



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer	Vårsemesteret, 2014 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Jan Erik Waage	<i>Jan Erik Waage</i> signatur forfatter)
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder(e): Kjell Tore Fosså	
Tittel på masteroppgaven: Duktilitet i fiberarmert høyfast normalbetong Engelsk tittel: Ductility in fiberreinforced high strenght concrete.	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Duktilitet Høyfast betong Fiberarmering Stålfiber Basaltfiber	Sidetall: 101 + vedlegg/annet: 34 Stavanger, 12 juni, 2014 dato/år

Sammendrag

Denne oppgaven tar for seg duktilitet i fiberarmert høyfast normalbetong. Historie, egenskaper og de forskjellige bestanddelene blir beskrevet. Det blir i tillegg foretatt en strukturell analyse med fokus på bøyemoment, skjærkapasitet og minimumsarmering. Det blir også sett på rissmoment og risslast.

Det er utført tester som omhandler rissutvikling for store bjelker, trepunkts bøyetest av bjelkelegemer i henhold til NS-EN 14561 og strekkprøving av bjelkelegemer. I tillegg er det utført trykkfasthetsprøving av terninger, spaltestrekkprøving av sylindere og prøving av arbeidsdiagram trykk med sylindere. Målet med disse prøvene er å se på endring i egenskaper og duktilitet i betongen ved forskjellige doseringer og typer fiber. To typer fiber er brukt i oppgaven; stålfiber og basaltfiber.

Trykkfastheten blir ikke påvirket ved tilsetning av fiber. Spaltestrekkfastheten øker ved tilsetning av stålfiber og ved tilsetning av større mengder basaltfiber. For mindre doseringer av basaltfiber er spaltestrekkfastheten uendret.

Bøyestrekfastheten blir forbedret ved bruk av fiber. Bjelkelegemene blir i stand til å motstå krefter også etter brudd og vi får noe som kalles rest bøyestrekfasthet. Bruddenergien øker betraktelig, og betongen blir mer duktil. Også for strekkbjelkene forbedres de fleste parametrene, og rest strekkfasthet ved 2,5 mm forlengelse forbedres med økende fibermengder.

Sylindere brukt i prøving av arbeidsdiagram trykk får økt evne til å motstå krefter etter at bruddspenningen nås. Høyere dosering av fiberarmering øker denne evnen. Stålfiber gir den største effekten.

Egenskapene til de store bjelkene forbedres ved tilsetning av fiber. Ved tilsetning av stålfiber synker antall riss betraktelig. For basaltfiberen er det ingen endring i antall riss, men rissviddene er mindre synlige. Risslasten holder seg relativt lik for alle bjelkene, mens bruddlasten øker ved tilsetning av fiber.

Forord

Jeg ønsker å rette en stor takk til veilederen min, Kjell Tore Fosså, som har bidratt med mye kunnskap og støtte gjennom hele prosessen. Jeg ønsker også å takke medstudentene mine, Jesper Bruneau Simonsson og Robin Simonstad, som har vært gode samarbeidspartnere på betonglabben.

Jeg vil også takke de andre medstudentene ved Universitetet i Stavanger, som har bidratt til å gjøre studietiden både lærerik og underholdende.

Det er ved betonglabben i paviljong 4 på Universitetet i Stavanger både støping og de fleste eksperimentelle testene har blitt utført. Jeg ønsker å takke labansvarlig Samdar Kakay, som har vært meget behjelpelig med alt vi har lurt på.

Oppgaven har blitt gjennomført ved det Teknisk - Naturvitenskapelige fakultetet ved Universitetet i Stavanger, som også stod for de økonomiske utgiftene i forbindelse med oppgaven. Oppgaven er et resultat av et litteraturstudium, eksperimentelle tester og beregninger. Håpet er at oppgaven kan være et bidrag i forskningen innen fiberarmert betong.

Stavanger, juni 2014.

Jan Erik Waage

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	2
Forord	3
Innledning	7
1. Teori	8
1.1. Historie	8
1.2. Egenskaper	10
1.2.1. Fersk betong	11
1.2.2. Herdet betong	11
1.3. Tilsetningsstoffer	12
1.4. Tilslag	13
1.4.1. Fint tilslag	16
1.4.2. Grovt tilslag	16
1.5. Pozzolaner	17
1.5.1. Silikastøv	18
1.5.2. Flyveaske	19
1.6. Sement	20
1.6.1. Norcem Anleggsement FA	21
1.6.2. Kjemisk sammensetning	22
1.7. Fasthet	23
1.7.1. Fasthetsklasser	23
1.8. Fiberarmert betong	24
1.8.1. Fibertyper	24
1.9. Duktilitet	26
1.9.1. Definisjon	26
1.9.2. Bruddmekanikk	26
1.9.3. Bruddenergi	27
1.9.4. Karakteristisk lengde	28
1.9.5. Brittleness number	28
2. Strukturell analyse	29
2.1. Bruddgrensetilstand (ULS)	29
2.1.1. Materialfaktor	29
2.1.2. Momentkapasitet for vanlig armert konstruksjon i henhold til EC2	30

2.1.3.	Momentkapasitet for fiberarmert betong.....	33
2.1.4.	Skjærkapasitet	33
2.2.	Bruksgrensetilstand (SLS).....	35
2.2.1.	Minimumsarmering.....	35
2.2.2.	Konstruksjonsregler minimumsarmering.....	36
2.2.3.	Risslast og rissmoment.....	37
3.	Prøveplan	40
3.1.	Prøveplan	40
3.2.	Blandeprosedyre	40
4.	Prøvemethoder	41
4.1.	Fersk betong	41
4.1.1.	Synkmål.....	41
4.1.2.	Densitet.....	42
4.1.3.	Luftinnhold.....	43
4.2.	Støping.....	44
4.2.1.	Terninger	44
4.2.2.	Sylindere.....	45
4.2.3.	Små bjelker.....	46
4.2.4.	Store bjelker	47
4.3.	Herdet betong	51
4.3.1.	Trykkfasthet	51
4.3.2.	Spaltestrekfasthet	52
4.3.3.	Arbeidsdiagram – trykk.....	54
4.3.4.	Bøystrekfasthet	55
4.3.5.	Arbeidsdiagram – strekk	61
4.3.6.	Rissutvikling v/last + bruddlast.....	62
5.	Proporsjonering.....	63
5.1.	Materialer.....	63
6.	Resultater og diskusjon	65
6.1.	Fersk betong	65
6.1.1.	Synkmål.....	65
6.1.2.	Densitet.....	66
6.1.3.	Luftinnhold.....	67

6.2.	Herdet betong	68
6.2.1.	Trykkfasthet	68
6.2.2.	Spaltestrekkfasthet	70
6.2.3.	Arbeidsdiagram – trykk.....	72
6.2.4.	Bøyestrekfasthet	75
6.2.5.	Arbeidsdiagram – strekk	83
6.2.6.	Rissutvikling v/last + bruddlast.....	90
7.	Konklusjon.....	95
8.	Feilkilder	96
9.	Figurliste	97
10.	Referanser.....	99
11.	Tabelliste	101
12.	Vedlegg	102
	Vedlegg datablader.....	103
	Dynamon SX-N superplasierende tilsetningstoff.....	103
	Norcem Anleggsement FA.....	105
	Stålfiber krampeharex DE 60/1,0 NZ	107
	Basaltfiber reforcetek chopped basalt fibres	110
	Siktekurver.....	112
	Siktekurve 0-8	112
	Siktekurve Velde 8-16	113
	Siktekurve Velde 16-22	114
	Vedlegg proporsjonering	115
	Vedlegg testverdier.....	120
	Terning trykkfasthet.....	120
	Spaltestrekkfasthet	122
	Arbeidsdiagram strekk	123
	Arbeidsdiagram trykk	128
	Store bjelker	129
	Bøyestrekfasthet.....	130
	Bøyestrekfasthet kurver	131

Innledning

Kværner engineering vil i årene fremover fokusere på offshore betongkonstruksjoner i både lettbetong og høyfast normalbetong. Høyfast normalbetong kan være mer utsatt for opprissing grunnet generelt mer sprø oppførsel ved belastning. Dette innebærer at når riss først dannes så går konstruksjonen raskere mot brudd. Dette kompenseres vanligvis med armering i konstruksjonen, men også fiber kan benyttes for å gjøre betongen mer duktil og mindre utsatt for oppsprekking når den er utsatt for strekkrefter.

Opgaven går ut på å gjennomføre et litteraturstudium om høyfast betong, fiberarmering og duktilitet. Målet med oppgaven er å få en høyfast betong med en trykkfasthet over 100 MPa. Bjelkeforsøk skal utføres i laboratorium for å måle effekten på bjelkens egenskaper. Andre mekaniske egenskaper som trykkprøving, arbeidsdiagram, strekkfasthet og E-modul vil også bli prøvet. Forsøkene vil omfatte bruk av stålfiber og basaltfiber.

Kapittel 1 består av teori rundt betong og delmaterialer, samt fiberarmert betong og duktilitet. I kapittel 2 blir det beskrevet fremgangsmåter for å beregne momentkapasitet, minimumsarmering, skjærkapasitet, risslast og rissmoment. Det blir også sett på et forslag for momentkapasitet for fiberarmerte konstruksjoner. Kapittel 3 beskriver prøveplanen og blandedprosedyren. I kapittel 4 blir de forskjellige prøvemetodene beskrevet. Kapittel 5 omhandler proporsjonering, mens kapittel 6 inneholder presentasjon og diskusjon av de eksperimentelle resultatene oppnådd i forsøkene som er utført.

Forsøkene som er gjennomført fokuserer på å se på økte duktilitetsegenskaper ved tilsetning av forskjellige typer og mengder fiberarmering.

1. Teori

1.1. Historie

Betong er et materiale som har eksistert i en eller annen form i lang tid. Det er uenighet om hva som er den eldste betongen, noe som kan begrunnes med at forskjellige forfattere har forskjellige meninger rundt selve definisjonen på hva som er betong. Både sammensetningen og produksjonsmetoden på betong var forskjellig før i tiden i forhold til det vi kaller betong idag.

De tidlige sementbindemidler var som oftest en kombinasjon av brent kalk og hydraulisk kalk. Kalk brennes av relativt ren kalkstein, der kullsyre drives ut ved ca 1000-1100 °C, men herder ikke under vann. Når brent kalk blir blandet med vann og sand får man en såkalt kalkmørtel, som kontinuerlig vil absorbere CO₂ fra luften og herdne, noe som kan sies å være en reversibel prosess av brenningen. Hydraulisk kalk derimot herder i vann som sementen vi bruker idag. Det er produkter av dette limpulveret vi vanligvis anser som betong i vår tid.

Bruken av betong strekker seg mange tusen år tilbake i tid og noen av de første sporene en har funnet av dette er i et gulv bygd i Yiftah El, vest for Jerusalem, der det er funnet rester av betong. Dette gulvet er antatt bygd for 9000 år siden. En antar at det må ha blitt benyttet ca 8m³ betong med 2 tonn kalk som bindemiddel til det 180m² store gulvet.

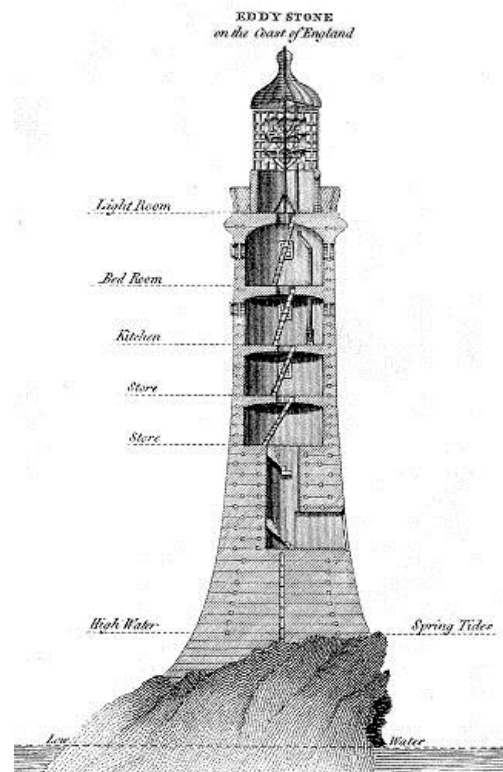
De tidligste illustrasjonene av betongarbeid har man funnet i Egypt. Disse kan dateres til ca 1950 f.kr. Dette er illustrasjoner fra Thebes gravkammer som viser forskjellige stadier av det enkelte har beskrevet som betongproduksjon.

Romerne var flittige brukere av betong som byggemateriale. De praktiserte omfattende bruk av betong fra 300 f. Kr. til 476 e.kr., en tidsperiode på mer enn 700 år. Romerriket var en dominerende makt i den vestlige verden fra 27f.kr. til år 395, og spredde sin kultur og sine skikker på en måte uten sidestykke tidligere i historien. I denne perioden ble Romersk betong, laget av kalk, vulkansk aske og tilsag av pimpstein, mye brukt i mange romerske bygninger. Pantheonet i Roma, fullført ca 140 e.kr. er kanskje en av de mest kjente. Romernes byggemåter ble også bevart langt inn i middelalderen.

Etter romerrikets fall kommer det en periode på over 1000 år der betong bare benyttes i spredte tilfeller og da som regel i kirkelige byggverk. Det kan virke som om kirken i denne perioden passet godt på romernes betonghemmeligheter.

En av de kanskje største pådriverne for den moderne bruken av betong er det tredje fyrhuset på Eddystoneklippene. Disse klippene er et meget værhardt sted 14 km utenfor Plymouth. John Smeaton fikk i 1756 i oppgave å bygge dette fyrtårnet. Smeaton eksperimenterte med ulike typer sement og endte opp med en blanding av kalk fra Aberthaw og pozzolan fra Italia. Fyrhuset stod ferdig i 1759 og var i tjeneste frem til 1882, da fundamentene begynte å svikte.

Den engelske mureren Joseph Aspdin fikk i 1824 patent på sin «Portland cement». Navnet kommer av at produktet har en likhet i farge, hardhet og fasthet med naturstein fra halvøya Portland i Dorsetshire. Joseph Aspdin's sønn William Aspdin forbedret kvaliteten på produktet gjennom høyere brennetemperatur, og tok ut patent på dette i 1852. Produksjonskostnadene var mye høyere, men produktet hadde relativt treg avbindingstid og god tidligfasthet. Bruken av betong i byggebransjen økte raskt fra 1850 og utover, og ble snart den dominerende bruken av sement. Dermed begynte Portland sement sin dominerende rolle. ^[1]



Figur 1 : Det tredje fyrhuset på Eddystoneklippene

Tidlig på syttitallet spådde eksperter at den praktiske grensen for ferdigblandet betong sannsynligvis ikke ville overstige en trykkfasthet på 75 Mpa. Utviklingen av høyfast betong har over årene gjort at dette estimatet enkelt blir møtt og forbigått. ^[2]

