibermengder og to ulike utforminger, da det er interessant å utforske hvordan disse faktorene påvirker konstruksjonsegenskapene til betongelementene i fersk- og herdet fase. Alle testresultater presenteres i den siste delen av oppgaven, hvor det også utføres evaluering og diskusjon av gitte resultater. Konklusjonen presenteres helt i slutten av oppgaven.

For å få en håndterbar prøvematrix ble oppgaven begrenset med tanke på valg av betongresept og, ikke minst, antall prøvestykker som kunne utstøpes og testes. Da noen prøvestykker skulle sendes til CT-skann, ble også dimensjonene på disse begrenset i forhold til kapasiteten til testmaskinen.

2 Generelt om betong

Betong er et av de mest viktige og mest brukte byggematerialene som er på markedet. Den er godt egnet i konstruksjoner på grunn av sin høye kapasitet mot trykk, samt høy motstand mot brann, aldring og ytre påkjenninger. Det er et byggemateriale som er miljøvennlig og kan brukes til flere formål da den kan støpes i flere ulike former. Hvilken fasthetsklasse som benyttes styres av valget av miljø eller bestandighetsklasse for betongen, da den må tilfredsstillende krav innen miljø, anvendelsesområde, ønske om bearbeidbarhet og styrke.

Betong er en sammensatt blanding som i hovedsak består av sement, vann, stein og sand, men som oftest også inneholder tilsetningsstoffer og tilsetningsmaterialer. Alle de ulike elementene i en betongblanding vil i ulik grad påvirke betongens egenskaper både i fersk og herdet fase. Hvilken påvirkningsgrad elementene har på betongen avhenger av mengde og type material som blir brukt. Sammensetningen av materialer bestemmes ut fra ønskelige egenskaper til den ferdige betongkonstruksjonen.

Betong har lav strekkapasitet, og strekkraftene som fører til opprissing av betongen i en konstruksjon må dermed overtas av en form for armering som støpes inn i konstruksjonen. De mest brukte armerings typene er som følger:

- Tradisjonell slakkarmering
- Spennarmering
- Fiberarmering

2.1 Sement

I Norge er Portland sement den mest brukte sementtypen. Produksjonen av Portland sement startet i 1892 da selskapet A/S Christiania Portland Cementfabrikk bygget sitt sementanlegg i Slemmestad. Selskapet slo seg senere sammen med to andre sementprodusenter og dannet firmaet Norcem A/S. Norcem A/S har i dag to operative sementanlegg i Norge. De ligger i Brevik og Kjøpsvik, og er blant de mest moderne og energieffektive anleggene i Europa.

CEM I og CEM II er de to mest brukte sementtypene. De blir ofte referert til som Portland sement og Portland-sammensatt sement. CEM II tilsettes pozzolane i form av flyve aske, silika eller slagg for å oppnå ønskede egenskaper i betongens herdet fase. Pozzolane er avfallsstoffer fra andre industrier, det er dermed en stor fordel å kunne benytte dette til videre utvikling av nye materialer.

Kornstørrelsen til sement er i gjennomsnitt ca. 0,02 mm. Sement har høy finmalingsgrad, som bidrar til å gi sementen en hurtig varme- og fasthetsutvikling [4].

2.2 Tilslag

Tilslag er en samlebetegnelse for sand- og steinmaterialer som blir brukt i betong. Tilslaget inndeles i ulike fraksjoner for lettere å finne den sammensetningen som gir ønskede egenskaper til både fersk- herdet- og hard betong. Sand er den minste fraksjonen og har normalt graderingen 0-8mm. Grovere tilslag, som grus, har videre gradering fra 8mm og større. Det finnes også produsenter som har flere fraksjoner med mindre graderinger, for eksempel 0-4mm og 4-8mm. Dette gir muligheten til å kombinere ulike graderingskurver for ulike formål ved bruk av betong. [4]

Tilslag opptar mellom 65%-75% av volumet til betongblandingen. Da er det naturlig at deres egenskaper og variasjoner i størrelse påvirker egenskapene og kvaliteten til betongen. Tilslaget kan påvirke støpeligheten, komprimerbarheten og porøsiteten til betongen, samt føre til slumptap og tap av styrke. Økonomien til produsenten kan også påvirkes av egenskapene til tilslagene. Brukes det tilslag med lavt vannbehov og god støpelighet, vil sementmengden kunne reduseres. Det betyr at det kan lønne seg å bruke dyrere tilslag med høyere kvalitet, enn å bruke billigere alternativer med dårligere kvalitet og større variasjoner i egenskapene. [4]

2.3 Tilsetning

Betongteknologien har de siste tiårene gjennomgått en signifikant utvikling, spesielt de siste årene ved introduksjonen av nye og mer effektive tilsetningsstoffer. Kjemikalier tilsettes betongen under blandingsprosessen for å manipulere betongegenskapene i fersk- og herdet fase. Effekten av tilsetningsstoffene avhenger av flere faktorer, blant annet hvilken type og mengde tilsetningsstoff, tidspunkt for tilsetning, temperatur og innblandingstid.

Tilsetningsstoffer deles inn i ulike klasser basert på deres påvirkning på betongen. Den største gruppen av tilsetningsstoffer brukt i Norge består av plastiserende og superplastiserende stoffer. Deres hovedoppgave er å dispergere sementpartikler i vannet. Partiklene fordeles fordi overflatekreftene og friksjonen mellom sementpartiklene reduseres. Ved å tilsette plastiserende eller superplastiserende tilsetningsstoffer, vil støpeligheten og komprimerbarheten til betongen kunne økes vesentlig uten å påvirke styrken til betongen. Et annet alternativ kan også være å redusere vanninnholdet i betongblandingen samtidig som støpeligheten og komprimerbarheten forblir uendret. Dette kommer av tilsetningsstoffenes vannreducerende egenskaper. Overdosering av P eller SP kan derimot føre til separasjon og vannutskillelse.

Målet med tilsetningsstoffer er å gjøre en god betong enda bedre. Normalt vil ikke en dårlig betong kunne forbedres ved tilsetning av kjemikalier. [4]

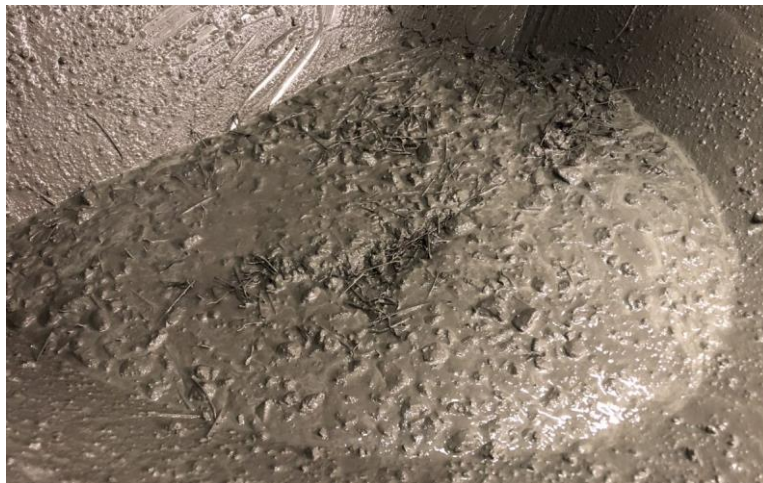
2.4 Egenskaper til fersk betong

Støpelighet er det konseptet som best beskriver egenskapene til fersk betong. Konseptet består av tre ulike begreper som til sammen beskriver betongens støpelighet.

- **Stabilitet** defineres som betongens evne til å forbli homogen gjennom hele den ferske fasen, både når den ligger i ro eller når den er i bevegelse på grunn av transport, komprimering eller fylles i former. Om betongen har en lav stabilitet kan blandingen separeres.
- **Mobilitet** defineres som betongens evne til å bevege seg når den blir påført en last. Høy mobilitet vil si lav intern friksjon mellom partiklene, lav evne til å feste seg til

overflater og lav motstand mot intern flyt. Dette oppnås ved høyt vanninnhold og lavt innhold av grove tilslag.

- **Komprimerbarhet** defineres som betongens evne til å fylle formene og slippe ut innkapslet luft. Mengde energi som må tilføres for å komprimere betongen tilstrekkelig avhenger av betongens mobilitet, sjokkabsorpsjonsevne, densitet, antall luftlommer og stabiliteten til luftlommene. [4]



Figur 2.1: Fersk betong

Egenskapene til den ferske betongen avhenger først og fremst av hvilke råmaterialer som benyttes og hvordan de sammensatt vil fungere. For å enklere beskrive forholdet mellom støpelighet og design brukes en modell kalt «partikkel-matriks modellen». Modellen deler den ferske betongblandingen i en partikkel fase og en matriks fase basert på materialenes egenskaper. Partikkel fasen består av alt tilslag med en partikkelstørrelse større enn 0,125mm og matriks fasen består av alle flytende komponenter samt alt tilslag med partikkelstørrelse mindre enn 0.125mm. Matriks fasen karakteriseres som en tung, viskøs væske, mens partikkel fasen karakteriseres som friksjonsdominerende. [4]

Vann/semnt-forholdet er viktig for å oppnå ønsket flyt egenskaper til matriksen. V/c-forholdet er masseforholdet mellom vann og bindemiddel, hvor bindemiddel tilsvarer sement, tilsetninger og finstoff mindre enn 0.125mm. Kompresjonsstyrken og varigheten til betongen påvirkes i stor grad av masseforholdet.

2.5 Utvikling av fasthet og modenhet

Sement og vann reagerer med hverandre igjennom en eksoterm prosess som gjør at det oppstår en hydratisering. Under denne sementhydratiseringen vil det bli utviklet varme, og allerede de første dagene etter støping vil temperaturen i betongen stige. Raten av hydratisering er sterkt temperaturavhengig. Det vil si at ved høye temperaturer vil hydratiseringen foregå raskere og gi rask styrkeutvikling, mens ved lavere temperaturer vil hydratiseringsraten reduseres. Sementens varmeutviklingsforløp avhenger også av den kjemiske sammensetningen og finheten til sementen, og ulike tilsetningsstoffer kan påvirke utviklingen under hydratisering. [4]

"Herdeteknologi", er et uttrykk introdusert av Freiesleben-Hansen og Pedersen da de utviklet en modell som beskriver forholdet mellom varme og hydratiseringsrate. Det ble utviklet en hastighetsfunksjon, $H(\theta)$, som gir hydratiseringsrate ved en gitt temperatur sammenlignet med referansetemperaturen på 20 grader. Funksjonen ble utviklet ved å ta utgangspunkt i Arrhenius ligningen. [4]

Betongens virtuelle alder, eller betongens modenhet, kan defineres ved å beregne hydratiseringsprosessen ut ifra hastighetsfunksjonen. Modenheten til betongen avhenger av hydratiseringsrate, som igjen avhenger av temperaturen. Dersom temperaturen i betongen er den samme som referansetemperaturen, oppnår betongen 7 dagers modenhet nøyaktig 7 dager etter støping. Oppbevares derimot betongen i en høyere temperatur kan det gå raskere. Da kan samme modenhet oppnås etter eksempel 5 dager. [4]

Modenheten til betongen kalkuleres som tidsintegralet av hastighetsfunksjonen fra miksetid til testetid. Man vet generelt ikke temperaturutviklingen som en matematisk funksjon av tid, men som en målt temperatur historie. De numeriske kalkulasjonene av modenhet gjøres ved å dele en gitt temperatur historie opp i n tidsintervaller. For hvert tidsintervall beregnes gjennomsnittstemperaturen og man kan fra Tabell 2.1 definere ekvivalent verdi av funksjonen. Modenheten defineres ved å multiplisere $H(\theta)$ med Δt . [4]

$$M = \int_{t_0}^t H(\theta) dt, \rightarrow \theta = \theta(t) \quad 2.1$$

$$M = \sum_{t_0}^t H(\theta) \Delta t_i \quad 2.2$$

Temp. [°C]	<u>H(θ)</u>	Temp. [°C]	<u>H(θ)</u>
0	0,15	20	1,00
1	0,17	21	1,05
2	0,20	22	1,10
3	0,23	23	1,15
4	0,26	24	1,20
5	0,29	25	1,26
6	0,33	26	1,32
7	0,37	27	1,38
8	0,41	28	1,44
9	0,45	29	1,51
10	0,50	30	1,57
11	0,54	31	1,64
12	0,59	32	1,72
13	0,64	33	1,79
14	0,70	34	1,87
15	0,75	35	1,95
16	0,80	36	2,04
17	0,85	37	2,13
18	0,90	38	2,22
19	0,95	39	2,31
20	1,00	40	2,41

Tabell 2.1: Typiske verdier for funksjonsrate $H(\theta)$ i temperaturspennet 0-40 °C

2.6 Selvkomprimerende betong

Selvkomprimerende betong (SKB) er et begrep bruk til å beskrive type betong og plasseringsteknikk for utstøping av betongelementer. Under plasseringsprosessen skal det ikke tilføres noe komprimeringsenergi i form av vibrering eller ved bruk av komprimeringsstav. Gravitasjonen skal ta seg av komprimeringen av betongen. Denne komprimeringsmetoden er sterkt avhengig av betongens flyteegenskaper. [4]

Partikkel-matriks modellen brukes ofte for å beskrive SKB, og for denne type betong vil alltid matriksfasen være dominerende. Egenskapene til den ferske betongen kontrolleres av egenskapene til de to fasene og mengdeforholdet mellom dem. For å beskrive konsistensen til en SKB blir synk-utbredelsesmål den mest effektive metoden da betongens synk-mål er veldig høyt. [4]

SKB egner seg godt ved bruk av fiberarmering på grunn av et større innhold av finstoff og mindre tilslagsstørrelse i selve blandingen. Fibere har ofte en lang, slank form og har et høyt overflateareal, og en stor mengde finstoff vil dermed gi fiberen bedre heft samt en jevnere fordeling.

SKB med innhold av fiber stiller spesielle proporsjoneringskrav. Proporsjoneringen vil være avhengig av fibertype og fibermengde, men det vil uansett være viktig å strebe etter en jevn tilslagsgradering uten partikkelsprang for å oppnå en stabil fiberarmert SKB. [3]

3 Fiberarmert betong

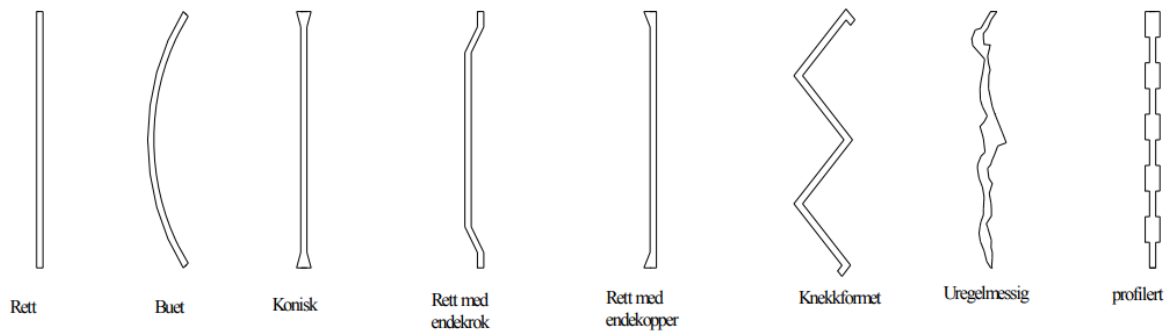
Fiberarmert betong er betong tilsatt fibermaterialer for å forbedre konstruksjonens, eller konstruksjonselementets, strukturelle integritet. Egenskapene til den ferdige betongen bestemmes av hvilket fibermaterial det brukes, geometrien til fiberen, fiberdistribusjonen, fiberorienteringen og tettheten til fibrene. Når det dimensjoneres for fiberarmerte konstruksjonselementer i dag, går man ut ifra at fibrene er jevnt fordelt og har en tilfeldig orientering.

Mengden av tradisjonell armering kan reduseres ved bruk av fiberarmering. Dette resulterer i en mer effektiv byggeprosess da plassering av vanlig slakkarmering er en svær tidkrevende prosess. En annen fordel med fiberarmerte betongkonstruksjoner er at betongarbeidere vil kunne unnsnippe diverse belastningsskader og helseplager som følge av tunge løft av armeringsstenger og vibreringsutstyr, samtidig som de slipper å binde like mye jern. Bruk av fiberarmert betong som konstruksjonsmateriale er kostbart, men med redusert arbeidsmengde og dermed reduserte arbeidstimer vil det være mer lønnsomt å velge denne typen materiale.

En stor mengde materialer bruker fiber til å forbedre deres materialeegenskaper. Slik har det vært siden oldtiden. Eksempler på forbedrede materialeegenskaper kan være strekkstyrke, motstand mot riss, bestandighet og slitasjemotstand. De siste tiårene har det blitt utført betydelig forskning og utvikling av fiberarmerte materialer som er behandlet i flere forskningsrapporter og lærebøker. [3]

3.1 Fibertyper

Det finnes flere ulike typer fiber som alle gir ulike egenskaper til betongen. De mest brukte typene i dag er stål-, glass-, syntetisk og naturlige fibermaterialer. På byggeplass anvendes det i hovedsak stål- og syntetisk fiberarmert betong. Fiberens utforming kan være veldig variert. De kan være korte eller lange, tykke eller tynne, rektangulære eller sirkulære etc. Hvilken form som egner seg best, avhenger av bruksområde og må deklarerer av leverandør.



Figur 3.1: Vanlige fiberformer [3]

Viktigheten av dimensjon, form og lengde på fiberen er stor. Er fiberen veldig tynn og kort, avtar effektiviteten bare noen timer etter utstøping. Det skjer fordi fiberen utnyttes til å redusere sprekker forårsaket av svinn som oppstår under herdeprosessen. Hvis det egentlige målet er å øke betongens strekkfasthet må fiberens lengde økes.

For beskrivelse av fiberen brukes ofte slankhetstall. Slankhetstallet oppgir forholdet mellom fiberens lengde og diameter. Mengde fiber tilsatt betongen måles som en prosentandel av det totale volumet og betegnes som en volumfraksjon.

De ulike fibre klassifiseres enten som mikro- eller makrofiber avhengig av hvilken størrelse de har. Det finnes god dokumentasjon av mikrofiber, men de har ingen konstruktiv effekt. Likevel krever til eksempel statens veivesen at denne typen fiber skal benyttes i alle tunneler med tanke på brann. Plast- og stålfiber klassifiseres som makrofiber og har begge en konstruktiv effekt. Av de to typene er det stålfiber som har den største effekten.

3.1.1 Stålfiber

Stålfiber egner seg godt for homogen innblanding i betong og kan være rette eller formede stenger av stål. NS-EN 14889-1 angir spesifikasjoner, definisjoner og krav til stålfiber for armering av betong. De ulike stålfibertypene klassifiseres i følgende grupper. [3]

I:	cold-drawn wire	kaldtrukket ståltråd
II:	cut sheet	Stanset fra stålplate
III:	melt ekstraktet	smelteslagg
IV:	shaved cold drawn wire	splittet kaldtrukket ståltråd
V:	milled from blocks	frest fra stålblock

Tabell 3.1: Klassifisering av stålfiber [3]

Stålfiberen benyttet i betongkonstruksjoner i Norge er kaldtrukket ståltråd. De har et slankhetstall mellom 0,45-0,65, er mellom 35-60mm lange og er designet med forankring i begge ender for at fiberen skal få god heft i betongen.



Figur 3.2: Stålfiber med endeforankring

Sett fra et teoretisk synspunkt, er det ønskelig med en stålfiber som har høyest mulig slankhet da fiberens effektivitet øker med slankheten. Fra et praktisk synspunkt derimot, er en veldig slank fiber vanskelig å blande inn i betongen. Risikoen for at det oppstår fiberballing, som gjør betongen til en ikke-homogen blanding, øker ved bruk av veldig slanke stålfibere.

I en fiberarmert betong er det ikke den samme overdekningen til armeringen som foreligger ved bruk av tradisjonell stangarmering. Dette medfører at fibere kan plassere seg nær overflaten. Fibere langs overflaten kan eksponeres for stoffer i nærmiljøet som igjen kan føre til korrosjon av fiberen. Synlige rustflekker kan komme dukke opp på overflaten og porer dannes i betongen. Det oppstår ikke nok krefter til at det vil gi avskalling på betongen, men det vil påvirke strukturen til konstruksjonen. Derfor er det viktig å overflatebehandle betongen der det er ønskelig med en jevn og fin overflate.

3.1.2 Glassfiber

Glassfiber er tynne fibrer som fremstilles fra smeltet glass. Glass er i utgangspunktet er stivt materiale, men har svært elastiske egenskaper frem til det når bristepunktet. De bøyelige fibre er også svært spenstige og vil gå tilbake til sin naturlige rette form så fort bøyelasten blir fjernet [5]. Glassfiberarmert betong vil bidra til å gi gode resultater både når det kommer til estetikk og økonomi da mulighetene for ulike byggetekniske løsninger er uendelige. Glassfiberen er også sikker mot korrosjon [5].

3.1.3 Syntetisk fiber

Den vanligste typen av syntetisk fiber er polymerfiber. De er laget av polymermateriale og kan være rette eller formede stykker. Spesifikasjoner, definisjoner og krav til polymerfiber for armering av betong er angitt i NS-EN 14889-2. Polymerfiber deles inn i 2 klasser og klassifiseres etter lengden til fiberen. Klasse 1 er for fiber med en lengde mindre eller lik 30mm og klasse 2 er for fiber med en lengde større enn 30mm. Fibrene i klasse 1 er ikke dokumentert for konstruktiv bruk, som vil si at de ikke kan brukes i lastbærende konstruksjonselementer, og fibre i klasse 2 kan bare brukes for det de er dokumentert for. Dersom bæreevnen til fibre skal utnyttes over et lengre tidsrom må egenskapene til fibre være godt dokumentert da det er stor usikkerhet rundt fibrenes egenskaper under langtidslast. Polymerfiber har også et lavt smeltepunkt som må tas hensyn til om fiberen skal utnyttes konstruktivt. [3]

Elastisitetsmodulsen til syntetiske fibre er ofte lav og fibre vil dermed ikke øke styrken til betongen noe særlig. De vil derimot øke seigheten og motstanden mot ytre påvirkninger til konstruksjonen ved å absorbere energi.

Polyolefin	pva
Polypropylen	polyakrylsk
Polyetylen	aramider
Polyester	nylon
Blandinger av materialer gitt over	

Tabell 3.2: Polymermaterialer [3]

Polypropylen er et vanlig og mye brukt polymerfiber materiale. Fiberen har en ujevn overflate bestående av riller eller knotter for å forsikre god heft i betongen og har ofte en varierende lengde mellom 30-50mm.

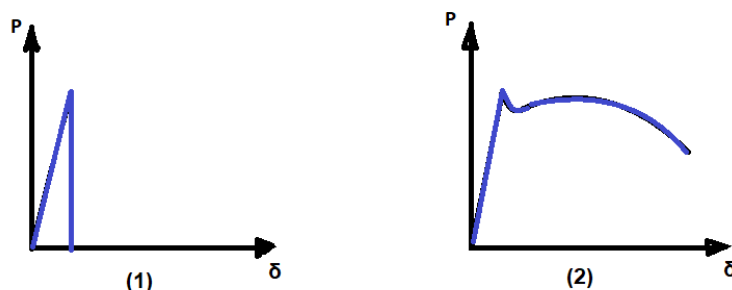
3.1.4 Basaltfiber

Basaltfiber er en naturlig fibertype laget av basalt, som er den vanligste steintypen i jordskorpen. Basalt er dannet ved rask avkjøling av lava på jordens overflate. Den kjemiske sammensetningen til basalt er den samme som glassfiber, men basalt har høyere karakteristisk styrke. Den har også høy slitestyrke og høyt smeltepunkt.

En annen fordel ved å bruke basaltfiber er at den ikke vil korrodere. Man trenger da ikke ta spesielle hensyn til overdekning eller overflatebehandling.

3.2 Fiberens virkemåte

Fiberens hovedoppgave er å forbedre de duktile egenskapene til konstruksjonen. Under herdeforløpet til den ferdig støpte betongen vil det kunne oppstå riss som følge av svinn i betongen. Etter oppstått riss vil fiberen aktiveres og ta over strekkraftene fra betongen. En stor fordel med bruk av fiber i betong er at hele tverrsnittet til konstruksjonen vil være armert. Risikoen for sprekkdannelse vil da reduseres og man eliminerer avskalling på betongen som oppstår ved korrosjon av armeringsstålet.



Figur 3.3: Forhold mellom påsatt last og deformasjon for (1) uarmert betong og (2) fiberarmert betong

Som nevnt i kapittel 2, har betong lav strekkfasthet. En betongkonstruksjon uten armering vil dermed gå til brudd ved oppstått riss. I en fiberarmert betongkonstruksjon vil derimot fiberen holde betongen sammen ved å utnytte sin egen strekkfasthet og konstruksjonen beholder sin bruksegenskap etter oppstått riss. Figur 3.3 viser forholdet mellom påsatt last og deformasjon for uarmert- og fiberarmert betong når det oppstår riss i konstruksjonen. Denne oppførselen er grunnen til at effekten av fiber i betong forklares med reststrekkfasthet, siden deres egenskaper utnyttes etter opprissing.

Når man skal lage en betongkonstruksjon ved bruk av fiberarmering er det viktig å følge NS-EN 13670 – Utførelse av betongkonstruksjoner for å sørge for at utførelse og kontrollering gjøres på riktig måte. I det fiber tilsettes betongen, vil blandingen være mer sårbar for feil og etter betongen er ferdig utstøpt er det ingen enkel oppgave å kontrollere om det er brukt riktig mengde fiber eller riktig fibertype.

3.3 Effekt av fiber i betong

Vanligvis blir fiberarmering benyttet i betongkonstruksjoner for å kontrollere sprekker og riss forårsaket av plastisk svinn og uttørningssvinn. Permeabiliteten til betongen og blødning av vann kan også reduseres ved tilsetning av fiber. Fibrene vil ha en innvirkning på betongens bøyestrekfasthet, men ikke i så stor grad at de vil kunne erstatte bruken av vanlig slakkarmering. Det må dokumenteres riktig dersom fiberen skal være i stand til å erstatte det totale armeringsarealet i en konstruksjon. B. Krogedal [6] gir i samarbeid med Velde en tommelfingerregel om mengde slakkarmering som tilsvarer hvilke mengder stålfiber, som fremstilt i Tabell 3.3.

Armeringsmatte	Mengde stålfiber
1 matte k 257	20 kg
2 matter k 275	25 kg
2 matter k 335	30 kg

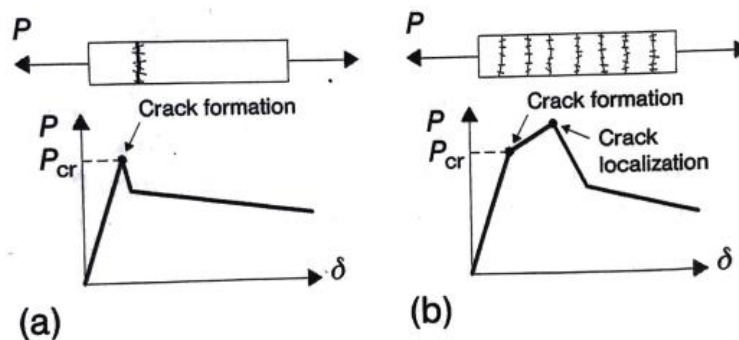
Tabell 3.3: Tommelfingerregel for å erstatte slakkarmering med stålfiber [6]

En utfordring ved å erstatte all slakkarmering med fiberarmering er at konstruksjonselementet blir sprøere. Når en konstruksjon som har kontinuerlig armering blir påført ytre påkjenninger, vil den gi klar forvarsel før den går til brudd. Armeringen vil også holde konstruksjonen sammen etter oppstått brudd. Ved bruk av fiberarmering som eneste armeringstype kan i verste fall konstruksjonen kollapse uten forvarsel.

Betongens kompresjonsstyrke og elastiske egenskaper blir ikke betydelig påvirket av fiberen, med mindre en høy prosentandel tilsettes. Mengde- og retningsfordeling av fibrene kan by på problemer ved bruk av fiberarmert betong. Områder rundt utsparinger eller områder med høye lastkonsentrasjoner er de mest kritiske. For å opprettholde kapasiteten i nevnte områder, bør det benyttes noe tradisjonell armering eller en større fibermengde. [7]

Dersom elastisitetsmodulsen til fiberen er høyere enn matriksen, vil fibrene hjelpe med å bære lastene ved å øke strekkstyrken til materialet. Det er bekreftet at tilsetning av små, jevnt fordelte og tett plasserte fibere vil bidra til å øke betongens statiske og dynamiske egenskaper. Oppgaven til fiberen i betongen er å ta over strekkspenningene som oppstår ved lastpåføring, noe stålfiber er svært egnet til. Allerede ved svært små rissvidder, ofte før risset i det hele tatt er synlig, vil stålfiberen ta over strekkspenningene. [8]

Avhengig av fiberens sammensetning, vil fiberarmert betong vise hard eller myk oppførsel under enaksiell spenning. En styrkereduksjon oppstår etter første riss ved myk oppførsel og det tillates ikke flere riss. Det tillates derimot flere riss før konstruksjonen feiler ved hard oppførsel. [7]



Figur 3.4: Myk (a) og hard (b) oppførsel ved aksiell spenning [7]

3.4 Fiberens bruksområde

Grunnet utfordringer med å kontrollere fiberens orientering i betongen ved utstøping og begrenset erfaring med bruk av fiber som armering, er anvendelsen av fiber i konstruksjoner foreløpig begrenset til gulv på grunn og sprøytebetong for bergsikring. Det benyttes også i diverse konstruksjonselementer, men som regel ikke uten tradisjonell armering i tillegg. Byggebransjen er en konservativ bransje, og det mangler tilstrekkelige regelverk og veiledninger knyttet til fiberarmert betong.

For industrigulv på grunn blir ofte utfordringen å stå imot de store og gjentakende lastene påført ved bruk av truck og lift, hvor både økt styrke mot rissutvikling og økt varighet på gulvet er høyt ønskelig [9]. Stålfiber har vist seg spesielt godt egnet for bruk i industrigulv. Ved å benytte fiber istedenfor kontinuerlig slakkarmering, oppnås fordeler som spart arbeidstid, større fugefrie arealer og mindre rissutvikling [3]. Fiber har også fått en stor rolle innenfor tunellforinger. Tuneller utsettes ofte for jord- og vanntrykk, og fibre vil kunne bidra til å øke kapasiteten mot svinn og redusere permeabiliteten [9].

3.5 Regelverk

Standarder og regelverk finnes overalt. Standardisering er svært viktig da det innebærer systematisering innenfor næringslivet, men også innenfor samfunnet som en helhet. Arbeid og utførelser blir mer effektive dersom det finnes en standard måte å operere på. [10]

Det må være tilrettelagt godkjente regelverk og veiledninger dersom fiberarmert betong skal brukes i konstruksjoner. Det er ulike krav til et bygg eller en konstruksjon vedrørende bæreevne, bestandighet, støpelighet og fasthet. Regelverkene er til stede for å kunne kontrollere at konstruksjonen oppfyller de gitte kravene.

Norske regelverk og veiledninger

Det finnes ingen norsk standard for bruk av fiberarmert betong enda. Det finnes noen få veiledninger, men det ville vært mest hensiktsmessig dersom det fantes et nasjonalt dokument som var i stand til å henvise til gjeldende regelverk. Det finnes flere internasjonale

regelverk for fiberarmert betong, men fortsatt ingen som dekker hele behovet. Norsk standard er, per dags dato, under utvikling, og den planlegges publisert i nær fremtid.

SINTEF og NTNU har i regi av forskningsprogrammet *Concrete Innovation Centre (COIN)* gjort omfattende tester for bruk av fiberarmert betong i ulike bærende konstruksjonsdeler for å få en raskere materialutvikling. Ut fra dette prosjektet har de utviklet COIN Project rapport 29 som er et forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner. Behovet for retningslinjer innen bruk av fiber i betong har økt kraftig de siste tiårene og dette behovet er bakgrunnen for rapporten som ble publisert i 2011.

Norsk betongforening publiserte i 2020 den nye veiledningen NB38 «Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner» etter utførelser av mer omfattende forsøk rundt bruken av fiberarmert betong. Deres hensikt med den nye publikasjonen var å gjøre det enklere og trygt å anvende fiberarmering i bærende konstruksjoner og på den måten bidra til at potensialet i denne typen betongkonstruksjoner utnyttes i langt større grad enn tidligere [11].

Selve materialsiden innenfor fiber ligger et skritt foran da det foreligger standarder for både stål- og polymerfiber.

- Stålfiber: EN 14889-1
- Polymer: EN 14889-2

Dersom det skal benyttes andre materialer som fiber i betong, må de deklarereres på samme måte som stål- og polymerfiber.

Internasjonalt regelverk

Det foreligger ingen eurocode som kan benyttes ved fiberarmering i betong, men flere land har utviklet veiledninger og retningslinjer som kan brukes i sammen med EC2 del 1-1 [12] til å dimensjonere bærende betongkonstruksjoner.

Den tyske veiledningen ble publisert i 2010 og skulle angi egenskaper og veiledning for bruk av stålfiber i betongkonstruksjoner. Før publikasjonen av denne standarden, ble fiberarmert betong hovedsakelig benyttet i industrigulv i Tyskland slik som i Norge.

Den svenske og den danske veiledningen ble publisert i 2014. Den danske veiledningen baseres på den tyske, med små endringer, og omhandler design og utførelse ved støping av stålfiberarmert betong. Den svenske veiledningen omhandler derimot dimensjonering av bygg og andre anleggsarbeid ved bruk av stål- og polymerfiberarmert betong.

FIB Model Code ble opprettet i en tid hvor det ikke var noen form for internasjonale veiledninger. Den ble dannet ved initiativ fra *International Committee for Concrete* (CEB) og *International Federation for Prestressing* (FIB). FIB står for *The International Federation for Structural Concrete* og er en prenormativ organisasjon. En prenormativ organisasjon vil si en organisasjon som arbeider med den innledende fasen av eksperimentell forskning, hvor resultatene fra forskningen brukes videre til utviklingen av standarder og retningslinjer. Målet med å opprette FIB Model Code var å skape en basis for utvikling av fremtidige veiledninger og presentere en ny utvikling innen strukturelle materialer og betongkonstruksjoner. Store mengder av arbeidet har derfor handlet om nyskapende materialer som fiberarmert betong [7].

En annen organisasjon som arbeider med å fremme et vitenskapelig samarbeid i områder med byggkonstruksjoner og materialer er RILEM. RILEM er en mer teoretisk organisasjon sammenlignet med FIB, og har utviklet RILEM TC-162-TDF som er en veiledning for beregning av stålfiberarmerte strukturelle konstruksjoner. RILEM og FIB er begge organisasjoner som har stor påvirkningskraft og som har arbeidere i flere land. Dermed kan de følge utviklingen fra flere ulike deler av verden.

3.6 Dimensjonering av fiberarmert betong

Ved dimensjonering av konstruksjonselementer skal det tas hensyn til de dimensjonerende situasjonene som kan oppstå, slik at funksjonen til konstruksjonen vil bli oppfylt. Det er også viktig at situasjonene er varierte og alvorlige slik at alle forhold som kan inntreffe under utførelse og bruk av konstruksjonen dekkes ved dimensjonering.

I denne oppgaven skal det dimensjoneres for momentkapasitet for prøvestykker med ulik fibermengde, og beregningene gjøres i henhold til COIN Project rapport 29 [3].

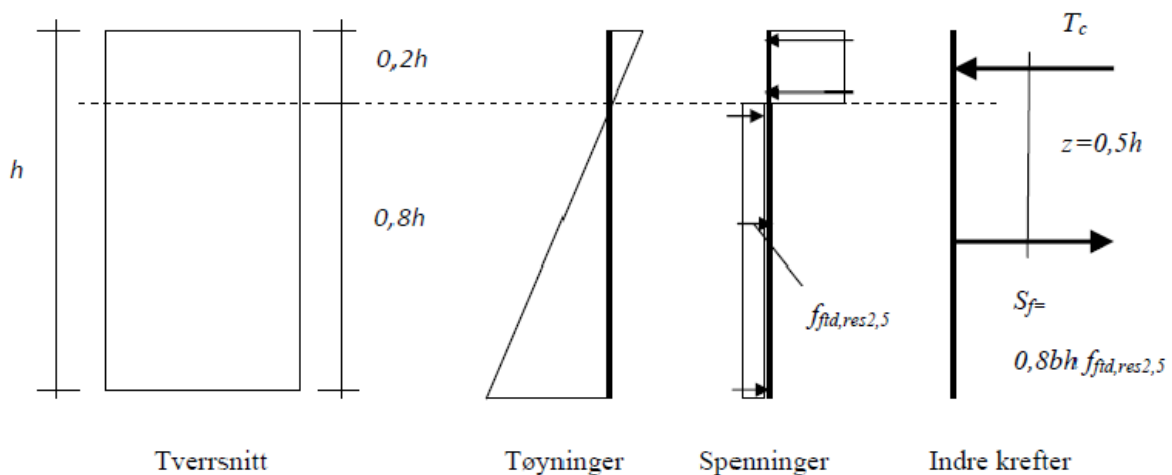
3.6.1 Momentkapasitet

Kapasiteten til et fiberarmert konstruksjonselement kan i henhold til COIN Project rapport 29 [3] forenklet beregnes ved å anta at rest strekkfastheten virker over $0,8h$ og at den indre momentarmen er $0,5h$. Momentkapasiteten for et rektangulært tverrsnitt er da gitt ved:

$$M_{Rd} = 0,4 f_{ftd,res,2,5} b h^2 \quad 3.1$$

Hvor $f_{ftd,res,2,5}$ er dimensjonerende rest strekkfasthet som beregnes fra karakteristisk rest strekkfasthet med materialfaktoren $\gamma_{cf} = 1,5$.

$$f_{ftd,res,2,5} = f_{ftk,res,2,5} / \gamma_{cf} \quad 3.2$$

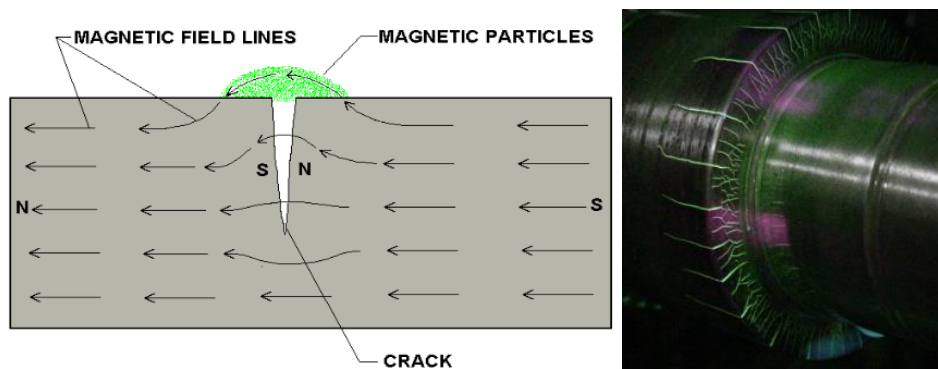


Figur 3.5: Spennings- og tøyningsfordeling for rektangulært tverrsnitt utsatt for ren bøyning [3]

Dersom karakteristisk rest strekkfasthet er høyere enn $2,5\text{N/mm}^2$ må trykksonehøyden i tverrsnittet bestemmes ved å kreve aksiell likevekt mellom strekkresultanten og en spenningsblokk med høyde lik 80% av trykksonen og spenning f_{cd} .

4 Ikke-destruktiv testing (NDT)

Non-destructive testing (NDT) klassifiseres som bruken av ikke-destruktive teknikker for bestemmelse av integriteten til et materiale, en komponent eller en konstruksjon eller kvantitative målinger av egenskapene til et objekt. Det vil si å utføre en inspeksjon eller måling uten bruk av ødeleggende verktøy og uten å redusere de nåværende fysiske egenskapene til objektet.



Figur 4.1: Magnetisk partikkeltesting

Prøvingen kan foretas inne i laboratorier, i verksteder eller ute, og kan også utføres selv om det aktuelle objektet er i bruk. Ved ikke-destruktiv testing benyttes en rekke vitenskaper og teknologier, ofte i kombinasjoner. Noen eksempler kan være materialteknikk, fysikk, kjemi eller elektronikk.

4.1 Bruksområder

Det benyttes NDT-metoder i nesten alle steg i produksjonen eller livssyklusen til en komponent. I dag brukes moderne NDT-metoder til å sørge for at materialets eller konstruksjonens integritet og pålitelighet opprettholdes. De brukes også til å kontrollere produksjonen, redusere produksjonskostnadene og til å sørge for uniformt kvalitetsnivå.

Før byggeprosessen er igangsatt brukes NDT-metoder til å assistere i produktutvikling, undersøke og sortere materialer og til å overvåke, forbedre eller kontrollere produksjonen av byggematerialene. Under bygging benyttes NDT-metoder til å sørge for kvaliteten til materialene og sammenføyningsprosessen igjennom hele byggeprosessen, og drifts NDT-

inspeksjoner benyttes til å sørge for at konstruksjonen i brukstilstand fortsetter å ha den nødvendige integriteten slik at dens nytte er ivaretatt og at menneskers sikkerhet ikke svekkes [13].

NDT-metoder som røntgen/CT og ultralyd kan fungere som hjelpemidler for å gjennomføre avanserte analyser av både materialer og konstruksjonselementer uten å forårsake noen skader. Dersom en illustrasjon av innsiden av et konstruksjonselement blir tilgjengelig, kan diverse ujevnheter eller defekter oppdages og analyseres. Man kan også observere og analysere sammensetningen og fordelingen av ulike delmaterialer i konstruksjonselementer laget av sammensatte byggematerialer slik som betong. Deretter kan samme element testes for kapasitet og man har mulighet til å forklare og utforske hvorfor oppførselen eller kapasiteten er slik den er. En så kompleks analyse vil ikke være mulig dersom prøvestykkene testes med destruktive prøvemethoder.

4.2 Testmetoder

Det finnes flere ulike NDT-metoder, og hvilken metode som benyttes avhenger av flere faktorer. Hva som skal testes, hvilket materiale det er laget av og hvor testen skal utføres er bare noen av faktorene som er med å bestemme hvilke metoder som egner seg best. Likevel er noen metoder mer vanlige enn andre, og de seks mest vanlige metodene er som følger:

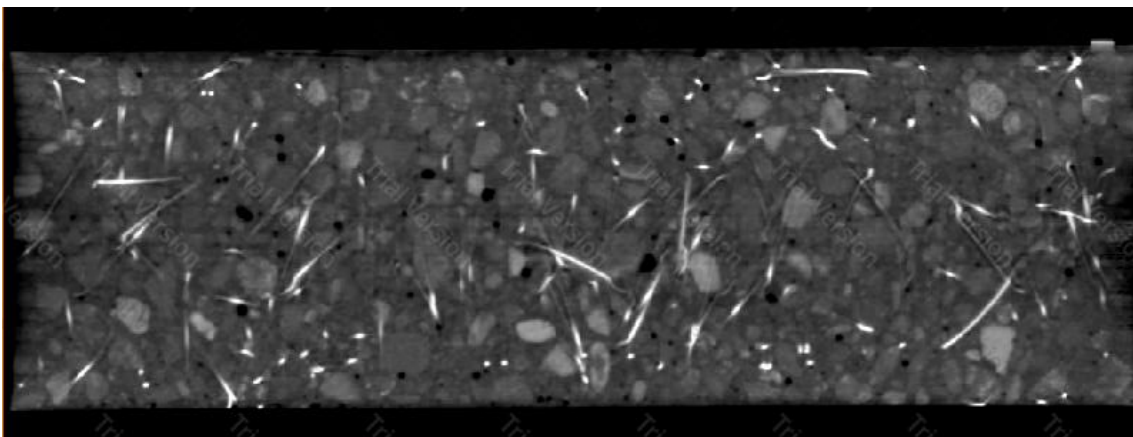
- **Visuell inspeksjon.** Mest grunnleggende og vanlige NDT-metode. Omhandler hva man kan se med det blotte øye, eller ved hjelp av kamera, forstørrelsesglass m.m.
- **Flytende penetrant testing.** En farget væske tilføres overflaten til prøvestykket og vil trekke inn i eventuelle feil. Overflødig væske tørkes bort, og den gjenværende væsken vil kunne oppdages med det blotte øye.
- **Magnetisk partikkeltesting.** Baseres på bruk av magnetfelt og magnetiske partikler. Anvendes hovedsakelig for å påvise overflate- eller underoverflateskader.
- **Ultralyd.** Lydbølger med høy frekvens introduseres inn i et materiale og reflekteres tilbake fra overflater eller feil.
- **Eddy Current testing.** En liten overflatesonde skannes over en overflatedel i et forsøk på å finne sprekker.

- **Radiografi testing.** Røntgen eller computertomografi.

I denne oppgaven er det brukt computertomografi (CT) for testing av prøvestykker. Metoden er beskrevet i neste delkapittel, kapittel 4.3.

4.3 Computertomografi (CT)

CT-teknologien har blitt brukt som et verktøy for diagnostisk bildebehandling innen medisin helt siden 1970-tallet. Videreføringen av denne teknologien til studiet av materialer har skjedd i nyere tid og enda mer nylig ble den tatt i bruk innenfor forskning på betong. Utstyret består av en røntgenkilde og -detektor og prøvestykket plasseres mellom dem. Kilden sender røntgenstråler som mottas av detektoren. Alle komponentene inni prøvestykke vil dempe noe av strålingen og hvor mye stråling som dempes vil variere med densiteten til de ulike materialene. Hver densitetsverdi blir videre overført til en gråskala som går fra svart til hvitt, hvor svart representerer de laveste densitetene og hvitt representerer de høyeste densitetene. Til slutt vil man få et svart/hvitt bilde som viser innsiden av prøvestykket.



Figur 4.2: CT-bilde av fiberarmert betong

For å kunne rekonstruere et 3D-bilde av prøvestykket, vil både røntgenkilden og -detektoren rotere rundt en vertikal akse mens røntgenutslippet fortsetter. Prosessen repeteres til prøvestykket har blitt eksaminert over 360° rotasjon slik at hele tverrsnittet kan studeres.

Foreløpig er det bare CT-teknologi som er i stand til å gi en visualisering av fibrenes eksakte posisjoner inni en herdet betongmasse.

4.3.1 Avizo computer software

Avizo Software er et avansert program for å utforske og forstå materialstrukturer og materialegenskaper i et bredt spekter av materialvitenskapelige forskningsområder og for mange ulike materialtyper. Fra enkel visualisering og måling, til avansert bildebehandling, kvantifisering, analysering og rapportering, gir Avizo Software et omfattende multimodalitets digitalt laboratorium for avansert 2D/3D materialkarakterisering og kvalitetskontroll [14].

Thermo Fisher Scientific sin Avizo Software er en alt-i-ett-bildeanalyseplattform som tillater visualisering, prosessering og kvantifisering av fibermaterialer. Avizo Software muliggjør påvisning av produksjonsprosesskader som matrisesprenging, fiber/matrise avbinding eller fiberbrudd. Mangler i materialet kan kvantifiseres lokalt (hulrom, sprekker) eller globalt (tverrsnittsforsvinninger eller feiljustering) [14].

XFiber – Fibersporing og redigering

Denne utvidelsen gir spesifikk støtte for analyse av fibre, filamenter, tunneler og andre nettverk eller tre-lignende strukturer. XFiber-utvidelsen gir automatiske, halvautomatiske og interaktive verktøy for å hjelpe segmenterings- og analyseprosessen. Noen av verktøyene er som følger [14]:

- Automatisk segmentering av individuelle fibre med høy oppløsning
- Viktige retninger for fibre med lav oppløsning
- Kvantifisering som kontaktpunkt eller avstand til nærmeste nabo
- Fiberformsstatistikk (diameter, lengde, skjevhet, areal, volumfraksjon, tverrsnittets omkrets og areal)
- Statistikk i forhold til fibrenes tetthet
- 3D-tegning av fiberens orientering på en sfære eller halv sfære med egenskaper kartlagt som farge og høyde
- Avanserte fiberfiltreringsmoduler

5 Prøveplan og testmetoder

Alle prøvestykker skal støpes på laboratoriet ved Universitetet i Stavanger. For hver ulike fibermengde lages det to like blandinger.

Prøvestykker omtalt som søyler er, og skal testes som, bjelker. Årsaken til at disse omtales som søyler er for å skille de ulike støpemetodene brukt for de ulike prøvestykkene. For mer utfyllende informasjon om støpemetodene, se delkapittel 5.5.

Prøvestykker støpt fra blanding 1 med gitte fibermengder:

Prøvestykke	Dimensjoner lxbxh [mm]	Fiberinnhold volumprosent	Betong	Antall
Terning uten fiber	150x150x150	-	B35	3
Terning med 0,4% fiber	150x150x150	0,4	B35	3
Terning med 0,8% fiber	150x150x150	0,8	B35	3
Terning med 1,2% fiber	150x150x150	1,2	B35	3
Sylinder uten fiber	300x150	-	B35	3
Sylinder med 0,4% fiber	300x150	0,4	B35	3
Sylinder med 0,8% fiber	300x150	0,8	B35	3
Sylinder med 1,2% fiber	300x150	1,2	B35	3
Bjelke 1	150x150x550	0,4	B35	1
Bjelke 2	150x150x550	0,4	B35	1
Bjelke 3	150x150x550	0,8	B35	1
Bjelke 4	150x150x550	0,8	B35	1
Bjelke 5	150x150x550	1,2	B35	1
Bjelke 6	150x150x550	1,2	B35	1
Søyle 1	150x150x550	0,4	B35	1
Søyle 2	150x150x550	0,4	B35	1
Søyle 3	150x150x550	0,8	B35	1
Søyle 4	150x150x550	0,8	B35	1
Søyle 5	150x150x550	1,2	B35	1
Søyle 6	150x150x550	1,2	B35	1

Tabell 5.1: Prøvestykker støpt fra blanding 1

Prøvestykker støpt fra blanding 2 med gitte fibermengder:

Prøvestykke	Dimensjoner lxbxh [mm]	Fiberinnhold volumprosent	Betong	Antall
Terning uten fiber	150x150x150	-	B35	3
Terning med 0,4% fiber	150x150x150	0,4	B35	3
Terning med 0,8% fiber	150x150x150	0,8	B35	3
Terning med 1,2% fiber	150x150x150	1,2	B35	3
Plate 1	480x480x100	0,4	B35	1
Plate 2	480x480x100	0,4	B35	1
Plate 3	480x480x100	0,8	B35	1
Plate 4	480x480x100	0,8	B35	1
Plate 5	480x480x100	1,2	B35	1
Plate 6	480x480x100	1,2	B35	1

Tabell 5.2: Prøvestykker støpt fra blanding 2

5.1 Proporsjonering og materialer

For at prøvestykkene skal kunne sammenlignes, er det viktig at samme betongresept benyttes på alle prøvestykker. I samarbeid med professor Il Kjell Tore Fosså ved UiS ble det valgt en betongresept på B35 som egner seg godt til bruk i kombinasjon med fiber.

Sementen som skal benyttes er Norcem anleggsement FA som er en spesialsement for anleggskonstruksjoner. Den egner seg godt til bruk i alle eksponerings-, bestandighets- og fasthetsklasser og er spesielt tilpasset norske forhold. Noen av fordelene ved bruk av denne sementer er at den gir relativt lav varmeutvikling, den har meget gode støpelighets- og bestandighetsegenskaper og kan benyttes i kombinasjon med alkalireaktivt tilslag [15].

Stålfiber skal benyttes som erstatning for kontinuerlig armering. Stålfiberen som tilsettes betongen er DE 50/1,0 N, levert av Krampe Harex. Det første tallet i benevnelsen gir lengden til fiberen i mm og det andre tallet er diameteren i mm. Det skal benyttes tre ulike fibermengder, 0,4%, 0,8% og 1,2%. Ved tilsetning av store fibermengder som 1,2%, kan det oppstå problemer i form av fiberballing da det vil eksistere en øvre kritisk fibermengde for betongblandingen [3].

Det er ønskelig med en robust betongblanding for å forsøke å unngå problemer som separering eller fiberballing. Dermed er matriksvolumet satt til 360 l/m³ og masseforholdet, kjent som v/c-tallet, satt til 0,38. Ved bruk av selvkomprimerende fiberarmert betong, må det også benyttes tilsetningsstoffer som reduserer vannbehovet eller øker flyteegenskapene uten å ødelegge stabiliteten [3]. Noe luft i betongen er ønskelig slik at det er mulighet for bevegelse ved temperaturendringer. Luftinnholdet i blandingen er satt til 2%.

Tabell 5.3 viser resepten som skal benyttes for betongblanding tilsatt 0,4% fiber, alle reseptene finnes i vedlegg B.

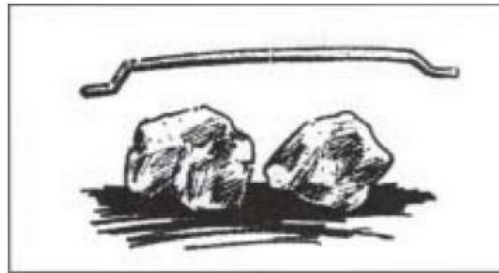
Batch no	0,4% fiber Blanding 1				
Quality requirements	B35 M40				
Batch volume:	100 liter				
Materials	Mix kg/m³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Anlegg FA	471,6	47,155			47,155
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	179,2	17,919		-4,347	13,572
Absorbed water	30,7	3,066			3,066
Sand 0/8 mm Årdal	885,1	88,509	4,0	3,540	92,050
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	820,7	82,072	0,5	0,410	82,482
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	4,7	0,472	84	0,396	0,472
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Stålfiber	31,2	3,120			3,120
	0,0	0,000			0,000

16,638

Tabell 5.3: Eksempel på proporsjonering

5.2 Tilslag

For fiberarmert betong spesifiserer NB38 [2] at fiberlengden skal være minst to ganger maksimal tilslagsstørrelse, d_g , fordi fibrene skal føre strekkspenningene forbi tilslagskornene.



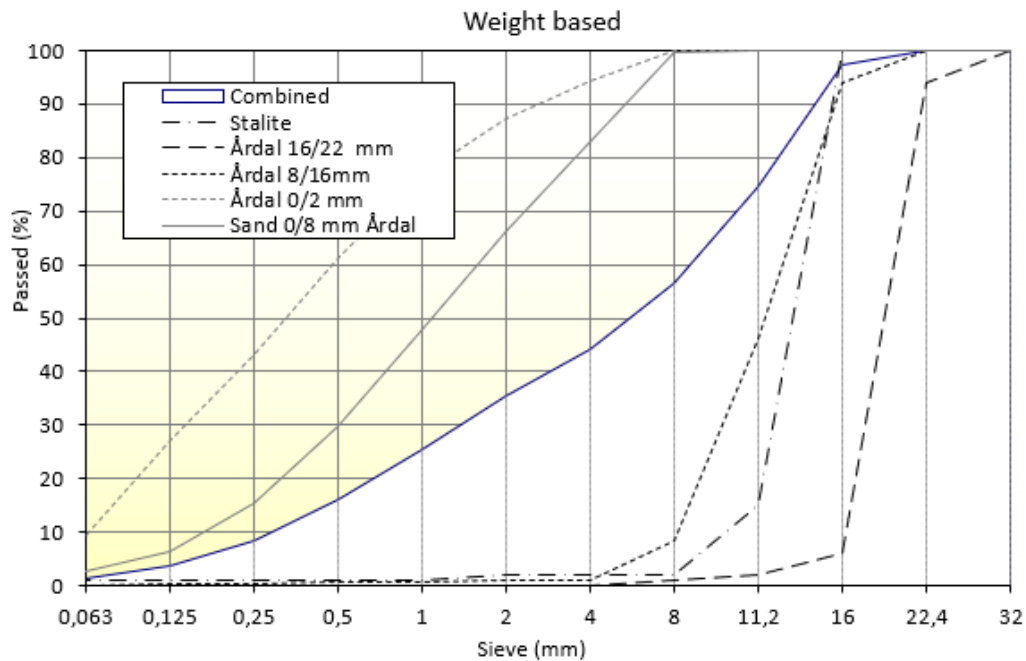
Figur 5.1: Fiberlengden skal være minst 2 ganger maksimal tilslagsstørrelse

Ved å bruke stålfibere med lengden 50mm, skal d_g ikke overskride 25mm. I denne oppgaven benyttes tilslag levert fra Årdal med tilslagsstørrelsene 0-8mm og 8-16mm, hvor da d_g er 16mm.

Combined aggregate

Fraction	Name	Density [kg/m ³]	Abs. Mois [%]	Alk. react. Sv[%]	Chlorids [%]	Batch		Use
						volume	weight	
I	Sand 0/8 mm Årdal	2650	3,0	0,0	0,00	0,523	0,525	ok
II	Årdal 0/2 mm	2650	0,5	0,0	0,00	0,000	0,000	
III	Årdal 8/16mm	2690	0,5	0,0	0,00	0,477	0,475	ok
IV	Årdal 16/22 mm	2700	0,5	0,0	0,00	0,000	0,000	
V	Stalite	1420	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VI	Test	2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VIII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
IX	Test	2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
X		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
Sammensatt		2669		0,0	0,00	1,000	1,000	

Tabell 5.4: Tilslag inndeling



Figur 5.2: Fordelingskurve for tilslag brukt i betongblandingen

5.3 Tilsetningsstoff

Ved bruk av fiberarmert betong er det anbefalt at betongen er selvkomprimerende [3]. Dynamon SX-N er et superplastiserende stoff som ofte brukes i selvkomprimerende betong. Det er et svært effektivt tilsetningsstoff basert på modifiserte akrylpolymerer som er anvendelig i all betong for å øke støpeligheten og/eller redusere tilsatt vannmengde.

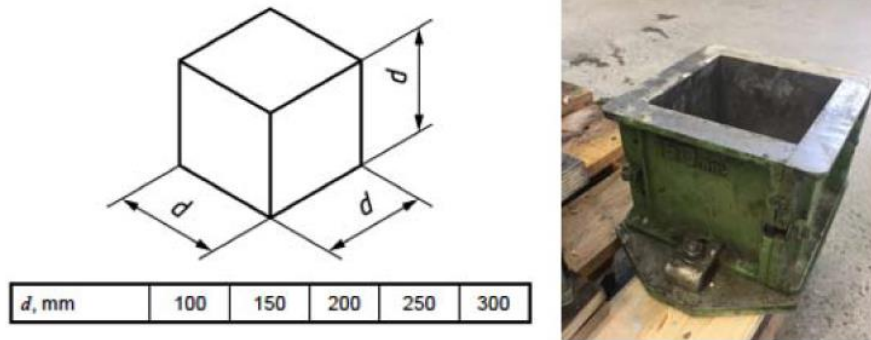
For betongblandingene som skal støpes til denne oppgaven er mengden av tilsetningsstoffet satt til 1% av bindemidlene.

5.4 Forberedende arbeid

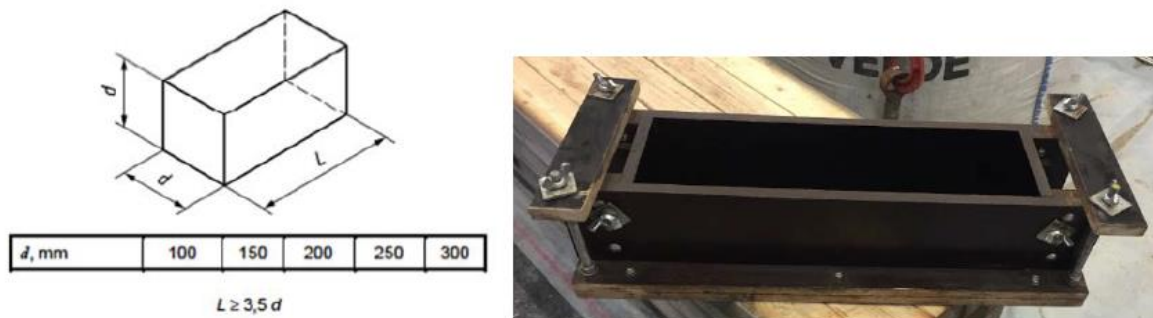
Støpingen på UiS skal deles inn i syv omganger fordelt på to dager. Det er én resept uten fiber, to resepter med 0,4% fiber, to resepter med 0,8% fiber og to resepter med 1,2% fiber, derfor blir det blandet syv resepter.

Prøvestykkene skal støpes i standardiserte former. NS-EN 14651 [16] viser til standardiserte former med dimensjonene 150x150x550mm for testing av rest bøyestrekfasthet. Bjelker og

søyler støpes i henhold til standarden. Da det er anbefalt at prøver med fiberinnhold bør ha et tverrsnittsareal på 150x150mm, blir terninger støpt i former på 150x150x150mm.



Figur 5.3: Støpeform for terning 150x150x150mm [6]



Figur 5.4: Støpeform til bjelke 150x150x550mm [6]

For støping av plater blir det ikke benyttet standardiserte former da dette ikke foreligger. Dimensjonene velges som 480x480x100mm med hensyn på begrensningen til CT-skanneren. Platestørrelsen var i utgangspunktet ønsket som 550x550x150mm.



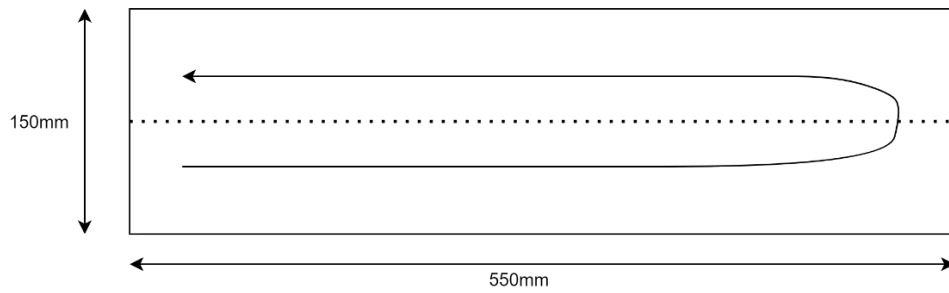
Figur 5.5: Støpeform til plate 480x480x100mm

5.5 Støpemetode

Ulike støpemetoder skal testes ut for å undersøke om fiberorienteringen kan kontrolleres. Det er ønskelig med en ensrettet fiberorientering i lengderetning for maksimal utnyttelse av fibre [3].

Bjelker

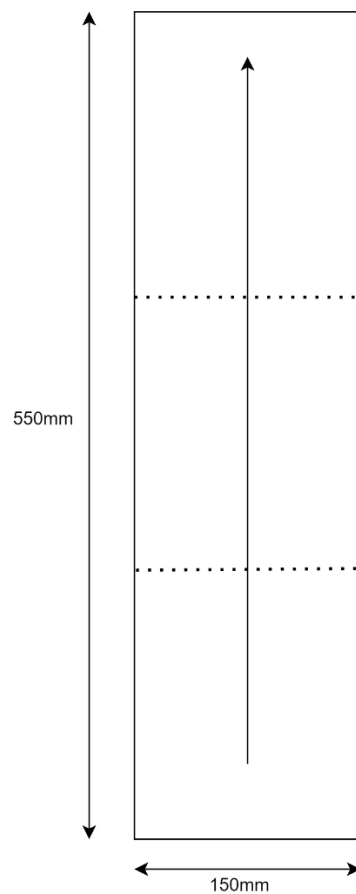
Prøvestykkene omtalt som bjelker skal støpes i horisontal retning og i to lag. Betongen skal helles i formen fra en ende til den andre med riktig betongmengde slik at halvparten av formen fylles. Deretter skal betongen helles fra motsatt side av formen og tilbake med riktig mengde betong slik at hele formen fylles. Det er viktig at utførelsen foregår med konstant hastighet og at betongen fylles i formen fra samme helningsvinkel. Etter formen er full, skal fem komprimeringer påføres i hvert hjørne og for hver tiende cm langs kantene med en manuell vibratorstav. Selv om det ikke skal være nødvendig å bruke vibratorstav ved SKB, gjøres dette for å forsikre jevn utfylling av formene. Figur 5.6 viser en illustrasjon av støpemetoden, hvor en pil representerer støperetning.



Figur 5.6: Illustrasjon av støpemetode for bjelker

Søyler

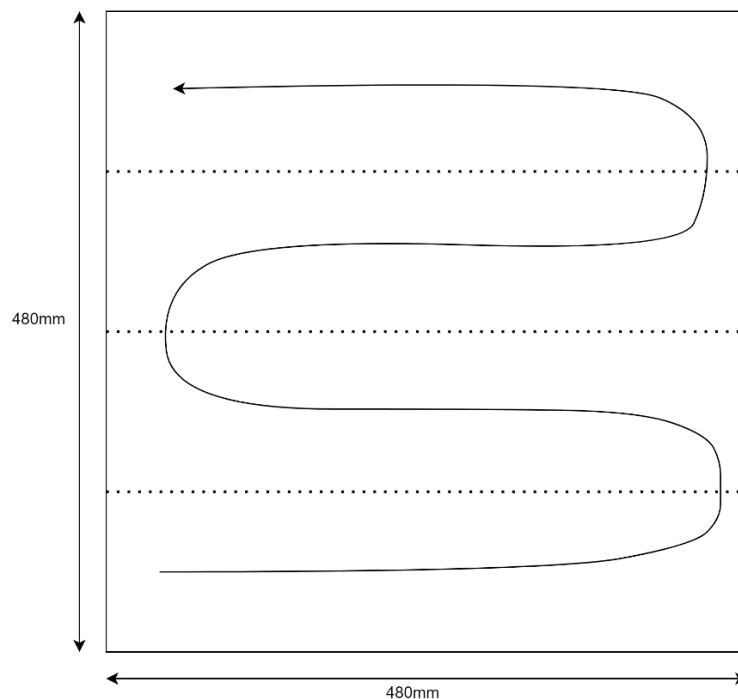
Prøvestykkene omtalt som søyler skal støpes i vertikal retning og i tre omganger. Første tredjedel av formen fylles opp og fem komprimeringer påføres i hvert hjørne ved å bruke en manuell vibratorstav. Prosessen gjentas ved de neste to tredjedelene helt til formen er full. Figur 5.7 viser en illustrasjon av støpemetoden, hvor en pil representerer støperetning.



Figur 5.7: Illustrasjon av støpemetode for søyler

Plater

Støpemetoden som skal brukes for plater er lignende den metoden som benyttes for bjelker. Da platehøyden er 100mm, trengs det ikke to lag for å fylle formen. Et hjørne markeres som starthjørne og betongen helles i formen med konstant hastighet og konstant helningsvinkel. Betongen fylles i formen fra en side til den andre helt til formen er full. Etter formen er full, skal fem komprimeringer påføres i hvert hjørne og for hver tiende cm langs kantene med en manuell vibratorstav. Figur 5.8 viser en illustrasjon av støpemetoden, hvor en pil representerer støperetning.



Figur 5.8: Illustrasjon av støpemetode for plater

5.6 Prøving av fersk betong

5.6.1 Densitet

Densiteten til den ferske betongen bestemmes i henhold til NS-EN 12350-6:2019 [17]. En beholder som rommer ca. 8 liter fylles opp med betong og veies. Densiteten til normal betong skal etter krav ligge mellom $2000\text{-}2600\text{kg/m}^3$ og formelen for beregning av densitet er som følger:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad 5.1$$

Hvor,

D = betongens densitet – [kg/m³]

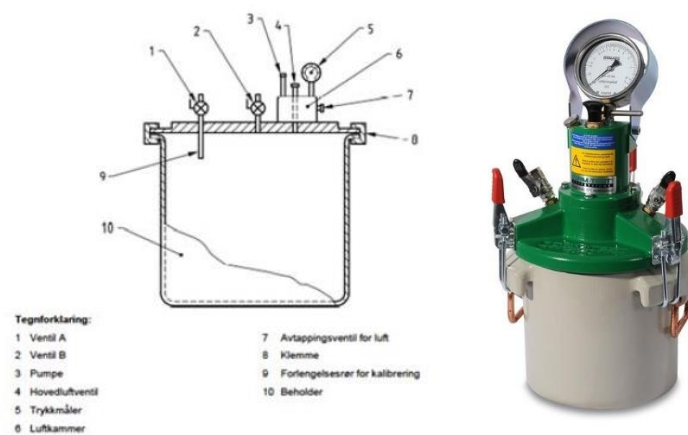
m_1 = vekten av tom beholder – [kg]

m_2 = vekten av beholder fylt med betong – [kg]

V = volum av beholder – [m³]

5.6.2 Luftinnhold

Betongens luftinnhold bestemmes i henhold til NS-EN 12350-7 [18]. Metoden som brukes er trykkmålemetoden, hvor betongen som har et ukjent luftinnhold fylles i en tett beholder der trykket utlignes. Trykkmåleren har et ur som kalibreres i prosent av luft for det resulterende trykket.

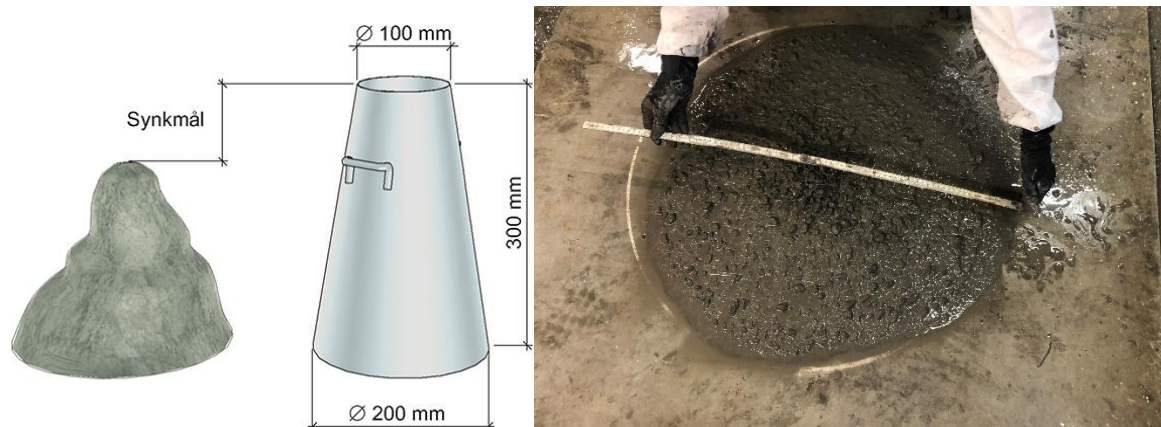


Figur 5.9: Utstyr brukt til å måle luftinnhold

5.6.3 Synkmål og utbredelsesmål

Konsistensen til en betongblanding beskrives ofte ut fra synkmål og utbredelsesmål. Metoden for prøving av synk- og utbredelsesmål blir beskrevet i NS-EN 12350-2-8 [19] [20], og er statiske metoder.

En kjege plasseres på et stort Brett og fylles opp med betong. Dersom det brukes selvkomprimerende betong, skal kjegele fylles opp i en omgang uten påføring av mekanisk komprimering. Kjegele dras deretter rett opp med en jevn hastighet. Betongens synkmål er avstanden mellom toppen av betongen på brettet og toppen av kjegele, mens betongens utbredelsesmål er diameteren til betongblandingen på brettet etter den har flyt ut.



Figur 5.10: Synk- og utbredelsesmål

Synkmål er den mest vanlige metoden for å beskrive betongens konsistens. Metoden uttrykker til en viss grad mobiliteten og komprimerbarheten til betongen. Brukes det derimot selvkomprimerende betong, er utbredelsesmål den beste metoden for å beskrive konsistensen da synkmålet blir vanskelig å måle på grunn av de gode flyeegenskapene til blandingen. Ved bruk av sistnevnte metode blir betongens utflytningsevne og mobilitet målt, og dette målet er i større grad påvirket av viskositeten til betongen. For selvkomprimerende betong er det viktig å tilstrebe en jevn tilslagsgradering uten partikkelsprang for å oppnå en stabil blanding med liten fare for separasjon [3].

I denne oppgaven blir det bare målt utbredelsesmål da betongblandingen er svært selvkomprimerende.

5.7 Prøving av herdet betong

5.7.1 Trykkfasthet

Trykkfastheten til betongen blir bestemt i henhold til NS-EN 12390-3:2019 [21]. 2 dager etter støping blir prøvestykkene tatt ut av formene og plassert i et vannbad med temperatur på 20 ± 2 grader. Trykktesting av prøvestykker skal gjennomføres 28 dager etter støping.

Prøvestykkene plasseres i en trykkmaskin hvor de blir lastet med en konstant hastighet på 0,5 MPa/s. Lasten blir påført helt til prøvestykkene ikke lenger klarer å opprettholde lasten og dermed går til brudd. Deretter blir bruddformen på prøvestykkene sjekket i henhold til standarden. Maksimumlasten registreres, og kompresjonsstyrken til betongen blir beregnet med følgende formel:

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

Hvor,

f_c = Prøvestykkets trykkfasthet [MPa]

F = Maksimum last ved brudd [N]

A_c = Tverrsnitts arealet av prøven [mm^2]

5.7.2 Spaltestrekkfasthet

Spaltestrekkfastheten til betongen bestemmes i henhold til NS-EN 12390-6:2001 [22]. Det støpes ut to sylindere fra betongblanding uten fiber, samt to sylindere for hver fibermengde. For betongblandingen med innhold av fiber vil det bli testet for spaltestrekkfasthet av blanding 1 for hver fibermengde. Prøvestykkene blir tatt ut av formen etter to døgn og lagt i vannbad med en temperatur på rundt 20°C . Spaltestrekkfastheten vil bli testet etter 28 dagers herding av prøvestykkene.

Prøvestykket plasseres i en jigg som deretter plasseres i en trykkmaskin. Prøvestykket blir påført en last med konstant hastighet på 0,05 MPa/s over et smalt område i lengderetningen helt til prøvestykket ikke lenger klarer å motstå lasten. Ved påføring av lasten vil strekkrefter

oppstå vinkelrett på trykkretningen, noe som vil føre til strekkbrudd i prøvestykket. Maksimumslasten registreres, og spaltestrekkfastheten beregnes ved følgende formel:

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

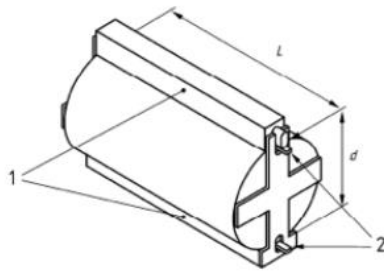
Hvor,

f_{ct} = prøvestykkets spaltestrekkfasthet – [MPa]

F = Bruddlasten – [kN]

L = Lengden av kontaktlinjen til prøvestykket – [mm]

d = prøvestykkets fastsatte tvernsnittsmål – [mm]



Figur 5.11: Sylinder plassert i jigg

5.7.3 Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodulsen til betongen bestemmes i henhold til NS-EN 12390-13:2013 [23]. Det støpes ut en sylinder fra betongblanding uten fiber, samt en sylinder for hver fibermengde. For betongblandingen med innhold av fiber blir blanding 1 for hver fibermengde brukt til utstøping av prøvestykker til prøving og bestemmelse av elastisitetsmodulus. Sylinderne blir avformet to dager etter støping og plasseres deretter i vannbad med temperatur rundt 20°C. Testen utføres etter 28 døgns herding og elastisitetsmodulsen beregnes ved følgende formel:

$$E_{C,S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad 5.4$$

Hvor,

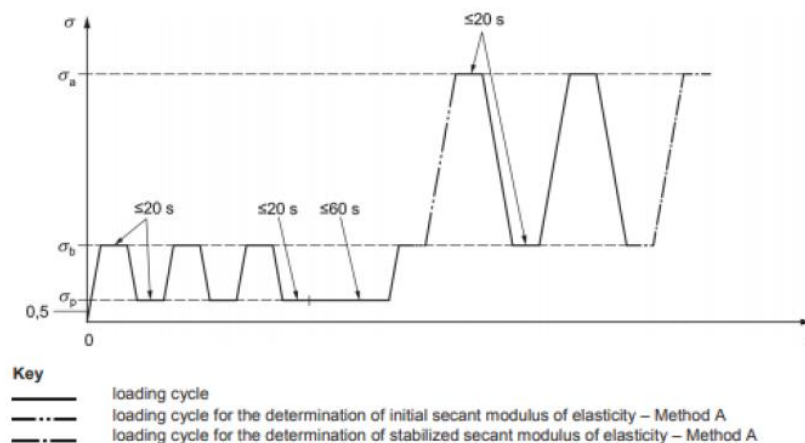
σ_a^m = målt øvre spenning

σ_b^m = målt nedre spenning

$\varepsilon_{a,3}$ = gjennomsnittstøyning ved øvre spenning for tredje lastsyklus

$\varepsilon_{b,2}$ = gjennomsnittstøyning ved nedre spenning for andre syklus

Før testen starter skal en elastisitetmåler monteres på prøvestykket og kalibreres slik at den er i nullposisjon. Deretter plasseres prøvestykke sentralt i maskinen hvor det blir utsatt for aksial kompresjon. Spenning og tøyning registreres, og sekantens stigningstall til spennings-tøynings kurven bestemmes etter tre lastsykluser.



Figur 5.12: Lastsykluser ved prøving av elastisitetsmodulusen

De forhåndsbestemte spenningene maskinen krever for å kjøre riktig test er følgende:

Øvre spenning:
$$\sigma_a = \frac{f_c}{3} \quad 5.5$$

Nedre spenning:
$$0,10 f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 f_c \quad 5.6$$

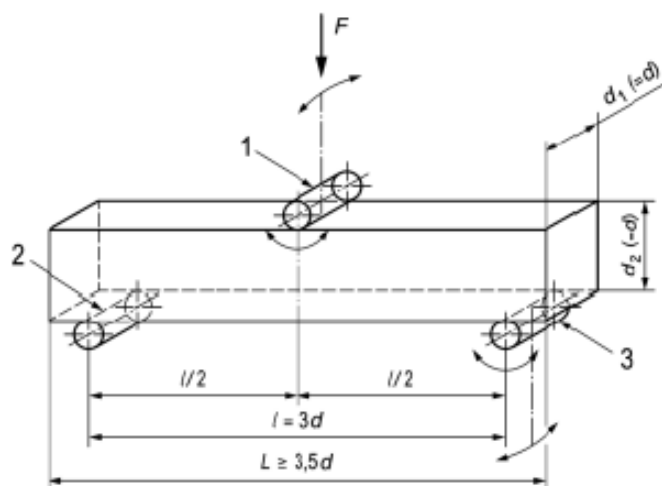
Forhåndslast spenning:
$$0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b \quad 5.7$$

Det utføres tre lastsykluser hvor maks spenning er lik nedre spenning. Spenningen vi øke fra forhåndslast spenning til nedre spenning med en konstant hastighet på 0,6 MPa/s. Nedre spenning holdes for en periode mindre enn 20 sekunder, og gjennomsnittstøyningen, $\epsilon_{b,m}$, regnes ut på slutten av perioden hvor tøyningen registreres. [23]

Etter de tre syklusene øker spenningen opp til øvre spenning med samme hastighet som sist. Spenningen holdes for en periode mindre enn 20 sekunder. Ved de to første syklusene reduseres spenningen ned til nedre spenning med hastighet 0,6 MPa/s og holdes der for en periode mindre enn 20 sekunder. Tøyningen registreres på slutten av periodene med øvre spenning i første og tredje syklus og gjennomsnittstøyningen, $\epsilon_{a,1}$ og $\epsilon_{a,3}$, beregnes. Gjennomsnittstøyningen, $\epsilon_{b,2}$, regnes ut ved å registrere tøyningen på slutten av perioden med nedre spenning i andre syklus. [23]

5.7.4 Bøyestrekfasthet

Bøyestrekfastheten skal bestemmes i henhold til NS-EN 12390-5:2019 [24]. Det benyttes en 3-punkts bøyemaskin hvor prøvestykkene plasseres på to opplagere. For at kreftene skal bli fordelt likt mellom hver opplager, skal disse være fritt opplagte.



Figur 5.13: Lastordning på prøvestykket

Den påførte punktlasten skal øke med en jevn hastighet på 0,5 MPa/s frem til prøvestykke ikke lenger klarer å motstå kraften og dermed går til brudd. Maksimumslasten registreres, og bøyestrekfastheten til betongen blir beregnet med følgende formel:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 F l}{2 d_1 d_2^2}$$

5.8

Hvor,

$f_{ct,fl}$ = bøyestrekfastheten gitt i MPa [N/mm²]

F = bruddlast gitt i N

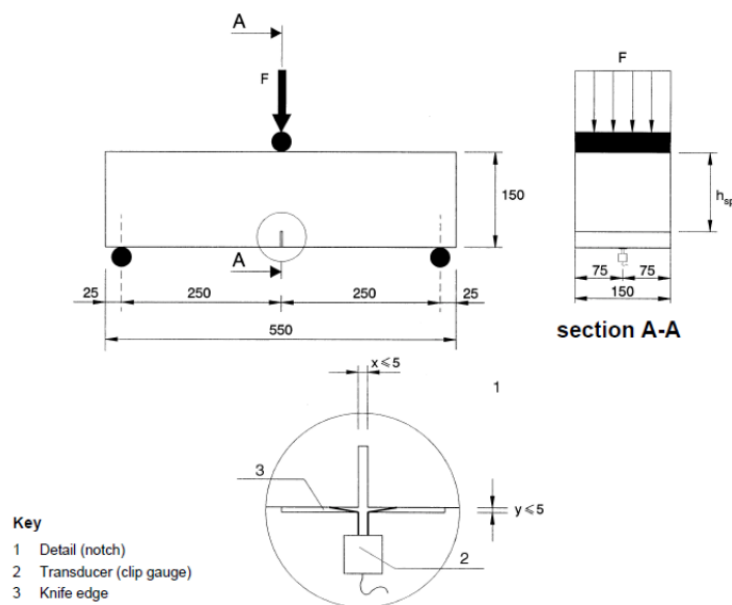
l = avstand mellom opplagere gitt i mm

d_1 og d_2 = dimensjonene av prøvestykkets tverrsnitt gitt i mm

5.7.5 CMOD test

Crack Mouth Opening Displacement, CMOD, bestemmes i henhold til NS-EN 14651:2005 [16]. Det benyttes en 3-punkts bøyemaskin hvor prøvestykkene plasseres på to opplagere. For at kreftene skal bli fordelt likt mellom hver opplager, skal disse være fritt opplagte.

Det lages et innsnitt i prøvestykkene dagen før testen skal utføres. Innsnittet skal ha en bredde på 5mm eller mindre, en høyde på 25mm ± 1mm, og skal lages ved bruk av sag. Prøvestykkene skal videre herdes tørt i romtemperatur frem til testing. [16]



Figur 5.14: Forsøksoppsett for CMOD test

Prøvestykket skal plasseres sentrert i testmaskinen. Opplagerne skal ha en avstand på 500mm fra hverandre og lastrullen justeres slik at den er plassert direkte over innsnittet i prøvestykket. En clip gauge plasseres deretter i bunn av innsnittet hvor den vil måle utviklingen av sprekåpningen. Lasten påføres slik at CMOD øker med en konstant rate på 0,05mm/min og testen kan termineres etter oppnådd sprekåpning på minst 4mm. [16]

Proporsjonalitetsgrensen bestemmes ved å lage en linje fra rissvidde 0,05mm som går parallelt med last akse i last-CMOD grafen og deretter ta den høyeste lastverdien oppnådd før denne rissvidden. Følgende formel brukes for å bestemme proporsjonalitetsgrensen [16]:

$$f_{ct,L}^f = \frac{3 F_L l}{2 b h_{sp}^2} \quad 5.9$$

Hvor,

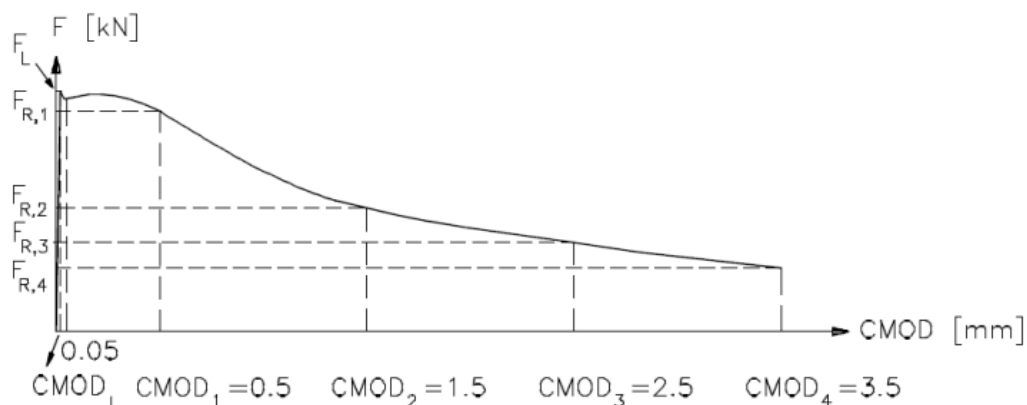
$f_{ct,L}^f$ = proporsjonalitetsgrensen [MPa]

F_L = lasten som tilhører proporsjonalitetsgrensen [kN]

l = spennvidden [mm]

b = bredden til prøvestykket [mm]

h_{sp} = avstanden mellom toppen av prøven til starten på innsnittet [mm]



Figur 5.15: Prinsipp for bestemmelse av proporsjonalitetsgrensen og last ved spesifiserte rissvidder [16]

Rest bøyestrekfasthet beregnes ved bruk av lastverdier gitt fra spesifiserte rissvidder på følgende måte [16].

$$f_{R,i} = \frac{3 F_i l}{2 b h_{sp}^2} \quad 5.10$$

Hvor,

$f_{R,i}$ = rest bøyestrekfasthet ved tilhørende rissvidder [MPa]

F_i = last ved tilhørende rissvidder [kN]

l = spennvidden [mm]

b = bredden til prøvestykket [mm]

h_{sp} = avstanden mellom toppen av prøven til starten på innsnittet [mm]

De karakteristiske verdier (0,05 kvantilen) bestemmes i henhold til COIN Project rapport 29 [3].

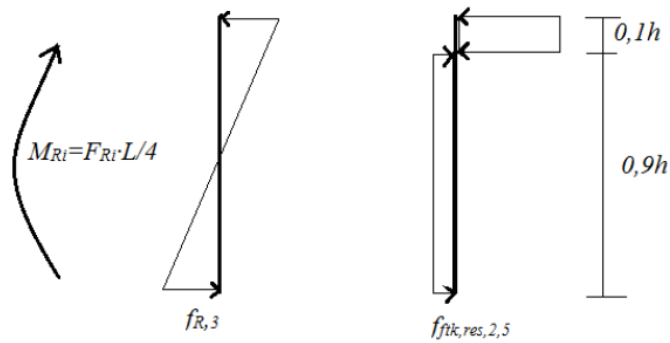
$$f_{Rk,i} = f_{R,i} - k s \quad 5.11$$

Hvor k er en koeffisient lik 1,7, og s er prøveseriens standardavvik. Da det bare er testet ett prøvestykke for hver fibermengde og støpemetode, vil standardavviket settes lik 0 i denne oppgaven.

Den karakteristiske rest strekkfastheten kan ifølge COIN Project rapport 29 [3] bestemmes videre som:

$$f_{ftk,res,2,5} = 0,37 f_{Rk,3} \quad 5.12$$

Relasjonen mellom karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekkfasthet baseres på antagelsen om at samme last vil optas av to ulike spenningsfordelinger, lineær elastisk for bestemmelsen av $f_{Rk,3}$ og ideelt plastisk for bestemmelsen av $f_{ftk,res,2,5}$.



Figur 5.16: Relasjonen mellom karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekkfasthet [3]

5.8 Computertomografi

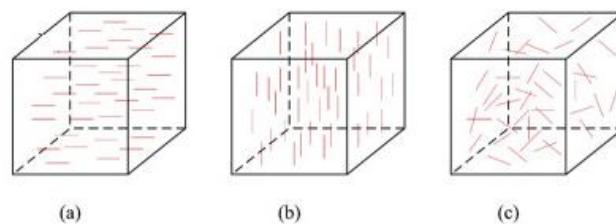
Bjelke 2,4 og 6, søyle 2,4 og 6, samt plate 1,2,3 og 5 blir sendt til Stratum Reservoir i Sandnes for gjennomføring av CT-skann. Alle bjelker og søyler som sendes til skanning vil bli sagt i forkant. Prøvestykkene er støpt med en lengde på 550mm, men skanneren har en kapasitet på maksimum 500mm. Etter anbefaling fra arbeiderne ved Stratum Reservoir blir bjelkene og søylene sagt slik at de har en lengde på 470mm. Prøvestykkene sendes til skanning 14 dager etter støping og etter 13 dager i vannbad.

Programvaren Avizo benyttes til å analysere dataene gitt fra CT-skanningen. Ved å bruke denne programvaren, er det mulig å fastslå hvilken densitetsdistribusjon de ulike tverrsnittene inneholder basert på de dempede verdiene fra røntgendektoren. Denne analysen gjøres for flere tverrsnitt fra hvert prøvestykke for å oppnå et komplett 3D-bilde av elementet. Videre deles hvert prøvestykke inn i 3D-pikslar, hvor hver piksel tildeles de passende densitetsverdiene. Det resulterende bildet vises i en gråskala hvor hver fargetone tilsvarer densitetsverdiene av pikslene slik at tettere regioner fremstilles som lysere gråtoner og mindre tette regioner fremstilles som mørkere gråtoner. Det er mulig å identifisere stålfibrene inni betongmassen da de har høyere densitet enn betongen og dermed vil fremstilles med veldig lyse gråtoner. Programvarens mange algoritmer vil videre markere alle fibere ved å spore pikslene med de korrekte densitetsverdiene.

Distansen mellom hvert tverrsnitt fra CT-skanningen er 0,5mm. Denne avstanden er mindre enn diameteren til fiberen slik at ingen fibre vil forsvinne mellom to plan.

5.8.1 Fiberorientering

Fra et strukturelt synspunkt er det viktig at fibreene er orientert i riktig retning. De bør være orientert i retningen som er konsistent med retningen av kreftene de skal bære. Dersom fibreene har samme orientering som retningen til de påførte strekkreftene, vil effektiviteten til fiberen øke og den strukturelle adferden til prøvestykke forbedres. COIN Project rapport 29 [3] viser til en høyere kapasitetsfaktor for fibre med aktuell retningsfordeling.



Figur 5.17: Eksempler på fiberorienteringer: (a) Horisontalt, (b) Vertikalt og (c) Tilfeldig

Orienteringen til alle fibreene i de ulike prøvestykkene lokaliseres ved å bruke Avizo sin utvidelsespakke, "XFiber". Når fiberorienteringene er kjent, vil det være mulig å få en oversikt over hvor mange prosent av fibreene som er orientert i riktig retning og hvilken orientering som er den dominerende for prøvestykkene. Den dominante fiberorienteringen tilsvarer vinklene som forekommer flest ganger.

5.8.2 Effektivitetsindeks

Effektivitetsindeksen til fibrene er en beskrivende faktor som sier noe om orienteringen til fibrene. Den tar utgangspunkt i orienteringen til alle fibrene i betongmassen og gir gjennomsnittsvinkelen formet med lengderetningen til prøvestykket. F. Laranjeira et al. [25] gir følgende uttrykk for kalkulering av effektivitetsindeks.

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos \theta_z \quad 5.13$$

Hvor,

α = effektivitetsindeks

N = antall fibere i prøvestykket

$\cos \theta_z$ = er cosinus til vinkelen til hver fiber formet med z-aksen

Verdien til effektivitetsindeksen kan variere mellom 0 og 1. Er verdien 0, indikerer dette at alle fibrene er orientert i xy-planet. Er derimot verdien 1, indikerer det at alle fibrene står vinkelrett på dette planet. Det vil si at fibrene er orientert parallelt med z-aksen.

Det skal beregnes en global effektivitetsindeks for hvert prøvestykke, men også en lokal effektivitetsindeks for sentraltverrsnittet til prøvestykkene. Sentraltverrsnittet er 4cm bredt og er tatt fra midten av den langsgående aksene for å forsikre at alle fibrene som passerer igjennom dette snittet fanges opp. Ved sentrert lastpåføring under kapasitetstesting av prøvestykket vil strekkraftene være høyest langs dette tverrsnittet og det er dermed ønskelig å finne en beskrivelse på fiberorienteringen i dette området.

6 Dimensjoneringsprinsipp

6.1 Bruddgrensetilstand – ULS

Med bruddgrensetilstanden til en konstruksjon menes det tilstander som er av betydning for sikkerheten til mennesker og/eller sikkerheten til konstruksjonen dersom det inntreffer konstruksjonssvikt eller sammenbrudd [26].

Fordelen med å bruke fiberarmering i betongkonstruksjoner er at de vil overta strekkrefter etter opprissing. Strekksonen kan karakteriseres ved hjelp av en forenklet metode, hvor det antas en uniform spenningsfordeling med spenning tilsvarende dimensjonerende rest strekkfasthet.

For fiberarmert betong kan, i likhet med vanlig betong, kapasiteten til konstruksjonen bestemmes ved antagelsen om at plane tverrsnitt forblir plane etter tøyning. Da kan Hookes lov brukes siden både betongen og fiberen har en lineær elastisk oppførsel. Fiberens trykksone kan også antas å være den samme som ved bruk av vanlig slakkarmering som er spesifisert i EC2 del 1-1, 3.1.4(3) [12], hvor rektangulær spenningsfordeling er brukt.

6.1.1 Momentkapasitet for fiberarmert betong

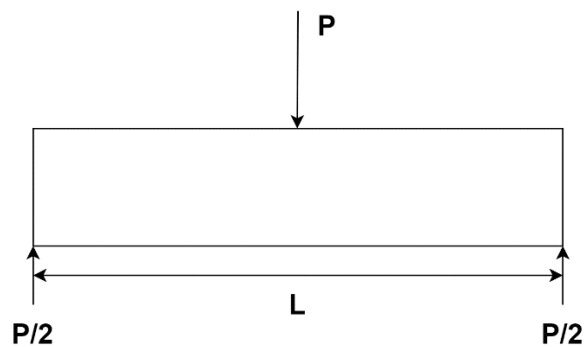
Ved dimensjonering av plateelementer er det brukt verdier for rest strekkfastheter gitt fra bjelkeelementer med tilsvarende fibermengde da samme betongresept og samme støpemetode er benyttet for platene.

Håndberegninger er utført i Mathcad og utfyllende oppsummering av beregningsresultatene finnes i vedlegg C.

Prøvestykke	Dimensjonerende momentkapasitet [kNm]
Bjelke 2	1,26
Bjelke 4	2,16
Bjelke 6	2,43
Søyle 2	0,67
Søyle 4	1,08
Søyle 6	0,84
Plate 2	1,80
Plate 4	3,07
Plate 5	3,46
Plate 6	3,46

Tabell 6.1: Dimensjonerende momentkapasitet

Når momentkapasiteten er kjent, kan dimensjonerende bruddlast enkelt kalkuleres ved å vurdere lastoppsettet til prøvestykket. Deretter sammenlignes verdien med reell bruddlast fra prøving av bøyestrekkefasthet for å sjekke hvordan dimensjoneringsmetoden samsvarer med virkeligheten.



Figur 6.1: Free-Body Diagram

$$M_{Rd} = \frac{PL}{4} \rightarrow P = \frac{4 M_{Rd}}{L} \quad 6.1$$

Prøvestykke	Dimensjonerende bruddlast [kN]	Reell bruddlast [kN]	Sikkerhetsmargin
Bjelke 2	11,72	31,24	62,5%
Bjelke 4	20,09	41,14	51,2%
Bjelke 6	22,61	54,47	58,5%
Søyle 2	6,20	28,77	78,5%
Søyle 4	10,05	33,73	70,2%
Søyle 6	7,79	31,36	75,2%
Plate 2	16,29	44,02	63%
Plate 4	27,93	59,68	53,2%
Plate 5	31,42	62,64	49,8%
Plate 6	31,42	58,35	46,2%

Tabell 6.2: Dimensjonerende- vs reell bruddlast

Veiledende metode for dimensjonering av momentkapasitet for fiberarmert betong er veldig konservativ. Sikkerhetsmarginen virker å variere med både støpemetode og fibermengde, hvor økt fibermengde gir noe lavere margin. Søyleelementer har en sikkerhetsmargin på over 70% som resulterer i svært overdimensjonerte konstruksjoner, mens bjelker og plater har en margin på rundt 50-60%. Den mest sannsynlige årsaken til den høye sikkerhetsmarginen er sikkerhetsfaktoren på 0,37 som multipliseres med prøvestykkets rest strekkfasthet og dermed reduserer karakteristisk kapasitet. I tillegg spesifiserer COIN Project rapport 29 [3] at rest strekkfasthet, $f_{Rk,3}$, tilhørende 2,5mm rissvidde skal benyttes ved dimensjonering for bruddgrensetilstand. Denne verdien er lavere enn rest strekkfastheten ved begynnende rissutvikling for alle prøvestykker, men spesielt lav for elementer med oppførsel tilsvarende søyleelementer.

Da det fortsatt er stor usikkerhet knyttet til bruk av fiberarmering, er det nødvendig med en dimensjoneringsmetode som tar høyde for eventuelle variasjoner som kan oppstå inni konstruksjonene. Det bør absolutt gjennomføres mer forskning rundt armeringstypen for å legge til rette for en mer gunstig metode å beregne kapasiteten på slik at fiberarmert betong blir et mer lønnsomt konstruksjonsmateriale.

7 Eksperimentelt resultat

7.1 Fersk betong

7.1.1 Densitet

Alle resultatene fra målingene på prøvene er meget stabile og innenfor normalkravet for betong som er på 2400kg/m^3 . Betongens densitet blir ikke noe særlig påvirket av stålfiberinnholdet, selv om resultatene viser en svak tendens til at densiteten øker med økende fiberinnhold.

Betongblanding	Densitet – [kg/m^3]
Uten fiber	2383
0,4% fiber	2390
0,8% fiber	2400
1,2% fiber	2407

Tabell 7.1: Betongens densitet

7.1.2 Luftinnhold

For at slutfastheten til betongen ikke skal påvirkes av luftinnhold er det satt en maks grense på luftinnhold i normalbetong satt til 4%. I samtlige betongresepter er det satt opp et luftinnhold på 2,0%. Alle resultatene er innenfor kravet, og med god margin. Det var forventet at blandingen uten fiber skulle ha et lavere luftinnhold enn de resterende blandingene med fiber. Det var dog ikke forventet at blanding med 1,2% fiber skulle ha et såpass lavt luftinnhold da innblanding av fiber kan påvirke luftinnholdet til betongen [2]. Det kan skyldes god utførelse i støpefase i form av fibertilsetning, miksetid og miksemaskin som ble brukt. Fibertilsetningen har derimot påvirket luftinnholdet i de to resterende fiberbetong blandingene.

Betongblanding	Luftinnhold [%]
Uten fiber	0,5
0,4% fiber	1,2
0,8% fiber	1,6
1,2% fiber	0,8

Tabell 7.2: Luftinnhold i betongblandinger

7.1.3 Synkmål og utbredelsesmål

Betongblanding		Utbredelsesmål [mm]
Uten fiber		715
0,4% fiber	Blanding 1	650
	Blanding 2	655
0,8% fiber	Blanding 1	670
	Blanding 2	710
1,2% fiber	Blanding 1	630
	Blanding 2	615

Tabell 7.3: Resultater fra utbredelsesmål

Et vanlig kriterium for å klassifisere en betongblanding som selvkomprimerende er et utbredelsesmål større enn 650mm [4]. Resultatene til betongblanding med 1,2% fiberinnhold er de eneste som ikke er i henhold til kravet. Differansen kan være forårsaket av det høye fiberinnholdet i blandingen, men kan også være et resultat av minkende effekt fra det superplastiserende tilsetningsstoffet. Blanding 2 med 0,8% fiber separerte seg ved tilsetning av SP, men ved å la betongen ligge i ro en liten stund slik at SP-effekten fikk avta var det ikke lenger tegn til separasjon av blandingen da prøving av utbredelsesmål ble utført.

Økende tilsetning av fiber eller økning av fiberens lengde, resulterer ofte i redusert synkutbredelse. En vanlig observasjon er at utbredelsesmålet reduseres med ca. 35mm dersom blandingen tilsettes fiber. Resultatene viser stort sett til en høyere reduksjon, opp mot 100mm, etter fibertilsetning med unntak av betongblanding tilsatt 0,8% fiber. Denne blandingen får en reduksjon som står til forventningene.

Generelt sett indikerer resultatene at alle betongblandinger har god mobilitet og utflytningsevne.



Figur 7.1: Utbredelsesmål ved 0,8% fibermengde (blanding 1)

7.2 Herdet betong

7.2.1 Trykkfasthet



Figur 7.2: Testmaskin for trykkprøving

I henhold til EC2 del 1-1 [12] skal B35 betong tåle en last på

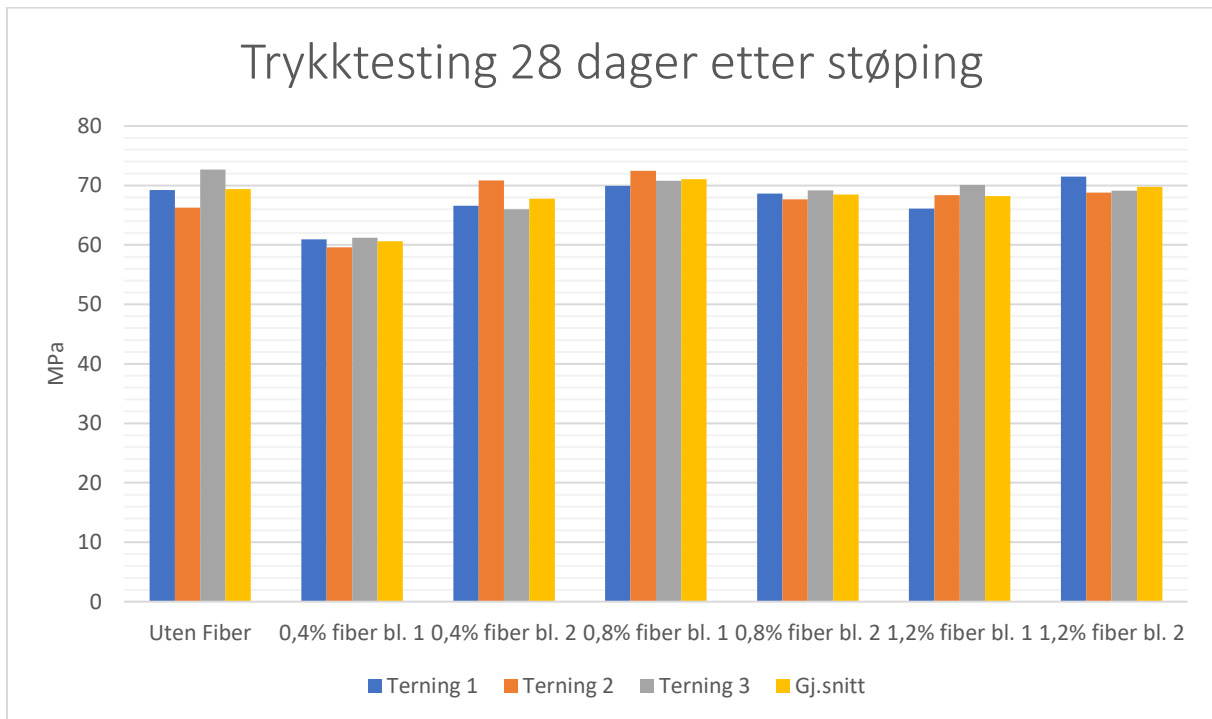
$$F_{max} = 45 \text{ MPa} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm} = 1012,5\text{kN}$$

For hver betongblanding ble det støpt ut og testet 3 terninger. Alle resultatene viser til en styrke godt over F_{max} for en B35 betong.

Terning	Bland.	Dimensjon mm	Fibermengde volumprosent	F_{max} kN	f_{cm} MPa	f_{ck} MPa	Gj. snitt f_{cm} MPa	Gj. snitt f_{ck} MPa
1	-	155x153x150	-	1641,8	69	61	69	61
2		151x150x150	-	1500,8	66	58		
3		151x150x150	-	1645,8	73	65		
1	1	151x150x150	1,2	1497,5	66	58	68	60
2		153x150x150	1,2	1568,8	68	60		
3		150x150x150	1,2	1577,3	70	62		
1	2	151x153x150	1,2	1654,6	71	63	70	62
2		152x150x150	1,2	1568,3	69	61		
3		151x150x150	1,2	1565,5	69	61		
1	1	151x150x150	0,8	1583,9	70	62	71	63
2		150x150x150	0,8	1630,5	72	64		
3		152x153x150	0,8	1651,5	71	63		
1	2	151x150x150	0,8	1554,9	69	61	69	61
2		150x150x150	0,8	1522,9	68	60		
3		152x150x150	0,8	1577,1	69	61		
1	1*	152x150x150	0,4	1389,8	61	53	61	53
2		151x150x150	0,4	1350,3	60	52		
3		155x153x150	0,4	1452	61	53		
1	2	150x150x150	0,4	1498,5	67	59	68	60
2		151x150x150	0,4	1604	71	63		
3		153x150x150	0,4	1514,4	66	58		

Tabell 7.4: Resultat fra trykktest

*Blandingen viser gjennomgående lavere resultater fra alle tester.

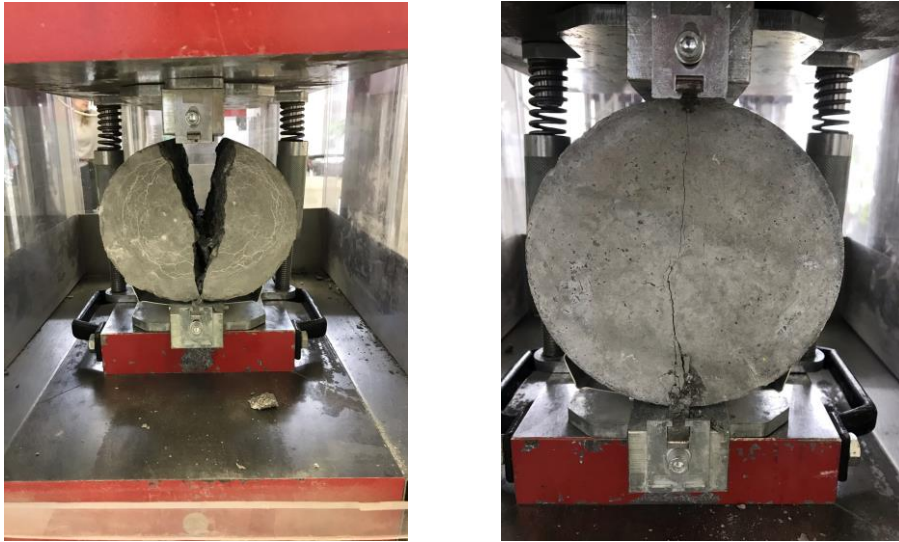


Figur 7.3: Trykkfasthet til terninger ved 28 døgn

Resultatene fra trykktesten viser til en styrke godt over standard verdier. For å få en trykkfasthet i henhold til standarden kunne det blitt brukt støpetester undervegs i prosessen for å forbedre og rette på betongresepten. Resultatene er meget gunstige innenfor et kapasitetsperspektiv, men på samme tid dårlige sett fra en økonomisk side. Det er dyrt og unødvendig å bruke en betong som er sterkere enn behovet.

Flere forskere har undersøkt påvirkningen fiberen har på trykkfasthet, og konklusjonen er at trykkfastheten påvirkes svært lite. Den eneste synlige påvirkningen er at den fiberarmerte betongen får en mer duktil oppførsel og vil ikke ha like synlige deformasjoner etter oppstått brudd. Det oppstår langt færre riss på prøvestykkene som inneholder fiber. Dette viser til en økt kapasitet mot rissutvikling. Rissutviklingen varierer også i henhold til fibermengde, noe som bekrefter at økt mengde fiber reduserer antall, og synligheten av, riss.

7.2.2 Spaltestrekkfasthet

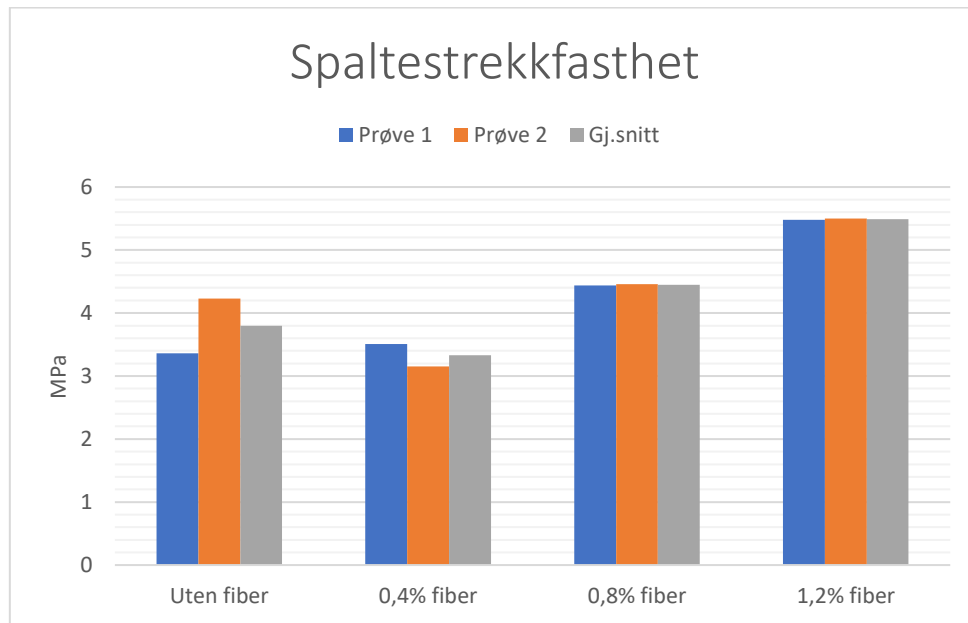


Figur 7.4: Prøving av spaltestrekkfasthet - Betong uten fiber vs betong med fiber

I henhold til EC2 del 1-1, tabell 3.1 [12] skal en B35 betong ha en strekkfasthet på 3,2 MPa.

Prøve nr.	Fibermengde volumprosent	Bruddlast [kN]	Spaltestrekkfasthet [MPa]	Gj. snitt spaltestrekkfasthet [MPa]
1	-	237,83	3,36	3,80
2	-	298,72	4,23	
3	0,4	248,05	3,51	3,33
4	0,4	222,97	3,15	
5	0,8	314,07	4,44	4,45
6	0,8	315,39	4,46	
7	1,2	387,69	5,48	5,49
8	1,2	388,90	5,50	

Tabell 7.5: Resultat fra spaltestrekktesting



Figur 7.5: Spaltestrekktest ved 28 døgnet

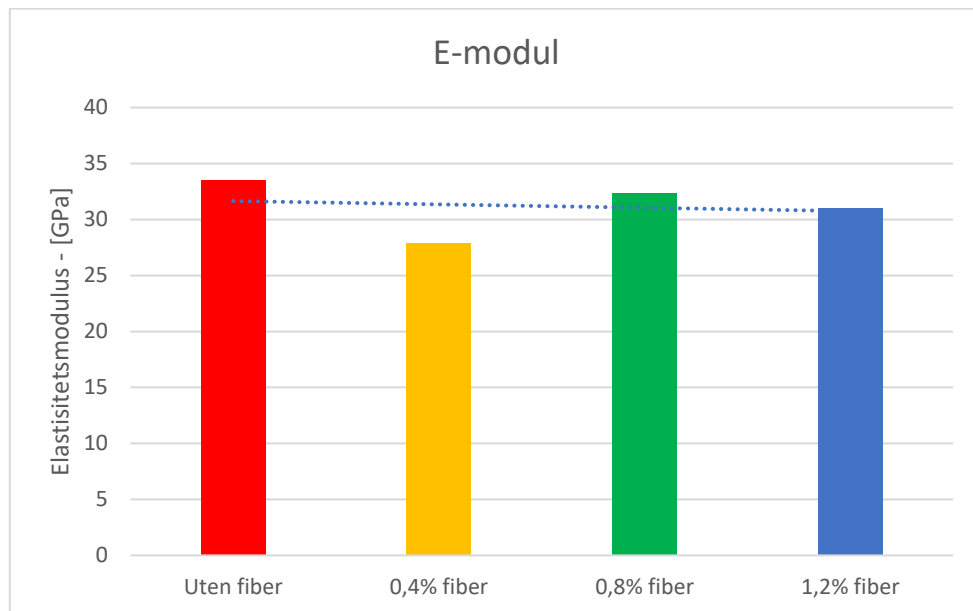
For betongblandingene uten fiber og med 0,4% fiber er det tydelig variasjon i strekkfasthet mellom de to sylindrene. De skal teoretisk sett ha den samme strekkfastheten da de er støpt fra samme blanding. Årsaken til denne variasjonen kan være avhengig av flere faktorer. Det kan for eksempel være dårlig distribusjon av tilslaget, dårlig hydratisering av betongen eller feil håndtering av prøvestykkene under utførelse av testene. Sylindrene med 0,4% fiberinnhold viser til lavere strekkfasthet enn sylindrene uten fiber. Prøve 4 har til og med lavere strekkfasthet enn det standarden krever. Dette gir signaler om at noe er galt med denne betongen.

Resultatene fra de resterende betongblandingene er som forventet. Det er liten variasjon mellom de ulike prøvestykkene og strekkfastheten øker med økt mengde tilsatt fiber. Blandingen viser til å være homogen og stabil.

7.2.3 Elastisitetsmodulus

8 Prøve nr.	Fibermengde volumprosent	Elastisitetsmodulus [GPa]
1	-	33,5
2	0,4	27,9
3	0,8	32,4
4	1,2	31,0

Tabell 7.6: Resultat ved prøving av elastisitetsmodulus



Figur 7.6: Prøving av elastisitetsmodulus ved 28 døgn

Det er ikke forventet at fiberinnhold skal ha noen påvirkning på elastisitetsmodulusen til betongen. Likevel antyder grafen at verdiene synker med økende fibermengde. Hva som forårsaker denne oppførselen kan ikke avklares uten videre analyse av fibrene inni prøvestykkene, men den mest sannsynlige årsaken er ekstra hulrom i betongen dannet av fibrene. For å prøve å fjerne noe av luften som dannes rundt fibrene ble en vibratorstav bruk til lett komprimering langs kantene på formene.

Betongblandingen med 0,4% fiberinnhold gir nok en gang verre resultat enn resten av blandingsene, og uten en mer nøyaktig analyse vil forsøk på å angi årsaken bare resultere i spekulasjoner.

Sammenlignet med elastisitetsmodulus angitt i EC2 del 1-1, tabell 3.1 [12] for en B35 betong, er resultatene fra prøvene noe lave. Prøvestykket uten fiberinnhold gir et resultat tilsvarende standarden, men resten står ikke til forventningene. Dette kommer mest sannsynlig av fiberinnholdet og de ekstra hulrommene fibrene kan forårsake, eller på grunn av det høye matriksvolumet som er anvendt i alle betongblandningene.

7.2.4 Bøyestrekfasthet



Figur 7.7: Prøving av bøyestrekfasthet

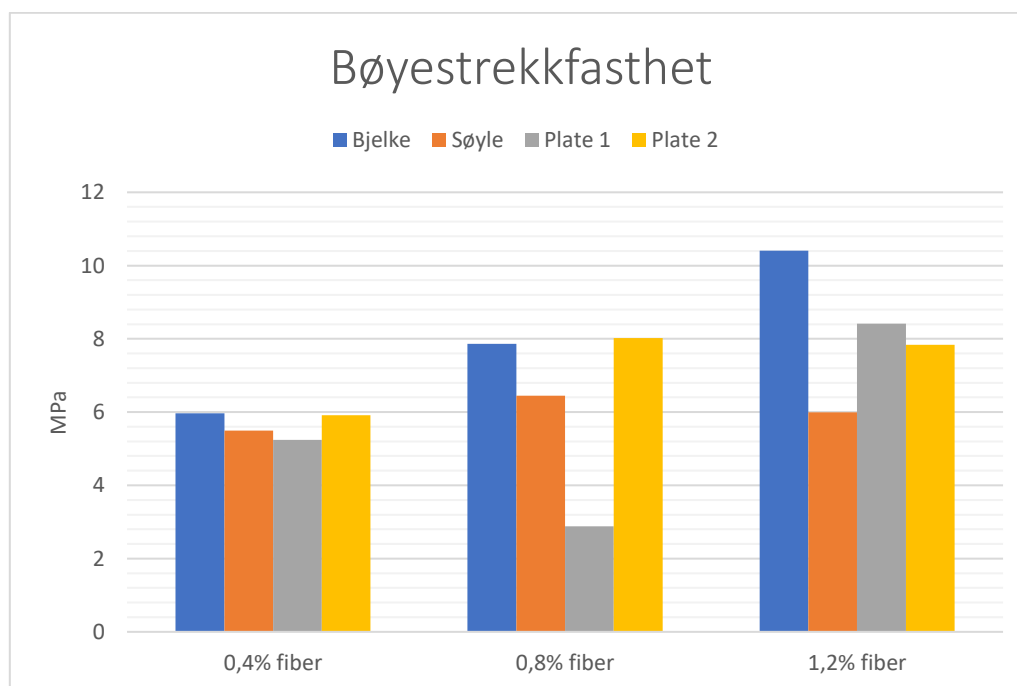
Bøyestrekfastheten til en B35 betong kan finnes ved bruk av følgende uttrykk i henhold til EC2 del 1-1, 3.1.8 [12].

$$f_{cf} = \max \left(\frac{1,6h}{1000} f_{ctk}; f_{ctk} \right)$$

f_{ctk} er den karakteristiske aksialstrekfastheten til betongen og er 4,2 MPa for B35 betong. Prøvestykkene har en tverrsnittshøyde på 150mm som da gir en bøyestrekfasthet på 4,2 MPa. Resultatene fra alle godkjente bøyestrekprøver er innenfor kravet. Ved prøving av plate 1 og plate 3, ble det brukt feil innstillinger på bøyemaskinen og resultatene fra de to prøvestykkene må derfor forkastes.

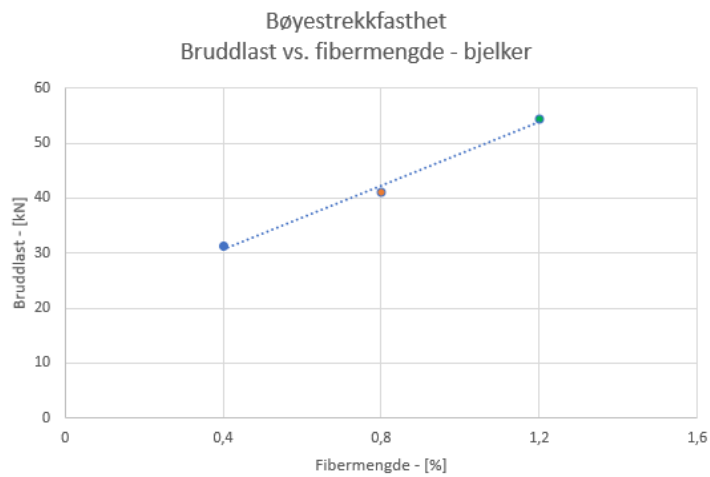
Prøvestykke	Dimensjoner [mm]	Fibermengde volumprosent	F_{max} [kN]	f_{cf} [MPa]
Bjelke 2	150x150x470	0,4	31,24	6,0
Bjelke 4	150x150x470	0,8	41,14	7,9
Bjelke 6	150x150x470	1,2	54,47	10,4
Søyle 2	150x150x470	0,4	28,77	5,5
Søyle 4	150x150x470	0,8	33,73	6,4
Søyle 6	150x150x470	1,2	31,36	6,0
Plate 1*	100x480x480	0,4	38,98	5,2
Plate 2	100x480x480	0,4	44,02	5,9
Plate 3*	100x480x480	0,8	21,47	2,8
Plate 4	100x480x480	0,8	59,68	8,0
Plate 5	100x480x480	1,2	62,64	8,4
Plate 6	100x480x480	1,2	58,35	7,8

Tabell 7.7: Resultat fra bøyestrekfasthetsprøving

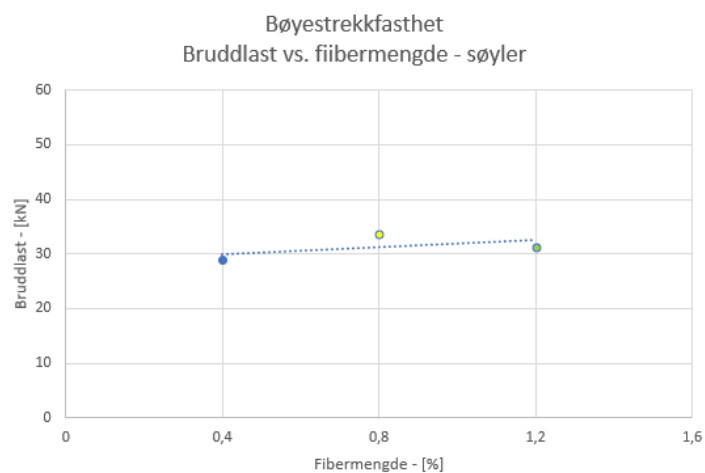


Figur 7.8: Forskjellig bøyestrekfasthet m.h.p. fibermengde

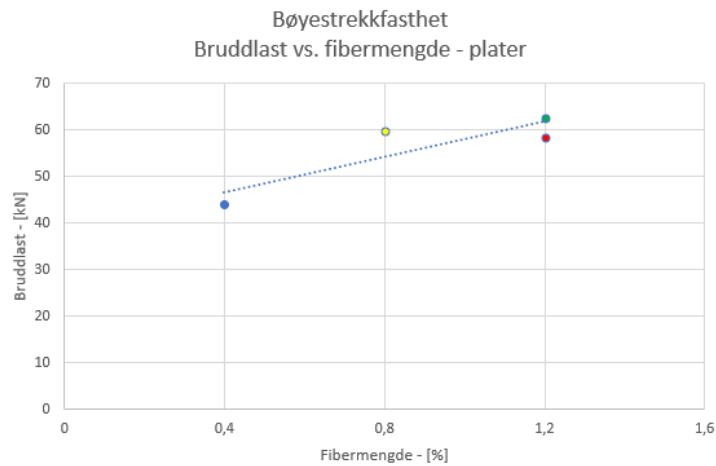
Bøyestrekfastheten varierer med både støpemetode og dimensjonene til prøvestykkene. Bjelker og søyler har samme dimensjoner, men ulik støpemetode. Bjelkeelementene får en kapasitetsøkning på ca. 20% når fibermengden økes med 0,4%. Søyleelementene har derimot størst kapasitet med en fibermengde på 0,8% og kapasitetsøkningen er ikke særlig stor mellom de ulike fibermengdene. Plateelementene har andre dimensjoner, men samme støpemetode som bjelkene. Kapasitetsøkningen for plater reduseres ved tilsetning av en større fibermengde, men har likevel høyest kapasitet ved 1,2% fiberinnhold.



Figur 7.9: Bøyestrekfasthet – bjelker



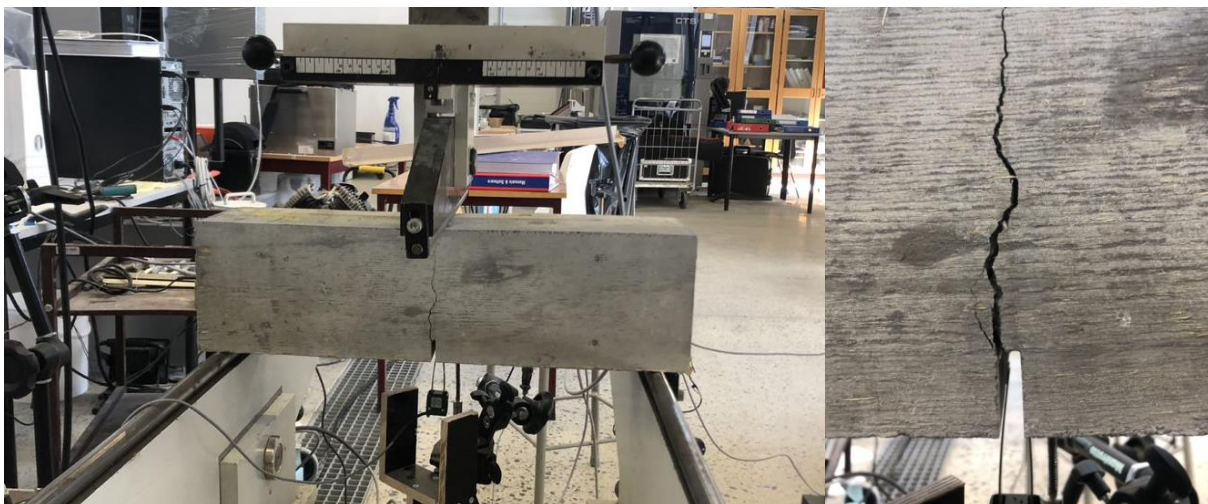
Figur 7.10: Bøyestrekfasthet - søyler



Figur 7.11: Bøystrekkfasthet – plater

I tillegg til kapasitet, spiller også økonomi en viktig rolle ved valg av konstruksjonselement og mengde fiberarmering. For bjelkeelementene ville det vært lønnsomt å bruke 1,2% fiberinnhold i betongen da kapasitetsøkningen er stor. For de andre elementtypene ville det derimot vært mest lønnsomt å bruke 0,8% fiberinnhold da kapasiteten ikke viser tegn til betydelig økning ved tilsetning av en større fibermengde.

7.2.5 CMOD test



Figur 7.12: Prøving ved 3-punkts bjelketest

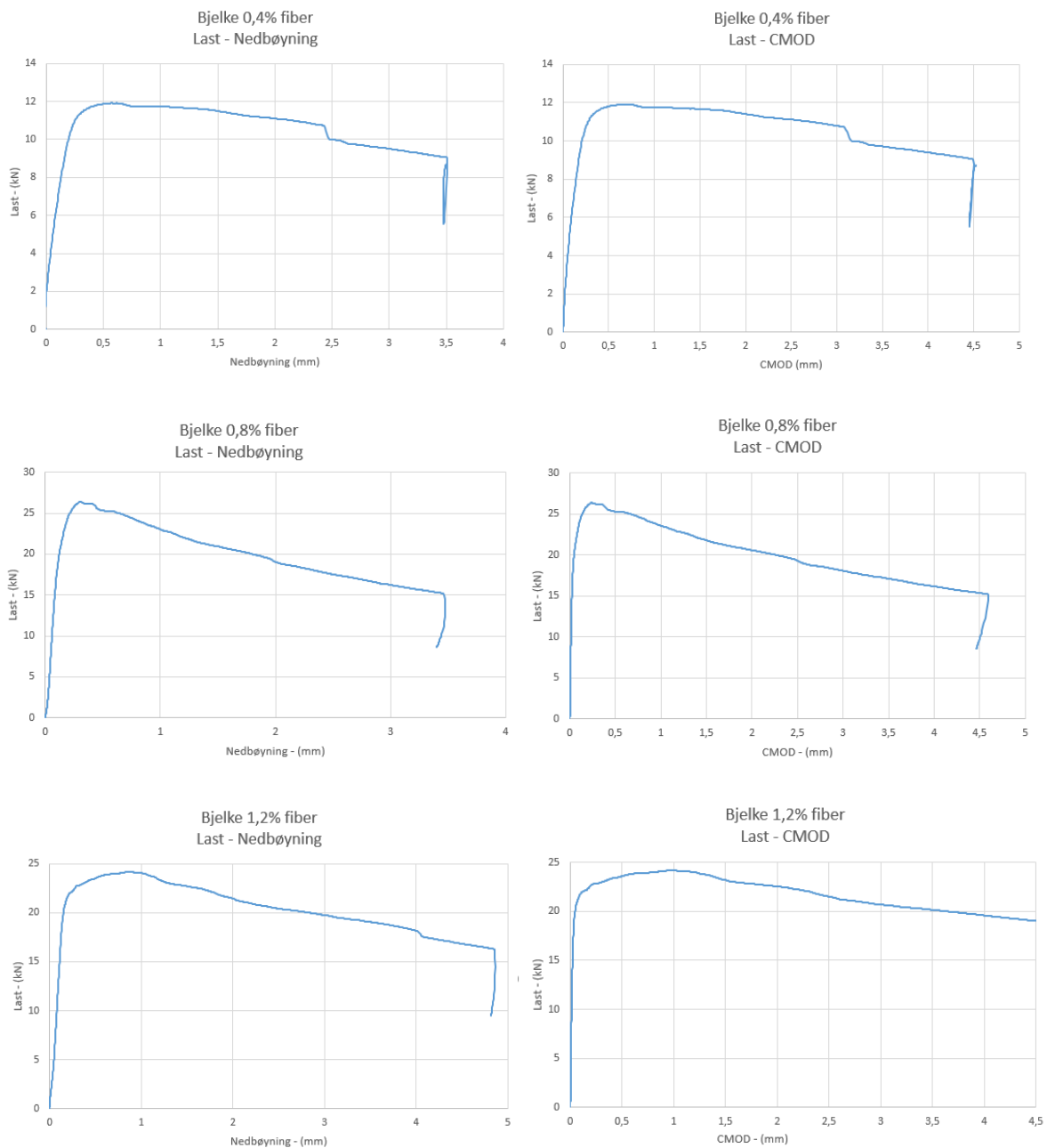
Tabell 7.8 viser de spesifiserte rissviddene og deres tilhørende last og rest bøyestrekfastheter for hvert prøvestykke som ble utsatt for tre-punkts bjelketest.

Prøvestykke	Fibermengde volumprosent	CMOD (mm)	Last (kN)	Proporsjonalitetsgrense (N/mm ²)	Rest bøyestrekfasthet (N/mm ²)
Bjelke 1	0,4	0,05	$F_L = 4,01$	1,4	$f_{R,1} = 4,0$
		0,5	$F_1 = 11,81$		
		1,5	$F_2 = 11,66$		
		2,5	$F_3 = 11,12$		
		3,5	$F_4 = 9,72$		
Bjelke 3	0,8	0,05	$F_L = 20,50$	7,0	$f_{R,1} = 8,7$
		0,5	$F_1 = 25,27$		
		1,5	$F_2 = 21,75$		
		2,5	$F_3 = 19,26$		
		3,5	$F_4 = 17,09$		
Bjelke 5	1,2	0,05	$F_L = 20,40$	6,9	$f_{R,1} = 8,0$
		0,5	$F_1 = 23,62$		
		1,5	$F_2 = 23,18$		
		2,5	$F_3 = 21,52$		
		3,5	$F_4 = 20,16$		
Søyle 1	0,4	0,05	$F_L = 16,85$	5,9	$f_{R,1} = 2,1$
		0,5	$F_1 = 6,06$		
		1,5	$F_2 = 5,99$		
		2,5	$F_3 = 5,69$		
		3,5	$F_4 = 5,43$		
Søyle 3	0,8	0,05	$F_L = 17,29$	5,9	$f_{R,1} = 4,2$
		0,5	$F_1 = 12,27$		
		1,5	$F_2 = 10,48$		
		2,5	$F_3 = 9,57$		
		3,5	$F_4 = 8,66$		
Søyle 5	1,2	0,05	$F_L = 16,41$	5,8	$f_{R,1} = 2,7$
		0,5	$F_1 = 7,58$		
		1,5	$F_2 = 7,29$		
		2,5	$F_3 = 7,20$		
		3,5	$F_4 = 6,82$		

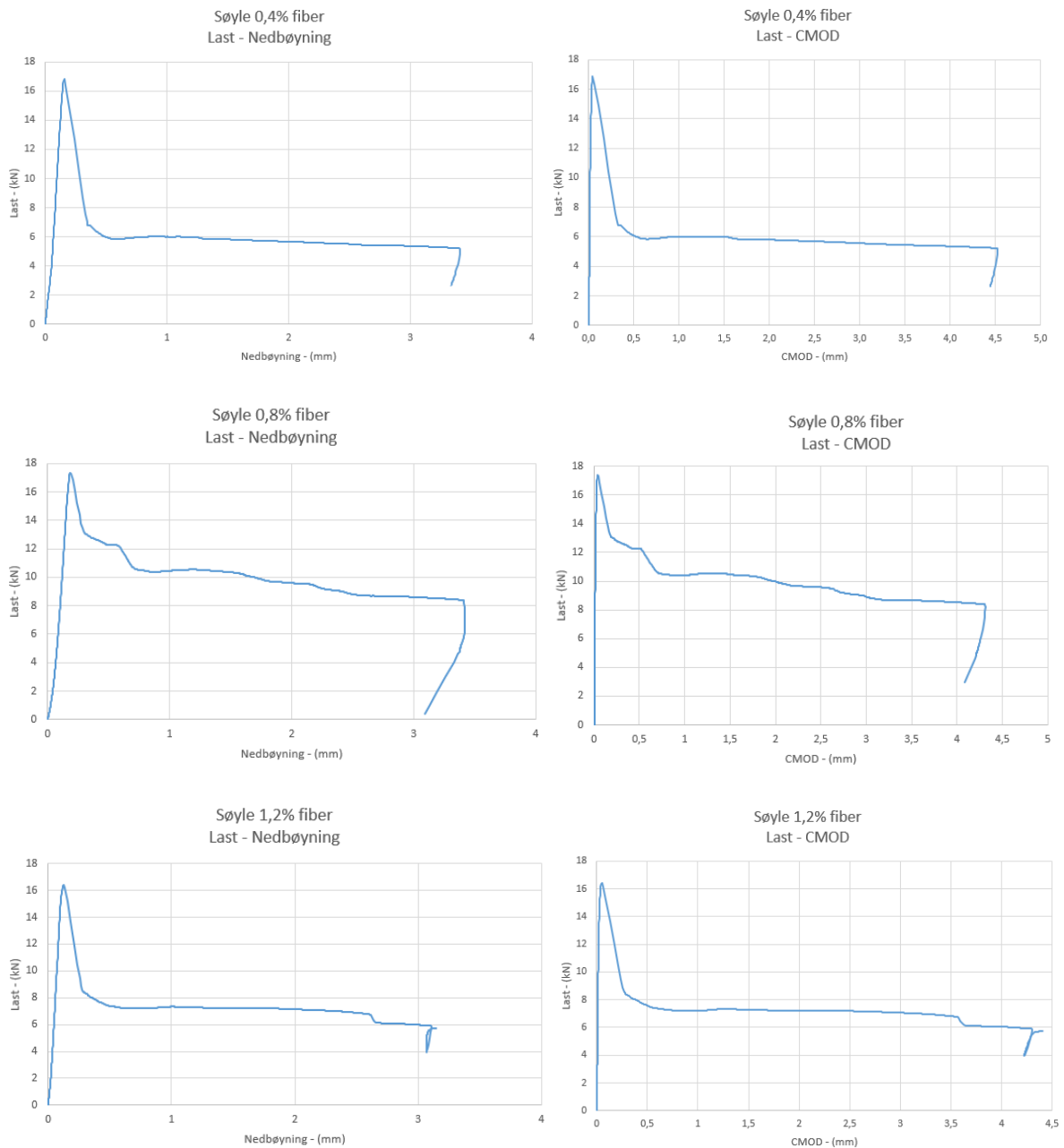
Tabell 7.8: Rest bøyestrekfasthet fra CMOD test

Bjelkeelementene har gjennomgående høyere rest bøyestrekfasthet enn søyleelementene med samme fiberinnhold. Da alle elementer med samme fiberinnhold er støpt ut fra samme betongblanding tyder dette på at støpemetode er den avgjørende årsaken til differansen i rest bøyestrekfasthet. Lastverdiene gir også signaler om at prøvestykkets oppførsel varierer

mellom elementtypene. Last ved proporsjonalitetsgrensen er lavere enn ved resterende rissvidder for bjelker, men høyere for søyler. Det betyr at bjelker klarer å opprettholde en høyere lastpåkjenning etter oppstått riss i motsetning til søyler hvor kapasiteten blir kraftig redusert etter første riss.



Figur 7.13: Last vs. nedbøyning og CMOD - bjelker

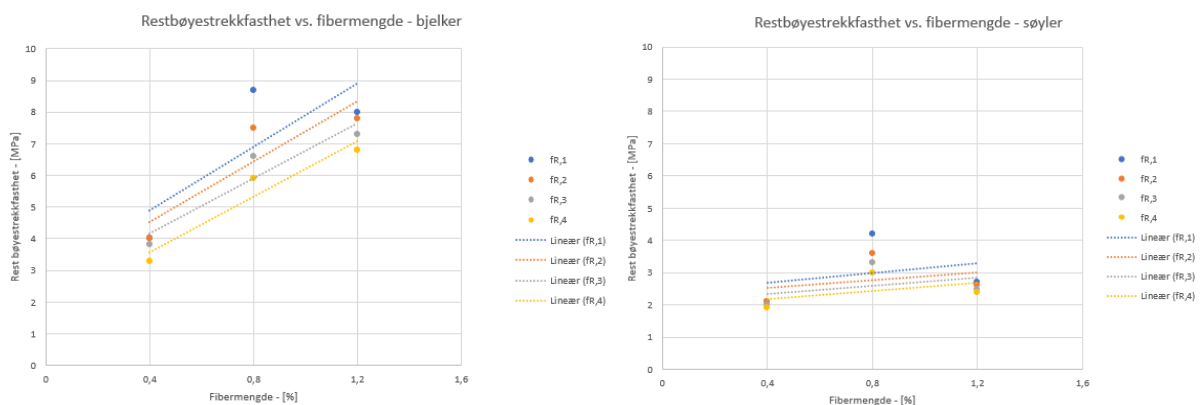


Figur 7.14: Last vs. nedbøyning og CMOD – søyler

Fiberarmert betong vil fortsette å motstå lastpåkjenning etter oppstått brudd, noe ordinær uarmert betong ikke vil klare. Figurene over viser forholdet mellom last og rissvidde ved bruk av fiberarmering for de ulike prøvestykkene. Alle prøvestykkene viser at betongen har en seig oppførsel. Dette antyder at stålfibrene vil holde prøvestykket sammen og beskytte betongen fra å få en rask kollaps etter oppstått brudd. Figurene viser også at nedbøyningen av elementene vil øke relativt proporsjonalt med rissvidde.

Søyleelementene viser en tydelig knekk i grafen hvor første riss oppstår, noe som forårsaker en kraftig reduksjon av kapasiteten til prøvestykkene. Dårlig heftglidning mellom fiber og betong eller for mye luft i betongen kan være grunner til denne oppførselen, men mest sannsynlig årsak er derimot lavt fiberantall med riktig orientering igjennom sentraltverrsnittet. Se delkapittel 7.3.5 for videre informasjon angående dette. For søyleelementer viser betongblanding med 0,8% fiberinnhold mest gunstige resultater.

Ved dimensjonering av fiberarmerte betongkonstruksjoner brukes verdier tatt fra rest bøyestrekfasthet. Verdiene fra bjelkeelementene er stigende ved økende fibermengde, mens verdiene fra søyleelementene har liten variasjon med hensyn på fibermengde. Det minnes om dårlige egenskaper på betongblanding med 0,4% fiberinnhold, og dersom blandingen hadde normale egenskaper ville variasjonen mellom søyleelementene muligens vært enda lavere.



Figur 7.15: Rest bøyestrekfasthet vs. Fibermengde

Det er interessant å se sammenhengen mellom de ulike støpemetodene som har blitt brukt. Den viser at ved å øke fiberinnholdet i betongblandingen vil man redusere kapasitetene ytterligere. Dersom det skal anvendes en betong med 1,2% fiberinnhold, vil kapasitetene reduseres med nærmere 70% om man velger å bruke støpemetoden for søyler over metoden for bjelker. Reduksjonen vil være tilnærmet lik for alle kapasitetene, $f_{R,1}$ - $f_{R,4}$, ved endring av fiberinnhold i betongen som vist av Tabell 7.9

Fibermengde volumprosent	Rest bøyestrekfasthet	Kapasitetsreduksjon dersom støpemetode for søyler blir brukt i stedet for metode for bjelker
0,4	$f_{R,1}$	47,5%
	$f_{R,2}$	47,5%
	$f_{R,3}$	47,4%
	$f_{R,4}$	42,4%
0,8	$f_{R,1}$	51,7%
	$f_{R,2}$	52,0%
	$f_{R,3}$	50,0%
	$f_{R,4}$	49,2%
1,2	$f_{R,1}$	66,3%
	$f_{R,2}$	66,7%
	$f_{R,3}$	65,8%
	$f_{R,4}$	64,7%

Tabell 7.9: Kapasitetsreduksjon ved bruk av støpemetode for søyler over bjelker

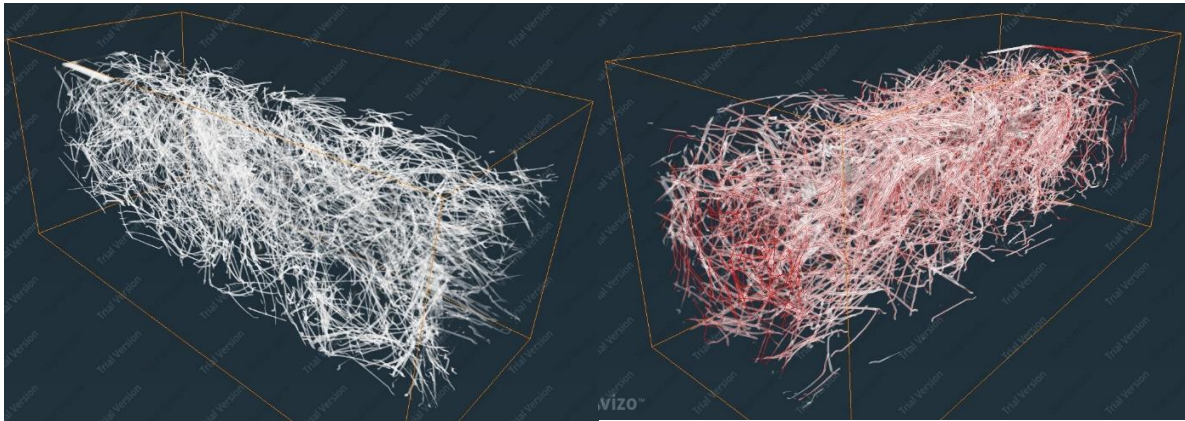
Tabell 7.10 gir prøvestykkenes karakteristiske verdier beregnet i henhold til COIN Project rapport 29 [3].

Prøvestykke	Fibermengde volumprosent	CMOD [mm]	Karakteristisk rest bøyestrekfasthet [N/mm ²]	Karakteristisk rest strekkfasthet [N/mm ²]
Bjelke 1	0,4	0,5	$f_{RK,1} = 4,0$	$f_{ftk,res,2,5} = 1,4$
		1,5	$f_{RK,2} = 4,0$	
		2,5	$f_{RK,3} = 3,8$	
		3,5	$f_{RK,4} = 3,3$	
Bjelke 3	0,8	0,5	$f_{RK,1} = 8,7$	$f_{ftk,res,2,5} = 2,4$
		1,5	$f_{RK,2} = 7,5$	
		2,5	$f_{RK,3} = 6,6$	
		3,5	$f_{RK,4} = 5,9$	
Bjelke 5	1,2	0,5	$f_{RK,1} = 8,0$	$f_{ftk,res,2,5} = 2,7$
		1,5	$f_{RK,2} = 7,8$	
		2,5	$f_{RK,3} = 7,3$	
		3,5	$f_{RK,4} = 6,8$	
Søyle 1	0,4	0,5	$f_{RK,1} = 2,1$	$f_{ftk,res,2,5} = 0,74$
		1,5	$f_{RK,2} = 2,1$	
		2,5	$f_{RK,3} = 2,0$	
		3,5	$f_{RK,4} = 1,9$	
Søyle 3	0,8	0,5	$f_{RK,1} = 4,2$	$f_{ftk,res,2,5} = 1,2$
		1,5	$f_{RK,2} = 3,6$	
		2,5	$f_{RK,3} = 3,3$	
		3,5	$f_{RK,4} = 3,0$	
Søyle 5	1,2	0,5	$f_{RK,1} = 2,7$	$f_{ftk,res,2,5} = 0,93$
		1,5	$f_{RK,2} = 2,6$	
		2,5	$f_{RK,3} = 2,5$	
		3,5	$f_{RK,4} = 2,4$	

Tabell 7.10: Karakteristiske verdier for rest bøye- og rest strekkfasthet

7.3 Computertomografi

Fremstillingen av stålfibrene inni betongmassen viser til en relativt homogen fiberfordeling uten store tegn til områder med stor konsentrasjon av fiber eller fiberballing. Ved økende mengde tilsatt fiber, er det derimot litt mer synlig at noen områder har litt større fiberkonsentrasjoner. Etter at densitetsverdiene til fiberen er blitt isolert, fremkommer følgende visualisering av fordelingen, med og uten markering av fibere.



Figur 7.16: Visualisering av fiberfordeling. (Bjelke 4)

Fiber-sporende algoritmer angir antall fibre i hvert prøvestykke.

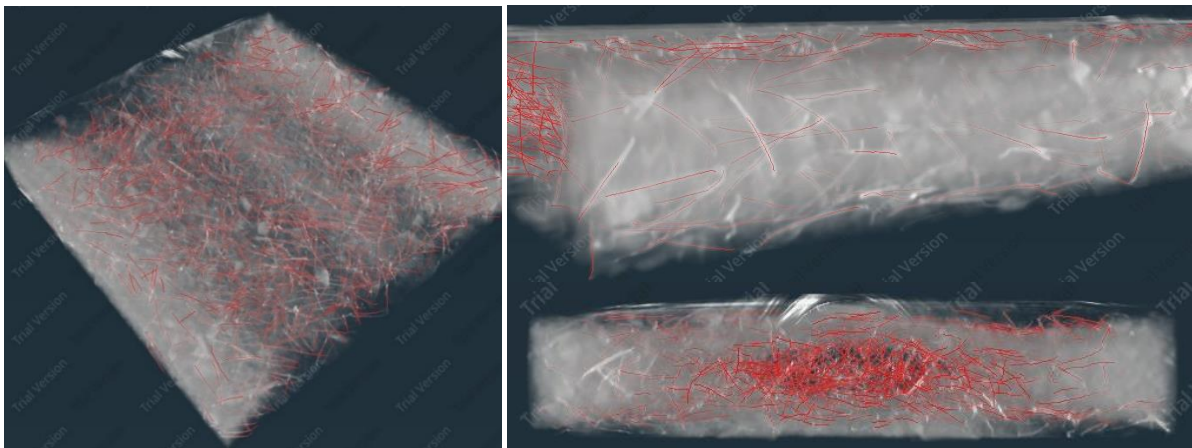
Prøvestykke	Fibermengde – [%]	Antall fiber
Bjelke 2	0,4	1171
Bjelke 4	0,8	2495
Bjelke 6	1,2	3154
Søyle 2	0,4	952
Søyle 4	0,8	1994
Søyle 6	1,2	3460
Plate 1	0,4	1627
Plate 2	0,4	1599
Plate 3	0,8	2724
Plate 5	1,2	3166

Tabell 7.11: Antall fiber i prøvestykkene gitt av Avizo/XFiber

Antall fiber i bjelker og søyler med samme fibermengde burde i teorien være det samme da deres dimensjoner er helt like, og de er støpt ut fra samme betongblanding. Resultatene viser en gjennomsnittlig differanse på 342 stålfiber mellom bjelke og søyle. Dette antyder at fiberfordelingen i den ferske betongblandingen ikke er 100% homogen, noe den i praksis aldri vil kunne bli. Andre årsaken til differansen kan være tidspunkt for støping. Alle blandinger er tilsatt superplastiserende stoff, hvor virkningen av stoffet vil avta med tid og kan resultere i

ulik konsistens på betongen. Menneskelig påvirkning er også på listen over mulige årsaker. Som nevnt tidligere vil støpeligheten til betongen avta med økt mengde fiberinnhold. Dermed forventes den største differansen fra blandingen med 1,2% fiberinnhold. I dette tilfellet er det blandingen med 0,8% fiberinnhold som gir størst differanse mellom antall fiber, og den mest sannsynlige årsaken vil være menneskelig påvirkning ved støping da blandingen i seg selv virket homogen og hadde god støpelighet.

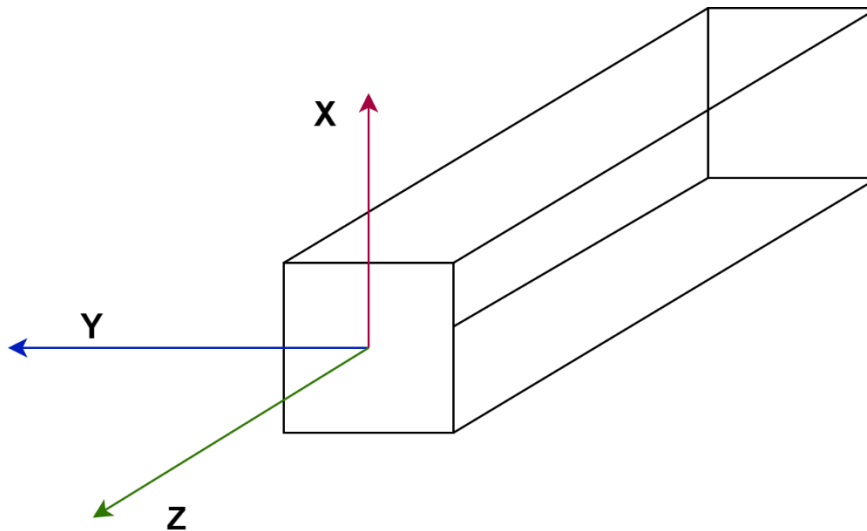
Dimensjonene til platene var såpass store at CT-maskinen måtte bruke maksimum effekt for å klare å skanne igjennom dem. Dette medførte at kvaliteten på bildene ble svært dårlig og størrelsen på pikslene var store. Den lave kvaliteten på bildene gjorde det vanskelig å skille densitetsverdiene fra hverandre og størrelsen på 3D-pikslene var større enn diameteren til fibre. Forsøket på å utføre en analyse av prøvestykkene ble delvis mislykket da programvaren ikke klarte å skille ut densitetsverdiene til stålfibre på grunn av uklarhet i bildene. Det var derimot mulig å hente ut noe data fra modellen for å få en ide om hvordan fiberfordelingen inni prøvestykket vil se ut. Resultatene er ikke representative for denne type konstruksjon eller fibermengde da det foreligger stor usikkerhet rundt nøyaktigheten på analysen og kan dermed ikke brukes til å beskrive egenskapene til prøvestykkene.



Figur 7.17: Analyse av plater

7.3.5 Fiberorientering

Fiberorienteringen til de ulike prøvestykkene virker tilsynelatende å være svært tilfeldig. Ved observasjon av resultatene fra Avizo er det ingen åpenbar dominerende fiberorientering. For de gitte prøvestykkene er det ønskelig med en orientering parallell med z-aksen da dette er den langsgående akse som er vinkelrett på lastretningen.



Figur 7.18: Lokalt koordinatsystem for prøvestykker analysert i Avizo

Figur 7.19 viser fiberens orientering i forhold til z-aksen og vinklene er fremstilt med 10° intervaller.



Figur 7.19: Fiberorientering

Med hensyn til strukturelle egenskaper er resultatene svært utilfredsstillende. Bjelke 2 har de mest gunstige resultatene, men bare rundt 29% av fibrene vil utnyttes optimalt til overtakelse av strekkrefter fra konstruksjonen etter påført last.

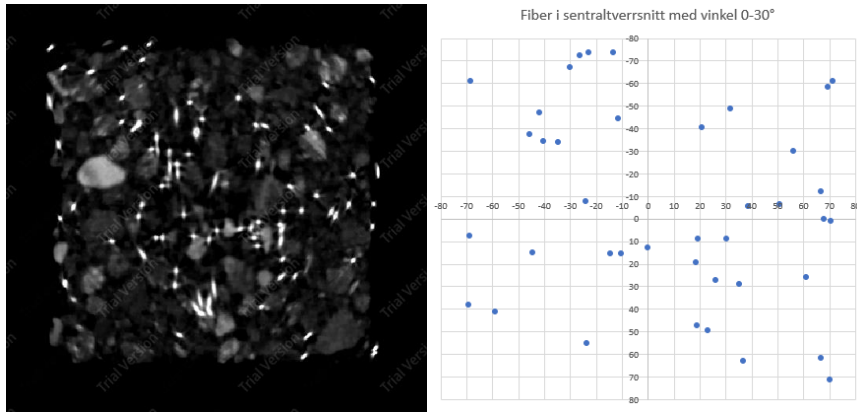
Bjelkeelementene virker å ha en jevnt over tilfeldig fiberorientering med lite variasjon mellom de forskjellige intervallene. Fiberorienteringen synes også å være relativt uavhengig av fibermengde.

Søyleelementene virker ikke å ha en like jevn fordeling over intervallene som det bjelkeelementene har. Mesteparten av fibrene har en vinkel på mer enn 60° målt fra den ønskede aksene. Histogrammene viser også at ved økning av fibermengde tilsatt i blandingen vil fiberorienteringen forverres.

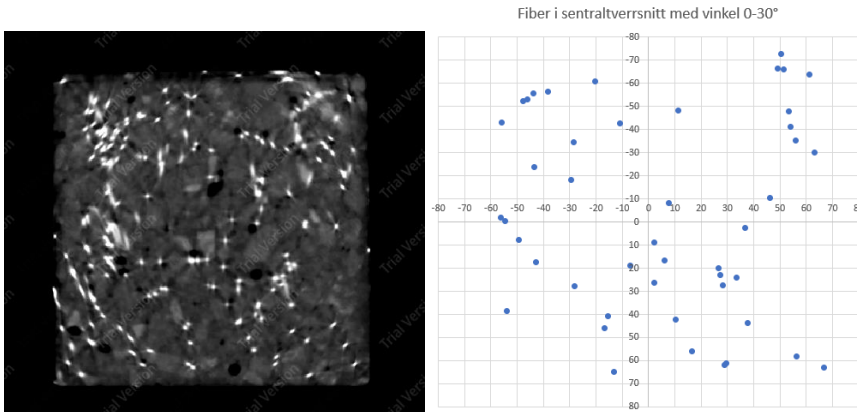
Tabell 7.12 viser en relasjon mellom fibermengde og vanskelighetsgraden av å orientere fiberne. Siden støpeligheten til betongen påvirkes i stor grad av mengde fiber, er relasjonen som forventet. Forskjellen er betraktelig større for støpemetode brukt til søyler enn til bjelker, og tilsier at førstnevnte metode er den som egner seg minst til bruk ved bærende konstruksjoner. Selv om det er variasjoner innenfor de ulike intervallene, er resultatene konsistente sett fra et globalt perspektiv som gjør at fiberorienteringen i et konstruksjonselement vil kunne forutsees ved bruk av disse støpeteknikkene.

Prøvestykke	Mengde fiber orientert 0-30° [%]
Bjelke 2	29,29
Bjelke 4	27,58
Bjelke 6	27,81
Søyle 2	15,13
Søyle 4	6,12
Søyle 6	5,55

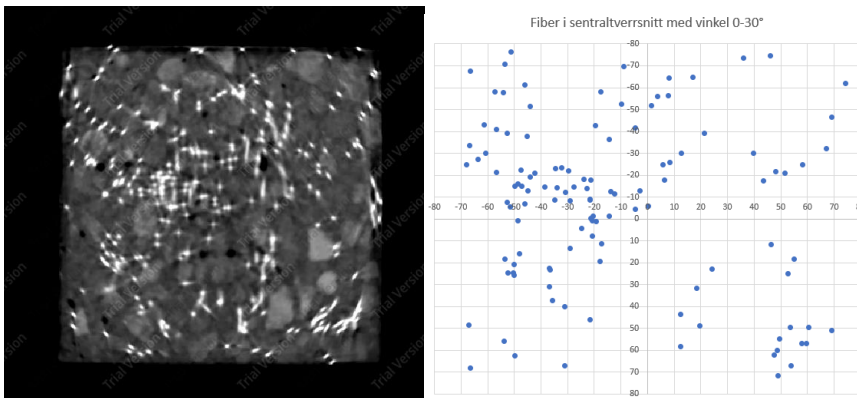
Tabell 7.12: Mengde fiber orientert i ønsket retning



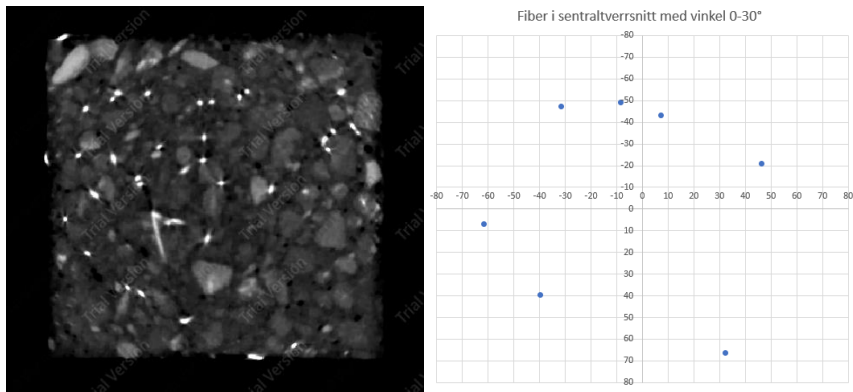
Figur 7.20: Alle fibre vs effektive fibre i sentralverrsnitt, Bjelke 2



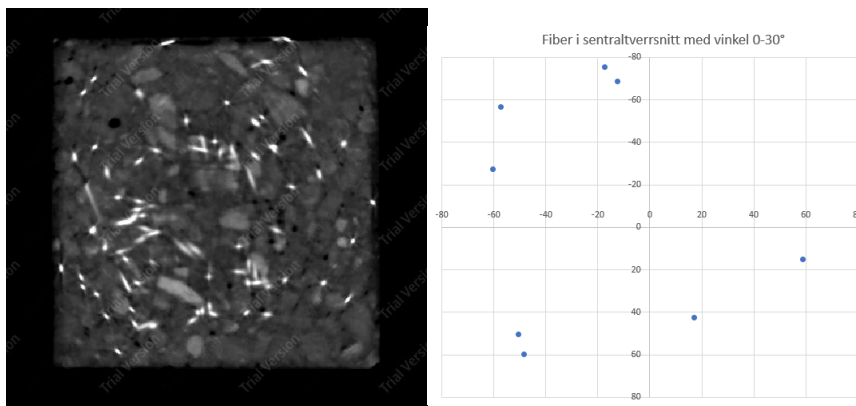
Figur 7.21: Alle fibre vs effektive fibre i sentralverrsnitt, Bjelke 4



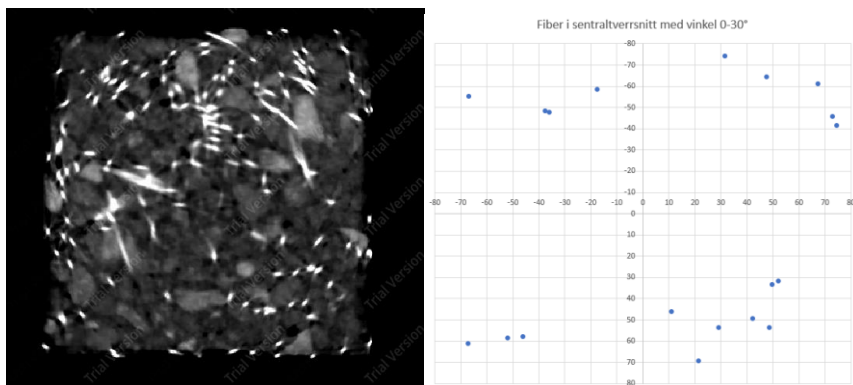
Figur 7.22: Alle fibre vs effektive fibre i sentralverrsnitt, Bjelke 6



Figur 7.23: Alle fibre vs effektive fibre i sentralvernsnitt, Søyle 2



Figur 7.24: Alle fibre vs effektive fibre i sentralvernsnitt, Søyle 4



Figur 7.25: Alle fibre vs effektive fibre i sentralvernsnitt, Søyle 6

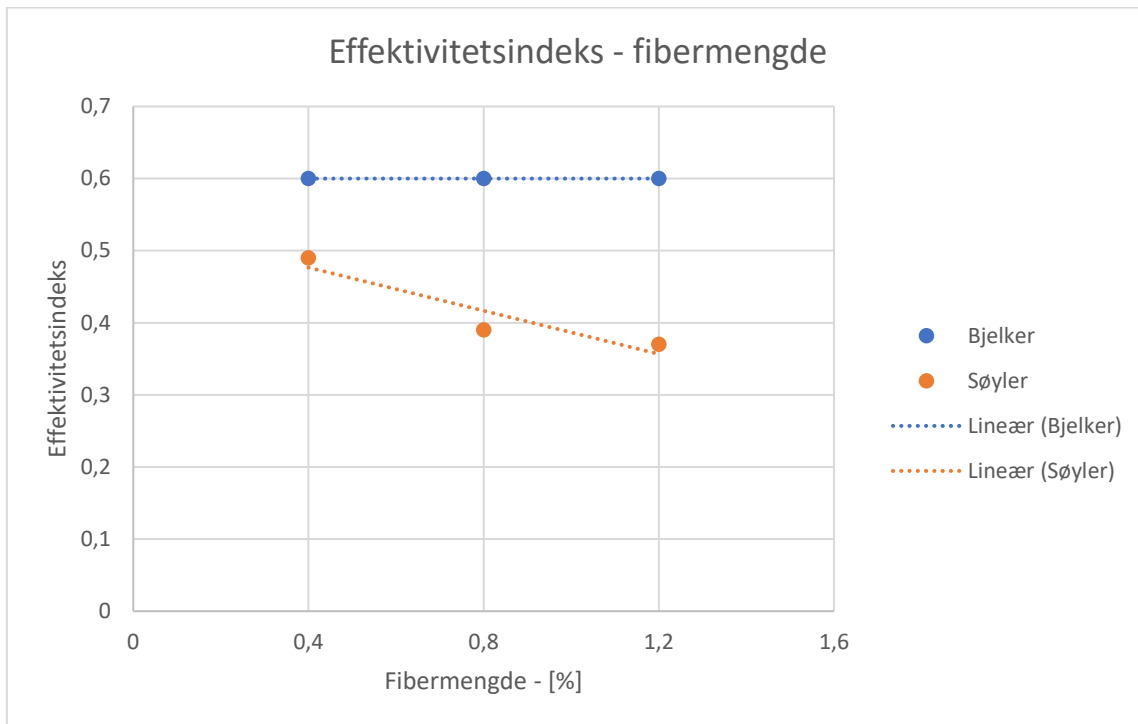
7.3.6 Effektivitetsindeks

Prøvestykke	Global effektivitetsindeks	Lokal effektivitetsindeks ved sentraltverrsnitt
Bjelke 2	0,6	0,6
Bjelke 4	0,6	0,58
Bjelke 6	0,6	0,66
Søyle 2	0,49	0,47
Søyle 4	0,39	0,38
Søyle 6	0,37	0,41
Plate 1	0,6	0,59
Plate 2	0,66	0,63
Plate 3	0,59	0,61
Plate 5	0,67	0,69

Tabell 7.13: Global og lokal effektivitetsindeks, hvor ønsket verdi = 1

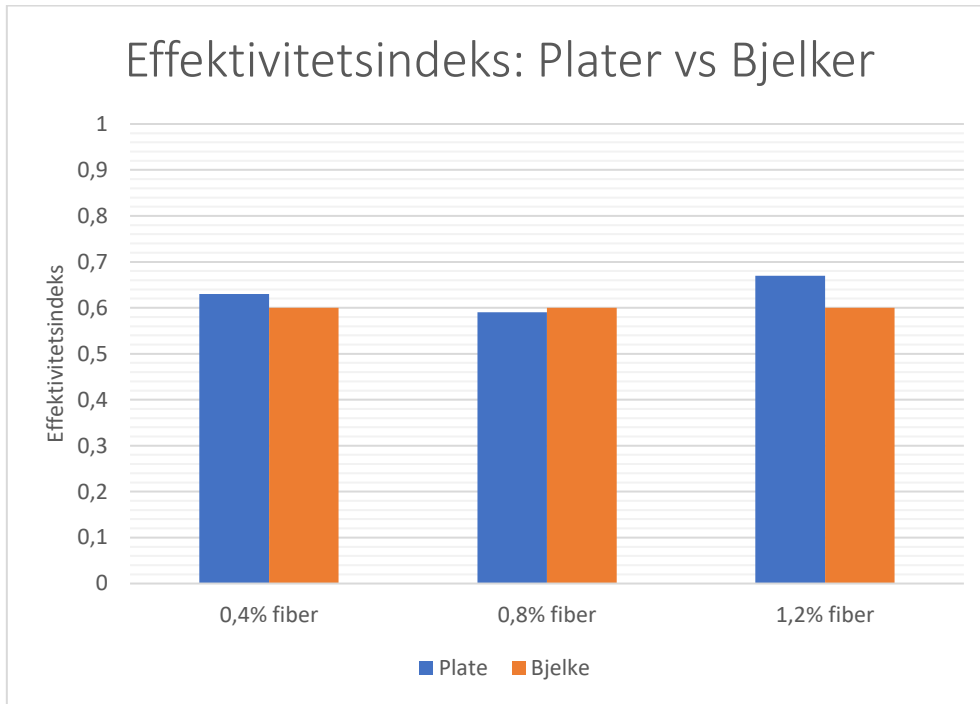
Resultatene indikerer at det ikke er noen klar dominant fiberorientering i prøvestykkene da effektivitetsindeksen ligger ca. midt på skalaen fra 0-1. Bjelkene har en indeks nærmere 1 og søylene har en indeks nærmere 0. Dette var forventet og bekrefter at støpemetoden for søyler ikke egner seg for konstruksjonselementer. Selv om effektivitetsindeksen skulle vært tilnærmet lik 1 for optimal funksjon, bør det bemerkes at det er liten forskjell mellom indeksene i den sentrale regionen og det komplette prøvestykket. Dette viser til en jevn og konsistent fiberorientering igjennom hele elementet.

Ved bruk av støpemetode for bjelker viser effektivitetsindeksen å være konsistent, uavhengig av fibermengde. Metoden for søyler viser derimot en synkende effektivitetsindeks ved tilsetning av mer stålfiber. Jo mer fiber blandingen inneholder, jo vanskeligere vil det bli å få orientert fiberen riktig i søylene.

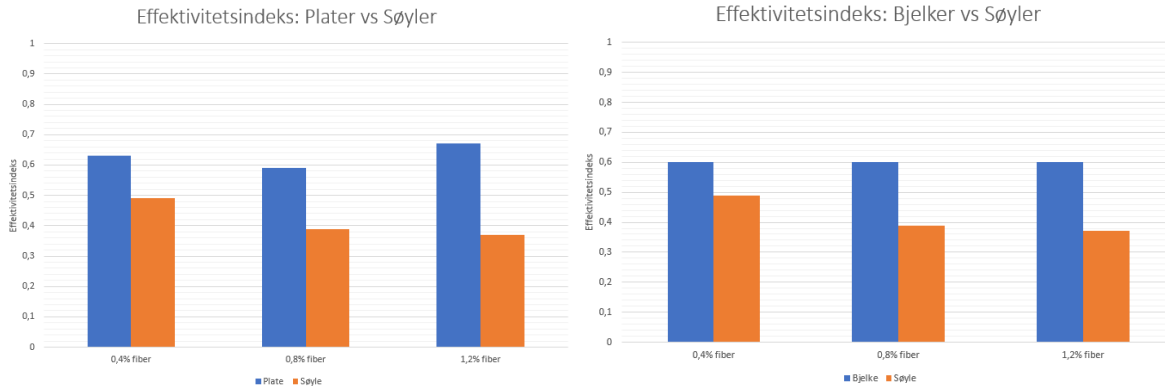


Figur 7.26: Effektivitetsindeksens variasjon med fibermengde

Som nevnt tidligere, har ikke Avizo klart å spore alle fibrene inni plateelementene på grunn av kvaliteten på CT-bildene og effektivitetsindeksen er dermed bare beregnet for de kjente fiberorienteringene. Det interessante med denne effektivitetsindeksen er likevel at verdiene ligner på de for bjelker. Samme prinsipp for støpemetode er brukt på plater og bjelker og det er forventet at indeksene skal ha samme verdier. Også for disse prøvestykkene er det liten variasjon mellom globale og lokale verdier, men det kan ha en sammenheng med at de fleste oppsporede fibrene befinner seg rundt det sentrale tversnittet som tidligere vist av Figur 7.17.



Figur 7.27: Effektivitetsindeks, plater vs bjelker

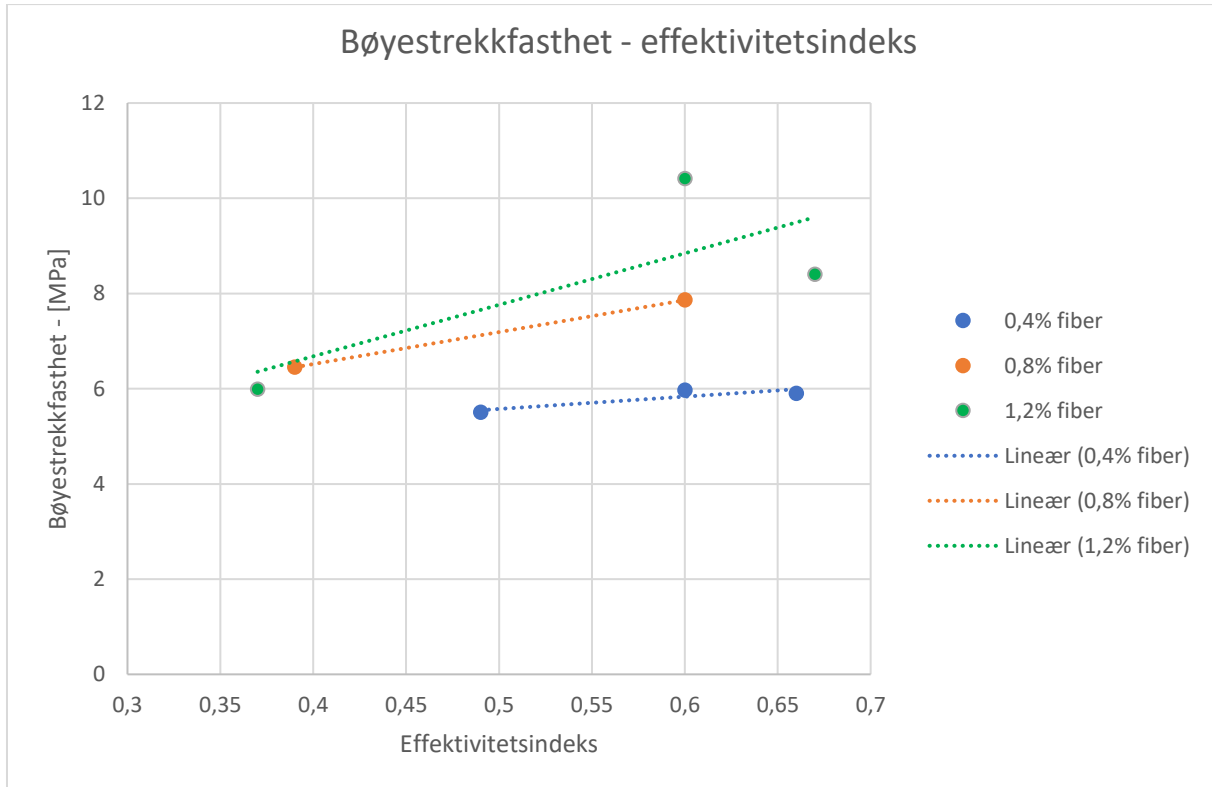


Figur 7.28: Effektivitetsindeks, plater og bjelker vs søyler

Effektivitetsindeks vs bøyestrekfasthet

Fra et kapasitetssynspunkt er det, som tidligere nevnt, ønskelig at effektivitetsindeksen har en verdi så nærme 1 som mulig da dette betyr at fibrene er ensrettet [2]. Figuren under bekrefter at bøyestrekfastheten vil øke med økt effektivitetsindeks. Denne illustrasjonen antyder også at kapasitetsøkningen med hensyn på effektivitetsindeksen vil være større ved økt

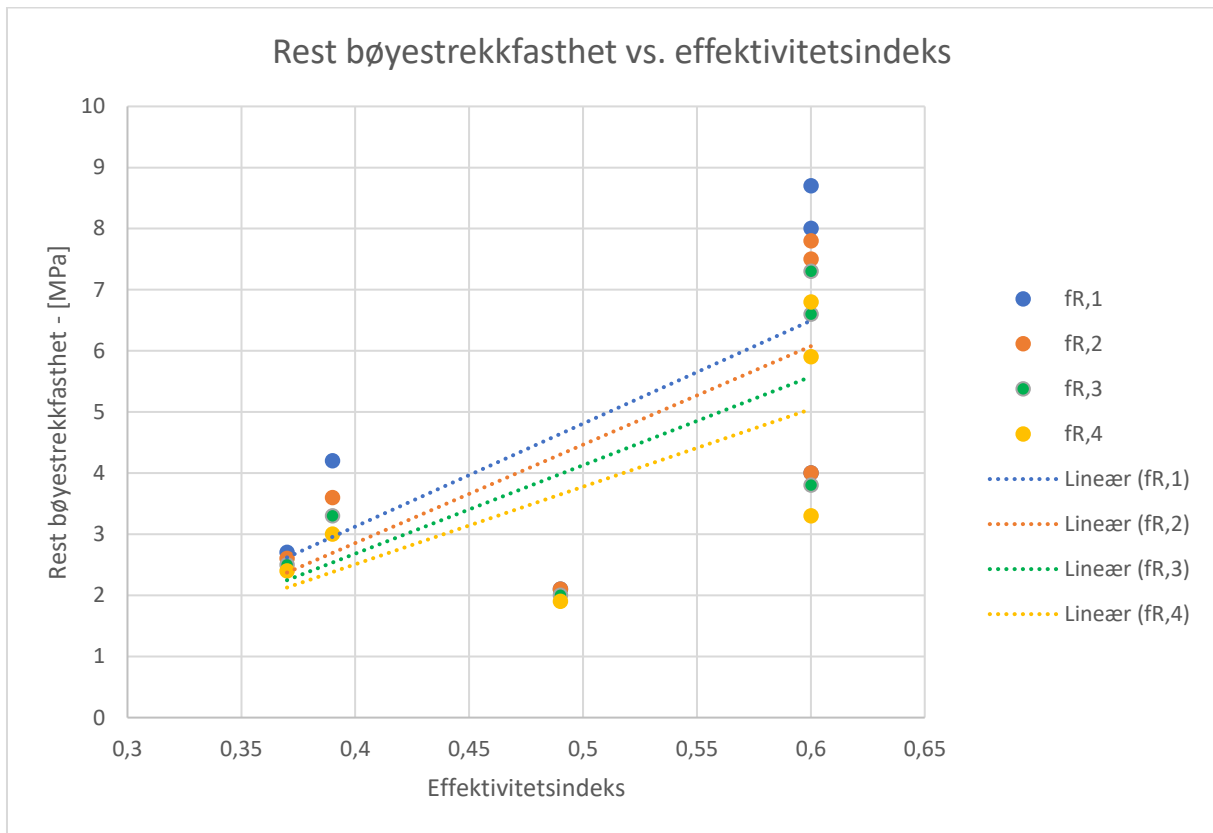
fibermengde. Det gir absolutt mening da en endring i effektivitetsindeksen på, for eksempel, 0,1 vil resultere i langt flere effektive fibre i et prøvestykke med høyere fiberinnhold.



Figur 7.29: Bøyestrekfasthet vs effektivitetsindeks

Effektivitetsindeks vs rest bøyestrekfasthet

Ved å se på resultatene fra rest bøyestrekfasthet og sammenligne disse med effektivitetsindeksene, bekreftes det nok en gang at fiberorienteringen har mye å si for kapasiteten til prøvestykket. Orienteringen er mest sannsynlig den største årsaken til prøvestykkenes ulike oppførsel ved påføring av last som videre gir ulike kapasitetsverdier. Dersom trendlinjene for rest bøyestrekfasthetene vs effektivitetsindeksene studeres, vil man kunne se ett synkende stigningstall på linjene fra $f_{R,1}$ til $f_{R,4}$. Prøvestykkene viser dermed til en seigere oppførsel med større kapasitet mot videre utvikling av riss etter allerede oppstått sprekk i betongen når prøvestykket har en god effektivitetsindeks. Synkende stigningstall på trendlinjene oppstår muligens fordi at ved økende rissvidder vil flere fibre overbelastes og gå til brudd og dermed blir strekkraftene opptatt av de gjenværende fibrene.

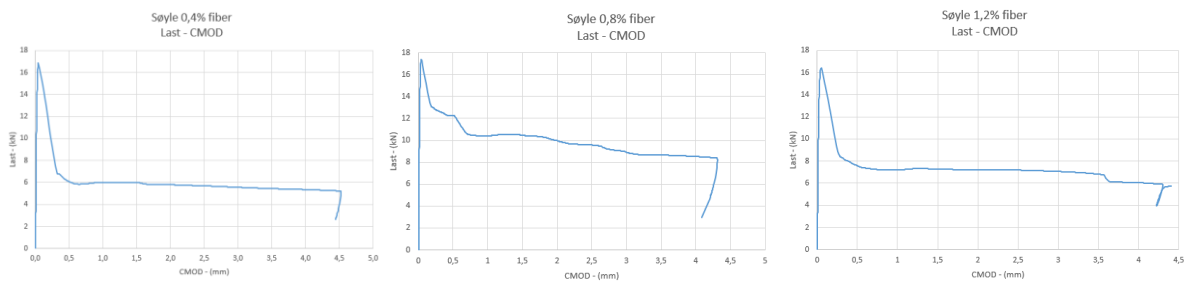


Figur 7.30: Rest bøyestrekfasthet vs effektivitetsindeks

8 Konklusjon

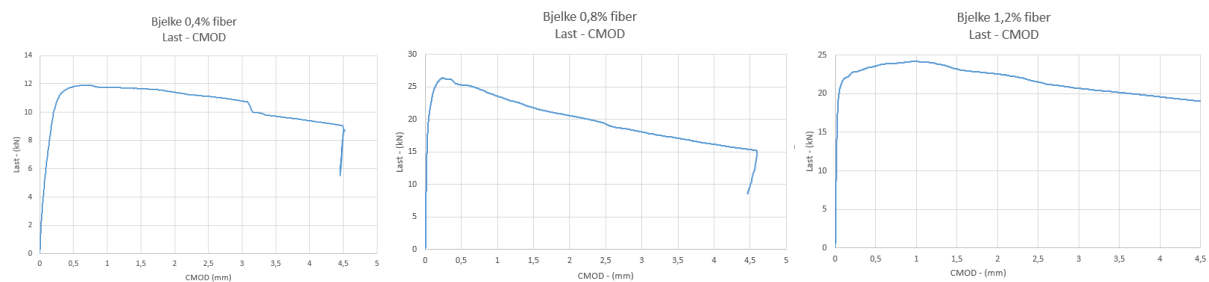
Det er tydelig at fiberorienteringen er en faktor som i stor grad påvirker kapasiteten til et fiberarmert betongkonstruksjonselement etter oppstått riss. For å gjøre rede for fiberorienteringen kan orienteringsprofilen brukt i denne oppgaven benyttes til å hente ut informasjon om den totale vinkeldistribusjonen til fibre. Gjennomsnittorienteringen til fibre kalkuleres og brukes videre som en indeks for å beskrive effektiviteten til fibre inni konstruksjonen. Resultatene viser en klar sammenheng mellom effektivitetsindeks og CMOD. Det betyr at dersom verdien til indeksen er kjent, vil oppførselen til prøvestykket ved lastpåføring kunne forutsees før testing. Høyere effektivitetsindeks gir økt kapasitet, samt en mer duktil oppførsel etter oppstått riss. Grafen tilhørende søyleelementer viser at kapasiteten reduseres kraftig etter første riss og effektivitetsindeksen tar høyde for denne type oppførsel. Oppførselen etter påført last ser ut til å endre seg når effektivitetsindeksen har en verdi rundt 0,5, og sammenhengen mellom effektivitetsindeks, α , og oppførsel ved lastpåføring kan dermed uttrykkes på følgende måte:

$$0 < \alpha \leq 0,5$$



Figur 8.1: Prøvestykkets oppførsel under lastpåføring ved $0 < \alpha < 0,5$

$$0,5 < \alpha \leq 1$$



Figur 8.2: Prøvestykkets oppførsel under lastpåføring ved $0,5 < \alpha < 1$

Sammenhengen fungerer også motsatt vei ved at effektivitetsindeks kan anslås dersom prøvestykkets oppførsel er kjent fra testing. Eksakt effektivitetsindeks vil ikke kunne bestemmes ut fra prøvestykkets CMOD-graf, men det vil bli kjent om den har en verdi under eller over 0,5 hvor sistnevnte er ønskelig for bruk av fiberarmerte konstruksjonselementer som beskrevet i NB38 [2] og COIN Project rapport 29 [3].

Da det ble brukt ulike teknikker ved utstøping av prøvestykkene, vil konklusjonen basert på resultatene være at støpemetode styrer fiberorienteringen. Støpemetode benyttet for bjelker (horisontalt utstøpt i 2 lag) gir en stabil fiberorientering uavhengig av fibermengde, mens støpemetode benyttet for søyler (utstøpt vertikalt i 3 lag) gir en ugunstig fiberorientering som forverres med økende fibermengde. Sistnevnte metode bør ikke brukes for lastbærende konstruksjonselementer da fiberorienteringen ikke vil gi ønskede kapasitetssegenskaper. Plateelementer ble også støpt ved bruk av metode for bjelker, og viser til samme fiberorienteringsfaktor som bjelkeelementene. Dette bekrefter orienteringens stabilitet ved å benytte teknikken for utstøping av prøvestykker. Selv om orienteringen er stabil og forutsigbar for bjelker, er den likevel svært tilfeldig og har nesten likt antall fibre i alle vinkler. Dermed er heller ikke denne metoden optimal til bruk for lastbærende konstruksjoner.

CT teknologi gir langt mer nøyaktige resultater enn manuell telling av fibre. Manuell telling av fibre beskriver fiberorienteringen som arealforhold mellom fiber og betong i ulike tverrsnitt [2]. Dersom alle fibre i et prøvestykke er ensrettede, vil ikke denne metoden ta hensyn til fiberens vinkel målt fra den langsgående aksene. Vinkelen målt fra denne aksene er avgjørende for effektiviteten til fiberen, og det kan i verste fall resultere i en lavere kapasitet enn antatt. Ved å bruke CT teknologi, er det derimot mulig å identifisere alle fibre inne i et betongelement samt deres eksakte orientering. Siden det er en ikke-destruktiv teknikk, vil ikke prøvestykkene ødelegges og de kan dermed benyttes til videre testing. Prosessen er totalt automatisert, og vil dermed eliminere all menneskelig usikkerhet knyttet til utførelsen. Denne teknologien kan hjelpe betongindustrien med å utvikle støpemetoder som vil gi gunstig fiberorientering inne i betongelementer.

Norske veiledninger for dimensjonering av fiberarmerte betongkonstruksjoner [2] [3] er svært konservative. Ved beregning av dimensjonerende momentkapasitet for alle prøvestykker, gir

det beste resultatet en dimensjonerende bruddlast som er 53% av reell bruddlast. Det verste resultatet gir en dimensjonerende kapasitet på bare 21% av reell kapasitet, som tilsvarer en sikkerhetsfaktor på hele 80%. Metoden er mest konservativ ved dimensjonering av prøvestykker med samme oppførsel som søyler etter påføring av last, da last ved 2,5mm rissvidde er relativt lav i forhold til bruddlast. Dersom beregningene blir for konservative og ikke utnytter potensialet til fibre, vil det ikke være økonomisk lønnsomt å bruke fiberarmering. Resultatene antyder også at dimensjoneringsmetoden blir noe mindre konservativ ved økende fibermengde tilsatt i betongen, men konstruksjonselementene har fortsatt unødvendig høy sikkerhetsmargin. Det bør gjennomføres mer forskning på fiberarmerte betongkonstruksjoner for å finne måter å dimensjonere etter en mer reell utnyttelse av fiberen. Mer kunnskap og erfaring vil kunne føre til muligheten av å redusere fibermengde og samtidig oppnå egenskaper som tilfredsstillende krav.

9 Forslag til videre arbeid

Forslag til videre arbeid for fiberarmerte betongkonstruksjoner:

- Utforske flere ulike støpemetoder for å komme frem til en metode som gir ønsket fiberorientering og hvor resultatene fra utstøpingene er forutsigbare og konsistente. Deretter forsøke å overføre støpemetoden til større elementer med ulike dimensjoner.
- Utføre videre forskning rundt prøvestykkenes effektivitetsindeks og dens sammenheng med kapasitet for å komme frem til en mindre konservativ og mer korrekt beregningsmetode for fiberarmerte konstruksjoner.
- Implementere fiberorienteringen i de strukturelle analysemodellene. Foreslå en formulering som inneholder den forventede orienteringen.
- Studere D-regioner hvor hovedretning for strekk og tøyning ikke er tydelig definert.
- Foreta beregninger for skjærkapasitet.
- Utvide testprogrammet for å verifisere de ulike tilnærmingene i standarder og designkoder.
- Videre studie av riss og sprekke mønstre.
- Utvide til andre fibertyper og utføre en parametrisk studie.

Referanser

- [1] J.V. Thue, «Store Norske Leksikon,» 16 juli 2019. [Internett]. Available: <https://snl.no/betong>.
- [2] T. Kanstad et al., «Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner,» Norsk Betongforening; 2020. Publikasjon nr. 38.
- [3] T. Kanstad, «Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmert betongkonstruksjoner,» Sintef, Oslo, 2011.
- [4] M. Maage et al., TKT 4215 Concrete Technology 1, Trondheim: NTNU, 2016.
- [5] T. Årtun, «Store Norske Leksikon,» 8 august 2017. [Internett]. Available: <https://snl.no/glassfiber>.
- [6] B. Krogedal, «Fiberarmering i samvirkekonstruksjon,» Mastergradsavhandling, Institutt for maskin, bygg og materialteknologi, Universitetet i Stavanger, Stavanger, 2017.
- [7] Fib Model Code, Fib model code for concrete structures 2010, Wilhelm Ernst & Sohn, 2010.
- [8] The Constructor - Civil Engineering Home, «Fiber Reinforced Concrete,» [Internett]. Available: <https://theconstructor.org/concrete/fiber-reinforced-concrete/150/>. [Funnet 14 april 2021].
- [9] A. Abid og K. Franzèn, «Design of Fibre reinforced concrete beams and slabs,» Chalmers university of technology, Gøteborg, 2011.
- [10] Standard Norge, «Standardisering.» STANDARD.NO. Hentet fra: <https://www.standard.no/standardisering/> (Lastet ned: 12.02.2021).
- [11] Norsk betongforening. «Endelig er publikasjon nr. NB38 «Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner (2020)» ferdig!» BETONG.NET. Hentet fra: <https://betong.net/aktuelt/endelig-er-publikasjon-nr-nb38-fiberarmert-betong-i-baerende-konstruksjoner-2020-ferdig/> (Lastet ned: 06.04.2021)
- [12] Eurokode 2: *Prosjektering av betongkonstruksjoner, allmenne regler og regler for bygninger*, NS-EN 1992-1-1: 2004+NA:2008, 2008, (EC2 del 1-1).
- [13] The American society for nondestructive testing. «What is nondestructive testing?» ASNT.ORG. Hentet fra: https://asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Testing.aspx (Lastet ned: 03.06.2021).
- [14] Thermo Fisher Scientific. «Avizo software for material science.» THERMOFISHER.COM. Hentet fra: <https://www.thermofisher.com/no/en/home/industrial/electron-microscopy/electron-microscopy-instruments-workflow-solutions/3d-visualization-analysis-software/avizo-materials-science.html> (Lastet ned: 19.05.2021)

- [15] Norcem. «Anleggsement FA». NORCEM.NO. Hentet fra: <https://www.norcem.no/no/AnleggFA> (Lastet ned: 03.06.2021)
- [16] *Prøvingsmetode for betong med metalliske fibere – Måling av bøyestrekfasthet (proporsjonalitetsgrense og restfastheter)*, NS-EN 14651, 2005.
- [17] *Prøving av fersk betong, densitet*, NS-EN 12350-6, 2019.
- [18] *Prøving av fersk betong, luftinnhold - trykkmetoder*, NS-EN 12350-7, 2019.
- [19] *Prøving av fersk betong, synkmål*, NS-EN 12350-2, 2019.
- [20] *Prøving av fersk betong, selvkomprimerende betong - synkutbredelsesmetode*, NS-EN 12350-8, 2019.
- [21] *Prøving av herdnet betong, prøvelegemers trykkfasthet*, NS-EN 12390-3, 2019.
- [22] *Prøving av herdnet betong, prøvelegemers spaltestrekfasthet*, NS-EN 12390-6, 2009.
- [23] *Prøving av herdnet betong, bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk*, NS-EN 12390-13, 2013.
- [24] *Prøving av herdnet betong, prøvelegemers bøyestrekfasthet*, NS-EN 12390-5, 2019.
- [25] F. Laranjeira, S. Grünwald, J. Walraven, C. Blom, C. Molins og A. Aguado, «Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete,» *Materials and Structures*, nr. 44, s. 1093-1111, nov. 2010. [Internett]. Hentet fra: doi: 10.1617/s11527-010-9686-5
- [26] *Eurocode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*, NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016, 2008 (EC 1990).

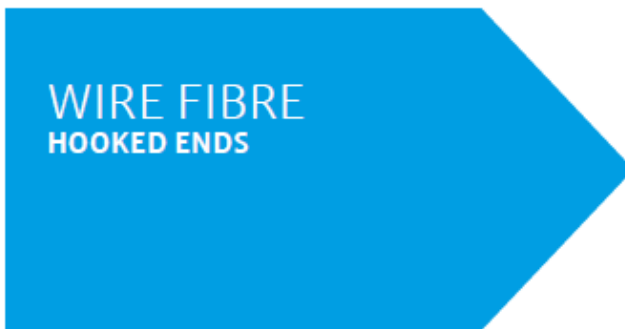
Vedlegg A. Betongmaterialer

Vedlegg A-1. Stålfiber



Data Sheet | Fibres

Version 10/2019



① Type of fibre ③ Length ⑤ Material Specification

DE 50/1,0 N

② Shape of fibre ④ Diameter



GEOMETRY

① Type of fibre	wire fibre
② Shape of fibre	hooked ends
③ Length (L)	50 mm ± 10%
④ Diameter (d)	1,00 mm ± 10%
Cross section	round
Ratio (L/d)	50

FIBRE NETWORK

Quantity of fibres	3.240 fibres/kg
Minimum dosage	20 kg/m ³

MATERIAL PROPERTIES

⑥ Material specifications	Normal tensile strength
Material	Steel
Material number	1.0313
Tensile strength	1.100 N/mm ²
Modulus of elasticity	210.000 N/mm ²

CERTIFICATIONS & SYSTEM APPROVALS

Standards (DIN)	EN 14889-1
Certifications (DIN)	EN ISO 9001:2015, EN ISO 50001



Subject to change without notice. All specifications are only a general description of our products. For detailed information please ask for our product leaflets.

INFO

Krampe Harex® Fibres are a cost effective solution to conventional reinforcement methods:

- › Industrial floors
- › Tunneling applications
- › Precast concrete elements
- › Applications in residential buildings

In relation to our **Service+** offer, we determine the suitable type of fibre, the optimal dosage and the necessary concrete strength. Further information can be found on our website krampeharex.com.

PACKAGING



Bags



Boxes*



Big Bag

STORAGE



Keep Dry

* Fibres are magnetically linearized.

Vedlegg A-2. Dynamon SX-N



BESKRIVELSE

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

BRUKSOMRÅDER

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

Noen spesielle bruksområder er:

- Vann tett betong med krav til høy eller svært høy fasthet og med strenge krav til bestandighet i aggressive miljøer.
- Betong med særlige krav til høy støpelighet; i konsistensklasser S4 og S5 etter NS-EN 206.
- Selvkomprimerende betong med ønske om lengre åpentid. Om nødvendig kan SKB stabiliseres med en viskositetsøker - **Viscofluid** eller **Viscostar**.
- Til produksjon av frostbestandig betong - da i kombinasjon med luftinnførende tilsetningsstoffer - **Mapeair**. Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut

fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.

- Til golvstøp for å oppnå en smidig betong med bedret støpelighet. Store doseringer og lave temperaturer kan retardere betongen noe.

EGENSKAPER

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

Denne effekten kan prinsipielt utnyttes på tre måter:

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



Dynamon SX-N

KOMPATIBILITET MED ANDRE PRODUKTER

Dynamon SX-N lar seg kombinere med andre Mapei tilsetningsstoffer, som f.eks. styrkingsakselererende stoffer som **Mapefast** og styrkingsretarderende stoffer som **Mapetard**.

Produktet lar seg også kombinere med luftinnførende tilsetningsstoffer, **Mapeair**, for produksjon av frostbestandig betong.

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

DOSERING

Dynamon SX-N tilsettes for å oppnå ønsket resultat (styrke, bestandighet, støpelighet, sementreduksjon) ved å variere doseringen mellom 0,4 og 2,0 % av sement + flyveaske + mikrosilika. Ved økt dosering økes også betongens åpentid, dvs. tiden betongen lar seg bearbeide. Større doseringsmengder og lave betongtemperaturer gir en retardert betong. Vi anbefaler alltid prøvestøper med aktuelle parametere.

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

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

Dynamon SX-N kan også tilsettes direkte i automikser på bygg- eller anleggsplass. Betongen bør da blandes med maksimal hastighet på trommelen i ett minutt pr. m³ betong i lasset, men minimum 5 minutter.

EMBALLASJE

Dynamon SX-N leveres i 25 liters kanner, 200 liters fat, 1000 liter IBC-tanker og i tank.

LAGRING

Produktet må oppbevares ved temperaturer mellom +8°C og +35°C. I lukket emballasje bevarer produktet sine egenskaper i minst 12 måneder. Hvis produktet utsettes for direkte sollys, kan det føre til variasjoner i fargetonen uten at dette påvirker egenskapene til produktet.

SIKKERHETSINSTRUKSJONER FOR KLARGJØRING OG BRUK

For instruksjon vedrørende sikker håndtering av våre produkter, vennligst se siste utgave av sikkerhetsdatablad på vår nettside www.mapei.no

PRODUKT FOR PROFESJONELL BRUK.

MERK

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene. All overstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering. Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse. Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.

Vennligst referer til siste oppdaterte versjon av teknisk datablad som finnes tilgjengelig på vår webside www.mapei.no

JURIDISK MERKNAD

*Innholdet i dette tekniske databladet kan kopieres til andre prosjektrelaterte dokumenter, men det endelige dokumentet må ikke suppleres eller erstatte betingelsene i det tekniske datablad, som er gjeldende, når MAPEI-produktet benyttes. Det seneste oppdaterte datablad er tilgjengelig på vår hjemmeside www.mapei.no
ENHVER ENDRING AV ORDLYDEN ELLER BETINGELSER, SOM ER GITT ELLER AVLEDET FRA DETTE TEKNISKE DATABLADET, MEDFØRER AT MAPEI SITT ANSVAR OPPHØRER.*

Alle relevante referanser for produktet er tilgjengelige på forespørsel og fra www.mapei.no

**Dynamon
SX-N**

TEKNISKE DATA (typiske verdier)

PRODUKTBESKRIVELSE

Form:	væske
Farge:	gulbrun
Viskositet:	lettflytende; < 30 mPa·s
Tørrestoffinnhold (%):	18,5 ± 1,0
Densitet (g/cm ³):	1,06 ± 0,02
pH:	6,5 ± 1
Kloridinnhold (%):	< 0,05
Alkallinnhold (Na ₂ O-ekvivalenter) (%):	< 2,0

Det er ikke tillatt å kopiere, reprodusere eller ildfå utgjitt her.
Oversettelse kan foreta til andre språk.

6392-07-2017(NO)

Vedlegg B. Proporsjoneringsark

Vedlegg B-1. B35 betong

Mix proporsjon **SKANSKA**

Project	Masteroppgave
Batch no	0% fiber
Quality requirements	B35 M40

Batch volume:	50 liter
Date:	
Time for water addition:	
Responsible:	
Executed by:	

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Anlegg FA	471,1	23,553			23,553
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	179,0	8,950		-2,201	6,749
Absorbed water	13,1	0,654			0,654
Sand 0/8 mm Årdal	899,5	44,973	4,0	1,799	46,772
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	817,8	40,892	0,5	0,204	41,097
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	4,7	0,236	84	0,198	0,236
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000

7,403

Vedlegg B-2. 0,4% fiber, Blanding 1.

Mix proporsjon **SKANSKA**

Project	Masteroppgave
Batch no	0,4% fiber Blanding 1
Quality requirements	B35 M40

Batch volume:	100 liter
Date:	
Time for water addition:	
Responsible:	
Executed by:	

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Anlegg FA	471,6	47,155			47,155
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	179,2	17,919		-4,347	13,572
Absorbed water	30,7	3,066			3,066
Sand 0/8 mm Årdal	885,1	88,509	4,0	3,540	92,050
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	820,7	82,072	0,5	0,410	82,482
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	4,7	0,472	84	0,396	0,472
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Stålfiber	31,2	3,120			3,120
	0,0	0,000			0,000

16,638

Vedlegg B-3. 0,4% fiber, Blanding 2.

Mix proporsjon **SKANSKA**

Project	Masteroppgave
Batch no	0,4% fiber Blanding 2
Quality requirements	B35 M40

Batch volume:	62 liter
Date:	
Time for water addition:	
Responsible:	
Executed by:	

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Anlegg FA	471,6	29,236			29,236
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	179,2	11,110		-2,695	8,415
Absorbed water	30,7	1,901			1,901
Sand 0/8 mm Årdal	885,1	54,876	4,0	2,195	57,071
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	820,7	50,885	0,5	0,254	51,139
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	4,7	0,292	84	0,246	0,292
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Stålfiber	31,2	1,934			1,934
	0,0	0,000			0,000

10,315

Vedlegg B-4. 0,8% fiber, Blanding 1.

Mix proporsjon **SKANSKA**

Project	Masteroppgave
Batch no	0,8% fiber Blanding 1
Quality requirements	B35 M40

Batch volume:	100 liter
Date:	
Time for water addition:	
Responsible:	
Executed by:	

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Anlegg FA	471,8	47,176			47,176
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	179,3	17,927		-4,321	13,606
Absorbed water	30,5	3,046			3,046
Sand 0/8 mm Årdal	879,3	87,935	4,0	3,517	91,452
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	815,4	81,539	0,5	0,408	81,947
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	4,7	0,472	84	0,396	0,472
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Stålfiber	62,4	6,240			6,240
	0,0	0,000			0,000

16,651

Vedlegg B-5. 0,8% fiber, Blanding 2.

Mix proporsjon						SKANSKA
Project	Masteroppgave					
Batch no	0,8% fiber Blanding 2					
Quality requirements	B35 M40					
Batch volume:	62 liter					
Date:						
Time for water addition:						
Responsible:						
Executed by:						
Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg	
Norcem Anlegg FA	471,8	29,249			29,249	
	0,0	0,000			0,000	
	0,0	0,000			0,000	
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000	
	0,0	0,000			0,000	
Free water	179,3	11,115		-2,679	8,435	
Absorbed water	30,5	1,888			1,888	
Sand 0/8 mm Årdal	879,3	54,519	4,0	2,181	56,700	
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Årdal 8/16mm	815,4	50,554	0,5	0,253	50,807	
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000	
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000	
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Mapei Dynamon SX-N	4,7	0,292	84	0,246	0,292	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
Stålfiber	62,4	3,869			3,869	
	0,0	0,000			0,000	

10,324

Vedlegg B-6. 1,2% fiber, Blanding 1.

Mix proporsjon **SKANSKA**

Project	Masteroppgave
Batch no	1,2% fiber Blanding 1
Quality requirements	B35 M40

Batch volume:	100 liter
Date:	
Time for water addition:	
Responsible:	
Executed by:	

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Anlegg FA	472,0	47,197			47,197
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	179,3	17,935		-4,296	13,639
Absorbed water	30,3	3,026			3,026
Sand 0/8 mm Årdal	873,6	87,360	4,0	3,494	90,854
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	810,1	81,006	0,5	0,405	81,411
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	4,7	0,472	84	0,396	0,472
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Stålfiber	93,6	9,360			9,360
	0,0	0,000			0,000

16,665

Vedlegg B-7. 1,2% fiber, Blanding 2.

Mix proporsjon **SKANSKA**

Project	Masteroppgave
Batch no	1,2% fiber Blanding 2
Quality requirements	B35 M40

Batch volume:	62 liter
Date:	
Time for water addition:	
Responsible:	
Executed by:	

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Anlegg FA	472,0	29,262			29,262
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	179,3	11,120		-2,663	8,456
Absorbed water	30,3	1,876			1,876
Sand 0/8 mm Årdal	873,6	54,163	4,0	2,167	56,330
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	810,1	50,224	0,5	0,251	50,475
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	4,7	0,293	84	0,246	0,293
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Stålfiber	93,6	5,803			5,803
	0,0	0,000			0,000

10,332

Vedlegg C. Momentkapasitet

Bjelke 2:

Material egenskaper

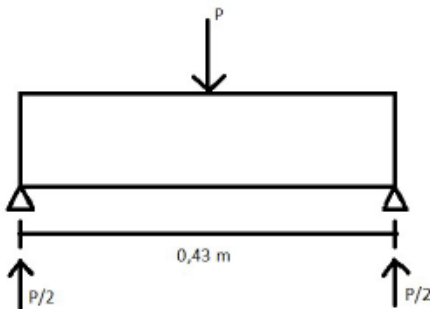
$$f_{ftk.res.2.5} := 1.4 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 150 \text{ mm} \quad h := 150 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 0.933 \text{ MPa} \quad L := 0.43 \text{ m} \quad P_{brudd} := 31.24 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{Rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 1.26 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 \cdot L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 11.721 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 11.721 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 31.24 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 17.581 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.375$$

Dimensjonerende bruddlast er 37,5% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.563$$

Karakteristisk bruddlast er 56,3% av reel bruddlast fra test

Bjelke 4:

Material egenskaper

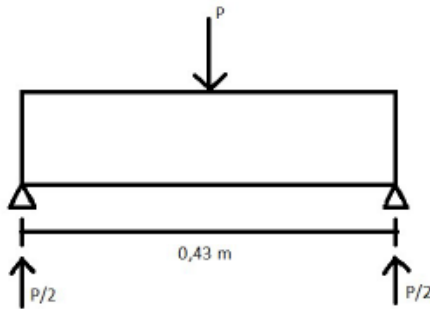
$$f_{ftk.res.2.5} := 2.4 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 150 \text{ mm} \quad h := 150 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 1.6 \text{ MPa} \quad L := 0.43 \text{ m} \quad P_{brudd} := 41.14 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{Rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 2.16 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 \cdot L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 20.093 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 20.093 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 41.14 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 30.14 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.488$$

Dimensjonerende bruddlast er 48,8% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.733$$

Karakteristisk bruddlast er 73,3% av reel bruddlast fra test

Bjelke 6:

Material egenskaper

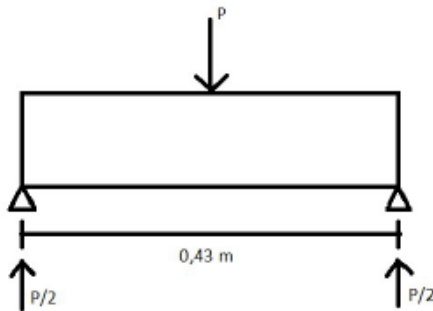
$$f_{ftk.res.2.5} := 2.7 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 150 \text{ mm} \quad h := 150 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 1.8 \text{ MPa} \quad L := 0.43 \text{ m} \quad P_{brudd} := 54.47 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{Rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 2.43 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 * L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 22.605 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og
karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 22.605 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 54.47 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 33.907 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.415$$

Dimensjonerende bruddlast er
41,5% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.622$$

Karakteristisk bruddlast er
62,2% av reel bruddlast fra test

Søyle 2:

Material egenskaper

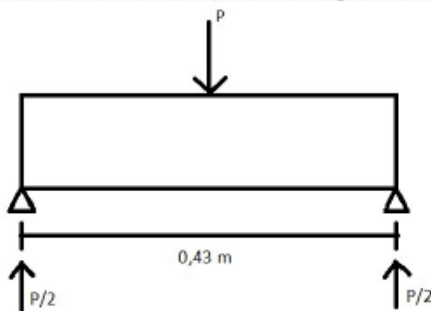
$$f_{ftk.res.2.5} := 0.74 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 150 \text{ mm} \quad h := 150 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 0.493 \text{ MPa} \quad L := 0.43 \text{ m} \quad P_{brudd} := 28.77 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{Rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 0.666 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 \cdot L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 6.195 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og
karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 6.195 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 28.77 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 9.293 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.215$$

Dimensjonerende bruddlast er
21,5% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.323$$

Karakteristisk bruddlast er
32,3% av reel bruddlast fra test

Søyle 4:

Material egenskaper

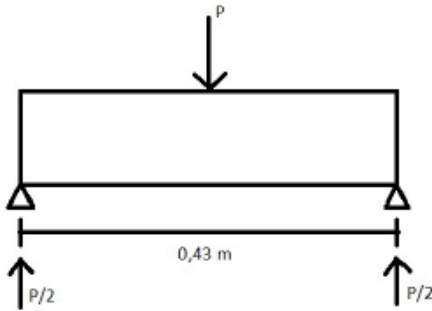
$$f_{ftk.res.2.5} := 1.2 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 150 \text{ mm} \quad h := 150 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 0.8 \text{ MPa} \quad L := 0.43 \text{ m} \quad P_{brudd} := 33.73 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 1.08 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 * L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 10.047 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og
karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 10.047 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 33.73 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 15.07 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.298$$

Dimensjonerende bruddlast er
29,8% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.447$$

Karakteristisk bruddlast er
44,7% av reel bruddlast fra test

Søyle 6:

Material egenskaper

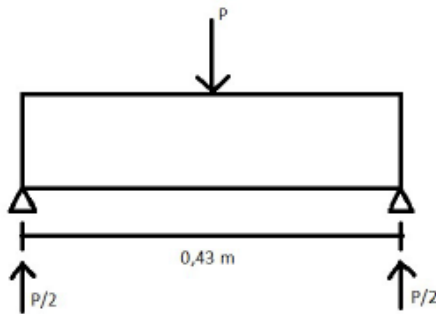
$$f_{ftk.res.2.5} := 0.93 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 150 \text{ mm} \quad h := 150 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 0.62 \text{ MPa} \quad L := 0.43 \text{ m} \quad P_{brudd} := 31.36 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 0.837 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 \cdot L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 7.786 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og
karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 7.786 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 11.679 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 31.36 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.248$$

Dimensjonerende bruddlast er
24,8% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.372$$

Karakteristisk bruddlast er
37,2% av reel bruddlast fra test

Plate 1:

Momentkapasitet:

Plate 1: (0,4% fiber)

Material egenskaper

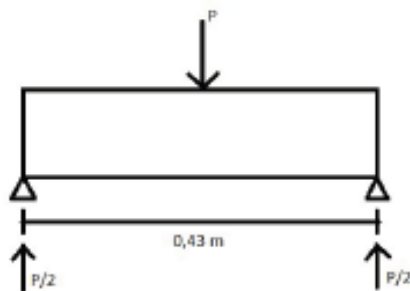
$$f_{ftk.res.2.5} := 1.4 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 480 \text{ mm} \quad h := 100 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 0.933 \text{ MPa} \quad L := 0.44 \text{ m} \quad P_{brudd} := 38.98 \text{ kN}$$

Momentkapasitet Mrd:

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 1.792 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 \cdot L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 16.291 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 16.291 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 24.436 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 38.98 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.418$$

Dimensjonerende bruddlast er 41,8% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.627$$

Karakteristisk bruddlast er 62,7% av reel bruddlast fra test

MERK: Denne platen ble ikke testet riktig da innstillingene på testmaskin ikke var riktige

Plate 2:

Material egenskaper

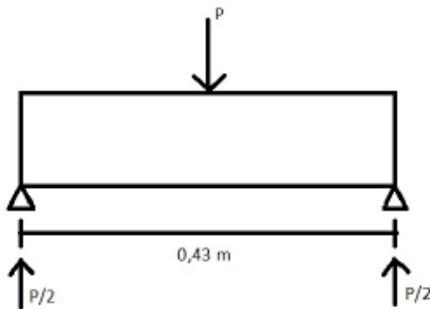
$$f_{ftk.res.2.5} := 1.4 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 480 \text{ mm} \quad h := 100 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 0.933 \text{ MPa} \quad L := 0.44 \text{ m} \quad P_{brudd} := 44.02 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 1.792 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 \cdot L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 16.291 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og
karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 16.291 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 44.02 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 24.436 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.37$$

Dimensjonerende bruddlast er
37% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.555$$

Karakteristisk bruddlast er
55,5% av reel bruddlast fra test

Plate 3:

Momentkapasitet:

Plate 3: (0,8% fiber)

For plater brukes rest strekkfasthet verdier fra bjelker da betongblandingene er de samme og lik støpemetode er brukt.

Material egenskaper

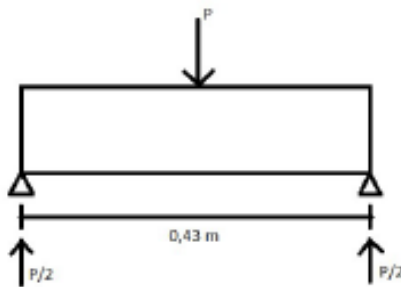
$$f_{f_{tk.res.2.5}} := 2.4 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 480 \text{ mm} \quad h := 100 \text{ mm}$$

$$f_{f_{td.res.2.5}} := \frac{f_{f_{tk.res.2.5}}}{\gamma_{cf}} = 1.6 \text{ MPa} \quad L := 0.44 \text{ m} \quad P_{brudd} := 21.47 \text{ kN}$$

Momentkapasitet Mrd:

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{f_{td.res.2.5}} \cdot b \cdot h^2 = 3.072 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :|

$$M = P/2 \cdot L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 27.927 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 27.927 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 21.47 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 41.891 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 1.301$$

Dimensjonerende bruddlast er 130% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 1.951$$

Karakteristisk bruddlast er 195% av reel bruddlast fra test

MERK: Denne platen ble ikke testet riktig da instillingene på testmaskinen var feil

Plate 4:

Material egenskaper

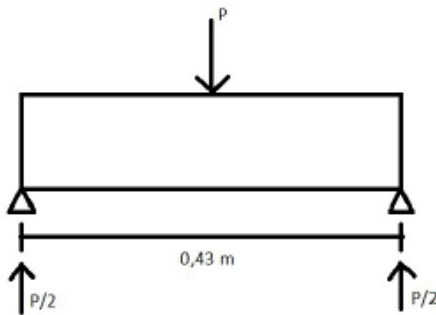
$$f_{ftk.res.2.5} := 2.4 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 480 \text{ mm} \quad h := 100 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 1.6 \text{ MPa} \quad L := 0.44 \text{ m} \quad P_{brudd} := 59.68 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 3.072 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 \cdot L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 27.927 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 27.927 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 59.68 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 41.891 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.468$$

Dimensjonerende bruddlast er 46,8% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.702$$

Karakteristisk bruddlast er 70,2% av reel bruddlast fra test

Plate 5:

Material egenskaper

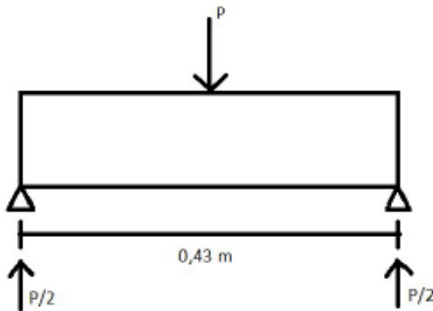
$$f_{ftk.res.2.5} := 2.7 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 480 \text{ mm} \quad h := 100 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 1.8 \text{ MPa} \quad L := 0.44 \text{ m} \quad P_{brudd} := 62.64 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{Rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 3.456 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 * L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 31.418 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og
karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 31.418 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 62.64 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 47.127 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.502$$

Dimensjonerende bruddlast er
50,2% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.752$$

Karakteristisk bruddlast er
75,2% av reel bruddlast fra test

Plate 6:

Material egenskaper

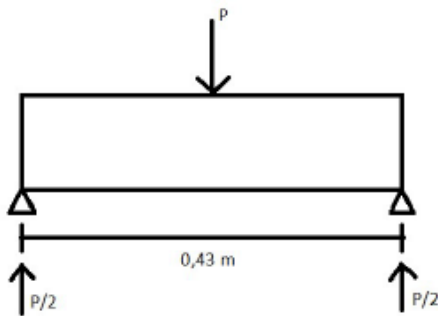
$$f_{ftk.res.2.5} := 2.7 \text{ MPa} \quad \gamma_{cf} := 1.5 \quad b := 480 \text{ mm} \quad h := 100 \text{ mm}$$

$$f_{ftd.res.2.5} := \frac{f_{ftk.res.2.5}}{\gamma_{cf}} = 1.8 \text{ MPa} \quad L := 0.44 \text{ m} \quad P_{brudd} := 58.35 \text{ kN}$$

Momentkapasitet M_{Rd} :

$$M_{Rd} := 0.4 \cdot f_{ftd.res.2.5} \cdot b \cdot h^2 = 3.456 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Dimensjonerende bruddlast:



Moment igjennom senter tverrsnitt :

$$M = P/2 * L/2$$

$$\rightarrow P_d := \frac{(4 \cdot M_{Rd})}{L} = 31.418 \text{ kN}$$

Dimensjonerende og
karakteristisk bruddlast:

$$P_d = 31.418 \text{ kN}$$

Reel bruddlast fra test:

$$P_{brudd} = 58.35 \text{ kN}$$

$$P_{dk} := P_d \cdot 1.5 = 47.127 \text{ kN}$$

Differansen mellom lastene:

$$Diff := \frac{P_d}{P_{brudd}} = 0.538$$

Dimensjonerende bruddlast er
53,8% av reel bruddlast fra test.

$$Diff_k := \frac{P_{dk}}{P_{brudd}} = 0.808$$

Karakteristisk bruddlast er
80,8% av reel bruddlast fra test

Vedlegg D. Kalkulasjoner

Vedlegg D-1. Spaltestrekkfasthet

Spaltestrekkfastheten testes i henhold til NS-EN 12390-6:2009 Prøvelegemers spaltestrekkfasthet

Spaltestrekkfastheten er gitt ved følgende formel :

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

Hvor

- f_{ct} er spaltestrekkfastheten, i MPa eller N/mm^2
 F er største last i N
 L er lengden på prøvelegemets kontaktlinje i mm
 d er det fastsatte tverrsnittmålet i mm

Spaltestrekkfastheten skal uttrykkes til nærmeste 0,05 MPa (N/mm^2)

```
L = 300; %mm  
d = 150; %mm
```

Uten fiber :

```
F1 = 237.83; %kN  
f1 = (2*F1*1000)/(pi*L*d)
```

```
f1 = 3.3646
```

```
fct1 = round(f1,2)
```

```
fct1 = 3.3600
```

```
F2 = 298.72; %kN  
f2 = (2*F2*1000)/(pi*L*d)
```

```
f2 = 4.2260
```

```
fct2 = round(f2,2)
```

```
fct2 = 4.2300
```

```
avg1 = round((f1+f2)/2,2)
```

```
avg1 = 3.8000
```

0,4% fiberinnhold :

```
F3 = 248.05; %kN
```

$$f3 = (2 * F3 * 1000) / (\pi * L * d)$$

$$f3 = 3.5092$$

$$fct3 = \text{round}(f3, 2)$$

$$fct3 = 3.5100$$

$$F4 = 222.97; \text{ %kN}$$

$$f4 = (2 * F4 * 1000) / (\pi * L * d)$$

$$f4 = 3.1544$$

$$fct4 = \text{round}(f4, 2)$$

$$fct4 = 3.1500$$

$$\text{avg2} = \text{round}((f3 + f4) / 2, 2)$$

$$\text{avg2} = 3.3300$$

0,8% fiberinnhold :

$$F5 = 314.07; \text{ %kN}$$

$$f5 = (2 * F5 * 1000) / (\pi * L * d)$$

$$f5 = 4.4432$$

$$fct5 = \text{round}(f5, 2)$$

$$fct5 = 4.4400$$

$$F6 = 315.39; \text{ %kN}$$

$$f6 = (2 * F6 * 1000) / (\pi * L * d)$$

$$f6 = 4.4619$$

$$fct6 = \text{round}(f6, 2)$$

$$fct6 = 4.4600$$

$$\text{avg3} = \text{round}((f5 + f6) / 2, 2)$$

$$\text{avg3} = 4.4500$$

1,2% fiberinnhold :

$$F7 = 387.69; \text{ %kN}$$

$$f7 = (2 * F7 * 1000) / (\pi * L * d)$$

$$f7 = 5.4847$$

$$fct7 = \text{round}(f7, 2)$$

$$fct7 = 5.4800$$

$$F8 = 388.90; \text{ %kN}$$

$$f8 = (2 * F8 * 1000) / (\pi * L * d)$$

$$f8 = 5.5018$$

$$fct8 = \text{round}(f8, 2)$$

$$fct8 = 5.5000$$

$$\text{avg4} = \text{round}((f7 + f8) / 2, 2)$$

$$\text{avg4} = 5.4900$$

Vedlegg D-2. Bøystrekkfasthet

Bøystrekkfastheten testes i henhold til NS-EN 12390-5:2019 Prøvelegemers bøystrekkfasthet

For tre – punkts bøyeprøving er bøystrekkfastheten gitt ved formel :

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

Hvor

$f_{ct,fl}$ er bøystrekkfastheten i MPa (N/mm^2)

F er bruddlast i N

l er avstanden mellom de nedre rullene i mm

d_1 og d_2 er tverrsnittets tverrmål i mm

Bøystrekkfasthet for bjelker og søyler

Bjelker :

$d_1 = 150;$ %mm
 $d_2 = 150;$ %mm
 $l = 430;$ %mm

0,4% fiberinnhold :

$F_1 = 31.24;$ %kN
 $f_{ctf11} = (3 \cdot F_1 \cdot 1000 \cdot l) / (2 \cdot d_1 \cdot (d_2^2))$

$f_{ctf11} = 5.9703$

0,8% fiberinnhold :

$F_2 = 41.14;$ %kN
 $f_{ctf12} = (3 \cdot F_2 \cdot 1000 \cdot l) / (2 \cdot d_1 \cdot (d_2^2))$

$f_{ctf12} = 7.8623$

1,2% fiberinnhold :

$F_3 = 54.47;$ %kN
 $f_{ctf13} = (3 \cdot F_3 \cdot 1000 \cdot l) / (2 \cdot d_1 \cdot (d_2^2))$

$f_{ctf13} = 10.4098$

Søyler :

0,4% fiberinnhold :

$$F4 = 28.77; \quad \%kN$$

$$fctf14 = (3 * F4 * 1000 * l) / (2 * d1 * (d2^2))$$

$$fctf14 = 5.4983$$

0,8% fiberinnhold :

$$F5 = 33.73; \quad \%kN$$

$$fctf15 = (3 * F5 * 1000 * l) / (2 * d1 * (d2^2))$$

$$fctf15 = 6.4462$$

1,2% fiberinnhold :

$$F6 = 31.36; \quad \%kN$$

$$fctf16 = (3 * F6 * 1000 * l) / (2 * d1 * (d2^2))$$

$$fctf16 = 5.9932$$

Bøystrekkfasthet for plater

$$d1p = 480; \quad \%mm$$

$$d2p = 100; \quad \%mm$$

$$lp = 440; \quad \%mm$$

0,4% fiberinnhold :

$$F1p = 38.98; \quad \%kN$$

$$fctf11p = (3 * F1p * 1000 * l) / (2 * d1p * (d2p^2))$$

$$fctf11p = 5.2379$$

$$F2p = 44.02; \quad \%kN$$

$$fctf12p = (3 * F2p * 1000 * l) / (2 * d1p * (d2p^2))$$

$$fctf12p = 5.9152$$

0,8% fiberinnhold :

$$F3p = 21.47; \quad \%kN$$

$$fctf13p = (3 * F3p * 1000 * l) / (2 * d1p * (d2p^2))$$

$$fctf13p = 2.8850$$

$$F4p = 59.68; \quad \%kN$$

$$fctf14p = (3 * F4p * 1000 * l) / (2 * d1p * (d2p^2))$$

$$fctf14p = 8.0195$$

1,2% fiberinnhold :

$$F5p = 62.64; \quad \%kN$$

$$fctf15p = (3 * F5p * 1000 * l) / (2 * d1p * (d2p^2))$$

$$fctf15p = 8.4173$$

$$F6p = 58.35; \quad \%kN$$

$$fctf16p = (3 * F6p * 1000 * l) / (2 * d1p * (d2p^2))$$

$$fctf16p = 7.8408$$

Vedlegg D-3. CMOD

Kalkulering av proporsjonalitetsgrense og rest bøyestrekfasthet i henhold til NS-EN 14651:2005+A1:2007 [#]

Data:

Bjelke 1 :

```
l1 = 550; %mm  
b1 = 152.6; %mm  
h1 = 151; %mm  
hsp1 = 125.6; %mm  
FL1 = 4.011254787; %kN  
F1_1 = 11.81478596; %kN  
F2_1 = 11.65945148; %kN  
F3_1 = 11.11712933; %kN  
F4_1 = 9.714923859; %kN
```

Bjelke 3 :

```
l3 = 550; %mm  
b3 = 151.4; %mm  
h3 = 151; %mm  
hsp3 = 126; %mm  
FL3 = 20.504444031; %kN  
F1_3 = 25.2697506; %kN  
F2_3 = 21.75403595; %kN  
F3_3 = 19.26316643; %kN  
F4_3 = 17.0936985; %kN
```

Bjelke 5 :

```
l5 = 550; %mm  
b5 = 154; %mm  
h5 = 152; %mm  
hsp5 = 126; %mm  
FL5 = 20.40003967; %kN  
F1_5 = 23.62064552; %kN  
F2_5 = 23.18494987; %kN  
F3_5 = 21.51737595; %kN  
F4_5 = 20.15551758; %kN
```

Søyle 1 :

```
S11 = 550; %mm  
Sb1 = 150; %mm  
Sh1 = 150; %mm  
Shsp1 = 125.1; %mm
```

```
SFL1 = 16.85496902; %kN
SF1_1 = 6.057607174; %kN
SF2_1 = 5.992631912; %kN
SF3_1 = 5.685083866; %kN
SF4_1 = 5.433647156; %kN
```

Søyle 3 :

```
S13 = 550; %mm
Sb3 = 152.4; %mm
Sh3 = 151; %mm
Shsp3 = 125.5; %mm
SFL3 = 17.28884125; %kN
SF1_3 = 12.27056408; %kN
SF2_3 = 10.47756863; %kN
SF3_3 = 9.571154594; %kN
SF4_3 = 8.661684036; %kN
```

Søyle 5 :

```
S15 = 550; %mm
Sb5 = 150; %mm
Sh5 = 150; %mm
Shsp5 = 125.1; %mm
SFL5 = 16.40844917; %kN
SF1_5 = 7.58110714; %kN
SF2_5 = 7.294752598; %kN
SF3_5 = 7.195301056; %kN
SF4_5 = 6.815383911; %kN
```

Kalkulasjoner

Proporsjonalitetsgrense (LOP) :

$$LOP = f_{\alpha,L}^f$$

$$f_{\alpha,L}^f = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

LOP skal uttrykkes til nærmeste 0,1 N/mm²

Bjelke 1 :

```
Bjelke_LOP_1 = round((3*FL1*1000*11)/(2*b1*(hsp1^2)),1) % N/mm^2
```

```
Bjelke_LOP_1 = 1.4000
```

Bjelke 3 :

```
Bjelke_LOP_3 = round((3*FL3*1000*13)/(2*b3*(hsp3^2)),1) % N/mm^2
```

Bjelke_LOP_3 = 7

Bjelke 5 :

```
Bjelke_LOP_5 = round((3*FL5*1000*I5)/(2*b5*(hsp5^2)),1) % N/mm^2
```

Bjelke_LOP_5 = 6.9000

Søyle 1 :

```
Soyle_LOP_1 = round((3*SFL1*1000*S11)/(2*Sb1*(Shsp1^2)),1) % N/mm^2
```

Soyle_LOP_1 = 5.9000

Søyle 3 :

```
Soyle_LOP_3 = round((3*SFL3*1000*S13)/(2*Sb3*(Shsp3^2)),1) % N/mm^2
```

Soyle_LOP_3 = 5.9000

Søyle 5 :

```
Soyle_LOP_5 = round((3*SFL5*1000*S15)/(2*Sb5*(Shsp5^2)),1) % N/mm^2
```

Soyle_LOP_5 = 5.8000

Rest bøyestrekfasthet ($f_{R,i}$)

$$f_{R,i} = \frac{3 \cdot F_i \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

$f_{R,i}$ skal uttrykkes til nærmeste 0,1 N/mm²

Bjelke 1 :

```
Bjelke_fR1_1 = round((3*F1_1*1000*I1)/(2*b1*(hsp1^2)),1)
```

Bjelke_fR1_1 = 4

```
Bjelke_fR2_1 = round((3*F2_1*1000*I1)/(2*b1*(hsp1^2)),1)
```

Bjelke_fR2_1 = 4

```
Bjelke_fR3_1 = round((3*F3_1*1000*I1)/(2*b1*(hsp1^2)),1)
```

Bjelke_fR3_1 = 3.8000

```
Bjelke_fR4_1 = round((3*F4_1*1000*I1)/(2*b1*(hsp1^2)),1)
```

Bjelke_fR4_1 = 3.3000

Bjelke 3 :

$$\text{Bjelke_fr1_3} = \text{round}((3 * \text{F1_3} * 1000 * l_3) / (2 * b_3 * (\text{hsp}_3^2)), 1)$$

$$\text{Bjelke_fr1_3} = 8.7000$$

$$\text{Bjelke_fr2_3} = \text{round}((3 * \text{F2_3} * 1000 * l_3) / (2 * b_3 * (\text{hsp}_3^2)), 1)$$

$$\text{Bjelke_fr2_3} = 7.5000$$

$$\text{Bjelke_fr3_3} = \text{round}((3 * \text{F3_3} * 1000 * l_3) / (2 * b_3 * (\text{hsp}_3^2)), 1)$$

$$\text{Bjelke_fr3_3} = 6.6000$$

$$\text{Bjelke_fr4_3} = \text{round}((3 * \text{F4_3} * 1000 * l_3) / (2 * b_3 * (\text{hsp}_3^2)), 1)$$

$$\text{Bjelke_fr4_3} = 5.9000$$

Bjelke 5 :

$$\text{Bjelke_fr1_5} = \text{round}((3 * \text{F1_5} * 1000 * l_5) / (2 * b_5 * (\text{hsp}_5^2)), 1)$$

$$\text{Bjelke_fr1_5} = 8$$

$$\text{Bjelke_fr2_5} = \text{round}((3 * \text{F2_5} * 1000 * l_5) / (2 * b_5 * (\text{hsp}_5^2)), 1)$$

$$\text{Bjelke_fr2_5} = 7.8000$$

$$\text{Bjelke_fr3_5} = \text{round}((3 * \text{F3_5} * 1000 * l_5) / (2 * b_5 * (\text{hsp}_5^2)), 1)$$

$$\text{Bjelke_fr3_5} = 7.3000$$

$$\text{Bjelke_fr4_5} = \text{round}((3 * \text{F4_5} * 1000 * l_5) / (2 * b_5 * (\text{hsp}_5^2)), 1)$$

$$\text{Bjelke_fr4_5} = 6.8000$$

Søyle 1 :

$$\text{Soyle_fr1_1} = \text{round}((3 * \text{SF1_1} * 1000 * s_{l1}) / (2 * s_{b1} * (\text{Shsp}_1^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr1_1} = 2.1000$$

$$\text{Soyle_fr2_1} = \text{round}((3 * \text{SF2_1} * 1000 * s_{l1}) / (2 * s_{b1} * (\text{Shsp}_1^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr2_1} = 2.1000$$

$$\text{Soyle_fr3_1} = \text{round}((3 * \text{SF3_1} * 1000 * s_{l1}) / (2 * s_{b1} * (\text{Shsp}_1^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr3_1} = 2$$

$$\text{Soyle_fr4_1} = \text{round}((3 * \text{SF4_1} * 1000 * s_{l1}) / (2 * s_{b1} * (\text{Shsp}_1^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr4_1} = 1.9000$$

Søyle 3 :

$$\text{Soyle_fr1_3} = \text{round}((3 * \text{SF1_3} * 1000 * s_{l3}) / (2 * s_{b3} * (\text{Shsp}_3^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr1_3} = 4.2000$$

$$\text{Soyle_fr2_3} = \text{round}((3 \cdot \text{SF2_3} \cdot 1000 \cdot \text{S13}) / (2 \cdot \text{Sb3} \cdot (\text{Shsp3}^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr2_3} = 3.6000$$

$$\text{Soyle_fr3_3} = \text{round}((3 \cdot \text{SF3_3} \cdot 1000 \cdot \text{S13}) / (2 \cdot \text{Sb3} \cdot (\text{Shsp3}^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr3_3} = 3.3000$$

$$\text{Soyle_fr4_3} = \text{round}((3 \cdot \text{SF4_3} \cdot 1000 \cdot \text{S13}) / (2 \cdot \text{Sb3} \cdot (\text{Shsp3}^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr4_3} = 3$$

Søyle 5 :

$$\text{Soyle_fr1_5} = \text{round}((3 \cdot \text{SF1_5} \cdot 1000 \cdot \text{S15}) / (2 \cdot \text{Sb5} \cdot (\text{Shsp5}^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr1_5} = 2.7000$$

$$\text{Soyle_fr2_5} = \text{round}((3 \cdot \text{SF2_5} \cdot 1000 \cdot \text{S15}) / (2 \cdot \text{Sb5} \cdot (\text{Shsp5}^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr2_5} = 2.6000$$

$$\text{Soyle_fr3_5} = \text{round}((3 \cdot \text{SF3_5} \cdot 1000 \cdot \text{S15}) / (2 \cdot \text{Sb5} \cdot (\text{Shsp5}^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr3_5} = 2.5000$$

$$\text{Soyle_fr4_5} = \text{round}((3 \cdot \text{SF4_5} \cdot 1000 \cdot \text{S15}) / (2 \cdot \text{Sb5} \cdot (\text{Shsp5}^2)), 1)$$

$$\text{Soyle_fr4_5} = 2.4000$$

Kalkulering av karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekkfasthet i henhold til COIN Project report 29 [#]

Karakteristisk rest bøyestrekfasthet ($f_{Rk,i}$) :

$$f_{Rk,i} = f_{R,i} - k \cdot s$$

$$k = 1.7$$

$$k = 1.7000$$

$$s = 0$$

$$s = 0$$

Siden det bare ble testet 1 prøvestykke for hver blanding, er standardavviket 0. Dette gjør at $f_{Rk,i} = f_{R,i}$

Bjelke 1 :

$$\text{Bjelke_fRk1_1} = \text{Bjelke_fR1_1}$$

$$\text{Bjelke_fRk1_1} = 4$$

$$\text{Bjelke_fRk2_1} = \text{Bjelke_fR2_1}$$

$$\text{Bjelke_fRk2_1} = 4$$

$$\text{Bjelke_fRk3_1} = \text{Bjelke_fR3_1}$$

$$\text{Bjelke_fRk3_1} = 3.8000$$

$$\text{Bjelke_fRk4_1} = \text{Bjelke_fR4_1}$$

$$\text{Bjelke_fRk4_1} = 3.3000$$

Bjelke 3 :

$$\text{Bjelke_fRk1_3} = \text{Bjelke_fR1_3}$$

$$\text{Bjelke_fRk1_3} = 8.7000$$

$$\text{Bjelke_fRk2_3} = \text{Bjelke_fR2_3}$$

$$\text{Bjelke_fRk2_3} = 7.5000$$

$$\text{Bjelke_fRk3_3} = \text{Bjelke_fR3_3}$$

$$\text{Bjelke_fRk3_3} = 6.6000$$

$$\text{Bjelke_fRk4_3} = \text{Bjelke_fR4_3}$$

$$\text{Bjelke_fRk4_3} = 5.9000$$

Bjelke 5 :

$$\text{Bjelke_fRk1_5} = \text{Bjelke_fR1_5}$$

$$\text{Bjelke_fRk1_5} = 8$$

$$\text{Bjelke_fRk2_5} = \text{Bjelke_fR2_5}$$

$$\text{Bjelke_fRk2_5} = 7.8000$$

$$\text{Bjelke_fRk3_5} = \text{Bjelke_fR3_5}$$

$$\text{Bjelke_fRk3_5} = 7.3000$$

$$\text{Bjelke_fRk4_5} = \text{Bjelke_fR4_5}$$

$$\text{Bjelke_fRk4_5} = 6.8000$$

Søyle 1 :

$$\text{Soyle_fRk1_1} = \text{Soyle_fR1_1}$$

$$\text{Soyle_fRk1_1} = 2.1000$$

$$\text{Soyle_fRk2_1} = \text{Soyle_fR2_1}$$

$$\text{Soyle_fRk2_1} = 2.1000$$

$$\text{Soyle_frk3_1} = \text{Soyle_fr3_1}$$

$$\text{Soyle_frk3_1} = 2$$

$$\text{Soyle_frk4_1} = \text{Soyle_fr4_1}$$

$$\text{Soyle_frk4_1} = 1.9000$$

Søyle 3 :

$$\text{Soyle_frk1_3} = \text{Soyle_fr1_3}$$

$$\text{Soyle_frk1_3} = 4.2000$$

$$\text{Soyle_frk2_3} = \text{Soyle_fr2_3}$$

$$\text{Soyle_frk2_3} = 3.6000$$

$$\text{Soyle_frk3_3} = \text{Soyle_fr3_3}$$

$$\text{Soyle_frk3_3} = 3.3000$$

$$\text{Soyle_frk4_3} = \text{Soyle_fr4_3}$$

$$\text{Soyle_frk4_3} = 3$$

Søyle 5 :

$$\text{Soyle_frk1_5} = \text{Soyle_fr1_5}$$

$$\text{Soyle_frk1_5} = 2.7000$$

$$\text{Soyle_frk2_5} = \text{Soyle_fr2_5}$$

$$\text{Soyle_frk2_5} = 2.6000$$

$$\text{Soyle_frk3_5} = \text{Soyle_fr3_5}$$

$$\text{Soyle_frk3_5} = 2.5000$$

$$\text{Soyle_frk4_5} = \text{Soyle_fr4_5}$$

$$\text{Soyle_frk4_5} = 2.4000$$

Karakteristisk rest strekkfasthet ($f_{fk, res, 2,5}$)

Bjelke 1 :

$$\text{Bjelke1_fftk_res} = 0.37 * \text{Bjelke_frk3_1}$$

$$\text{Bjelke1_fftk_res} = 1.4060$$

Bjelke 3 :

$$\text{Bjelke3_fftk_res} = 0.37 * \text{Bjelke_frk3_3}$$

Bjelke3_fftk_res = 2.4420

Bjelke 5 :

Bjelke5_fftk_res = 0.37*Bjelke_fRk3_5

Bjelke5_fftk_res = 2.7010

Søyle 1 :

Soyle1_fftk_res = 0.37*Soyle_fRk3_1

Soyle1_fftk_res = 0.7400

Søyle 3 :

Soyle3_fftk_res = 0.37*Soyle_fRk3_3

Soyle3_fftk_res = 1.2210

Søyle 5 :

Soyle5_fftk_res = 0.37*Soyle_fRk3_5

Soyle5_fftk_res = 0.9250

Vedlegg D-4. Elastisitetsmodulus

Beregning av spenninger brukt som input til maskinen:

Uten fiber:

Øvre spenning:
$$\sigma_a = \frac{f_c}{3} = \frac{69}{3} = 23 \text{ MPa}$$

Nedre spenning:
$$0,10 f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 f_c$$
$$\rightarrow 6,9 \leq \sigma_b \leq 10,35$$
$$\rightarrow \sigma_b \approx 8 \text{ MPa}$$

Forhåndslast spenning:
$$0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$$
$$\rightarrow \sigma_b \approx 2 \text{ MPa}$$

0,4% fiber:

Øvre spenning:
$$\sigma_a = \frac{f_c}{3} = \frac{61}{3} = 20,33 \text{ MPa}$$

Nedre spenning:
$$0,10 f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 f_c$$
$$\rightarrow 6,1 \leq \sigma_b \leq 9,15$$
$$\rightarrow \sigma_b \approx 8 \text{ MPa}$$

Forhåndslast spenning:
$$0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$$
$$\rightarrow \sigma_b \approx 2 \text{ MPa}$$

0,8% fiber:

Øvre spenning: $\sigma_a = \frac{f_c}{3} = \frac{71}{3} = 23,67 \text{ MPa}$

Nedre spenning: $0,10 f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 f_c$
 $\rightarrow 7,1 \leq \sigma_b \leq 10,65$
 $\rightarrow \sigma_b \approx 8 \text{ MPa}$

Forhåndslast spenning: $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$
 $\rightarrow \sigma_b \approx 2 \text{ MPa}$

1,2% fiber:

Øvre spenning: $\sigma_a = \frac{f_c}{3} = \frac{68}{3} = 22,67 \text{ MPa}$

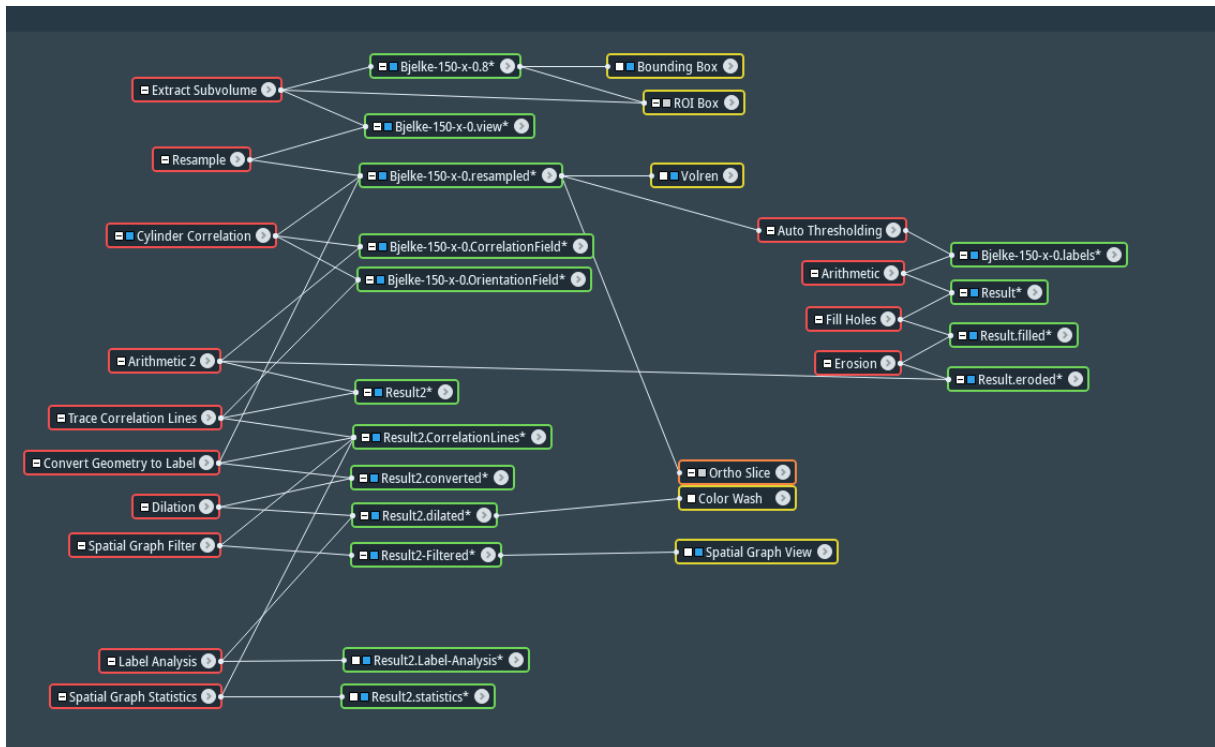
Nedre spenning: $0,10 f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 f_c$
 $\rightarrow 6,8 \leq \sigma_b \leq 10,2$
 $\rightarrow \sigma_b \approx 8 \text{ MPa}$

Forhåndslast spenning: $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$
 $\rightarrow \sigma_b \approx 2 \text{ MPa}$

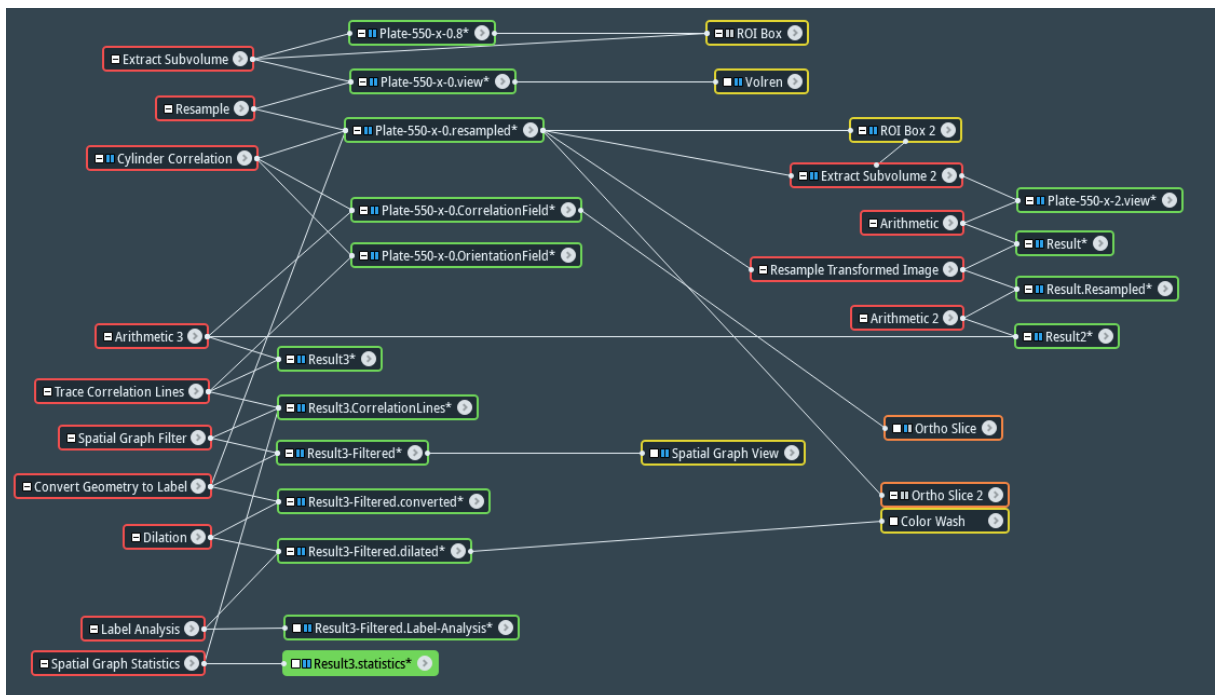
Vedlegg E. Avizo

Vedlegg E-1. Analyse

Bjelker og søyler:

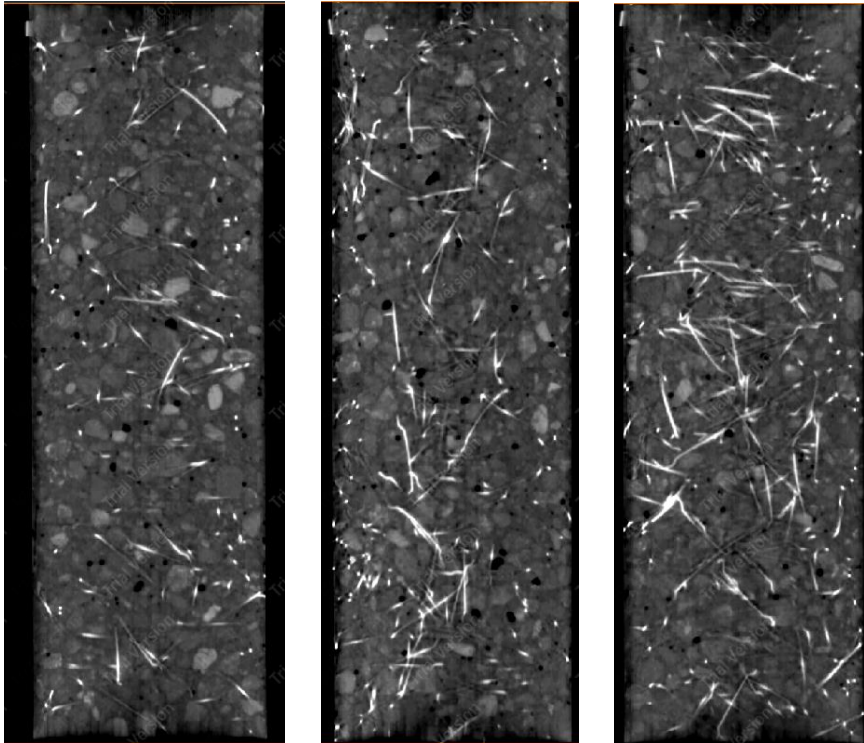


Plater:



Vedlegg E-2. Bilder

Bjelke 2, 4 og 6. Tverrsnitt YZ:



Søyle 2,4 og 6. Tverrsnitt YZ:

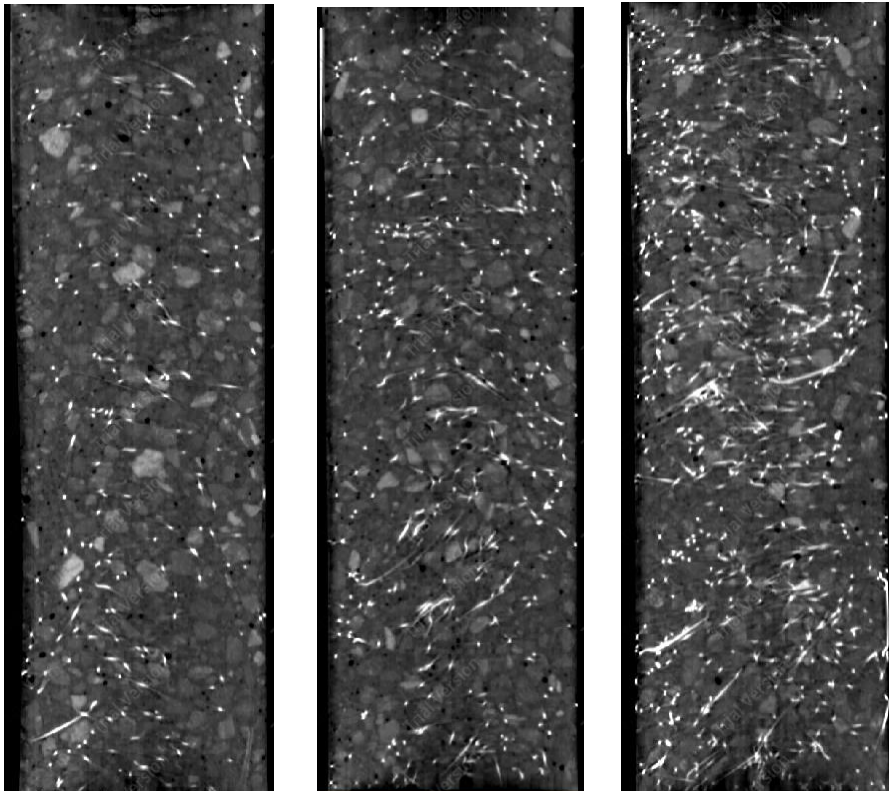
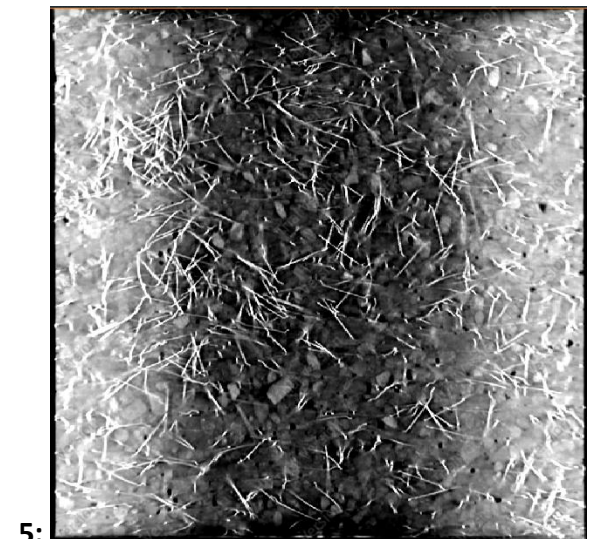
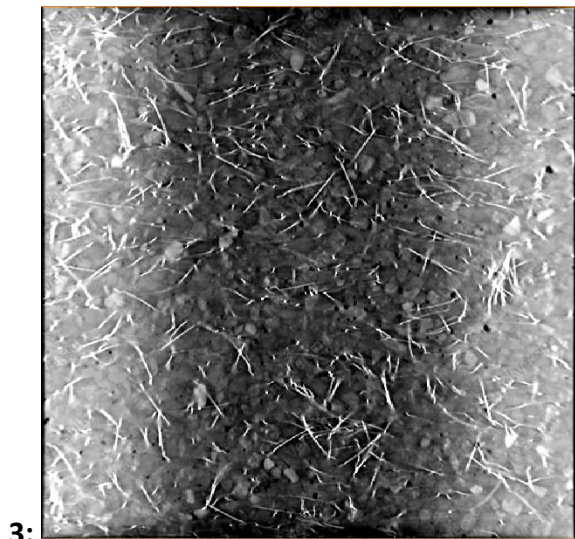
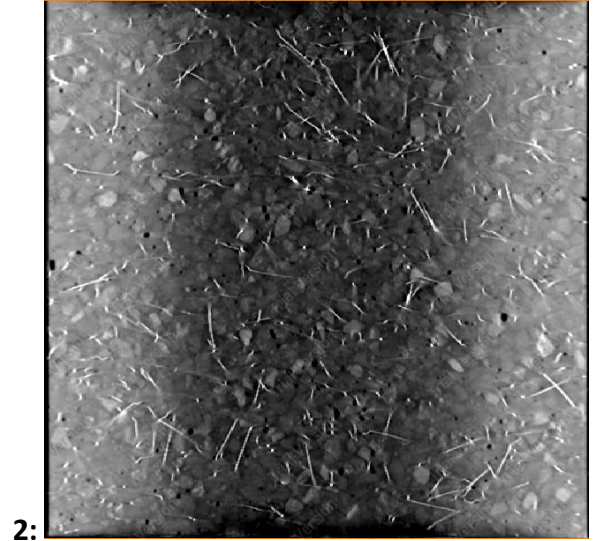
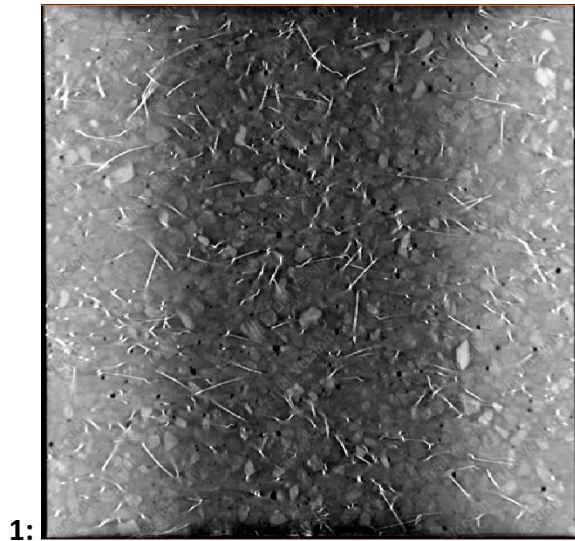
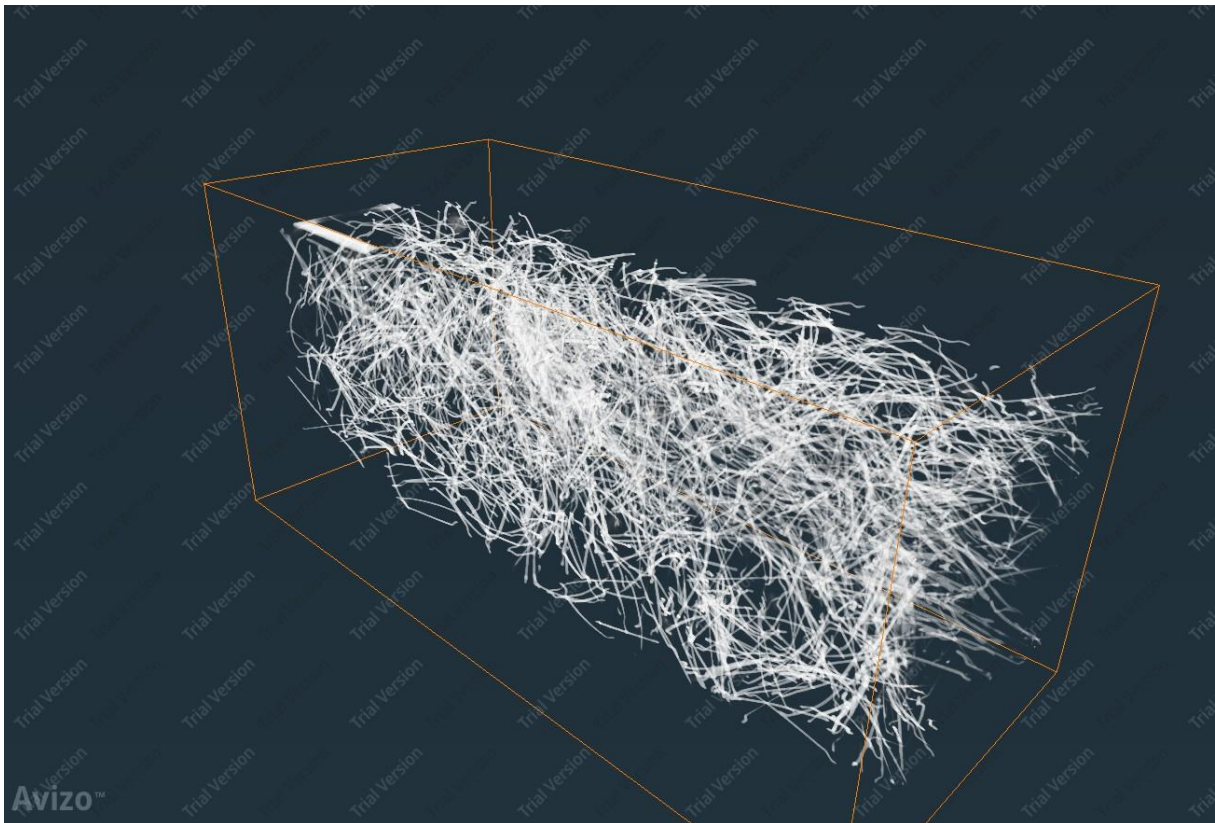
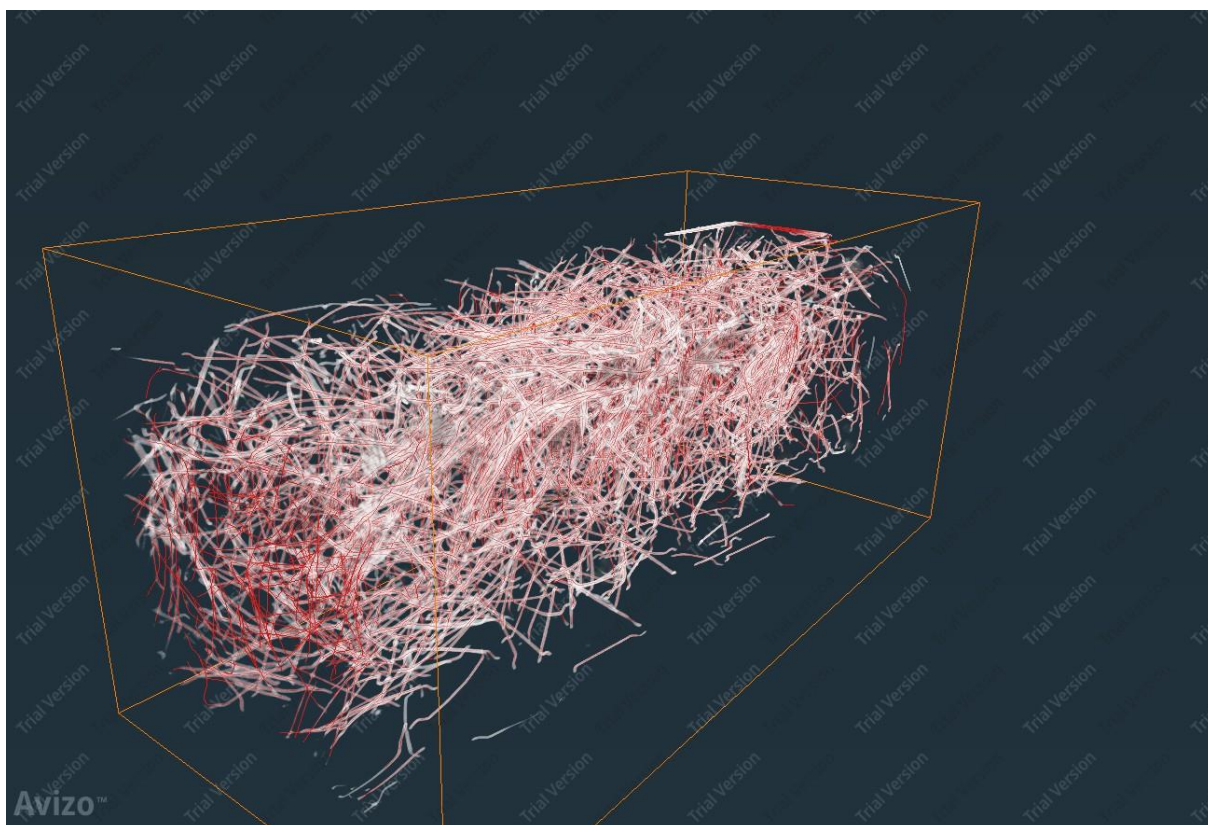


Plate 1, 2, 3 og 5. Tverrsnitt YZ:



Bjelke 4:





Søyle 4:

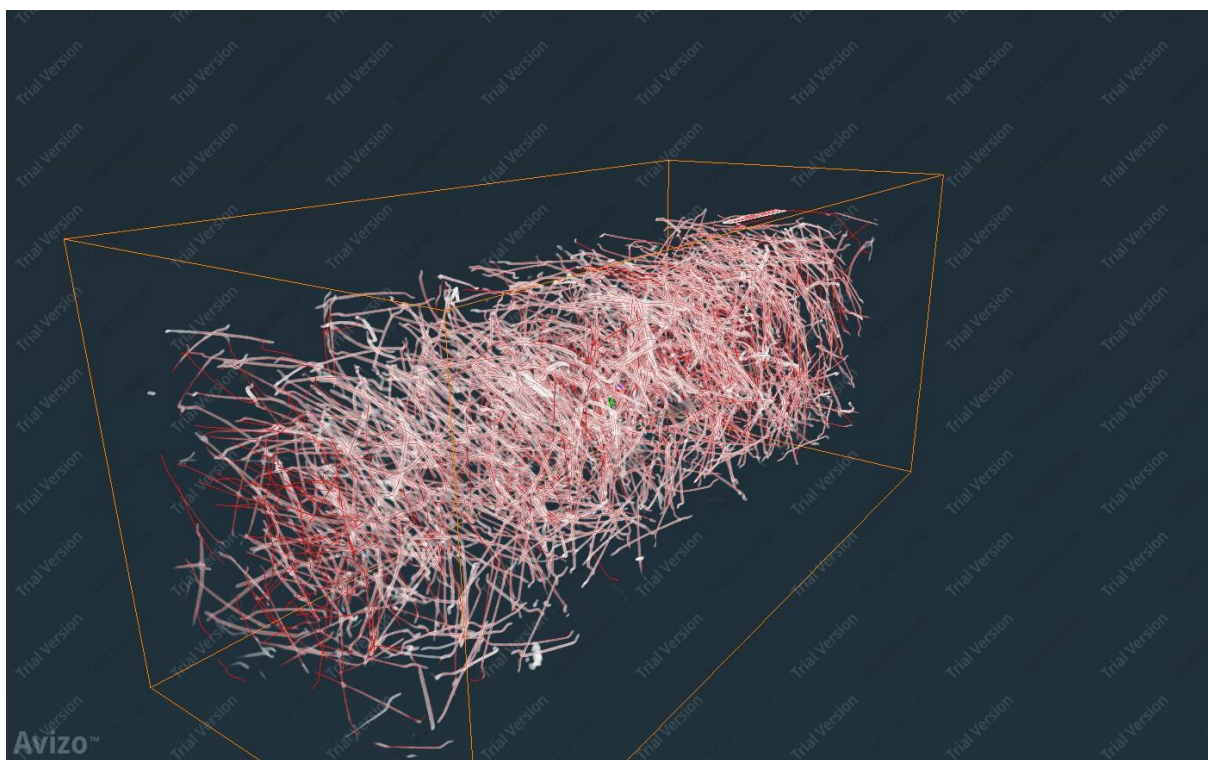
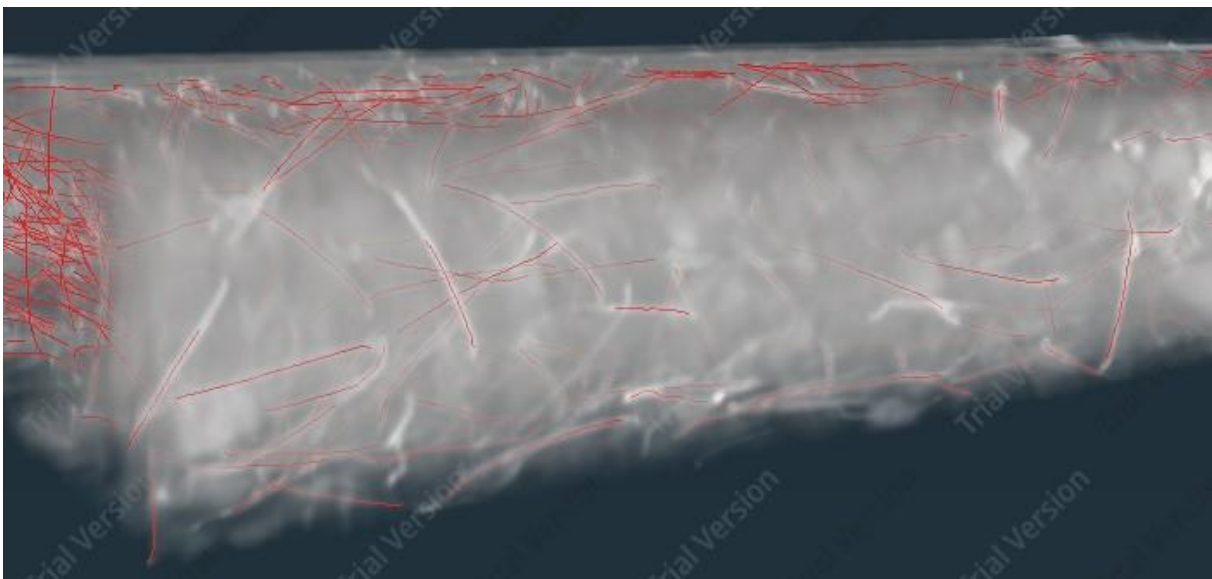
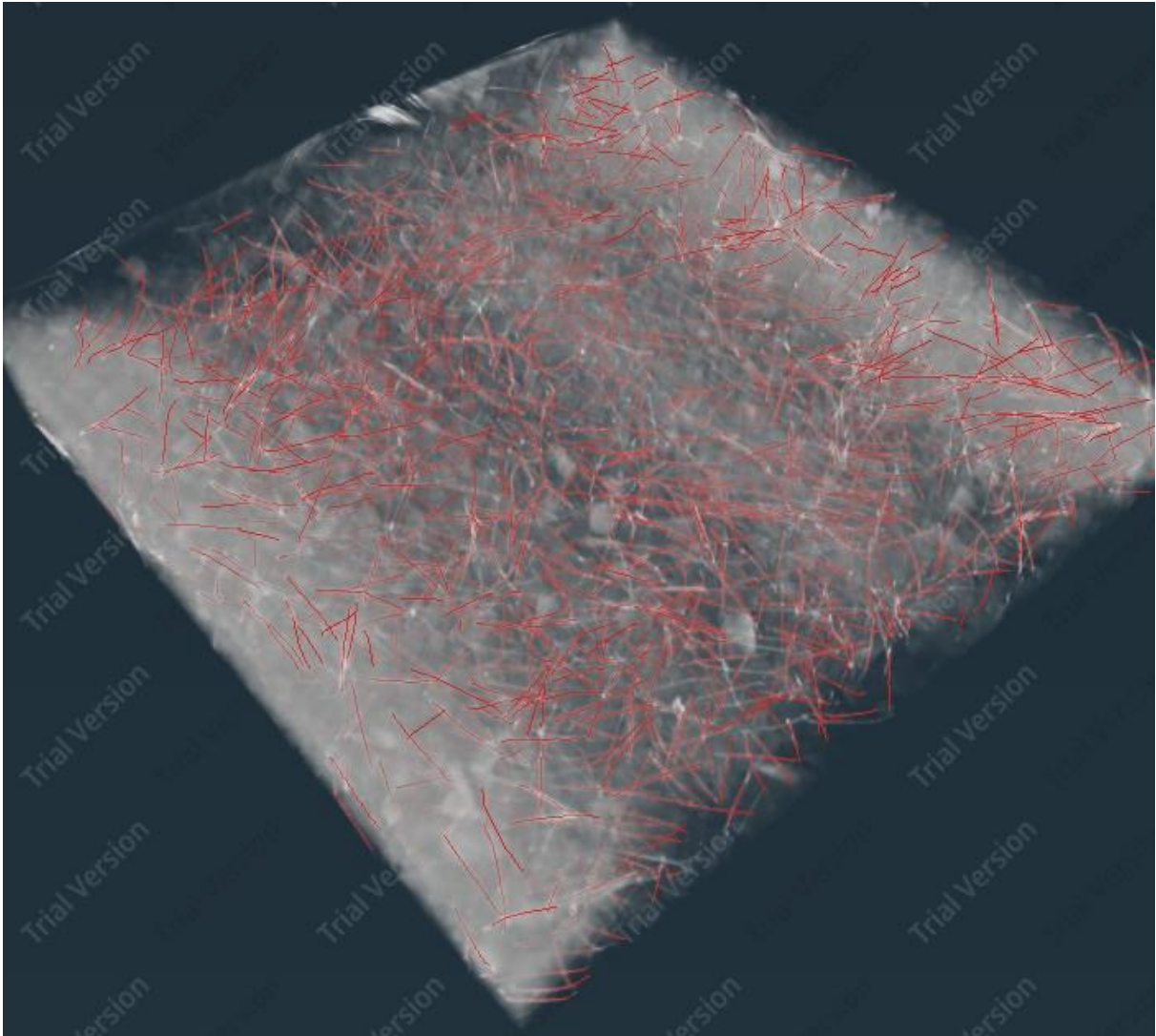


Plate 1:



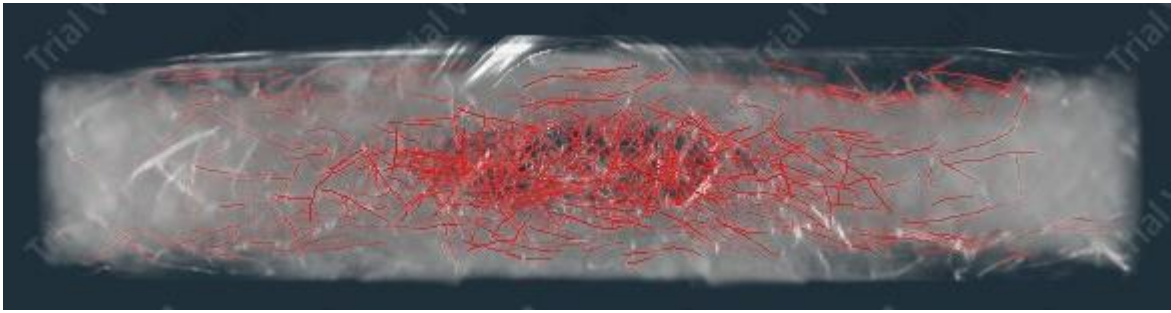


Plate 2:

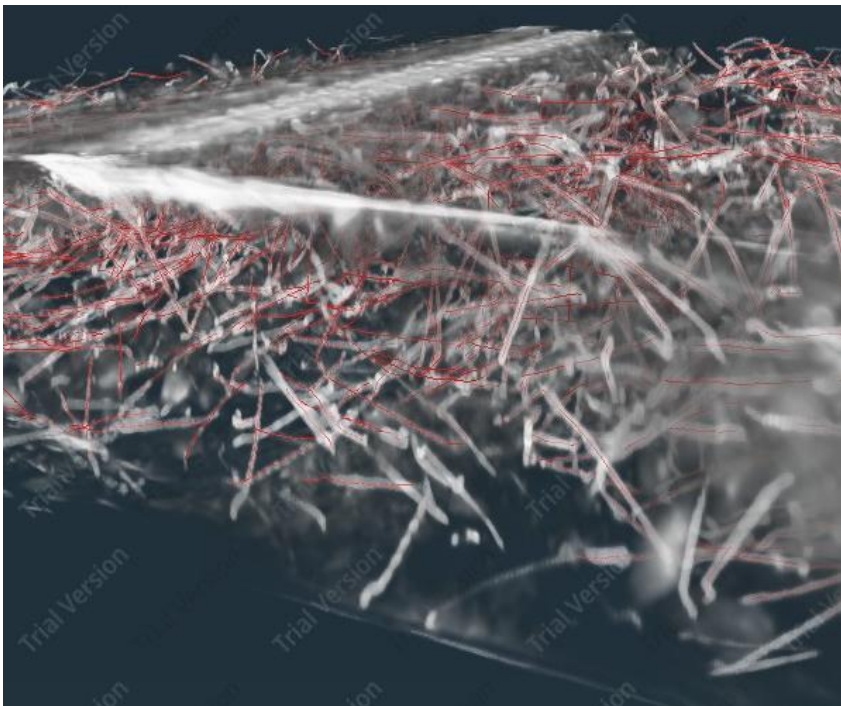
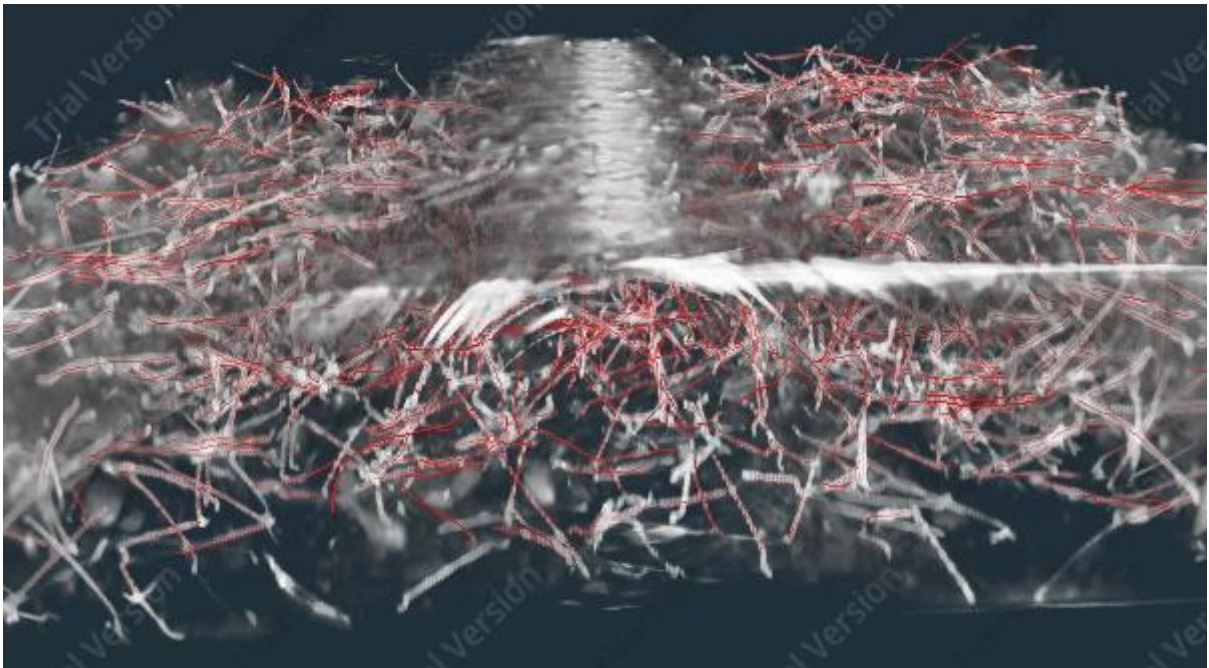


Plate 3:

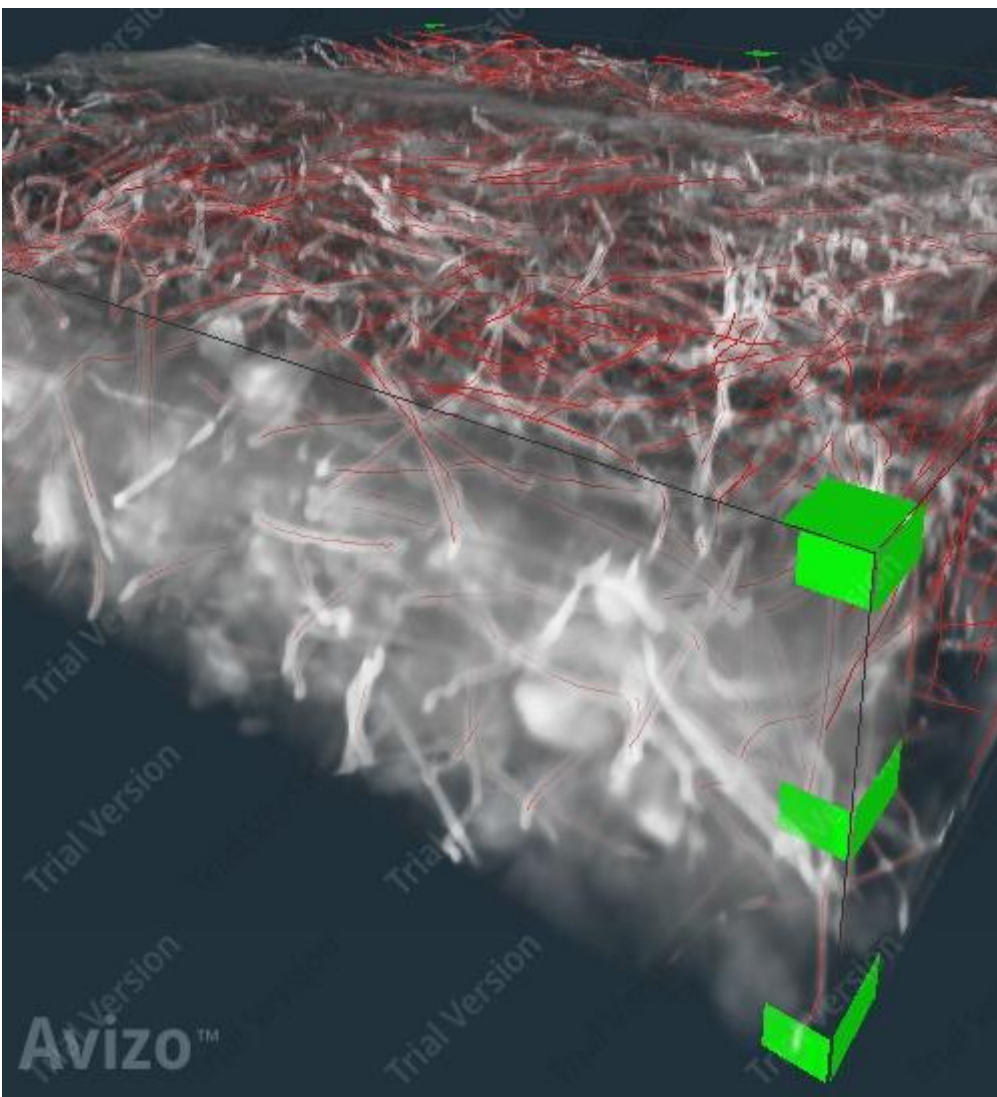
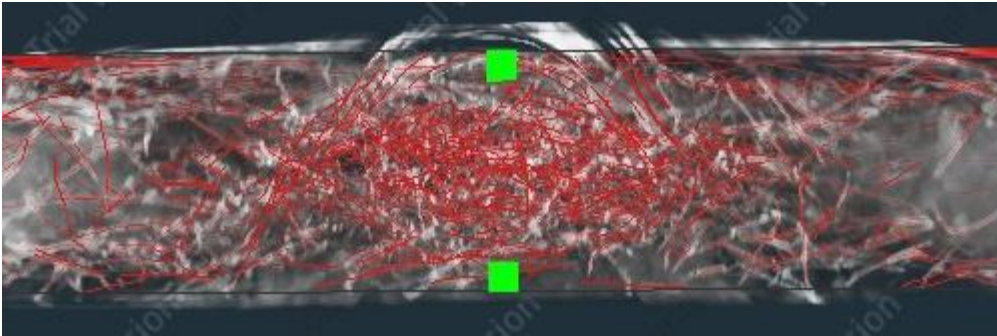


Plate 5:

