

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Forord

Denne masteroppgaven er utført ved Institutt for Matematiske Realfag og Teknologi ved Universitetet for Miljø- og Biovitenskap (UMB) i Ås, og er den avsluttende oppgaven for studiet Byggeteknikk og arkitektur.

Interessen for betong har delvis kommet gjennom tidligere jobb som tømrer der små oppdrag som støping av ringmur og gulv på grunn ble utført. Gjennom studiene på UMB har spesielt fagene Husbyggingsteknikk, Konstruksjonsteknikk og Videregående betongmaterialteknologi gitt grunnleggende teoretisk kunnskap som har økt interessen ytterligere. Derfor var det veldig spennende å få muligheten til å bli enda bedre kjent med de ulike bestanddelene betongen består av gjennom litteraturstudie og forsøk.

Jeg vil takke veileder ved UMB, førsteamanuensis Christian O. Sørensen, for hjelp til utarbeiding av spennende oppgave og god veiledning. I tillegg vil jeg takke Christine Hauck i Veidekke V-teknikk for gode faglige innspill og hjelp med litteratur. Takk til Lene Hedemann Larsen i Veidekke for invitasjon til Betongens dag og for å sette meg i kontakt med dyktige personer i Veidekke.

En spesiell takk til Christelle og mamma og pappa som har hatt troa og støttet meg hele tiden. Det betyr utrolig mye, spesielt på de tunge dagene. Takk til familie og venner som har vist interesse og støtte.

Thomas Roland Buene

Ås, 14. mai 2012

Sammendrag

Denne oppgaven tar for seg silikas innvirkning på fiberbetong med tanke på fiberens heftkapasitet, betongens tøyelighet, trykk- og strekkfasthet.

Opgaven er inndelt i to deler:

1. En litteraturstudie tar for seg plast- og stålfibres ulike egenskaper i de forskjellige fasene av betongens utvikling fra plastisk til herdet. Det er sett på hvordan belastningen overføres fra pasta til fiber, og fiberens belastningsforløp fra første belastning til den er helt løsrevet fra den omsluttende betongpastaen. Tidligere forsøk som er gjort på området, og som kan bidra til å belyse spørsmålene rundt problemstillingen, er presentert og diskutert.
2. Laboratoriearbeid utført på UMB's betonglab som gikk ut på å støpe åtte ulike prøveserier, tilsammen 72 terninger, med ulik tilsetning av fiber og silika og forskjellig herdetid. Terningene ble trykktestet for å undersøke de ulike tilsetningenes påvirkning av trykkfastheten gjennom herdetiden.

På grunnlag av forsøksresultatene og litteraturstudiet ble det trukket følgende slutninger:

1. Overgangssonen mellom fiber og pasta får økt kontaktflate ved tilsetning av silika på grunn av at pastaen forfines av de små silikakornene. Den økte kontaktflaten resulterer i økt heftkapasitet.
2. Tilsetning av silika kan, på grunn av filler-effekten, gi et ekstra bidrag til trykkfastheten ved at betongen blir mer kompakt rundt fibre som ligger tett.
3. For høy konsentrasjon av fiber i betongen kombinert med lavt v/c-tall kan føre til lav grad av kompaktet og dermed svekket trykkfasthet.

Abstract

This thesis investigates the effect of silica fume on fibre-reinforced concrete with respect to fibre/matrix bonding, concrete ductility and compressive and tensile strengths.

The thesis is divided into two parts:

1. A literature study that investigates synthetic and steel fibre's properties in the different phases of the concrete curing. The focus is on how stress is transferred from the matrix to the fibre, and the behavior of the fibre from the first impact to the total separation of the fibre from the concrete. Former experiments on the subject that can help clarifying issues surrounding the problem has been presented and discussed.
2. Laboratory experiments conducted at the Norwegian University of Life Sciences (UMB) included the casting of eight different batches, a total of 72 cubes, containing different amounts of fibre and silica fume and subject to varying curing time. The cubes were compression tested to examine the influence of different additives on the compressive strength throughout the curing time.

Based on the experimental results and the literature study the following conclusions were drawn:

1. The interfacial transition zone (ITZ) between the fibre and matrix is increased by the addition of silica fume as a result of the matrix being refined by the small grains. The increased ITZ results in a stronger fibre-matrix bond.
2. The addition of silica fume can, because of the filler-effect, provide an additional contribution to the compressive strength due to a more compacted matrix around fibres that are closely spaced.
3. A too high concentration of fibres in the concrete combined with a low w/c-ratio can result in a low degree of compacting and thus lowered compressive strength.

Innhold

Forord	III
Sammendrag	IV
Abstract	V
Innhold	VI
Figurliste	VIII
Tabeller	VIII
1. Innledning	1
2. Litteraturstudie	3
2.1 Silika	3
2.1.1 Silikaens effekt på betong	4
2.1.2 Silika i kombinasjon med stålfiber.....	6
2.2 Rissdannelse.....	7
2.2.1 Kryp	7
2.2.2 Svinn	8
2.3 Armering i betong	8
2.4 Fiberarmering.....	10
2.4.1 Forskjellige typer fibre.....	12
2.4.2 Spredning av fibre i betongen	15
2.4.3 Fibrenes virkning på riss- og sprekke dannelse	15
2.4.4 Mikrostrukturen rundt fiberen.....	16
2.5 Fibrenes oppførsel når betongen belastes	18
2.5.1 Før oppsprekking	18
2.5.2 Rissdannelsen og oppsprekking	20
2.5.3 Fibrenes belastningsforløp	21
2.5.4 Forskjellen mellom rett fiber og fiber med endeforankring.....	25
2.5.5 Mikrofiber vs. makrofiber.....	26
3. Forsøksplaner og metode	27
3.1 Laboratoriarbeid	27
3.1.1 Sprøytebetong	27
3.1.2 Materialer som ble brukt i forsøket.....	28
3.1.3 Utstyr til støpning og trykktesting(i henhold til NS-EN 206-1:2000 (23)).....	30
3.1.4 Resepter.....	30
3.1.5 Støpeserier.....	30
3.1.6 Fremgangsmåte i forbindelse med behandling av fersk betong	31
3.1.7 Fremgangsmåte i forbindelse med behandling av herdet betong	32
3.2 Kontrollmetoder	34
3.2.1 Statistisk signifikans	34
3.2.2 Student's T-test.....	35
4. Resultater	36
4.1 7-døgns fasthet.....	37
4.1.1 Statistiske tester av resultatene	37

4.2	28-døgns fasthet.....	39
4.2.1	Statistiske tester av resultatene	39
5.	Diskusjon	41
5.1	Resultatene fra trykktestingen.....	41
5.1.1	7-døgns fasthet	41
5.1.2	28-døgns fasthet	41
5.1.3	Strekfasthet, tøyelighet, heft- og uttrekkskapasitet	42
5.2	Feilkilder i forbindelse med forsøket	43
6.	Konklusjon	45
7.	Videre arbeid	46
8.	Referanser	47
9.	Vedlegg	49
	Vedlegg A: Grafer – Utvikling av fiberens spenning	
	Vedlegg B: Resultater fra trykkprøver og statistiske tester	
	Vedlegg C: T-fordeling for "Student's" T-test	
	Vedlegg D: Metoder for testing av herdet betong	
	Vedlegg E: Utvidet utstyrliste	
	Vedlegg F: Datablad	

Figurliste

Figur 2.1: Silikapartikler i fiberbetong (7).....	5
Figur 2.2: Silika som ble benyttet i forsøket.....	5
Figur 2.3: Strekkarbeidsdiagram for uarmert betong (11)	9
Figur 2.4: Strekkarbeidsdiagram for armert betong (11)	9
Figur 2.5: Størrelsen på riss i fiberarmert betong sammenliknet med betong med armeringsnett (27)	11
Figur 2.6: Strekkarbeidsdiagram for fiberarmert betong (11).....	11
Figur 2.7: Ulike fibertverrsnitt (14)	13
Figur 2.8: Forskjellige typer stålfiber (16).....	14
Figur 2.9: Noen typer syntetiske fibre (14).....	15
Figur 2.10: Overgangssonens grenseflate (14)	17
Figur 2.11: Mikroskopisk fotografi av ITZ (14)	17
Figur 2.12: "Wall"-effekten	17
Figur 2.13: Relative størrelser av betongens bestanddeler (14).....	18
Figur 2.14: "Shear-lag"-modellen (14)	19
Figur 2.15: Utvikling av riss i fiberbetong (14)	21
Figur 2.16: Største kraftoverførende riss for normal betong vs. fiberbetong (14).....	21
Figur 2.17: Fase 1-4 av fiberens belastningsforløp (14)	22
Figur 2.18: Fase 1 av fiberens belastningsforløp (19).....	22
Figur 2.19: Fase 2 av fiberens belastningsforløp (19).....	23
Figur 2.20: Fase 3 av fiberens belastningsforløp (19).....	23
Figur 2.21: Kraftlinjer for tre fibre med ulike egenskaper (19)	24
Figur 2.22: Energien som kreves for å trekke ut en fiber (14).....	25
Figur 3.1: Støpeformene som ble benyttet i forsøket.....	31
Figur 3.2: Stiplede linjer som angir posisjonene for måling av terningers belastningsflate (24).....	33
Figur 3.3: Trykktestmaskinen som ble benyttet i forsøket.....	34

Tabeller

Tabell 2.1: Fasthetsutvikling av betong tilsatt silika (8).....	6
Tabell 2.2: Trykkfasthet av betong tilsatt silika og fiber (8).....	7
Tabell 2.3: Hovedforskjeller mellom mikrofiber og makrofiber	26
Tabell 2.4: Oversikt over antall fibre i betongen basert på fiberstørrelsen (14)	26
Tabell 3.1: Resepter som ble brukt i forsøkene	30
Tabell 4.1: Gjennomsnittlig trykkfasthet og standardavvik for 7-døgns fasthet.....	37
Tabell 4.2: Resultater av "Student's" T-test og Excel T-test for 7-døgns fasthet.....	37
Tabell 4.3: Resultater av statistisk signifikans for 7-døgns fasthet.....	38
Tabell 4.4: Gjennomsnittlig trykkfasthet og standardavvik for 28-døgns fasthet.....	39
Tabell 4.5: Resultater av "Student's" T-test og Excel T-test for 28-døgns fasthet.....	39
Tabell 4.6: Resultater av statistisk signifikans for 28-døgns fasthet.....	40

1. Innledning

Betong er et materiale i stadig utvikling, og man prøver hele tiden å finne nye løsninger som skal gjøre betongen brukbar i et stadig mer utfordrende miljø og klima. Bygninger bygges høyere og høyere og broer får lengre og lengre spenn. Derfor trenger man betong som kan motstå store trykk- og strekkpåkjenninger. For å etterstrebe dette har det de siste 60 årene blitt forsøkt å blande inn silika i betongen med økt trykkfasthet som et av de viktigste resultatene. Det er også forsket på nye former for armering og spesielt fiberarmering av ulike typer. Bruk av fiber i betong kan dateres så langt tilbake som romertiden der de tilsatte hestehår i betongen for å motvirke kryp. Moderne fibre lik de vi har i dag ble først tatt i bruk rundt begynnelsen av 1900-tallet. Det finnes fibre laget av alt fra glass, plast og naturprodukter til metall, og de kommer i ulike former og størrelser. De mest brukte i dag er fiber av plast og stål. Fiberbetong brukes i dag hovedsakelig i plater på mark, ikke-lastbærene vegger og i sprøytebetong.

Det er først og fremst som svinnarmering at fibre tilsettes betongen, men i ikke-lastbærende konstruksjoner, hvor det kun brukes minimumsarmering, er det mulig å erstatte all armeringen med fiber. Det er gjerne i kompliserte konstruksjoner hvor det er dyrt og vanskelig å legge tradisjonell armering at det kan være lønnsomt med fibre i betongen. Legging og binding av tradisjonell armering er ofte tidkrevende og i mange tilfeller forbundet med fare ved at arbeidere fort kan snuble eller henge seg fast i armering som stikke ut av vegger, gulv og tak. Plastfibre, i form av mikrofibre og for det meste produsert av polypropylen, bidrar i hovedsak til å ta opp strekkrefter i forbindelse med kontroll av plastisk svinn i størkningsfasen, mens stålfibrenes(makrofibre) egenskaper er foretrukket i den herdede betongen.

Fibre blir tilsatt betongen med ønske om å forbedre dens egenskaper og oppførsel. Betong, som er et sprøtt materiale, kan for eksempel få forbedret seighetsegenskaper av tilsatt fiber. Fibrene er korte og ikke kontinuerlige sammenliknet med vanlig armering. De er i tillegg mer eller mindre tilfeldig fordelt i betongen. I denne oppgaven skal samarbeidet mellom fiber og silika, først og fremst i herdet betong, undersøkes for å finne ut om kombinasjonen av de to kan øke heften mellom fibrene og pastaen slik at betongens strekkfasthet og tøyelighet kan forbedres. Norsk Betongforenings "Publikasjon nr. 7" (1) inneholder ingen oversikt over trykkfasthet i forbindelse med sprøytebetong. Derfor ble det i forbindelse med denne

oppgaven utført forsøk i laboratorium som så på betongens trykkfasthetsvikling for å finne ut om tilsetning av silika, på grunn av en eventuell økt heft til fiberen, vil gi et ekstra bidrag til trykkfastheten i fiberbetong.

De første forsøkene på laboratoriet tok for seg samspillet mellom silika og SP-stoff. I en tørr betongmiks, med v/c-tall ned mot 0,1 og en ukjent mengde SP-stoff, skulle det ifølge et eksperiment fra begynnelsen av 90-tallet (2) være mulig å gjøre miksen helt flytende ved kun å tilsette tørt silika. Teorien gikk ut på at silikaen ville fungere som filler og presse ut vannet som var bundet opp av sementen og dermed gjøre miksen flytende. Etter mange forsøk med ulike blandingsforhold lyktes det ikke å få til den ønskede effekten. Derimot viste det seg at silika gjorde betongen seigere. Dette resultatet økte interessen om silikaens effekt på fibre i betongen.

Av hensyn til utstyret som var tilgjengelig for å utføre laboratoriearbeidet, ble det kun fokusert på mørtellignende blandinger, som for eksempel sprøytebetong, i forbindelse med forsøkene. Kjøkkenmikseren som ble benyttet til miksing var rett og slett ikke i stand til å mikse inn pukk i betongen. Dette skyldes vispens rotasjonsbane som gjør at avstanden mellom vispen og bollen varierer veldig mye. Dette gir en god og effektiv miksemetode, men det fører også til at dersom det tilsettes for store partikler, vil disse ha muligheten til å komme mellom vispen og bollekanten og sette seg fast slik at kjøkkenmaskinen vil skjære seg og i verste fall bli ødelagt.

Det finnes veldig mange forskjellige typer fibre på markedet. Det er på grunn av oppgavens omfang og tidsbegrensning kun fokusert på stålfibre og til dels plastfibre, og deres effekt på plastisk og herdet betong.

2. Litteraturstudie

Formålet med litteraturstudien er å opparbeide seg en kunnskap om temaet og samtidig få en oversikt over hva som tidligere har blitt gjort av forsøk på området. Silika er en sentral del av denne oppgaven og det er blant annet sett på hvilken innvirkning silika har på herdeprosessen og fasthetsutviklingen, samt hvordan den fungerer som en filler i kontakt med fibre. Det er også sett på ulike typer fibre for å kartlegge hvilke fibre som egner seg best i de forskjellige fasene av betongens herdeprosess. Spesielt er spørsmål knyttet rundt fiberens heft- og uttrekkskapasitet forsøkt klargjort, samt svinn og rissproblematikken. Litteraturstudien bedret også egen forståelse rundt laboratoriearbeid med betong. Betong er et komplekst materiale med mange variable, og ved å endre en av disse kan egenskapene endre seg dramatisk.

2.1 Silika

Silika er et biprodukt som kommer fra produksjonen av silisium (3) og ble tidligere sett på som et avfallsprodukt (4). De ørsmå partiklene, som ser ut som røyk, forsvant rett ut av fabrikkpipene sammen med annen røyk og forurensning. Etter at man på 1970-tallet fikk strengere retningslinjer innenfor miljø, ble det satt i gang tiltak for å rense røyken på fabrikkene for å få ned forurensningen og utslipp. Da var det naturlig å prøve å finne egnede bruksområder for avfallet som ble skilt ut. I Norge og de andre skandinaviske landene var det allerede på 1950-tallet gjort forsøk og funnet ut at silika i kombinasjon med Portland sement hadde positiv effekt på blant annet styrken til den ferdige betongen (3). Dette tidlige arbeidet la grunnlaget for fremtidig interesse for forskning på området. Dette er altså mye av grunnen til at man har gått fra å se på silika som et avfallsprodukt, til at det har blitt et ettertraktet tilsetningsmiddel i moderne betong. I USA, i dag, er det ikke lenger tillatt å slippe noe silika ut i atmosfæren. Alt skal samles opp og selges til betongindustrien. Men likevel, slik tilstanden er nå, er det ikke nok silika tilgjengelig til å tilfredsstille markedet. Dette har gjort at prisen er langt høyere i dag enn det den var tidligere, og ført til at bruken har dalt noe i det siste. Silika blir levert enten som tørt kompaktert støv på bulk, eller som "slurry". "Slurry" er en blanding av 50 % silika og 50 % vann.

2.1.1 Silikaens effekt på betong

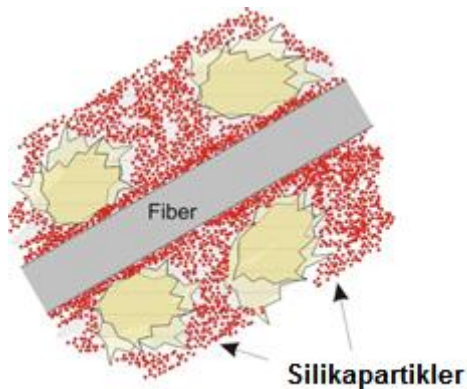
Pozzolan-effekten

Pozzolan-effekten er en styrkebringende effekt som oppnås ved å tilsette pozzolanske materialer, som for eksempel flyveaske og silika, i betongen i løpet av blandedeprosessen. Når sement reagerer med vann dannes blant annet den kjemiske forbindelsen kalsiumhydroksid($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Dette er en forbindelse som gjør betongen alkalisk, det vil si at betongen blir mer motstandsdyktig mot armeringskorrosjon, men den bidrar ikke til betongens styrke i det hele tatt. Med andre ord hindrer denne forbindelsen på en måte at sementens reaksjon med vann blir maksimalt utnyttet til fasthetsøking. Det som skjer når silika tilsettes betongen er at den begynner å reagere med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og danner kalsiumsilikathydrat. Denne forbindelsen er lik den som oppstår når vann og sement danner silikater, hvilket er den største bidragsyteren til betongens styrke (3) (5) (6), og den herdede betongen vil dermed få økt fasthet. Pozzolanske materialer har også andre effekter på betongen, som et resultat av effekten nevnt ovenfor. Når silikaen produserer mer silikater blir betongen nemlig tettere og mindre porøs.

Filler-effekten

Denne fortettingen av betongen er også sterkt hjulpet av silikaens mikroskopiske størrelse som fyller opp tomrommene mellom silikatene som dannes fra sementkorn. Diameteren til silikakornene er 1/50-1/100 av sementens diameter, det vil si en gjennomsnittlig diameter på 0,1 μm (4). Filler-effekten vil gjøre betongen tettere og hindre at uønsket forurensning og kjemikalier kommer inn i betongen og bryter den ned i form av sulfatangrep. "En filler er definert (...) som et finkornet materiale som, grunnet sine fysiske egenskaper, påvirker noen av betongens egenskaper, sånn som bearbeidelighet, permeabilitet, kapillaritet og oppsprekking." (6) Ifølge Elkems nettsider (7) hvor de beskriver filler-effekten i forbindelse med fiberbetong forklares det at ved bruk av silikapartikler får betongen en mer raffinert porestruktur med mindre porer og dermed lavere porøsitet i herdet tilstand. Dette er vist i figur 2.2. "I fersk tilstand, bidrar Elkem mikrosilika til å binde vannet og forbedrer dermed plastisiteten til den ferske blandingen." (7) På grunn av silikakornenes størrelse vil de legge seg mellom sementkornene og fylle opp dette hulrommet. Vannet som tidligere opptok dette hulrommet vil så bli presset ut i blandingen og den blir av dette mer bearbeidelig (5). Silika kan ikke benyttes uten SP-stoff på grunn av at de små kornenes polaritet vil gjøre at silikaen

ikke vil spre seg i blandingen, men heller klumpe seg sammen og "låse inn" vannansamlinger.



Figur 2.1: Silikapartikler i fiberbetong (7)



Figur 2.2: Silika som ble benyttet i forsøket

Forsinket herdeprosess

Siddique og Kahn (8) omtaler et forsøk som viser til at i betong hvor noe av sementen har blitt erstattet med silika ikke får en like rask økning i trykkfasthet som betong uten silika. Resultatene fra forsøkene viser at først etter syv døgn har betongen med silika høyere fasthet enn kontrollbetongen uten silika. Etter 28 døgn har betongen med 5 % silika en trykkfasthet på 5-10 % over kontrollbetongen, avhengig av kontrollbetongens v/c-tall. Betongen med høyest v/c-tall har den største prosentvise forskjellen i fasthet. Denne "forsinkende" effekten som silika viser i herdeprosessen skyldes at det, på grunn av mindre sement, utvikles mindre Ca(OH)_2 som silikaen kan reagere med. I tabell 2.1 vises resultatene fra forsøket.

Andre forsøk utført med betong tilsatt silika har i følge Terrence C. Holland (3) gitt fastheter opp mot 120 MPa etter 28 døgn. Den høye fastheten kan gi fordeler som for eksempel økte spenn i brokonstruksjoner, men den gir også i noen tilfeller muligheten til å redusere konstruksjoners dimensjoner. For eksempel kan det i høyreiste bygninger ofte være en fordel å kunne redusere de bærende søylenes størrelse for å få økt innvendig areal og dermed økte inntekter i form av større utleieareal. Backe (4) skriver om laboratorieforsøk hvor fastheter over 160 MPa er oppnådd. Dette krever imidlertid et v/c-tall ned mot 0,13 og er ikke vanlig innen normal betongproduksjon fordi det ikke ville være mulig å oppnå tilstrekkelig kompaktering på en byggeplass.

Tabell 2.1: Fasthetsutvikling av betong tilsatt silika (8)

Mixture	Compressive strength (MPa)						
	1 day	3 days	7 days	28 days	56 days	90 days	180 days
w/cm 0.27	39	68	72.5	84	86.5	87.5	90
SF 5	35	63	75.5	88.5	93	96.5	97.5
SF 10	25	61	79	95.5	100	104	107
SF 15	24.5	59.5	76.5	101	103.5	106	109
w/cm 0.30	48	63.5	72	83.5	84.5	85.5	87.5
SF 5	46	62	81	91	95.5	95.5	97
SF 10	42	61.5	78.5	95	97	99	103
SF 15	38	57.5	74.5	98.5	101.5	104	106.5
w/cm 0.33	41.0	58.0	62.5	75	78	79	81.5
SF 5	35.0	55.0	69.5	83.0	85.0	90.0	90.0
SF 10	32.0	53.0	70.5	89.5	90.5	92.0	93.5
SF 15	31.0	47.5	70.5	88.5	93.0	95.5	100.5

2.1.2 Silika i kombinasjon med stålfiber

Siddique og Kahn (8) omtaler også et liknende forsøk gjort med fiberbetong. Det ble benyttet to ulike typer kaldtrukne stålfibre med slankhetstall henholdsvis 65 og 80. Begge fibertypene hadde endeforankring. Det ble støpt en kontrollbetong uten fiber og silika, mens testbetongen inneholdt henholdsvis 0,5 og 1 % fiber, og 0, 5, 10 og 15 % silika. Fiberinnholdet er beregnet fra det totale betongvolumet, silikaen er regnet av sementvekten. Forskerne observerte økning i trykkfasthet for betong tilsatt kun silika, men også ytterligere økt trykkfasthet for betongen tilsatt både silika og fiber. Forskerne konkluderte med at silikaens filler-effekt økte heften mellom sementpastaen og tilslagene som resulterte i økt fasthet. Resultatene fra forsøket vises i tabell 2.2.

Tabell 2.2: Trykkfasthet av betong tilsatt silika og fiber (8)

Series	Silica fume (%)	Steel fibre content (%)	Compressive strength (N/mm ²)
A	0	0	32.4
		0.5	33.4
		1.0	37.4
		0.5	34.1
		1.0	38.5
B	5	0	36.4
		0.5	38.3
		1.0	48.1
		0.5	41.4
		1.0	45.7
C	10	0	56.2
		0.5	60.4
		1.0	66.9
		0.5	59.7
		1.0	63.7
D	15	0	60.1
		0.5	66.5
		1.0	69.3
		0.5	63.2
		1.0	70.5

2.2 Rissdannelse

Riss vil forekomme i all betong, og det er kun mulig å redusere rissenes størrelse ved å sikre gode herdeforhold. Det viktige er å hindre utviklingen av rissene. Utviklingen av riss er resultatet av kryp og svinn, samt andre faktorer som temperaturforskjeller og for høy belastning. Ved å redusere svinn og kryp, vil også utviklingen av rissene dempes.

2.2.1 Kryp

Med kryp menes en økende deformasjon av betongen over tid forårsaket av egenvekt og/eller ytre last mindre enn bruddlasten. Kryp er en langtverkende effekt som gjør at strekk eller trykk kan føre til permanent endring av form. Kryp trenger ikke føre til brudd av betongen. Det er i hovedsak tre faktorer som påvirker hvor stor effekten av kryp vil bli:

1. Tilslag
2. v/c-forholdet
3. Betongens alder

Tilslaget har som regel høyere E-modul enn pastaen og bidrar i utgangspunktet til å begrense virkningen av kryp. Det vil si jo sterkere tilslag, jo mindre kryp. For eksempel er det vist at

betong tilsatt lettvektstilslag er mer utsatt for kryp enn normal betong. Videre vil vektforholdet mellom vann og sement påvirke kryptets størrelsesorden. Det sies at kryp er omvendt proporsjonal med betongens styrke og at jo mer vann som tilsettes, jo mer vil betongen utsettes for kryp. Andre forhold som påvirker v/c-tallet vil også påvirke kryp. Med årene fortsetter herdeprosessen å styrke betongen ytterligere. En ung betong som blir utsatt for last vil være mer utsatt for kryp enn en eldre betong av samme kvalitet (9).

2.2.2 Svinn

Med svinn menes endring av betongens volum forårsaket av fuktighetstap. Dette er først og fremst noe som skjer i løpet av størkningsprosessen, men også i løpet av herdeprosessen kan fuktighetstap forekomme og føre til redusert kapasitet. De to viktigste formene for svinn er:

1. Plastisk svinn
2. Svinn på grunn av uttørking av herdet betong

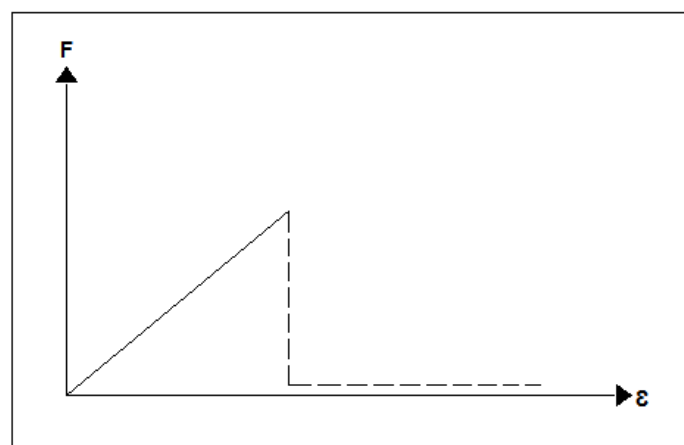
Plastisk svinn foregår like etter at betongen er plassert, mens den enda er plastisk. Spesielt gulv, som har store ubeskyttede flater, er utsatt ved at vann fordampes ved for rask uttørking og forårsaker sprekker i overflaten og rundt armering og tilslag. Jo høyere v/c-forhold, jo større er risikoen for plastisk svinn. Svinn på grunn av uttørking i løpet av herdeperioden er forårsaket av at vannet som er bundet opp i gelporene fordampes. Vanntapet fører til volumtap og oppsprekking.

Dette er de to største årsakene til svinn og de forsterkes dersom betongen ikke får tilfredsstillende herdeforhold. Svin kan aldri forhindres, men ved å sørge for at betongens overflate har nok fuktighet, for eksempel ved tildekking og vaning (10), er det mulig å begrense utviklingen.

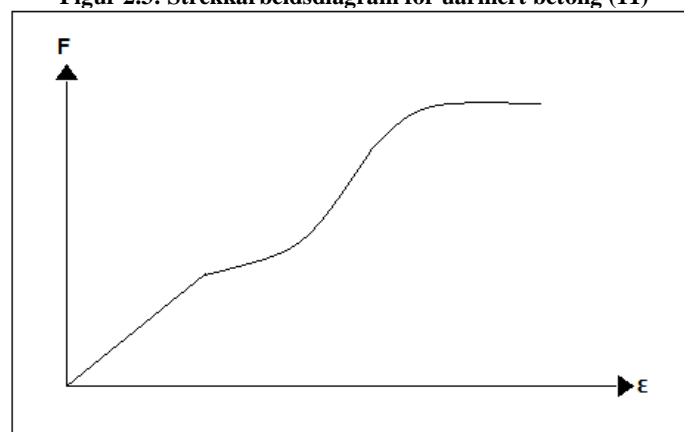
2.3 Armering i betong

Hovedårsaken til å armere betong er for å endre dens egenskaper i forbindelse med strekkpåkjenninger og begrense kryp og svinn. Betongens strekkfasthet tilsvarer normalt omtrent bare 1/10 av trykkfastheten. Man sier derfor at uarmert betong har lav strekkfasthet og strekkføyningskapasitet, og materialet karakteriseres derfor som sprøtt. All betong armeres, selv om det i utgangspunktet kan se ut som om den kun vil bli utsatt for trykkpåkjenninger. Dette er på grunn av momentvirkningene i konstruksjonen som vil kunne gi, i mange tilfeller, store strekksoner som i en uarmert konstruksjon vil kunne føre til et tidlig brudd. Minimumsarmering er påkrevd for å forhindre svinn-sprekker. Den tradisjonelle

metoden å armere betong på er ved å benytte armeringsjern som blir bundet sammen med ståltråd, eventuelt sveiset sammen. Legging av armering er en tidkrevende jobb og det fører med seg en del risiko. Blant annet grunnet faren ved å snuble i gulvarmeringen, men også det at man kan henge seg opp i og skade seg mot armering som stikker ut av vegger, gulv og tak i løpet av byggeperioden. Ferdigsveiset armeringsnett har langt på vei erstattet sammenbundet armeringsjern i gulv, særlig gulv på grunn. Disse er mye raskere å legge da man kun trenger å binde sammen de ferdigsveisede mattene. Under er det vist arbeidsdiagrammer for henholdsvis armert og uarmert betong. På figur 2.3 ser vi at den uarmerte betongens tøyning stiger proporsjonalt med belastningen helt til vi får et plutselig brudd når belastningen blir for høy. I arbeidsdiagrammet for den armerte betongen, som er vist i figur 2.4, er det tydelig at armeringen overtar strekkbelastningen når betongen sprekker opp, og vi kan se at det oppnås flyt tilsvarende som for stål. Omfanget av oppsprekningen avgjøres av armeringens plassering, dimensjon og tetthet (11).



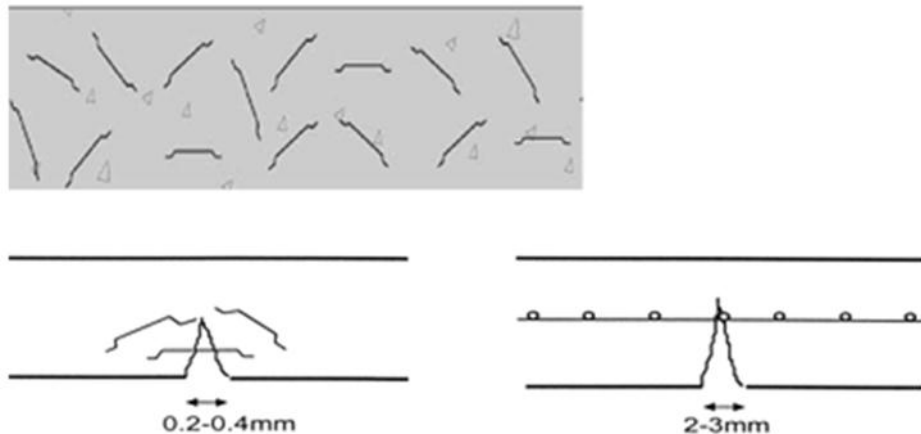
Figur 2.3: Strekkarbeidsdiagram for uarmert betong (11)



Figur 2.4: Strekkarbeidsdiagram for armert betong (11)

2.4 Fiberarmering

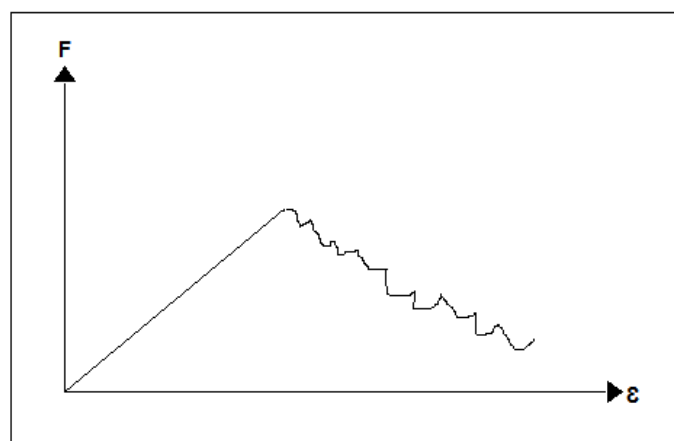
Ved å tilsette fiber i betongen er det mulig å redusere sprøheten. Man får noen andre egenskaper enn normal armert betong ved at det istedenfor store armeringsjern, som er organisert og strategisk plassert, er mange små armeringsjern som er "tilfeldig" spredt rundt i betongen. Dette gir mange av de samme egenskapene, men samtidig er det en del ulikheter. Fiberarmering benyttes først og fremst for å forminske rissdannelsen i betongens overflate og avstanden mellom disse. I motsetning til konvensjonell betong, der mikroriss har mulighet til å utvikle seg til makroriss, vil fibre i fiberbetongen begrense at de riss som allerede har oppstått ikke utvikler seg til større riss og sprekker. Dette skjer ved at kraften overføres gjennom risset, via fibre, og gjør det mulig for fiberbetong å overføre spenning selv etter oppsprekking. Når kraften blir for stor vil det forekomme et brudd ved at fiberen løsner fra pastaen og trekkes ut grunnet for liten friksjon og for dårlig heft mellom de to. Det er altså fiberens uttrekkskapasitet som er det svake leddet, ikke fiberen i seg selv. Er det tilsatt nok fiber, og dersom fibre har riktig lengde og tykkelse, kan man i stor grad unngå at små riss utvikler seg til større riss som kan skade betongen. Det kreves selvsagt også at fibre har tilstrekkelig heft til sementpastaen (12). Stålfiber kan, ved riktig dosering også erstatte armeringsnett i gulv på grunn. Noen fordeler ved bruk av stålfiber i en slik konstruksjon er at dersom man klarer å spre fibre jevnt i betongen er sikret at konstruksjonens armering er plassert riktig. Det er ikke alltid like lett med armeringsnett da disse ofte kan bli trykket for langt ned ved at arbeiderne står på dem når betongen legges ut. Man sparer også tid ved at man slipper å legge ut og binde sammen armeringen (13). I figur 2.5 er det vist hvordan rissene i et stålfiberarmert betonggulv er mindre enn der man bruker armeringsnett. Det er fordi fibre er mindre og jevnere fordelt enn armeringsnettet og vil oftere befinne seg der riss oppstår. På grunn av de små rissene vil ikke betongen være like utsatt for skadelige angrep som for eksempel sulfater og det vil være mindre sjans for rustsprenging og avskalling. Grunnen til dette er blant annet fordi stålfibre har et mye mindre tverrsnittsareal og diameter enn vanlige armeringsjern, noe som fører til at utvidelsen på grunn av rust blir mindre enn hva tilfellet er ved bruk av tykkere armering. Og jo mindre uønskede åpninger det er i betongen, jo mindre er faren for skadelige angrep. Fiber i betongen vil ikke nødvendigvis gjøre at strekkapasiteten styrkes. Derfor bør ikke fiberarmering benyttes alene i frittstående konstruksjoner, men heller i en kombinasjon med strekkarmering. Når den fiberarmerte betongen begynner å utvikle riss vil fibre ta over lasten, og siden de er tilfeldig fordelt med forskjellig orientering, vil arbeidsdiagrammet for fiberbetong se ut som figur 2.6. Grafen



Figur 2.5: Størrelsen på riss i fiberarmert betong sammenliknet med betong med armeringsnett (27)

starter likt som på de to andre strekkarbeidsdiagrammene, men når betongen sprekker opp og mister sin styrke, tar fibrene over. Det er ingen jevn kurve da det hele tiden er et ulikt antall fibre som "trår til" og hjelper å holde konstruksjonen sammen, samtidig som noen fibre løsner.

Ifølge Brant et al. (12) er spenningen i fiberen omvendt proporsjonal med fiberens diameter, og effekten av fibertilsetningen vil derfor bli større for lange, tynne fibre enn for korte og tjukke. På grunn av fiberens høye E-modul, i forhold til betongen, vil det i det elastiske stadiet av deformasjonen oppstå skjærkrefter mellom fiberen og pastaen. Dette er fordi betongen vil tøyes/deformeres mer enn fiberen. Igjen kan det konkluderes med at friksjonen er avgjørende for fiberbetongens strekkapasitet. Det finnes en grense der fiberens lengde skaper en friksjon til pastaen som overskrider fiberens strekkapasitet. Dersom fiberen blir lang nok vil vi istedenfor et heftbrudd få et fiberbrudd. Dette er fiberens kritiske lengde. For å oppnå størst mulig friksjon er det viktig at mest mulig av fiberen er i kontakt med pastaen. På mikroskopisk nivå vil ikke fiberen lenger fremstå som glatt, men den vil heller være relativt



Figur 2.6: Strekkarbeidsdiagram for fiberarmert betong (11)

ujevn. Jo større kontaktflate fiberen har, jo større område kan utsettes for friksjon. Altså er det en fordel at fiberen ikke er glatt. En annen faktor som er viktig er at pastaen er finkornet nok til å utnytte denne mikroskopiske ujevnheten. Det vil si at jo finere sementkornene er, jo mer av den ujevne overflaten klarer den å dekke. Følgende egenskaper kreves for at fibre skal være effektive i samspill med betongen (14) (12):

- lange fibre
- tynne fibre
- ru eller deformert overflate
- høy strekkapasitet - minimum to til tre ganger større for fiberen enn for pastaen
- høy E-modul - minst tre ganger høyere for fiberen enn for pastaen
- endeforankring
- heften mellom fiberen og pastaen skal være lik eller høyere enn pastaens strekkfasthet
- fiberen må være såpass duktil at den ikke ryker eller knekker ved slitasje eller bøyning

Det er også viktig at den termiske ekspansjonen og Poissons tall for både fiberen og pastaen er tilnærmet den samme. Dette er fordi stor forskjell i den ene eller den andre kan resultere i at fiberen enten løsner fra pastaen eller forårsaker oppsprekking dersom den utvider seg mer, eller trekker seg mer sammen i forhold til betongen.

Det er som regel tre egenskaper som avgjør stålfiberens virkning i betongen:

1. Slankhetstallet
2. Fiberens form og eventuell forankring
3. Overflatebehandling

2.4.1 Forskjellige typer fibre

Det finnes flere forskjellige typer fibre, hvor stålfiber er den mest brukte typen. Blant andre benyttede fibertyper kan det nevnes plastfiber og glassfiber. I motsetning til de to sistnevnte, som kun kan oppta krefter i strekkretningen, har stålfiberen mulighet til å oppta krefter i både strekk- og trykkretningen. Stålfiber kommer i mange forskjellige størrelser og utforminger, men det er i utgangspunktet fem hovedkategorier (15):

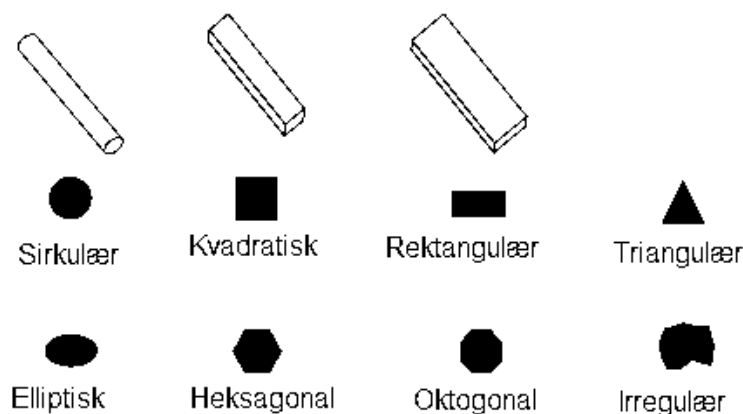
- Type 1: kaldtrukket tråd
- Type 2: presset ut av plate

- Type 3: smelte-utvunnet
- Type 4: fabrikk-kuttet
- Type 5: modifisert kaldtrukket tråd

Det er type 1 og type 2 som er de mest vanlige typene av stålfiber. Den største forskjellen mellom disse ligger i tverrsnittformen. Type 1 har en rund form da den er klippet fra en ståltråd, mens type 2 har et firkantet tverrsnitt da den er presset ut av en plate. Fibernes geometri varierer mye fra type til type. Ulike fibertverrsnitt vises i figur 2.7. Det samme gjelder for effektene de forskjellige fibre gir betongen. Mens noen fibre i hovedsak skal forbedre seigheten og redusere rissvidder, er andre fibre laget for å redusere plastisk svinn eller hindre avskalling ved brann. Under følger en oversikt over viktig terminologi brukt innen fiberproduksjon (14):

- Slankhetstall ($\lambda = l/d$), forholdet mellom fiberens lengde (l) og diameter(d)(ekvivalent diameter for fibre uten rundt tverrsnitt)
- Buntede fibre, tråder bestående av hundrevis eller tusenvis av mikrofibre
- Avkappede tråder, fibre klippet i ulike lengder
- Sorterte fibre, fibre som er satt sammen i, for eksempel, kryss

Disse karakteristikene er som regel uavhengig av fibertype, og avhenger av geometri heller enn materialtype. I betongindustrien skilles det mellom makrofiber og mikrofiber. En fiber klassifisert som en makrofiber skal være lengre enn maksimum tilslagsstørrelse, og ha et tverrsnittsareal mye større enn sementkornets, i tillegg til et slankhetstall mindre enn 100. Mikrofibre skal ha tverrsnittsareal på størrelse med et sementkorns og skal ikke være lengre enn maksimum tilslagsstørrelse.



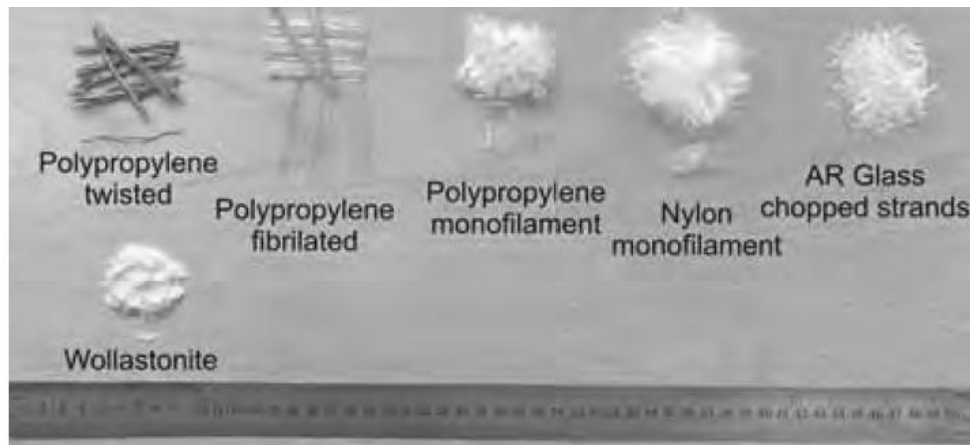
Figur 2.7: Ulike fibertverrsnitt (14)

American Society for Testing and Materials (ASTM) krever at fibre fra alle de fem forskjellige fibertypene skal være tilstrekkelig små til at de vil bli tilfeldig fordelt når de blandes inn i betongen. Det at det finnes så mange forskjellige typer fibre gjør at det er mulig å få fibre som har egenskaper spesielt tilpasset den betongtypen som skal benyttes. For eksempel påvirker små og tynne fibre betongens bearbeidelighet mindre enn lange og tykke fibre. Noen fibre er bølgete mens andre er rette og har forskjellige former og avslutninger i endene. Dette for å øke friksjonen og forankringskapasiteten mellom fiberen og betongen.



Figur 2.8: Forskjellige typer stålfiber (16)

Fibrene i figur 2.8 er produsert ved å kaldtrekke stål og så klippe tråden i ønsket lengde og med ønsket endeforankring og form. Dette er en rimelig måte å produsere stålfiber på, og det gjør at stålfibre er populære, da det bidrar til å holde den totale kostnaden av betongen nede. Denne metoden er populær i forbindelse med stålfiberproduksjon og er mer brukt enn metoden der stålfibre presses ut av plater. Til betongproduksjon blir fibre levert på ulike måter. Det leveres store sekker på opp i mot 1000 kg. Disse er beregnet på de store ferdigbetongfabrikkene. Men man kan også få dem levert i mindre sekker av cirka 20 kg per stykk. Disse er lettere å håndtere, og sekkene er produsert av vannoppløselig papir slik at det bare er å kaste hele sekken inn i blandemaskinen. Deretter er det viktig å blande i så lang tid som det er anvist på sekken slik at man er sikker på at alt papiret er oppløst. Fibrene kan enten komme sammenlimt ved hjelp av et vannoppløselig lim, eller de kan ligge løst i sekken. Førstnevnte krever litt lengre blandetid for å sikre at alle fibre blir løst fra hverandre og jevnt fordelt i hele miksen.



Figur 2.9: Noen typer syntetiske fibre (14)

2.4.2 Spredning av fibre i betongen

Det er essensielt at fibre som blir tilsatt den ferske betongen blir jevnt fordelt og ikke samler seg opp i klumper eller ender opp nederst i blandemaskinen. Stålfibre har en tendens til sistnevnte. For å forminske dette problemet blir fibre tilsatt jevnt under innblanding. Ved tilsetning av fibre i trommelbil anbefales det maksimal hastighet på trommelen samtidig som at fibre tilsettes med en maksimal hastighet på 60 kg/min. Når alle fibre er tilsatt skal satsen blandes i 4-5 minutter på maksimal hastighet (17).

For å kontrollere om fibre er fordelt slik det er ønsket, bruker man en vibrerende maskin med en magnet. Det tas ut prøver mens bilen tømmes. En prøve fra starten av blandingen, en fra midten og en helt til slutt. En oppmålt mengde betong tilsettes maskinen og vibreres over magneten. Deretter skyller man magneten og samler opp fibre. Dette gjøres minst to ganger for å sikre at man får med seg alle fibre. Det hele gjøres likt for de tre prøvene, med lik mengde tilsatt betong. Ved å sammenlikne mengde fiber i de tre prøvene vil man kunne se hvordan fordelingen av fiber er i blanderen (18). Det skal også nevnes at stålfibre er lettere å blande inn i betongen enn andre fibre. Dette skyldes blant annet utformingen, at de er stive og ikke kleber seg sammen, og at de sammenliknet med andre fibre har en relativt stor diameter.

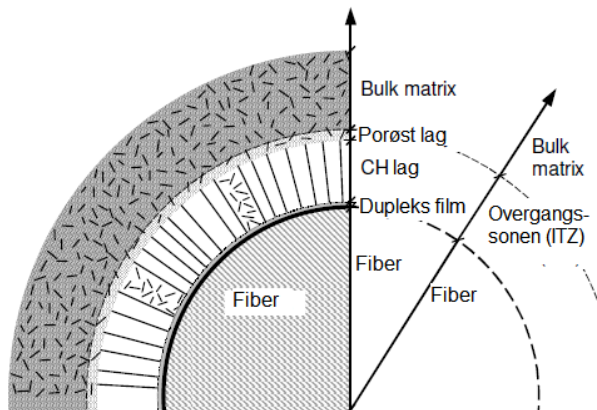
2.4.3 Fibrenes virkning på riss- og sprekkdannelse

Rissdannelse og utviklingen av rissene er en nærmest uunngåelig prosess som foregår i all betong. Det er spesielt områdene mellom tilslag og pasta og betongoverflaten som er utsatt. Helt fra betongen er fersk og uten at den er utsatt for belastning vil det oppstå kryp og segresjon av den ferske betongen, men også termisk ekspansjon. De forskjellige bestanddelene kan ha forskjellig spesifikk varmekapasitet, som vil gi riss når betongen enten

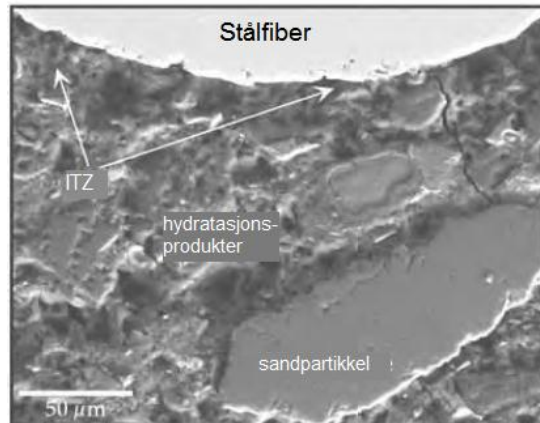
varmes opp av herdeprosessen eller kjøles ned av omgivelsene. Det vil også oppstå riss ved belastning på grunn av tilslagernes og pastaens ulike stivhet. På begynnelsesstadiet karakteriseres rissene som mikroriss, som etter hvert kan utvikles til makroriss og sprekker. Utviklingen av rissene kommer av betongens lave strekkfasthet. Resultatene fra tester som ble utført på 1960-tallet, av Romualdi og Batson, kunne vise til en forbedret strekkkapasitet på betongemner tilsatt fiber. Man trodde derfor at fibrenes forsinkende effekt på utviklingen av mikroriss og sprekker var årsaken til den økte fastheten, og dess tettere fibre ble plassert, det vil si dess høyere volumprosent fiber som ble tilsatt, dess mer motstandsdyktig mot mikroriss ville betongen bli. I ettertid er det blitt poengtert at fiberne som ble brukt i disse forsøkene var relativt store i forhold til sprekkstørrelsen, og mengden fiber som det var mulig å blande inn i betongen begrenset seg til 3,0 volumprosent. Av denne grunnen mener Löfgren (14) at fibre mest sannsynlig ikke kan ha hatt noen innvirkning på den økte strekkfastheten. Löfgren (14) mener derimot at siden Romualdi og Batson brukte indirekte testmetoder, som "sylinder splitt-test", for å beregne strekkfastheten, er det mer sannsynlig at en økt seighet i betongen etter knekking kan være årsaken til økt lastkapasitet. Likevel har senere forsøk, fra 2000-tallet, gjort på mekanikken til mikrofiber, vist at fibre faktisk kan ha en forsinkende effekt på rissdannelsen (14).

2.4.4 Mikrostrukturen rundt fiberen

Utviklingen av betongens mikrostruktur i løpet av herdeprosessen avhenger av flere faktorer. De viktigste er v/c-tallet, komposisjonen av tilslagskornenes størrelse, kjemiske tilsetningsstoffer og hydrasjonsforhold som temperatur og varighet. Tilsetting av fiber vil ikke ha noen innvirkning på hydrasjonsprosessen og det endrer heller ikke mikrostrukturens utvikling. Derimot er heftkraften mellom fiber og pasta, i det som kalles overgangssonens grenseflate (the interfacial transition zone (ITZ)), påvirket av hvordan mikrostrukturen har fått utvikle seg. Figur 2.10 viser en skjematisk beskrivelse av denne sonen. Figur 2.11 er et elektronmikroskopbilde av den samme sonen og vil gi en forståelse av størrelsesforholdene. Det er viktig å forstå denne mikrostrukturen siden den spiller en viktig rolle i fiberbetongmaterialets kapasitet. Faktorer som har en innvirkning i ITZ er "Wall"-effekten, hvilke kjemiske prosesser som finner sted nær den ujevne overflaten og resultatet av "bleeding" som gir ineffektiv kompaktering av kornene rundt store flater som fiberen. Det er funnet at et lite rom rundt fiberen har en tendens til å fylles opp med vann når betongen fremdeles er fersk, og at dette rommet bare delvis vil fylles opp med hydratiserte sementpartikler i løpet av herdeprosessen (14).



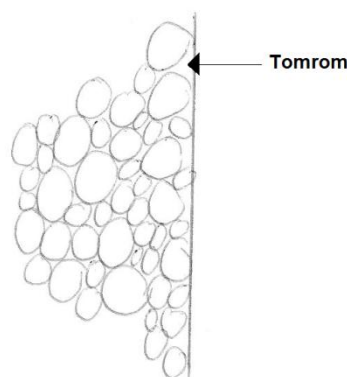
Figur 2.10: Overgangssonens grenseflate (14)



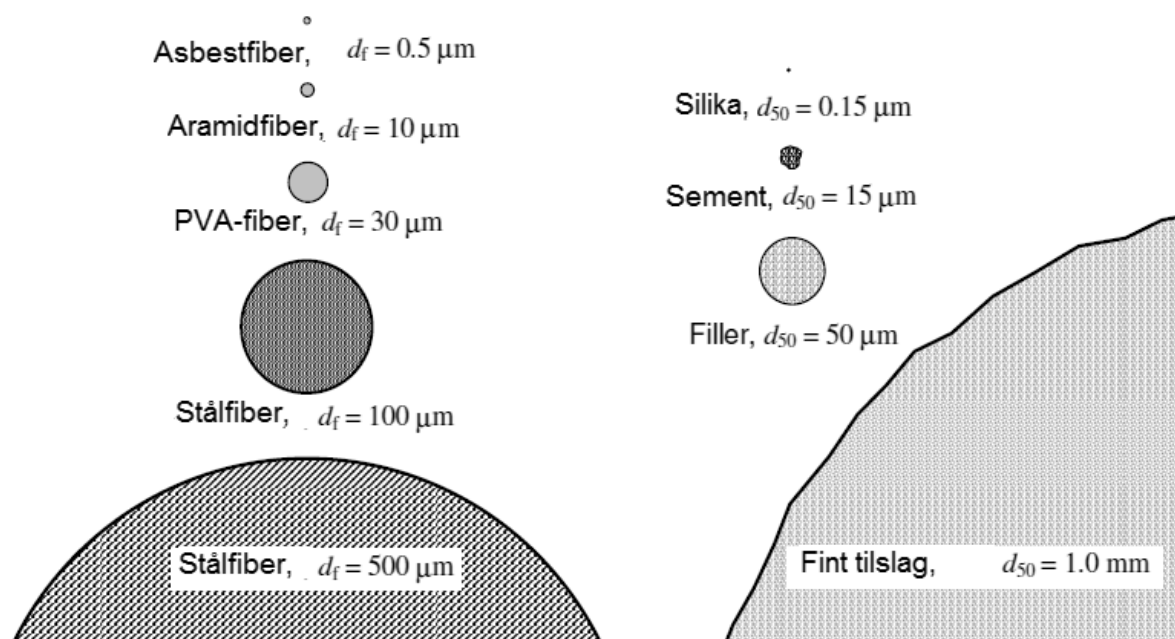
Figur 2.11: Mikroskopisk fotografi av ITZ (14)

Wall-effekt

Wall-effekten beskriver hvordan partikler, som for eksempel sand-, sement- og silikakorn, vil komprimeres og pakkes sammen inntil en vegg, for eksempel inntil en fibers overflate, kontra der hvor det er partikler på alle kanter. I figur 2.12 ser vi at når partiklene pakker seg sammen inntil en fiber, vil det dannes tomrom som ellers ville blitt fylt opp av andre partikler. I litt avstand fra veggen ser vi at mindre partikler kommer inn og fyller opp tomrommene. Riktig variasjon i kornstørrelser vil bidra til å redusere wall-effekten. For eksempel vil silikakorn kunne bidra til økt kompaktering som kan resultere i en økt uttrekkskapasitet for fiberen (14). Fordelene med silika i dette tilfellet er den lille størrelsen, sammenliknet med sement, som gjør at den pakkes tettere, pozzolan-effekten og at silika bidrar til å begrense "bleeding" som igjen fører til bedre kompaktering. I figur 2.13 sammenliknes relative størrelser av betongens bestanddeler.



Figur 2.12: "Wall"-effekten



Figur 2.13: Relative størrelser av betongens bestanddeler (14)

2.5 Fibernes oppførsel når betongen belastes

2.5.1 Før oppsprekking

Plastisk betongs E-modul varierer fra 0 N/mm² og opp mot 5 000 N/mm². Herdet betong har en E-modul mellom 25 000 N/mm² og 40 000 N/mm². Når last blir påført betongen, vil noe av kraften overføres til fiberen. Da er det forskjellen i E-modul som avgjør hvor mye kraft som blir overført. E-modulen forteller oss om forholdet mellom et materiales fasthet og evnen til å motstå elastisk deformasjon. Enkelt fortalt vil det kreve høyere spenning for å deformere et materiale med høy E-modul enn et materiale med lav E-modul. Stålfibre har en E-modul på rundt 210 000 N/mm², mens plastfibres E-modul spenner veldig vidt fra cirka 3500 N/mm² for polypropylen til rundt 800 000 N/mm² for karbon (14). De mest benyttede plastfibrene er polypropylen, og slike fibre vil på grunn av sin lave E-modul kun ha effekt på plastisk betong. Den lave E-modulen gjør at plastfibrene kan forlenges mer enn den herdede betongen og dermed ikke bidra til økt tøyelighet. En stålfiber med høyere E-modul vil derimot få overført kraft fra betongen. Det som skjer når den herdede betongen blir utsatt for laster er at den vil begynne å strekke seg, men de områdene som er i umiddelbar nærhet av stålfiberen vil i begynnelsen ikke klare det. Stålfiberen vil holde igjen og kraften vil overføres fra betongen til fiberen via skjærkraft. Det er fort gjort å tenke at man ved å øke stålfibrenes E-modul vil kunne øke fiberbetongens strekkfasthet, men samspillet mellom de to materialene er mer komplekst enn som så. En økning av fiberens E-modul vil gi en stivere fiber som vil

tøytes mindre ved spenningspåføring. Dette vil bare resultere i en tidligere løsrivelse fra pastaen fordi skjærkreftene i ITZ vil bli for store. En måte å regne ut maksimal strekkspenning, σ_t , og E-modul, E_c , til et sammensatt materiale er å ta hensyn til volumandelene:

Formel 1: $\sigma_t = (V_f * E_f + V_b * E_b) * \epsilon$ og $E_c = V_f * E_f + V_b * E_b$ (14)

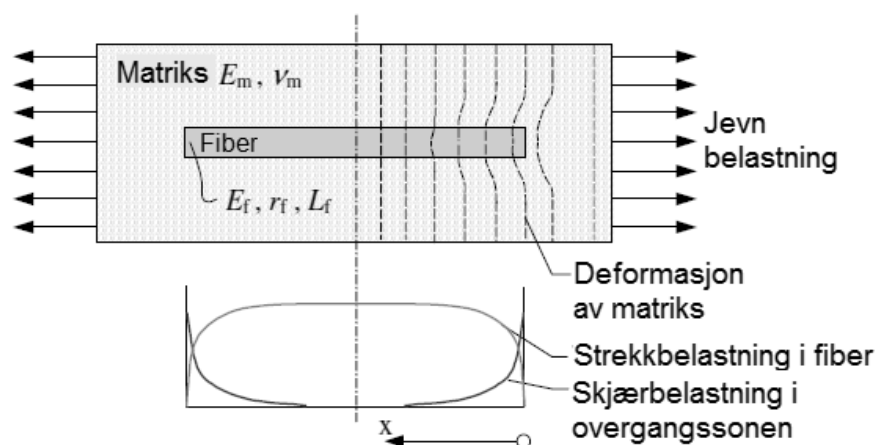
hvor V_f og V_b tilsvarer volumene av henholdsvis fiber og betong, E_f og E_b er bestanddelenes E-modul og ϵ er maksimum elastisitet for materialet med lavest strekkfasthet.

Disse formlene gjelder kun for 2-dimensjonale teoretiske materialer, og tar ikke høyde for heftstyrken mellom fiber og pasta, eller fibrenes plassering i 3 dimensjoner. Ved å modifisere formelen kan også dette tas høyde for:

Formel 2: $\sigma_t = \sigma_{pmaks} * V_b + \eta_{\phi} * \eta_l * \tau_{snitt} \frac{L_f}{d_f} V_f$ (14)

hvor σ_{pmaks} er pastaens maksimale fasthet, η_{ϕ} er fiberens effektive orienteringsfaktor, η_l er fiberens effektive lengdekoefisient, τ_{snitt} er gjennomsnittlig heftstyrke og L_f/d_f er fiberen slankhetstall.

Viktigheten av fiberens utforming for hvordan kraften overføres fra pastaen til fiberen kan beskrives ved hjelp av "shear-lag"-teorien (14). "Shear-lag"-modellen, som er vist i figur 2.14, viser hvordan betongen tøytes og deformeres mer enn stålfiberen når den blir utsatt for strekkrefter. Dette resulterer i at forskjellen mellom betongens og fiberens deformasjon er størst ved fiberens ende og avtar inn mot midten av fiberen. Dette vil gi størst skjærspenning ved fiberens ende, der forskjellen i deformasjon er størst, og avtagende skjærspenning inn



Figur 2.14: "Shear-lag"-modellen (14)

mot midten. Strekkspenningen i fiberen vil øke langs x-aksen.

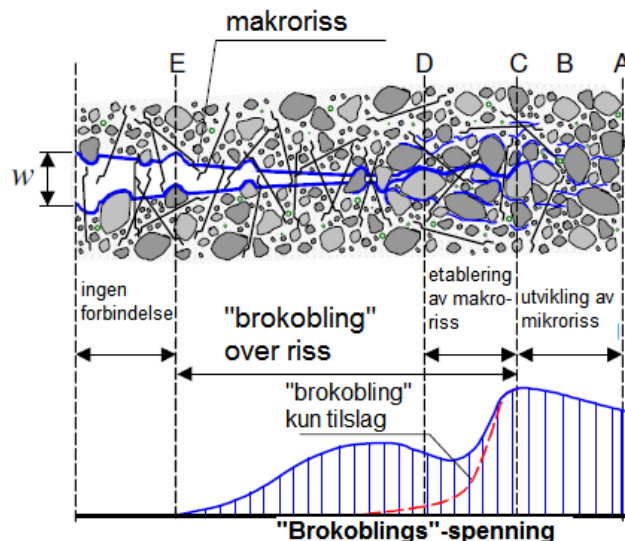
"Shear-lag"-modellen er en enkel modell som tar hensyn til geometri og volumer. Den antar at så lenge fiberen har høyere E-modul enn pastaen vil det sammensatte materialets stivhet øke med fiberens stivhet, volumet av tilsatt fiber og økende slankhetstall. Dette betyr at en lang og tynn fiber vil gi mer bidrag til økt stivhet i betongen enn en kort og tjukk fiber. I vedlegg A viser noen grafer hvordan spenningen i fiberen endres når fiberens E-modul endres, når pastaens E-modul endres og når fiberens slankhetsforhold endres. Også utviklingen av skjærspenningen i ITZ er representert. Vi ser at ved å øke fiberens E-modul vil spenningen i fiberen også øke forutsatt tilstrekkelig heft. Effekten ved økt E-modul for pastaen er ikke like stor på fiberspenningen. Spenningen vil overføres til fiberen tidligere med en stivere pasta, men maksnivået vil bli det samme. Effekten ved endret slankhet er at en fiber med høy slankhet vil få spenningen overført over en kortere distanse enn en fiber med lav slankhet.

2.5.2 Risstdannelsen og oppsprekking

Hvor fort betong sprekker når belastningen overskrider kapasiteten, avhenger av seigheten. To viktige faktorer som avgjør betongens seighet er tilslaget og fiberens evne til å føre krefter gjennom riss ("brokobling") ved hjelp av sin egen kapasitet og heft til pastaen.

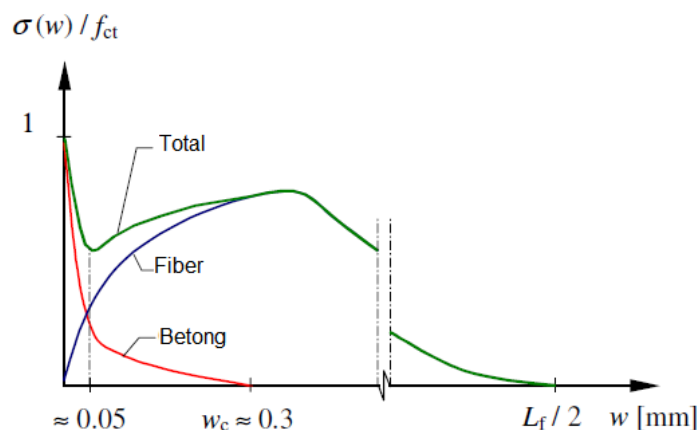
Mikromikrorissenes utvikling i fire stadier (se figur 2.15):

- A Det første stadiet gjelder for betongen når den er ubelastet. Det er allerede en rekke mikroriss i betongen på dette stadiet på grunn av interne krefter forårsaket av kryp, svinn og termisk deformasjon.
- A – C Når betongen så blir belastet vil mikrorissene, i hovedsak de mellom pastaen og tilslaget, begynne å vokse sammen til større riss.
- C – D Ved ytterligere belastning vil mikroriss utvikles til makroriss
- D – E På dette stadiet holdes betongen sammen over rissene ved hjelp av tilslaget og fibre. Spenningen som opptas av betongen vil avta.
- E - Det er ikke lenger noe som holder betongen sammen over rissene.



Figur 2.15: Utvikling av riss i fiberbetong (14)

For normal betong vil det ikke lenger overføres kraft etter at største riss har overskredet cirka 0,3 mm. Fibre vil kunne øke maksimalstørrelsen for største kraftoverførende riss til halve fiberlengden, som for stålfibre betyr at riss opp til 30 mm kan overføre krefter. Se figur 2.16.

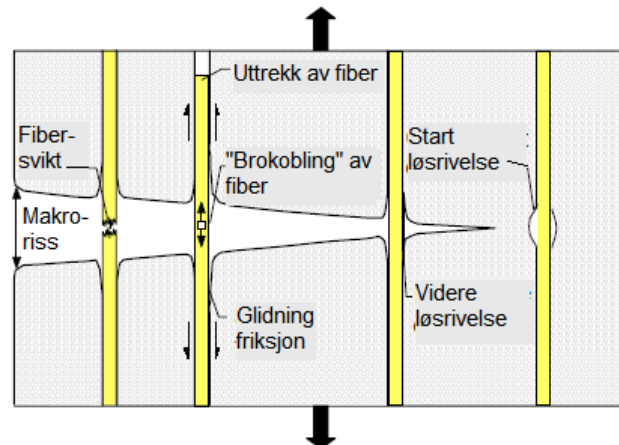


Figur 2.16: Største kraftoverførende riss for normal betong vs. fiberbetong (14)

2.5.3 Fibernes belastningsforløp

For å kunne velge riktig type fiber til betongen er det viktig å forstå hvordan fibre og betong oppfører seg sammen. Fiberbetongens kapasitet er ikke bare avhengig av fibernes plassering, men også fiberens oppførsel med tanke på uttrekk når betongen belastes. Når et riss i betongen utvikler seg og beveger seg mot en fiber, kan den enkelte fibers oppførsel deles inn i fem faser (19):

0. Utgangstilstand uten belastning
1. Lineær fase
2. Løsrivelsesfasen
3. Friksjonsfasen
4. Total løsrivelse/Bruddfasen



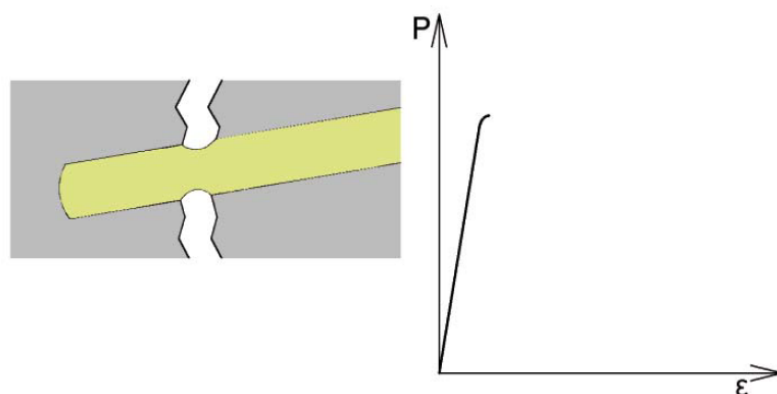
Figur 2.17: Fase 1-4 av fiberens belastningsforløp (14)

Fase 0

Dette er fasen før noe belastning er påført fiberbetongen.

Fase 1

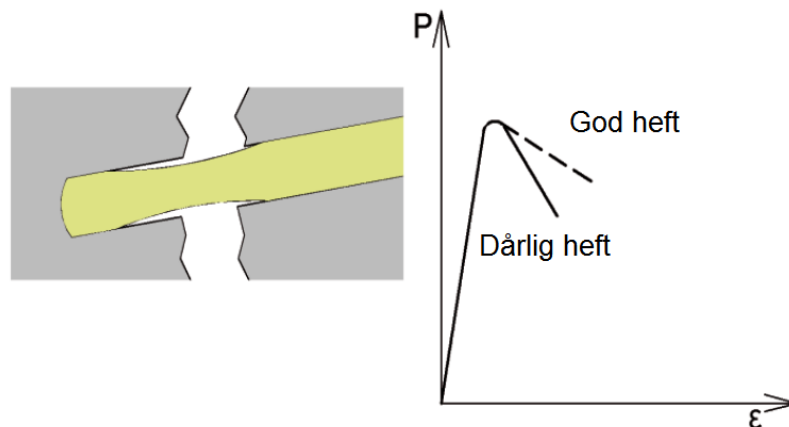
Fase 1 beskriver oppførselen til en fiber i betong som blir utsatt for strekkrefter i det elastiske stadiet. Kraften som absorberes av fiberen er tilnærmet lineært økende. Avhengig av fiberens E-modul, vil kraften som absorberes når det første risset oppstår være lav for fibre med lav E-modul eller høy for fibre som har høyere E-modul enn den omsluttende betongen. Det er ved punktet når betongen er sprukket og kraften er overført til fiberen, at man oppnår maksimal kraftpåkjenning.



Figur 2.18: Fase 1 av fiberens belastningsforløp (19)

Fase 2

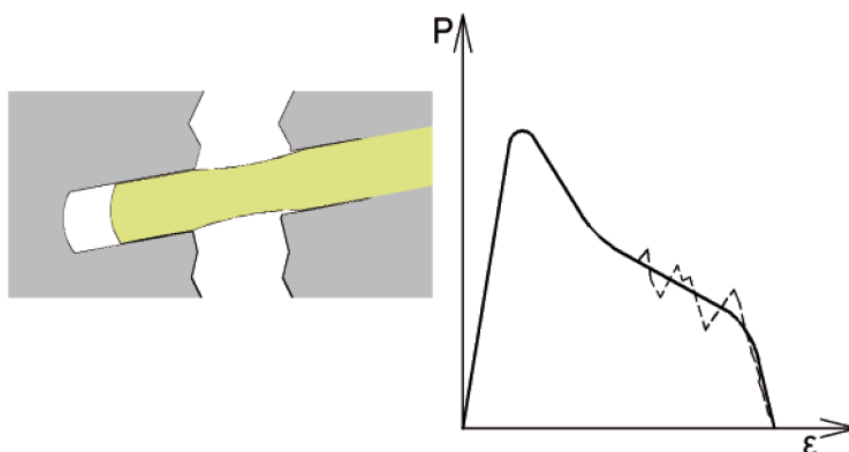
Det er i denne fasen at sementlimet rundt fiberen begynner å løsne. Kraften som er absorbert av fiberen blir mer eller mindre kraftig redusert og varigheten av denne fasen avhenger av fiberens lengde. En lang fiber har mer sementlim å løsne seg fra enn en kort fiber med samme diameter, og vil derfor ha en lenger fase 2 enn den kortere fiberen. Den stiplede linjen beskriver forløpet for en fiber med god heft, mens den brattere linjen representerer en fiber med mindre heft.



Figur 2.19: Fase 2 av fiberens belastningsforløp (19)

Fase 3

Fase 3 oppstår etter at fiberen er løsrevet fra betongen over hele dens lengde. Det eneste som holder igjen nå er friksjon. Kraften avtar tilnærmet lineært frem til fase 4. I praksis vil kraftlinjen være noe mer taggete, vist ved den stiplede linjen, når en fiber trekkes ut.

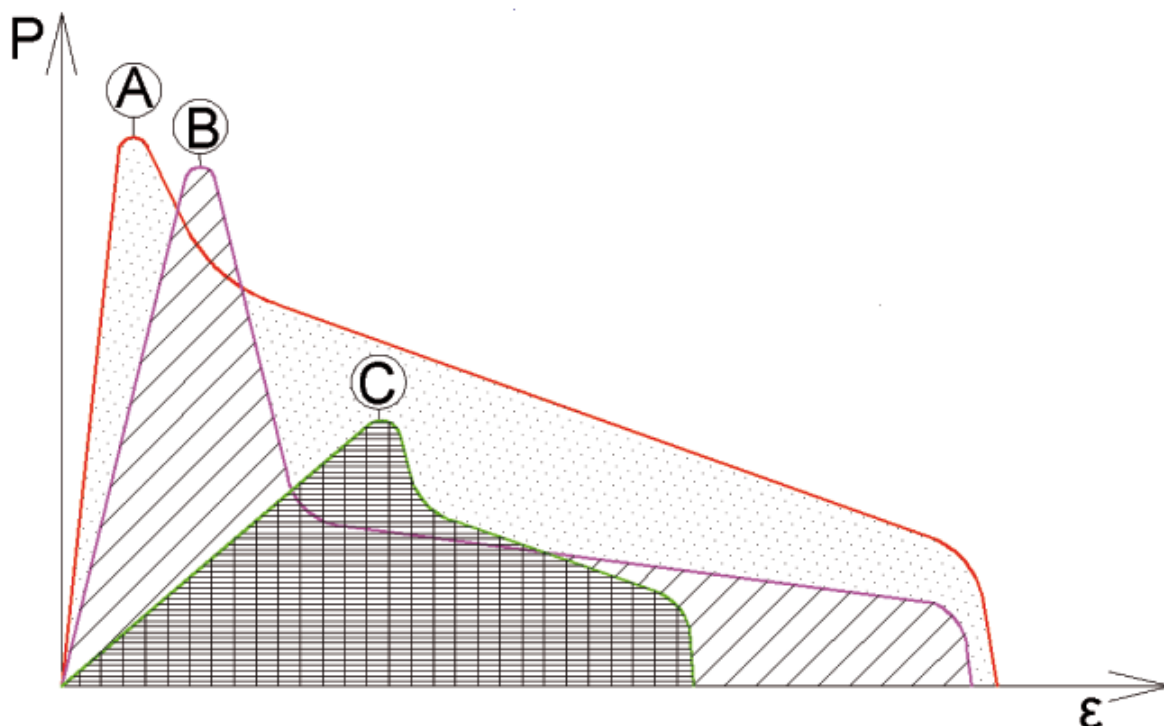


Figur 2.20: Fase 3 av fiberens belastningsforløp (19)

Fase 4

I de fleste tilfeller vil det i denne fasen forekomme en total løsrivelse av fiber fra pasta. Dersom heften og friksjonen er for stor, gjerne på grunn av endeforankring, eller en for tynn fiber, vil vi få et fiberbrudd.

Fiberens egenskaper gir oss mulighet til å begrunne valg av fiber til ulike formål. Egenskaper som E-modul, lengde, tykkelse, overflate og fastholdingskapasitet kan være avgjørende for om en fiber egner seg bedre enn en annen.

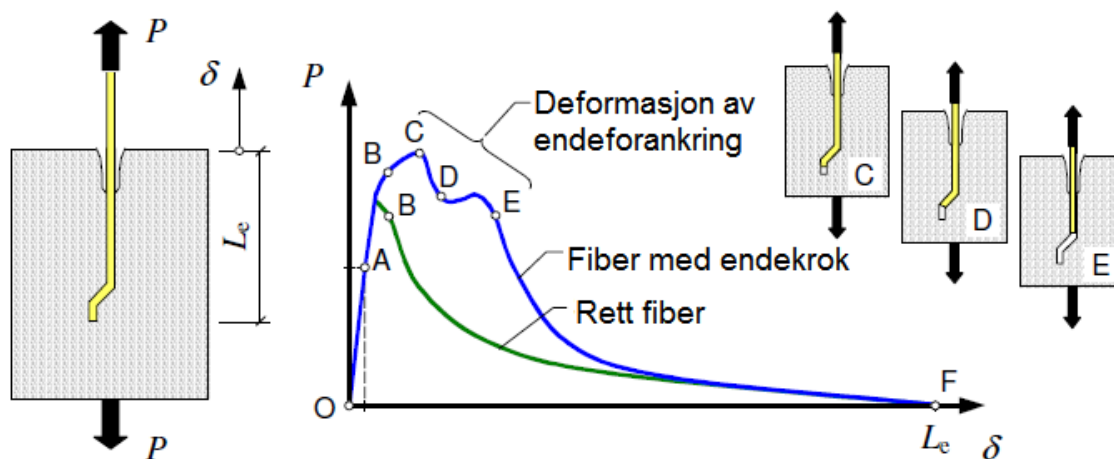


Figur 2.21: Kraftlinjer for tre fibre med ulike egenskaper (19)

Kurve A i figur 2.21 viser kraftlinjen for en fiber med høy E-modul, grunnet den bratte stigningen i fase 1, og god heft, grunnet den relativt lave nedgangen i fase 2. Fase 3 er relativt lang noe som tyder på en lang fiber med høy uttrekksfriksjon (19). Som vi ser er fibrenes geometriske utforming essensiell når det gjelder kapasitet for uttrekk. Endeforankringer, fibertverrsnitt og overflatestruktur er også viktige egenskaper for å sikre god kapasitet. Når det gjelder pastaen er det viktig at den kan dra nytte av fibrenes utforming ved å trenges inn i strukturen og omslutte så mye som mulig av fiberens overflate. I tillegg er fiberens vinkel i forhold til sprekken med på å avgjøre den samlede kapasiteten.

2.5.4 Forskjellen mellom rett fiber og fiber med endeforankring

I figur 2.22 vises energien som kreves for å trekke ut en rett fiber kontra en fiber som har en geometrisk forankring i enden som øker friksjonen mellom fiberen og pastaen. Energien som kreves tilsvare arealet under grafen for hver fiber. Avstanden mellom punktene O og A tilsvare det elastiske området. Dersom belastningen økes ytterligere vil fiberen begynne å løsrive seg fra pastaen ved punkt A til den er helt løsrevet ved punkt B. Da er det bare friksjonen mellom fiberen og pastaen som holder igjen. For fiberen med endeforankring beskriver linjen fra punkt C til E deformasjonen av endeforankringen, det vil si når endekroken rettes ut ved at fiberen trekkes ut av betongen. Vi kan se av de to grafene at endeforankringen fører til at det kreves mer energi for å trekke ut fiberen, noe som betyr at disse fibre vil gi en seigere betong. Faren er imidlertid større sjanse for fiberbrudd på grunn av den økte friksjonen.



Figur 2.22: Energien som kreves for å trekke ut en fiber (14)

2.5.5 Mikrofiber vs. makrofiber

Tabell 2.3: Hovedforskjeller mellom mikrofiber og makrofiber

Mikrofiber	Makrofiber
Lengde mindre enn tilslaget største diameter	Lengde større enn tilslaget største diameter
Diameter på størrelse med et sementkorns diameter	Diameter større enn et sementkorns diameter
	Slankhetstall mindre enn 100
Virkningen gjelder først og fremst til og med utviklingen av mikroriss	Virkningen gjelder først og fremst fra og med utviklingen av makroriss

Ved å sammenlikne to prøver av fiberbetong med lik volumprosent av fiber, den ene med mikrofiber og den andre med makrofiber, vil det i betongen tilsatt mikrofiber kunne være opp til flere tusen ganger flere fibre per cm^2 enn i betongen med makrofiber. Dette skyldes at vekten av én makrofiber tilsvarer vekten av mange flere mikrofiber. Tabell 2.4 beskriver hvor mange fibre, n_f , man omtrentlig kan regne med å finne i hver cm^2 av betongen når tilsatt fibermengde, V_f , er 1 % av den totale betongvekten. Hvis vi igjen ser på figur 2.15 viser avstanden fra A til C området hvor mikrorissene oppstår og utvikler seg til makroriss. Mikrofibrene vil, på grunn av sitt store antall, ha større sannsynlighet for å kunne krysse mikrorissene og dempe utviklingen av disse. Som for makrofiber kreves det et høyt slankhetstall og en høy stivhet for at mikrofibrene skal kunne dempe utviklingen av mikroriss på en mest mulig effektiv måte. Makrofibrene vil derimot gjøre større nytte når rissene har utviklet seg til makroriss, og mikrofibrene ikke lenger er lange nok til å overføre kraften gjennom risset.

Tabell 2.4: Oversikt over antall fibre i betongen basert på fiberstørrelsen (14)

	"Pitch" Karbon	"Pan" Karbon	Asbest	Polypropylen	PVA	Stål Mikrofiber	Ordinære Stålfibre
Diameter [μm]	14-18	6-10	0,02-25	18	12-41	50-150	250-1 050
Lengde [mm]	3-12	3-6	1-5	10-25	4-12	3-15	25-60
n_f [ant./ cm^2]	2 500	10 000	>50 000	2 000	900	30	2

3. Forsøksplaner og metode

3.1 Laboratoriarbeid

En sentral del av denne oppgaven er forsøkene som ble utført på laboratoriet. Det innebar miksing og støping av mørtel og trykktesting av terninger. Reseptene som ble brukt er basert på sprøytebetong da stålfibre er mye brukt sammen med denne type betong, og tilslagssammensetningen (0-8 mm) også passet bra med kapasiteten på miksebollen.

Betonglaben på UMB er preget av lite oppfølging og er dermed mangelfull på mange områder. Den første tiden gikk med på å undersøke hva som var tilgjengelig av utstyr, og hva som eventuelt måtte anskaffes. Det viste seg at mye av det utstyret man anser som primært for en betonglabb ikke var å oppdrive på universitetets område, og det var heller ikke like lett å få tilgang til dette på egenhånd. Dette være seg for eksempel siktesats, luftmåler og passende utstyr for tørking av og kontroll av fuktighet i sand.

3.1.1 Sprøytebetong

Sprøytebetong benyttes i dag i hovedsak der hvor det ellers ville vært nødvendig med kompliserte forskalinger for å få jobben gjort. Eksempler på dette er først og fremst buede former som tunneltak og buede vegger i form av for eksempel tanker. Også rassikring av fjellsider hvor man har fjellsiden å sprøyte mot er velegnede bruksområder for sprøytebetong. Metoden benyttes også ved reparasjonsarbeid hvor forskaling ikke er mulig, for eksempel på broer som er skadet av frostsprengning eller salt-/korrosjonsskader. Det skilles mellom to metoder av sprøytebetong, henholdsvis tørr-metoden og våt-metoden. Tørr-metoden går ut på at en tørr miks av sement, tilslag og eventuelle tilsetningsstoffer og -materialer pumpes via en slange til spøytedysen der det blandes med vann. Blandingen sprøytes så på underlaget i en hastighet på 100 m/s. Tørrmetoden benyttes for det meste til reparasjonsarbeid. Våt-metoden er den mest brukte sprøytebetongmetoden og her er betongen ferdigblandet før den pumpes til dysen og ut. Man har derfor kontroll på v/c-forholdet og kan enkelt dokumentere hvor mye vann som er blandet inn i betongen. Sprøytebetongen er kun avhengig av å ha én flate man kan sprøyte på i motsetning til konvensjonell betong som må ha forskaling på flere sider. Dette er en kostnadsreduserende fordel, men med tanke på at man trenger mye sement i blandingen, samt at utstyret som trengs for å sprøyte betongen er kostbart, er som regel ikke de økonomiske aspektene hovedårsaken for å velge sprøytebetong.

Kriteriene for at det skal være mulig å få betongen til å feste seg til en overflate uten bruk av forskaling er at betongens v/c-tall er forholdsvis lavt, maks 0,45 for våtmiks (20). Er betongen for våt vil den begynne å sige istedenfor å holde seg på plass, mens en for tørr betong vil ikke ha den klebeeffekten som er nødvendig for å henge fast til overflaten.

Silika i sprøytebetong

En av ulempene ved bruk av sprøytebetong er at ikke all betongen fester seg til overflaten som skal behandles. Noe av betongen vil prelle av og forårsake søl og gris på områdene rundt, og ikke minst prelltap. Ved å tilsette silika i kombinasjon med SP-stoff vil problemet bli redusert. Silikaen bidrar til at betongen blir tettere og mer klebelig, noe som gjør det lettere å sprøyte flere lag på vertikale flater som vegger og horisontale flater som tak uten at betongen siger. Dette fører også til at man kan sprøyte det neste laget tidligere og dermed spare tid. Grunnet mindre søl vil det ved bruk av silika og SP-stoff også bli redusert arbeidsmengde i forbindelse med vasking og opprydning etter sprøytearbeidet (21).

3.1.2 Materialer som ble brukt i forsøket

Sement

Sementen som ble benyttet var av type Norcem Standard FA med 20 % flyveaske. Det var én sekk tilgjengelig i laboratoriet da arbeidet startet. Denne holdt til å støpe alle 48 terningene for 28-døgns fasthet, men det måtte anskaffes en ny sekk for støpning av 7-døgns-terningene. Den eldste sekken var forseglet og tett, og innholdet viste ingen tegn til å ha vært i kontakt med fuktighet. Det antas at innholdet i begge sekkene har hatt samme kvalitetsnivå, og i og med at terninger som ikke har inneholdt sement fra samme sekk ikke har blitt direkte sammenliknet anses det ikke som noe problem at det var en aldersforskjell på sementen.

Sand

Sanden, type 0-8 mm, ble hentet gratis hos Franzefoss på Vinterbro noen dager før de første blandningene skulle gjøres. Dette var i midten av februar, så sanden var frossen og inneholdt en god del vann, antageligvis mellom 10 og 15 %. Av mangel på tørkemuligheter ble sanden lagret i plastdunker inne på labben så lenge blandingsarbeidet pågikk. Dette førte til at fuktighetsnivået varierte enormt fra toppen av dunken til bunnen ettersom den øverste sanden ble tørket av luften, mens resten av vannet sank ned mot bunnen. I forbindelse med betongblandingen ble det til hver blanding tørket 500 gram sand, ved hjelp av en kokeplate og en stekepanne, for til en hver tid å vite fuktnivået i sanden som ble brukt. Hver dag ble det

blandet fire ganger, og det viste seg at fuktnivået som regel varierte fra 5-6 % i sanden som lå i toppen av dunken, og ble benyttet til den første blandingen, til 12-13 % for sanden som ble brukt i den siste blandingen. Av denne grunn ble det veldig vanskelig å beregne 100 % nøyaktig vanninnhold i resepten noe som kan føre til variasjon i v/c-forholdene mellom de fire blandingene. Tørking av sanden med stekepanne og kokeplate var veldig tidkrevende i og med at det tok cirka én time å tørke 1 kg sand, og det ville derfor tatt alt for lang tid å tørke de 100 kiloene med sand som gikk med til forsøket. Det ble imidlertid gjort et forsøk på mengdetørking av sanden ved å spre den utover et bord og la den ligge over natten. Dette ville i det minste gi et jevnere fuktnivå enn det som ble oppnådd i dunkene. Det viste seg ikke å være så effektivt som ønskelig, og det ble kun med det ene forsøket. Grunnet manglende utstyr til å foreta kontroll av korngradering og finstoffmengde er det kun antatt at disse har vært like gjennom hele forsøket slik at det ikke skulle utgjøre noen forskjell på resultatet.

SP-stoff

Sp-stoffet som ble brukt i forsøkene var av typen Dynamon SX-N levert av Rescon Mapei. Sp-stoffets hovedeffekt er å redusere sement- og silikakornenes polaritet. Ved å legge seg rundt hvert enkelt korn og lage en hinne med negativ ladning reduseres polariteten som gjør at kornene tiltrekkes av hverandre. Dette reduserer kornenes tendens til å klumpe seg, og vil dermed bidra til at betongen får mere flyt og bedre bearbeidelighet (5). Det er i hovedsak tre grunner for å tilsette, SP-stoff, i den ferske betongen.

1. For å kunne ha et lavere v/c-tall, men samtidig beholde samme bearbeidelighet.
2. For å kunne beholde det opprinnelige v/c-forholdet, men øke bearbeideligheten.
3. For å redusere pastamengden i betongen uten å redusere de mekaniske styrkene.

Det siste punktet vil bidra til en lavere kostnad på grunn av mindre sement samt mindre svinn. Det er viktig å presisere at det ikke er SP-stoffet i seg selv som fører til mindre svinn (6), men det faktum at det er tilsatt mindre vann i betongen som kan fordampe. Med andre ord vil mer av det totale vanninnholdet bidra til hydratasjonen av betongen. Man vil også kunne dra nytte av redusert varmeutvikling både fordi SP-stoffet virker retarderende, og at det er tilsatt mindre sement (22). Disse fordelene kan resultere i mindre rissdannelse i betongen.

Andre materialer

I tillegg til sement, sand og SP-stoff ble det brukt stålfiber av type Dramix, levert av Unicon på Vinterbro. Mer informasjon om disse produktene i vedlegg F.

3.1.3 Utstyr til støpning og trykktesting(i henhold til NS-EN 206-1:2000 (23))

- Kenwood Classic Major KM635 m/ K-visp. Kjøkkenmaskin
- Mettler PM4000. Vekt, nøyaktighet: 0,01 gram

Utvidet utstyrsliste finnes i vedlegg E.

3.1.4 Resepter

Tabell 3.1: Resepter som ble brukt i forsøkene

Serie	Sement (g)	Sand (g)	Vann (ml)	v/c	SP-stoff (ml)	Silika (%)	Fiber (g)
UU	500	1650	225	0.45	5	-	-
SU	500	1650	225	0.44	5	3	-
UF	500	1405	225	0.45	5	-	50
SF	500	1405	225	0.44	5	3	50

Symbolforklaringer: UU = Uten silika, uten fiber. SU = Med silika, uten fiber.

UF = Uten silika, med fiber. SF = Med silika, med fiber.

Reseptene som er beskrevet i tabellen over gjelder for innholdet i én terning á én liter(100x100x100 mm). Tilsatt silika er oppgitt i prosent av sementvekten, mens fibrene er oppgitt med reel vekt.

3.1.5 Støpeserier

Det ble i alt støpt åtte ulike serier av de fire ulike reseptene. Til sammen ble dette 48 terninger med 28-døgns fasthet, 12 av hver resept, og 24 terninger med 7-døgns fasthet, 6 av hver resept. Dimensjonen på terningene som ble støpt var 100x100x100 mm. På grunn av miksebollens størrelse var det kun volum nok til å mikse betong til tre terninger av gangen. Dette passet bra med tanke på at terningsformene som ble brukt også hadde rom til tre terninger. På denne måten vil i det minste tre og tre av terningene fra den samme serien ha tilnærmet helt lik blanding. Av de åtte seriene var fire støpt med hensyn på 7-døgns fasthet og fire med hensyn på 28-døgns fasthet. Den første serien er ble støpt uten hverken silika eller fiber. Dette var for å ha en kontrollbetong, et "nøytralt" utgangspunkt med tanke på fasthet. I serie to ble det tilsatt silika, lik 3 % av sementvekten, som siste ingrediens. Den tredje serien

er uten silika, men det ble tilsatt 50 gram stålfiber, til hver terning, som siste ingrediens. I den fjerde serien er det tilsatt både silika og fiber, det vil si 3 % silika og 50 gram fiber til hver terning.

3.1.6 Fremgangsmåte i forbindelse med behandling av fersk betong

Det ble det tørket en liten mengde sand før hver blanding, tilsvarende tre terninger, for å få en viss kontroll på fuktighetsnivået i bøtta Sandmengden ble regnet ut med hensyn til fuktinnholdet, veid opp til nærmeste gram og så plassert i blandebollen. Deretter ble sementen veid opp og puttet i bollen. Maskinen ble startet slik at sand og sement ble mikset til en jevn blanding før vannet ble tilsatt. Da vannet hadde spredt seg ut i blandingen ble SP-stoffet tilsatt og maskinen sto så og mikset i fem minutter til den ferdige blandingen ble helt i støpeformene. I de blandingene som inneholdt silika ble det etter tilsatt SP-stoff kun mikset i ett minutt før silika ble tilsatt. Silikaen ble tilsatt jevnt i bollen for å sikre god spredning, for så å bli mikset i fem minutter. De blandingene som inneholdt fiber ble fiberen mikset i to minutter. Da blandingen var ferdig ble betongen plassert i dieselsmurte stålformer vist i figur 3.1. Prosessen med å plassere betongen i formene ble fulgt etter NS-EN 12390. Det vil si at betongen ble plassert i tre lag, hvert lag ble staket 25 ganger med en 16 mm stålstav for så bli rettet av med en murskje. For å sikre likest mulig innhold i alle de tre terningene foregikk plasseringen slik at det først ble fylt 1/3 i den første terningen, så 1/3 i den andre og så 1/3 i den tredje. Det samme ble gjort for lag nummer to og tre også. Dette ble gjort for å sikre at dersom blandingen var noe ulik i toppen og bunnen av bollen, ville forskjellen bli eliminert når betongen kom i formene. Denne metoden viste seg spesielt viktig for blandingene som



Figur 3.1: Støpeformene som ble benyttet i forsøket

inneholdt fiber da stålfibrene hadde en tendens til å synke til bunnen av bollen. Hadde ikke betongen blitt fordelt lagvis i formene kunne det ført til at terning nummer en nesten ikke ville inneholdt fiber i det hele tatt, mens terning nummer tre ville fått mesteparten av den tilsatte fiberen. Det var også noe vanskeligere å komprimere betongen som inneholdt fiber enn de som ikke hadde fiber. Fiberen opplevdes nærmest som en seig klump i betongen og det var vanskelig å unngå at fibrene ble noe stampet ned av stålstaven. Etter at betongen var plassert i formene ble den avrettet med en murskje før terningformene ble plassert på en rett flate i tette plastposer slik at overflaten ikke skulle tørke ut og sprekke opp. Slik herdet terningene i ett døgn før de ble plassert i vannbad i henholdsvis 6 og 27 døgn. Det antas at vannbadet hadde en jevn temperatur på 18 – 20 °C i disse døgnene. Dette ble ikke målt, men romtemperaturen i rommet skal ha vært relativt jevn i hele perioden og eventuelle små variasjoner i lufttemperaturen ville gitt heller mindre variasjoner i vanntemperaturen. Norsk standard krever at vanntemperaturen skal være 20 °C, så det eventuelle avviket må anses godkjent da resultatene ikke skal måles opp mot andre forsøk. Det har uansett vært like forhold for alle terningene slik at det ikke skal ha noen ting å si for sammenlikningen mellom disse. Under følger en liste med viktige punkter for å få likest mulig terninger:

- Fordele betongen fra bollen likt i de tre formene
- Komprimere i henhold til NS-EN 12390
- Passe på at betongen fyller hele forma, også ut i hjørnene
- Spre fiberarmeringen jevnt i hele terningen
- Sørge for pene overflater

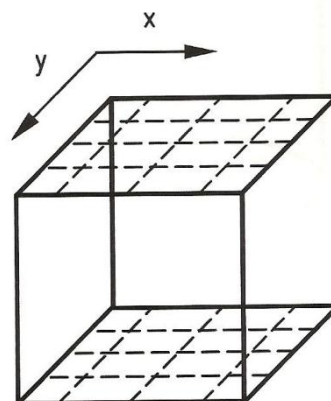
3.1.7 Fremgangsmåte i forbindelse med behandling av herdet betong

Etter at herdingen hadde foregått i henholdsvis 7 og 28 døgn ble terningene tatt ut av vannet for å trykktestes. Formene ble tatt fra hverandre og terningene ble skilt fra formene. Dette viste seg i noen tilfeller å være litt vanskelig da noen av terningene hang godt fast i formene og måtte løsnes ved å sette murskjeeen mellom terningen og formen for så å slå med en hammer til de løsnet. Noen av terningene fikk noen små skader av dette da litt av betongen hang igjen i forma. Fremgangsmåten videre var først å identifisere hvilke flater som skulle fungere som trykkflater, altså toppen og bunnen av terningen. Noen av støpeformene hadde en liten fordypning i den ene siden som markerte hvilken side av terningen som skulle peke opp når den ble plassert i trykkmaskinen. Det var imidlertid ikke alle formene som hadde dette, og det var derfor nødvendig å definere en topp- og bunnside på de andre terningene slik

at alle terningene skulle ha likest mulig utgangspunkt. Det var ikke vanskelig å identifisere hvilken av sidene som hadde blitt avrettet med murskje og som hadde hatt minst beskyttelse. Plasten som skulle hindre uttørking det første døgnet hadde i noen tilfeller satt fra seg noen merker som gjorde denne overflaten litt ujevn. Ujevnheten overskred imidlertid ikke standardens krav på maks 3 %. Siden det kreves at trykkflatene er så jevne som mulig, ble denne flaten sammen med den motstående flaten to av sideflatene. De andre flatene var vanskelige å skille fra hverandre og det var derfor tilfeldig hvilke to av de fire som ble topp og bunn. Neste steg var å måle og regne ut terningens gjennomsnittlige tverrsnittsareal. Det ble gjort etter tillegg B i NS-EN 12389-3 (24), vist i figur 3.2. Det ble målt tre steder i x-retning på toppflaten og tre steder i x-retning på bunnflaten. Gjennomsnittet av de seks målingene ble tverrsnittsarealets x_m . Det samme ble gjort i y-retning for å finne y_m . Gjennomsnittlig tverrsnittsareal blir da:

Formel 3:
$$A_c = x_m * y_m \quad (24)$$

Terningene ble så plassert, i trykkmaskinen vist på figur 3.3, på et kvadratisk underlag av stål som var noen millimeter større enn terningen selv. Maskinens topplate, som er "løs" og kan bevege seg i det vertikale planet, ble senket til terningen satt fast. Hjulet som åpner og stenger ventilen ble skrudd til og pumpingen med staven kunne starte. Frem til trykket nådde 5 -10 tonn ble det pumpet så fort som mulig, men etter 10 tonnsmerket var nådd, da det begynte å merkes litt motstand, ble pumpehastigheten senket til én syklus i sekundet. Dette tilsvarte en trykkøkning på cirka 1-2 tonn per syklus. Når terningene sprakk, og det ikke var mulig å øke trykket noe ytterligere, ble pumpingen stoppet, og maksimalt trykk ble notert. Deretter ble prosessen startet på nytt med neste terning.



Figur 3.2: Stiplede linjer som angir posisjonene for måling av terningers belastningsflate (24)



Figur 3.3: Trykktestmaskinen som ble benyttet i forsøket

3.2 Kontrollmetoder

3.2.1 Statistisk signifikans

Det kan ofte være vanskelig å si om utfallet av et eksperiment eller forsøk ble slik det ble av en spesiell årsak eller av ren tilfeldighet. Dersom man, med høy sannsynlighet, kan fastslå at et statistisk resultat ikke har fremkommet ved en tilfeldighet, sier man gjerne at resultatet er statistisk signifikant, og man kan som regel dermed avkrefte nullhypotesen(H_0). Nullhypotesen er den påstanden man ønsker å teste i en signifikans-test. Vanligvis er nullhypotesen en påstand om at det ikke eksisterer noen effekt eller forskjell i forsøket som er gjort. En signifikans-test er designet for å vurdere styrken av bevisene mot nullhypotesen. Statistisk signifikans kan også fortelle hvor sikker man kan være på at det eksisterer forskjeller eller sammenhenger mellom to eller flere resultater. En nullhypotese er en hypotese som typisk sier at det ikke er noen forskjell mellom to målte tilfeller, i motsetning til den alternative hypotesen(H_A) som sier at det er forskjell. Signifikansnivået man velger, før analysen blir gjort, avgjør hvor tydelige bevis man trenger for å avkrefte nullhypotesen. Jo høyere signifikansnivå man ønsker, jo sterkere bevis trenger man. Den kritiske p-verdien(sannsynlighets-verdien) forteller, med utgangspunkt i signifikansnivået, hvor stor sannsynligheten er for å oppnå de samme dataene og resultatene igjen sett at nullhypotesen er sann. Det vil si at dersom p-verdien er veldig lav tyder det mest sannsynlig på at

nullhypotesen er feil og kan avkrefte. Men det er også en mulighet for at de dataene man har hatt tilgjengelig er høyst uvanlige, og det er derfor sjeldent at man med hundre prosent sikkerhet kan avslå nullhypotesen. Som regel velger man et signifikansnivå på 0,05, eller 5 %. Dette avhenger selvsagt av hvilke data man ønsker å kontrollere for signifikans. Er det medisinske data, kreves det gjerne et enda høyere signifikansnivå. Dersom man velger et signifikansnivå på 5 % kan man, om p-verdien er mindre enn 0,05, med 95 % sikkerhet avslå H_0 og konkludere med at resultatet ikke er tilfeldig. Verdiene for p er gitt i en standard normal-tabell og det kreves at man regner ut en Z-verdi på bakgrunn av de statistiske dataene for å kunne plukke ut p-verdien fra tabellen.

3.2.2 Student's T-test

En hver statistisk test som benytter en t-fordeling kalles en t-test. T-fordelingen er lik normal-fordelingen ved at de begge er symmetriske om 0 og har noenlunde lik form. De er riktig nok noe forskjellig ved at t-fordelingen i utgangspunktet er noe lavere og har litt større "haler" på sidene. T-fordelingen bestemmes imidlertid av en parameter kalt frihetsgraden. Frihetsgraden forteller hvor mange objekter som er presentert i forsøket, eller hvor stort forsøksomfanget har vært. Dess større omfang, eller dess flere objekter, desto mer vil t-fordelingen nærme seg normal-fordelingen. En av de mest brukte t-testene er "Student's t-test", oppfunnet av William Gosset hvis kallenavn var "Student". Denne statistiske testen brukes for å sammenlikne gjennomsnittsverdier i to prøver som har en nominell variabel og en målbar variabel. I denne oppgaven vil den nominelle variabelen være om terningene inneholder silika eller ikke, og om de inneholder fiber eller ikke. Den målbare variabelen er selvsagt terningens fasthet. Frihetsgraden finnes ved å legge sammen antallet objekter for de to prøvene å trekke fra to. Nullhypotesen for en "Student's t-test" vil ta utgangspunkt i at det ikke er noen forskjell i de to prøvenes gjennomsnittsverdi, altså at gjennomsnittsfastheten er den samme for to forskjellige betongresepter. Formelen som brukes til å regne ut den statistiske t-verdien har forskjellen mellom de to gjennomsnittsverdiene i telleren. Det betyr at jo større forskjell det er mellom de to, jo større vil t-verdien bli. Formelens nevner er summen av standardfeilen. Det vil si at nevneren vil bli lavere ved en synkende varians, og/eller et økende utvalg. Størrelsen på testmaterialet har derfor mye å si for om resultatet vil være signifikant eller ikke.

4. Resultater

Av de 72 terningene som ble produsert, var 71 av tilfredsstillende karakter etter endt herdeperiode. Én terning hadde fått store skader da den ble tatt ut av støpeformen og kunne derfor ikke brukes. Når alle resultatene var klare ble det regnet ut gjennomsnittsverdier og standardavvik for hver betongtype. Disse verdiene ble så sammenliknet med hverandre, ved hjelp av statistiske beregninger for å finne ut om prøvene var statistisk signifikante, og om det var mulig å fastslå forskjeller i trykkfasthet for de ulike betongtypene. Formlene som er benyttet til statistikkberegningene er:

Formel 4:

$$T = \frac{|X_1 - X_2|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (25)$$

Her er X_1 og X_2 , gjennomsnittsverdier for henholdsvis serie 1 og 2. S_1 og S_2 er standardavvik, og n_1 og n_2 er antall objekter i de to seriene. Denne formelen brukes i forbindelse med "Student's" t-test for å regne ut t-verdien som skal sammenliknes med tabellverdien for ønsket signifikansnivå. Den kalkulererte verdien må være høyere enn tabellverdien for at resultatet skal være signifikant. Tabellen for t-fordelingen er vedlagt i vedlegg C.

Formel 5:

$$|X_1 - X_2| > r * \frac{(S_1 + S_2)}{2} \quad (2)$$

Denne formelen, kalt signifikanstest, er ment å kunne gi en pekepinn på om forskjellen mellom to ulike prøvesett er signifikant eller ikke. Formelen er avhengig av størst mulig forskjell i prøvenes gjennomsnittsverdier og at standardavviket er minst mulig for å oppnå statistisk signifikans. Den tar imidlertid ikke hensyn til prøvens størrelse slik "Student's" T-test gjør og det legges derfor ikke like stor vekt på denne formelen. I formelen settes r lik 1 og gir ikke noe bidrag i dette tilfelle.

I tillegg til disse formlene ble det også utført en t-test med Excels innebygde funksjon. Denne regner ut en p-verdi som viser sannsynligheten for at H_0 er sann. P-verdien må være under verdien for det valgte signifikansnivået for at H_0 kan forkastes på det ønskede signifikansnivå.

Testresultater utført i Excel ligger under vedlegg B.

4.1 7-døgns fasthet

Resultater av trykktestingen etter 7 døgn:

Fullstendig oversikt over trykkprøveresultater for alle terningene kan finnes i vedlegg B.

Tabell 4.1 viser gjennomsnittlig trykkfasthet til de fire seriene etter syv døgn herding i vannbad. Det foreligger seks terninger fra hver serie, og standardavvik er regnet ut for hver serie.

Tabell 4.1: Gjennomsnittlig trykkfasthet og standardavvik for 7-døgns fasthet

Serie	Gjennomsnittlig trykkfasthet	Standardavvik
UU7	37,9	2,0
UF7	38,1	3,9
SU7	37,5	3,3
SF7	38,7	1,9

4.1.1 Statistiske tester av resultatene

Av tabellen kan vi se at de fire gjennomsnittsverdiene ikke er like. Likevel må det utføres en statistisk test av resultatene for å undersøke signifikansnivået til forskjellene. Dette gjøres basert på metodene som er beskrevet ovenfor. Tabell 4.2 viser resultatene av de statistiske testene som er utført. "Student's" t-test vises til venstre, og t-testen fra Excel vises til høyre. Det er valgt et signifikansnivå på 95 % og frihetsgraden for hver test har hvert 10. Følgende null-hypotese og alternativ hypotese er valgt for alle testene:

H_0 : Det er ingen forskjell i fasthet mellom de to seriene

H_A : Det er forskjell i fasthet mellom de to seriene

Tabell 4.2: Resultater av "Student's" T-test og Excel T-test for 7-døgns fasthet

T-TEST				
Tester	Kalkulert T-verdi	T-verdi fra tabell	Sannsynligheten for at H_0 er sann	
UU vs UF	0,095	2,228	0,927	H_0 er sann dersom tallet i kolonnen til venstre er større enn 0,05
UU vs SU	0,302		0,770	
UU vs SF	0,676		0,515	
UF vs SU	0,310		0,763	
UF vs SF	0,331		0,750	
SU vs SF	0,798		0,448	

"Student's" t-test

Av "Student's" t-test ser vi at ingen av de kalkulerte t-verdiene er høyere enn tabellverdien for 95 % signifikansnivå.

"T-test"

Vi ser at den kalkulerte p-verdien er høyere enn 0,05 i alle tilfeller. Sannsynligheten for at H_0 er sann er for stor og H_0 kan dermed ikke forkastes i noen av tilfellene.

Tabell 4.3: Resultater av statistisk signifikans for 7-døgn fasthet

Tester	Statistisk signifikans		
	Dersom $|X_1 - X_2| > r * (S_1 + S_2)/2$ vil resultatet være signifikant		
	$|X_1 - X_2|$	$r * (S_1 + S_2)/2$	r settes lik 1
UU vs UF	0,17	2,99	Ikke signifikant
UU vs SU	0,48	2,68	Ikke signifikant
UU vs SF	0,76	1,95	Ikke signifikant
UF vs SU	0,65	3,64	Ikke signifikant
UF vs SF	0,59	2,91	Ikke signifikant
SU vs SF	1,24	2,60	Ikke signifikant

På bakgrunn av de statistiske resultatene er det ikke bevist å være noen forskjell i gjennomsnittlig fasthet mellom noen av seriene.

4.2 28-døgns fasthet

Resultater av trykktestingen etter 28 døgn:

Fullstendig oversikt over trykkprøveresultater for alle terningene kan finnes i vedlegg B.

Tabell 4.4 viser gjennomsnittlig trykkfasthet til de fire seriene etter 28 døgn herding i vannbad. Det foreligger 12 terninger fra hver serie (SF28 har kun 11 terninger), og standardavvik er regnet ut for hver serie.

Tabell 4.4: Gjennomsnittlig trykkfasthet og standardavvik for 28-døgns fasthet

Serie	Gjennomsnittlig trykkfasthet	Standardavvik
UU28	51,0	4,0
UF28	47,1	3,9
SU28	51,8	3,1
SF28	48,7	2,9

4.2.1 Statistiske tester av resultatene

Av tabellen kan vi se at de fire gjennomsnittsverdiene ikke er like. Likevel må det utføres en statistisk test av resultatene for å undersøke signifikansnivået til forskjellene. Dette gjøres basert på metodene som er beskrevet ovenfor. Tabellen under viser resultatene av de statistiske testene som er utført. "Student's" t-test vises til venstre, og t-testen fra Excel vises til høyre. Det er valgt et signifikansnivå på 95 % og frihetsgraden for hver test har hvert 22. Følgende null-hypotese og alternativ hypotese er valgt for alle testene:

H_0 : Det er ingen forskjell i fasthet mellom de to seriene

H_A : Det er forskjell i fasthet mellom de to seriene

Tabell 4.5: Resultater av "Student's" T-test og Excel T-test for 28-døgns fasthet

T-TEST			
Tester	Kalkulert T-verdi	T-verdi fra tabell	Sannsynligheten for at H_0 er sann
UU vs UF	2,423	2,074	0,024
UU vs SU	0,558		0,538
UF vs SU	3,269		0,004
UU vs SF	1,614	2,080*	0,122
UF vs SF	1,112		0,279
SU vs SF	2,515		0,020

* SF-serien har kun 11 terninger. Det gir frihetsgrad 21 for testene som inkluderer SF, derav tabellverdi 2,080

"Student's" t-test

Av "Student's" t-test ser vi at UU vs UF, UF vs SU og SU vs SF har signifikant forskjellig trykkfasthet for 95 % signifikansnivå. UF vs SU vil i tillegg være signifikant for 99,5 % signifikansnivå da tabellverdien for dette nivået er 3,119. De tre andre testene lavere kalkulert t-verdi enn tabellverdi for 95 % signifikansnivå.

"T-test"

Vi ser at den kalkulerte p-verdien er lavere enn 0,05 for UU vs UF, UF vs SU og SU vs SF. Sannsynligheten for at H_0 er sann er, for disse tilfellene, lav nok til at H_0 kan forkastes. For de andre tilfellene er sannsynligheten for at H_0 er sann for høy til å kunne forkaste H_0 .

Tabell 4.6: Resultater av statistisk signifikans for 28-døgns fasthet

Tester	Statistisk signifikans		
	Dersom $|X_1 - X_2| > r * (S_1 + S_2)/2$ vil resultatet være signifikant		
	$|X_1 - X_2|$	$r * (S_1 + S_2)/2$	r settes lik 1
UU vs UF	3,93	3,97	Ikke signifikant
UU vs SU	0,82	3,57	Ikke signifikant
UF vs SU	4,75	3,54	Signifikant
UU vs SF	2,34	3,45	Ikke signifikant
UF vs SF	1,59	3,42	Ikke signifikant
SU vs SF	3,16	3,01	Signifikant

Signifikanstesten viser at UU vs UF ikke er signifikant. Denne testen tar ikke hensyn til frihetsgraden, så det legges derfor mer vekt på de to andre testene som viser til signifikant forskjell.

På bakgrunn av de statistiske resultatene kan vi med 95 % sikkerhet fastslå at det er forskjell i gjennomsnittlig trykkfasthet mellom UU og UF, og SU og SF. Vi kan med 99,5 % sikkerhet fastslå at det er forskjell i gjennomsnittlig trykkfasthet mellom UF og SU.

5. Diskusjon

5.1 Resultatene fra trykktestingen

5.1.1 7-døgns fasthet

Ut i fra de statistiske sammenlikningene som er gjort på resultatene av 7-døgnstestene er det ikke mulig å bevise at noen av partiene skiller seg nevneverdig fra hverandre. Til det er signifikansnivåene for lave. Det ble i litteraturstudiet heller ikke observert noen liknende forsøk med 7-døgns fasthet som det var mulig å sammenlikne med. Det er likevel interessant å observere at det for 7-døgns fasthet er partiene med fiber som har den høyeste gjennomsnittlige fastheten, mens det for 28-døgns fasthet er disse partiene som har lavest gjennomsnittlig fasthet. Man skal være veldig forsiktig med å trekke noen konklusjoner av dette med tanke på at det ikke er bevist noen signifikante forskjeller for partiene med 7-døgnsfasthet og dette dermed kan være helt tilfeldig.

5.1.2 28-døgns fasthet

Ved nærmere undersøkelse av resultatene fra trykktestingen og statistikkberegningene av partiene med 28-døgns fasthet er det mulig å se at noen av seriene skiller seg ut. Serien som kun er tilsatt silika har signifikant høyere fasthet enn begge seriene som er tilsatt fiber. I tillegg har kontrollserien, som verken er tilsatt silika eller fiber, signifikant høyere fasthet enn serien som kun er tilsatt fiber. Det er ikke mulig å se noen signifikant forskjell i fasthet mellom serien kun tilsatt fiber og serien tilsatt både fiber og silika, heller ikke mellom kontrollserien og serien tilsatt fiber og silika.

Fra Köksal et al.s forsøk beskrevet i kapittel 2.1, representert ved tabell 2.2, som omhandler betongens fasthetsutvikling ved tilsatt silika og fiber, ser vi at disse resultatene viser en motsatt tendens i forhold til fastheten i de ulike seriene sammenliknet med resultatene i denne oppgaven. Først og fremst ser det ut til at silikaens virkning er stor og fører til en økning i fasthet. Det samme gjelder for alle partiene som er tilsatt fiber som også har fasthetsøkning. Årsakene til at disse resultatene viser andre tendenser enn resultatene fra denne oppgaven kan være ulik grad av kompaktering i de to forsøkene. Faktorene som ligger til grunn for denne påstanden er:

1. v/c-forholdet
2. fiberinnholdet
3. silikainnholdet

Det er grunn til å tro at Köksal et al., i forsøkene sine, har benyttet et høyere v/c-forhold enn det som er tilfelle i mine forsøk. Dette begrunner jeg med den relativt lave fastheten som er oppnådd i kontrollserien uten fiber og silika ($32,4 \text{ N/mm}^2$) i forhold til fastheten som er oppnådd i min egen kontrollserie ($51,0 \text{ N/mm}^2$). Et høyere v/c-forhold vil i dette tilfellet gi en mer bearbeidelig masse som lettere kan komprimeres, spesielt rundt fibre. Dette er viktig for å unngå hulrom som svekker betongen.

Köksal et al. har i sine forsøk tilsatt henholdsvis 0,5 og 1 % fiber, med to ulike slankheter, i fiberseriene. I mine forsøk er det tilsatt 2 % fiber i begge seriene, med og uten silika. Dette høye fiberinnholdet kan ha resultert i at mørtelen ikke har hatt mulighet til å omfavne alle fibre på grunn av fibrenes tette plassering. Dette vil gjøre det vanskelig å komprimere betongen skikkelig, noe som igjen vil resultere i mindre kontaktflate mellom fibre og pasta, og dermed lavere heftkapasitet for fibre. Det vil også kunne føre til at det oppstår hulrom mellom fibre.

Når det kommer til å vurdere silikainnholdet i de to forsøkene kan vi se at Köksal et al. har blandet inn henholdsvis 5, 10 og 15 % silika mot 3 % i forsøket i forbindelse med denne oppgaven. Silikaen vil i tillegg til å danne silikater av Ca(OH)_2 også fungere som en filler, spesielt i ITZ der "wall"-effekten gjør at sement og tilslag skaper relativt store tomrom mot fiber-"veggen". Ved å tilsette nok silika vil "wall"-effekten bli minimert og heften mellom fiberens mikrostruktur og pastaen vil øke på grunn av at en tettere og mer finkornet pasta gir større kontaktflate. Silikaens filler-effekt vil bidra til å fylle opp hulrom som ikke har latt seg komprimere.

5.1.3 Strekkfasthet, tøyelighet, heft- og uttrekkskapasitet

Det ble i forbindelse med denne oppgaven ikke utført tester av hverken spaltstrekkfasthet av sylinder eller uttrekkskapasitet av fiber. Til det var tiden for kort. Slike tester ville kunne gitt gode opplysninger om hvor stort bidrag silika gir til strekk- og heftkapasiteten i fiberbetong. En trepunkts bøyetest av prismer kunne vært benyttet til å undersøke om tøyeligheten ville blitt forbedret. På bakgrunn av litteraturstudiet er det likevel grunn til å

fastslå at silika, på grunn av den lille størrelsen i forhold til de andre ingrediensene i betongen, vil føre til at mikroskopiske ujevnheter i fibrenes overflate blir fylt med pasta. Dette vil i teorien øke kontaktflaten og dermed også heft- og uttrekkskapasiteten. Löfgren (14) mener imidlertid at betongens strekkfasthet ikke lar seg forbedre nevneverdig av fibertilsetning da fibre ikke kan forhindre at riss oppstår og utvikler seg. Seigheten kan derimot forbedres på grunn av fiberens egenskap til å forlenge maksimal kraftoverførende sprekkstørrelse fra 0,3 mm for normal betong til lengden av en halv fiber for fiberbetong.

5.2 Feilkilder i forbindelse med forsøket

En av årsakene til at mine resultater viser andre tendenser enn tidligere, liknende forsøk, kan skyldes følgende feilkilder.

På grunn av vanskeligheter med å kontrollere fuktigheten i tilslaget er det store muligheter for at v/c-forholdet ikke har blitt holdt helt likt for alle terningene. Det er imidlertid vanskelig å tro at dette skulle slå ut kun på spesielle serier, da forholdene rundt fuktighetskontrollen var lik hver dag og at hver enkelt serie ble støpt på samme dag. Det er mer sannsynlig at denne feilkilden er årsaken til den, til tider, store forskjellen i fasthet mellom terningene i samme parti, noe som forårsaket et stort standardavvik for enkelte seier.

En annen feilkilde som kan ha forårsaket ulike fastheter innad i partiene er det faktum at hele blandingen som ble laget gikk med til å støpe terninger. Normalt tas det bare ut små prøver av en stor blanding for å forhindre at de siste restene av betong nederst i blandemaskinen blir brukt. Denne siste resten kan ha litt ulike forhold enn resten av blandingen. Imidlertid vil det på et laboratorium være større nøyaktighet i forbindelse med vasking av blandemaskin og oppmåling av ingredienser enn det vil være på en fabrikk.

Det at det er tilsatt mye fiber i forhold til liknende forsøk og det som er normalt i betongindustrien, kan ha forårsaket dårligere kompaktering i seriene med fiber enn seriene uten. Det ble ikke utført densitetskontroll av terningene, så det er vanskelig å vite helt sikkert hvor høy graden av kompaktering var i de enkelte partiene. En kontroll av densiteten kunne muligens avslørt en forskjell i kompakteringen av terningene med og uten fiber. En slik kontroll utføres best ved å senke terningene i et kar med vann for så å veie det fortrenge vannet. Da vil eventuelle ujevnheter i overflaten også bli tatt hensyn til. En annen måte å

gjøre det på er enklere og innebærer veiing av selve terningen. Terningvolumet er kjent, og det er da mulig å kontrollere vekten mot den teoretiske spesifikke vekten.

En siste feilkilde jeg vil trekke frem er unøyaktigheter ved trykktesteren. Denne ble sist kalibrert i 1982 i følge merkingen, og kan av den grunn ha gitt unøyaktig informasjon. Det skal også legges til at avlesningen var analog og at det var vanskelig å bestemme helt nøyaktig hvilken fasthet terningen fikk. Det var kun skalering for hvert tonn og man måtte derfor anslå en større nøyaktighet enn dette.

6. Konklusjon

Forsøkene som ble utført på laboratoriet i forbindelse med denne oppgaven ga ingen direkte svar på problemstillingen, men sett i forbindelse med litteraturstudien er det mulig å konkludere med at:

1. Silika kan gi et ekstra bidrag til å øke trykkfastheten i fiberbetong grunnet at de små kornene forfiner pastaen som dermed har mulighet til å trenge inn mellom fibre som ligger tett. Dersom alle fibre er omfavnet av pasta økes kompaktheten og tilstedeværelsen av svekkende hulrom forhindres.
2. For høyt innhold av fiber vil imidlertid føre til at dannelsen av hulrom ikke kan forhindres med standardiserte metoder for kompaktering. Spesielt i kombinasjon med lavt v/c-tall vil det være vanskelig å oppnå tilfredsstillende kompaktering.
3. Fibrenes heftkapasitet kan forbedres ved at tilsatt silika trenger inn i fiberens mikrostruktur og dermed øker kontaktflaten mellom fiber og pasta. ITZ forsterkes, både på grunn av den økte kontaktflaten, men også på grunn av silikaens generelle bidrag til økt fasthet i form av pozzolan-effekten. Dette gjør at ITZ tåler større skjærkrefter før løsrivelsesfasen begynner.

7. Videre arbeid

I forbindelse med denne oppgaven ble det ikke utført spaltestrekkforsøk eller uttrekksforsøk. En fremtidig oppgave kan implementere disse forsøkene for nøyere undersøkelse av fibrenes heftkapasitet i fiberbetong med og uten silika.

For videre arbeid kan det være interessant å se på forskjellige sammensetninger av fibre og silika og prøve å finne grensen for hvor mye fiber som kan tilsettes før graden av kompaktering går ned og senker betongens trykkfasthet. Det bør blandes flere partier med ulike mengder silika og fiber, separat og i kombinasjon for å finne ut når fiberinnholdet blir for høyt slik at fastheten synker.

Det kan også være interessant og kontrollere hvor mye effekt v/c-forholdet har for kompakteringen av fiberbetong. Det vil si hvor lavt kan v/c-forholdet være før kompaktering etter standardens krav ikke er godt nok til å forhindre hulrom mellom fibre som gir redusert trykkfasthet. Det kan i denne forbindelse også forsøkes alternative metoder for komprimering for å finne en metode som gir tilfredsstillende kompakt betong.

8. Referanser

1. Grimstad, Eystein, et al., et al. Publikasjon nr. 7 - Sprøytebetong til bergsikring. Oslo : Norsk Betongforening, 2011.
2. Samtale med Christian Sørensen. Ås : s.n., 2012.
3. Holland, Terence C. Silca fume User's manual. Lovettsville, VA, USA : Silica fume association, 2005.
4. Bache, Hans Henrik. Densified cement ultra-fine particle-based materials. Aalborg : Aalborg Portland, 1981.
5. Notater fra forelesning i TBA321-Videregående betongmaterialteknologi. Ås : Christian O. Sørensen, 2011.
6. Neville, Adam M. Properties of concrete 3rd ed. Harlow, England : Longman Scientific & Technical, 1981.
7. Elkem. Filler effect. [Internett] Elkem, 11 09 2007. [Sitert: 06 02 2012.] www.fibreceement.elkem.com/eway/default.aspx?pid=249&trg=Main_7395=7397:0:4,4534:1:0:0:::0:0.
8. Siddique, R. og Kahn, M. Iqbal. Silica Fume. Supplementary Cementing Materials, Engineering Materials. Berlin : Springer-Verlag, 2011.
9. Creep in concrete. [Internett] [Sitert: 30 04 2012.] www.aboutcivil.com/creep-in-concrete.html.
10. Shrinkage in concrete. [Internett] [Sitert: 30 04 2012.] www.aboutcivil.com/shrinkage-in-concrete.html.
11. Dansk Betonforening. Praktisk anvendelse af fiberbetong. København : Parits Grafik A/S, 1995.
12. Ole Brant, et al. Praktisk anvendelse af fiberbeton, Publikation nr. 43. København : Dansk Betongforening, 1995.
13. 522.111 Betonggulv på grunnen. s.l. : Sintef Byggforsk, 2003.
14. Löfgren, Ingemar. Fibre-reinforced concrete for industrial construction. Gøteborg : Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of technology, 2005.

15. American Society for Testing and Materials. Standard specification for steel fibers for fiber-reinforced concrete. West Conshohocken, Usa : American Society for Testing and Materials, 2006.
16. [Internett] Arcelor Mittal. [Sisert: 01 03 2012.]
www.arcelormittal.com/distributionsolutions/wiresolutions/steelfibres/products.
17. Dramix produktdatablad. s.l. : Bekaert, 2003.
18. Nikolaisen, Eirik. Masteroppgave - Fordeling av fibre i fersk armert betong. Ås : UMB, 2010.
19. Röck, Rudolph. Grundlagen über die wirkung von fasern in beton. s.l. : Schretter & Cie, 2007.
20. Neville, Adam M. Properties of concrete 4th ed. Harlow, England : Pearson Educatino Limited, 1995.
21. Spiratus, Nelu, et al., et al. Superplasticizer for concrete - Fundamentals, technology, and practice. Cap-Saint-Ignace : Marquis, 2003.
22. Dynamon SR-N superplastiserende tilsetningsstoff. [Internett] [Sisert: 06 02 2012.]
www.mapei.com/public/NO/products/dynamon_sr-n.pdf.
23. Standard Norge. Betong Del 1: Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar. s.l. : Standard Norge, 2000.
24. Standard Norge. Prøving av herdet betong Del3: Prøvelegemers trykkfasthet. s.l. : Standard Norge, 2009. NS-EN 12390-3:2009.
25. Notater fra forelesning i STAT216 - Statistics. Bozeman, MT, USA : Miguel Paz, 2010.
26. Adams, Donald F. Fiber-matrix interfacial bond test methods. [Internett] 01 01 2011. [Sisert: 30 04 2012.] www.compositesworld.com/articles/fiber-matrix-interfacial-bond-test-methods.
27. Dønn armert boligulv. [Internett] Betong øst. [Sisert: 24 02 2012.]
www.betongost.no/betongprodukter/donn-armert/14-produktark/56-donn-armert-boligulvLest.

9. Vedlegg

Vedlegg A: Grafer – Utvikling av fiberens spenning

Vedlegg B: Resultater fra trykkprøver og statistiske tester

Vedlegg C: T-fordeling for "Student's" T-test

Vedlegg D: Metoder for testing av herdet betong

Vedlegg E: Utvidet utstyrsliste

Vedlegg F: Datablad

Vedlegg A: Grafer – Utvikling av fiberens spenning

Utvikling av fiberens spenning når fiberens E-modul endres, når pastaens E-modul endres og når fiberens slankhetsforhold endres.

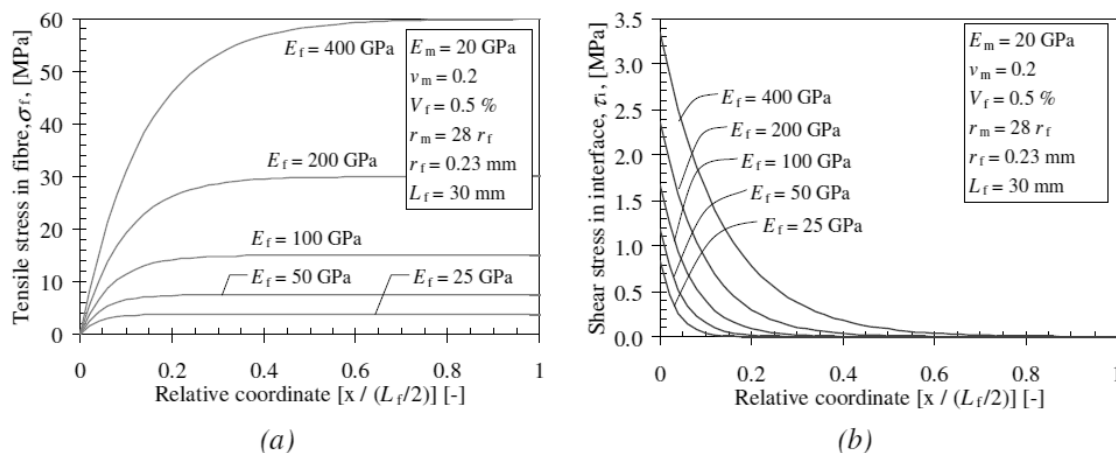


Figure 22. Results from shear-lag analysis, influence of the modulus of elasticity of the fibre: (a) stresses in fibre and (b) interface at cracking.

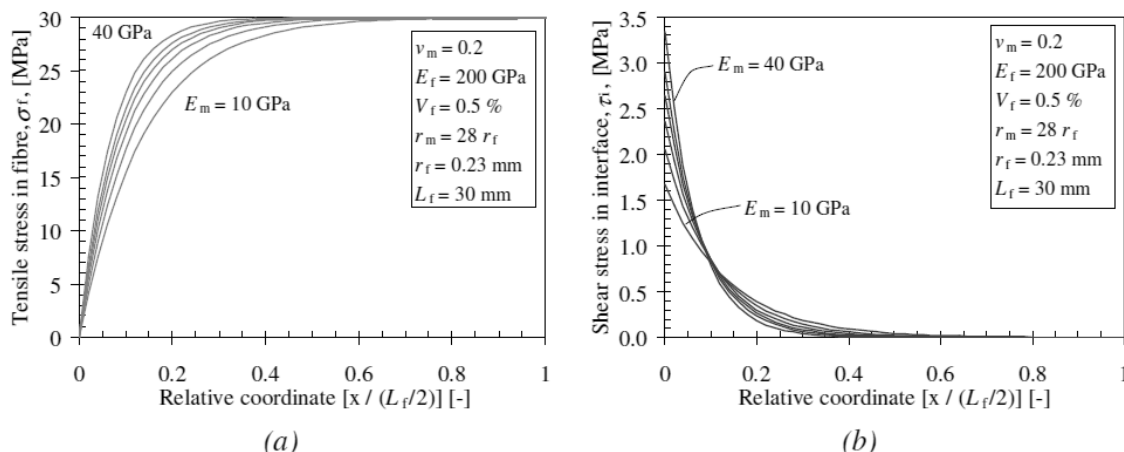


Figure 23. Results from shear-lag analysis, influence of the modulus of elasticity of the matrix: (a) stresses in fibre and (b) interface at cracking.

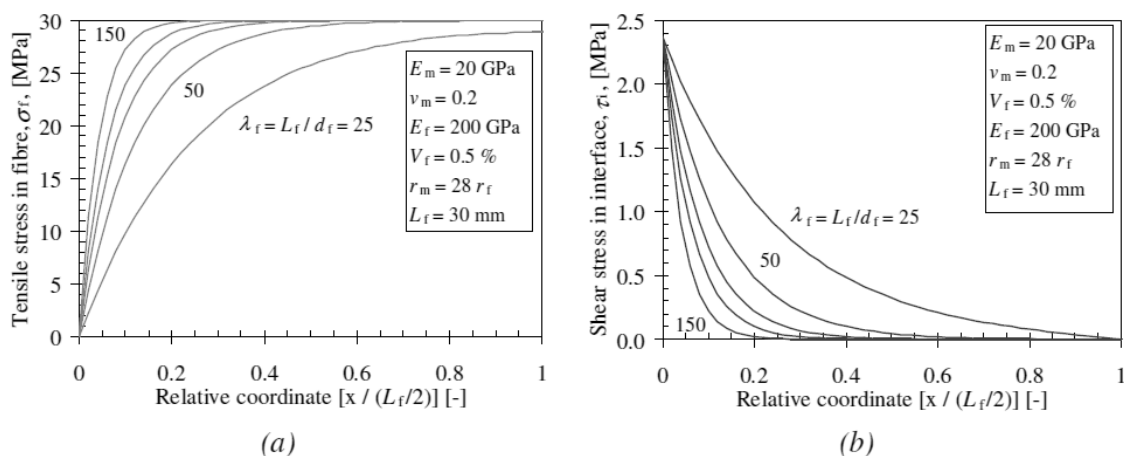


Figure 24. Results from shear-lag analysis, influence of the slenderness of the fibre (the fibre diameter): (a) stresses in fibre and (b) interface at cracking.

Vedlegg B: Resultater fra trykkprøver og statistiske tester

Resultater fra 7-døgns trykktesting

Terning ID	X _m (mm)	Y _m (mm)	A _c (mm ²)	Fiberinnhold (g)	Silikainnhold (%)	Største last ved brudd (kN)	f _c (N/mm ²)	Prøvedato	Gjennomsnitt	Standardavvik
UU7.1	100	101	10100	-	-	367	36.3	05.03.2012	37.9	2.0
UU7.2	100	101	10100	-	-	370	36.6	05.03.2012		
UU7.3	100	101	10100	-	-	392	38.8	05.03.2012		
UU7.4	100	100	10000	-	-	398	39.8	05.03.2012		
UU7.5	101	100	10100	-	-	359	35.5	05.03.2012		
UU7.6	100	100	10000	-	-	405	40.5	05.03.2012		
UF7.1	100	101	10100	50	-	421	41.7	05.03.2012	38.1	3.9
UF7.2	100	101	10100	50	-	428	42.4	05.03.2012		
UF7.3	100	101	10100	50	-	400	39.6	05.03.2012		
UF7.4	100	100	10000	50	-	382	38.2	05.03.2012		
UF7.5	100	100	10000	50	-	330	33.0	05.03.2012		
UF7.6	100	100	10000	50	-	338	33.8	05.03.2012		
SU7.1	100	101	10100	-	3	425	42.1	06.03.2012	37.5	3.3
SU7.2	100	101	10100	-	3	399	39.5	06.03.2012		
SU7.3	100	101	10100	-	3	345	34.2	06.03.2012		
SU7.4	100	100	10000	-	3	390	39.0	06.03.2012		
SU7.5	100	100	10000	-	3	365	36.5	06.03.2012		
SU7.6	100	100	10000	-	3	335	33.5	06.03.2012		
SF7.1	100	100	10000	50	3	400	40.0	06.03.2012	38.7	1.9
SF7.2	100	100	10000	50	3	392	39.2	06.03.2012		
SF7.3	100	100	10000	50	3	350	35.0	06.03.2012		
SF7.4	100	100	10000	50	3	399	39.9	06.03.2012		
SF7.5	100	100	10000	50	3	389	38.9	06.03.2012		
SF7.6	100	100	10000	50	3	392	39.2	06.03.2012		

Symbolforklaringer: UU = Uten silika, uten fiber. SU = Med silika, uten fiber. UF = Uten silika, med fiber. SF = Med silika, med fiber.

Resultater fra 28-døgns trykktesting

Termin ID	X _m (mm)	Y _m (mm)	A _c (mm ²)	Fiberinnhold (g)	Silikainnhold (%)	Største last ved brudd (kN)	f _c (N/mm ²)	Prøvedato	Gjennomsnitt	Standard- avvik
UU28.1	100	101	10100	-	-	493	48.8	12.03.2012	51.0	4.0
UU28.2	100	101	10100	-	-	463	45.8	12.03.2012		
UU28.3	100	101	10100	-	-	482	47.7	12.03.2012		
UU28.4	100	100	10000	-	-	430	43.0	12.03.2012		
UU28.5	100	101	10100	-	-	515	51.0	12.03.2012		
UU28.6	100	101	10100	-	-	530	52.5	12.03.2012		
UU28.7	100	101	10100	-	-	529	52.4	12.03.2012		
UU28.8	100	101	10100	-	-	538	53.3	12.03.2012		
UU28.9	100	100	10000	-	-	550	55.0	12.03.2012		
UU28.10	100	102	10200	-	-	575	56.4	12.03.2012		
UU28.11	100	100	10000	-	-	550	55.0	12.03.2012		
UU28.12	100	101	10100	-	-	520	51.5	12.03.2012		
UF28.1	102	101	10302	50	-	450	43.7	14.03.2012	47.1	3.9
UF28.2	100	101	10100	50	-	410	40.6	14.03.2012		
UF28.3	101	101	10201	50	-	410	40.2	14.03.2012		
UF28.4	100	100	10000	50	-	495	49.5	14.03.2012		
UF28.5	100	100	10000	50	-	490	49.0	14.03.2012		
UF28.6	100	100	10000	50	-	493	49.3	14.03.2012		
UF28.7	100	100	10000	50	-	478	47.8	14.03.2012		
UF28.8	100	100	10000	50	-	450	45.0	14.03.2012		
UF28.9	100	100	10000	50	-	500	50.0	14.03.2012		
UF28.10	100	100	10000	50	-	482	48.2	14.03.2012		
UF28.11	100	100	10000	50	-	486	48.6	14.03.2012		
UF28.12	100	100	10000	50	-	533	53.3	14.03.2012		

Termin ID	X _m (mm)	Y _m (mm)	A _c (mm ²)	Fiberinnhold (g)	Silikainnhold (%)	Største last ved brudd (kN)	f _c (N/mm ²)	Prøvedato	Gjennomsnitt	Standardavvik
SU28.1	100	101	10100	-	3	475	47.0	13.03.2012	51.8	3.1
SU28.2	100	101	10100	-	3	561	55.5	13.03.2012		
SU28.3	100	101	10100	-	3	535	53.0	13.03.2012		
SU28.4	100	101	10100	-	3	538	53.3	13.03.2012		
SU28.5	100	101	10100	-	3	550	54.5	13.03.2012		
SU28.6	100	101	10100	-	3	570	56.4	13.03.2012		
SU28.7	100	101	10100	-	3	505	50.0	13.03.2012		
SU28.8	100	101	10100	-	3	525	52.0	13.03.2012		
SU28.9	100	101	10100	-	3	525	52.0	13.03.2012		
SU28.10	100	100	10000	-	3	470	47.0	13.03.2012		
SU28.11	100	100	10000	-	3	485	48.5	13.03.2012		
SU28.12	100	100	10000	-	3	530	53.0	13.03.2012		
SF28.1	100	100	10000	50	3	460	46.0	15.03.2012	48.7	2.9
SF28.2	100	101	10100	50	3	470	46.5	15.03.2012		
SF28.3	-	-	-	-	-	-	-	-		
SF28.4	100	100	10000	50	3	500	50.0	15.03.2012		
SF28.5	100	100	10000	50	3	445	44.5	15.03.2012		
SF28.6	101	101	10201	50	3	470	46.1	15.03.2012		
SF28.7	100	100	10000	50	3	515	51.5	15.03.2012		
SF28.8	100	100	10000	50	3	500	50.0	15.03.2012		
SF28.9	100	100	10000	50	3	530	53.0	15.03.2012		
SF28.10	100	100	10000	50	3	470	47.0	15.03.2012		
SF28.11	100	100	10000	50	3	525	52.5	15.03.2012		
SF28.12	100	100	10000	50	3	485	48.5	15.03.2012		

Symbolforklaringer: UU = Uten silika, uten fiber. SU = Med silika, uten fiber. UF = Uten silika, med fiber. SF = Med silika, med fiber.

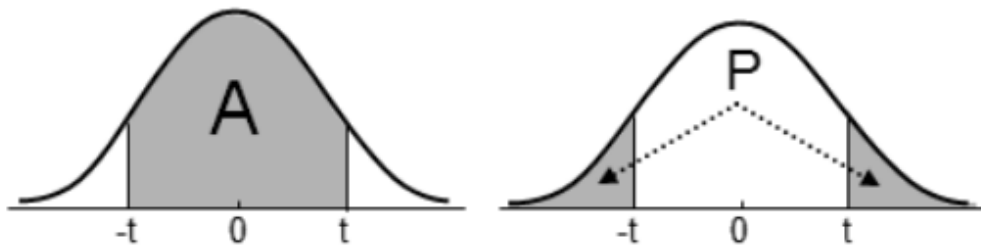
Resultater fra statistikkberegninger

TESTER FOR 7-DØGNS TERNINGER				
T-TEST			Statistisk signifikans	
Kalkulert T-verdi	T-verdi fra tabell	Sannsynligheten for at H_0 er sann		Dersom $|X_1 - X_2| > r^* (S_1 + S_2)/2$ vil resultatet være signifikant
		P-verdi	$r^* (S_1 + S_2)/2$	r settes lik 1
UU vs UF	0.095	0.927	0.17	Ikke signifikant
UU vs SU	0.302	0.770	0.48	Ikke signifikant
UU vs SF	0.676	0.515	0.76	Ikke signifikant
UF vs SU	0.310	0.763	0.65	Ikke signifikant
UF vs SF	0.331	0.750	0.59	Ikke signifikant
SU vs SF	0.798	0.448	1.24	Ikke signifikant

TESTER FOR 28-DØGNS TERNINGER				
T-TEST			Statistisk signifikans	
Kalkulert T-verdi	T-verdi fra tabell	Sannsynligheten for at H_0 er sann		Dersom $|X_1 - X_2| > r^* (S_1 + S_2)/2$ vil resultatet være signifikant
		P-verdi	$r^* (S_1 + S_2)/2$	r settes lik 1
UU vs UF	2.423	0.024	3.93	Ikke signifikant
UU vs SU	0.558	0.583	0.82	Ikke signifikant
UU vs SF	1.614	0.122	2.34	Ikke signifikant
UF vs SU	3.269	0.004	4.75	Signifikant
UF vs SF	1.112	0.279	1.59	Ikke signifikant
SU vs SF	2.515	0.020	3.16	Signifikant

Vedlegg C: T-fordeling for "Student's" t-test

Values of the t-distribution (two-tailed)



DF	A	0.80	0.90	0.95	0.98	0.99	0.995	0.998	0.999
	P	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001
1		3.078	6.314	12.706	31.820	63.657	127.321	318.309	636.619
2		1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	22.327	31.599
3		1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.215	12.924
4		1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5		1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6		1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7		1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8		1.397	1.860	2.306	2.897	3.355	3.833	4.501	5.041
9		1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10		1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11		1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12		1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13		1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14		1.345	1.761	2.145	2.625	2.977	3.326	3.787	4.140
15		1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16		1.337	1.746	2.120	2.584	2.921	3.252	3.686	4.015
17		1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18		1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19		1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20		1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21		1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22		1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23		1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.768
24		1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.090	3.467	3.745
25		1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26		1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27		1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28		1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29		1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30		1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
31		1.309	1.695	2.040	2.453	2.744	3.022	3.375	3.633
32		1.309	1.694	2.037	2.449	2.738	3.015	3.365	3.622
33		1.308	1.692	2.035	2.445	2.733	3.008	3.356	3.611
34		1.307	1.691	2.032	2.441	2.728	3.002	3.348	3.601

Vedlegg D: Metoder for testing av herdet betong

Trykktesting

Betongens trykkfasthet måles ved hjelp av trykktesten. Denne metoden går ut på at man tar ut prøver av den ferske betongen som man fordeler i smurte former. Formene kan enten være sylindriske med en diameter på 150 mm og en høyde på 300 mm, eller de kan være kubiske med dimensjoner 100x100x100 mm. Fordelingen av betongen, i formene, skal foregå etter NS-EN 12390. Når betongen har størknet kan formene bli bragt til et laboratorium hvor prøvene, senest etter tre døgn, blir lagt i et vannbad for videre herding. Vannbadet sørger for optimale herdeforhold for betongprøvene vedrørende temperatur og fuktighet. Vannbadet skal hindre svinn og rissdannelser, og det er like viktig at dette blir forhindret i størkningsperioden, før terningene blir plassert i vannbadet. Derfor er det vanlig enten å dekke til overflaten som er eksponert for luft med plast, eller å plassere formene i et fuktkontrollert rom den første tiden. Når det har gått 28 døgn fra prøvene ble tatt blir de tatt ut av vannbadet for å trykktestes. Først blir prøvene målt for å se at de tilfredsstillende standardiserte dimensjonene fastsatt i standarden. Dersom det blir funnet noen avvik må enten prøven forkastes, eller man kan justere den ved enten å slipe ned prøven dersom den er for stor, eller ved hjelp av et påstøp av kalsiumaluminatsement dersom prøven er for liten. Prøver som ikke har større avvik enn ± 3 % av den standardiserte dimensjonen kan testes uten videre justering ved å måle gjennomsnittsarealet av trykkflatene og benytte dette arealet når fastheten regnes ut (24). Det finnes flere forskjellige trykkmaskiner for å trykkteste terninger og sylindre. Tidligere brukte man manuelle hydrauliske maskiner hvor man selv måtte vippe en stang frem og tilbake for å skape et trykk på prøven. Standarden beskriver hvilken hastighet trykket skal øke med for å unngå støtliknende bevegelser som kan føre til unøyaktige resultater. Mere moderne maskiner har blitt automatisert slik at man enkelt kan bestemme riktig hastighet som trykket skal øke med for å tilfredsstille kravene i standarden. Man får også enkelt printet ut fine informative grafer som beskriver belastningsforløpet, og som gir deg nøyaktig maksimal belastning. Med de eldre manuelle maskinene må man selv lese av belastningen på mekaniske visere på fremsiden av maskinen. Dette kan fort føre til litt unøyaktig avlesning.

Split cylinder -test

Dette er en indirekte test av betongens strekkfasthet og går ut på å påføre en liggende sylinder trykklast helt til den får et langsgående brudd. Strekkkapasiteten kan så regnes ut ved hjelp av følgende formel:

$$\sigma_{ts} = \frac{2P}{\pi l D} \quad (18)$$

hvor σ_{ts} er spaltestrekkfastheten i N/mm^2 , P er bruddlast i N og l og D er henholdsvis sylinderens lengde og diameter i mm.

Uttrekk av fiber

En uttrekkstest av en enkelt fiber foregår ved å støpe fiberen inn i et stykke betong for så å trekke den ut når betongen er herdet. Man finner da lasten som kreves for å trekke fiberen ut og skjærkapasiteten mellom fiber og betong kan dermed regnes ut. For veldig tynne fibre vil tykkelsen av betongen være veldig tynn og ikke dekke hele delen av fiberen som skal trekkes ut. Dette er for å forhindre at man får et fiberbrudd (26).

Vedlegg E: Utvidet utstyrsliste

Utsyr som ble benyttet i forbindelse med forsøkene:

- Kenwood Classic Major KM635 m/ K-visp. Kjøkkenmaskin
- Mettler PM4000. Vekt, nøyaktighet: 0,01 gram
- Diverse beger for veiing av masser
- Måleskjeer. 5 ml til 1 dl
- Slikkepott
- Stekepanne
- Kokeplate
- Terningformer
- Stålstav. 16 mm
- Flat murskje
- Trykkmaskin (ukjent merke)
- Skyvelære

Vedlegg F: Datablad

Superplastiserende tilsetningsstoff

PRODUKTBEKRIVELSE

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

Produktet tilhører Dynamonsystemet basert på den Mapei utviklede DPP-teknologien (DPP = Designed Performance Polymers) der tilsetningsstoffenes egenskaper skreddersys til ulike betongformål.

Dynamonsystemet er utviklet på basis av Mapeis egen sammenstilling og produksjon av monomerer.

BRUKSOMRÅDE

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

Noen spesielle bruksområder er:

- Vannrett betong med krav til høy eller svært høy fasthet og med strenge krav til bestandighet i aggressive miljøer.
- Betong med særlige krav til høy støpelighet; i konsistensklasser S4 og S5 etter NS-EN 206-1.
- Selvkomprimerende betong med ønske om lengre åpentid. Om nødvendig kan SKB stabiliseres med en viskositetsøker - **Viscofluid** eller **Viscostar**.
- Til produksjon av frostbestandig betong – da i kombinasjon med luftinnførende tilsetningsstoffer - **Mapeair**. Valg av type luftinnførende stoff gjøres ut fra egenskapene til de andre delmaterialer som er tilgjengelige.
- Til golvstøp for å oppnå en smidig betong med bedret støpelighet. Store doseringer og lave temperaturer kan retardere betongen noe.

EGENSKAPER

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

Denne effekten kan prinsipielt utnyttes på tre måter:

1. For å redusere mengden tilsatt vann, men samtidig beholde betongens støpelighet. Lavere w/c-forhold gir høyere fasthet, tetthet og bestandighet i betongen.
2. For å forbedre støpeligheten sammenlignet med betonger med samme w/c-forhold. Fastheten forblir dermed den samme, men muliggjør forenklet utstøping.

3. For å redusere både vann og sementmengde uten å forandre betongens mekaniske styrke. Gjennom denne metoden kan en blant annet redusere kostnadene (mindre sement), redusere betongens svinnpotensial (mindre vann) og redusere faren for temperaturgradienter på grunn av lavere hydrasjonsvarme. Spesielt er denne siste effekten viktig ved betonger med større sementmengder.

VÆR OPPMERKSOM PÅ

Dynamon SX-N lar seg kombinere med andre Mapei tilsetningsstoffer, som f.eks styrkningsakselererende stoffer som **Mapequick** og styrkningsretard-erende stoffer som **Mapetard**. Produktet lar seg også kombinere med luftinnførende tilsetningsstoffer, **Mapeair**, for produksjon av frostbestandig betong.



Produsent:

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

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

EMBALLASJE

Dynamon SX-N leveres i 25 liters kanner, 200 liters fat, i 1000 liters containere og i bulk. Produktet må oppbevares ved temperaturer mellom +8°C og +35°C og bevares sine egenskaper i minst ett år i lukket emballasje. Fargenyanser kan oppstå i produksjon av polymerene som inngår i **Dynamon SX-N**, men dette påvirker ikke produktets bruksegenskaper. Produktet bør røres forsiktig om før bruk for å sikre et homogent produkt. Produktet bør ikke utsettes for sollys.

DOSERING

Dynamon SX-N tilsettes for å oppnå ønsket resultat (styrke, bestandighet, støpelighet, sementreduksjon) ved å variere doseringen mellom 0,3 og 2,0% av sementmengden.

Ved økt dosering økes også betongens åpentid, dvs. tiden betongen lar seg bearbeide.

Større doseringsmengder og lave betongtemperaturer gir en retardert betong. Vi anbefaler alltid prøvestøper med aktuelle parametere.

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

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

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

VERNETILTAK

For helse-, miljø- og sikkerhetsinformasjon, se eget sikkerhetsdatablad. Sikkerhetsdatabladene finnes på www.mapei.com

MERK

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene.

All ovenstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.

Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse. Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.

Alle leveranser fra Mapei AS skjer i henhold til de til enhver tid gjeldende salgs- og leveringsbetingelser, som anses akseptert ved bestilling.

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

Produsent:

Mapei AS

Vallsetvegen 6, 2120 Sagstua, Norway

Tlf: +47 62 97 20 00 Fax: +47 62 97 20 99

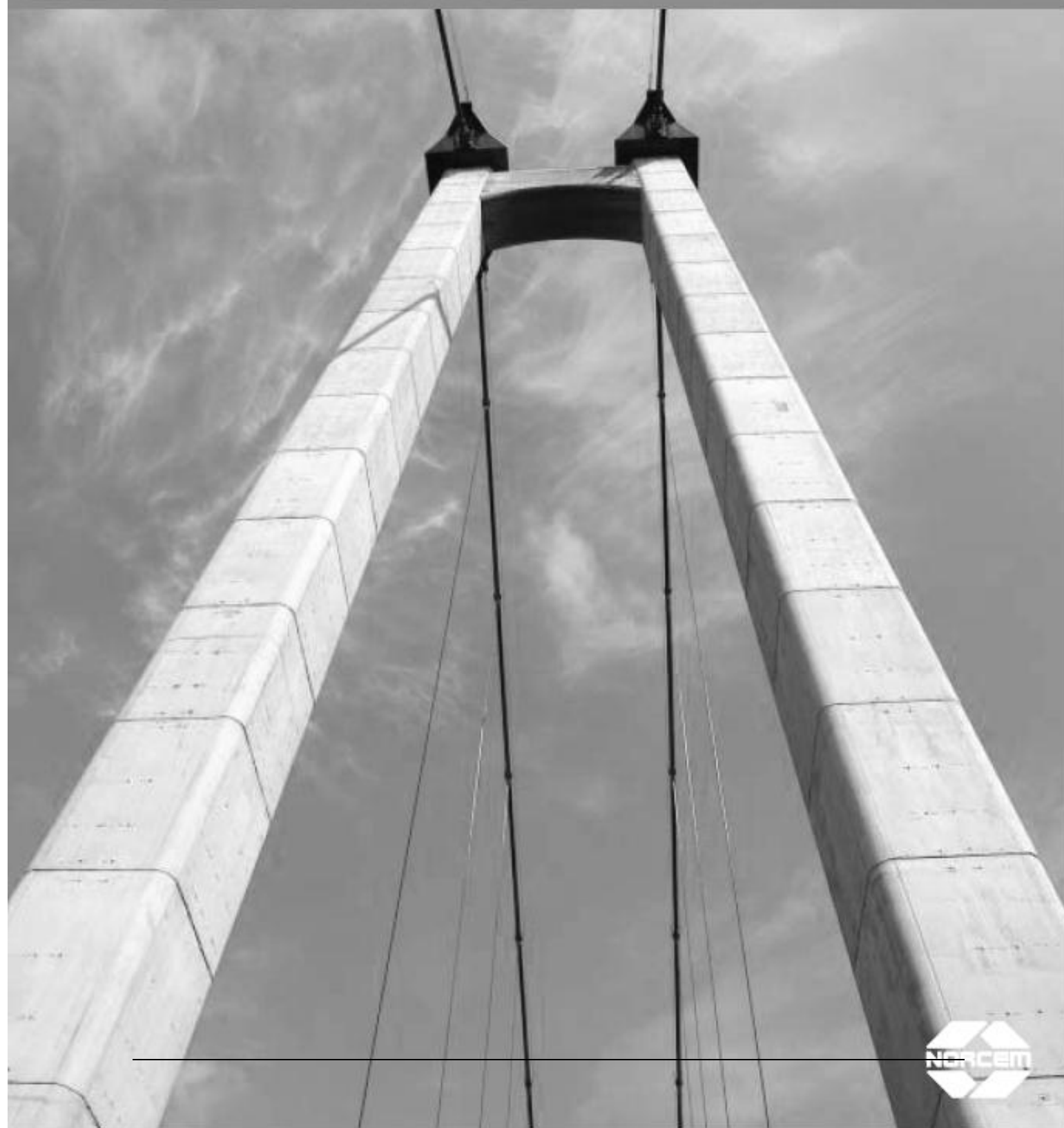
post@mapei.no

www.mapei.com



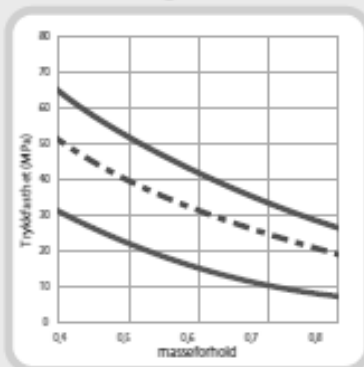
PRODUKTINFORMASJON

Standard sement FA



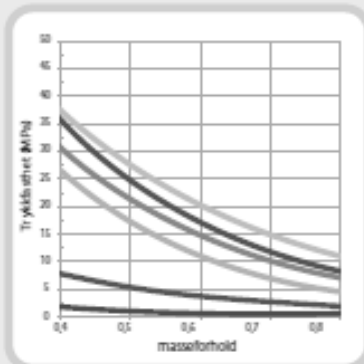


Fasthetsutvikling



Figur 1

Tidligfasthet



Figur 2

Fasthetsutvikling

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

Tidligfasthet

Tidligfastheten i betong er meget avhengig av temperatur og eventuell dosering av tilsetningsstoff med retarderende effekt. I figur 2 er vist trykkfasthet etter 1 døgn med forskjellige masseforhold med og uten 1% plastiserende tilsetningsstoff (P-stoff) med Standardsement FA. Prøvene er lagret ved 95% luftfuktighet ved varierende temperatur.

Motstand mot alkalireaksjoner

Norsk Betongforenings publikasjon nr. 21 fastsetter retningslinjer for produksjon av bestandig betong med alkalireaktivt tilslag. Publikasjonen fastlegger at for betong med Standardsement FA kan det benyttes alkalireaktivt tilslag dersom betongens totale alkali-innhold ikke overstiger visse verdier.

For betong der Standardsement FA blandes med andre sementtyper, gjelder andre grenser. For grenseverdier - se www.betong.net under Publikasjoner, og Vedlegg C til publikasjon 21.

Fasthetsklasse – masseforhold

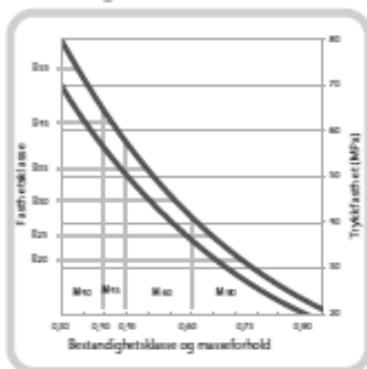
Med normalt god styring av betongproduksjonen er det behov for en overhøyde på ca 7 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Standardsement FA gir følgende retningsgivende verdier for minste og største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring.

Fasthetsklasse	B20	B25	B30	B35	B45
Minste - Største masseforhold	0,65 - 0,72	0,57 - 0,65	0,51 - 0,57	0,44 - 0,51	0,35 - 0,44

Norcem Standardsement FA er tilpasset norske forhold og kan benyttes til betong i alle eksponerings-, bestandighets- og fasthetsklasser. Standard FA gir bestandig betong også i kombinasjon med alkalireaktivt tilslag. Fasthetsprofilen er tilpasset minimum sementbehov for konstruksjoner utendørs i bestandighetsklasse M60.



Bestandighetsklasse



Figur 3

Bestandighetsklasse

NS-EN 206-1 klassifiserer betongens miljøpåvirkninger i eksponeringsklasser. I nasjonalt tillegg til denne standarden er de ulike eksponeringsklassene gruppert i seks bestandighetsklasser med krav til betongens største masseforhold (se tabell 3). Tabell 2 viser anbefalte kombinasjoner av bestandighets- og fasthetsklasser. Retningsgivende verdier for største masseforhold i de ulike fasthetsklassene er gitt i tabell 1. I figur 3 er vist sammenhengen mellom bestandighetsklasse og fasthetsklasse, i et variasjonsbelte forårsaket av ulike produksjonsforutsetninger. Figuren gjelder for betong uten luftinnføring med Norcem Standardsement FA. I bestandighetsklasse M60 anbefaler vi generelt fasthetsklasse B25.

Anbefalte kombinasjoner

Bestandighetsklasse M90	Fasthetsklasse B20 eller høyere
Bestandighetsklasse M60	Fasthetsklasse B25 eller høyere
Bestandighetsklasse M45	Fasthetsklasse B35 eller høyere
Bestandighetsklasse M40	Fasthetsklasse B45 eller høyere

Tabell 2

Valg av bestandighetsklasse (nasjonale krav)

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

*Minst 4% luft

Tabell 3

Deklarerte verdier

Norcem Standardsement FA tilfredsstiller kravene til Portlandflygeasement
EN 197-1 -CEM II/A-V 42,5 R B = Brevik K = Kjøpsvik

Kjemiske data

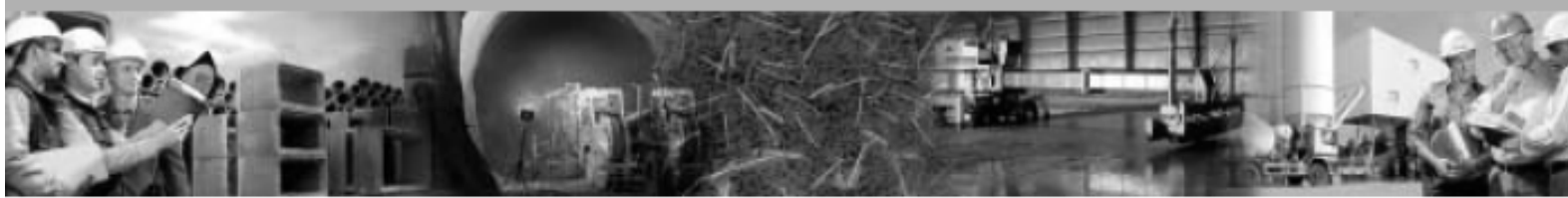
Egenskap	Deklarerte verdier	Krav ifølge NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	450 m ² /kg	
Alkali (ekv Na ₂ O) - Brevik	1,4 %	Deklarert iht NB21
Alkali (ekv Na ₂ O) - Kjøpsvik	1,5 %	Deklarert iht NB21
Flygeaskeinnhold	20,0 %	6-20%
Glødetap	2,0 %	-
Sulfat (SO ₂)	3-4 %	≤ 4 %
Klorid	< 0,07%	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2 ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt (kg/dm ³)	2,99	

Fysikalske data

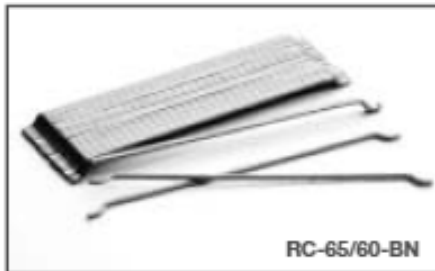
Egenskap	Retningsgivende verdier	Krav ifølge NS-EN 197-1
Trykkfasthet 1 døgn	21 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	31 MPa	≥ 20 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	40 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	52 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende bindetid (min)	130 (B) / 120 (K)	≥ 60 min
Ekspansjon	1 mm	≤ 10 mm

*Karakteristiske verdier





DATA SHEET



RC-65/60-BN

What is Dramix®?

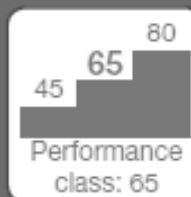
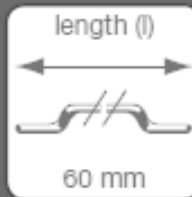
Dramix® steel fibres, from industry specialist Bekaert, have set a new standard for concrete reinforcement with their unique combination of flexibility and cost-efficiency.

Dramix® is a cold drawn steel wire fibre with hooked ends for optimum anchorage. What you get from Dramix® reinforced concrete is ductility and high load bearing capacity. On top of that, you'll find a quick and easy way to an efficient and cost effective solution.

RC-65/60-BN offers you:

- Dramix® Easy Mix**
 Dramix® Easy Mix fibres are engineered in such a way to offer fast and perfect mixing, improved pumpability and optimized fibre distribution. Even complex forms and structures are possible.
- Dramix® Hi Perform**
 Dramix® Hi Perform fibres provide high performance and crack resistance. These are products of choice to create optimal ductility. Dramix® Hi Perform is used for structural, designed applications, in situ, precast or sprayed.

GEOMETRY AND PERFORMANCE



3.200 Fibres/kg

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

MATERIAL PROPERTIES

Tensile strength: Rm nom: 1.160 N/mm²
 Tolerances: ± 7,5% Avg
Young's Modulus (Emod): ± 210.000 N/mm²

PACKAGING



STORAGE



PRODUCT APPROVALS



SYSTEM APPROVALS



- CE LABEL:** Dramix® is certified for CE mark system 1: steel fibres for structural use. For detailed info: CE info sheet available on request.

- ISO 9001:** All Dramix® plants are ISO 9001 certified. The same quality standards are applied.
- ISO 14001:** Some plants are already ISO 14001 certified. All plants will be ISO 14001 certified before end 2011.

Bekaert will advise on the most suitable fibre for your application.
 - For our recommendations on handling, dosing and mixing.
 - For composition and safe application and in the frame of Reach art.33.

Please go to: www.bekaert.com/dosingdramix
infobuilding@bekaert.com