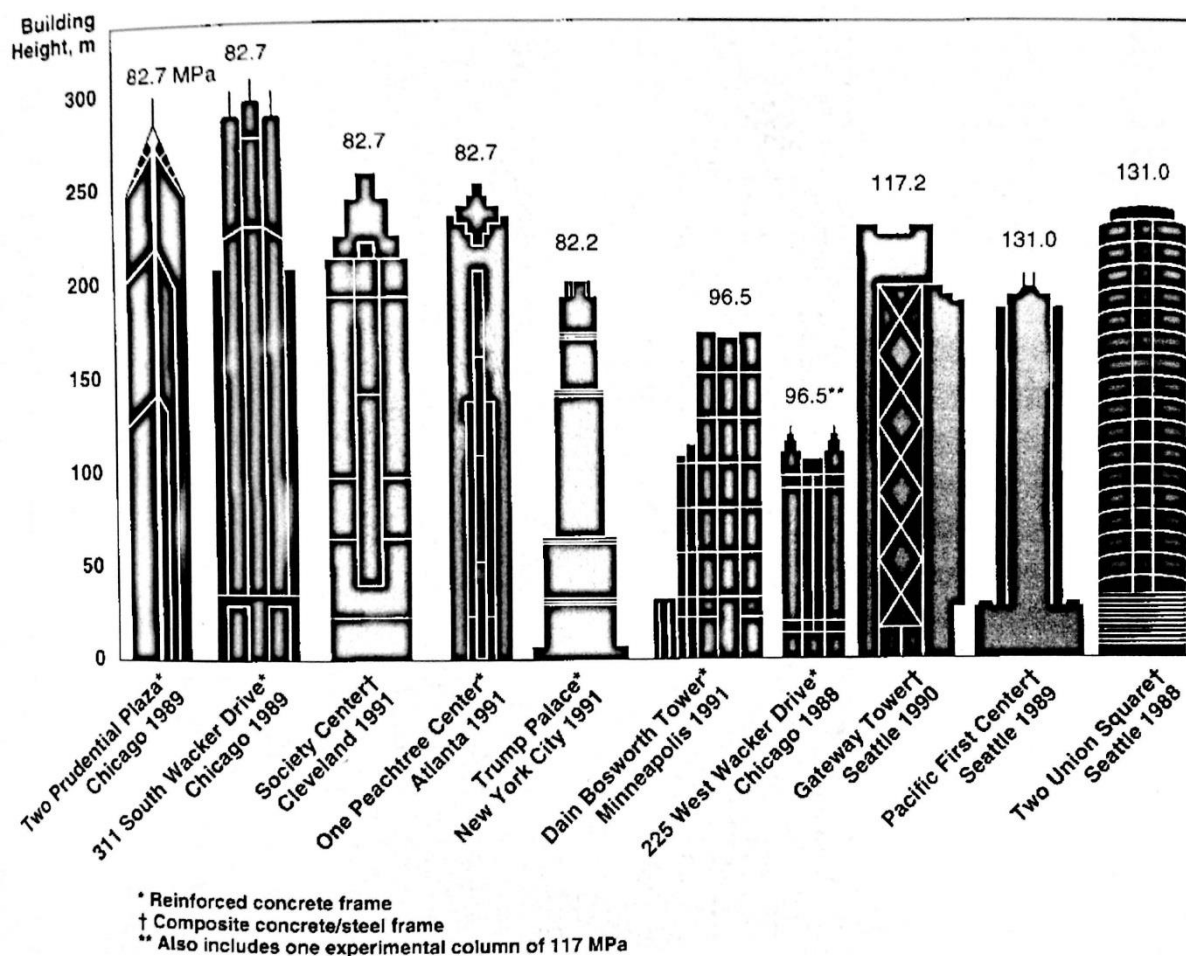
På midten av sekstitallet var de fleste fornøyde med å basere bygg på 15-20 Mpa betong som var godt forstått, økonomisk og trygg. Det var ikke åpenbart at betong en dag ville erstatte stål som bærende system i høyhus. Datidens oppfatning var at bruken av betong i høyhus bare var egnet til fundamenter, gulv og som brannbeskyttelse for konstruksjonselementer av stål. I Chicago på denne tiden begynte man å bruke høyfast betong i betydelige mengder i store bygg. Det skal nevnes at det som ble betegnet som høyfast betong da, ikke nødvendigvis er det nå. Trykkfastheten til betongen ble over en periode på 10 år økt fra 15-20 Mpa til 45-60Mpa. Økningen i trykkfasthet stoppet imidlertid på 60 Mpa, da en teknologisk barriere som ikke kunne bli forbigått med de tilgjengelige råmaterialer var nådd. Det var først ved inntoget til superplastiserende midler på åttitallet at fastheten kunne bli økt ytterligere, ved å redusere v/c-tallet. Bruken av silikastøv i betong ble rapportert allerede i 1952, av en Norsk forsker, men det var ikke før sent på syttitallet at silikastøv begynte å bli brukt som et supplerende sementbasert materiale i betong i Skandinavia. I Nord-Amerika begynte det først å bli brukt tidlig på åttitallet. Flere høyhus ble oppført i høyfast betong fra sekstitallet og utover. ^[3]

1.2. Egenskaper

Betongens egenskaper blir påvirket av mange faktorer. Bruken av tilsetningstoffer, type og sammensetning av tilslag, bruk av pozzolaner og type sement har mye å si for kvaliteten på sluttproduktet. I dette delkapittelet sees det på egenskapene til vanlig betong, i forhold til høyfast betong.

Vanlig betong er den absolutt vanligste å benytte. Vanlig betong brukes til de fleste formål, blant annet boligblokker, broer, veier, gater, dekker, tunneller, dammer og kaier. [4]

Høyfast betong er vanligere å benytte i forbindelse med for eksempel offshoreplattformer, skyskrapere og konstruksjoner med behov for høy styrke. En kan med høyfast betong lage mindre tverrsnitt enn om en skulle brukt vanlig betong til den samme konstruksjonen.



Figur 2: Noen bygg med høyfast betong i USA

1.2.1. Fersk betong

Egenskapene til fersk betong er ikke nevneverdig forskjellig i høyfast betong og vanlig betong og kan beskrives av støpelighetskonseptet. Støpelighet er ikke absolutt i den forstand at det er så og si umulig å spesifisere hva som er god og dårlig støpelighet, da nødvendig støpelighet i praksis er avhengig av blant annet type konstruksjon, støpings- og komprimeringsteknikk og transport. Støpeligheten er i stor grad avhengig av egenskapene og sammensetningen av tilslaget, sementpastaen og av den volumetriske sammenhengen mellom disse. Støpeligheten blir også påvirket av tilsetningstoffer.

Støpelighet kan deles opp i tre grunnleggende elementer; stabilitet, mobilitet og komprimerbarhet. Stabilitet er betongens evne til å bevare sin homogenitet gjennom den ferske fasen. Mangel på stabilitet kan føre til separasjon. Mobilitet kan beskrives som den ferske betongens evne til å bevege seg som følge av krefter som virker på den, eller som evnene til å fylle ut støpeformen og omslutte armeringen. Komprimerbarheten er den ferske betongens evne til å bli pakket. ^[5]

1.2.2. Herdet betong

Hovedforskjellen på vanlig betong og høyfast betong ligger i fastheten. Høyfast betong er definert som betong med høyere trykkfasthet enn 55 Mpa, men vanlig betong naturlig nok er betong med lavere trykkfasthet enn 55 Mpa. Høyfast betong er også mye sprøere enn vanlig betong. Generelt kan en si at jo høyere trykkfasthet en betong har, jo sprøere er den. Strekkfastheten til vanlig betong ligger på rundt 10-12% av trykkfastheten, mens den for høyfast betong er ca 4-6%.

1.3. Tilsetningsstoffer

Norsk Standard NS-EN 206-1 definerer tilsetningsstoffer som: «*Materiale som tilsettes under blanding i små mengder i forhold til sementmengden for å endre egenskapene til fersk eller herdnet betong*»

Bruken av kjemiske tilsetningsstoffer er svært utbredt, og allerede i 1984 var det estimert at 95 til 100% av den totale Norske betongproduksjonen inneholdt kjemiske tilsetningsstoffer. Norge har på mange måter vært en pioner i bruken av kjemiske tilsetningsstoffer. Offshore industrien hadde behov for nye løsninger som brukte nye tilsetninger for å få en betong med ekstremt god støpelighet og styrke. Kjemiske tilsetningsstoffer bør bli sett på som noe som kan forbedre en allerede god betong. En dårlig blanding kan normalt sett ikke bli vesentlig forbedret ved å tilsette kjemikalier.

Effekten en tilsetning har er avhengig av flere faktorer, blant annet mengden tilsetning, type og mengde sement, tilslag, konsistens, om andre tilsetninger allerede er tilsatt, tidspunkt for tilsetning, temperatur, blandetid og type blandeutstyr.^[5]

Det er mange forskjellige typer tilsetninger i bruk i dag. De viktigste som brukes i betong er plastiserende/vannreducerende stoffer, luftinnførende stoffer, akselererende stoffer og retarderende stoffer. I tillegg finnes det en del andre stoffer til spesielle formål.^[4]

Plastiserende og superplastiserende tilsetningsstoffer er den helt klart største gruppen kjemiske tilsetningsstoffer brukt i betong i Norge. Omtrent 95% av alle tilsetninger solgt i Norge er av denne typen. Plastiserende og superplastiserende tilsetningsstoffer er delt i fire undergrupper. Disse undergruppene og deres markedsandeler fra 1996 til 2006 er vist i Tabell 1-1.

Tabell 1-1 Markedsandeler plasiserende midler 1996-2006

Type tilsetningstoff	Plastiserende/ Superplastiserende *)	Markedsandel i Norge(%)		
		1996	2001	2006
Lignosulfonat	P	60	52	30
Naftalen	SP	5	6	1
Melamin	SP	35	16	2
Polykarboksylat	SP	0	26	67

*) P = Plastiserende, SP = Superplastiserende

Hovedoppgaven til de plastiserende/superplastiserende tilsetningstoffene er å spre samlede sementpartikler i vann. Som vist i tabellen over er polykarboksylat og lignosulfonat dominerende i det norske markedet. Den plastiserende effekten til polykarboksylat er omtrent 3-4 ganger større enn andre tilsetningsstoffer.^[5]

1.4. Tilslag

Tilslag er sand, stein og grusmaterialer som blir brukt i betong. Tilslaget utgjør vanligvis mellom 65-75% av betongvolumet. Det er vanlig å dele opp tilslaget i fraksjoner, for eksempel 0-8 mm, 8-16mm og 16-22mm. Disse fraksjonene kan også bli delt opp i mindre fraksjoner, for eksempel 0-4mm, 4-8mm, 8-12mm og 12-16mm. Dette muliggjør forskjellige sammensetninger av graderingskurver for varierende bruk av betong.

Det var inntil for 15-20 år siden helt vanlig å bruke tilslag fra lokale grustak og blande dette rett inn i betongen. I dag er både tilslags- og betongindustrien mer klar over hvor mye tilslaget kan ha å si på egenskapene til betongen, både i fersk og herdet tilstand. En stor del av æren for dette må en gi til ekspertisen som ble utviklet i Norge under byggingen av offshore-plattformene i nordsjøen. En annen faktor som har bidratt er økt bruk av betong med høyere fasthet, som har ført til økt fokus på tilslagsegenskapene. ^[5]

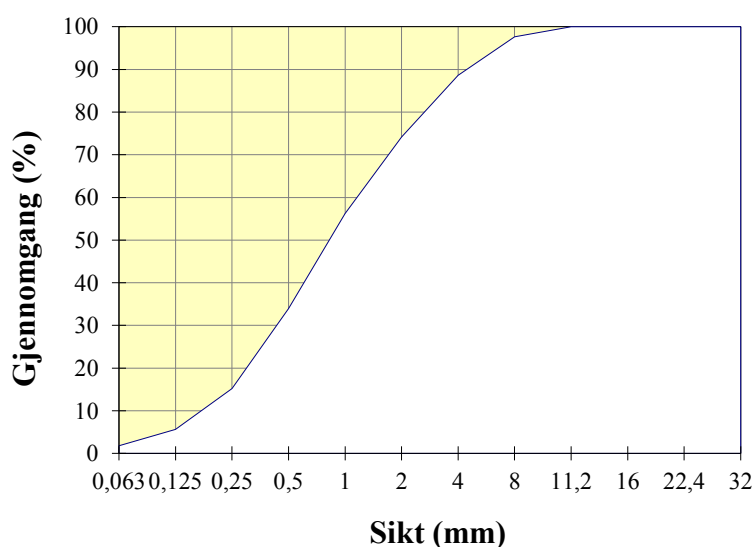
Tilslagets korngradering er mengdefordelingen av de ulike kornstørrelsene i blandingen. Korngraderingen til tilslaget bestemmes ved en sikteanalyse. Til denne analysen brukes en siktesats som består av en rekke sikter med standardiserte maskevidder. For sikting av fint tilslag brukes en siktesats med maskevidder på 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, og 0,063mm. For det grove tilslaget brukes en siktesats med maskevidder tilsvarende som for fint tilslag, men en legger til sikter med maskevidde på 11,2, 16, 22,4 og 32 mm. Eventuelt kan 64 mm også legges på. For at en skal få et godt resultat, må materialet være overflatetørt, slik at det ikke klumper seg sammen og går gjennom riktig sikt. En måler opp en viss mengde materiale, for eksempel 1 kg, og legger det i den øverste sikten. Deretter ristes hele siktesatsen til gjennomgangen har stoppet. En har da fått delt opp tilslaget i fraksjoner. Mengden materiale i hvert sikt veies opp, og beregnes som en prosent av den totale massen.

Når en skal tegne opp siktekurven, ser en på sikteresten og gjennomgangen. Sikteresten er den mengden masse som i prosent ikke kan passere en gitt maskevidde. Sikteresten fra en tilfeldig sikteprøve er lik summen av massen på den tilfeldige sikten og på alle siktene over. Gjennomgangen er mengden masse i prosent som går gjennom den sikten vi ser på. Summen av sikteresten og gjennomgangen er på hvert sikt 100%. I Tabell 1-2, vises sikterest og gjennomgang for sanden brukt i betongen i denne oppgaven. ^[4]

Tabell 1-2: Sikterest og gjennomgang

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	14,4	35,8	2,4	97,6
4	78,6	163,9	11,4	88,6
2	207,1	343,4	25,9	74,1
1	392,5	540,1	43,8	56,2
0,5	628,4	778,4	66,1	33,9
0,25	836,9	969,1	84,8	15,2
0,125	944,7	1065,0	94,4	5,6
0,063	982,4	1108,9	98,2	1,8
Bunn	999	1130		

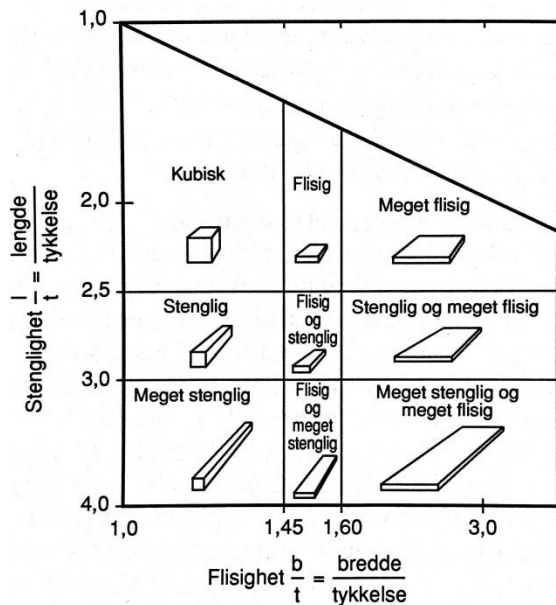
I Figur 3 vises siktekurven for den samme sanden.



Figur 3: Siktekurve

Partikkelformen til tilslaget påvirker både vannbehovet og støpeligheten til betongen. Kubiske, avrundede partikler vil ha en positiv innvirkning på disse egenskapene, mens et høyt innhold av flisige partikler vil ha en negativ innvirkning.^[5]

Flisighet er forholdet mellom kornenes bredde og tykkelse, mens stenglighet er forholdet mellom kornenes lengde og tykkelse, se Figur 4. Naturlig sand og grus har generelt en glatt overflate og rund kornform.^[6]



Figur 4: Kornformdiagram etter stenglighet og flisighet.

1.4.1. Fint tilslag

Fint tilslag er tilslag med kornstørrelse under 8mm. Det vanligste i Norge er å bruke sand fra naturlige grusforekomster. Dette kan være både «naturlig sand», som er siktet direkte fra grustaket, eller «naturlig knust stein», som er naturlig sand iblandet knust stein fra forekomsten.

I de senere år har det også blitt vanlig å bruke sand produsert fra knust stein, såkalt «knust sand/maskin sand», i betongen. På grunn av en forventet mangel på grus av god kvalitet også i Norge, vil bruken av knust sand mest sannsynlig bli mer vanlig i fremtiden. ^[5]

1.4.2. Grovt tilslag

Grovt tilslag er tilslag med kornstørrelse over 8mm. I Norge er det som med sand vanlig å ta grovt tilslag fra naturlige forekomster. Dersom det grove tilsaget er siktet direkte fra grustaket, får vi det som kalles «naturlig grus». I mange forekomster er det mindre innhold av de grove fraksjonene i forhold til de fine, og det er derfor vanlig å knuse større steiner og kombinere dette med naturlig grus. Vi får da det en kaller «knust grus». ^[5]

1.5. Pozzolaner

Pozzolaner er stoff som ved en reaksjon med vann og kalkhydrat danner et lignende produkt som ved en reaksjon mellom portlandsement og vann. Pozzolaner kan bli brukt som erstatning for en del av portlandsementen, eller som tilsats til den. Navnet pozzolan kommer fra byen Pozzuoli ved Napoli. Innbyggerne her fant vulkanaske som de knuste og blandet med brent kalk, noe som ga et sterkt bindemiddel de brukte til muring.^[7]

Det er et stort antall aktive mineraltilsetninger i bruk i betong. Formuleringen «aktive tilsetninger» antyder en kjemisk reaktivitet enten alene eller i kombinasjon med Portlandsement og/eller dens hydratiseringsprodukter.

Ikke-aktive tilsetninger er også mye brukt og blir vanligvis referert til som fillere. Dette er da som regel finstoff finere enn 125 µm som er så godt som kjemisk dødt. Aktive tilsetninger har også en filler-effekt.

De to typene av pozzolaner som er mest brukt i Norge er flyveaske og silikastøv. Begge disse er industrielle biprodukter, som reduserer behovet for Portlandsement når de blir brukt i betong. Bruken av disse er da fordelaktig både fra et økonomisk og et miljøbevisst synspunkt, sistnevnte hovedsakelig ved å redusere de store CO₂ utslippene som hører med produksjonen av Portlandsement.

Aktivitetsfaktoren, eller k-faktoren, sier noe om hvor mye sement du kan erstatte med de forskjellige pozzolanene. K-faktoren er en del av masseforhold konseptet (m), som er gitt av ligningen:

$$m = \left(\frac{w}{c}\right) eq = \frac{w}{c+k*p} \quad (\text{Formel 1-1})$$

Der

p er den aktive tilsetningen, for eksempel flyveaske eller silikastøv.

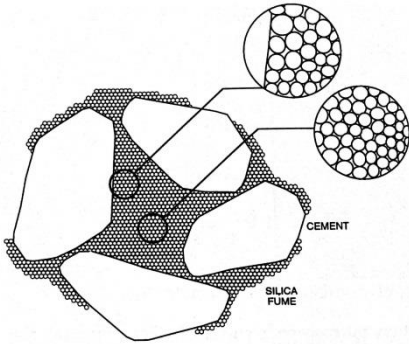
w er vannet.

c er Portland sement.

k er aktivitetsfaktoren. For silikastøv og flyveaske er det i Norge vanlig å bruke k-verdier på 2 og 0,4.^[5]

1.5.1. Silikastøv

Silikastøv er et biprodukt av smelteprosessen brukt for å produsere silisiummetall og ferrosilisiumlegeringer. Innholdet av silisiumdioksid er som regel 85-98%. Silikastøv fungerer som en meget god filler, både på grunn av størrelsen og formen til partiklene. Silikastøv har et overflateareal på rundt $20000\text{m}^2/\text{kg}$, mens vanlig Portland sement har rundt $300\text{-}500\text{m}^2/\text{kg}$. De er formet som glassaktige kuler og har en gjennomsnittlig diameter på mellom $0,1\text{-}0,2\ \mu\text{m}$. Det vil si at den gjennomsittlige silikastøvpartikkelen er ca 100 ganger mindre enn den



Figur 5 : Filler effekt av silikastøv

gjennomsnittlige sementpartikkelen. Silikastøvpartiklene kan fylle tomrommet mellom de større sementpartiklene, som vist i Figur 5 : Filler effekt av silikastøv. Silikastøv gjør den ferske betongen seigere, og blødning kan bli helt eliminert. Den økte seigheten vil hjelpe til å redusere separasjon og hindre dannelsen av vannlommer under armering og grovt tilsalg. For høyfast betong er det veldig nyttig å betrakte silikastøv som en vannreducerende i forhold til støpelighet og vannbehov. I en ren sementpasta er det et visst behov for vann for å fylle hulrommet mellom sementkornene og muliggjøre flyt.

Vannreducerende tilsetningsstoffer reduserer hulromsvolumet ved å spre sementkornene og senker dermed vannbehovet. En kan med silikastøv redusere vannbehovet ytterligere, da silikastøvet kan erstatte vannet i hulrommene og øke støpeligheten når en bruker superplastiserende midler. Det er spekulert i om silikastøv har en «kulelager effekt» som forbedrer mobiliteten til de irregulære sementpartiklene. Verken avbindingstiden eller temperaturutviklingen blir påvirket noe særlig ved bruk av silikastøv i normale doseringer.

Silikastøv øker fastheten til betongen, da spesielt etter 7-28 døgn. Pozzolanreaksjonen til silikastøv begynner litt etter sementreaksjonen, naturlig nok, siden kalsiumhydroksid må bli dannet av sementreaksjonen før pozzolanreaksjonen kan begynne. Permeabiliteten til betongen blir redusert ved bruk av silikastøv, noe som bidrar til bedre beskyttelse mot kloridinntrenging. Silikastøv bidrar også til bedre heft mellom betongen, tilslaget og armeringen, da en har en mye tettere mikrostruktur ved bruk av silikastøv. ^[5]

1.5.2. Flyveaske

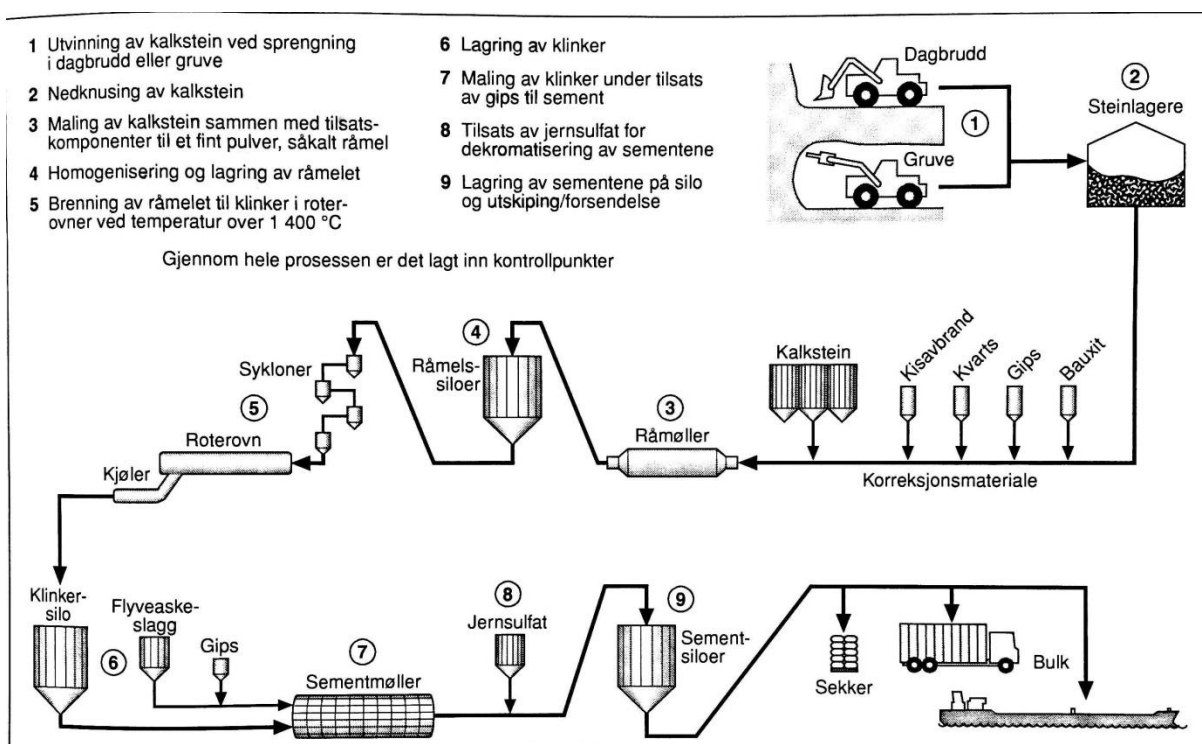
Flyveaske er et biprodukt fra brenning av kull i kullkraftverk. I Norge er det få kullkraftverk, så det meste av flyveasken brukt i betong blir importert fra Danmark. Flyveasken blir samlet opp gjennom filtere i kullkraftverkene. Variasjonen i flyveaske er mye større enn i silikastøv, da de er avhengig av kulletts sammensetning. Flyveaske med kvaliteter som er egnet for betong har som regel ca 45-55% silisiumdioksid og en kornstørrelse på nivå med Portlandsement, det vil si 1-100 μm , med et gjennomsnitt på 10-20 μm . Overflatearealet er på ca 300-500 m^2/kg , det samme som Portlandsement. Ofte er en del av partiklene i flyveaske hule, med mindre partikler på innsiden.

Flyveaske vil generelt forbedre støpeligheten til betongen når den blir brukt som en sementerstatte. Som med silikastøv, vil permeabiliteten til betongen reduseres ved bruk av flyveaske. På grunn av den trege pozzolanreaksjonen, vil tidligfastheten være lav, men flyveasken kan reagere over lang tid, dersom det er nok fuktighet til at det er mulig å få reaksjoner. ^[5]

1.6. Sement

Det meste av sementen som brukes i Norge er Portlandsement. Det er et grått pulver som blir framstilt ved å male et mellomprodukt, klinker, sammen med gips. Gipsen blir tilsatt for å styrke størkingen til sementen. Portlandsementer i klasse CEM I består av minst 95% portlandklinker og gips. Portlandsement er et hydraulisk bindemiddel, det vil si at det danner en hard, vannbestandig masse når det blir tilsatt vann. [4]

Hovedbestanddelen i produksjonen av Portlandklinker er kalkstein. Kalksteinen blir godt blandet med mindre bestanddeler av for eksempel bauxitt, kvarts og gips for å få den riktige sammensetningen av oksyder. Denne nye miksen av råmaterialer blir malt til mel. Kalkstein står normalt for over 90% av råmaterialet. Oksydsammensetningen av råmaterialet er meget viktig for kvaliteten til sementklinkeren. Kalkstein, som for det meste består av kalsitt, er hovedkilden til kalsium, mens de andre bestanddelene bidrar med ekstra tilførsel av aluminium, jern, alkalier og noen andre elementer i små konsentrasjoner.



Figur 6: Produksjon av sement.

Portlandsement blir produsert av en blanding av leir- og kalkholdige materialer. Figur 6 viser trinnene i sementproduksjon. Prosessen blir ofte delt inn i tre trinn: oppredning av råmaterialene, brenning og nedmaling til sement. Oppredningen skjer under punktene 1-4, der de knuste steinmaterialene males ned. Råmaterialene går deretter videre fra råmøllen via en råmølle til et syklontårn. Materialene forvarmes her til 1000°C og karbondioksid drives ut. Selve brenningen foregår i roterovnen, der råmaterialet varmes videre til 1400°C. Det er ved denne temperaturen de ulike klinkermaterialene sement består av dannes. En delvis smeltefase oppnås i denne brenneprosessen, der partiklene sintrer sammen til små kuler, kalt klinker. Denne klinker blir så nedmalt sammen med gips i en sementmølle. Uten tilsetning

av gips ville sementen stivnet momentant når man tilsatte vann. Sementens finhet varieres ved å endre maletiden. Dersom en skal produsere blandingssementer, tilsettes for eksempel flyveaske i sementmøllen og males sammen med sement og gips. Jernsulfat tilsettes på slutten av av produksjonen for å binde opp krom, som sement inneholder litt av.

I Norge produseres det flere typer sement, alle av Norcem AS, som er Norges eneste sementprodusent. Disse er Norcem Standardsement, Norcem Standardsement FA, Norcem Industrisement, Norcem Anleggsement, Norcem Anleggsement FA, Mursement, Hvit sement og noen spesialsementer. I denne oppgaven er det brukt Norcem Anleggsement FA, så dette er den eneste sementen det skal sees nærmere på.

1.6.1. Norcem Anleggsement FA

På hjemmesidene til Norcem beskrives denne sementen slik: «Norcem Anleggsement FA er en spesialsement for anleggskonstruksjoner. Sementen kan brukes i alle eksponerings-, bestandighets- og fasthetsklasser. Den er spesielt tilpasset norske forhold for bruk i bestandighetsklasse M45 og MF45 eller strengere.»

Sementen inneholder 17% flyveaske og har en finhet på 390 m²/kg. Den spesifikke vekten er 2,99 kg/dm³. Varmeutviklingen er relativt lav, så sementen er egnet for bruk i massive konstruksjoner. Sementen gir også god støpelighet på lave v/c tall.

1.6.2. Kjemisk sammensetning

Den typiske portlandklinkeren har en sammensetning som vist i Tabell 1-3 og inneholder normalt fire hovedfaser. Disse kalles Alite, Belite, Aluminat og Ferritt. Sammensetningen av disse er gitt i Tabell 1-4 De fire hovedfasene i Portlandklinker.

Oksid	Navn	Vekt%
CaO	Kalsiumoksid /kalk	60-67
SiO ₂	Silisiumdioksid /silika	17-24
Al ₂ O ₃	Aluminiumoksid / alumina	4-7
Fe ₂ O ₃	Jernoksid	1,5-5
MgO	Magnesiumoksid / magnesia	1-5
SO ₃	Sulfitt	0,5-3,5
K ₂ O + Na ₂ O	Alkali	0,2-1,5

Tabell 1-3 Typisk sammensetning av Portlandklinker

Hovedfase	Mineralogisk begrep	Kjemisk notasjon	Forkortet kjemisk notasjon
Trikalsiumsilikat	Alite	3CaO*SiO ₂	C ₃ S
Dikalsiumsilikat	Belite	2CaO*SiO ₂	C ₂ S
Trikalsiumaluminat	Aluminat	3CaO*Al ₂ O ₃	C ₃ A
Tetrakalsiumaluminoferritt	Ferritt	4CaO*Al ₂ O*Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Tabell 1-4 De fire hovedfasene i Portlandklinker

1.7. Fasthet

Fasthet kan sies å være den høyeste spenningen et materiale tåler før det bryter sammen. For betong er trykkfastheten den viktigste materialegenskapen ved design av konstruksjoner, da strekkfastheten i betong er så liten i forhold. En regner vanligvis med at alle strekkrefter må bli tatt opp av armeringen. Som nevnt i kapittel 1.2.2 har vanlig betong en strekkfasthet på ca 10-12% av trykkfastheten, mens høyfast betong har ca 4-6% av trykkfastheten. ^[5]

I Norge er det mest vanlig å benytte 100*100*100mm terninger, som etter 28 døgns herding blir testet til brudd i en trykkpresse, når man skal teste trykkfastheten til betongen. Sylinderer kan også benyttes.

1.7.1. Fasthetsklasser

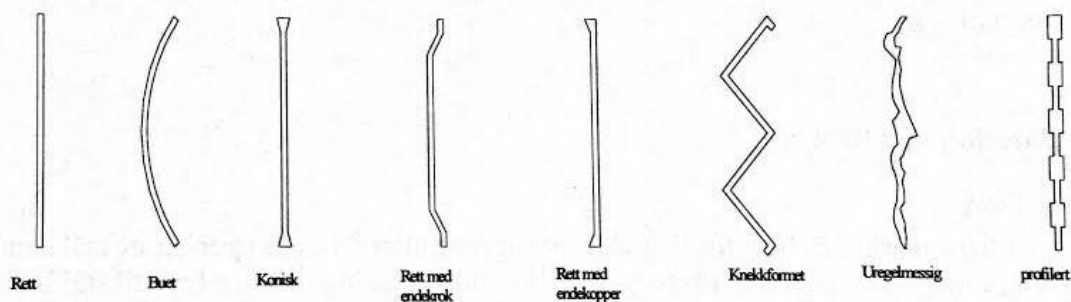
Den minste trykkfastheten et prøvestykke kan ha innenfor en gitt fasthetsklasse, er gitt av Norsk Standard. Tabellen under viser fasthetsklassene og minste verdier på fasthet prøvestykkene kan ha, angitt i nasjonalt tillegg i NS-EN 206-1.

Tabell 1-5: Fasthetsklasser

Fasthetsklasse NS	B10	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65	B75	B85	B95
CEN-betegnelse		C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C55/67				
Karakteristisk sylinderfasthet f_{cck}	10	20	25	30	35	45	55	65	75	85	95
Karakteristisk terningfasthet f_{ck} ¹⁾	12	25	30	37	45	55	67	80	90	100	110
¹⁾ For fasthetsklasse B55 og høyere kan andre verdier benyttes hvis forholdet mellom disse og referansefastheten for sylinderer er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen											

1.8. Fiberarmert betong

Fiberarmert betong er som navnet antyder betong med fiberarmering. Et stort antall fibre blandes inn i betongen på blandestasjonen. Det aller meste av det som brukes av fiberarmert betong idag brukes i gulv, plater på mark og i sprøytebetong til fjellsikring. Forskjellige typer fiber blir brukt, i forskjellige doseringer. Fibrene varierer både i lengde, tykkelse og utforming. Forskjellige former er vist i Figur 7: Forskjellige former på fiberarmering.



Figur 7: Forskjellige former på fiberarmering

Fiber kan tilsettes for å gjøre betongen mer duktil og for å redusere riss. Armeringsbehovet i betongkonstruksjoner skyldes som nevnt i kapittel 1.7 betongens lave strekkfasthet. Betongens strekktoyning er imidlertid lavere enn armeringens flytetøyning (0,2 mot 2,5 ‰) noe som vil si at en vanligvis får betydelige riss før armeringen tar opp nok krefter. Disse rissene kan føre til redusert levetid og vil vanligvis være uønsket med hensyn til estetikk og vanntetthet. Betongen må derfor i tillegg til styrkekrav oppfylle krav om rissviddebegrensning. Dette kan generelt oppnås på tre måter: økt mengde vanlig armering, bruk av spennarmering og ved hjelp av fiberarmering.

Fiber har vært benyttet til å armere sprø materialer siden oldtiden, da de for eksempel brukte strå og hår i murverk. Asbestfiber ble benyttet i blant annet sementpasta i nyere tid (fra 1898), men på grunn av helseskader i forbindelse med asbest ble alternative fibertyper introdusert på 60 og 70-tallet. Stålfiber har blitt benyttet i over 100 år, da den første patentsøknaden ble levert allerede i 1874. ^[8]

1.8.1. Fibertyper

Det finnes som nevnt flere typer fiberarmering og det vil her bli forklart litt om de forskjellige typene.

1.8.1.1. Stålfiber

Stålfiber er små stenger av stål med varierende lengde og diameter. Vanlig lengde er mellom 30-60mm, mens vanlig diameter er fra 0,5 til 1,2 mm. De har vanligvis en rett form med endekrok. Stålfiber har de siste tiårene vært mye brukt i industrigulv, med stor suksess. De største fordelene i forhold til vanlig armering er spart arbeidstid, transport utover gulvet, mindre opprissing og større fugefrie areal. ^[8]

1.8.1.2. Basaltfiber

Basaltfiber er laget av smeltet vulkansk stein som blir dratt ut til tynne kontinuerlige basalttråder med en bestemt diameter. Disse trådene blir så belagt med et belegg passende for bruk i betong. De tynne basalttrådene tvinnes sammen og kuttes i passende lengder, som varierer avhengig av tiltenkt bruk. Basaltfiber har en materialdensitet på ca 2,68 g/cm³, og en strekkfasthet på ca 3200 MPa. ^[9]

1.8.1.3. Polypropylenfiber

Polypropylenfiber er fiber laget av plastmaterialet polypropylen. Fibrene har lav egenvekt sammenlignet med stålfiber, med en materialdensitet på omtrent 0,91 g/cm³. Polypropylenfibrene brukt i betong er kjemisk inaktive og alkali-resistente. Noen av fordelene med bruk av polypropylenfiber inkluderer økt brannmotstand, redusert fare for eksplosjonsartet avskalling, redusert fare for blødning, økt betongtetthet og økt motstand mot slag. ^[10]

1.8.1.4. Glassfiber

Glassfiber er tynne fibrer fremstilt fra smeltet glass. De tynne fibrene er svært bøyelige og spenstige, noe som gjør at de retter seg ut igjen dersom bøyekraften fjernes, uten varige deformasjoner. ^[11]

Glassfiber i betong er spesielt designet for å være motstandsdyktig mot alkalier. Glassfiberarmert betong kan støpes i plater så tynne som 12 mm. Dette er med på å gjøre at denne typen betong er mye brukt rent arkitektonisk. ^[12]

1.9. Duktilitet

1.9.1. Definisjon

Det finnes mange definisjoner på hva duktilitet er. Store Norske Leksikon definerer duktilitet som et metalls evne til å la seg forme ved plastisk bearbeiding. ^[13] En kan også si at duktilitet er en måling på hvor mye strekk et materiale tåler før brudd, men det gjelder også for det meste for metaller. Duktilitet kan også sies å være et materiales evne til å få en permanent deformasjon som følge av belastning. Sprøe materialer, som for eksempel glass, kan ikke ta opp lokale spenningskonsentrasjoner på lik linje med metaller, og går derfor til brudd relativt lett. ^[14]

Et materiale som kan oppta store tøyninger før det går til brudd, omtales ofte som et duktilt materiale. Duktilitet kan defineres som prosentvis tøyning i forhold til den opprinnelige lengden.

$$\text{prosentvis tøyning} = \frac{L_0 - L_f}{L_0} * 100\% \quad (\text{Formel 1-2})$$

Der

L_0 er opprinnelig lengde.

L_f er lengden etter tøyning.

1.9.2. Bruddmekanikk

Bruddmekanikk er en fagdisiplin innen materialforskning som ser på hvordan brudd oppstår og hvordan de eventuelt kan forhindres. Bruddmekanikken tar utgangspunkt i at alle konstruksjonsmaterialer har sprekklignende defekter, såkalte bruddanvisninger, og at slike defekter resulterer i brudd i konstruksjonsdelen når en funksjon av defektens dypde og den nominelle spenningen i konstruksjonen går over en viss størrelse. Denne størrelsen er avhengig av materialegenskapene og kalles materialets bruddseighet. ^[15]

Som nevnt i kapittel 1.2.2, kan en si at jo høyere fasthet betong har, jo sprøere er den. I tabell 3.1 i NS-EN 1992-1-1:2004 + NA:2008 ser en at tøyningsgrensen, ϵ_{cu2} , i bruddtilstanden endrer seg som funksjon av fastheten. Det samme gjelder tøyningen idet maksimalspenningen nås, ϵ_{c2} . Disse følger formlene under for karakteristiske sylindrefastheter over eller lik 50 MPa. For karakteristiske fastheter under dette er verdiene henholdsvis 3,5% og 2%.

$$\epsilon_{cu2}(\%) = 2,6 + 35 * \left(\frac{90 - f_{ck}}{100}\right)^4 \quad (\text{Formel 1-3})$$

$$\epsilon_{c2}(\%) = 2,0 + 0,85 * (f_{ck} - 50)^{0,53} \quad (\text{Formel 1-4})$$

Der

ϵ_{cu2} er tøyningsgrensen i bruddtilstanden

ϵ_{c2} er tøyningen når maksimalspenningen nås.

f_{ck} er karakteristisk sylindrefasthet

Utifra disse formlene og tabell 3.1 i NS-EN 1992-1-1:2004 + NA:2008 ser vi at tøyningen før brudd oppstår blir lavere med høyere fasthet, mens tøyningen når maksspenning oppnås blir høyere. Disse går mot hverandre og blir like ved en karakteristisk sylindrefasthet på 90 MPa, når begge har en verdi på 2,6%.^[16]

1.9.3. Bruddenergi

Bruddenergien kan testes for å identifisere sprøheten til betongen i spenning. Bruddenergien representerer energien som kreves for en sprekk til å forplante seg. Lavere bruddenergi gjør at det er lettere for sprekker å forplante seg, noe som kan føre til et tidligere sammenbrudd av en konstruksjon.^[17] Bruddenergien kan bestemmes eksperimentelt ved en trepunkts bøyetest, som er beskrevet nærmere i kapittel 4.3.4.

Bruddenergien kan uttrykkes av følgende formel:^[18]

$$G_f = \frac{W_f}{b \cdot h_{sp}} \quad (\text{Formel 1-5})$$

Der

G_f er bruddenergien, i N/m.

W_f er arealet under last/CMOD kurven, i Nmm.

h_{sp} er høyden fra tuppen av den forhåndsdefinerte sprekken til toppen av prøvelegemet, i mm.

b er bredden av prøvelegemet, i mm.

1.9.4. Karakteristisk lengde

Den karakteristiske lengden er en indikasjon på materialets sprøhet, og er definert som:^{[19][17]}

$$l_{ch} = \frac{E \cdot G_f}{f_{ctm}^2} \quad (\text{Formel 1-6})$$

Der

l_{ch} er karakteristisk lengde, i mm.

E er betongens E-modul, i GPa.

G_f er bruddenergien, i N/m.

f_{ctm} er strekkfastheten til betongen, i MPa.

1.9.5. Brittleness number

Brittleness number, eller «sprøhetstallet» sier beskriver hvor sprøtt et materiale er, og er definert som:^[20]

$$\beta = \frac{f_{ctm}^2 \cdot h}{G_f \cdot E} \quad (\text{Formel 1-7})$$

Der

B er brittleness number.

f_{ctm} er strekkfastheten til betongen, i MPa.

h karakteristisk størrelse på konstruksjonen, som for denne oppgaven settes lik lengden til bjelken, i mm.

G_f er bruddenergien, i N/m.

E er betongens E-modul, i GPa.

2. Strukturell analyse

I dette kapittelet sees det på metoder for å bestemme lastvirkninger på konstruksjoner for både vanlig betong og fiberarmert betong.

2.1. Bruddgrensetilstand (ULS)

Bruddgrensetilstanden tar for seg konstruksjonens kapasitet mot brudd, ved beregning på grunnlag av materialenes tøyningssegenskaper og dimensjonerende fastheter. Aktuelle lastvirkninger som blir diskutert i dette kapittelet er bøyemoment og skjærkraft. ^[21]

2.1.1. Materialfaktor

Ifølge Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner^[8], kan materialfaktoren for rest strekkfasthet settes til:

$$\gamma_{cf} = 1,5$$

Og dimensjonerende rest strekkfasthet kan deretter bestemmes som:

$$f_{ftd,res2,5} = \frac{f_{ftk,res2,5}}{\gamma_{cf}} \quad (\text{Formel 2-1})$$

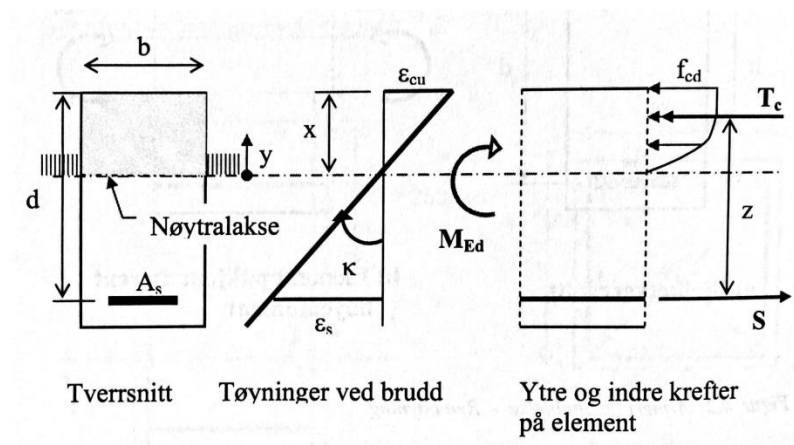
Dersom det tas hensyn til avvik i tverrsnittdimensjoner, og variasjonskoeffisienten for rest strekkfasthet ikke er større enn 10%, kan materialfaktoren reduseres til 1,35. ^[8]

2.1.2. Momentkapasitet for vanlig armert konstruksjon i henhold til EC2

Beregningene lagt frem i dette delkapittelet er basert på EC2^[16] og Sørensen^[21]. Følgende beregningsforutsetninger gjøres i henhold til EC2, 6.1(2)P:

- Full heft mellom betong og armering.
- Naviers Hypotese er gyldig, dvs plane tverrsnitt forblir plane.
- Betongens strekkfasthet sees bort ifra.
- Spennings og tøyningsegenskaper etter EC2, 3.1.7.

På grunnlag av beregningsforutsetningene fås en beregningsmodell som vist i Figur 8.



Figur 8: Beregningsmodell, momentkapasitet.

Der

d er tverrsnittets effektive høyde fra trykkrand til tyngdeunkt i strekkarmering.

A_s er strekkarmeringens tverrsnittsareal.

x er trykksonehøyden.

S er kraft i strekkarmering

T_c er trykkresultant av betongspenningen i trykksonen.

z er indre momentarm, dvs avstand mellom S og T_c .

For et gitt tverrsnitt med en gitt armering må en først bestemme om tverrsnittet er underarmert eller overarmert. Grensetilfellet mellom overarmert og underarmert er det balanserte armerte tilfellet. Ved å bestemme den balanserte armeringsmengden, $A_{s,b}$, og sammenligne den aktuelle A_s med denne kan det avgjøres om tverrsnittet er under eller overarmert.

Fra tøyingsforløpet i Figur 8 kan α_b bestemmes når $\varepsilon_s = \varepsilon_{yd}$:

$$\alpha_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \quad (\text{Formel 2-2})$$

Der

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s}$$

Den balanserte armeringsmengden finnes så fra formelen:

$$A_{s,b} = \lambda * \eta * \frac{f_{cd}}{f_{yd}} * b * d * \alpha_b \quad (\text{Formel 2-3})$$

Ut ifra dette kan en regne ut aktuell α .

Dersom tverrsnittet er underarmert eller balansert armert, altså $A_s \leq A_{s,b}$, finnes α fra formelen:

$$\lambda * \eta * f_{cd} * b * d * \alpha - f_{yd} * A_s = 0 \quad (\text{Formel 2-4})$$

Dersom tverrsnittet er overarmert, altså $A_s > A_{s,b}$, finnes α fra formelen:

$$\lambda * \eta * f_{cd} * b * d * \alpha^2 + E_s * A_s * \varepsilon_{cu} * \alpha - E_s * A_s * \varepsilon_{cu} = 0 \quad (\text{Formel 2-5})$$

Betongtrykksjonens momentkapasitet finnes ved å sette aktuell verdi for α inn i formelen:

$$M_{Rd} = \lambda * \eta * \alpha * (1 - 0,5 * \lambda * \alpha) * f_{cd} * b * d^2 \quad (\text{Formel 2-6})$$

Der

$$\lambda = 0,8 \text{ for fasthetsklasser } \leq B50, \text{ og } \lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400 \text{ for fasthetsklasser } > B50.$$

$$\eta = 1,0 \text{ for fasthetsklasser } \leq B50, \text{ og } \eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200 \text{ for fasthetsklasser } > B50.$$

For kontroll av armeringstøyningen benyttes formelen:

$$\varepsilon_s = \frac{1-\alpha}{\alpha} * \varepsilon_{cu} < \varepsilon_{ud} = 0,03 \quad (\text{Formel 2-7})$$

Vanlig praksis i Norge er en armeringstøyning ved brudd på $\epsilon_s = 2\epsilon_{yk} = 0,005$. En har ved denne armeringstøyningen er armeringstverrsnitt som ofte betegnes som «normalarmert». Trykksonehøyden for normalarmerte tverrsnitt finnes ved hjelp av formelen:

$$x = \alpha * d \quad (\text{Formel 2-8})$$

Der

x er trykksonehøyden

α er trykksonehøydefaktoren

d er tverrsnittets effektive høyde fra trykkrand til tyngdeunkt i strekkarmering.

Hvor

$$\alpha = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + 2 * \epsilon_{yk}} \quad (\text{Formel 2-9})$$

På grunn av at ϵ_{cu} varierer med betongkvaliteten og ϵ_{yk} varierer med stålqualiteten, vil en få forskjellige verdier for α ved forskjellige kombinasjoner av betong og armeringskvalitet. Tabell 2-1 viser verdier for α for betong i fasthetsklasser B20-B95, for armeringstål med flytegrense $f_{yk} = 500$ MPa. Verdier for ϵ_{cu} finnes i EC2, Tabell 3.1 med $\epsilon_{cu} = \epsilon_{cu2}$.

Tabell 2-1: verdi for α for B20-B95.

Fasthetsklasse	B20 – B45	B55	B65	B75	B85 – B95
$\alpha = x/d$	0,412	0,383	0,359	0,346	0,342

Den dimensjonerende momentkapasiteten for betongtrykksonen, M_{Rd} , finnes ved formelen:

$$M_{Rd} = K * f_{cd} * b * d^2 \quad (\text{Formel 2-10})$$

Der

f_{cd} er dimensjonerende trykkfasthet for betongen. $f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} * f_{ck}}{\gamma_c}$

b er bredden på bjelken.

d er tverrsnittets effektive høyde fra trykkrand til tyngdepunkt i strekkarmering.

Verdien for K finnes fra Tabell 2-2^{[16][21]}

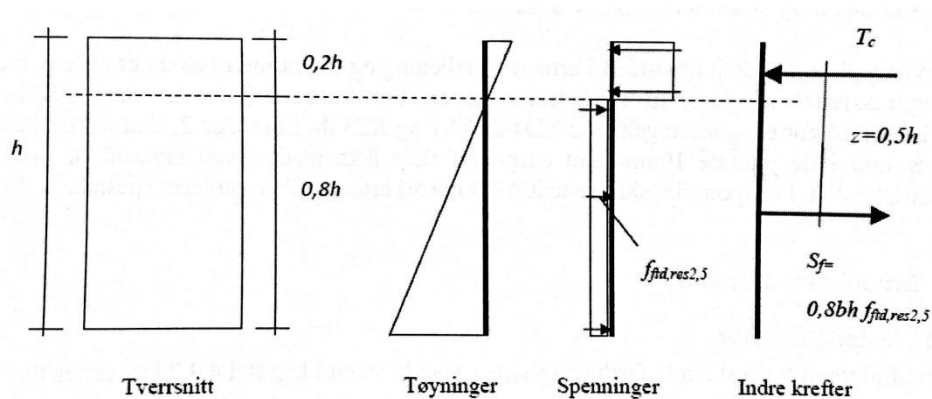
Tabell 2-2: Verdi av K.

Fasthetsklasse	B20 – B45	B55	B65	B75	B85	B95
K	0,275	0,250	0,219	0,195	0,177	0,161

2.1.3. Momentkapasitet for fiberarmert betong

Kanstad^[8] foreslår en metode for å beregne momentkapasiteten for fiberarmerte betongtverrsnitt. Kapasiteten kan forenklet beregnes ved å anta at rest strekkfasthet, $f_{ftd,res2,5}$, virker over $0,8h$ og at den indre momentarmen er lik $0,5h$. Dette er vist på Figur 9. Momentkapasitetet for et rektangulært tverrsnitt blir da gitt ved:

$$M_{Rd} = 0,4 * f_{ftd,res2,5} * b * h^2 \quad (\text{Formel 2-11})$$



Figur 9: spennings- og tøyningsfordeling for rektangulært tverrsnitt av fiberarmert betong utsatt for ren bøyning.

2.1.4. Skjærkapasitet

Det finnes flere metoder for å beregne skjærkapasiteten til fiberarmert betong. De fleste baserer seg på resultater fra ulike bjelkeprøvingsserier med konvensjonell bøyestrekkarmering i underkant bjelke. Gyldigheten til følgende beregning begrenser seg derfor til tverrsnitt med konvensjonell lengdearmring.

For beregning av skjærkapasiteten tar Kanstad^[8] utgangspunkt i skjærkapasitet for betong uten tradisjonell bøylearmering fra EC2 punkt 6.2.2., med bidraget fra fiberarmert som et tillegg.

Bidraget fra EC2 punkt 6.2.2. er:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}] * b_w * d \quad (\text{Formel 2-12})$$

$$C_{Rd,c} = \frac{k_2}{\gamma_c} \quad (\text{Formel 2-13})$$

Med en minsteverdi:

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d \quad (\text{Formel 2-14})$$

Der

f_{ck} er karakteristisk sylindertykkfasthet i MPa.

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{med } d \text{ i mm.}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sL}}{b_w * d} \leq 0,02 \quad (\text{Formel 2-15})$$

hvor

A_{sL} er tverrsnittsarealet av strekkarmeringen med en forankringslengde $\geq (l_{bd} + d)$ forbi det betrakte snittet.

b_w er minste tverrsnittsbredde i strekksonen.

d er den effektive høyden

k_1 er 0,15

k_2 er 0,18 eller 0,15 dersom betingelsene for å sette k_2 lik 0,18 ikke er oppfylt. k_2 er lik 0,18 for betong med største tilslag D, etter NS-EN 12620, lik eller større enn 16 mm, og der det grove tilslaget utgjør 50% eller mer av den totale tilslagsmengden og det ikke benyttes grovt tilslag av kalkstein eller stein med tilsvarende lav fasthet.

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 * f_{cd} [MPa] \quad (\text{Formel 2-16})$$

hvor

N_{Ed} er aksialkraften i tverrsnittet fra laster og forspenning i N. ($N_{Ed} > 0$ for trykk)

A_c er arealet til betongtverrsnittet i mm^2 .

$$v_{min} = 0,035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2} \quad (\text{Formel 2-17})$$

Bidraget fra fiberarmeringen er:

$$V_{Rd,cf} = 0,6 * f_{ftd,res2,5} * b_w * h \quad (\text{Formel 2-18})$$

Der

$$f_{ftd,res2,5} = \frac{f_{ftk,res2,5}}{\gamma_{cf}} \quad (\text{Formel 2-19})$$

hvor

$\gamma_{cf} = 1,5$ er betongens materialfaktor (evt 1,35 som nevnt i kapittel 2.1.1).

Når disse bidragene legges sammen, betegner Kanstad $V_{Rd,c}$ fra EC2 som $V_{Rd,ct}$ slik at den nye $V_{Rd,c}$ for skjærkapasitet med fiber blir:

$$V_{Rd,c} = V_{Rd,ct} + V_{Rd,cf} \quad (\text{Formel 2-20})$$

2.2. Bruksgrensetilstand (SLS)

Bruksgrensetilstanden bygger på at konstruksjonen skal tilfredstille krav knyttet til dens bruk og formål i sin brukstid. Krav til bruksgrensetilstanden skal også sikre konstruksjonens bestandighet. Beregningene det sees på i dette kapittelet gjelder opprissing av betong.^[21]

2.2.1. Minimumsarmering

Ifølge kapittel 7.3.2 i EC2^[16], skal det dersom det er krav om begrensning av rissvidden, kreves en minste mengde armering med heft for å begrense opprissing i områder der det kan oppstå strekk. Beregningen av minimumsarmering baserer seg på at strekksonen i et tverrsnitt skal ha samme kapasitet rett etter rissdannelse som umiddelbart før.

EC2 kapittel 7.3.2. beregner minimumsarmering på følgende måte:

$$A_{s,min} * \sigma_s = k_c * k * f_{ct,eff} * A_{ct} \quad (\text{Formel 2-21})$$

Der

$A_{s,min}$ er tverrsnittsarealet av minimumsarmeringen i strekksonen

A_{ct} er betongarealet i strekksonen. Strekksonen er den delen av tverrsnittet som er beregnet til å være i strekk umiddelbart før det første risset dannes.

σ_s er absoluttverdien av den største tillatte spenningen i armeringen umiddelbart etter at risset er dannet. Den kan antas lik armeringens flytegrense f_{yk} .

$f_{ct,eff}$ er middelverdien av betongens strekkfasthet når det først forventes at riss kan oppstå.

k er en koeffisient som tar hensyn til virkningen av ujevn spenningsfordeling i tverrsnitt med indre likevekt, som fører til reduksjon av fastholdingskrefter.

$k=1,0$ for steg med $h \leq 300\text{mm}$ eller flens med $b < 300\text{ mm}$.

$k=0,65$ for steg med $h \geq 800\text{ mm}$ eller flens med $b > 800\text{ mm}$.

Mellomliggende verdier kan interpoleres

k_c er en koeffisient som tar hensyn til spenningsfordelingen innenfor tverrsnittet rett før opprissing og til endringen i den indre momentarmen.

$k_c = 1,0$ for rent strekk.

$k_c = 0,4 * \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1 * (h/h^*) * f_{ct,eff}} \right] \leq 1$ for bøyning eller bøyning kombinert med aksialkraft.

hvor

$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{b * h}$, hvor N_{Ed} er aksialkraft i betraktet tverrsnittsdelt i bruksgrense (trykk positiv).

$h^* = h$ for $h < 1,0\text{ m}$ og $h^* = 1,0\text{ m}$ for $h \geq 1,0\text{ m}$.

$k_1 = 1,5$ når N_{Ed} er en trykkraft, og $k_1 = 2 \cdot h^* / 3 \cdot h$ når N_{Ed} er en strekkraft.

Ifølge Kanstad^[8] kan prinsippet for beregning av minimumsarmering for en fiberarmert konstruksjon følge de samme prinsippene som i EC2 kapittel 7.3.2. Den eneste forskjellen er at en da legger inn bidraget fra rest strekkfasthet. Dette legges inn på venstresiden i ligningen fra EC2;

$$A_{ct,2} * f_{ftk,res2,5} \quad (Formel 2-22)$$

Der

$A_{ct,2}$ er arealet av tverrsnittets strekksone etter opprissing

$f_{ftk,res2,5}$ er karakteristisk rest strekkfasthet relatert til 2,5 mm rissvidde bestemt som angitt i kapittel 4.3.4.

2.2.2. Konstruksjonsregler minimumsarmering

I EC2, 9.2.1.1. er det gitt minste armeringsareal for rektangulære bjelker. Fiberarmerte konstruksjoner må for å kunne benyttes istedenfor vanlig betong oppfylle kravet satt her. Formelen for minimumsarmering er gitt ved:

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d \geq 0,0013 * b_t * d \quad (Formel 2-23)$$

Der

b_t er midlere bredde av strekksonen.

f_{ctm} er midlere strekkfasthet til betongen.

d er den effektive høyden av tverrsnittet.

f_{yk} er armeringens karakteristiske flytegrense.

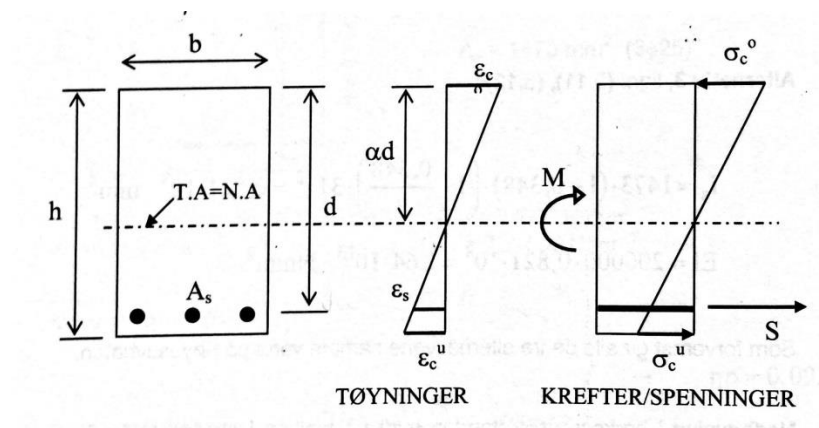
2.2.3. Risslast og rissmoment

Beregningene for rissmoment og risslast er hentet fra Sørensen^[21]. Disse beregningene blir tatt med for å kunne beregne teoretisk risslast og rissmoment og sammenligne det med faktiske verdier oppnådd gjennom forsøk.

Antagelser i beregningsmodellen:

- Betong i trykk og stål er lineært elastiske materialer som følger Hooke's lov
- Betong antas å ikke ha strekkfasthet, dvs spenningsløs betong i strekksone for fullstendig opprissing.
- Navier's hypotese er gyldig, dvs plane tverrsnitt forblir plane.

Strekkspenningen til betongen vil ved lave lastnivåer være lavere enn strekkfastheten og tverrsnittet er da uopprikket. Figur 10 viser et uopprikket betongtverrsnitt ved ren bøyepåkjenning.



Figur 10: Uopprikket tverrsnitt, bøyning.

Siden tverrsnittet er uopprikket er nøytralaksen (N.A.) og tyngdepunktsaksen (T.A.) sammenfallende. Beliggenheten til aksene kan derfor lettest bestemmes ved en tyngdepunktsberegning for det transformerte betongtverrsnittet. Hull i betongen for armeringen neglisjeres. Moment av arealene om øvre rand gir:

$$(A_c + \eta * A_s) * \alpha * d = A_c * \frac{h}{2} + \eta * A_s * d \quad (\text{Formel 2-24})$$

Som kan omformes til:

$$\alpha * d = \frac{A_c * 0,5 * h + \eta * A_s * d}{A_c + \eta * A_s} \quad (\text{Formel 2-25})$$

Der

α er faktor for bestemmelse av trykksonehøyden

d er den effektive høyden

A_c er arealet av betongtverrsnittet

h er høyden

η er materialstivhetsforholdet: $\eta = \frac{E_{sk}}{E_{cm}}$

hvor

E_{sk} er E-modul for stål.

E_{cm} er E-modul for betong.

A_s er strekkarmeringens tverrsnittsareal.

Betongens bidrag til arealreghtsmomentet blir:

$$I_{cl} = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left(\alpha \cdot d - \frac{h}{2} \right)^2 \quad (\text{Formel 2-26})$$

Armeringens bidrag til arealreghtsmomentet blir:

$$I_{sl} = A_s \cdot (d - \alpha \cdot d)^2 \quad (\text{Formel 2-27})$$

Og bøyestivheten for det uopprissede tverrsnittet blir:

$$(EI)_l = E_{cm} \cdot I_{cl} + E_{sk} \cdot I_{sl} \quad (\text{Formel 2-28})$$

Som kan uttrykkes som:

$$(EI)_l = E_{cm} \cdot \left(I_{cl} + \frac{E_{sk}}{E_{cm}} \cdot I_{sl} \right) = E_c \cdot (I_{cl} + \eta \cdot I_{sl}) \quad (\text{Formel 2-23})$$

Dersom en forutsetter at tverrsnittet i Figur 10 risser opp når strekkspenningen i underkant, σ_c^u , når strekkfastheten, kan rissmomentet, M_{cr} , og risslasten, P_{cr} , bestemmes. Krumningen kan finnes fra Figur 10:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{(EI)_l} = \frac{\varepsilon_c^u}{h - \alpha \cdot d} \quad (\text{Formel 2-29})$$

Dersom uttrykket for bøyestivheten for uopprisset tverrsnitt settes inn i denne likningen, får en ut et uttrykk for M:

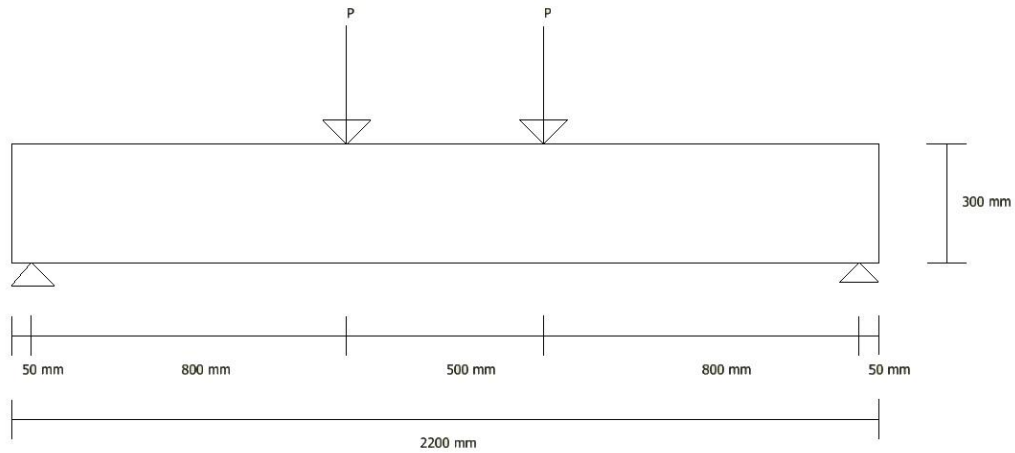
$$M = \frac{\varepsilon_c^u \cdot E_c \cdot (I_{cl} + \eta \cdot I_{sl})}{h - \alpha \cdot d} = \frac{\sigma_c^u \cdot (I_{cl} + \eta \cdot I_{sl})}{h - \alpha \cdot d} \quad (\text{Formel 2-30})$$

Risskriteriet $\sigma_c^u = f_{ctm}$ innsatt i denne likningen, gir rissmomentet, M_{cr} :

$$M_{cr} = \frac{I_{cl} + \eta \cdot I_{sl}}{h - \alpha \cdot d} \cdot f_{ctm} \quad (\text{Formel 2-31})$$

For lastilfellet som brukes i denne oppgaven, altså to punktlaster på fritt opplagt bjelke, se Figur 11, finnes risslasten, P_{cr} , ved:

$$P_{cr} = \frac{2 * M_{cr}}{a} \quad (\text{Formel 2-32})$$



Figur 11: Lastilfelle stor bjelke.

3. Prøveplan

I dette kapittelet presenteres prøveplanen og blandeprosedyren.

3.1. Prøveplan

Tabell 3-1 viser prøveplanen for oppgaven. Totalt støpes det ut 5 forskjellige resepter, hver på ca 240 liter. Dette blir delt opp i tre til fire blandinger. Som tabellen viser støpes det ut fire terninger, fire sylindere, fire små bjelker og 1 stor bjelke per resept.

Tabell 3-1: Prøveplan

Resept	1	2	3	4	5		
Stålfiber vol%	0,00	1,00	1,50	0,00	0,00		
Prøvemethode	Basaltfiber vol%	0,00	0,00	0,00	1,50	3,00	Sum
Trykkfasthet	Antall terninger	4	4	4	4	4	20
Spaltestrekk	Antall sylindere	2	2	2	2	2	10
Arbeidsdiagram trykk	Antall sylindere	2	2	2	2	2	10
Arbeidsdiagram strekk	Antall små bjelker	2	2	2	2	2	10
CMOD	Antall små bjelker	2	2	2	2	2	10
Rissutvikling / Bruddlast	Antall store bjelker	1	1	1	1	1	5
	Antall liter [L]	239,7	239,7	239,7	239,7	239,7	1198,5

3.2. Blandeprosedyre

For å blande betongen ble det benyttet en tvangsblender med en kapasitet på 110 liter. Denne er vist i Figur 12. Volumet per blanding varierer mellom 60-90 liter avhengig av hvor tung betongen er å jobbe med. Dette gjøres for å sikre at betongen blir godt blandet. Blandeprosedyren er som følger:

- Alt tørrstoff med unntak av fiber tilsettes.
- 1 min blanding av det tørre.
- Vann og superplastiserende tilsettes.
- 2 min blanding etter tilsetning av vann og superplastiserende.
- 1 min hvile, hvor fiber tilsettes dersom dette er i med i resepten. For basaltfiberen tilsettes omtrent halvparten av mengden her.
- 1 min blanding etter hvile, hvor resten av basaltfiberen tilsettes for de reseptene som inneholder dette.

Tilsetningen av basaltfiberen blir delt opp for å unngå såkalte fiberballer i blandingen.



Figur 12: Tvangsblender brukt i oppgaven.

4. Prøvemethoder

Dette kapitlet omhandler prøvemethoder for fersk og herdet betong.

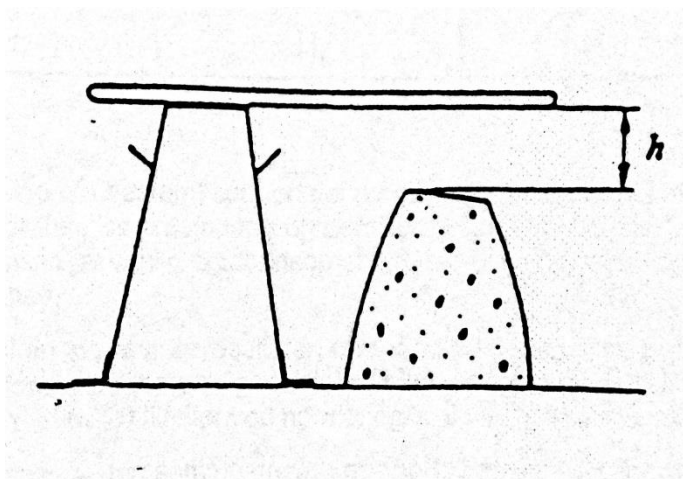
4.1. Fersk betong

I dette delkapitlet beskrives prøvemethoder for å teste egenskapene til fersk betong. Beskrivelsene er hentet fra sine respektive standarder.

4.1.1. Synkmål

Prøvemethoden for å bestemme synkmål er beskrevet i NS-EN 12350-2, Prøving av fersk betong Del 2: synkmål. Prinsippet går ut på at den ferske betongen komprimeres i en synkkjegle. Når denne blir trukket opp, gir lengden betongen har sunket en indikasjon på betongens konsistens.

Synkkjeglen plasseres på et horisontalt underlag. Mens synkkjeglen fylles, holdes den fast mot underlaget enten ved hjelp av festeklemmer eller ved at en person står på de to fotstøttene. Synkkjeglen fylles med tre lag, som hver utgjør ca en tredjedel av høyden på synkkjeglen når den er komprimert. Hvert lag komprimeres med 25 støt med komprimeringstaven. For det nederste laget er det nødvendig å skråstille staven og påføre halvparten av støtene i en spiral mot midten. Det andre og øverste laget komprimeres gjennom hele sin dypde, slik at støtene såvidt er gjennom det underliggende laget. Dersom bearbeidingen av det øverste laget fører til at betongen synker under synkkjeglens overkant, etterfylles betong slik at det alltid er en topp over kjeglens overkant. Etter komprimering avrettes overflaten med en sagvis bevegelse av komprimeringstaven. Sølt betong fjernes fra underlaget, og synkkjeglen løftes forsiktig opp i vertikal retning. Hele prosedyren fra fylling av kjeglen begynner til fjerning av kjeglen skal utføres uten avbrudd i løpet av 150 sekunder. Rett etter at synkkjeglen er fjernet, måles synkmålet (h) som svarer til forskjellen mellom kjeglens høyde og høyden på betongens høyeste punkt, se Figur 13. ^[22]



Figur 13: Synkmåling

4.1.2. Densitet

Prøvemethoden for å bestemme den ferske betongens densitet er beskrevet i NS-EN 12350-6, Prøving av fersk betong Del 6: Densitet. Prinsippet går ut på at den ferske betongen komprimeres i en stiv og vanntett beholder med kjent volum, for deretter å veies.

Betongen plasseres i beholderen og komprimeres umiddelbart med minst 25 støt fra komprimeringstaven. Støtene fordeles jevnt over tverrsnittet av beholderen. Sidene av beholderen bankes forsiktig med en trehammer etter komprimering, for å fjerne innesluttede luftflommer. Det bankes helt til det ikke lenger er store luftbobler på overflaten og fordypninger etter komprimeringstaven er borte. Etter at det øverste laget er komprimert, glettes overflaten med et avrettingsbrett. Utsiden av beholderen rengjøres. Beholderen veies for å bestemme massen (m_2)

Densitet beregnes fra formelen:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{Formel 4-1})$$

Der:

D er densiteten av den ferske betongen, i kilogram per kubikkmeter

m_1 er beholderens masse, i kilogram

m_2 er beholderens masse pluss massen av betongprøven, i kilogram

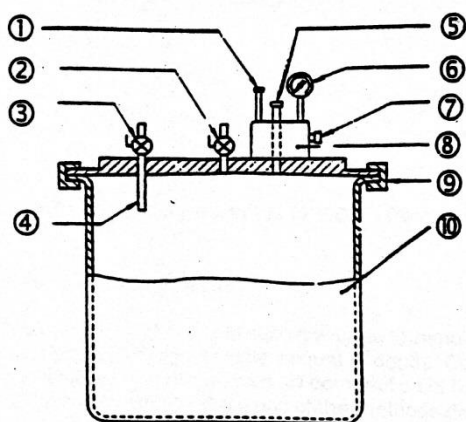
V er beholderens volum, i kubikkmeter

Betongens densitet angis til nærmeste 10 kg/m^3 .^[23]

4.1.3. Luftinnhold

Prøvemethoden for å bestemme luftinnholdet i den ferske betongen er beskrevet i NS-EN 12350-7, Prøving av fersk betong Del 7: Luftinnhold Trykkmetoder. I denne standarden er det to metoder å foreta luftmålinger på. Den ene er vannsøyle metoden og den andre er trykkmåler metoden. Det er trykkmålermetoden som er brukt i denne oppgaven. Prinsippet går ut på at et kjent volum luft ved et kjent trykk slås sammen i en lukket beholder med et ukjent volum luft i betongprøven. Tallskiven på trykkmåleren er kalibrert i forhold til prosentandel av luft for det resulterende trykket.

Betong blir plassert i beholderen på en slik måte at en fanger så lite luft som mulig. Betongen plasseres i tre lag, alle ca like tykke. Betongen komprimeres umiddelbart etter plassering. Komprimeringen foregår på samme måte som for densitet, altså 25 støt fra komprimeringstaven jevnt fordelt over tverrsnittet av beholderen i hvert lag. Beholderen bankes på siden med en hammer til det ikke er store luftbobler og fordypningene etter komprimeringstaven er borte. Kantene og dekselet til beholderen rengjøres grundig. Dekselet klemmes på plass med klemmer. Det er viktig å passe på at det er tett mellom dekselet og beholderen. Hovedluftventilen stenges, og ventil A og B åpnes. Vann sprøytes inn i enten ventil A eller B til det kommer vann ut av den andre ventilen. Beholderen bankes lett med hammeren til all innestengt luft er ute. Ventilene lukkes og luft pumpes inn i beholderen med pumpen og stabiliseres på startpunktet på måleren. Deretter åpnes hovedventilen, måleren dunkes lett på og verdien leses av. Dette er prosentandelen luft. Ventil A og B åpnes for å slippe ut trykket før dekselet fjernes. Figur 14 viser de forskjellige delene på en luftmåler. ^[24]



1. Pumpe
2. Ventil B
3. Ventil A
4. forlengelsesrør for kalibrering
5. Hovedluftventil
6. Trykkmåler
7. Luftventil
8. Luftkammer
9. Klemmer
10. Beholder

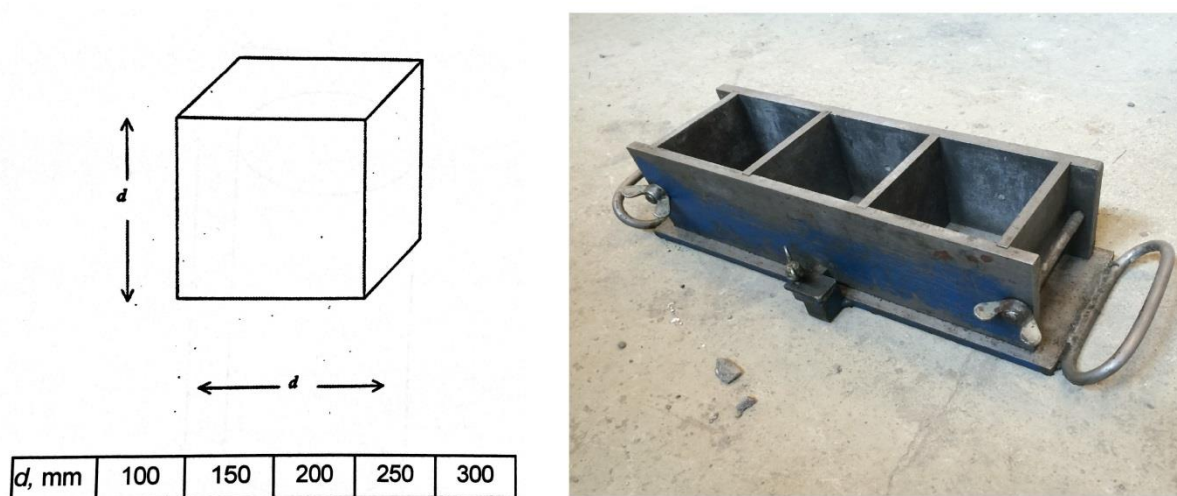
Figur 14: Luftmåler

4.2. Støping

I dette delkapittelet sees det på støpemetoder for de forskjellige prøvestykkene. Alle støpeformene blir påført et lag med forskalingsolje med en sprøytepistol. All støping er utført i henhold til NS-EN 12390 og NS-EN 14651.

4.2.1. Terninger

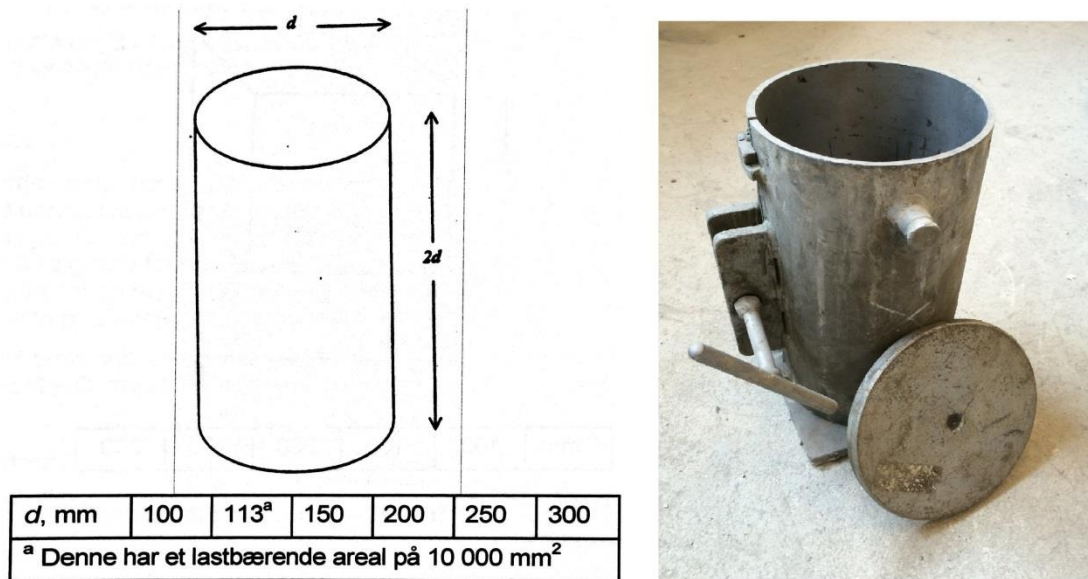
Terningene som brukes i denne oppgaven har målene 100*100*100mm. Formene fylles opp i tre lag, alle ca like tykke, og hvert lag komprimeres umiddelbart etter fylling, med 25 støt fra komprimeringstav per lag. Sidene av formen bankes lett med en hammer etter komprimering av hvert lag. Overflaten avrettes med en støpeskje i en sagende bevegelse. På Figur 15 vises nominelle størrelser på terninger og terningform benyttet i oppgaven. Fire terninger støpes per resept, alle for trykktesting. En terning testes etter 3 døgn, en etter 7 døgn og to etter 28 døgn. Etter støping blir terningene tildekket av plast og satt på et bord i labben til neste dag. Deretter blir de satt over i vannbad frem til testing. ^[25]



Figur 15: Til venstre: nominelle størrelser på terninger. Til høyre: støpeform for terninger.

4.2.2. Sylindere

Sylindrene som brukes i denne oppgaven har målene 150*300mm. Metoden for støping er lik som på terningene. Sylindrene blir avformet dagen etter støp og lagt over i vannbad frem til testing. Lagring av sylindrene er vist på Figur 17. Totalt fire sylindere støpes per resept, to for spaltestrekking og to for arbeidsdiagram trykk. Nominelle størrelser og støpeform brukt i oppgaven er vist i Figur 16.



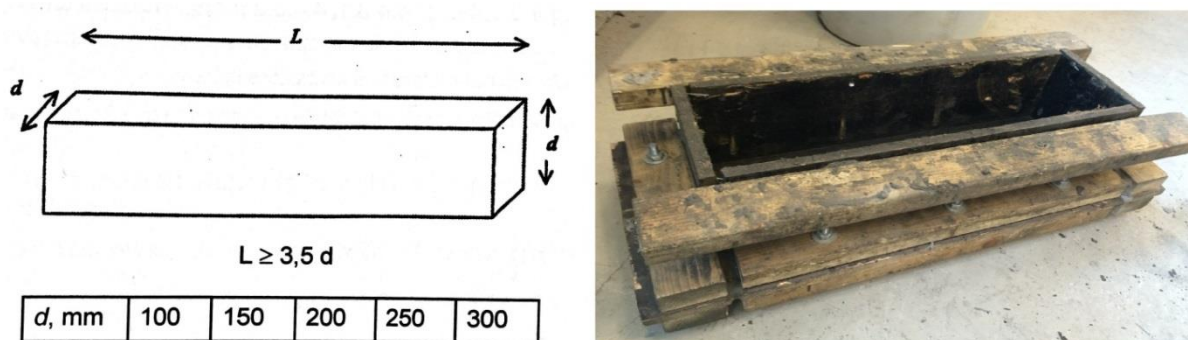
Figur 16: Til venstre: nominelle størrelser på sylindere. Til høyre: støpeform for sylindere.



Figur 17: Lagring av sylindere.

4.2.3. Små bjelker

De små bjelkene som brukes i denne oppgaven har målene 150*150*550mm. Fire bjelker støpes per resept, to stykker for testing av CMOD diagram og to stykker for arbeidsdiagram strekk. For bjelkene til testing av CMOD diagram blir formene i Figur 18 benyttet. Her vises også nominelle størrelser på små bjelker. For testing av arbeidsdiagram strekk blir formene i Figur 19 benyttet. Her støpes det inn forankring for å kunne gjennomføre strekktesting, også disse vist i Figur 19.

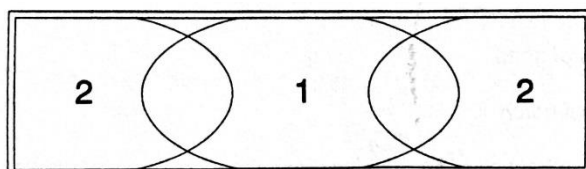


Figur 18: Til venstre: nominelle størrelser på små bjelker/prismer. Til høyre: støpeform for bjelker til CMOD.



Figur 19: Til venstre: støpeform for bjelker til strekktesting. Til høyre: forankringsbolter.

Prosedyren for å fylle formen med betong er vist i Figur 20. Størrelsen på fylling nummer 1 bør være dobbelt så stor som fylling nummer 2. Formen bør fylles opp til ca 90% av høyden før komprimering. Til komprimering benyttes en stavvibrator. Formen fylles helt opp under vibrering, før overflaten glattes av. ^[26]



Figur 20: Prosedyre for å fylle formen på små bjelker.

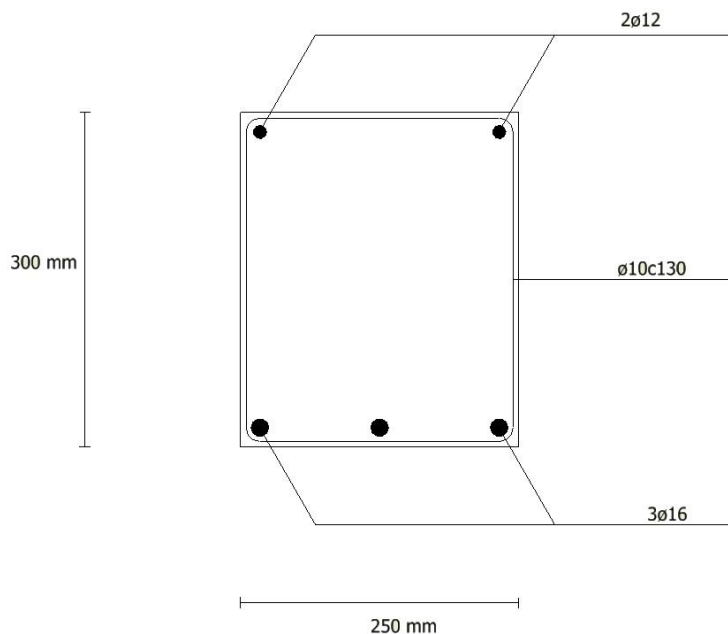
4.2.4. Store bjelker

De store bjelkene som brukes i denne oppgaven har dimensjonene 250*300*2200mm. Det støpes en stor bjelke per resept. Bjelkene fylles i to omganger, da det trengs to blandinger for å få nok betong til å fylle hele formen. Formen fylles omtrent halveis opp i ene enden, og vibreres med vibrator underveis. Betong tilsettes slik at støpefronten holdes jevn, helt til hele formen er fylt halveis opp. Dette gjentas en gang til for å fylle formen til toppen. Overflaten avrettes med murerkje. I Figur 21 vises tom, halvfull og ferdig støpt støpeform for stor bjelke. Bjelkene blir dekket med plast umiddelbart etter støping. Etter avforming blir de lagret under plast og vannet med jevne mellomrom.



Figur 21: Til venstre: støpeform stor bjelke. I midten: halvfylt stor bjelke. Til høyre: ferdig støpt stor bjelke

Armeringstegningen for de store bjelkene er vist i Figur 22.



Figur 22: Armeringstegning stor bjelke.

4.2.4.1. Beregninger stor bjelke

Beregningene gjort under er basert på utledningene gjort i kapittel 2.

Fra Formel 2-23 får vi minimumsarmeringen.

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d \geq 0,0013 * b_t * d \quad (\text{Formel 2-23})$$

Som omtalt i kapittel 5 er ønskes en trykkfasthet på omtrent 100 MPa. Ut fra tabell 3.1 i EC2 antas det da at vi har B90 betong. Det vil si at vi har en f_{ctm} på 5 MPa. f_{yk} settes lik 434,8 MPa. b_t er lik 250 mm og d er lik 257 mm.

Dette gir :

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{5}{434,8} * 250 * 257 = 192,1 \text{ mm}^2$$

Det settes inn tre jern med en diameter på 16 mm i strekksonen, noe som gir $A_s = 603,2 \text{ mm}^2$, som er godt over minimumsarmeringen.

Momentkapasiteten beregnes fra kapittel 2.1.2.

Teoretisk ϵ_{cu} er fra Tabell 3.1 i EC2 lik 2,6‰, og α_b kan da bestemmes fra formel 2-2:

$$\alpha_b = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{yd}} \quad (\text{Formel 2-2})$$

Der

$$\epsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,8}{200000} = 2,17\text{‰}$$

Som gir:

$$\alpha_b = \frac{2,6}{2,6+2,17} = 0,545$$

Faktorene λ og η er avhengige av betongens trykkfasthet, og bestemmes ved:

$$\lambda = 0,8 - \frac{90-50}{400} = 0,7$$

Og

$$\eta = 1,0 - \frac{90-50}{200} = 0,8$$

Balansert armeringsmengde bestemmes fra formel 2-3:

$$A_{s,b} = \lambda * \eta * \frac{f_{cd}}{f_{yd}} * b * d * \alpha_b \quad (\text{Formel 2-3})$$

Som gir:

$$A_{s,b} = 0,7 * 0,8 * \frac{51}{434,8} * 250 * 257 * 0,545 = 2300,1 \text{mm}^2$$

Dvs:

$$A_s < A_{s,b}$$

Som betyr at vi har et underarmert tverrsnitt. Formel 2-4 benyttes da for å finne aktuell verdi for α :

$$\lambda * \eta * f_{cd} * b * d * \alpha - f_{yd} * A_s = 0 \quad (\text{Formel 2-4})$$

Som gir:

$$0,7 * 0,8 * 51 * 250 * 257 * \alpha - 434,8 * 603,2 = 0$$

Som gir

$$\alpha = 0,143$$

Formel 2-6 kan da benyttes for å finne momentkapasiteten til betongtrykksonen:

$$M_{Rd} = \lambda * \eta * \alpha * (1 - 0,5 * \lambda * \alpha) * f_{cd} * b * d^2 \quad (\text{Formel 2-6})$$

Som gir:

$$M_{Rd} = 0,7 * 0,8 * 0,143 * (1 - 0,5 * 0,7 * 0,143) * 51 * 250 * 257^2 * 10^{-6} = 64,06 \text{kN}$$

Kontroll av armeringstøyningen ved Formel 2-7:

$$\epsilon_s = \frac{1-\alpha}{\alpha} * \epsilon_{cu} < \epsilon_{ud} = 0,03 \quad (\text{Formel 2-7})$$

Som gir:

$$\epsilon_s = \frac{1-0,143}{0,143} * 0,0026 = 0,0156 < 0,03 \rightarrow OK$$

Dette gir en bruddlast på:

$$P_{Rd} = \frac{(2 * M_{Rd})}{a} = \frac{2 * 64,06}{0,8} = 160,15 \text{kN}$$

Risslast og rissmoment beregnes fra formel 2-31 og 2-32. Fra formel 2-25 har vi:

$$\alpha * d = \frac{A_c * 0,5 * h + \eta * A_s * d}{A_c + \eta * A_s} \quad (\text{Formel 2-25})$$

Der

$$A_c = 250 \cdot 300 = 75000 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 603,2 \text{ mm}^2, \text{ som bestemt over.}$$

$$\eta = E_{sk}/E_{cm}, \text{ der } E_{sk} = 200 \text{ GPa, og } E_{cm} = 44 \text{ GPa, som tatt fra tabell 3.1 i EC2. Det gir}$$

$$\eta = 4,54$$

$$h = 300 \text{ mm.}$$

$$d = 257 \text{ mm.}$$

Altså blir:

$$\alpha * d = \frac{75000 \cdot 0,5 \cdot 300 + 4,54 \cdot 603,2 \cdot 257}{75000 + 4,54 \cdot 603,2} = 153,77 \text{ mm}$$

Fra formel 2-26 har vi:

$$I_{cl} = \frac{b \cdot h^3}{12} + b * h * \left(\alpha * d - \frac{h}{2} \right)^2 \quad (\text{Formel 2-26})$$

Som gir:

$$I_{cl} = \frac{250 \cdot 300^3}{12} + 250 * 300 * \left(153,77 - \frac{300}{2} \right)^2 = 563,57 * 10^6 \text{ mm}^4$$

Fra formel 2-27 har vi:

$$I_{sl} = A_s * (d - \alpha * d)^2 \quad (\text{Formel 2-27})$$

Som gir:

$$I_{sl} = 603,2 * (257 - 153,77)^2 = 6,43 * 10^6 \text{ mm}^4$$

Vi har fra formel 2-31:

$$M_{cr} = \frac{I_{cl} + \eta * I_{sl}}{h - \alpha * d} * f_{ctm} \quad (\text{Formel 2-31})$$

Som gir:

$$M_{cr} = \frac{563,57 * 10^6 + 4,54 * 6,43 * 10^6}{300 - 153,77} * 5 = 20,27 \text{ kNm}$$

Formel 2-32 gir oss:

$$P_{cr} = \frac{2 * M_{cr}}{a} \quad (\text{Formel 2-32})$$

Som gir:

$$P_{cr} = \frac{2 * 20,27}{0,8} = 50,68 \text{ kN}$$

Dette vil si at vi forventer riss ved en total last på 50,68 kN.

4.3. Herdet betong

I dette delkapittelet ses det på prøvemethoder for herdet betong for de forskjellige prøvestykkene.

4.3.1. Trykkfasthet

Trykkfastheten bestemmes ut ifra NS-EN 12390-3:2002. Terningene tas ut av vannbadet og tørkes. Alle bærende overflater på prøvemaskinen tørkes rene og eventuelle løse partikler eller fremmedlegemer som kan komme i kontakt med trykkplatene fjernes fra prøvelegemets overflater. Terningene plasseres i prøvemaskinen slik at lasten påføres vinkelrett på støperetningen. Prøvelegemet sentreres i forhold til den nedre trykkplaten. Prøvelegemene belastes med en belastningshastighet på 1 MPa/sekund. Største avleste last registreres. Tilfredstillende bruddformer for terninger er gjengitt i Figur 23.

Trykkfastheten bestemmes av følgende ligning:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (\text{Formel 4-2})$$

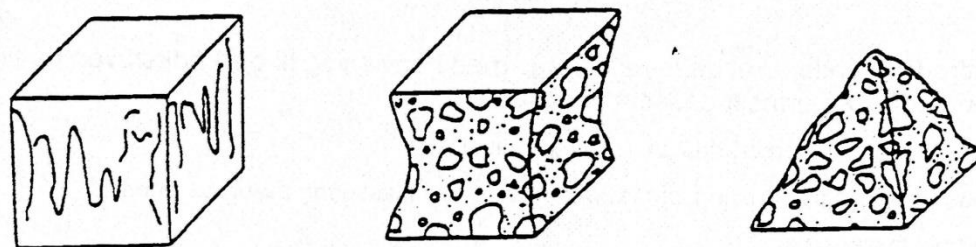
Der

f_c er trykkfastheten i megapascal (N/mm²)

F er bruddlast i Newton (N)

A_c er tverrsnittsarealet på prøvelegemet som trykkraften virker mot (mm²)

Trykkfastheten angis til nærmeste 0,5 Mpa. ^[27]



Eksplodivt brudd

MERKNAD Alle de fire eksponerte flatene har omtrent tilsvarende brudd, vanligvis med liten skade på flatene som er i kontakt med trykkplatene.

Figur 23: Tilfredstillende bruddform for terningformede prøvelegemer.

4.3.2. Spaltestrekkfasthet

Spaltestrekkfastheten bestemmes ut ifra NS-EN 12390-6:2001. Prinsippet går ut på at et sylindereformet prøvelegeme utsettes for en trykkraft som påføres langs et smalt område i lengderetningen. Den resulterende strekkraften vinkelrett på trykkretningen fører til strekkbrudd i prøvelegemet.

Sylinderene tas ut av vannbadet og tørkes. Alle bærende overflater rengjøres. Mellomleggsplater plasseres i jiggen. En skjematisk tegning av en jig og jiggen brukt i oppgaven er vist i Figur 24. Prøvestykket plasseres i nedre del av jiggen, og øvre del settes på. Påse at sylindere ligger rett, og at den øvre platen er parallell med den nedre platen. En konstant hastighet for spenningsøkning velges, innenfor området 0,4 – 0,6 Mpa/s. Testprogrammet som benyttes heter «TestExpert». Belastningshastigheten settes til 2,8 kN/s, da dette var forhåndsdefinert i prøveprogrammet for spaltestrekk.

Belastningshastigheten som kreves er gitt ved formelen:

$$R = \frac{s \cdot \pi}{2} * L * d \quad (\text{Formel 4-3})$$

Der

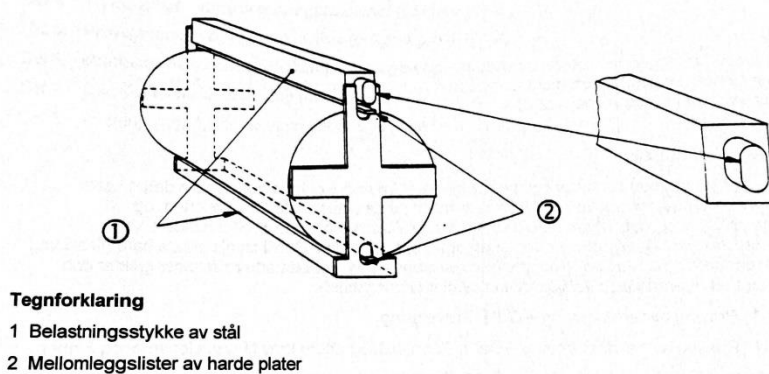
R er belastningshastigheten som kreves, i N/s

L er prøvelegemets lengde, i mm

d er prøvelegemets fastsatte mål, i mm

s er hastigheten for spenningsøkningen, i Mpa/s

Største avleste last registreres.



Figur 24: Til venstre: skjematisk tegning av jig. Til høyre: Jigg brukt i oppgaven.

Spaltestrekkfastheten fremkommer ved følgende ligning:

$$f_{ct} = \frac{2*F}{\pi*L*d} \quad (\text{Formel 4-4})$$

Der

f_{ct} er spaltestrekkfastheten, i MPa.

F er største last, i N.

L er lengden på prøvelegemets kontaktlinjer, i mm.

d er det fastsatte tverrsnittsmålet, i mm.

Spaltestrekkfastheten uttrykkes i nærmeste 0,05 MPa.^[28]

4.3.3. Arbeidsdiagram – trykk

Til arbeidsdiagram trykk brukes sylindere. Arbeidsdiagrammet viser kraften på y-aksen og deformasjonen på x-aksen. Sylinderene pusses ned i en stripe i lengderetning, og strekkklapper limes på. Sylinderene plasseres sentrisk i trykkpressen. For å få ut et arbeidsdiagram, også etter brud, blir parametrene i testprogrammet endret slik at maskinen fortsetter belastningen også etter at sylinderen har gått til brudd. Sylinderene trykkes da til 5mm deformaasjon. Trykkpressen programmeres til å gjennomføre testen med en deformasjonstyrt belastning på 0,5 mm/min. Deformasjonen blir målt gjennom strekkklappen i programmet Catmaneasy. Både lasten og deformasjonen blir også målt i datamaskinen til trykkpressen, i testprogrammet kalt «TestExpert». Strekkklappen gir etter brudd målinger uten mening, derfor brukes grafen fra trykkmaskinen som arbeidsdiagram. Deformasjonen målt gjennom strekkklappen kan brukes til å beregne E-modul. I Figur 25 vises sylindere med pålimte strekkklapper.



Figur 25: Sylindere med pålimte strekkklapper.

Formelen for beregning av E-modul er som følger:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Formel 4-5})$$

Der

E er E-modul, i MPa

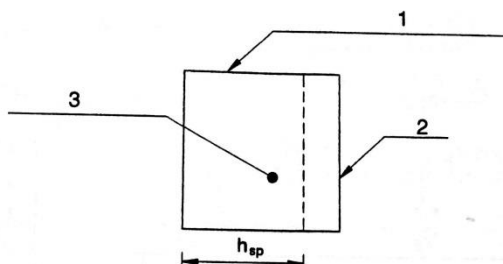
σ er spenningen, i MPa

ε er deformasjonen, i mm/m

E-modulen beregnes av verdier for brudd i arbeidsdiagrammet.

4.3.4. Bøystrekkfasthet

Bøystrekkfastheten bestemmes fra små bjelker med en forhåndsdefinert sprekk midt i bjelkespennet. Testen er utført i samsvar med NS-EN 14651:2005+A1:2007. Den forhåndsdefinerte sprekk sages ved våtsaging med en betongsag. Prøvestykkene roteres 90° om lengdeaksen og sages gjennom bredden av prøvestykket midt i bjelkespennet. Dette er vist i Figur 26.



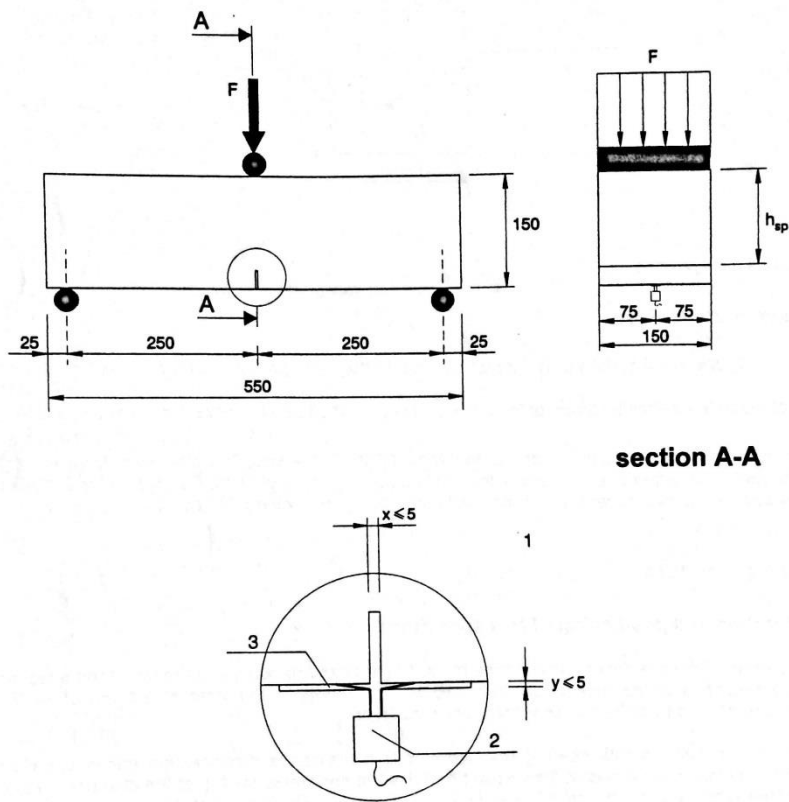
Figur 26: Posisjonen til den forhåndsdefinerte sprekk.

Der

- 1 er overflaten under støping.
- 2 er den forhåndsdefinerte sprekk.
- 3 tverrsnittet av prøvelegemet.

Lengden h_{sp} skal være $125\text{mm} \pm 1\text{ mm}$.

Bjelkens spennvidde er 500mm, og lasten blir påført midt i spennet. Last og CMOD blir kontinuerlig registrert opp til en CMOD på 4,5 mm. Målingen av CMOD blir gjort av en «clip gauge», eventuelt en «displacement transductor». Lasten blir registrert av en lastcelle som plasseres under opplager. Prinsippet for måling av CMOD er illustrert i Figur 27.

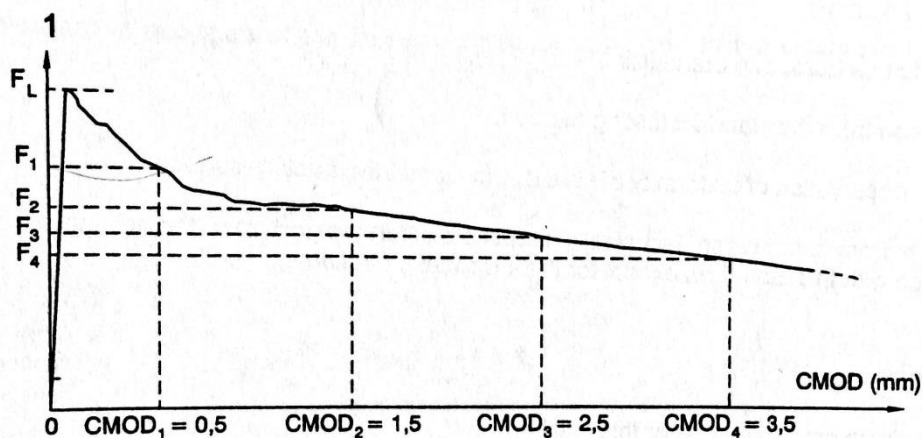


Figur 27: Prinsipp for måling av CMOD.

Der

- 1 er detalj av sprekken.
- 2 er clip gauge
- 3 er knivblad.

Den ekvivalente bøyestrekkefastheten for proporsjonalitetsgrensen (Limit of proportionality, LOP), og for fire forskjellige forhåndsdefinerte rissvidder (CMOD₁-CMOD₄) blir bestemt for alle bjelkene. De forhåndsdefinerte rissviddene og proporsjonalitetsgrensen er vist i Figur 28.



Figur 28: Last-CMOD diagram og F_j ($j = 1, 2, 3, 4$)

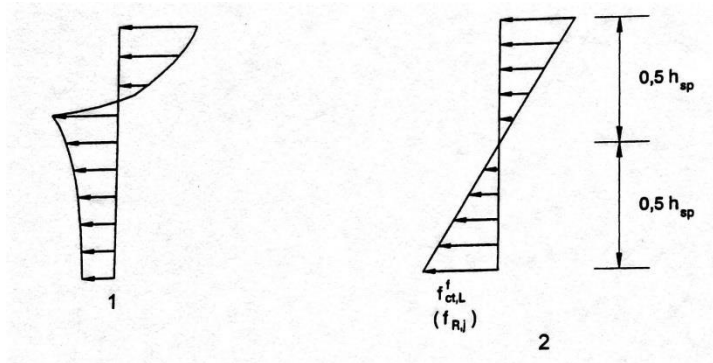
Der

F_j er last ved $\text{CMOD} = \text{CMOD}_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$)

F_L er last ved proporsjonalitetsgrensen.

Lasten som samsvarer med proporsjonalitetsgrensen, F_L , bestemmes ved å tegne en linje på CMOD lik 0,05 mm parallelt med lastaksen i Last-CMOD diagrammet, og bestemme F_L som den høyeste lastverdien i intervallet fra 0 til 0,05 mm.

Bøystrekkfastheten ved proporsjonalitetsgrensen og rest bøystrekkfasthet bestemmes ut fra bøyemomentet og antagelsen om lineær spenningsfordeling i henhold til NS-EN 14561, som vist i Figur 29.



Figur 29: Reell og antatt spenningsfordeling.

Der

1 er reell spenningsfordeling.

2 er antatt spenningsfordeling.

Bøyestrekfastheten er gitt av følgende ligning:

$$f_{ct,L}^f = \frac{6 \cdot M_L}{b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (\text{Formel 4-6})$$

Der

$f_{ct,L}^f$ er bøyestrekfastheten ved proporsjonalitetsgrensen.

F_L er lasten som samsvarer med proporsjonalitetsgrensen.

M_L er bøyemomentet ved F_L .

b er bredden til prøvelegemet.

h_{sp} er avstanden mellom tuppen av sprekken og toppen av prøvelegemet midt på spennet.

l er spennlengden.

Rest bøyestrekfasthet er gitt av ligningen:

$$f_{R,j} = \frac{6 \cdot M_j}{b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (\text{Formel 4-7})$$

Der

$f_{R,j}$ er rest bøyestrekfasthet ved tilsvarende CMOD_j (j = 1, 2, 3, 4)

F_j er last ved tilsvarende CMOD_j (j = 1, 2, 3, 4)

M_j er bøyemoment ved tilsvarende last F_j (j = 1, 2, 3, 4)

b er bredden til prøvelegemet.

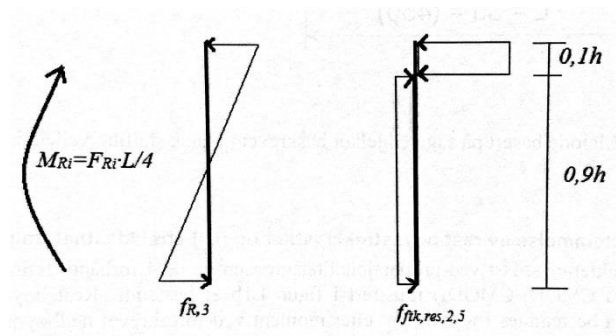
h_{sp} er avstanden mellom tuppen av sprekken og toppen av prøvelegemet midt på spennet.

l er spennlengden.

Ifølge Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner^[8], kan karakteristisk rest strekkfasthet ved en rissvidde på 2,5mm bestemmes basert på rest bøyestrekfasthet ved samme rissvidde, altså $f_{R,3}$ fra NS-EN 14561. Denne karakteristiske rest strekkfastheten defineres som 0,37 ganger rest bøyestrekfasthet ved samme rissvidde.

$$f_{ftk,res\ 2,5} = 0,37 * f_{R,3} \quad (\text{Formel 4-8})$$

Denne relasjonen er basert på at samme last antas opptatt av to ulike spenningsfordelinger; lineært elastisk for bestemmelse av $f_{R,3}$ og ideelt plastisk for bestemmelse av $f_{ftk,res\ 2,5}$. Disse spenningsfordelingene er vist i Figur 30.



Figur 30: Illustrasjon av relasjonen mellom karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekkfasthet.

Testen avviker fra NS-EN 14561 ved at vi har en nedbøyningskontrollert testmaskin, og ikke en testmaskin som kontrollerer økningen i CMOD.

Ifølge NS-EN 14561: *The machine shall be operated so that CMOD increases at a constant rate of 0,05mm/min. When CMOD = 0,1 mm, the machine shall be operated so that CMOD increases at a constant rate of 0,2mm/min...In case of a testing machine controlling the rate of increase of deflection, the above testing procedure shall be applied provided that the CMOD related parameters are transformed into deflection related parameters.*

The relation between CMOD and deflection may be approximated by:

$$\delta = 0,85CMOD + 0,04$$

Følgende tabell fra NS-EN 14561 kan benyttes istedenfor denne formelen.

Tabell 4-1: Forhold mellom CMOD og nedbøyning.

CMOD (mm)	δ (mm)
0,05	0,08
0,1	0,13
0,2	0,21
0,5	0,47
1,5	1,32
2,5	2,17
3,5	3,02
4,0	3,44

Bjelkene blir testet med påført last kontrollert av nedbøyning og ikke av økning i CMOD. Hastigheten på nedbøyningen settes til 0,1mm/min på bjelkene uten fiber, og 0,21mm/min på bjelkene med fiber. Dette blir gjort fordi det ikke er mulig å programmere testmaskinen brukt i oppgaven til å øke nedbøyningshastigheten etter en viss nedbøyning. Disse verdiene velges på grunnlag av tabell 3-2. 0,21 mm/min nedbøyning tilsvarer ifølge tabellen en CMOD på 0,2 mm/min. 0,1 mm/min for bjelkene uten fiber velges fordi det forventes at bjelken går direkte til brudd, og den lavere hastigheten velges da for å få flere målinger opp mot brudd.

Bruddenergi, karakteristisk lengde og brittleness number beregnes ut ifra formlene gitt i kapittel 1.9.3, 1.9.4 og 1.9.5.

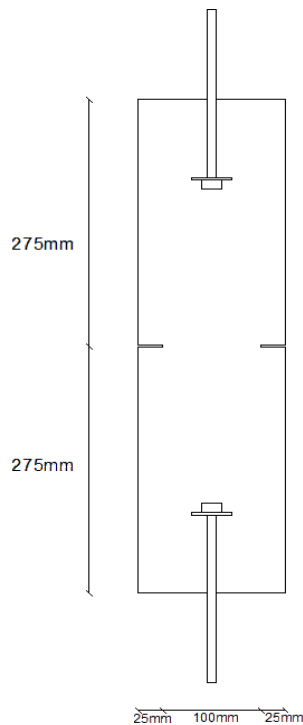
4.3.5. Arbeidsdiagram – strekk

Til arbeidsdiagram strekk brukes små bjelker med innstøpte bolter. Bjelkene sages på midten for å få et mindre tverrsnitt og sikre brudd på midten. Det sages inn 2,5 cm på alle sider. Dette gjøres fordi det da forventes at tverrsnittet er redusert nok til at bruddet oppstår her, og ikke rundt forankringsboltene. Bjelkene blir plassert i strekkmaskinen som strekker bjelkene med en hastighet på 0,05 mm/min. Testen kjøres til bjelkene har en forlengelse på 7mm eller til lasten er så godt som null. Denne verdien velges for å få ut et arbeidsdiagram som sier mye om oppførsel etter brudd. Arbeidsdiagrammet for strekk fås ut av testprogrammet. Figur 31 viser betongsag og strekkmaskin brukt i oppgaven.



Figur 31: Til venstre: Betongsag. Til høyre: Strekkmaskin.

I Figur 32 vises en skjematisk tegning av strekkbjelkene brukt i oppgaven.



Figur 32: Skjematisk tegning av strekkbjelke brukt i oppgaven.

4.3.6. Rissutvikling v/last + bruddlast

For å se på rissutvikling ved forskjellige laster og bruddlasten benyttes store bjelker. Disse blir satt inn i en trykkpresse av typen Tonitech for testing, hvor den blir belastet med en topunkts last. Avstanden mellom opplager og last er 800 mm, mens avstanden mellom lastene er 500 mm. Oppsettet er vist i Figur 11. Lasten blir påført med en jevn hastighet på 100N/s. For registrering av lastene ble testprogrammet «TestExpert» benyttet. Her blir også bruddlasten registrert.

Bjelken blir observert under hele testen, og når riss oppdages, markeres disse på bjelken med tusj. Rissene markeres videre for hver tiende kilonewton. Dersom nye riss oppdages, markeres disse. Lasten rissene oppstår ved noteres ved siden av risset, rundet ned til nærmeste ti kilonewton. Denne prosessen pågår helt til bjelken går til brudd.

5. Proporsjonering

I denne oppgaven er målet å få en betong med en trykkfasthet på ca 100 Mpa. For å få til dette blir v/c tallet satt til 0,3. Anleggsement FA blir benyttet og silikastøv blir tilsatt. I utgangspunktet er alle blandningene like, med unntak av resept 4 og 5, som etter samtaler med Reforcetech blir tilpasset til en viss grad for bruk av basaltfiber. I disse blandningene blir den største steinfraksjonen, dvs 16-22mm fraksjonen, fjernet.

Resept 1 er referanseblandingen, resept 2 har 1,0 vol% stålfiber, resept 3 har 1,5 vol% stålfiber, resept 4 har 1,5 vol% basaltfiber og resept 5 har 3,0 vol% basaltfiber.

5.1. Materialer

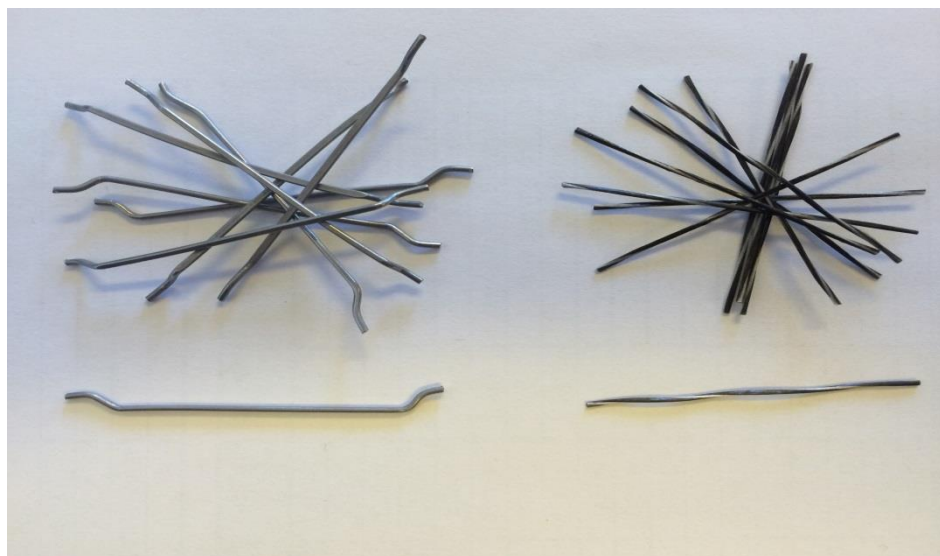
Materialene benyttet er som følger:

- Norcem Anlegg FA. Densitet 2990 kg/m³. Finhet (Blaine) 390 m²/kg. Andel flyveaske blir i proporsjoneringsarket satt til 20,5% for å få det til å stemme med sementens andel flyveaske på 17%. Se forøvrig vedlegg.
- Forsand 0/8 mm sand.
- Stein: det ble benyttet to fraksjoner stein:
 - o Velde 8/16 mm.
 - o Velde 16/22 mm.



Figur 33: Til venstre: Velde 8-16mm. Til høyre: Velde 16-22mm.

- Silikastøv.
- Dynamon SX-N superplastiserende.
- Fiber: det ble benyttet to typer fiber:
 - Basaltfiber type Reforcetech chopped basalt fibre 43 mm.
 - Stålfiber type krampeharex DE 60 / 1,0 NZ.



Figur 34: Til venstre: Stålfiber. Til høyre: Basaltfiber.

Tabell 5-1 viser de forskjellige reseptene og materialenes blandeforhold.

Tabell 5-1: Resepter.

Ingrediens		Resept 1 (REF)	Resept 2 (1,0%SF)	Resept 3 (1,5%SF)	Resept 4 (1,5%BF)	Resept 5 (3,0%BF)
Norcem anlegg FA	Materialer i kg/m ³ betong	443,6	444	444,2	472,4	446,1
Microsilika		29,4	29,5	29,5	29,6	29,6
Forsand 0/8mm nat. Vask		935,7	921,6	914,5	853,4	833,6
Velde 8/16mm		402,4	396,3	393,3	928	906,4
Velde 16/22 mm		485,9	478,6	474,9	0	0
Fritt vann		137,1	137,3	137,3	137,7	138
Dynamon sx-n		7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
Stålfiber		0	78	117	0	0
Basaltfiber		0	0	0	28,5	57

6. Resultater og diskusjon

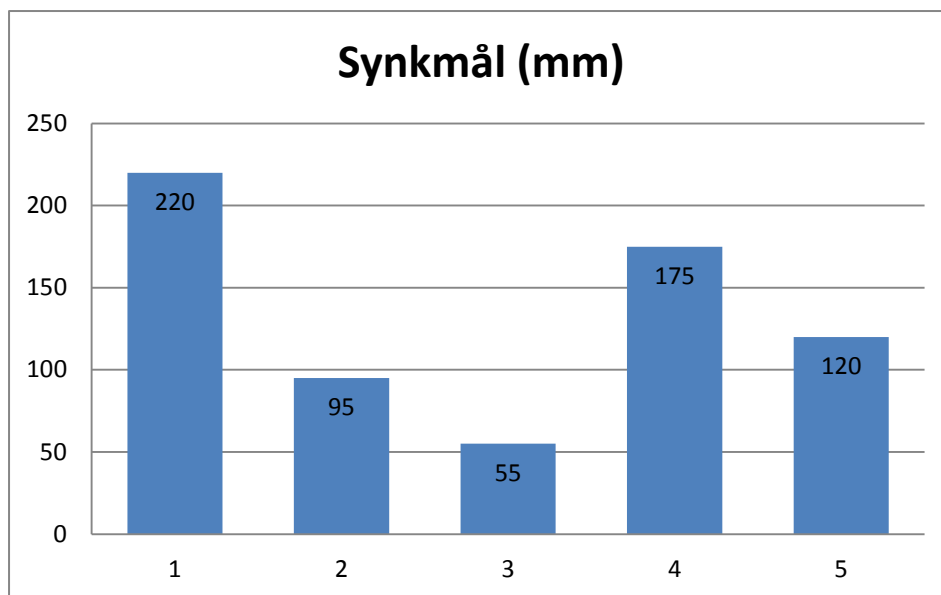
6.1. Fersk betong

I dette kapittelet legges det frem eksperimentelle resultater for testing av fersk betong, samt en diskusjon av disse resultatene. For alle figurene representerer tallene på den horisontale akse de forskjellige reseptene. