

Skjærkapasitet av ultrahøyfast fiberarmert betong – verifikasjon av designstandard



Tonje Schjelderup



Svava Iselin Idarsdottir



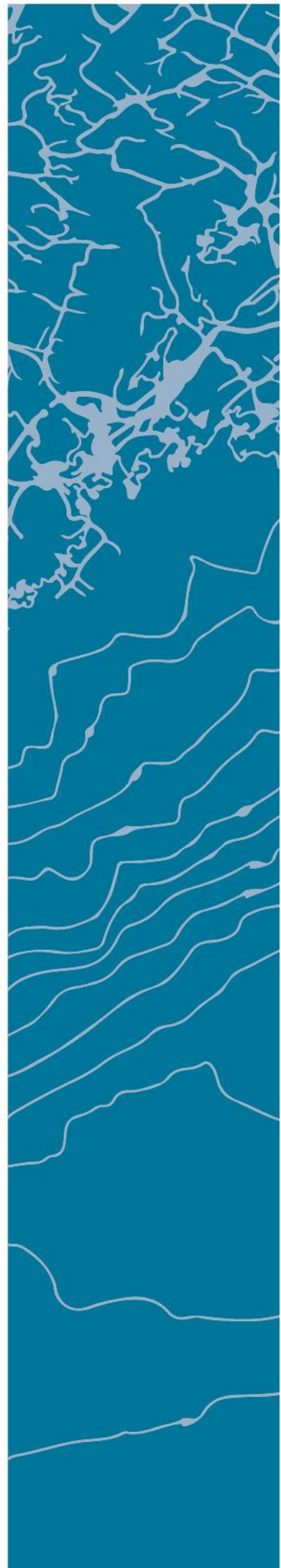
Piotr Stanislawski

VEILEDERE

Rein Terje Thorstensen
Ingrid Lande Larsen

Universitetet i Agder, 2018

Fakultet for teknologi og realfag
Institutt for ingeniørvitenskap



Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

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

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse. 	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

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

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

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

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å

gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?

JA NEI

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA NEI

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

Forord

Denne oppgaven er skrevet for Universitet i Agder og er en del av Meerc forskningsprosjekt. Vi valgte dette tema fordi det er spennende og utfordrende å se på nye materialer, samtidig som materialteknologi og spesielt betong er vår felles interesse. Det å se på et materiale som kan bli «stort» i Norge om noen år gir inspirasjon for masteroppgaven.

Det er flere personer som har bidratt til dette prosjektet. Først vil vi takke veiledere for hjelp med løsning av oppgaven

- Rein Terje Thorstensen
- Ingrid Lande Larsen

Vi vil også takke følgende personer for hjelp med rapport, beregninger og praktisk gjennomføring av tester:

- Anette Heimdal
- Katalin Vertes
- Paul Ragnar Svennevig
- Rita Sølvi Ditlefsen
- Idar Tobias Heskestad

Og til sist men ikke minst medstudentene våre for faglig samarbeid på kryss av masterprosjekter:

- Øystein Grøstad
- Espen Sandberg

Tusen takk.

Summary

Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) is a concrete that is still not in use in Norway. This is, as the name implies, a strong concrete, with high ductility from the fibres. To be able to use this concrete in Norway in the future, it is necessary to develop a national standard for UHPFRC. The concrete is in use in some countries, some of these are France, USA, Japan and Canada.

The French standard NF P18-710 is based on Eurocode 2, but it is customized for UHPFRC. The method to calculate the shear capacity is different, both because of the concrete and because of the use of fibres. To calculate how much the fibres will affect the shear capacity of the composite material, it is necessary to go through bending tests, and then do calculations from the test results. Both the mean value of the post-cracking strength along the shear crack, which is based on the stress-crack opening curve, and the orientation factor K will have a crucial impact on the shear capacity value from the fibres.

This is a master thesis written by three students at the University of Agder. The main goal of this thesis is to compare the calculated shear capacity from the french standard to the practical shear capacity. This was done by exposing UHPFRC beams to bending tests, to measure the shear capacity. It was not possible to compare the calculated values to the practical results as the beams collapsed because of moment capacity, and not shear capacity. Despite this, it is possible to assume that there are some insecurities in the formulas from the French standard. The reason for this assumption is that the calculated shear capacity for a beam with only fibres as reinforcement is higher than the shear capacity for a beam that is reinforced with shear reinforcement.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	i
Publiseringsavtale.....	ii
Forord.....	iii
Summary	iv
Innholdsfortegnelse	v
Figurliste	viii
Tabelliste	x
1. Innledning.....	1
2. Samfunnsperspektiv	2
3. Teori.....	3
3.1 Karakteristiske egenskaper til UHPFRC	3
3.1.1 Proporsjonering.....	3
3.1.2 Varmebehandling.....	4
3.1.3 Trykkfasthet.....	4
3.1.4 Strekkfasthet.....	4
3.1.5 Bestandighet	4
3.1.6 Estetiske aspekter.....	5
3.2 Historie	5
3.2.1 Materialutviklingen av UHPFRC.....	5
3.3 Stålfiber	6
3.4 Herderegime.....	7
3.5 Skjærkapasitet.....	10

3.7	De franske standardene for UHPFRC.....	10
3.8	Orientering og fordeling av fiber.....	10
3.8.1	Fiberorienteringsfaktoren K.....	11
3.8.2	Egenskaper under strekk.....	11
3.8.3	Tension softening og strain hardening.....	12
3.9	Sikkerhetsfaktorer	14
4.	Forskerspørsmål	15
4.1	Avgrensninger	15
5.	Case/Materialer	16
5.1	Case.....	16
5.2	Materialer.....	16
5.2.1	Resept.....	16
5.2.2	Bjelker	17
6.	Metode	18
6.1	Litteraturstudie.....	18
6.2	Dimensjonering.....	18
6.2.1	Momentkapasitet	18
6.2.2	Skjærkapasitet.....	19
6.2.3	Fiberorienteringsfaktor K.....	20
6.2.4	Forankring	21
6.3	Laboratorieforsøk.....	21
6.3.1	Blandeprosedyre	21
6.3.2	Støping.....	23
6.3.3	Herding	23
6.3.4	Utbredningsmål.....	24
6.3.5	Densitet av fersk betong.....	24
6.3.6	Luftinnhold	25
6.3.7	Densitet av herdet betong	25
6.3.8	Trykkfasthet.....	25
6.3.9	Nedbøyningstest på prismer	25
6.3.10	4-punkts nedbøyningstest på prismer	25
6.3.10	3-punkts nedbøyningstest på prismer med innskjæring.....	27
6.3.11	Bestemmelse av σ -w-forholdet.....	28
6.3.12	4-punkts nedbøyningstest på bjelker	30
7.	Resultat.....	33
7.1	Beregningsresultater	33

7.1.1	Momentkapasitet	33
7.1.2	Skjærkapasitet.....	33
7.1.3	Armering	33
7.1.4	Fiberorienteringsfaktor K.....	35
7.2	Laboratorieresultater	37
7.2.1	Støp og herdeforhold	37
7.2.2	Utbredningsmål	38
7.2.3	Luftinnhold	39
7.2.4	Densitet av fersk betong.....	39
7.2.5	Densitet av herdet betong	40
7.2.6	Trykkfasthet.....	40
7.2.7	4-punkts nedbøyningstest på prismer.....	41
7.2.8	3-punkts nedbøyningstest på prismer.....	42
7.2.9	Bestemmelse av σ - w -forhold	43
7.2.10	4-punkts nedbøyningstest på bjelker	47
7.3	Sikkerhetsfaktor	49
8.	Diskusjon.....	50
8.1	Momentberegninger.....	50
8.2	Skjærberegninger	50
8.3	Armering.....	51
8.4	Klassifisering.....	52
8.4.2	Støp, herdeforhold og trykkfasthet.....	53
8.5	Nedbøyningstest på prismer.....	54
8.6	Beregning av σ - w -forhold	54
8.7	Nedbøyningstets på bjelker.....	55
8.8	Sikkerhetsfaktor	55
8.9	Fiberorienteringsfaktor K	56
9.	Konklusjon	57
10.	Anbefalinger	58
	Referanse.....	59
	Vedlegg.....	Feil! Bokmerke er ikke definert.

Figurliste

Figur 1-1 Bilde av Museet MuCEM i Marsielle der UHPFRC er tatt i bruk [3].	1
Figur 3-1 Eksempel på proporsjonene til UHPFRC og til vanlig betong målt i volum [7]	3
Figur 3-2 Bilde av Henada Airport i Japan, en flyplasskonstruksjon bygget med UHPFRC [9].	6
Figur 3-3 Trykkfasthet ved ulike herderegimer [11].	8
Figur 3-4 Parametere tilhørende formel (3.3) [14].	9
Figur 3-5 Eksempel på skjærbrudd ved ulike mengde skjærarmoring [15].	10
Figur 3-6 Former og forskalingers effekt på fiberorientering [20].	11
Figur 3-7 Eksempel på avlesning av f_{ctf} ved to scenarier av spenningskurver [17].	12
Figur 3-8 Illustrasjon av bruken av orienteringsfaktor [8].	12
Figur 3-9 Illustrasjon på "tension softening" og "strain hardening" [21].	13
Figur 3-10 Kurver hentet fra nedbøyningstest på prizmer med forskjellige fiber [22].	13
Figur 6-1 Ekvivalent forankringslengde for standard vinkelkrok [25].	21
Figur 6-2 Støpebordet i bruk [Eget bilde].	23
Figur 6-3 Bilder fra utførelse av utbredningsmål [Eget bilde].	24
Figur 6-4 Oppsettet for 4-punkts nedbøyningstest på prizmer [Eget bilde].	26
Figur 6-5 Oppsett for 3-punkts nedbøyningstest	27
Figur 6-6 Bilde av ekstensometer, plater og hvordan dette festes i innskjæringen [Eget bilde].	27
Figur 6-7 Illustrasjon av en sprukket del av prisme under nedbøyningstest [8].	28
Figur 6-8 Oppsett for nedbøyningstest på bjelker [Eget bilde].	30
Figur 6-9 Bilde av DIC-kameraet i bruk [Eget bilde].	31
Figur 6-10 Illustrasjon av de stemplede prikkene på prøvestykke [Eget bilde].	31
Figur 7-1 Teknisk tegning av bjelke med lengdearmoring [Eget bilde].	33
Figur 7-2 Teknisk tegning av bjelke med lengde- og skjærarmoring [Eget bilde].	34
Figur 7-3 Bilde av forankringsarmoring [Eget bilde].	34
Figur 7-4 Oppsett av prismene sagt ut fra dekkene [25].	35
Figur 7-5 Oppsettet av strekktesten av prismene [25].	36
Figur 7-6 Resultater på orienteringsfaktorene K [25].	36
Figur 7-7 Målt utbredningsmål i mm.	38
Figur 7-8 Målt luftinnhold i %	39
Figur 7-9 Målt densitet av fersk betong.	39
Figur 7-10 Målt gjennomsnittlig densitet per støp	40
Figur 7-11 Beregnet karakteristisk trykkfasthet og standardavvik for hver støp	40
Figur 7-12 Alle resultater av 4-punkts nedbøyningstest på prizmer	41
Figur 7-13 Prismenes elastisitetensgrense under strekkspenning, $f_{ct,el}$	42
Figur 7-14 Alle resultater av 3-punkts nedbøyningstest på prizmer	42
Figur 7-15 Resultater fra DIC-kameraet på sprekkutviklingen på en prisme	43
Figur 7-16 Resultat av σ -w beregninger	45
Figur 7-17 Regresjon av σ -w kurver	45
Figur 7-18 Resultater av 4-punkts nedbøyningstest på bjelker	47
Figur 7-19 Resultat av 4-punkts nedbøyningstest for fire typer bjelker	47
Figur 7-20 Bjelkenes maksimale kapasitet	48
Figur 7-21 Resultat fra DIC-kamera på sprekkutvikling av bjelke: A, B og C	48
Figur 8-1 Bruddflaten til en prisme etter testing [Eget bilde].	52
Figur 8-2 Bjelkens overfalte [Eget bilde]	53

Figur 8-3 Bilde av betongterninger etter trykktesting (uten fiber til venstre, med fiber til høyre) [Eget bilde]..... 53

Tabelliste

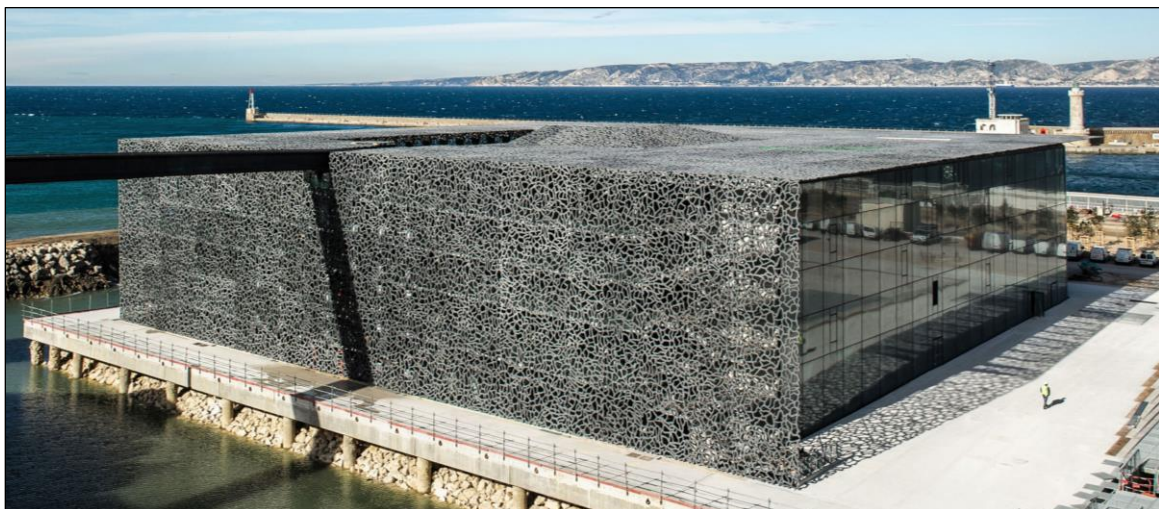
Tabell 3-1 Trykkfasthetsklasser [8].	4
Tabell 3-2 Varmebehandlingsklasser [8]	7
Tabell 5-1 UHPFRC-resept.....	16
Tabell 6-1 Blandeprosedyre.....	22
Tabell 6-2 Oversikt over de forskjellige prøvestykkene som skal støpes	23
Tabell 6-3 Student koeffisient [8].	32
Tabell 7-1 Beregnet skjærkapasitet med antatt fiberbidrag (før testing).....	33
Tabell 7-2 Beregnet skjærkapasitet med beregnet fiberbidrag (etter testing).....	33
Tabell 7-3 Oversikt over antall prøvestykker støpt ved de ulike støpene	37
Tabell 7-4 Oversikt over herderegime for prøvestykkene fra hvert støp	38
Tabell 7-5 Regresjonsligninger for σ -w.	46
Tabell 7-6 Resultatet av σ_f og σ_{Rdf}	46
Tabell 7-7 Sikkerhetsfaktor for moment og skjær	49

1. Innledning

I byggeindustrien er det viktig med sterke konstruksjoner som tåler mye, altså konstruksjoner som består av materialer med blant annet høy trykkfasthet. Betong har i lenge vært kjent som et slikt materiale, dette er en av grunnene til at det er ofte brukt i byggeindustrien. I løpet av de siste årene har det blitt utviklet en ny type betong; Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) [1]. Denne betongen, som navnet tilsier, gir en enda høyere trykkfasthet enn vanlig betong, mellom 150 MPa og 250 MPa. Siden den inneholder fiber vil den også oppnå duktile egenskaper når den utsettes for strekkrefter. En annen fordel med UHPFRC er bestandigheten, siden det er en såpass kompakt betong vil den få en lengre levetid. En slik betong vil øke mulighetene for byggebransjen betraktelig. Ved å bruke UHPFRC fremfor vanlig betong er det mulig å redusere tverrsnittet opptil 2-3 ganger mens den tilsatte fiberen vil gi muligheter for reduksjon av mengden med slakkarmering [1]. Redusert materialbruk gir fordeler både for økonomien og miljøet.

UHPFRC har blitt tatt i bruk i flere land, blant annet Frankrike, Australia, Japan og USA [1], men i Norge er den enda ikke blitt tatt i bruk i prosjekter [2]. For å kunne ta i bruk denne betongen er det nødvendig å utvikle en standard som er tilpasset norske omgivelser og krav. Det eksisterer i dag to franske standarder for UHPFRC, en for klassifisering og produksjon og en for design og dimensjonering, som kan bli brukt til veiledning ved utvikling av en norsk standard. Designstandarden er basert på Eurokode 2 (EC2), og har flere områder som er av interesse å undersøke. Et av disse er skjærkapasitet. I EC2 blir det brukt ulik sikkerhetsfaktor på skjærberegninger avhengig av flere faktorer på grunn av empirisk data. Noen av forskjellene mellom vanlig betong og UHPFRC er tilslaget og bruk av fiber, noe som fører til endring av flere egenskaper, som nevnt tidligere. Dette er noe som vil påvirke skjærkapasiteten til UHPFRC, og det er brukt en annen metode for å regne på dette i den franske standarden enn i EC 2.

Denne oppgaven har blitt utviklet for å kunne undersøke hvordan den franske standarden har valgt å beregne skjærkapasitet for UHPFRC, og hvordan dette stemmer med praktiske resultater.



Figur 1-1 Bilde av Museumet MuCEM i Marsielle der UHPFRC er tatt i bruk [3].

2. Samfunnsperspektiv

UHPFRC er et relativt nytt materiale som er tatt i bruk i noen få land, blant annet Frankrike, USA og Canada. Disse landene har utviklet sine egne standarder for dimensjonering ved UHPFRC [1]. I Norge har vi fortsatt ikke tatt i bruk dette materialet til prosjekter, og det er derfor ikke noe regelverk eller erfaring ved bruk av det [2].

UHPFRC har en særdeles høy trykkfasthet sammenlignet med vanlig betong, noe som gjør det mulig å redusere tverrsnittstørrelsen opp til 2-3 ganger, og fortsatt oppnå krav for dimensjonering [1]. Denne reduksjonen fører til mindre materialbruk, altså mindre betong og armering, og dermed mindre behov for transport, som påvirker miljøet.

Men UHPFRC har også ulemper for miljøet, ettersom det inneholder opptil 2 ganger så mye sement som vanlig betong [1]. Produksjon av sement krever store mengder energi, som fører til høyt utslipp av miljøgasser, i tillegg til at det er et dyrt delmateriale. Totalt sett vil ikke den store mengden sement være veldig negativt for verken miljø eller økonomi siden tverrsnittet kan reduseres i såpass stor grad [4].

Et annet viktig delmateriale i UHPFRC er fiberarmeringen. Fiberarmeringen bidrar til at UHPFRC får større strekkapasitet enn vanlig betong, og bidrar dermed til at det er mulig å begrense bruken av tradisjonell slakkarmering i betongkonstruksjoner, og fortsatt tilfredsstillende krav for dimensjonering. Reduksjon av stålarmering gir samme miljøgevinster som ved sement; det blir mindre behov for transport, og mindre utslipp ved produksjonen av stålet [5]. En ulempe ved bruk av stålfiber er rester og avfall, blir det produsert mer betong enn nødvendig for et prosjekt blir overskuddet til avfall, og det blir vanskelig å gjenvinne og bruke restene som fyllmasse. Problemet vil også oppstå ved riving av konstruksjoner [6]. Dette problemet kan begrenses ved å foreta nøyaktige beregninger for mengder betong til prosjektene.

Bruk av fiberarmering vil også føre til usikkerhet i de forskjellige kapasitetene til betongen. Dette skyldes ukjent fiberorientering, altså hvilken retning fiberen ligger. Fiberen må ligge i riktig retning i forhold til kreftene i betongen for å kunne gi noe fordel. Konsekvensen av dette kan være kollaps ved løfting eller påføring av laster, som vil skape farlige situasjoner på byggeplass og ved bruk av konstruksjonen. For å forebygge denne usikkerheten er det viktig å bruke riktig støpemetode og bestemme effekten av fiberen til bruk i dimensjonering, slik at fiberen orienterer og fordeler seg ønskelig i betongelementet.

3. Teori

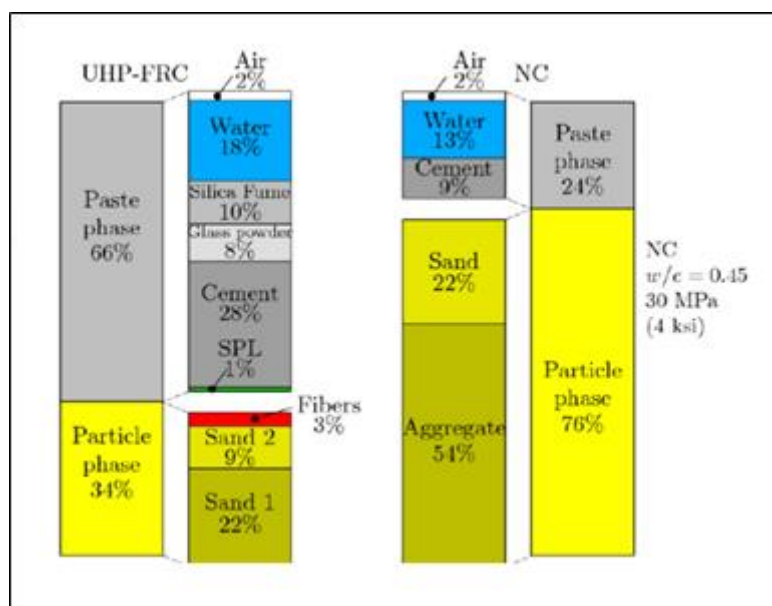
3.1 Karakteristiske egenskaper til UHPFRC

UHPFRC er et materiale bestående av sementmatriks. Det som skiller UHPFRC fra "high performance" og "very high performance concrete" er blant annet den systematiske bruken av fiber som forsikrer et ikke sprøtt materiale og kan erstatte konvensjonell armering. Generelt er trykkfastheten høyere enn 150 MPa og sammensetningen av delmaterialer med et høyt innhold av bindemiddel fører til en kompakt betong uten kapillærporer. Den direkte strekkfastheten til matriksen er vanligvis høyere enn 7 MPa.

Målet med å utvikle UHPFRC er å oppnå en høyere strekkstyrke ved bidrag fra fiber som sørger for strekkstyrke etter at sementmatriksen har sprukket. Ved tilstrekkelig høy strekkstyrke kan det være mulig å fjerne den konvensjonelle armeringen, avhengig av hvordan konstruksjonen og kreftene den er utsatt for virker. Generelt prøver man å kun beholde hovedarmeringstengene som kreves når fiberen ikke kan stå for resistansen mot store krefter alene [1].

3.1.1 Proporsjonering

I ordinær betong ligger vann-bindemiddelforholdet, w/b , mellom 0.4-0.6. For å oppnå en UHPFRC må w/b -forholdet reduseres til under 0.25, rundt 0.16-0.2. Dette oppnås ved hjelp av superplastiserende tilsetningsstoff (SP) og en betydelig økning av mengden bindemiddel. Det bør også tilsettes en mengde med ultrafine partikler tilsvarende omkring 20% av sementmassen. Silikastøv eller mikrosilika, som består av 5 til 10 ganger mindre partikler enn sement, blir typisk brukt til dette. Sammenlignet med tradisjonell betong er også tilslagsstørrelsen svært liten. Det legges også stor vekt på tilslagets mekaniske styrke, for å unngå at tilslaget blir det svakeste punktet i blandingen. Alt ovennevnt bidrar til et svært kompakt materiale, med utmerket ytelse når det gjelder varighet og mekanisk styrke [1]. Figur 3-1 illustrerer forskjellene i proporsjoner for UHPFRC og vanlig betong.



Figur 3-1 Eksempel på proporsjonene til UHPFRC og til vanlig betong målt i volum [7]

Med en slik sammensetning er det relativt lett å oppnå en trykkfasthet over 150 MPa, men det gjør også at materialet får enda høyere sprøhet og mister alle spor av plastisk oppførsel. Dette problemet kompenseres for ved hjelp av tilsetning av fiber, som gjenopptar duktile egenskaper under trykk [1].

3.1.2 Varmebehandling

UHPFRC har en del trekk som skiller seg ut fra tradisjonell betong. Materialet kan utsettes for en spesiell varmebehandling som resulterer i reduksjon i svinn og kryp og i tillegg øke bestandigheten. Denne varmebehandlingen består av å varme elementet opptil 90°C under relativ fuktighet nær metning i omtrent 48 timer [1]. Den betegnes som varmbehandlingsklasse TT2 i NF P18-470 [8]. Det lave v/c-tallet til UHPFRC fører til høyt autogent svinn men også lavt svinn under uttørking, eventuelt null svinn for varmebehandlingsklasse TT2. Dette gjør blant annet UHPFRC velegnet til bruk i prefabrikkerte elementer. De reduserte og forsinkede deformasjonene begrenser også de indre kreftene som oppstår i forbindelsen mellom metall og betong [1].

3.1.3 Trykkfasthet

I NF P18-470 er trykkfasthetsklasser definert Tabell 3-1. Den karakteristisk trykkfasthet skal være større eller lik minimum karakteristisk trykkfastheten for den spesifiserte klassen.

Tabell 3-1 Trykkfasthetsklasser [8].

Compressive strength class	Minimum characteristic cylinder strength	Minimum characteristic cube strength
	f_{ck-cyl} MPa	$f_{ck-cube}$ MPa
UHPFRC 130 / 145	130	145
UHPFRC 150 / 165	150	165
UHPFRC 175 / 190	175	190
UHPFRC 200 / 215	200	215
UHPFRC 225 / 240	225	240
UHPFRC 250 / 265	250	265

3.1.4 Strekkfasthet

Den desidert største utfordringen med UHPFRC, men også det som gjør at den skiller seg ut fra andre betonger, er strekkfastheten. Materialets strekkfasthet før opprissing blir styrket av fiberen. Fiberen bidrar også til at det oppstår reststrekkfasthet etter opprissing, og det er her det oppstår en utfordring. Blir UHPFRC sammensatt, blandet og herdet på korrekt måte vil sementmatriksen som styrer resistansen før opprissing styrkes ytterligere. Det fundamentale problemet er derimot å kontrollere og sikre strekkfastheten etter opprissing [1].

3.1.5 Bestandighet

UHPFRC er et svært kompakt materiale med en spesiell porestruktur karakterisert av få og små ikke-sammenhengende porer. Dette gjør materialet eksepsjonelt når det gjelder bestandighet. Vannporøsitet, luftpermeabilitet og kloridinntrengning er faktorer som alle reduseres i stor grad i forhold til vanlig eller høyfast betong. Disse egenskapene gjør at materialet egner seg til bruk i alle konstruksjoner utsatt aggressive eksterne forhold. I tillegg gjør resistansen mot abrasjon og

dynamiske effekter UHPFRC til spesielt relevant i applikasjoner utsatt for sjokk og eksplosjoner. Ved sjokk kan tilstedeværelsen av små fiber begrense flyvende segmenter som noen ganger kan forårsake sikkerhetsrisiko for mennesker [1].

3.1.6 Estetiske aspekter

Den kompakte karakteristikken til UHPFRC og materialets finhet gjør at en overflate av høy arkitektonisk kvalitet kan oppnås, ved bruk av fin matriks. Men det kan også oppstå estetiske utfordringer på uformede overflater på grunn av spor etter oksidasjon der fiberen befinner seg i overflaten. Det finnes flere teknikker for å ta hånd om dette problemet [1].

3.2 Historie

Helt siden midten av 1990 tallet har UHPFRC vært et tema som har blitt presentert på flere vitenskapelige konferanser ulike steder i hele verden. Her har den voksende ekspansjonen av materialets bruk blitt demonstrert, spesielt for entreprenører, arkitekter, designere og eiere, og dele tekniske erfaringer ved å designe og bygge med UHPFRC. Mange land delte sine erfaringer fra blant annet prosjekter fra Japan, Tyskland, Australia, Østerrike, USA, Danmark, Nederland, Canada og Frankrike. Disse prosjektene kan kategoriseres som fornyende arkitektoniske muligheter, med forlengede spenn og grenser, nytt utstyr og komponenter for bygging av konstruksjoner og bedre styrke og armeringsløsninger. Videre har de siste fremskritt innen forskning bekreftet sikkerheten og holdbarheten av UHPFRC prosjekter [1].

3.2.1 Materialutviklingen av UHPFRC

Tidlig forskning på UHPFRC ble utført av Professor Bache på 1970 tallet i Danmark, gjennom utviklingen av "compact reinforced composite", CRC-teknologi. Denne teknologien er fortsatt aktiv i dag og står sannsynligvis for den største produksjonen av UHPFRC i volum på verdensbasis. Dette er en teknologi hvor store prosentandeler med metallfiber blir tilsatt sementmatriksen for å produsere prefabrikkerte strukturer, typisk balkonger og trapper, med tradisjonell armering uten det mekaniske bidraget fra fiberen tatt i betraktning i beregningene.

Første forskning på UHPFRC i Frankrike fant sted på 1990-tallet gjennom "Reactive Powder Concrete" teknologi. Sent på 90-tallet ble markedets første UHPFRC, "Ductal", lansert. Den ble utviklet på forskningscenteret Lagarge i samarbeid med Bouygues Group og Rhodia. Denne teknologien er distribuert både i vest Europa, Asia, Australia og USA. Den blir brukt i alle typer konstruksjoner, som broer og bygninger, men også i ikke-bærende bekledning som dekorative design objekter.

Under lederskapet av det franske kraft selskapet (EDF), som har hatt stor innflytelse under utviklingen av UHPC, ble "BSI/CERACEM" laget av Eiffage på slutten av 90-tallet og senere utviklet med assistanse fra selskapet SIKA. Dette førte til realisering av et voksende bruksområde, både når det gjaldt nye konstruksjoner og ved rehabilitering av gamle. På 2000-tallet utviklet sementselskapet Vicat med støtte fra Vinci gruppen "BCV", som også har oppnådd gode resultater. Med erfaringen og potensialet til disse materialene, kom franskmennene i 2002 ut med anbefalinger om formaliserte metoder for å karakterisere egenskapene for disse materialene. De kom også med regler for å

designer UHPFRC-konstruksjoner der fiberens mekaniske styrke blir tatt med i betraktning og kan erstatte armering. Dette var en stor innovasjon for denne typen material.

Gjennom 2000-tallet har flere land engasjert seg i forskningen på UHPFRC. Japanerne publiserte sine egne anbefalinger i 2004 og har laget flere fremragende konstruksjoner, som bruer og komponenter i høyhus og flyplasskonstruksjoner i marine områder. Australia har også utviklet flere konstruksjoner og brukt materialet som skjold for å beskytte mot eksplosjoner. I 2005 startet Tyskland et ambisiøst forskningsprogram over 6 år, der et stort antall universiteter ble involvert under veiledning av Universitetet i Kassel [1].



Figur 3-2 Bilde av Haneda Airport i Japan, en flyplasskonstruksjon bygget med UHPFRC [9].

3.3 Stålfiber

UHPFRC er et eksplosivt materiale og derfor er det viktig å tilsette fiber. Fiberen øker duktiliteten til UHPFRC i både trykk og strekkretning. Den bidrar også til momentstyrken til betongen samtidig som den gir strekkapasitet. Den bidrar også til trykkapasitet men det er i begrenset grad.

Hvis støpbarhetene ikke er avgjørende bør man tilsette lange fibre da de gir bedre motstand mot dannelse av riss. Det er begrenset mengde lange fiber som kan tilsettes betongen, før støpbarheten blir dårlig. Med tanke på betongens styrke og støpbarheten, er det vanlig å blande flere forskjellige typer fiber. Ved å tilsette en kombinasjon av lange og korte fiber kan man oppnå både god støpbarhet og styrke. Valg av fiber er avhengig av størrelse på konstruksjonen og krefter som virker på konstruksjonen.

Fiber som blir brukt i betong er som oftest stålfiber. Den har god duktilitet, høy styrke og høy elastisitetsmodulus. Ved bruk av fiber uten endeforankring vil det svakeste punktet i en betong med fiber som oftest være bindingen mellom betongen og fiberen, altså heften. Betongen beskytter stålet mot rust men siden fiberen også befinner seg på overflaten, vil det bli dannet rust på fiberen. Denne overflaterusten er ikke farlig for betongens styrke siden det er kun en liten andel av fiberen som ligger i overflaten. Men det kan føre til estetiske problemer som misfarging av betongen.

Vanligste stålfiber som blir tilsatt i UHPC er:

- Lengde: 12.7 mm – 63.5 mm
- Diameter: 0.45 mm – 1mm
- Volum: 0.25% (20kg/m³) – 2%(157kg/m³)

[10]

Andre fordeler ved bruk av fiber er at det er mulig å redusere bruken av tradisjonell armering, og dermed bruke mindre mengder stål. Ved mindre mengder tradisjonell armering vil det også bli spart noe tid ved støping av konstruksjoner, ettersom det vil bli mindre behov for armeringsbinding. En annen konsekvens ved mindre total armering er at det blir mer økonomisk og mer miljøvennlig. Fiberbruk vil også ha en negativ virkning på miljøet i forbindelse med avfall, betongen vil bli vanskelig å resirkulere siden det er vanskelig å ta fiberen ut fra betongen [6].

3.4 Herderegime

UHPFRC kan utsettes for en spesiell varmebehandling, som beskrevet i 3.1.2. Når UHPFRC ikke har gjennomgått noen form for varmebehandling, klassifiseres den STT. Den skal da herdes i 28 dager og lufttemperaturen skal holdes til 20°C ±2. Klasse TT1, TT2 og TT1+2 er klasser der betongen har vært gjennom en form for varmebehandling. Tabell 3-2 viser en beskrivelse av varmebehandlingsklassene bestemt i den franske standarden [8].

Tabell 3-2 Varmebehandlingsklasser [8]

Klasse	Start tidspunkt	Forhold	Tidsintervall
STT	-	-	-
TT1	Initialfasen (ferskfase)	Ved høy temperatur	Til endt initialfase
TT2	Etter initialfasen	Fuktighet > 90% ved høy temperatur	10-talls timer
TT1+2	Kombinasjon av TT1 og TT2. Varmebehandlingen utføres etter TT1 først og deretter TT2		

UHPFRC klassifisert TT1 har undergått en "akselerasjon av hydratisering gjennom varmebehandling" eller "varming" som har som mål å redusere tidsintervallet til initialfasen og akselerere både initialfasen og termofasen (herdefasen). Dette foregår rett etter prøvestykket støpes i formen ved moderat varming. Når UHPFRC klassifiseres TT2 starter varmebehandlingen etter flere timer inn i termofasen. Temperaturen er relativt høy (størrelsesorden 90°C), fuktighetsgraden større enn 90% og tidsintervallet skal være på flere 10-talls timer. Den gjennomsnittlige trykkfastheten ved 28 døgn etter en slik behandling skal ikke være mindre enn den gjennomsnittlige trykkfastheten ved 28 døgn uten varmebehandling. Klasse TT1+2 blir gitt når UHPFRC har gjennomgått begge ovennevnte varmebehandlinger med suksess [8].

I en forskningsartikkel publisert av "Institution of Civil Engineers", er 3 forskjellige herderegimer testet på forskjellige UHPC og UHPFRC resepter. Trykkfastheten ble målt på terninger etter 3, 7, 14 og 28 dager. Herderegimene bestod av herding i vann (temperaturen var ikke spesifisert, den kan antas til $20^{\circ}\text{C} \pm 2$), damping (95% relativ fuktighet, 100°C , i 18 timer +10 timer for å nå temperatur på 100°C og for nedkjøling til romtemperatur) og ved oppvarming opptil 200°C i 48 timer. Det ble konkludert med at de dampede prøvestykkene ga en høyere tidligfasthet enn ved vanlig herderegime, men damping ga omtrent lik verdi på trykkfasthet etter 28 dager som terningene ved vanlig herderegime. Prøvestykkene som ble varmet opp til 200°C i 48 timer ga tidligfasthet og vesentlig høyere trykkfasthet etter 28 dager. Figur 3-3 viser resultatene oppnådd for trykkfasthet ved de forskjellige herderegimene [11].

Age at testing: d	Compressive strength: MPa		
	Water curing	Steam curing	Heat curing
3	53	53	53
7	64	120	160
14	111	128	185
28	144	142	196

Table 2. Compressive strength of cubes

Figur 3-3 Trykkfasthet ved ulike herderegimer [11].

Reaksjonsraten på herdingen vil øke eksponentielt med temperaturen. Betong generelt vil ha en dobbelt så høy reaksjonsrate ved en temperatur på 35°C enn på 20°C [12].

I følge COINs prosjektrapport om UHPFRC, vil varmebehandling ved en moderat temperatur begrenset til maks 65°C , kun gi en raskere tidligfasthet og ikke forbedring av mekaniske egenskaper og bestandighet [7].

Basert på regresjonsanalyser av data fra FHWA (Federal Highway Administration) på trykktestede UHPC terninger ved standard laboratorieforhold, kan trykkfastheten ved en gitt tid etter støping bestemmes med formel (3.1) [13].

$$f_{ct} := f_c \cdot \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{t - 0.9}{3} \right)^{0.6} \right] \right] \quad (3.1)$$

- f_{ct} UHPC trykkfasthet etter t dager herdetid
 f_c UHPC trykkfasthet etter 28 dager herdetid
 t Tid etter støpetidspunkt i dager

Videre forskning ble utført på UHPC ved herdetemperaturer på 41°C, 23°C og 10°C og følgende formler ble redegjort for denne blandingen [14].

$$t_{start} = \frac{2.8}{\sqrt{T}} \quad (3.2)$$

t_{start} Start på initialfasen i dager
 T Herdetemperatur i grader

$$f_{c,t} := f_{c,28d} \left[1 - e^{-\left(\frac{t-t_{start}}{a}\right)^b} \right] \quad (3.3)$$

$f_{c,28d}$ Trykkfasthet ved 28 dager
 $f_{c,t}$ Trykkfasthet ved tiden t i døgn, etter støp
 t_{start} Start på initialfase i dager
 a Tilpasningsparameter i dager
 b Tilpasningsparameter uten enhet

Curing Regime	T (°C)	$f'_{c,28d}$ (ksi)	a (days)	b
105°F (41 °C)	41	24.5	0.25	0.25
73° F (23 °C)	23	24	1.0	0.30
50° F (10 °C)	10	22.5	4.0	0.50

Note: 1 ksi = 6.89MPa and °F = 1.8 X °C + 32

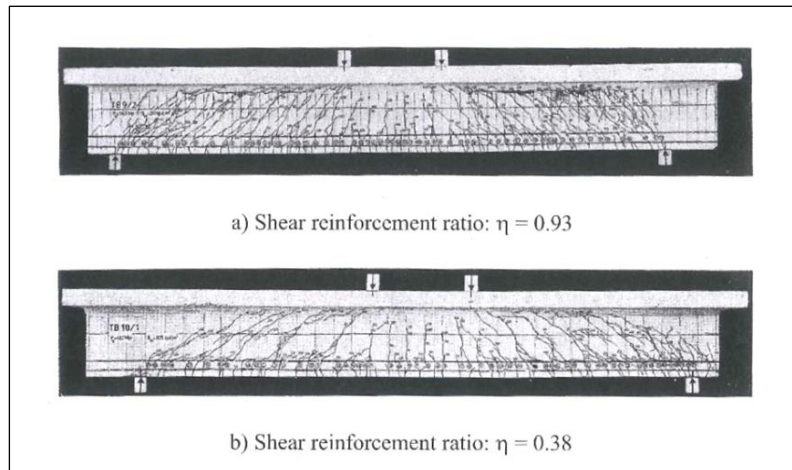
Figur 3-4 Parametere tilhørende formel (3.3) [14].

Formel (3.2) beregner når initialfasen begynner avhengig av herdetemperatur. Videre kan formel (3.3) med parametere fra Figur 3-4 benyttes for beregning av trykkfastheten avhengig av både tid og herdetemperatur. I Figur 3-4 er det oppgitt parametere for denne spesifikke prøveserien. Andre forskere har utført samme forsøk og funnet at forholdet i formel (3.3) korresponderer godt ved bruk av andre verdier for parameter a og b [14].

3.5 Skjærkapasitet

Et typisk skjærbrudd i en bjelke uten skjærarmoring vil starte horisontalt ved opplageret, deretter vil bruddet bevege seg langs lengdearmoringen, for så å gå opp mot belastningspunktet i ca. 45 grader [15].

Ved bruk av skjærarmoring i en bjelke vil skjærsprekkene bli fordelt jevnere utover bjelkelengden. Sprekkfordelingen er avhengig av mengde skjærarmoring, ved en større mengde skjærarmoring vil en få flere sprekker fordelt utover bjelken, som vist i Figur 3-5.



Figur 3-5 Eksempel på skjærbrudd ved ulike mengder skjærarmoring [15].

Selve mekanikken og overføringen av kraft gjennom betongen og gjennom sprekker i betongen er det fortsatt usikkerhet rundt. Mekanikken er noe som må bestemmes for at det skal være mulig å ha en god måte å bestemme skjær for betong på. Det har blitt gjort forsøk på å utvikle metoder og modeller for å beskrive og beregne skjærkapasiteten til betong. Dette er utfordrende ettersom det er vanskelig å forutsi sprekkutviklingen, men det er avgjørende for funksjonen av betongen. Selv om det har blitt forsket en del på skjærkapasiteten til betong, er dette et tema hvor det fortsatt gjenstår forskning. Dette var situasjonen i 2010, så det er mulig en løsning på dette i dagens situasjon [16].

3.7 De franske standardene for UHPFRC

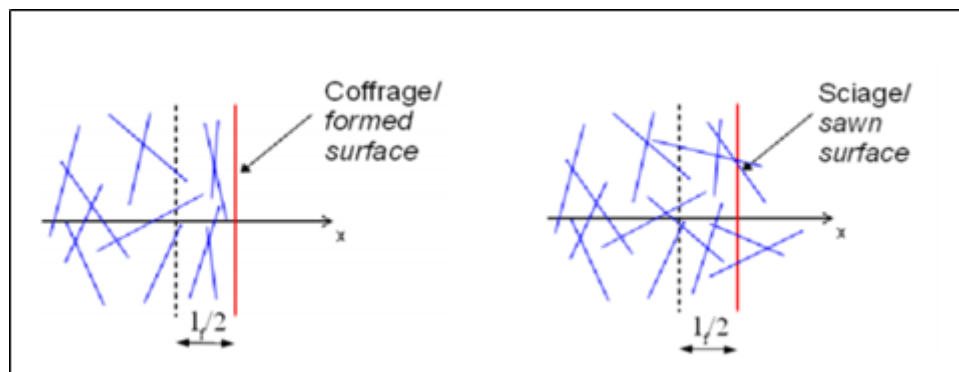
Franskmennene har publisert to standarder, en produktstandard (NF P18-470) [8] og en designstandard (NF P18-710) [17] med retningslinjer for produksjon og bruk av UHPFRC i konstruksjoner. Produktstandardene inneholder spesifikasjoner, egenskaper og produksjon av UHPFRC, samt utførelse av diverse metoder for å teste og klassifisere materialets egenskaper. Designstandardene kan brukes for dimensjonering med UHPFRC, denne er basert på EC2. Metoden for beregninger av skjærkapasitet avviker fra EC2, dette er spesielt på grunn av fiberens bidrag.

3.8 Orientering og fordeling av fiber

Generelt blir fiberarmert betong betraktet som at fiberen fordeler og orienterer seg tilfeldig og at materialet er isotropt i alle retninger. At dette innfrir i praksis kan ikke garanteres da fiberorientering og fordeling er avhengig av blande- og støpemetode, samt type fiber og form og

dimensjon på legemet som støpes. På en annen side kan en preferert orientering være fordelaktig for en del konstruksjoner sammenlignet med en isotrop fordeling. Fiberens orientering og fordeling har betydelig påvirkning på materialets mekaniske egenskaper, spesielt når det kommer til strekk. Dette skyldes at fiberen fungerer optimalt når den strekkes i lengderetning, men utgjør lite hvis den ligger i en retning vinkelrett på strekkretningen [18] [19].

Fiberen har en tendens til å orientere seg i samme retning som støperetningen, samt parallelt langs veggene i former og forskaling. Dette gjelder kun for fiberne som befinner seg i en avstand fra formveggene mindre eller lik halve fiberlengden. Dette fenomenet vil derfor påvirke strekkfastheten i større grad når forholdet mellom fiberlengden og strukturens tykkelse er lav. Figur 3-6 illustrerer dette fenomenet.



Figur 3-6 Former og forskalingers effekt på fiberorientering [20].

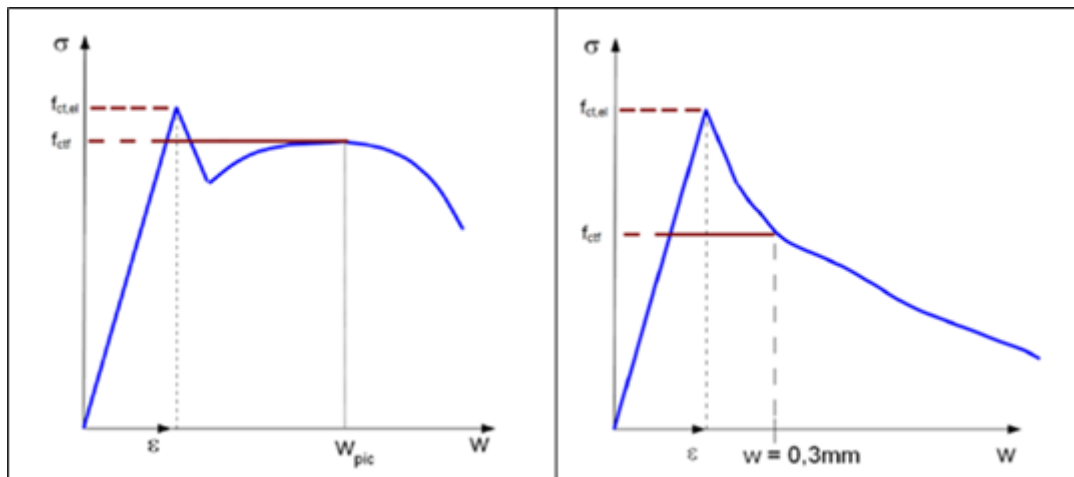
For å bedre kontrollere fiberorienteringen under utstøping, er det generelle prinsippet å plassere blandingen direkte i endelig posisjon for å unngå flyt. Lar dette seg ikke gjøre, kan det kompenseres med å dirigere flyteretningen i samme retning som den kritiske kraften [1].

3.8.1 Fiberorienteringsfaktoren K

For evaluering av strekkegenskapene til UHPFRC etter opprissing, er en presis bestemmelse av fiberens bidrag en nøkkelfaktor. I 2002 ble fiberorienteringsfaktoren K introdusert i anbefalingene fra Association Francaise de Génie Civil (AFGC), som er de samme som står bak NF P18 standardene. Den representerer fordeling og orientering av fiber i forskjellige soner av en reell konstruksjon, sammenlignet med en teoretisk modell der fiberen ville bli tilfeldig fordelt med en isotrop orientering [20].

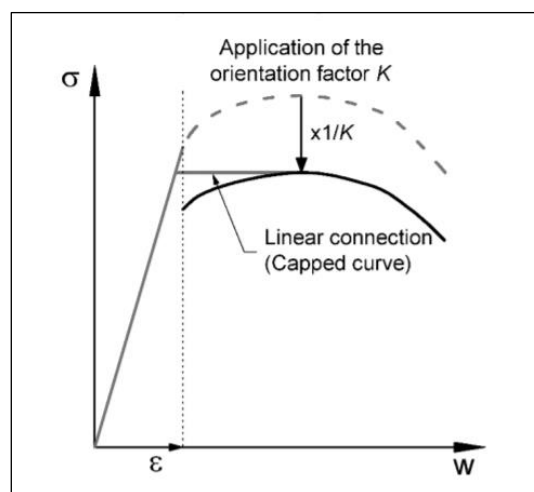
3.8.2 Egenskaper under strekk

Strekkegenskapene til UHPFRCen brukes til referanse for å designe konstruksjoner og for å spesifisere materialet. Disse egenskapene bestemmes ut ifra resultater fra nedbøyingstest på prismer. En kurve med σ - w -forholdet blir konstruert ut fra beregninger gjort etter testresultatene. I kurven er det mulig å avlese styrken etter opprissing, som er den største verdien målt. Et eksempel på disse kurvene er illustrert i Figur 3-7, hvor w representerer sprekkbredden, mens σ representerer strekkspenningen. $f_{ct,el}$ viser elasisetsgrensen under strekkspenning, og f_{ct} viser styrken etter opprissing [17].



Figur 3-7 Eksempel på avlesning av f_{ctf} ved to scenarier av spenningskurver [17].

K faktoren vil påvirke den ikke-lineære delen av kurven, som beskriver σ - w -forholdet etter opprissing, det er her fiberorientering- og fordeling har størst effekt [20]. Etter utført laboratorieforsøk på prismene, skal den ikke-lineære delen av grafen konstruert fra å multipliseres med $1/K$. Hvis nødvendig kan en lineær forbindelse mellom den lineære delen av grafen og toppunktet (f_{ctf}) for den ikke-lineære delen av grafen lages for å eliminere artefakter assosiert med et lokalt minimum. Figur 3-8 illustrerer dette. Dersom grafen ikke har et toppunkt, kuttet grafen ved f_{ctf} tilsvarende en sprekkbredde (w) på 0,3 mm [8].

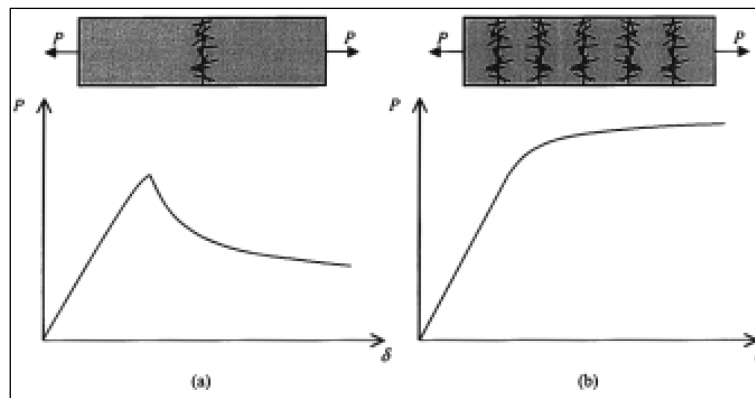


Figur 3-8 Illustrasjon av bruken av orienteringsfaktor [8].

3.8.3 Tension softening og strain hardening

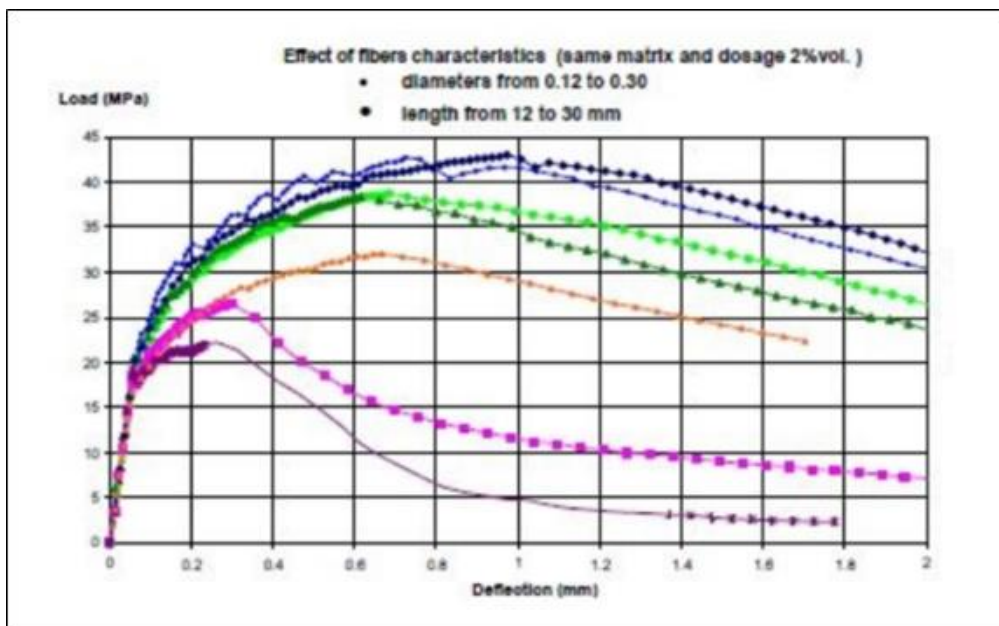
Når det blir dannet sprekke i et betongelement blir det også dannet «fiberbroer» gjennom sprekken. Fiberen vil prøve å motvirke sprekke dannelse og holde betongen sammen. Avhengig av fibervirkning vil man oppnå *tension softening* eller *strain hardening*. Det første tilfelle vil finne sted hvis fiberen som går gjennom sprekken knekker eller blir dratt ut på grunn av påførte krefter. Dette vil føre til kollaps av elementet, som illustrert i tilfelle (a) i Figur 3-9.

Strain hardening vil finne sted når fiberen brukt i betongen har høy effektivitet. Det vil si at etter sprekkdannelsen vil den gi styrke til betongen og før elementet rekker å kollapse i hovedsprekken vil den få riss og sprekker andre steder, som illustrert i tilfelle (b) i Figur 3-9 [21]. Figur 3-9



Figur 3-9 Illustrasjon på "tension softening" og "strain hardening" [21].

Figur 3-10 viser resultater fra nedbøyningstester. Matriksen og volumprosent fiber holdes konstant, og lengde og diameter på fiberen varierer fra 12-30 mm og 0,12-0,30 mm [22]. Kurvene illustrerer at mindre fiber gir "tension-softening", mens større fiber gir "strain-hardening".



Figur 3-10 Kurver hentet fra nedbøyningstest på prismer med forskjellige fiber [22].

Klassifisering

I følge NF P18-470 skal $f_{ctk,e}$ være større enn 6.0 MPa [8].

- Klasse T1* (softening under direct tension): når $f_{ctfm}/K < f_{ctm,el}$ og $f_{ctfk}/K < f_{ctk,el}$
- Klasse T2* (exhibiting limited strain hardening): når $f_{ctfm}/K \geq f_{ctm,el}$ og $f_{ctfk}/K < f_{ctk,el}$
- Klasse T3* (exhibiting significant strain hardening): når $f_{ctfm}/K \geq f_{ctm,el}$ og $f_{ctfk}/K \geq f_{ctk,el}$

3.9 Sikkerhetsfaktorer

Sikkerhetsfaktoren er en viktig del av beregningene som blir foretatt ved dimensjonering med betong. Funksjonen til sikkerhetsfaktoren er å gjøre dimensjonering og bruk av betong tryggere, ved å senke beregnet kapasitet i forhold til den praktiske kapasiteten.

Et godt eksempel på hvordan sikkerhetsfaktoren fungerer i beregningene blir vist i publikasjonen «Shear strenght in the new Eurocode 2. A step forward?» [23]. Ved bruk av fire metoder beregner de skjærkapasiteten til betongbjelker og sammenligner disse resultatene med forsøksresultater. I Forsøket dems bruker de bjelker med varierende type armering og størrelse på tverrsnittet. Resultatene viser at sikkerhetsfaktoren varierer med mengde armering og størrelse på tverrsnittet.

Noen av formlene greier å bestemme skjærkapasiteten som er tilnærmet lik den praktiske kapasiteten, men formelen fra EC2 er den som inneholder mest sikkerhet. Det er også EC2-metoden for beregning av skjærkapasitet man bruker i dagens dimensjonering. Denne metoden kan gi sikkerhetsfaktor på nesten 4 som er et høyt resultat, ettersom EC 2 vanligvis bruker en sikkerhetsfaktor på 2. Det er viktig å nevne at betongen som ble bruk for forsøket i denne publikasjon er vanlig betong, og ikke UHPFRC.

4. Forskerspørsmål

Hvordan stemmer dimensjoneringsreglene om skjærkapasitet i standard NF P18-710 sammenlignet med praktiske laboratorieresultater?

- Hvordan dimensjonere UHPFRC-bjelker med ulike armeringskombinasjoner?
- Hvordan bestemme fiberorienteringsfaktor K?
- Hvordan påvirker strekkspenning-sprekkbredde-forholdet beregnet skjærkapasitet?
- Hvor stor er sikkerhetsfaktoren i skjærkapasitetsberegningene?

4.1 Avgrensninger

For å kunne svare på forskerspørsmålet er følgende avgrensninger satt:

- Laboratorieforsøkene vil bli utført på laboratorium ved UiA, hvor det er flere studenter som skal utføre egne forsøk. Dette fører til begrensninger på laboratoriet, både med hensyn på tid og materialer. I tillegg til disse faktorene er det også en tidsfrist å forholde seg til for selve oppgaven. Alt dette vil resultere i at det kun kan støpes en begrenset mengde testelementer.
- Kapasiteten til testmaskinene som er tilgjengelige på UiA vil være med på å avgjøre hvor store elementer som kan støpes og testes.
- UHPFRC-resepten som blir brukt er fortsatt under utvikling, noe som medfører en risiko for at det ikke vil bli oppnådd optimale resultater.
- Resepten som blir brukt er utviklet for én type stålfiber, derfor vil kun denne stålfiberen bli brukt.

5. Case/Materialer

5.1 Case

Denne masteroppgaven går ut på å undersøke dimensjoneringsreglene for skjærkapasitet i den franske standarden NF P18-710 for UHPFRC. For å løse problemstillingen blir man nødt til å skaffe seg grunnleggende teori om UHPFRC i tillegg til kunnskap om dimensjonering og praktisk støping med denne type betong. De franske standardene, NF P18-470 og NF P18-710, for produksjon og dimensjonering av UHPFRC skal benyttes. Det skal dimensjoneres og støpes bjelker med forskjellige armeringskombinasjoner, listet opp i 5.2.2. Bjelkene skal testes ved bruk av 4-punkts nedbøyningstest for å bestemme skjærkapasiteten. De praktiske resultatene fra laboratorieforsøkene skal sammenlignes opp mot teoretisk skjærkapasitet beregnet etter skjærformlene i NF P18-710.

For å kunne dimensjonere bjelker og beregne den teoretiske skjærkapasiteten må UHPFRCen klassifiseres gjennom flere laboratorieforsk. Trykkfasthet, egenskaper under strekk og fiberorienteringsfaktor K må bestemmes.

5.2 Materialer

5.2.1 Resept

Resepten (Tabell 5-1) er utviklet gjennom et forprosjekt ved UiA, av Øystein Grøstad og Espen Sandberg [24]. Den er fortsatt under utvikling på UiA, og testresultatene vil kunne brukes til videre utvikling og forskning.

Tabell 5-1 UHPFRC-resept [24].

Resept SG4	Kg/m³
Alborg Rapid Cement	535,2
Flyveaske	148,9
Elkem Microsilica	210,3
Velde finfiller	295,5
Velde mellomfiller	919,6
Dramix Fiber 13/0,1	120,5
Dynamon SX-N superplasticizer	74,3
Vann	124
v/c	0.35
v/b	0.21

Sikkerhetsblad for Elkem Microsilica og Dynamon SX-N superplasticizer ligger i Vedlegg A. Sikkerhetsblad for de resterende materialene ligger i papirformat på laboratoriet ved UiA.

5.2.2 Bjelker

Det skal støpes bjelker med 4 forskjellige armeringskombinasjoner;

- Type **A** - Med fiber, strekk-, forankring- og skjærarmering
- Type **B** - Med fiber og strekk- og forankringsarmering
- Type **C** - Med fiber og uten armering
- Type **D** - Uten fiber og uten armering

Bjelke A og B skal testes for skjær. Bjelke C og D vil ikke kunne bli testes for skjær ettersom de ikke har lengdearmering og vil kollapse på moment.

6. Metode

Det er brukt flere ulike metoder for å fremskaffe informasjon til å svare på forskerspørsmålet i denne oppgaven. Dette kapitlet omhandler metodene som er benyttet. Litteraturstudie ble benyttet for å finne bakgrunnskunnskap om temaet, og om fremgangsmåte til de ulike metodene. Metoden dimensjonering er utført etter standarverkene NF P18-710 og EC2. Det har blitt utført en kvantitativ metode i form av laboratorieforsøk etter standarverkene NF P18-470, NS EN 12350 og NS EN 413-2.

6.1 Litteraturstudie

Hensikt med litteraturstudie er å få innsikt i tidligere forsøk og resultater som er relevant til temaet i denne oppgaven. Oppgaven handler om et relativt nytt materiale, derfor blir det valgt å søke på forskningsartikler som er nyere enn 2010. Et unntak for dette vil være anbefalte rapporter fra veiledere som er eldre. Det ble lagt stor vekt på utvalg av litteratur. Forskningsrapportene ble hentet fra troverdige kilder som for eksempel Rilem eller Science Direct, som er kjente og trygge utgivere av slike dokumenter. Målet med litteraturstudie var å finne minimum fem relevante vitenskapelige artikler.

6.2 Dimensjonering

Dimensjonering av UHPFRC-bjelker har blitt gjennomført etter NF p18-710 og EC2. Målet med dimensjonering er å oppnå større momentkapasitet enn skjærkapasitet for å tvinge bjelken til å oppnå skjærbrudd. I beregningene blir det brukt trykkfasthet fra laboratorieforsøk.

6.2.1 Momentkapasitet

Siden grunnen til forsøket er å undersøke skjærkapasitet til UHPFRC er det derfor viktig å overdimensjonere betongbjelkene på moment. Derfor ble det brukt metode for dimensjonering av tverrsnitt med trykkarmering fra boka «Betongkonstruksjoner», som inneholder retningslinjer for beregninger fra EC2, for å utnytte fullt styrkepotensjalet til betongen.

For å beregne momentkapasiteten til bjelkene blir det brukt følgende formler hvor armeringsmengde i trykk- og strekksonen er kjent.

$$A_{s1} := \frac{M_{rd}}{f_{yd} \cdot z} \quad (6.1)$$

$$z := 0.9 \cdot d \quad (6.2)$$

$$A_{s2} := \frac{\Delta M_{ed}}{f_{yd} \cdot h'} \quad (6.3)$$

A_{s1} Armeringsmengde i stekkdelen av tverrsnittet

M_{rd} Momentkapasitet

f_{yd}	Armeringens dimensjonerende flytgrense
z	Indre momentarm
d	Effektiv høyde
A_{s2}	Armeringsmengde i trykkdelen av tverrsnittet
ΔM_{ed}	Resten av ytre moment
h'	Avstand mellom trykkarmering og stekkarmering

Disse formlene blir gjort om til momentkapasitet, hvor momentkapasiteten må være høyere enn påført moment. I denne beregningen blir det gjort en forenkling med tanke på fiber. Det blir antatt at fiber ikke bidrar til moment, grunnen til dette er at slakkarmering er mer effektiv enn fiber, så fiberen vil påvirke momentkapasiteten i liten grad.

6.2.2 Skjærkapasitet

Skjærkapasiteten, V_{rd} , beregnes ved å summere skjærkapasitetsbidraet fra betongen, $V_{rd,c}$, skjærarmeringen, $V_{rd,s}$, og fiberen, $V_{rd,f}$.

Formel (6.4) gjelder for et armert tverrsnitt og formel (6.5) gjelder for uarmert tverrsnitt.

$$V_{rd,c} := \frac{0.21}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot (f_{ck})^2 \cdot b_w \cdot d \quad (6.4)$$

$$V_{rd,c} := \frac{0.18}{\gamma_{cf} \cdot \gamma_E} \cdot k \cdot (f_{ck})^2 \cdot b_w \cdot h \quad (6.5)$$

$$k := 1 + 3 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ck}} \quad (6.6)$$

$$\sigma_{cp} := \frac{N_{ed}}{A_c} \quad (6.7)$$

N_{ed}	Aksialkraften i tverrsnittet fra laster og forspenninger
A_c	Tverrsnittsarealet av betongen
γ_{cf}	Materialfaktor bestemt slik at $\gamma_{cf} \cdot \gamma_E$ er lik 1.5
f_{ck}	Betongen karakteristiske trykkfasthet i [MPa]
b_w	Minste bredden av tverrsnittet i strekksonen
z	Indre momentarm
d	Avstand mellom mest komprimerte fiberen og slakkarmering i strekksonen

Formel (6.8) gjelder for vertikal skjærarmring

$$V_{rd,s} := \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta \quad (6.8)$$

- A_{sw} Skjærarmringens tverrsnittsareal
 s Senteravstand mellom bøylearmring
 f_{ywd} Skjærarmringens elastisitetsgrense
 θ Vinkelen mellom betongtrykkstaven og bjelkeaksen vinkelrett på skjærkraften

Formel (6.9) og (6.10) gjelder for UHPFRC i klasse T1* og T2*.

$$V_{Rd,f} := A_{fv} \cdot \sigma_{Rd,f} \cdot \cot\theta \quad (6.9)$$

$$\sigma_{Rd,f} := \left(\frac{1}{K \cdot \gamma_{fc}} \right) \cdot \left(\frac{1}{w} \right) \cdot \int_0^w \sigma_f(w) dw \quad (6.10)$$

$$w := \max(w_u, 0.3\text{mm}) \quad (6.11)$$

$$A_{fv} := b_w \cdot z \quad (6.12)$$

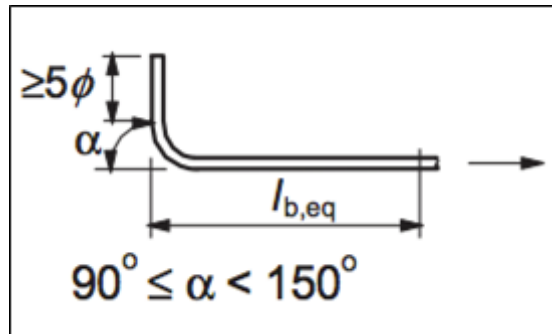
- $\sigma_{Rd,f}$ Gjennomsnittsverdi for styrken etter opprissing ved skjæriss
 A_{fv} Effektiv tverrsnittsareal
 K Fiberorienteringsfaktor
 w Sprekkbredde
 w_u Målt sprekkbredde ved høyest σ_f

6.2.3 Fiberorienteringsfaktor K

For å kunne utføre beregninger for fiberens bidrag for skjærkapasiteten må K faktor bestemmes. Denne blir teoretisk bestemt til 1 i dette tilfellet. Beslutningen er tatt på bakgrunn av Annex F i NF P18-470 og forskningsartikkelen "Fiber orientation distribution and tensile mechanical response in UHPFRC" av RILEM [24]. Konstruksjonsdelen som det skal bestemmes en K faktor for er en bjelke og testelementene for å bestemme K faktor er prismer. Bjelkene og prismene blir støpt på samme måte, og begge blir utsatt for krefter ved nedbøyingstest. Derfor kan det antas at fiberen vil fordele og orientere seg på samme måte i forhold til retningen til kreftene som påføres. I forskningsartikkelen ble det gjort forsøk med tilsvarende mengde og type fiber og prismene som ble skjært ut med støperetningen fikk en K faktor på 1.

6.2.4 Forankring

For enkelthetsskyld ble det valgt å ha armeringsstenger med bøy i endene til forankringsarmering på de nederste stengene. Armeringsstengene som ble levert var kun bøyd i den ene enden. På grunn av begrenset med tid ble det valgt å løse dette med å kutte av den bøyde enden, og så binde fast vinkelkroker på endene. Figur 6-1 viser prinsipper for forankring med standard vinkelkrok.



Figur 6-1 Ekvivalent forankringslengde for standard vinkelkrok [25]

I NF P18-710 gjelder også Figur 6-1 med unntak av at lengden 5Φ skal erstattes med $5\Phi/\delta$.

Formel (6.13) er fra NF P18-710, mens formel (6.14) er fra EC2 [25].

$$l_{b, \min} := \max \left[0.7 \cdot l_{b, \text{reqd}}, \left(\frac{1}{\delta} - 0.15 \right) \cdot 10 \cdot \phi, \left(\frac{1}{\delta} - 0.15 \right) \cdot 100 \text{mm} \right] \quad (6.13)$$

$$l_{b, \min} := \max(0.6 \cdot l_{b, \text{reqd}}, 10 \cdot \phi, 100 \text{mm}) \quad (6.14)$$

$l_{b, \min}$ Minste tillatte forankringsarmering lengde

$l_{b, \text{reqd}}$ Nødvendig kraftinnføring lengde

For å beregne forankringslengden brukes formel (6.14). Dette fordi i δ i den tilsvarende formelen i NF P18-710 inngår det verdier som $f_{ctm,el}$ og f_{ctfm} som ikke blir bestemt før etter støpene og testingen. I tillegg vil det ikke være mulig å beregne $l_{b, \text{reqd}}$ av samme grunn. Det blir derfor brukt maks av $10 \cdot \Phi$ og 100mm som forankringslengde.

6.3 Laboratorieforsøk

6.3.1 Blandeprosedyre

Generelt blandes UHPFRC i tre omganger. Først blandes alt pulver og tilslag til det blir en homogen blanding, deretter tilføres vann og alt eller deler av tilsetningsstoffer til det blir en tilstrekkelig flytende konsistens, til slutt tilsettes fiber [8].

Blandeprosedyren er hentet fra forprosjektet ved UiA hvor UHPFRC-resepten som brukes i denne oppgaven er utviklet [26]. Den har sin opprinnelse i Norcem sine grunnprinsipper for blandeprosedyre av UHPFRC.

Tabell 6-1 viser detaljert blandeprosedyre som skal benyttes under alle blandinger.

Tabell 6-1 Blandeprosedyre [24].

Fukt blandemaskinen med en blanding av sement og vann før maskinen fylles i denne rekkefølgen	Finfiller
	Microsilica
	Flyveaske
	Sement
	Mellomfiller
1. Kjør blandemaskinen i 5 minutter	Stopp maskinen og skrap massen ned til bunnen.
2. Kjør blandemaskinen i 2 minutter	Tilsett vannet og halvparten av SP-stoffet langsomt.
3. Stopp maskinen i 1 minutt	Skrap massen ned til bunnen.
4. Kjør blandemaskinen i 1 minutt	Tilsett resten av SP-stoffet
5. Kjør blandemaskinen i 5 minutter	Stopp maskinen og skrap massen ned til bunnen.
6. Kjør blandemaskinen i 1-5 minutter	Avhengig av når alt det tørre har reagert og blitt til en tykk masse
7. Kjør blandemaskinen i 2 minutter	Tilsett fiberen langsomt
8. Kjør blandemaskinen i 5 minutter	Stopp maskinen

6.3.2 Støping

Tabell 6-2 under viser en oversikt over antall planlagte prøvelegemer som skal støpes.

Tabell 6-2 Oversikt over de forskjellige prøvestykkene som skal støpes

Støpeplan			
	Terninger (10x10x10)cm	Prismer (10x10x50)cm	Bjelker (10x20x150)cm
Støp 1	4	4	-
Støp 2	10	12	-
Støp 3	36	12	14

«Støp 1» er et prøvestøp som skal utføres i hensikt med å bli kjent med materialet og utførelsen av blandedprosedyre og tester. Fra prismene i «Støp 2» skal materialets egenskaper under strekk testes og benyttes til å dimensjonere bjelkene som skal støpes under «Støp 3».

Bjelkene skal ha fire forskjellige armeringstilfeller;

- Type **A** - Med fiber, strekk-, forankring- og skjærarmering
- Type **B** - Med fiber og strekk- og forankringsarmering
- Type **C** - Med fiber og uten armering
- Type **D** - Uten fiber og uten armering

Metode for utstøping av prøvestykker består av å fylle mindre bøtter med den ferske betongen, og helle over i formene. Formene skal fylles fra den ene enden og stemples bortover. Dette er ganske tungvint med en så seig betong. Det ble derfor utviklet et støpebord, som vist i Figur 6-2, for å gjøre arbeidet mer effektivt når bjelkene skulle støpes.



Figur 6-2 Støpebordet i bruk [Eget bilde]

6.3.3 Herding

Grunnet begrensede ressurser, praktiske årsaker og på bakgrunn av den teoretiske kunnskapen fremskaffet om UHPFRC og herderegime ble det bestemt å varmebehandle prøvestykkene, slik at laboratorieforsøk kunne forekomme med kortere intervall enn 28 døgn.

Temperaturen er satt etter prosjektets tilgjengelighet på vannbad med stor nok kapasitet for mengde og antall prøvestykker, hvor vannbadet tilgjengelig har en maksimal temperatur på 45°C. Siden denne temperaturen er relativt lav kompenseres det for ved at varmebehandlingen foregår over et lengre tidsintervall. Lengden på dette tidsintervallet er bestemt ut fra at betong ved 20°C er tilstrekkelig herdet etter 28 døgn, at reaksjonstiden for herding øker eksponensielt, og at reaksjonsraten vil dobles fra 20°C til 35°C [12]. Det kan derfor konkluderes med at en varmebehandling på 45°C i minst 7 døgn vil føre til tilstrekkelig herding før utføring av laboratorieforsøk.

Alle prøvestykker skal avforskales etter omkring 24 timer og deretter herdes i vannbad på 45°C i minst 7 døgn. Alle testobjekter skal følge samme herderigime for at resultatene skal bli sammenlignbare.

I tillegg skal det støpes kontrollterninger som skal herdes i 20°C ± 2, for å kontrollere at benyttet herderigime oppnår tilstrekkelig fasthet.

6.3.4 Utbredningsmål

Utbredningsmålet blir testet i henhold til standard NS-EN 413-2, prøvingsmetoder for mursement. Dette fraviker fra metodene opplistet i NF P18-470, der flyten måles etter NS-EN 12350-5, NS-EN 12350-8 eller ASTM C230/C230M. Denne metoden benyttes

Utstyret smøres med formolje, og kjeglen plasseres midt på fallbordet. Kjeglen skal fylles halvfull og stamper 15 ganger, deretter fylles kjeglen helt og det skal stamper 15 ganger før den avrettes. Kjeglen løftes vertikalt opp og diameteren måles med skyvelær. Det måles flere steder og gjennomsnittet skal brukes. Stoppeklokken startes, og bordet løftes opp med sveiven og slippes 15 ganger på 42 sekunder med 3 sekunders intervall. Diameteren måles med skyvelær flere steder og gjennomsnittet beregnes. Utførelse av ulike steg i metoden illustreres i Figur 6-3.



Figur 6-3 Bilder fra utførelse av utbredningsmål [Eget bilde]

6.3.5 Densitet av fersk betong

Fersk densitet bestemmes i henhold til standard NS EN 12350-6.

6.2.6 Luftinnhold

Betongens luftinnhold skal bestemmes i henhold til standard NS EN 12530-7.

6.3.7 Densitet av herdet betong

Tørr densitet skal bestemmes i henhold til standard NF EN 12390-7.

Densiteten skal være mellom 2200 kg/m^3 og 2800 kg/m^3 . En toleranse på 100 kg/m^3 [8].

6.3.8 Trykkfasthet

Testen skal tilfredsstillende kravene gitt i NF EN 12390-3.

6.3.9 Nedbøyningstest på prismer

Prismene skal bli testet både ved 4-punkts nedbøyningstest og 3-punkts nedbøyningstest med innskjæring. I henhold til den franske standarden skal hver test utføres på minst seks prismer av tverrsnittsdimensjoner $a \times a$ og lengde $4a$, hvor a skal være mellom 7 cm og 20 cm og mellom 5 og 7 ganger lengden på lengste fiber. På grunn av testmaskinens kapasitet på 55 kN og tilgang på prismeforskaling ble prismer av dimensjoner 10 x 10 x 50 cm benyttet.

For å utføre begge testene benyttes testmaskinen Zwick k050 som er en nedbøyningskontrollert maskin.

Maskininnstillinger

Forhåndsbelastningen som påføres prøvestykket skal ha så lav intensitet som mulig. Etter påføring av forhåndsbelastningen aktiveres servokontrollen på nedbøyningen eller ekstensometeret.

Lastsatsen skal tilpasses etter hvilken type sensor som blir brukt til å kontrollere testen. For aktuator forskyvningskontrol skal lastsatsen være $(0,250 \pm 1) \text{ mm/min}$.

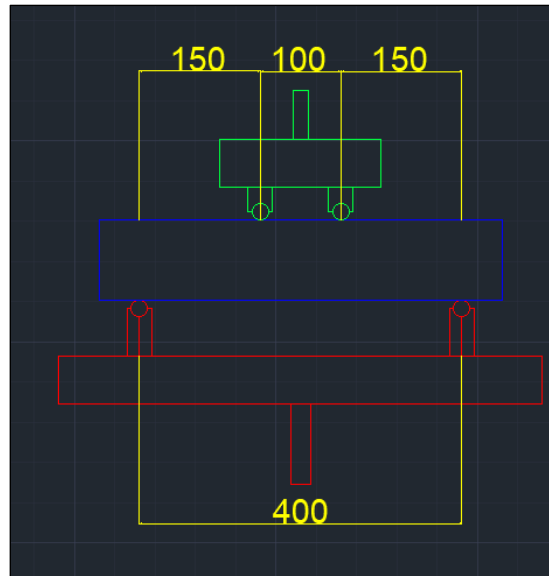
Testen skal kjøres helt til avbøyningen målt direkte på prøvestykket når $0,015 \times a$ (prismens høyde).

Data skal hentes inn i løpet av testen med en frekvens på minst 5 målinger per sekund. Det som skal måles er tiden, sprekkbredden, nedbøyningen og kraften.

6.3.10 4-punkts nedbøyningstest på prismer

I henhold til den franske standarden skal avstanden mellom de to punktene som skal trykke ned på prismet være a , og avstanden mellom opplagerne skal være $3a$ gitt at lengden av prismet er $4a$. Siden prismene brukt i denne oppgaven har lengde $5a$, ble det besluttet å bruke samme avstand mellom de to trykkpunktene, men å avvike fra standarden ved å bruke $4a$ som avstand mellom opplagerne. Dette ble gjort for å skape større nedbøyningsmoment i prismene ved å øke kraftarmen, med tanke på maskinens begrensede kapasitet på 55 kN.

Oppsettet for 4-punkts nedbøyningstest er vist i Figur 6-4.



Figur 6-4 Oppsettet for 4-punkts nedbøyningstest på prismer [Eget bilde]

Nedbøyningen blir målt av maskinen ved bruk av koordinater. Maskinen registrerer kraften, F_{nl} [N], rett før første riss, der materialet vil gå fra elastisitetssonen til den plastiske sonen (elastisitetsgrensen). Denne kraften benyttes først til å beregne korresponderende spenning ved elastisitetsgrensen under bøyning, ;

$$f_{ct, fl} := \frac{3 \cdot F_{nl}}{b \cdot a} \quad (6.15)$$

$f_{ct, fl}$ *Elastisitetgrense ved nedbøyning*

F_{nl} *Kraften ved første riss*

b *Bredden av prismet*

a *Høyden av prismet*

Den korresponderende spenningen ved elastisitetsgrensen under direkte strekk, kan da beregnes slik;

$$f_{ct, el} := f_{ct, fl} \cdot \left(\frac{k \cdot \alpha^{0.7}}{1 + k \cdot \alpha^{0.7}} \right) \quad (6.16)$$

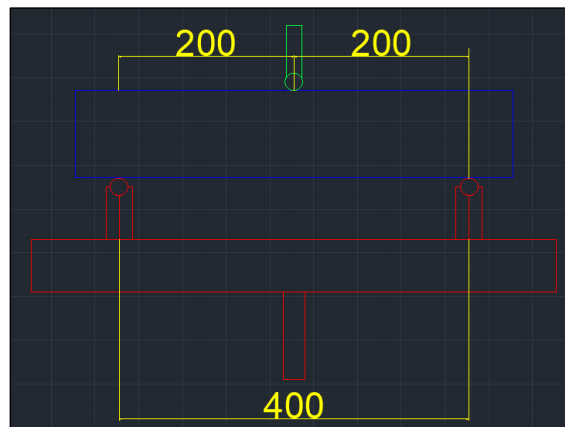
$f_{ct, el}$ *Spenningens elastisitetsgrense*

k *Koeffisient settes til 0.08*

6.3.10 3-punkts nedbøyningstest på prismer med innskjæring

Innskjæring av prismene skal sages i prismens midtseksjon i strekksonen. Flaten som skal innskjæres skal være en av flatene som lå mot sideveggene i formen. Dybden av innskjæringen skal være lik halve lengden av den lengste fiberen. Innskjæringens dybde skal være på 7 mm, men det var vanskelig og skjære så nøyaktig, derfor vil dybden variere med ± 1 mm. Bredde skal være mindre enn 3 mm [8]. Grunnet begrenset tilgang på utstyr kunne ikke en bredde på mindre enn 3 mm oppnås, og sagbladbredde på 4,5 mm ble benyttet.

Oppsettet for 3-punkts nedbøyningstest er vist i Figur 6-5.



Figur 6-5 Oppsett for 3-punkts nedbøyningstest

På tre-punkts testen brukes et ekstensometer plassert i underkant av prismen til å måle sprekkebredden. Ekstensometeret som er tilgjengelig er beregnet for å feste på tynne stålplater, derfor var det nødvendig å bruke to egenkomponerte plater. Disse platene ble festet i innskjæringen med teip, slik at ekstensometeret kunne måle sprekkebredden, som vist på Figur 6-6. Avstanden mellom de to klemmene på ekstensometeret skal være lik på alle prøvestykkene og ikke være større enn 5 cm.

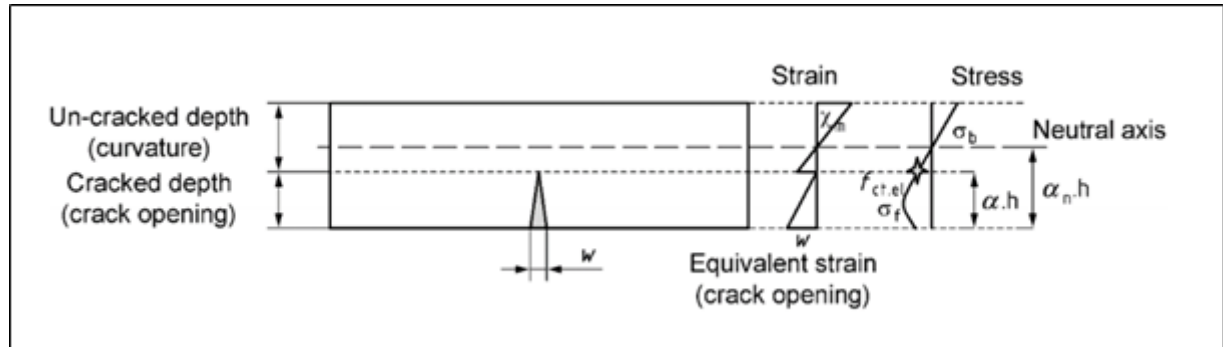


Figur 6-6 Bilde av ekstensometer, plater og hvordan dette festes i innskjæringen [Eget bilde]

6.3.11 Bestemmelse av σ - w -forholdet

Det skal konstrueres en kurve for σ (spenningen) som en funksjon av w . For å konstruere denne kurven brukes resultatene for kraft over sprekkbredde målt under 3-punkts nedbøyningstest.

Det blir først brukt uttrykk for den mekaniske balansen ved en opprisset prisme. Figur 6-7 illustrerer fordelingen av deformasjoner og spenninger i den opprissede og uopprissede delen av prismet.



Figur 6-7 Illustrasjon av en sprukket del av prisme under nedbøyningstest [8].

Den uopprissede delen tilsvarer en lineær elastisk kurve, og den opprissede delen tilsvarer spenningsfordelingen direkte fra effektiviteten til fiberene. Bidraget fra den uopprissede delen har index b og bidraget fra den opprissede delen har index f .

$$N_b := \frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^2}{2} \cdot \left[(1 - \alpha_n)^2 - (\alpha - \alpha_n)^2 \right] \quad (6.17)$$

$$N_f := \frac{\alpha \cdot h \cdot b}{w} \cdot \int_0^w \sigma_f \cdot dw \quad (6.18)$$

$$M_f := \alpha \cdot h \cdot N_f - \frac{(\alpha \cdot h)^2 \cdot b}{w^2} \cdot \int_0^w \sigma_f \cdot w \cdot dw \quad (\text{Formel 6.19})$$

$$M_b := \frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^3}{3} \cdot \left[(1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3 \right] + h \cdot \alpha_n \cdot N_b \quad (6.20)$$

$$M := M_b + M_f \quad (6.21)$$

$$N := N_b + N_f = 0 \quad (6.22)$$

M_b	<i>Momentkapasitet til uopprisset del av prismet i [MNm]</i>
M_f	<i>Momentkapasitet til opprisset del av prismet i [MNm]</i>
M	<i>Momentkapasitet</i>
N_b	<i>Normalkraft i uopprisset del av prismet [MN]</i>
N_f	<i>Normalkraften i opprisset del av prismet [MN]</i>
α	<i>Sprekkens relative dybde</i>
α_n	<i>Nøytralaksens relative dybde</i>
χ_m	<i>Kurvaturen av uopprisset del, oppgitt i m^{-1}</i>
$f_{ct,el}$	<i>Spennings elastisitetsgrense i [MPa]</i>
E_{cm}	<i>Gjennomsnittsverdien av Young's modulus i [MPa]</i>
b	<i>Bredden av prismet</i>
h	<i>Høyden av prismet</i>

Sprekkåpningen er knyttet til den uopprissede delen gjennom formel (6.23)

$$\chi_e := \frac{M}{E_{cm} \cdot I} \quad (6.23)$$

χ_e	<i>Ekvivalent elastisk kurvatur i m^{-1}</i>
I	<i>andre arealmoment</i>

Forholdet mellom høyden av sprekk og nøytralaksen er uttrykt i formel (6.24)

$$f_{ct,el} := E_{cm} \cdot \chi_m \cdot h \cdot (\alpha_n - \alpha) \quad (6.24)$$

$$\int_0^{w_i} \sigma_f dw = \int_0^w \sigma_f dw + \left(\frac{\sigma_f + \sigma_{fi}}{2} \right) \cdot (w_i - w) \quad (6.25)$$

$$N_{fi} := N_f \cdot \left(\frac{\alpha_i}{\alpha} \right) \cdot \left(\frac{w}{w_i} \right) + \alpha_i \cdot b \cdot h \cdot \left(\frac{\sigma_f + \sigma_{fi}}{2} \right) \cdot \left(1 - \frac{w}{w_i} \right) \quad (6.26)$$

For å ha et startpunkt for prosessen benyttes verdier i det punktet sprekk oppstår, altså på slutten av elastisk sone hvor sprekkbredden er null og derfor er M_f , N_b og N_f lik 0. Formel (6.27) kan da benyttes.

$$M_{b0} = M_{\text{ext}} = \frac{-b \cdot h^2 \cdot \sigma_f}{6} \quad (6.27)$$

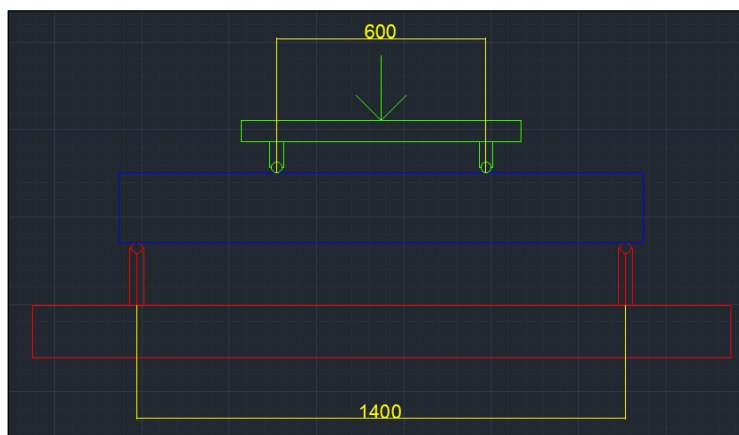
$$\sigma_f := \frac{(2 \cdot \sigma_f + \sigma_{fi})}{3} \quad (6.28)$$

Formlene over skal først utledes, for så å bruke programmet mathcad til utregning av endelige verdier. Mathcad er et dataverktøy for matematiske beregninger.

6.3.12 4-punkts nedbøyningstest på bjelker

For testing av bjelker på 1500 mm blir det brukt en modifisert 4-punkts nedbøyningstest for å minske momentet i bjelkene og holde skjærkraften mer konsentrert. Dette er en modifisert metode av statens vegvesen sin bøyestrekfasthets test av prismer.

Bjelken plasseres på opplagere med avstand på 1400 mm fra hverandre. Etter bjelken plasseres i maskinen legges testtriggen på. Den består av en stålbjelke med to trykkpunkter som skal påføre last på prøvestykket ved hjelp av maskinen. Trykkpunktene er plassert med senteravstand på 600 mm. Når last påføres stålbjelken vil den fordele denne lasten på hvert trykkpunkt. Figur 6-8 viser testens oppsett.



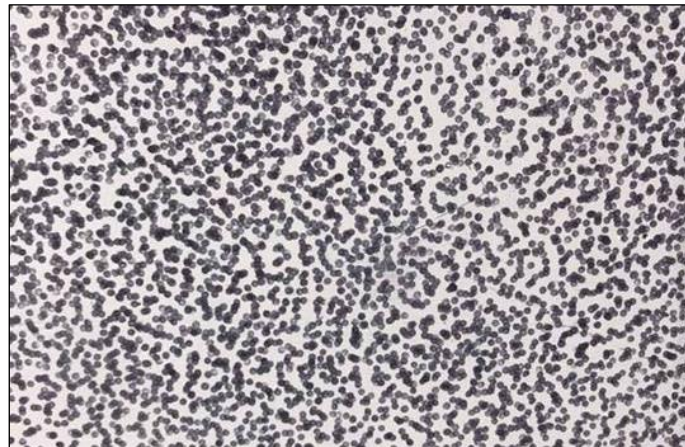
Figur 6-8 Oppsett for nedbøyningstest på bjelker [Eget bilde]

6.3.13 DIC-kamera



Figur 6-9 Bilde av DIC-kameraet i bruk [Eget bilde]

DIC-kamera ble brukt for sjekk av dannelse og utseende av riss. Ved bruk av denne type kamera er det viktig å male prøvestykket hvite og deretter stemple på svarte prikker som gir kamera mulighet til måling av forandring i pixler. Figur 6-10 viser tydelig illustrasjon av de stemplede prikkene.



Figur 6-10 Illustrasjon av de stemplede prikkene på prøvestykke [Eget bilde]

Ved en sprekk/riss dannelse eller ved nedbøyning vil prikkene bevege seg fra eller mot hverandre som vil resultere i tøyingsmåling. Vedlegg F viser gjennomføring av testen ved bruk av DIC-systemet. Dette systemet ble benyttet på bjelker og prismer.

6.3.13 Beregning av karakteristiske verdier

Karakteristisk verdi skal beregnes etter Annex B i NF P 18-470. Den karakteristiske verdien skal estimeres fra en populasjon av eksperimentelle verdier som er antatt normalfordelt og ved bruk av Student's lov med en signifikans på 5%, vist i Tabell 6-3. Den karakteristiske verdien er da lik den eksperimentelle gjennomsnittsverdien redusert av produktet av Student's koeffisienten av eksperimentelle estimering av standard avvik [8].

Tabell 6-3 Student koeffisient [8].

Number of experimental results	Student coefficient
3	2,920
4	2,353
5	2,132
6	2,015
7	1,943
8	1,895
9	1,860
10	1,833
11	1,812
12	1,796
...	...
> 30	1,7
...	...
∞	1,645

For å ekskludere avvik skal resultater som ligger $\pm 10\%$ fra medianen fjernes.

7. Resultat

7.1 Beregningsresultater

7.1.1 Momentkapasitet

Beregnet momentkapasitet ble 39,3 kNm. Dette tilsvarer en kraft på 98 kN.

7.1.2 Skjærkapasitet

Tabell 7-1 viser beregnet skjærkapasitet med antatt fiberbidrag før testing av bjelker og utregning av nødvendige verdier for $V_{rd,f}$.

Tabell 7-1 Beregnet skjærkapasitet med antatt fiberbidrag (før testing)

	Skjærkapasitet [kN]			
	$V_{rd,c}$	$V_{rd,s}$	$V_{rd,f}$	V_{rd}
A bjelker	23,4	12,0	12,0	47,4
B bjelker	23,4	0,0	12,0	35,4
C bjelker	28,1	0,0	12,0	40,1
D bjelker	28,1	0,0	0,0	28,1

I Tabell 7-2 er de endelige verdiene for beregnet skjærkapasitet etter korrigering av $V_{rd,f}$.

Tabell 7-2 Beregnet skjærkapasitet med beregnet fiberbidrag (etter testing)

	Skjærkapasitet [kN]			
	$V_{rd,c}$	$V_{rd,s}$	$V_{rd,f}$	V_{rd}
A bjelker	23,4	12,0	61,0	96,4
B bjelker	23,4	0,0	61,0	84,4
C bjelker	28,1	0,0	85,3	113,4
D bjelker	28,1	0,0	0,0	28,1

7.1.3 Armering

Lengdearmering

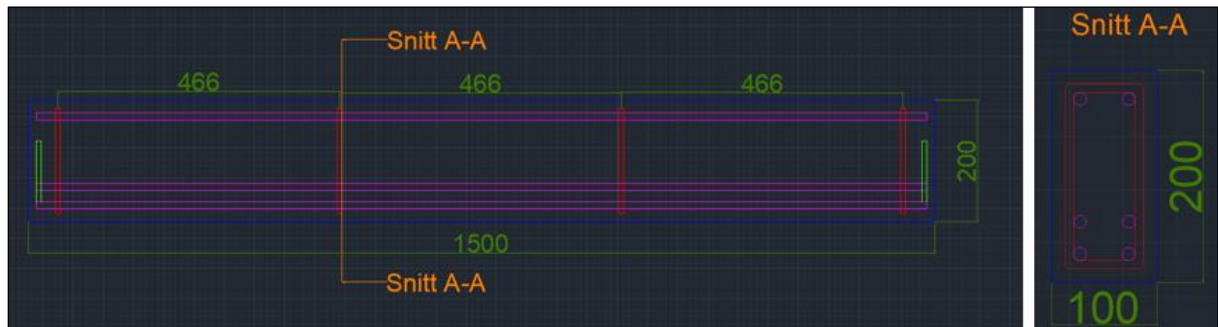
Det ble beregnet å bruke $\phi 12$ på lengdearmeringen, med 4 $\phi 12$ i strekksonen fordelt i to lag og 2 $\phi 12$ med trykkarmering. Teknisk tegning av løsningen er vist i Figur 7-1.



Figur 7-1 Teknisk tegning av bjelke med lengdearmering [Eget bilde]

Skjærarmering

Det ble beregnet å bruke 4 $\phi 8$ bøylor med senteravstand på 46,7 cm. Teknisk tegning av denne løsningen er vist i Figur 7-2.



Figur 7-2 Teknisk tegning av bjelke med lengde- og skjærarmering [Eget bilde]

Forankring

Det ble besluttet å plassere vinkelkrokene ved siden av og innenfor lengdearmeringen, noe som gjorde at det ble mindre avstand enn ønskelig mellom vinkelkrokene. Dette ble gjort fordi det ikke hadde latt seg gjøre å plassere dem på undersiden på grunn av bøylene, og hvis de hadde blitt plassert på oversiden ville avstanden mellom de to lagene bli for liten og det hadde blitt vanskeligere å kontrollere at betongen kom seg mellom disse stengene enn mellom de to stengene i bunn. Det ble brukt $\phi 8$ på vinkelkrokene ettersom det var svært trangt mellom hovedarmeringen. Forankringslengden ble beregnet til 12 cm, og høyden til 9 cm. Figur 7-3 viser bilde av forankringen.



Figur 7-3 Bilde av forankringsarmering [Eget bilde]

7.1.4 Fiberorienteringsfaktor K

Etter fordypning i hvordan K faktor skal bestemmes i følge NF P18-470 og ut ifra en forskningsartikkel hvor metoden er testet ut i praksis, ble resultatet av dette følgende beskrivelse.

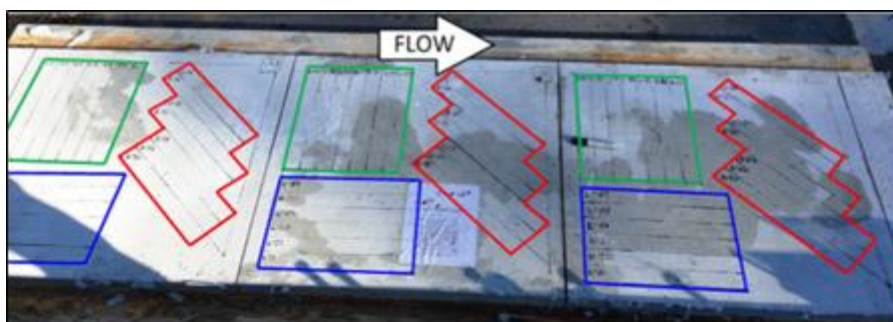
Orienteringsfaktoren K bestemmes ved å sammenligne momentkapasiteten av prismer skjært ut ifra en reell del av konstruksjonen, med støpte prismer av samme dimensjoner og betongresept. Prismene bestemmes ved referanse til en hoved-strekkretning i konstruksjonen assosiert med en del som er uniform i form av plassering og orientering av fiber [8].

Prøveplanen skal ta retningene av de indre strekkreftene som konstruksjonen utsettes for i betraktning. Minimum 6 plater eller prismer (avhengig av konstruksjonens tykkelse) med samme dimensjoner som de støpte prøvestykkene skal tas ut fra hver del av konstruksjonen og fra hver relevant strekkraftretning. Disse prøvestykkene tas vanligvis ut ved hjelp av sag, og skal testes i henhold til Annex D (eller Annex E for plater) ved 4-punkts og 3-punkts nedbøyningstest [8].

K_{global} bestemmes ved å ta forholdet mellom gjennomsnittet av toppunktene fra moment-nedbøyning-kurven fra de støpte prismene og toppunktene fra moment-nedbøyning-kurven fra prismene tatt ut fra deler av konstruksjonen ved saging. K_{local} bestemmes ved samme metode, bare ved bruk av den minste verdien på toppunktet fra moment-nedbøyning-kurven fra de sagde prismene [8].

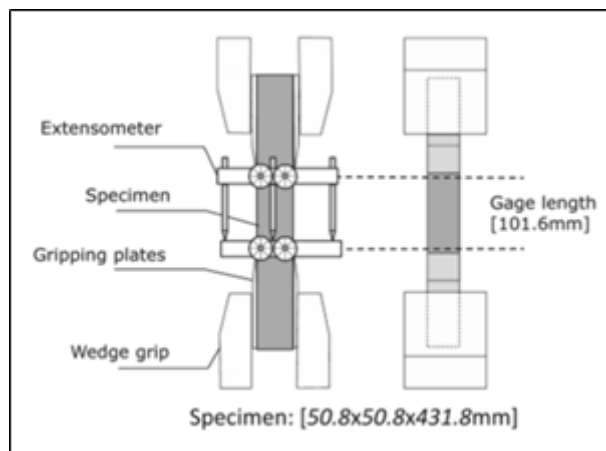
K verdiene skal ligge mellom 1,0 og 2,0 for K_{global} og mellom 1,0 og 2,5 for K_{local} [8].

I en forskningsartikkel av Rilem undersøkes K-faktor metoden fra AFGC med hensikt å studere og diskutere metoden. UHPFRCen brukt under dette forsøket inneholdt 2vol% fiber med diameter på 0,2 mm og lengde på 12,7 mm. Det ble støpt 5 elementdekker der flere prismer ble sagt ut i forskjellige retninger i forhold til støperetningen, se Figur 7-4. Det ble sagt ut prismer parallelt, vinkelrett og 45°C på støperetningen. I tillegg ble det støpt 12 prismer med samme resept og dimensjoner [25].



Figur 7-4 Oppsett av prismene sagt ut fra dekkene [25].

Prøveelementene herdet under omgivende forhold i 6 måneder før prismene ble kuttet fra dekkene og alle prismene ble testet ved direkte spenningstest. Oppsettet for testen er vist i Figur 7-5



Figur 7-5 Oppsettet av strekktesten av prismene [25].

Figur 7-6 viser resultatene av testene og den bestemte K faktoren for de forskjellige prismene tatt ut av dekkene ved ulike vinkler. FEC betegner de støpte prismene, FE0, FE45 og FE90 benevner prismene kuttet ut av dekkene ved de ulike vinklene på henholdsvis 0°C, 45° og 90°.

Set		Peak stress		K factor	
		Average (MPa)	Min (MPa)	K_{global}	K_{local}
Maya and Graybeal	FEC	10.9	9.6		
	FE0	12.4	10.7	0.69 → 1.00	0.80 → 1.00
	FE45	8.1	6.3	1.07	1.36
	FE90	6.1	5.1	1.39	1.68
Oosterlee [11] ^a	T-Mold	10.8			
	T-4/7H	10.5	9.1	0.95 → 1.00	1.09
	T-1/3H	3.2	2.6	3.06	3.80

Figur 7-6 Resultater på orienteringsfaktorene K [25].

Det konkluderes med viktigheten i å ta rede for fordeling og orientering av fiber og materialets anisotropi når det gjelder strekkegenskaper i design anbefalinger for UHPFRC. Konseptet med reduksjonsfaktorer viser seg å være en robust tilnærming for å redegjøre for fiberorientering og fordelings effekten på den strekkmekaniske responsen. Det viste seg også at de oppnådde K faktorene ved disse forsøkene samsvarte med K faktorer fra annen forskning på lignende elementer og i samme orden som de foreslåtte forutbestemte verdiene gitt av AFGC/NF P18 [25].

7.2 Laboratorieresultater

7.2.1 Støp og herdeforhold

Tabell 7-2 viser en oversikt over navn på de ulike støpene og antall prøvestykkene støpt.

Støpene er delt inn i tre der «støp 1» og «støp 2» er prøvestøp. Tall nummer to i «støp 3» står for hvilke av de tre dagene støpet ble utført, og tall nummer tre står for hvilke rekkefølge på dagen det ble støpt. Navnet på det siste støpet (3.3.2') er markert med " ' " , dette betyr at støpet ikke inneholder fiber.

Tabell 7-3 Oversikt over antall prøvestykker støpt ved de ulike støpene

Navn	Dato	Antall prøvesykker		
		Terning	Prisme	Bjelke
Støp 1	09.feb	4	4	0
Støp 2	23.feb	10	12	0
Støp 3.1.1	17.apr	4	1	2
Støp 3.1.2	17.apr	4	1	2
Støp 3.2.1	18.apr	4	1	2
Støp 3.2.2	18.apr	4	1	2
Støp 3.2.3	18.apr	4	4	1
Støp 3.2.4	18.apr	4	3	1
Støp 3.3.1	19.apr	4	1	2
Støp 3.3.2'	19.apr	4	0	2

Tabell 7-4 viser en oversikt over hvilket herdergime de forskjellige prøvestykkene har gjennomgått. For fremstilling av resultatene i dette kapittelet vil de samme merknadene på støpene bli benyttet.

Terningene i «støp 1» markert med **, ble behandlet i 90°C vannbad i 2 døgn. Det ble gjort for å kunne sammenligne resultatene fra da resepten ble utviklet, ved å benytte samme herderegimet. Terningene i «støp 2» markert *, ble oppbevart i vannbad på 20°C i 28 døgn for å bekrefte tilstrekkelig herding ved høyere temperatur over færre døgn. Terningene og prismene fra «støp 2» markert ^, herdet i tillegg i 56 døgn. Dette skyldes at det oppstod problemer med zwicken så testene ikke kunne utføres etter planlagt tid.

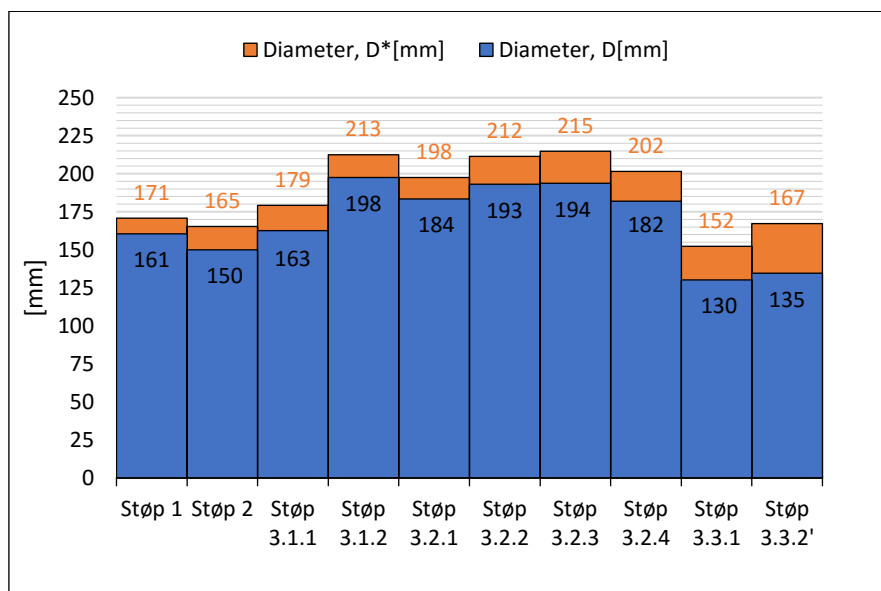
Det resterende prøvestykkene var planlagt å herde i vannbad på 45°C i minimum 7 døgn. Dette var ikke mulig å oppnå for «støp 3», på grunn av forsinkelser av mellomfiller som resulterte i flere omganger med utsettelse av støpene. Datoene som ble reservert for å teste bjelkene på mekatronikklaboratoriet var kun mulig å utsette en viss tid. Derfor ble herdetiden for «støp 3» noe redusert. Prøvestykkene i «støp 3» ble avforsalet etter 2 døgn istedenfor 1. Dette ble gjort fordi det ble oppdaget at betongen fortsatt kunne være litt formbar etter kun 1 døgn. Vannbadene som bjelkene herdes i er relativt trange og kunne endt opp med deformasjoner.

Tabell 7-4 Oversikt over herderegime for prøvestykkene fra hvert støp

Støp	Herding				Prøvestykke	
	Tid før avforskaling	Temperatur vannbad	Tid vannbad	Tid romtemperatur	Terning	Prisme
1**	1 døgn	90°C	2 døgn	0 døgn	4	0
1	1 døgn	45°C	27 døgn	0 døgn	0	4
2	1 døgn	45°C	12 døgn	0 døgn	3	1
2^	1 døgn	45°C	12 døgn	56 døgn	3	11
2*	1 døgn	20°C	28 døgn	0 døgn	4	0
3	2 døgn	45°C	5 døgn	1 døgn	alt	

7.2.2 Utbredningsmål

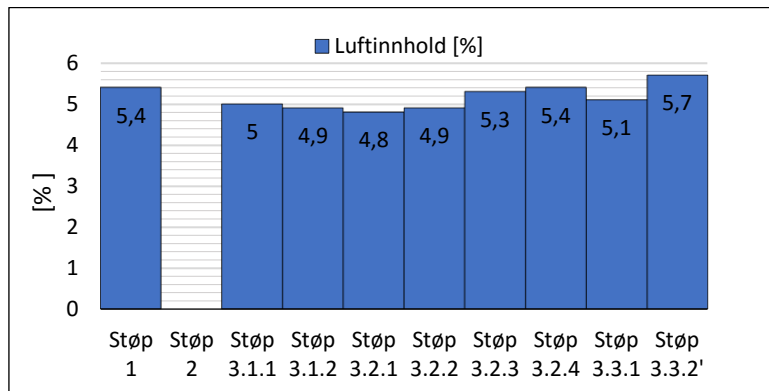
Flytegenskapene til de forskjellige støpene er illustrert i Figur 7-7. Den blå delen av søylene er utbredelsesdiameteren målt etter kjeglen er løftet opp. Den oransje delen av søylen demonstrerer utbredelsen etter tilført energi på fallbordet.



Figur 7-7 Målt utbredningsmål i mm

7.2.3 Luftinnhold

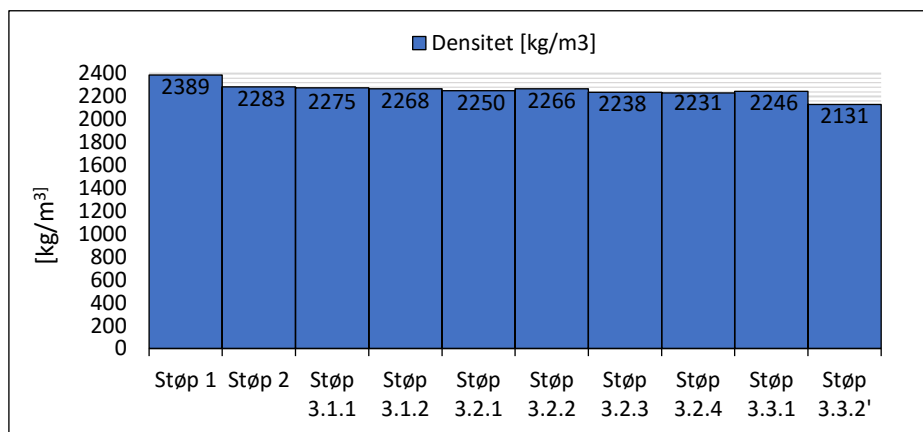
Figur 7-8 viser støpenes luftinnhold uttrykt i prosent. For «støp 2» ble luftinnholdet ikke målt på grunn av defekt utstyr.



Figur 7-8 Målt luftinnhold i %

7.2.4 Densitet av fersk betong

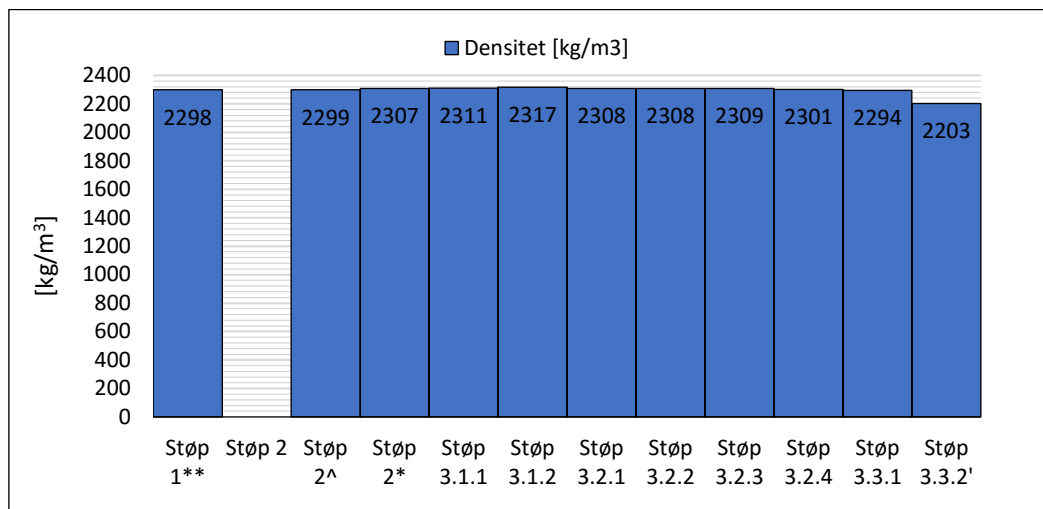
Densiteten av de ferske blandingene er vist i Figur 7-9.



Figur 7-9 Målt densitet av fersk betong

7.2.5 Densitet av herdet betong

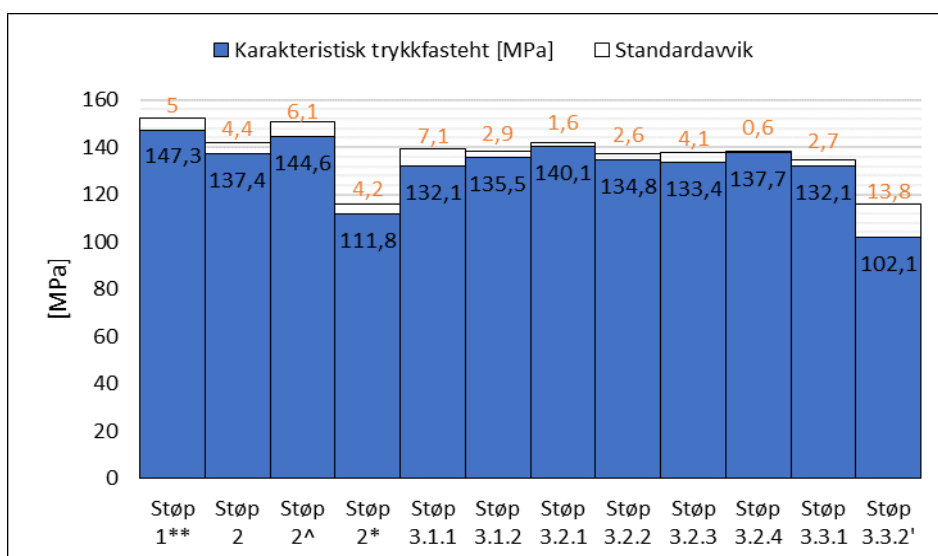
Figur 7-10 viser den gjennomsnittlige densiteten målt på herdete terninger fra hvert støp. De samme terningene blir senere trykktestet. For «støp 2» ble densiteten ikke målt.



Figur 7-10 Målt gjennomsnittlig densitet per støp

7.2.6 Trykkfasthet

I Figur 7-11 er den karakteristiske trykkfastheten til de ulike støpene fremstilt. De hvite toppene av søylene illustrerer standardavviket. Jo større verdi på standaravviket, desto større spredning finnes i prøvestykkene fra samme støp.



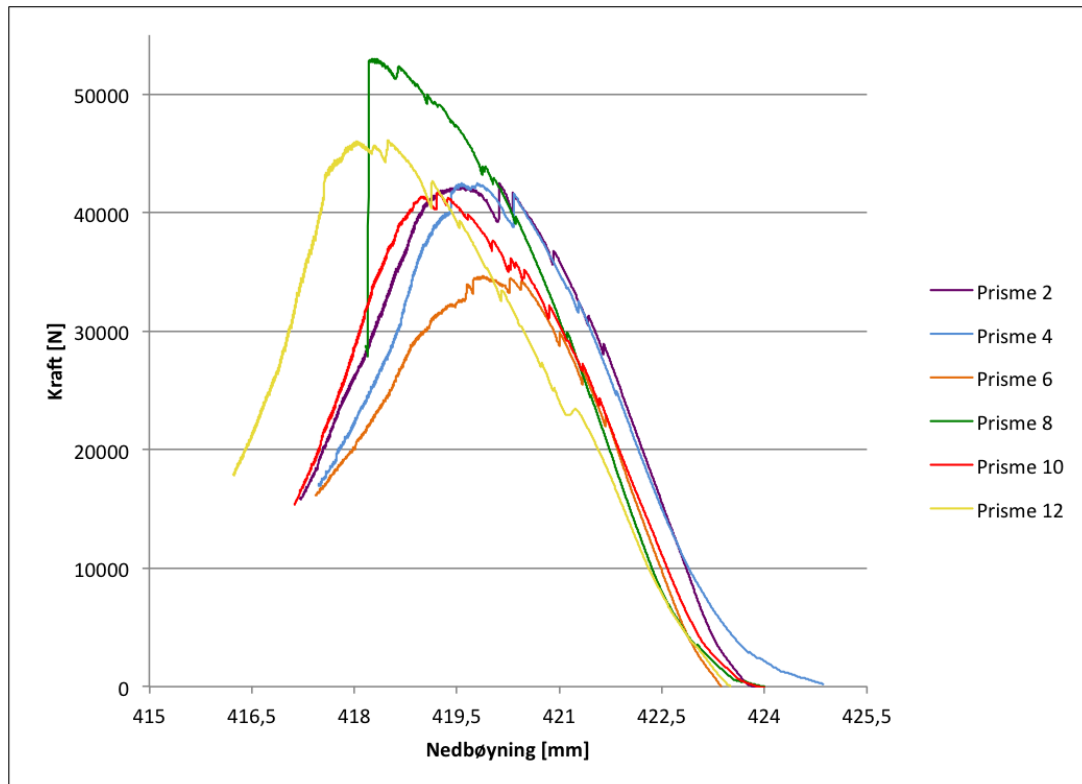
Figur 7-11 Beregnet karakteristisk trykkfasthet og standardavvik for hver støp

Den samlede karakteristiske trykkfastheten for alle blandingene i «støp 3» ble beregnet til 137,4 MPa. For dimensjonering av bjelker til «støp 3», ble den karakteristiske verdien til «støp 2» på 137,4 MPa benyttet. Siden disse verdiene ble identiske ble det ikke nødvendig å gå tilbake å korrigere beregningene etter «støp 3».

7.2.7 4-punkts nedbøyningstest på prismer

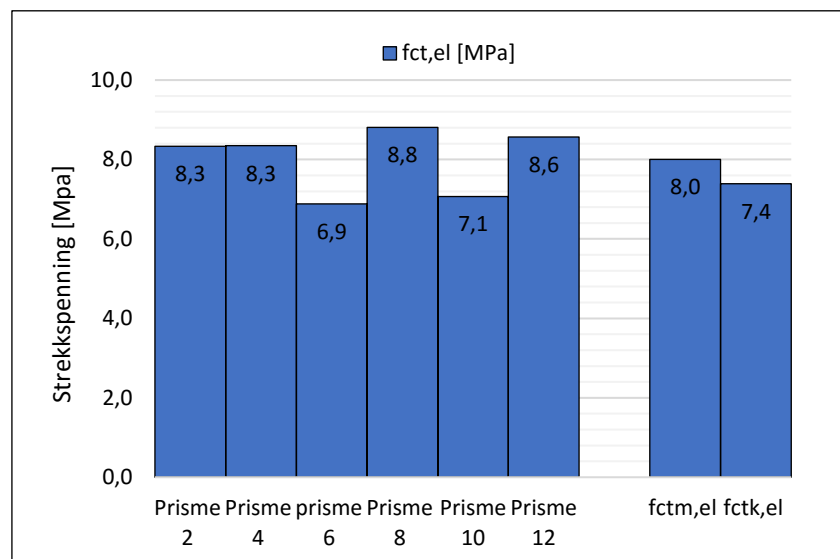
Grafene i Figur 7-12 viser kraftutviklingen i forhold til nedbøyning for alle prismene testet ved 4-punkts nedbøyningstest. Maskinen som testene ble utført på beregner nedbøyningen ved "tool separation" som er avstanden mellom riggens feste oppe og nede. Derfor begynner nedbøyningen på rundt 424 mm og går i negativ retning.

Grafen for «prisme 8» ender i en loddrett linje ettersom prismet nærmet seg maskinens maksimale kapasitet og de hydrauliske klypene glapp så maskinen måtte stoppes.



Figur 7-12 Alle resultater av 4-punkts nedbøyningstest på prismer

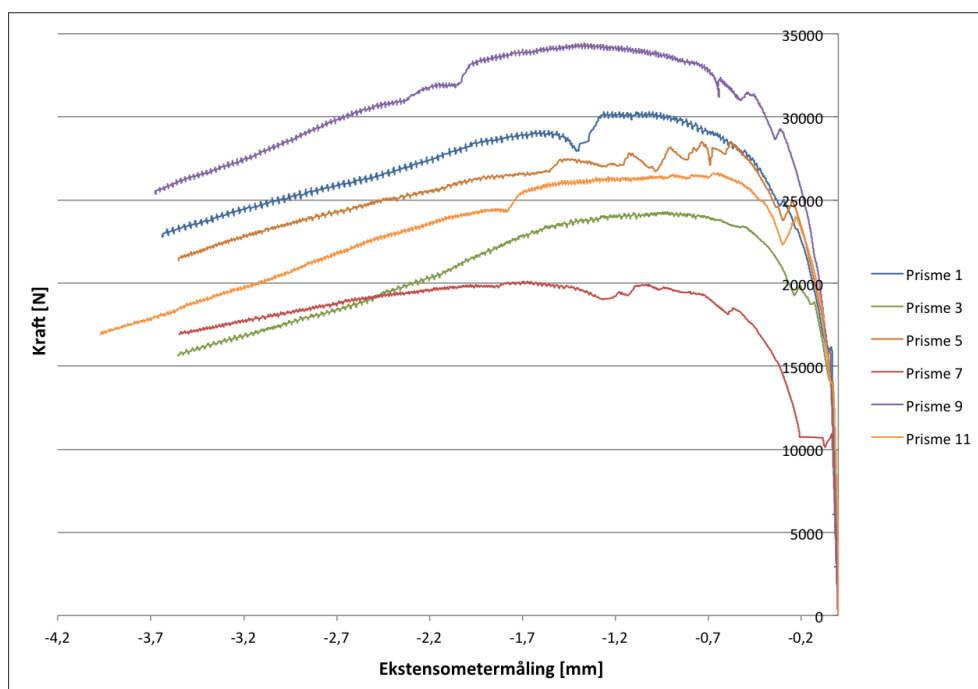
Figur 7-13 viser elastisitetsgrensen under strekkspenning til de forskjellige prismene testet ved 4-punkts nedbøyningstest. Søylene betegnet $f_{ctm,el}$ og $f_{ctk,el}$ er henholdsvis gjennomsnittsverdien og den karakteristiske verdien for alle prismene.



Figur 7-13 Prismenes elastisitetsgrense under strekkspenning, $f_{ct,el}$

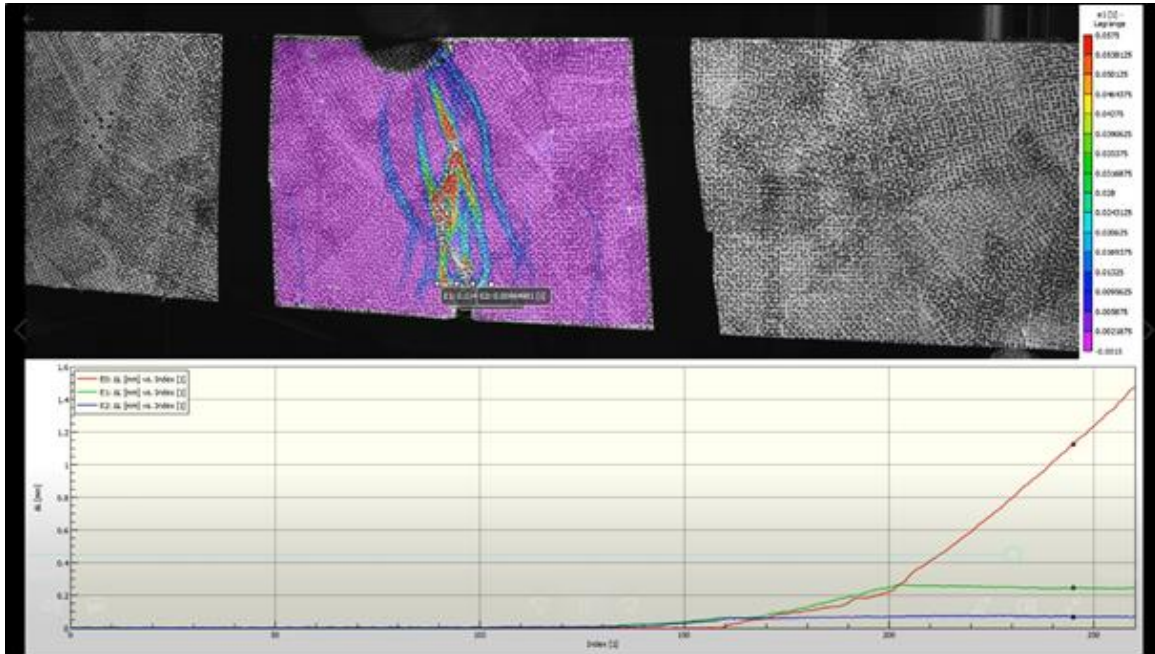
7.2.8 3-punkts nedbøyningstest på prismer

I Figur 7-14 er resultatene av prismene testet ved 3-punkts nedbøyning fremstilt. X-aksen representerer ekstensometermålingen som begynner på 0 og går i negativ retning etterhvert som prismen vil bøyes ned ved innskjæringen og etterhvert sprekke opp.



Figur 7-14 Alle resultater av 3-punkts nedbøyningstest på prismer

Figur 7-15 er et bilde tatt ut i fra video med analysene på sprekkutviklingen til en av prismene testet ved 3-punkts nedbøyingstest. Videoen viser sprekkbredden og tøyingskonsentrasjon over tid. Y-aksen på grafen er sprekkbredde, og x-aksen er tid. Fargene i kolonnen til høyre viser tøyingskonsentrasjonen. Videoene med sprekkutviklingsanalyse for alle prismene ligger i Vedlegg E.



Figur 7-15 Resultater fra DIC-kameraet på sprekkutviklingen på en prisme

7.2.9 Bestemmelse av σ - w -forhold

Alle formler som blir brukt i dette kapittelet er oppgitt i kapittel 6.3.11, samt NF P18-470.

For å ha mulighet til å finne σ og α ut i fra formler oppgitt i NF P18-470 er man nødt til å utlede to formler. En for moment og en for normalkraft. For å gjøre dette må man foreta flere regneoperasjoner som bli forklart under.

STEG1: Utledningen av formlene starter med formel for moment og normalkraft

$$M = M_b + M_f$$

$$N_f + N_b = 0$$

STEG2: Neste steg er å skrive opp formler for moment og normalkraft i opprisset og uopprisset del av prismen.

$$N_b = \left(\frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^2}{2} \right) \cdot \left[(1 - \alpha)^2 - (\alpha - \alpha_n)^2 \right]$$

$$N_f = \left(\frac{\alpha \cdot h \cdot b}{w} \right) \cdot \int_0^w \sigma_f dw$$

$$M_f = (\alpha \cdot h \cdot N_f) - \frac{(\alpha \cdot h)^2 \cdot b}{w^2} \cdot \int_0^w \sigma_f \cdot w \, dw$$

$$M_b = \frac{E_{cm} \cdot \chi_m \cdot b \cdot h^3}{3} \cdot \left[(1 - \alpha_n)^3 - (\alpha - \alpha_n)^3 \right] + h \cdot \alpha_n \cdot N_b$$

$$N_{fi} = N_f \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha} \cdot \frac{w}{w_i} + \alpha_i \cdot b \cdot h \cdot \left(\frac{\sigma + \sigma_i}{2} \right) \cdot \left(1 - \frac{w}{w_i} \right)$$

$$M_{fi} = M_f \cdot \left(\frac{\alpha_i}{\alpha} \cdot \frac{w}{w_i} \right)^2 + \alpha_i \cdot h \cdot N_{fi} \cdot \left(1 - \frac{w}{w_i} \right) - \left[\frac{(\alpha \cdot h)^2 \cdot b}{2} \right] \cdot \left(1 - \frac{w}{w_i} \right)^2 \cdot \sigma_f$$

STEG3: I ovennevnte ligninger er det mange ukjente derfor er det nødvendig å sette inn matematiske definisjoner, slik at man ender med to ligninger og to ukjente.

$$\int_0^{w_i} \sigma_f \, dw = \left(\int_0^w \sigma_f \, dw \right) + \left(\frac{\sigma + \sigma_i}{2} \right) \cdot (w_i + w)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$M = \frac{F \cdot l}{4}$$

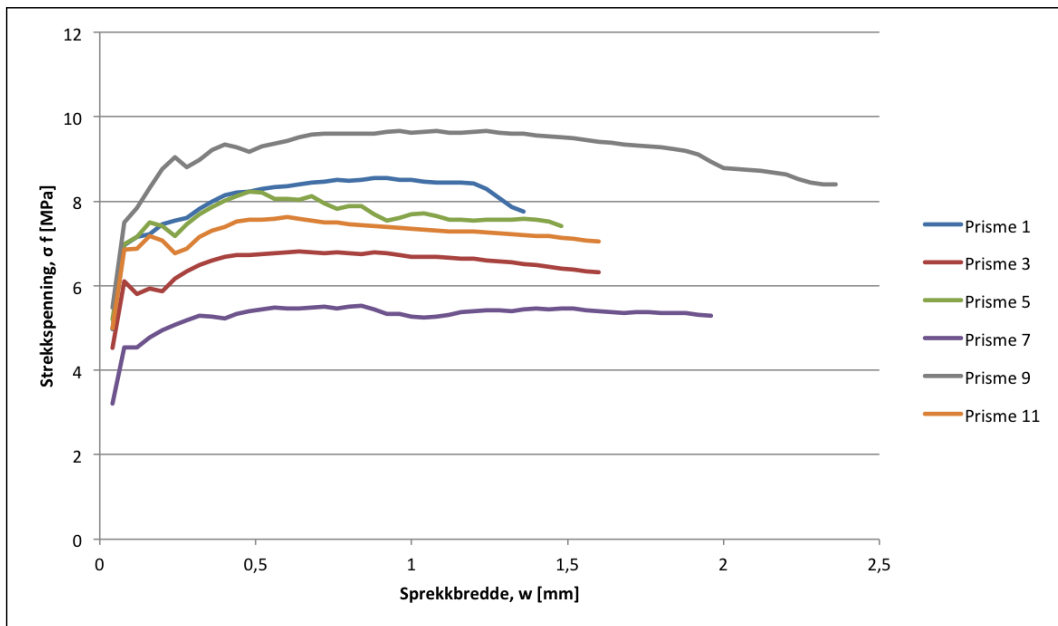
$$\chi_e = \frac{M}{E_{cm} \cdot I}$$

$$\chi_m = -2 \cdot \chi_e + \frac{3 \cdot w}{2 \cdot (a \cdot h)^2}$$

$$a_n = a + \frac{f_{ctel}}{h \cdot \chi_m \cdot E_{cm}}$$

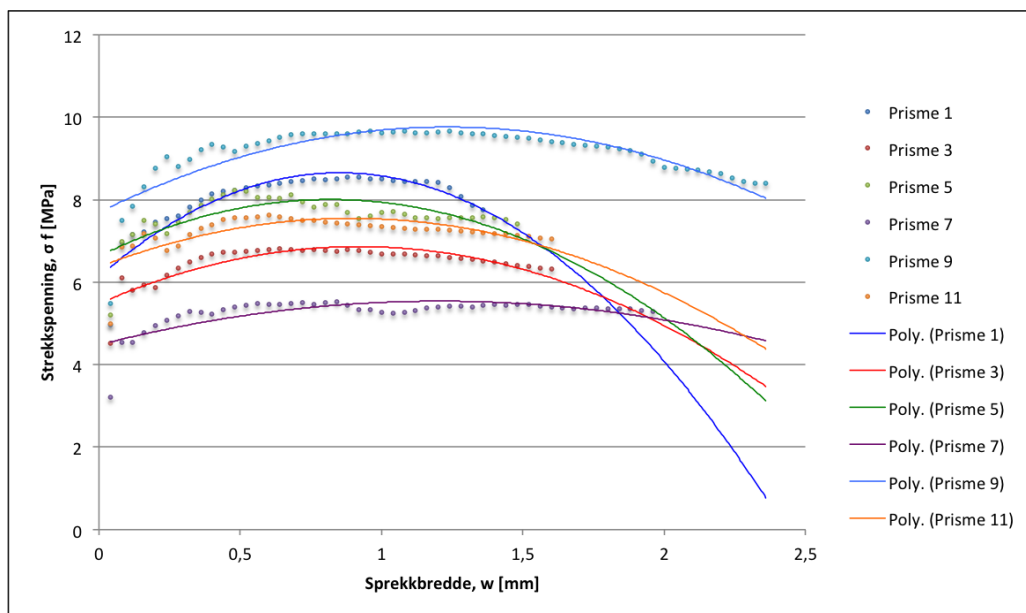
STEG4: Ved å sette ligninger fra steg 3 inn i steg 2 og deretter inn i steg1 vil man få to ligninger og to ukjent som resultat. Dette gir mulighet til å definere σ og α .

Figur 7-16 viser kurvene for utregningene av σ - w for hver prisme testet med 3-punkts nedbøyingstest.



Figur 7-16 Resultat av σ - w beregninger

I Figur 7-17 vises regresjonskurvene til hver prisme fra Figur 7-16. Ligningen for hver av regresjonskurvene er vist i Tabell 7-5.



Figur 7-17 Regresjon av σ - w kurver

Tabell 7-5 Regresjonsligninger for σ -w.

Prisme	Funksjon til regresjon
1	$\sigma_f = -3,4707w^2 + 5,9125w + 6,1365$
3	$\sigma_f = -1,6368w^2 + 3,0097w + 5,4795$
5	$\sigma_f = -2,0557w^2 + 3,3615w + 6,6319$
7	$\sigma_f = -0,7265w^2 + 1,7549w + 4,4817$
9	$\sigma_f = -1,362w^2 + 3,3568w + 7,696$
11	$\sigma_f = -1,4755w^2 + 2,6381w + 6,3694$

Resultatet av σ_f og σ_{Rdf} er fremstilt i Tabell 7-6. Mer utfyllende beregninger er vist i Vedlegg G og Vedlegg J.

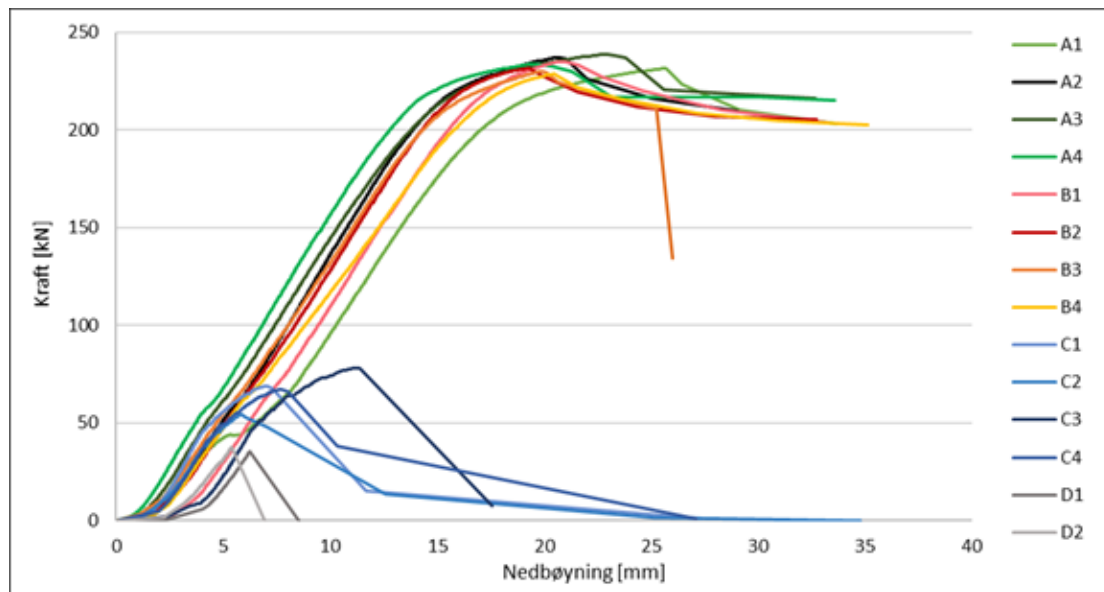
Tabell 7-6 Resultatet av σ_f og σ_{Rdf}

	σ_f korrigert	σ_{Rdf}
Prisme 1	8,558666667	6,0324
Prisme 3	6,790666667	4,8081
Prisme 5	8,237666667	5,6006
Prisme 7	5,517	3,883
Prisme 9	9,659333333	6,907
Prisme 11	7,619666667	5,9809
Gjennomsnitt	7,7305	5,535333333
Standardavvik	1,320266959	0,965264029
Antall prøver, n	6	6
Student koeff.	2,015	2,015
Karakteristisk verdi	6,644421591	4,741287543

UHPFRCen tilsvarer strekkklasse T1*, hvor følgende ulikhet er tilfredsstilt;
 $7,7 \text{ MPa}(f_{ctfm})/1(K) < 8 \text{ MPa}(f_{ctm,el})$ og $6,6 \text{ MPa}(f_{ctfk})/1(K) < 7,4(f_{ctk,el})$.

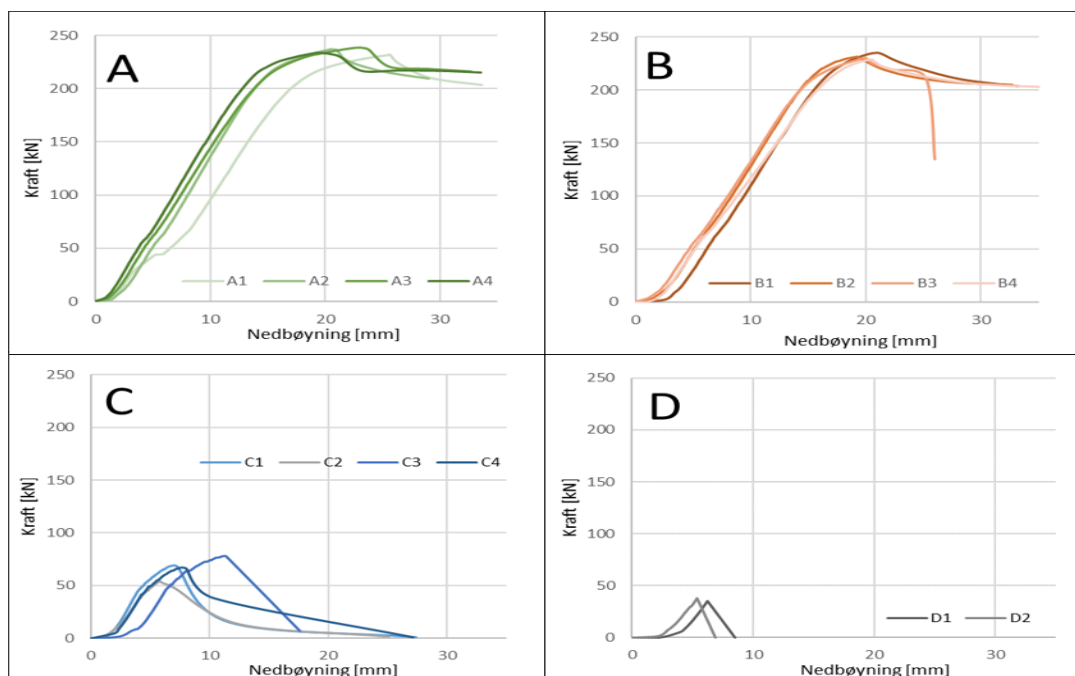
7.2.10 4-punkts nedbøyningstest på bjelker

Resultatene fra 4-punkts nedbøyningstest på bjelker er fremstilt i Figur 7-18.



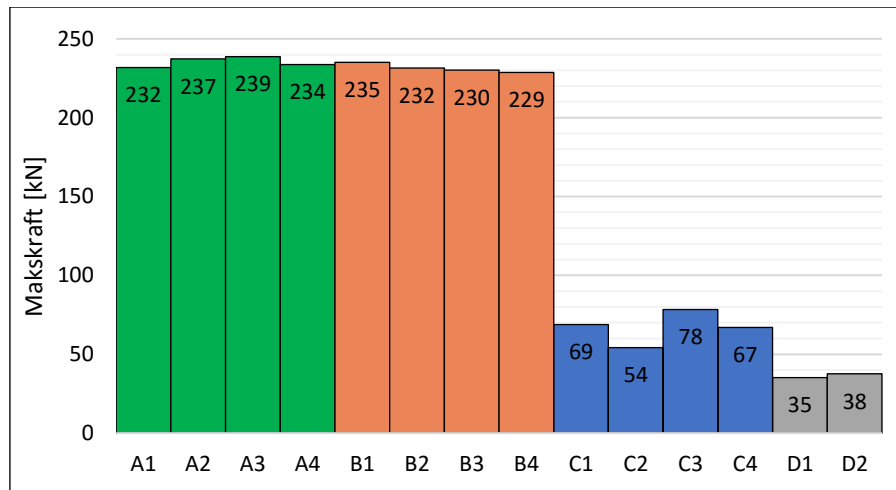
Figur 7-18 Resultater av 4-punkts nedbøyningstest på bjelker

Figur 7-19 viser de samme resultatene som Figur 7-18, men delt opp i de forskjellige armeringstilfellene for å lettere kunne se variasjonen mellom bjelkene av samme type.



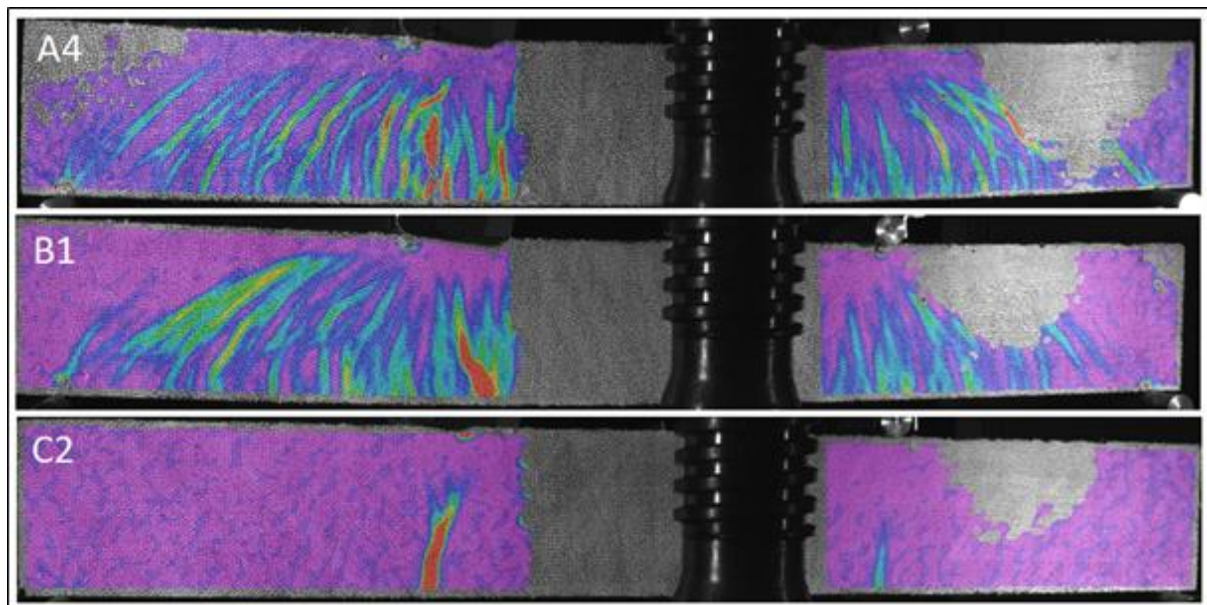
Figur 7-19 Resultat av 4-punkts nedbøyningstest for fire typer bjelker

Maksimalkraften for hver bjelke er vist i Figur 7-20.



Figur 7-20 Bjelkenes maksimale kapasitet

Bildet på Figur 7-21er tatt ut i fra analysen fra DIC-kameraet på sprekkutviklingen. Det er tatt et eksempelbilde fra hver type bjelke. Bjelkene av type D, uten armering eller fiber. Alle videoene med analyse ligger vedlagt i Vedlegg F.



Figur 7-21 Resultat fra DIC-kamera på sprekkutvikling av bjelke: A, B og C

7.3 Sikkerhetsfaktor

Sikkerhetsfaktorer beregnet etter resultater og beregninger fra testene er fremstilt i Tabell 7-7

Tabell 7-7 Sikkerhetsfaktor for moment og skjær

Bjelke	Makskraft [kN]	Tilsvarende moment [KNm]	Moment - kapasitet [KNm]	Sikkerhetsfaktor	Skjærkraft [KN]	Skjærkapasitet [kN]	Sikkerhetsfaktor
A1	232	46,36	39,31	1,18	115,90	96,4	1,20
A2	237	47,46	39,31	1,21	118,65	96,4	1,23
A3	239	47,74	39,31	1,21	119,35	96,4	1,24
A4	234	46,74	39,31	1,19	116,85	96,4	1,21
B1	235	47,02	39,31	1,20	117,55	84,4	1,39
B2	232	46,3	39,31	1,18	115,75	84,4	1,37
B3	230	46,04	39,31	1,17	115,10	84,4	1,36
B4	229	45,74	39,31	1,16	114,35	84,4	1,35

Sikkerhetsfaktoren for skjærkapasitet er bare beregnet ut ifra den verdien de kollapset på moment og vil derfor være høyere enn den oppgitt i tabellen.

8. Diskusjon

8.1 Momentberegninger

Momentkapasiteten på 39,3 kNm ble beregnet på grunnlag av boka "Betongkonstruksjoner" som er en veiledende bok med beregning og dimensjonering etter EC2. Dette er nødvendigvis ikke korrekt beregningsmetode siden denne boka verken er beregnet for betong med høyere fasthetsklasse enn 90 MPa og heller ikke for betong med fiber. Ettersom standard NF P18-710 ikke inneholder metode for å dimensjonere momentkapasitet spesifikt for UHPFRC, ble metoden fra konstruksjonsboka betraktet som beste løsning. Det er heller ikke noe beregning for momentkapasitet som ikke inneholder lengdearmering, så det antas at armeringen står for mesteparten av momentkapasiteten. På bakgrunn av dette og laboratorieresultatene som ga en momentkapasitet på rundt 47 MPa, kan det antas at disse beregningene stemmer godt og inneholder i dette tilfelle en sikkerhetsfaktor på rundt 1,2.

8.2 Skjærberegninger

Det var flere utfordringer ved beregning av skjær. Beregningsmetodene var kompliserte og tidskrevende. I tillegg er det flere benevninger og verdier som mangler generelt i standarden. Det måtte gjøres flere forsøk for å finne riktige benevninger og verdier som ga et realistisk svar. For beregning av skjærkapasiteten var det nødvendig med et flertall av klassifiseringsverdier fra laboratorieforsøk av den brukte UHPFRCen. Disse verdiene er betongens trykkfasthet og dens egenskaper under strekk, mer spesifikt σ -w-forholdet. Trykkfastheten blir benyttet i alle de tre skjærkapasitetsformlene, og σ -w-forholdet er kun en del av formelen for bidraget fra fiberen. Trykkfastheten ble testet og beregnet før dimensjoneringen av bjelkene, men ikke σ -w-forholdet. På grunn av tidspress og komplisert metode og utregning for sistnevnte verdi, ble det ikke mulig å beregne denne før bjelkene måtte støpes. Derfor måtte det bli gjort antagelser på hvor mye fiberen ville bidra med på skjærkapasiteten. Det ble ikke funnet noe teori om hvor mye fiberen faktisk bidrar til skjærkapasiteten fra forskningsartikler og lignende. Siden fiberene som er benyttet i denne oppgaven er små og uten endekroker til forankring, ble det antatt at den ikke ville bidra i høyere grad enn bidraget fra både betongen og skjærarmeringen. Det ble også gjort observasjoner under nedbøyingstest av prizmer som tydet på at heften mellom fiber og betong var svakere enn styrken på selve fiberen, ettersom fiberen ble dratt ut og ikke knakk. Det tydet på en "tension softening" oppførsel og var også medvirkende på antagelsen om fiberens bidrag til skjærkapasiteten. Den ble dermed satt til 12 kNm. Skjærkapasiteten fra betongen ble beregnet å være 23,4 kN for armert tverrsnitt og 28,1 for uarmert tverrsnitt. Bidraget fra skjærarmeringen ble beregnet til 12 kN. Ut ifra dette var sikkerheten for at bjelkene skulle oppnå skjærbrudd og ikke momentbrudd høy. Den beregnede momentkapasiteten på 39,3 kNm tilsvarer en kraft fra testmaskinen på 98 kN, og den sammenlagte skjærkapasiteten med antatt bidrag fra fiberen på 47,4 kN for A-bjelkene og 40,1 kN for B-bjelkene. Likevel fikk alle bjelkene momentbrudd og ikke skjærbrudd.

Etter resultatene fra testene på prismene og behandling og omregning av disse resultatene, kunne det virkelige bidraget fra fiberen beregnes. Denne verdien ble beregnet til hele 61 kN for A og B, og 85,3 kN for C. Dette var høyere enn forventet, men en god forklaring på at bjelkene ikke oppnådde skjærbrudd. Den totale skjærkapasitet ble da på 96,4 kN for A-bjelkene, 84,4 kN for B-bjelkene og 113,4 kN for C-bjelkene. Samtidig ble fortsatt beregnet skjærkapasitet noe lavere enn den beregnede momentkapasiteten. Det kan være flere grunner til dette. En av dem kan være at det ligger mer

sikkerhet i beregningene for skjærkapasitet. Dette vil være naturlig ettersom det ligger mer usikkerhet i effekten av fiberen i forhold til effekten fra betongen og armeringen. En annen forklaring kan være at lengdearmeringen ikke er betraktet med i beregningene. Det kan tenkes at grunnen til dette er at det ligger sikkerhet i å ikke regne med lengdearmering. Beregnet skjærkapasitet for bjelkene av type C er større enn for bjelkene av type A og B. Dette er fordi effektiv tverrsnittshøyde er avgjørende i formlene for skjær, og denne høyden blir som kjent større i et uarmert tverrsnitt. Det er ikke mulig å si om dette stemmer i praksis da ingen av bjelkene oppnådde skjærbrudd. En siste forklaring kan være at heften mellom fiberen og betongen var sterkere enn antatt og bidro mer til skjærkapasiteten. Dette er en svakhet i formelen, eller en utydighet i forklaringen til hvilken høyde som skal brukes, siden det ikke er logisk at en bjelke med skjærarmering skal være svakere på skjær, enn en bjelke uten skjærarmering. I skjærformelen for bidraget fra betongen var det forklart hvilke høyde som skulle brukes ved armert og ved uarmert tverrsnitt. Dette er ikke forklart i skjærformelen for bidraget fra fiberen, derfor ble det antatt å bruke de samme høydene avhengig av armert eller uarmert tverrsnitt som fra skjærformlene for betongbidraget.

8.3 Armering

Armeringen i bjelkene ble for tettliggende i endene, siden det måtte bindes på forankring da den bestilte armeringen var feil. Mulige konsekvenser av dette kan være at betongen ikke ble fordelt ordentlig mellom og rundt armeringen, som kan føre til hulrom. Ettersom UHPFRCen kun inneholder fine partikler vil dette mest sannsynlig ikke være tilfelle. Det ble heller ikke observert noe begynnelse på brudd eller riss ved endene på bjelkene, som tyder på at betongen på tross av den tette armeringen klarte å fordele seg godt.

Det måtte også stampes manuelt da bruk av vibrator ikke var mulig på grunn av smale bjelker og tett armering. Stampingene kan ha hatt påvirkning på fiberorienteringen. Det ble forsøkt å fylle forskalingene fra den ene enden og la den flyte ut for å dra nytte av at fiberen orienterer seg med støperetningen. Dette lot seg kun gjøre til en viss grad, da betongen var nok så seig og ikke fløt ut uten tilføring av energi. Det ble derfor tilført energi ved å stampe i samme retning som flyten. Siden fiberen som benyttes er så liten, er det trolig at stampingen ikke har like stor innvirkning som den ville hatt på større fiber. Ved bruk av større fiber vil faren for å stampe fiberen til bunnen være større. Etter å ha studert bruddflatene på både prismene og bjelkene, kan det konkluderes med at fiberen har fordelt seg godt og for det meste var orientert med støperetningen. Figur 8-1 viser den jevne fiberfordelingen i bruddtverrsnittet til en av prismene. Det var ingen tydelige tegn på ujevn fordeling eller orientering ved visuell inspeksjon. Fiberene er små og antallet fiber i bruddflatene er høy, det kan derfor være vanskelig å fastslå god fordeling og orientering uten å nøyaktig telle fiberen. Dette var ikke mulig å gjøre da det er en svært tidskrevende prosess å telle så mange fibre, og muligens ikke mulig å gjøre uten å bruke noen form for bildeanalyseprogram.



Figur 8-1 Bruddflaten til en prisme etter testing [Eget bilde].

Forankringen på $\phi 8$, som egentlig skulle vært $\phi 12$ ser ut til å ikke ha påvirket bruddet på bjelkene. Siden armeringstengene kollapset sammen med betongen, tyder det på at forankringen holdt godt og at $\phi 8$ var tilstrekkelig.

8.4 Klassifisering

8.4.1 Flytmål, luftinnhold og densitet

Det ble observert litt variasjon i flytmålet for de forskjellige blandinger. De to siste blandinger i «støp 3» skilte seg ut fra de resterende blandinger i «støp 3». Flyten målt ved de to prøvestøpene var også noe lavere enn verdiene for «støp 3», sett bort ifra de to siste blandinger. Årsaken til dette skyldes mest sannsynlig forskjellig fuktinnhold i de forskjellige delmaterialene. Dette ble observert underveis i støpingen. Det har ikke blitt registrert noe sammenheng mellom støpenes flyteegenskaper og prøvestykkenes styrke ved trykk og nedbøyning.

Resultatene for både luftinnhold, fersk densitet og herdet densitet var jevne. Dette tyder på en stabil betong og en god støpemetode. Siden luftinnholdet var stabilt kan det konkluderes med at luftinnholdet ikke var en årsak til variasjonene i flytmålet.

I de to standardene NF P18-710 og -470 er det oppgitt to forskjellige nedre krav når det gjelder tørr densitet. Kravet er på mellom $2200/2300 \text{ kg/m}^3$ og 2800 kg/m^3 . Resultatene fra denne oppgaven er innenfor i det ene tilfelle, men ikke i det andre da målt densitet varierte fra $2246-2289 \text{ kg/m}^3$. Dette er en feil i standardene som bør rettes opp.

8.4.2 Støp, herdeforhold og trykkfasthet

Ved avforskaling ble det observert fine støp med jevne overflater med lite synlige porer og uregelmessigheter, som vist på Figur 8-2. Det kan da antas at prosedyrene var gode og ble utført riktig og ikke vil ha negativ virkning på resultatene av prøvestykkene.



Figur 8-2 Bjelkens overflate [Eget bilde]

Som forventet var det tydelig at herderegimet var avgjørende for betongens trykkfasthet. Terningen fra «støp 1» som ble herdet under 90°C i 2 døgn oppnådde høyest karakteristisk verdi på 147,3 MPa. Terningene fra «støp 2» som herdet ved 45°C i 12 døgn fikk karakteristisk trykkfasthet på 137,4 MPa. Fra dette støpet ble det også testet terninger som i tillegg herdet i 56 døgn i lufttemperatur. Disse terningene oppnådde en karakteristisk trykkfasthet på 144,6 MPa. Den samlede karakteristiske verdien beregnet for alle blandinger i «støp 3» ble på 137,4 MPa. Denne verdien er identisk med den fra «støp 2» og det kan derfor antas at prismene og bjelkene støpt i «støp 3» ville utviklet høyere styrke over tid. I «støp 2» ble det også undersøkt virkningen av å herde terningene i vannbad på 20°C i 28 døgn. Da ble karakteristisk trykkfasthet på 111,8 MPa. Ut ifra resultatene på «støp 2» ble det derfor besluttet at herderigime på 45°C i 5 døgn vil gi tilstrekkelig fasthet for «støp 3».

Terningen uten fiber hadde den laveste trykkfastheten på 102,1 MPa og størst variasjon i resultatene. Disse terningene har fulgt samme herderegime som resten av terningene i «støp 3». De viste eksplosiv oppførsel, som en kan se på Figur 8-3. Dette bekrefter teorien om at UHPFRC er et eksplosivt materiale og at fiberen sørger for at betongen blir duktil.



Figur 8-3 Bilde av betongterninger etter trykktesting (uten fiber til venstre, med fiber til høyre) [Eget bilde].

I følge standarden for UHPFRC skal karakteristisk trykkfasthet minimum være 145 MPa. Det er ikke spesifisert i standarden hvor lang herdetiden må være for å oppnå denne trykkfastheten. Betongen i denne oppgaven tilfredsstillte ikke dette kravet. Men ettersom herdetiden var såpass kort, ville den muligens oppnådd dette kravet etter lenger herdetid. På bakgrunn av dette og at oppgaven ikke omhandler utvikling av resept ble den likevel brukt. Resepten er også under utvikling ved UiA og testresultater fra denne oppgaven vil kunne brukes til videre utvikling og forskning.

8.5 Nedbøyningstest på prizmer

Resultatene fra 4-punkts nedbøyningstest er relativt jevne, med unntak av prizme 8 som skiller seg ut med større styrke. Den lineære delen av grafene er relativt like og det er denne delen av resultatet som benyttes til beregninger. Kravene for strekkeegenskapene i standarden er en $f_{ctk,el}$ på 6,0 MPa. Resultatet på 7,4 MPa tilfredsstillte dette kravet.

Resultatene fra 3-punkts nedbøyningstest hadde større variasjoner. Dette kan blant annet skyldes variasjon i innskæringsdybden. En annen årsak kan også være ulik orientering og fordeling av fiber i bruddtvversnittet. Som nevnt tidligere ble dette ikke undersøkt på annen måte enn ved visuell analyse og det var ingenting som tydet på ujevn fordeling og orientering. DIC-kameraet som ble brukt for å undersøke sprekkutviklingen i prismene ble ikke benyttet direkte til beregning av resultatene. Analysen fra kameraet ble derimot brukt til kontroll av dannelse og plassering av sprekke.

Fra begge nedbøyningstestene på prismene kommer det tydelig fram at fiberen gir restbøyestrekfasthet. Etter den lineære delen av grafene der sprekkdannelse begynner blir grafen ujevn og "hakkete". Disse ujevnhetene representerer at heften mellom betongen og fiberen, litt etter litt, svekkes og fiberen rives ut.

8.6 Beregning av σ - w -forhold

Løsningen for å definere σ_f -verdier ved bestemt sprekkbredde, som er nødvendig for å beregne fiberens bidrag til skjærkapasiteten definert i den franske standarden, var svært komplisert og uklare. Et flertall av kompliserte formler må utledes til to ligninger med to ukjente, σ_f og α_n , for så å behandles i et utregningsprogram. I denne oppgaven har Mathcad 15 blitt benyttet. Til tross for bruken av dataprogram til utregning ble dette en tung og tidskrevende arbeidsoppgave. Utregningene måtte gjøres i flere steg for hver prizme, gjennomsnittlig ble det omtrent 35 steg per prizme. For å minske arbeidsmengden ble det gjort en beslutning på å bruke steg på 40 μm , istedenfor på anbefalte 20 μm fra standarden. Utregningene skal ha blitt utført på korrekt måte og har blitt nøye undersøkt utallige ganger. Hvor korrekte eller virkelighetsnære resultater denne metoden gir er usikkert. Det er kun denne metoden som finnes i standarden og det er en viktig del av analysen av skjærkapasitetsberegningen, så det ble valgt å benytte metoden. Dette er ingen god praktisk løsning og med så mange steg og faktorer er det ekstremt lett å gjøre feil ved utregning.

På måten denne metoden er fremstilt i standarden, ser det ut som at resultatet for σ - w -forholdet skal gi en jevn kurve. Siden grafene fra nedbøyningstesten er ujevne og hakkete ble dette overført til den konstruerte kurven da kraften tilsvarende de forskjellige sprekkbreddene brukes i beregningen. Det ble derfor brukt regresjon for å oppnå en jevn kurve. Grunnen til at grafene er ujevne skyldes muligens nedbøyingsstyrt testprogram, som gjør at kraften synker i det sprekken blir større og

fibren blir dratt ut. Et kraftstyrt testprogram kunne mest sannsynlig resultere i en jevnere graf, men det hadde vært vanskeligere å styre testfarten som i standarden er bestemt til mm/min og ikke kraft/min.

I følge standarden skal det også bestemmes en gjennomsnittlig kurve og en karakteristisk kurve. Det er ikke oppført noen bestemt måte å utføre dette på. Skjærkapasitetsformelen for bidraget fra fibren inneholder en $\sigma_{Rd,f}$, i denne faktoren er integralet av funksjonen for den karakteristiske kurven integrert. Det ble forsøkt å lage en felles regresjon for alle kurvene som kunne brukes som funksjon i beregningen. Dette ga ikke så bra resultater da regresjonens toppunkt ikke var representativt for kurvene, så den tilhørende sprekkbredden ble stor i forhold til virkeligheten. Det ble derfor brukt en egendefinert metode for å oppnå et mer representativt resultat. Metoden gikk ut å beregne en $\sigma_{Rd,f}$ for hver prisme ved å bruke sprekkbredden tilsvarende den maksimale σ og funksjonen for regresjonen av hver prisme. Til slutt ble det beregnet en karakteristisk verdi for $\sigma_{Rd,f}$ basert på dette. Det er denne verdien som er blitt brukt i beregningen for skjærkapasitetsbidraget fra fibren.

8.7 Nedbøyingstets på bjelker

Noen av bjelkene var litt skjeve på grunn av skjev forskaling. Forskalingen som ble benyttet har vært brukt flere ganger av tidligere studenter og har blitt skrudd sammen og fra hverandre mange ganger, samt blitt utsatt for vann om deformasjoner. På grunn av økonomiske aspekter og tidsbegrensninger ble disse likevel brukt. I tillegg fikk opplagerne i testriggen tydelige deformasjoner på grunn av de store kraftpåkjenningene som måtte til for å oppnå brudd i bjelkene med lengdearmring. Dette er vurdert til å kunne ha påvirket resultatene noe. I hvor stor grad dette har påvirket resultatene har ikke vært mulig å undersøke på grunn av tid.

Nedbøyingstestene på bjelkene av type A, B og C ble filmet av DIC-kameraet. Fra analysen på kameraet er det tydelig at det oppsto skjærsprekker selv om alle bjelker kollapset ved momentbrudd. Bjelkene av type A og B fikk brudd på rundt samme kraft på 230 kN. Videoanalysen av bjelkene viser at bjelkene av type B har lavere skjærkapasitet enn A-bjelkene, da skjærsprekkeene er tydeligere og tøyningen mer konsentrert. Dette stemmer godt med beregningene for skjærkapasiteten. Det er ikke mulig å si noe om skjærkapasiteten til bjelkene av type C og D, da de kollapset ved momentbrudd uten å vise tegn til noe form for skjærsprekker. Dette var forventet siden lengdearmringen er hovedbidragsyteren for momentkapasiteten. Det kan derimot observeres at fibren bidrar noe til momentkapasiteten. Bjelkene med kun fiber nådde nesten dobbel kraft før brudd i forhold til bjelken uten fiber.

8.8 Sikkerhetsfaktor

I EC2 er det vanlig med en sikkerhetsfaktor for dimensjoneringsberegninger på rundt 2. Etter metoden benyttet i denne oppgaven ble sikkerhetsfaktoren for momentkapasiteten på 1,2. Dette er en lav sikkerhetsfaktor. Siden bjelkene ikke oppnådde skjærbrudd, er det ikke mulig å fastslå en sikkerhetsfaktor for skjærkapasitetsberegningene. Men ut ifra kraften der bruddet oppsto vil sikkerhetskraften i hvert fall være større enn 1,2 for A-bjelkene og større enn 1,4 for B-bjelkene.

8.9 Fiberorienteringsfaktor K

Opprinnelig var det ønskelig å finne en K-faktor ut ifra laboratorieforsøk, men etter litteraturstudien ble det klart at dette var for omfattende å få til på laboratoriet ved UiA. K-faktoren som ble brukt i dette prosjektet ble valgt ut fra teori fra den franske standarden samt forskningsartikler. Svakheten ved å velge en teoretisk K-faktor er at den beregnede skjærkapasiteten fra fiberen muligens ikke er riktig i forhold til den praktiske skjærkapasiteten. Ved valg av en annen verdi på K, ville det resultert i mindre teoretisk bidrag fra fiberen til skjærkapasiteten, ettersom K-verdien brukt i dette tilfellet er den som vil gi høyest beregnet skjærkapasitet.

Metoden for å finne K-faktor fremstår som noe tungvint og sløsing av materialer ettersom det skal støpes elementer i full størrelse for å skjære ut prismer til nedbøyningstest. Til tross for at metoden gir inntrykk av å være tungvinn, dyr og miljøfiendtlig er andres erfaringer fra større prosjekter som har utført og testet metoden positive. De mener metoden gir god innsikt i den faktiske effekten til fiberen. Hvis denne metoden for K-faktoren etter hvert blir benyttet mer og mer, vil det kanskje være mulig å opprette en database for forskjellige K-verdier for forskjellige elementtyper og forskjellige UHPFRC-betonger med ulike mengder og type fiber.

9. Konklusjon

For å beregne skjærkapasiteten til UHPFRC brukes summen av 3 forskjellige formler fra den franske standarden NF P18-710; en for betong, en for skjærarmoring, og en for fiber. For å kunne beregne fiberens bidrag til skjærkapasiteten er det nødvendig å utføre tester for å få ut verdier som skal inn i formlene, blant annet σ og w ved 3punkts-test, og K-faktor. Skjærberegningen er en krevende metode med flere beregninger, og standarden mangler noen retningslinjer, som gjør dimensjoneringen mer utfordrende. Ifølge dagens formler vil den beregnede skjærkapasiteten til en bjelke med lengdearmoring og skjærarmoring være lavere enn den beregnede kapasiteten til en bjelke armert med kun stålfiber. Dette er fordi det effektive tverrsnittet blir redusert i beregningene for bjelken med lengdearmoring. Det er heller ikke inkludert lengdearmoring i beregningen for skjærarmoring. Det ble ikke funnet noen formel eller retningslinjer for beregning av moment i den franske standarden, men ut fra testresultatene kan en anta at det er mulig å bruke momentberegning for vanlig betong etter EC2.

For å bestemme fiberorienteringsfaktor K er det nødvendig å utføre tester. Det skal støpes elementer som tilsvarer elementene som skal brukes i konstruksjonen, ut fra disse elementene skal det skjæres ut prismer i ulike vinkler. Deretter skal disse prismene testes, og sammenlignes med prismer støpt ut i prismeformer. Forholdet mellom resultatene fra de utskjærte prismene og de støpte prismene utgjør K-faktoren. Ifølge litteraturstudie er dette en metode som er representabel for fiberens bidrag til betongens strekkegenskaper.

σ - w -utregningene er den avgjørende faktoren for den beregnede skjærkapasiteten fra fiberen. Siden fiberen har det største bidraget til skjærkapasiteten blir disse utregningene svært viktige også for den totale beregnede skjærkapasitet.

Basert på forsøkene og beregnet skjærkapasitet er det mulig å konkludere med at sikkerhetsfaktoren for skjærberegningene for UHPFRC ligger på minimum 1,2. Det var ikke mulig å finne en endelig sikkerhetsfaktor, da bjelkene i forsøkene ikke kollapset på grunn av skjærkrefter.

I denne oppgaven var det ikke mulig å avgjøre hvor godt dimensjoneringsreglene om skjærkapasitet i standard NF P18-710 stemmer med praktiske laboratorieresultater, ettersom testbjelkene ikke kollapset ved skjærbrudd. Der er likevel mulig å dra noen konklusjoner ut fra forsøkene. Beregningsformelen for skjærkapasiteten fra fiberen stemmer mest sannsynlig ikke, siden den gir en høyere skjærkapasitet for bjelkene uten skjærarmoring, enn for bjelkene med skjærarmoring. Ut fra DIC-bildene kan en se at det oppsto høye tøyninger på grunn av skjær i bjelkene uten skjærarmoring, som kunne resultere i brudd ved en noe høyere momentkapasitet. Dette kan tyde på at sikkerhetsfaktoren for skjærkapasitet i UHPFRC er lavere enn sikkerhetsfaktoren for vanlig betong i EC2, og at den franske standarden har mer reelle beregninger for skjærkapasitet.

10. Anbefalinger

Det er flere anbefalinger til videre arbeid og forbedring som er verdt å nevne etter å ha utført forsøkene og beregningene i denne oppgaven.

En av de største utfordringene var beregning av skjærkapasiteten. Som nevnt i diskusjonen var det en avansert og tidkrevende metode, i tillegg til at den ga usikre resultater. Hvis UHPFRC skal brukes i Norge i fremtiden er det en stor fordel å ha en mer brukervennlig standard, altså med enklere, mer tydelig og mer tidseffektiv metode for skjærberegninger. Utvikling av et dataverktøy til hjelp med disse beregningene vil også gi store fordeler ved dimensjonering av UHPFRC.

I forsøkene utført i forbindelse med denne oppgaven, har det vært begrensninger på grunn av tilgang til testmaskiner og forskaling. Siden bjelkene ikke kollapset på skjær ble det ikke mulig å få en full analyse av skjærberegningene. Ved bruk av testmaskin med større kapasitet vil det være mulig å dimensjonere bjelker med større tverrsnitt og større andel lengdearmring, som kan gi mulighet for å øke momentkapasiteten betraktelig. Det vil da være mulig å oppnå kollaps ved skjærbrudd. Det ville vært interessant å utføre disse forsøkene igjen i større dimensjoner. Da ville det også vært mulig å teste om lengdearmringa påvirker skjærkapasiteten, til tross for at effekten fra den ikke er inkludert i beregningene.

Ettersom det kun ble brukt én type fiberarmring kan det også være av interesse å gjennomføre identiske laboratorieforsøk, men med ulik størrelse på fiberen, og se hvordan dette vil påvirke skjærkapasiteten.

Referanse

- [1] J. Resplendino, «Introduction: What is UHPFRC?,» i *Designing and building with UHPFRC*, Wiley, 2013, p. Chapter 1.
- [2] Forskningsrådet, «Forskningsrådet,» Forskningsrådet, 2017. [Internett]. Available: <https://www.forskningsradet.no/prosjektbanken/#/project/NFR/269593/Sprak=en>. [Funnet April 2018].
- [3] Ductal, «Ductal,» Ductal, Juli 2016. [Internett]. Available: <https://www.ductal.com/en/mucem-when-aesthetic-and-mechanical-performances-are-brought-together>. [Funnet April 2018].
- [4] Norsk Betongforenings miljøkomite, «Norsk Betongforening,» November 2008. [Internett]. Available: https://fabeko.no/assets/CO2_rapport-2009-02.pdf. [Funnet Februar 2018].
- [5] ULCOS, «GLOBAL CCS INSTITUTE,» GLOBAL CCS INSTITUTE, August 2013. [Internett]. Available: <https://www.globalccsinstitute.com/insights/authors/dennisvanpuyvelde/2013/08/23/ccs-iron-and-steel-production>. [Funnet Februar 2018].
- [6] CANZAC, «CANZAC,» CANZAC, 2018. [Internett]. Available: <http://www.canzac.com/knowledge-centre/steel-fibres-advantages-and-disadvantages/>. [Funnet Februar 2018].
- [7] M. B. Eide og J.-M. Hisdal, «Coinweb,» 2012. [Internett]. Available: https://www.sintefbok.no/book/download/1068/vinfopubutgivelsercoincoin_proje ct_reportscoin_report_no_44nettcoin-no44pdf. [Funnet Februar 2018].
- [8] *French standard NF P18-470*, Afnor, 2016.
- [9] «Toa corporation,» 2010. [Internett]. Available: <https://www.toa-const.co.jp/eng/works/list104/>. [Funnet April 2018].
- [10] M. B. Eide og J.-M. Hisdal, «Coinweb,» 2012. [Internett]. Available: http://sintefbok.no/book/index/1068/ultra_high_performance_fibre_reinforced_concrete_uhpfrc_state_of_the_art?gclid=CjwKCAiAz-7UBRBAEiwAVrz-9d03jtrWtFR-TIWca5Ej024U8DuOz87KjUZ8Lj-AFAVGu9Dh9W4WxRoCn90QAvD_BwE. [Funnet Januar 2018].
- [11] P. R. Prem, A. R. Murthy og B. Bharatkumar, «Researchgate,» Februar 2015. [Internett]. Available: https://www.researchgate.net/profile/B_Bharatkumar/publication/276427421_Influence_of_curing_regime_and_steel_fibres_on_the_mechanical_properties_of_UHPC/links/5613570d08aec7900afb2651.pdf. [Funnet Februar 2018].
- [12] Norcem, «Norcem,» [Internett]. Available: https://www.norcem.no/no/system/files_force/assets/document/bb/11/herdeteknologi_lav.pdf?download=1. [Funnet Februar 2018].
- [13] Federal Highway Administration, «Federal Highway Administration,» August 2006. [Internett]. Available:

- <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/06103/06103.pdf>. [Funnet Februar 2018].
- [14] Federal Highway Administration, «Federal Highway Administration,» Juni 2013. [Internett]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/13060.pdf>. [Funnet Februar 2018].
- [15] G. L. Balázs, «A historical Review of Shear,» i *Shear and punching shear in RC and FRC elements*, Fib, 2010, pp. 1-13.
- [16] Fib, «Preface,» i *Shear and punching shear in RC and FRC elements*, Salò, Fib, 2010, p. iii.
- [17] *French standard NF P18-710*, Afnor, 2016.
- [18] F. Laranjeira, S. Grünwald, J. Walraven, C. Blom, C. Molins og A. Aguado, «Springerlink,» Juni 2010. [Internett]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1617%2Fs11527-010-9686-5.pdf>. [Funnet Februar 2018].
- [19] R. Gettu, D. R. Gardner, H. Saldívar og B. E. Barragán, «Springerlink,» Juli 2004. [Internett]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF02480572.pdf>. [Funnet Mars 2018].
- [20] A. Simon, D. Corvez og P. Marchand, «Feedback of a ten years assessment of fiber distribution using K factor concept,» RILEM-fib-AFGC, 2013.
- [21] RILEM, «RILEM,» Juni 2002. [Internett]. Available: <https://www.rilem.net/images/publis/1337.pdf>. [Funnet Mars 2018].
- [22] J. Batoz og M. Behloul, «UHPFRC development: experience with Ductal over the past two decades,» i *Designing and building with UHPFRC*, Wiley, 2013, p. Chapter 4.
- [23] A. Cladera og A. R. Marí, «Shear strength in the new Eurocode 2. A step forward?,» Fib, 2007.
- [24] Ø. Grøstad og E. Sandberg, «Utforskning av teori om UHPC,» 2017.
- [25] L. F. M. Duque og B. Graybeal, «Springerlink,» Juni 2016. [Internett]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1617%2Fs11527-016-0914-5.pdf>. [Funnet Mars 2018].
- [26] *Eurocode 2: prosjektering av betongkonstruksjoner*, Standard Norge, 2008.

Vedlegg

Vedlegg A Sikkerhetsblader

SX-N

Sikkerhetsdatablad

DYNAMON SX-N

Sikkerhetsdatablad 13/9/2017, Revisjon 4

AVSNITT 1: Identifikasjon av stoffet/stoffblandingen og av selskapet/foretaket

1.1. Produktidentifikator

Handelsnavn: DYNAMON SX-N

1.2. Relevante identifiserte bruksområder for stoffet eller stoffblandingen og bruk som frarådes

Anbefalt bruk:

Tilsetningsstoff for betong.

Frarådet bruk:

==

1.3. Opplysninger om leverandøren av sikkerhetsdata bladet Leverandør.

Mapei AS - Vallsetveien 6

2120 Sagstua - Norway

Kvalifisert person ansvarlig for sikkerhetsdatabladene:

sicurezza@mapei.it

1.4. Nødtelefonnummer

MAPEI AS - telefon: +47-62972000

fax: +47-62972099

www.mapei.no (Kontortid)

Giftinformasjonen – Telefon: +47 22591300

AVSNITT 2: Fareidentifikasjon

2.1. Klassifisering av stoffet eller stoffblandingen

Kriterier iflg. CLP-forordningen (EF) nr. 1272/2008:

Produktet regnes ikke som farlig i overensstemmelse med Reguleringen EU 1272/2008 (CLP).

Uheldige fysiske og kjemiske virkninger på menneskelig helse og på miljøet:

Ingen andre farer

2.2. Merkingselementer

Symboler/tegn

Ingen

Fareindikasjoner:

Ingen

Forholdsregler:

Ingen

Særlige bestemmelser:

Ingen

Produktet regnes ikke som farlig i overensstemmelse med Reguleringen EU 1272/2008 (CLP).

Spesialtiltak i henhold til vedlegg XVII av REACH og påfølgende endringer:

Ingen

2.3. Andre farer

9021955_NRE/4

Side n: 1 av 7

Sikkerhetsdatablad

DYNAMON SX-N

vPvB stoffer: Ingen - PBT stoffer: Ingen

Andre farer:

Ingen andre farer

AVSNITT 3: Sammensetning / opplysninger om bestanddeler

3.1. Stoffer

N.A.

3.2. Stoffblandinger

Farlige stoffer i henhold til CLP-regulering og tilhørende klassifisering:

Ingen

AVSNITT 4: Førstehjelpstiltak

4.1. Beskrivelse av førstehjelpstiltak

Ved hudkontakt:

Vask umiddelbart med såpe og vann.

Ved øyekontakt:

Får man stoffet i øynene; skyll straks grundig med store mengder vann og kontakt lege.

Vask umiddelbart med vann i minst 10 minutter.

Ved svelging:

Oppkast må absolutt ikke fremfroses. HENVEND DEG STRAKS TIL LEGE.

Det er mulig å gi aktiv kull dyppet i vann eller medisinsk mineral vaselinolje.

Skyll munnen godt og drikk mye vann. Dersom det oppstår ubehag, kontakt lege umiddelbart og vis dette sikkerhetsdatabladet.

Ved innånding:

Flytt den forulykkede ut i frisk luft, hold vedkommende varm og i hvile.

4.2. De viktigste symptomene og virkningene, både akutte og forsinkede

Ingen fare forbundet med normal bruk.

4.3. Angivelse av om umiddelbar legehjelp og spesialbehandling er nødvendig

Behandling:

(se avsnitt 4.1)

AVSNITT 5: Brannslukkingstiltak

5.1. Slukkingsmidler

Egnet slukkeutstyr:

Vann.

CO2 eller pulverapparat

Slukkemidler som ikke må brukes av sikkerhetshensyn:

Ingen spesielle.

5.2. Særlige farer knyttet til stoffet eller stoffb landingen Produktet er ikke brannfarlig.

Ikke pust inn eksplosjons- eller forbrenningsgasser.

Røyken som oppstår under en brann kan inneholde de opprinnelige ingrediensene eller andre ikke-identifiserte giftige og/eller irriterende komponenter.

5.3. Råd til brannmannskaper

Bruk egnet pusteutstyr.

Samle opp tilsølt slukkevann separat. Dette vannet må ikke skylles ut i sluk eller lignende. Flytt uskadete beholdere fra umiddelbart farlig område hvis dette lar seg gjøre uten sikkerhetsrisiko.

AVSNITT 6: Tiltak ved utilsiktede utslipp

6.1. Personlige forsiktighetsregler, personlig verneutstyr og nødrutiner

9021955_NRE/4

Side n: 2 av 7

H-setninger: Ingen

P-setninger: Ingen

3. Opplysninger om kjemisk sammensetning

	CAS nr.	EINECS nr.	% w/w
Silisiumdioksid (amorf)	69012-64-2	273-761-1	100

Produktet kan inneholde små mengder krystallinsk kvarts (< 0,5 %).

Mengde respirabel krystallinsk silika (RKS) i produktet er under 0,1 %.

© COPYRIGHT ELKEM AS 2016

501/PSI/NOR

Rev. 01, 2016-11-14

Side 1 av 4

4. Førstehjelpstiltak

Innånding:	Fjern vedkommende person fra det støvete området. Frisk luft.
Hudkontakt:	Vask med såpe og vann.
Øyekontakt:	Skyll med vann/øyeskyllevæske. Kontakt lege ved vedvarende ubehag.
Svelging:	Ikke relevant.

5. Tiltak ved brannslukking

Produktet er ikke brennbart, og støvet medfører ingen fare for eksplosjon.

Slukningsmidler: Ikke relevant.

6. Tiltak ved utilsiktet utslipp

Unngå innånding av støv. Søl samles i egnede beholdere.

7. Håndtering og oppbevaring

Håndtering: Unngå arbeidsoperasjoner som medfører støving. Se seksjon 8.

Oppbevaring: Oppbevares adskilt fra flussyre (HF). Bør ikke lagres ved temperatur i nærheten av eller under 0 C.

8. Eksponeringskontroll og personlig verneutstyr

A. Yrkeshygienisk eksponeringskontroll

Unngå innånding av støv. Sørg for god ventilasjon under bruk. Bruk CE-merket åndedrettsvern med støvfilter iht. NS-EN 149 FFP 2S/3S eller tilsvarende i områder med utilstrekkelig ventilasjon. Bruk vernehansker og øyevern. Vann/øyeskyllevæske må være tilgjengelig.



Forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier § 5-1. Vedlegg 1: Grenseverdier og tiltaksverdier for forurensninger i arbeidsatmosfæren (2013):

Stoff	CAS-nr.	ppm	mg/m³	Anm.
Amorf silisiumdioksid		-	1,5**	
-kvarts	14808-60-7	-	0,3*/0,1**	K
Tridymitt	15468-32-3	-	0,15*/0,05**	K
Kristobalitt	14464-46-1	-	0,15*/0,05**	K

*Totalstøv

**Respirabelt støv

Fortsetter neste side

B. Eksponeringskontroll (grenseverdi); ytre miljø

Grenseverdier for utendørs luft (FOR 2004-06-01 nr 931: Forskrift om begrensning av forurensning (forurensningsforskriften)).

Svevestøv	Midlingstid	Grenseverdi	Dato for oppnåelse av grenseverdi
PM ₁₀ ★	1 døgn	50 g/m ³	
PM ₁₀	Kalenderår	40 g/m	
PM _{2,5}	Kalenderår	25 µg/m ³	
PM _{2,5}	Kalenderår	20 µg/m ³	1. januar 2020

★ Døgnmiddelet må ikke overskrides mer enn 35 ganger per kalenderår.

9. Fysiske og kjemiske egenskaper

Utseende:	Ultrafint amorft pulver (respirabelt støv), danner agglomerater.
Farge:	Grått
Lukt:	Ingen
Smeltepunkt (C):	1550-1570
Oppløslighet (vann):	Uløselig/tungt løselig
Oppløslighet (organiske løsemidler):	Uløselig/tungt løselig
Egenvekt (vann=l):	2,2-2,3
Bulktetthet (kg/m ³) ca. :	150-700
Spesifikk overflate (m ² /g):	15-30
Partikkelstørrelse, gjennomsnitt (m):	0,15 (ca. 80 vekt % av primærpartiklene har diameter < 5 m).

10. Stabilitet og reaktivitet

Forhold som må unngås: Se nedenfor.

Stoffer som må unngås: Flussyre (HF)

Farlige reaksjonsprodukter:

Microsilica reagerer med flussyre (HF) og danner den giftige gassen silisiumtetrafluorid (SiF₄). Oppvarming av microsilica over 1000 C kan resultere i dannelse av krystallinske SiO₂-modifikasjoner som kristobalitt / tridymitt som kan forårsake lungefibrose.

11. Opplysninger om helsefare

Produktet oppfyller ikke kriteriene for fareklassifisering iht. Forskrift om klassifisering, merking og emballering av stoffer og stoffblandinger (CLP, FOR -2012-06-16-622).

Akutte effekter:

SVELGING: Finfordelt støv kan irritere og virke uttørrende på slimhinner.

INNÅNDING: Finfordelt støv kan irritere og virke uttørrende på slimhinner.

HUDKONTAKT: Finfordelt støv kan irritere og virke uttørrende.

ØYNE: Finfordelt støv kan irritere og virke uttørrende.

Kroniske effekter:

Innånding av støv fra produktet antas å medføre minimal risiko for silikose (lungefibrose), men kronisk obstruktiv lungesykdom er mistenkt ved eksponering over lang tid (år) for konsentrasjoner over administrativ norm.

12. Opplysninger om miljøfare

Produktet er ikke karakterisert som miljøfarlig.

MOBILITET: Produktet er lite mobilt ved normale miljøforhold.

NEDBRYTBARHET: Ikke relevant for uorganiske forbindelser.

BIOAKKUMULERING: Ikke relevant.

ØKOTOKSISITET:

Produktet oppfyller ikke kriteriene for fareklassifisering iht. Forskrift om klassifisering, merking og emballering av stoffer og stoffblandinger (CLP, FOR -2012-06-16-622)

13. Fjerning av rester og avfall

Materialet resirkuleres der dette er mulig.

Produktet er ikke klassifisert som farlig avfall i henhold til Kapittel 11 i "Avfallsforskriften" (FOR 2004-06-01 nr 930: Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall, MD (Miljøverndepartementet)).

Rester og avfall deponeres ellers etter gjeldende regelverk og etter avtale med lokale myndigheter.

14. Opplysninger om transport

UN	-
IMDG/IMO	Ikke klassifiseringspliktig
ADR/RID	Ikke klassifiseringspliktig
ICAO/IATA	Ikke klassifiseringspliktig

15. Opplysninger om lover og forskrifter

Denne produktsikkerhetsinformasjonen er utarbeidet i samsvar med:

- Forskrift om registrering, vurdering, godkjenning og begrensning av kjemikalier (REACH), Arbeids- og inkluderingsdepartementet, Justis- og politidepartementet og Miljøverndepartementet, 2008 med senere tilpasninger.
- Forskrift om klassifisering, merking og emballering av stoffer og stoffblandinger (CLP, FOR-2012-06-16-622).

16. Andre opplysninger av betydning for brukerens sikkerhet og helse

I henhold til FNs globaliserte harmoniserte system for klassifisering og merking av kjemikalier (GHS), kapittel 1.5.2. og Forordning EF 1272/2008 (CLP), Artikkel 58(2)(a) og 59(2)(b) (som endrer REACH Artikkel 31(1)) kreves det sikkerhetsdatablad (SDS) bare for stoffer og stoffblandinger som møter de harmoniserte fareklassifiseringskriteriene for fysisk fare, helsefare og miljøfare. Da dette produktet ikke oppfyller disse kriteriene, er det ikke utarbeidet et SDS i henhold til (EU) 2015/830. Relevant informasjon om helse, miljø og sikkerhet er i stedet gitt ved denne produksikkerhetsinformasjonen (PSI).

REACH artikkel 31 (7) krever at relevante eksponeringsscenarier fra "Rapport om kjemikaliesikkerhet" (CSR) skal vedlegges stoffets eller stoffblandningens SDS. Imidlertid kreves slik informasjon (Ref. REACH vedlegg I, kapittel 0 (Introduction), avsnitt 0.6 nr. 4 og 5) bare for fareklassifiserte produkter. Ettersom dette produktet ikke er fareklassifisert iht. CLP-kriteriene, faller også kravet om eksponeringsscenarier bort.

Endringer fra versjon 00 til 01: generisk e-post adresse, oppdatert link til svartjenesten, fjernet referanse til utdatert regelverk i seksjon 2, 11, 12, 15, referanse til (EU) 2015/830. Legal disclaimer fjernet.

Elkem Microsilica[®] er et registrert varemer

Vedlegg B: Veiledningsmøte referater

Dato: 16.01.2018	Sted: Universitetet i Agder
Til stede:	Tonje, Piotr, Svava, Rein Terje, Ingrid, Anette, Paul
Saker:	
Hvilken målgruppe skal rapporten skrives for?	Felles studenter (master, bygg), henvise til standarden men ha med basic teori, selv om det er allment kjent (trykkfasthet er hva, densitet er hva?)
Bør vi dimensjonere bjelker med, eller uten skjærarmering?	Kan vurderes for å utvide oppgaven. (De bjelkene som Bjørn bruker, de kan knekkes, har bøylearmering og lengdearmering). Vet ikke hvor mye sikkerhet den franske standarden inneholder - regner med det er det samme, på 3, kanskje litt mindre.
Hva vil det si at "d" i formelen for skjærkapasitet for betong i NF P18-710 går fra "the most compressed fiber"?	Oversiden av bjelken/toppunktet? Mest trykk i overkant av bjelken, og der ligger det også mest fiber → vanlig "d"
K - orienteringsfaktor, har dere noen tips til hvordan vi kan finne denne faktoren?	
Har dere tips til hvordan vi kan finne w_u ?	"Ultimae crack opening", mest sannsynlig en test, må finne ut hvilken test. Lage en blanding, med f.eks. 15 tester, og ta gjennomsnittet
Hva slags fiber har vi tilgang til?	Må bestilles (via Paul)
Annet	Bruke Øystein og Espen sin resept fra forrige semester, bli med dem på første støpinga for at det skal bli riktig. De brukte de små fibrene, men mulig å bestille andre fiber

MÅ FORSIKRE OSS OM AT ALLE ER KLAR OVER AT
VI MÅ FÅ STØPE NÅR VI HAR MULIGHET PGA
MEKATRONIKKLABEN

Lage en mal til planlegging for alle innenfor lab -
Svava

2 ganger på mekatronikklaben og en gang på
østerhus - mest ideelt for å få nok data til å levere
inn en A-oppgave

15 bjelker per støp (helst 24), 6 kun fiber, 6 fiber
m/armering, 3 uten noe.. Evt. færre, men med
skjærarmring

ENDRING: 3 uten noe

Dato: 30.01.2018	Sted: Universitetet i Agder
Til stede:	Tonje, Svava, Piotr, Rein Terje, Ingrid
Saker:	
Oppdatering om mail til han bak de franske standardene.	Mailen ble komponert i samarbeid og sendt under møtet
Kan vi få en eksisterende UHPFRC resept?	Øystein og Espen sin (får flere prøveresultater da). Standardiserer noen mål på prismene, må ikke få for lite tverrsnittsmål pga fiberen. Må ta prøveblanding med resepten, prøve med lengre fiber. Må ha spennlengde på 40, hvis ikke blir den ikke knekt. <u>Utgangspunkt i standarden, men modifisert</u>
Har dere noen tips om hvordan momentkapasiteten til UHPC skal beregnes, eller hvor vi eventuelt kan finne info om dette?	Droppe partialfaktorere (tøyning på UHPC og tøyning på stålet)? Bare sette tik 1. Skal stå i NF P18-710? Øystein og Espen har resultatene sine for trykkfasthet og E-modul osv?
Har dere tilgang til NF P18-451?	Spør i mailen til Toutlemonde
Skal vi ta med fiber i beregningen av moment?	Kan se bort fra det, hvertfall når man tar med armering. Men med kun fiber må man ta det med(?).
Prismer herding	45 grader i vannbad i en uke. Skal egentlig stå i 28 dager. Klarer å få de store bassengene opp til 90 grader, pakker inn i glava e.n.? Må herdes på samme måte. 45 grader i 7 døgn Kjøre 2 blandemaskiner parallelt
Forskerspørsmålet	Korte ned på spørsmålet, kutte siste del og heller ta det med som begrensninger. Flytte "om skjærkapasitet" foran? "Hvordan beregnes skjærkapasitet...?"?? "Varierende armering" - må være mer konkret, kanskje flytte "ulike armeringsmengder og -typer" dit? "Hvordan påvirker ulike faktorer i skjærkapasitetsberegningene størrelsen til

	<p>sikkerhetsfaktoren?" - gjøre litt enklere, kommer litt utydelig frem hva vi mener</p> <p>Dele opp "Hvordan bestemme fiber..." i to. "Hvordan påvirker fiberorientering.."?"</p>
Oppdatering om K-faktor	
Annet:	<p>Overdekning for UHPC er mindre enn for vanlig(?)</p> <p>Hvis det blir et problem, så kutter vi det, og skriver det ned i rapporte, f.eks. Hvis vi å kutte overdekninga ned til 15</p> <p>Lage ekstra terninger, ta ut etter 2, 7, 14 og 28 døgn for å undersøke utviklinga</p>

Dato: 20.02.2018	Sted: Universitetet i Agder
Til stede:	Tonje, Svava, Piotr, Rein Terje, Ingrid, Anette, Paul
Saker:	
Referanseressept uten fiber	Bare ta ut fiberen og bruke samme resept
Ny støpeplan (delt opp det store støpet)	Må teste alt ved like lang tidsavstand, og ha terninger og prizmer testet under samme herderegime
Tilgang til lab skjærtorsdag	Ja, med lånekort
Fravær gruppeveiledning 20.03	
Mengde materialer: Har regnet ut ca mengde, men vil få bekreftet at dette er greit	Godkjent
Annet	Huske å gi beskjed om at det blir eksplosivt ved referansebjelken, mye spenning i UHPC-bjelke, sprøtt brudd

Dato: 27.02.2018	Sted: Universitetet i Agder
Til stede:	Tonje, Piotr, Svava, Rein Terje, Anette
Saker:	
Kan vi la bjelkene ligge i vannbad i 14 dager? pga påsken	Ja, bare huske å ha lik behandling på alle
Du snakket om momentlikevekt i tverrsnittet og bjelken for å finne sigma kan du vise hva du tenkte på ?	
Det finnes tre forskjellige tilfeller hvor man beregner spenninger i tverrsnittet: før første riss etter første riss og ved brudd. Før risset bruker man hooks lov vet du hvordan man beregner de to andre tilfellene?	<p>Ren geometri, så lenge materialet henger sammen... spenningen henge sammen med nøytralaksen, finner maksimalspenningen i ytterste fiber...</p> <p>Står det gitt hvordan man skal anta at spenningen skal bli? Står et eksempel</p> <p>NB-publikasjon om fiberfordeling i Norge(?) - konstruktiv bruk av fiber (38?), er ikke kommet ut enda, men kan få tak i de kapitlene som er ferdig skrevet (2, 3 og 4, fra sept. 2015). Finnes 2 PhD om dette, mulig å få tak i.</p> <p>Ta kontakt med Terje Kanstad, har mye greie på dette</p>
Klassifisering i metode eller teori?	krav /ulike klasser i teori, mens metoden for å gjøre det i metode, og resultater i resultater
Annet	Ta med i metodekapittelet at vi samarbeider med en annen gruppe

Dato: 13.03.2018	Sted: Universitetet i Agder
Til stede:	Tonje, Piotr, Svava, Rein Terje, Ingrid, Anette
Saker:	
Er filler bestilt? Når ankommer den?	Skal bli gjort
Kamerautfordringer ved 3-punktstest: teiper fast platene, så det kommer teip på overflaten som skal filmes. Mulig å fokusere kameraet mellom teipene, ettersom det er området vi er interessert i?	Skal gå fint. Skal utføre tester på 6 prismer m/notch. Tar et bilde per sekund istedenfor 5 bilder per sekund. Ekstensometer mot kamera - nytt kapittel i rapporten
Doktor-rapport til Elena Sarmiento Vidal	Har tilgang til doktoravhandlingen hennes, ligger per dags dato hos Espen og Øystein. Venter på excel-program for beregning fra Terje Kanstad. Sende en ny mail ila torsdagen for å høre om han har fått tak i programmet.
Momentkapasitet med fiber	Letteste måten: Se bort i fra strekkapasiteten til UHPFRC for å være på den sikre siden.
Omregning fra kraft over sprekk til spenning over sprekk	Trenger en matematisk funksjonsuttrykk av spenningen i forhold til sprekk Måle sprekk oppover for å få en funksjon? Via programmet(kameraet) Plotter inn punktene: posisjon mot åpning, vil gi oss et funksjonsuttrykk som kan integreres Antar jevn fordeling av fiber i tverrsnittet. Må telle fiberen. Kan legge prismet på kopimaskinen på en overheadfoil. Deler tverrsnittet i ruter, teller noen ruter og ser om antallet er ca likt i de rutene og gjør deretter en antakelse om likt antall fiber i alle rutene. Dette gir oss stålmengde (har også fasthet og areal og kjenner forlengelsen av fiberen (=sprekk lengden?)) Regner med at de er elastiske og har god heft (nokså trygg antakelse). Tar en antakelse ut fra det om at fiberen fortsatt er i elastisk sone Antar at den sitter til den glipper, altså ikke noe

	<p>glidning</p> <p>Antar derfor at sprekkåpning er lik forlengelse av fiberen ->hooks lov</p> <p>Siden fiberen rives ut (ikke ryker) antar vi elastisk sone.</p> <p>Excel regresjon</p>
<p>Forskjell på trykkfasthet ved 7 dager i 45 grader i forhold til 3 dager i 90 grader</p>	<p>Helt normalt, kan fortsatt si at det er en UHPFRC.</p> <p>Pga den praktiske kapasiteten til varmeskapene vi har tilgang til er det ikke mulig.</p> <p>Materialet vi har er UHPFRC, men prismene vi har utført tester på er ikke ferdig modne. Bare si hva vi gjør.</p> <p>Når de testa fikk de best bøyestrekfasthet på 45 grader og best trykkfasthet på 90 grader.</p> <p>Skrive i rapporten at vi har laga en UHPFRC som tilfredsstillter kravene ved 90 grader, men at prismene er testa ved 45 grader. Mulig vi ikke har et problem, hvis terninger med 28 dagers herdetid tilfredsstillter kravene.</p>
<p>Annet</p>	<p>Får man ikke noe helt til etter standarden er det bare å beskrive/forklare det i rapporten.</p> <p>E-modul til stålfiberen er oppgitt i datablad, som kan søkes opp på internett.</p>

Dato: 08.05.2018	Sted: Universitetet i Agder
Til stede:	Tonje, Piotr, Svava, Paul, Anette
Saker:	
Grafer: er det greit å vise at den går fra null, men "sladde" første delen? For å slippe å ha unødvendig store/lange figurer.	Ja
Vedlegg: er det ok å ha excel-dokumentet som pdf-vedlegg i tillegg til selve fila som vedlegg?	Presisere at det er pdf-versjon av excel-vedlegg
Kraft som tilsvarer den verdien når grafen slutter å være lineær, når slutter graden å være lineær?	Den er lineær etter første sprekk... bruker man verdien ved første sprekk vil vi mest sannsynlig få en lavere spenning/strekkfasthet/sigma enn minimumskravet
Beregningsresultater (moment og skjær og slikt for å beregne bjelkene), men hvor legger man beregningene (Katalin)?	Resultat: vi velger å vise en beregning av en bjelke for å vise hvordan vi har kommet frem til resultatene våre, resten av resultatene er gitt i tabell/graf blabla, mens komplette beregninger ligger i vedlegg

Dato: 16.05.2018	Sted: Universitetet i Agder
Til stede:	Tonje, Piotr, Svava, Ingrid, Anette og Katalin
Saker:	
Hvor skal vi legge inn feilen med armeringen?	“Resultatet i resultatet, men siden armeringen ble feil ble det gjort endringer som forklares i metode”, setter konsekvensene av dette inn i diskusjon
“Denne oppgaven er skrevet av studenter ved UiA for UiA ... pga behov for forskning på UHPFRC” i innledning? I begynnelsen eller slutt? Eller i forord?	I forord, Ta med Meerc i forord
Mathcad	Det er ikke mulig å få ut utregningene i tabeller for å kunne bruke dem til neste steg.
Bøyer på utsia opplager, skjærberegning (vi tror det ikke har noe å si, men lurer på om det finnes en kilde på dette)	Bøylene vil ikke ha noe å si på skjærkapasitet ifølge Katalin, vi kan bruke kun to bøyer i beregningen. Ut ifra skjærdiagrammet ser vi at det ikke er krefter der
Vedlegg NF	ikke lov å legge med mest sannsynlig
Annet	Anbefaling: fikse et annet program for utregninger så det ikke blir så tungvint? Dårlig utregnings”oppskrift”, for avansert, og gir mest sannsynlig ikke så korrekte/bra resultater Generell teori er ok, men iterasjonen er ikke så bra (iterasjon skal gå litt fram og tilbake, mens denne går kun fremover). Er ikke en løsning for eurokode, er for dårlig mtp praksis Blanding av teori (mekanikk) og empirisk og numerisk data?

Dato: 29.05.2018	Sted: Universitetet i Agder
Til stede:	Tonje, Piotr, Svava, Ingrid, Anette
Saker:	
Datablad til delmaterialene? (sement, finfiller, mellomfiller, flyveaske, fiber, sp-stoff, microsilica)	Uia.no → søke ecoonline → institutt for naturvitenskapelige fag, universitetet i agder → ecoonline
Delspørsmål om fiberorienteringsfaktoren K sin påvirkning på skjærkapasiteten? Bytte ut K med σ_w ?	Ja, men kalle det for navnene, ikke symboler
Ok å ha med hvilke bjelker vi skal støpe i både "Case" og "Metode"?	Ja
Er kapittel "Case" ok? Eller trengs det mer spesifisering/utdypning? Om prismer? spenning?	Ikke bare den teoretiske skjærkapasiteten, men også den praktiske. Forklare hva armeringstilfeller er, eller bruke et annet ord? Armeringskombinasjoner. Referere til 5.2.2 i 5.2.1 Utviklet gjennom et forprosjekt, og referere til forprosjekter, istedenfor medstudenter Kanskje skrive ned hva er UHPFRC Ellers ok
Skjærmomentsprekker? Hva heter det?	
Skal teorien om K-faktoren gjentas i diskusjon? Må man ha diskutert alt som blir sagt i konklusjon?	Kort hva K-faktoren er/gjør/representerer, kommentere at det er en svakhet at vi ikke har fått testa ut hvilken K-faktor som skal brukes. Hva ville konsekvensen av en annen K-faktor vært? Hva påvirker faktoren? Konklusjon ut fra diskusjonen
Har vi riktig konklusjon ang. fiberens bidrag til skjærkapasiteten?	Høre med Katalin om hun har kommentarer Huske å kommentere at det var A og B som ble testet for skjær. Spørsmål vi har etter utført prosjekt; skal det regnes ut med kun skjær? Burde det være en egen formel for det?

<p>Kommentar på vedlegg? Har de i ulike mapper. Skal alle være i mapper, eller kun mathcad-, excel-, og videofiler?</p>	<p>Høre med Paul</p>
<p>Kap. 3.7, skal det være med noe sted? Er det i resultater?</p>	<p>I teori: ha kort om at det er nødvendig med en K-faktor. Og kort hva K-faktor er.</p> <p>Hører egentlig til resultater</p>
<p>Avgrensinger</p>	<p>Legge inn at det er ikke blir testa ut med kun vanlig armering og uten fiber?</p> <p>Endre setning med "begrenset tid" i første avgrensing?</p>
<p>Tittel, samme som på vitnemålet?</p>	<p>Opp til oss, men bør være det samme</p>
<p>Kameraet, hva heter det? Kort forklaring på det</p>	<p>DIC (digital Image Correlation)</p> <p>Kalibreres først for å finne avstand mellom prikkene, prikkene må dekke mer enn én pixel for at kameraet skal kunne registrere forandring i prikkene/pixlene.</p> <p>Er grei forklaring på nettet</p>
<p>Hvem føres opp som veiledere?</p>	<p>Ingrid og Rein terje</p>
<p>Konklusjon opp mot forskerspørsmål?</p>	<p>Mer konsentrert, i et punkt eller to</p> <p>Første setning litt unødvendig, kanskje prøve å flette den inn i neste setning. Kanskje starte med "tre forskjellige formler" før "det er en krevende prosess".</p> <p>Sikkerhetsfaktoren må gjøres tydeligere (eks. Fant ut at den ligger på misnt 1,2, men kan ikke finne ut mer)</p> <p>Starte hovedspørsmålsbesvarelsen med en setning som gjør det tydelig at det er det som skal svares på.</p> <p>Endre på sikkerhetsfaktor-delen i hovedsvaret.</p> <p>"Til tross"- "EC2", ha punktum</p> <p>"Fordi sikkerhetsfaktoren er mye mulig lavere" får frem tydeligere at vi mener mest sannsynlig, ikke mye lavere. "Vanlig betong dimensjonert etter EC2, ikke UHPFRC dimensjonert etter EC2"</p> <p>TYDELIG OG KORT</p>
<p>Forklaring/kilde til skjær?</p>	

Bruke h som d?	Høre med Katalin
Er det ok å bruke "strekkspenning"? Eller skal det kun skrives "spenning"?	Går greit med strekkspenning, men helst bruke sigma, og være konsekvente
Ok med "pga."?	På grunn av

Vedlegg C: Rapporter fra 3-punktstest

Digital vedlegg

Vedlegg D: Rapporter fra 4-punktstest

Digital vedlegg

Vedlegg E: DIC-videoer av prismer

Digital vedlegg

Vedlegg F: DIC-videoer av bjelker

Digital vedlegg

Vedlegg G: Mathcad beregninger av strekkspenning

Digital vedlegg

Vedlegg H: Excel resultater fra Lab

Digital vedlegg

Vedlegg I: Tekniske tegninger av testrigg for prismetesting

Digital vedlegg

Vedlegg J: Beregning og resultater for strekkspenning

Digital vedlegg

Vedlegg K: Excelberegning av sikkerhetsfaktor

Tittel:

Skjærkapasitet av ultrahøyfast fiberarmert betong – Verifikasjon av designstandard

 Kandidat:
 Tonje Schjelderup
 Svava Iselin Idarsdottir
 Piotr Stanislawski

 Veileder:
 Rein Terje Thorstensen og
 Ingrid Lande Larsen, UiA

Innledning

Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) har trykkfasthet fra 150-250 MPa. Fiberen gir duktile egenskaper under strekk. Ved å bruke UHPFRC fremfor vanlig betong er det mulig å redusere tverrsnittet opptil 2-3 ganger, mens den tilsatte fiberen vil gi muligheter for reduksjon av mengden med slakkarmering.

Case

Oppgaven går ut på å undersøke dimensjoneringsreglene for skjærkapasitet i NF P18-710 for UHPFRC. Det skal dimensjoneres og støpes bjelker med forskjellige armeringskombinasjoner. Bjelkene skal testes ved nedbøyingstest. Praktiske labresultater skal sammenlignes med beregnet teoretisk skjærkapasitet. For å utføre dette må UHPFRC klassifiseres gjennom flere laboratorieforsøk. Trykkfasthet, egenskaper under strekk og fiberorienteringsfaktor K må bestemmes.

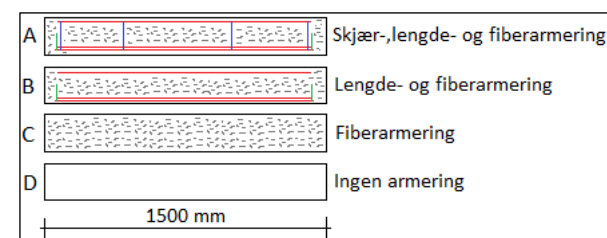
Forskerspørsmål

Hvordan stemmer dimensjoneringsreglene om skjærkapasitet i standard NF P18-710 sammenlignet med praktiske labresultater?

- Hvordan dimensjonere UHPFRCbjelker med ulike armeringskombinasjoner?
- Hvordan bestemme fiberorienteringsfaktor K?
- Hvordan påvirker strekkspenning-sprekkbredde-forholdet beregnet skjærkapasitet?
- Hvor stor er sikkerhetsfaktoren i skjærkapasitetsberegningene

Resultat

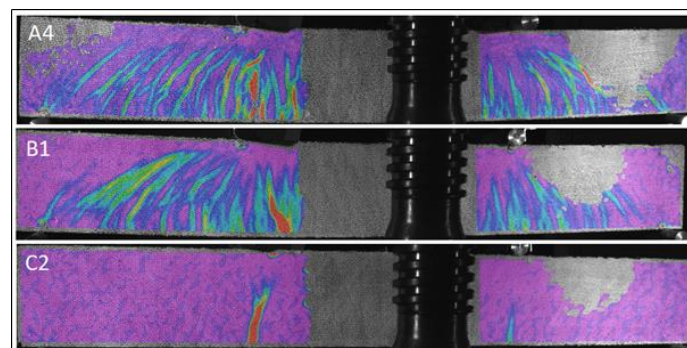
Figuren under viser bjelkenes forskjellige armeringskombinasjoner



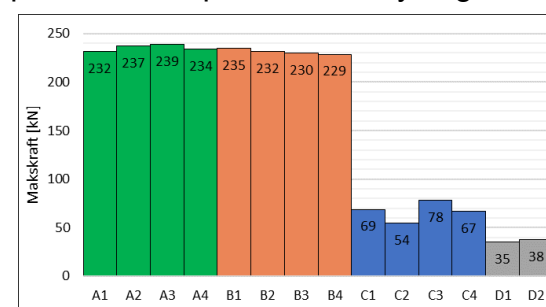
Tabellen viser beregnet skjærkapasitet for bjelkene.

	Skjærkapasitet [kN]			
	Betong	skjær-armering	Fiber	Totalt
A-bjelker	23,4	12,0	61,0	96,4
B-bjelker	23,4	0,0	61,0	84,4
C-bjelker	28,1	0,0	85,3	113,4
D-bjelker	28,1	0,0	0,0	28,1

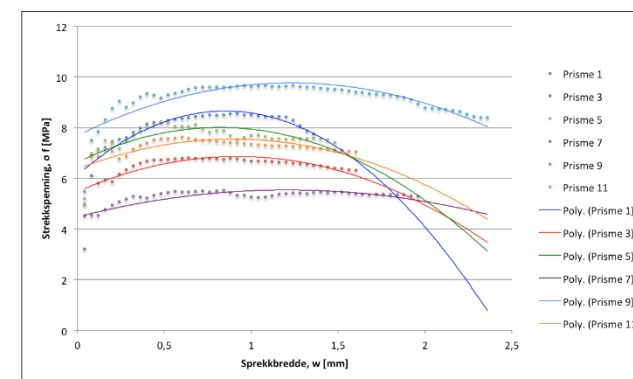
Det ble brukt et DIC-kamera som måler tøyingskonsentrasjon. Bilde under viser analyser fra kameraet. Bjelkene kollapset ved momentbrudd, men man kan tydelig se oppstår skjærsprekker på bildene.



Søylediagrammet viser bjelkenes maksimale kapasitet ved 4-punkts nedbøyingstest.



For å bestemme materialets egenskaper under strekk, ble prismer testet ved 3-punkts nedbøyingstest. Resultatene brukes i videre beregninger i Mathcad og ender tilslutt opp i σ -w-kurver. Kurvene med regresjon for de 6 prismene er fremstilt i figuren under.



I tabellen under er sikkerhetsfaktorene for moment- og skjærkapasiteten beregnet.

Bjelke	Maksikraft [kN]	Tilsvarende moment [kNm]	Moment-kapasitet [kNm]	Sikkerhetsfaktor	Skjærkraft [kN]	Skjærkapasitet [kN]	Sikkerhetsfaktor
A1	232	46,36	39,31	1,18	115,90	96,4	1,20
A2	237	47,46	39,31	1,21	118,65	96,4	1,23
A3	239	47,74	39,31	1,21	119,35	96,4	1,24
A4	234	46,74	39,31	1,19	116,85	96,4	1,21
B1	235	47,02	39,31	1,20	117,55	84,4	1,39
B2	232	46,3	39,31	1,18	115,75	84,4	1,37
B3	230	46,04	39,31	1,17	115,10	84,4	1,36
B4	229	45,74	39,31	1,16	114,35	84,4	1,35

Konklusjon

Skjærkapasiteten beregnes ut fra summen av formlene for betong, skjærarmering og fiber. Fiberens bidrag er avhengig av å utføre forsøk for bestemmelse av f_{ck} , σ -w-forholdet og K-faktor. Beregnet skjærkapasitet til bjelkene med lengde- og skjærarmering ble lavere enn for bjelkene armert med kun stålfiber. Dette skyldes forskjell i effektiv tverrsnittshøyde og at lengdearmering ikke er inkludert i skjærformelen. Momentberegning for vanlig betong etter EC2 ble brukt.

For å bestemme K-faktor støpes elementer tilsvarende den reelle konstruksjonen, ut fra disse elementene skjæres prismer ut i ulike vinkler. Forholdet mellom resultatene fra de utskjærte prismene og støpte prismer utgjør K-faktoren.

Bidraget fra fiberen utgjør mest for den totale skjærkapasiteten og σ -w-kurven er avgjørende faktor i formelen for bidraget fra fiberen.

Sikkerhetsfaktoren for skjærberegningene ligger på minimum 1,2. Det var ikke mulig å finne en endelig sikkerhetsfaktor, da bjelkene ikke kollapset ved skjærbrudd.

Beregningsformelen for skjærkapasiteten fra fiberen stemmer mest sannsynlig ikke, siden den gir lavere skjærkapasitet for bjelkene med skjærarmering, enn bjelkene uten. Ut fra DIC-bildene kan en se at det oppsto høye tøyninger på grunn av skjær i bjelkene uten skjærarmering, som kunne resultert i brudd ved en noe høyere momentkapasitet. Dette kan tyde på at sikkerhetsfaktoren for skjærkapasitet i UHPFRC er lavere enn sikkerhetsfaktoren for vanlig betong i EC2.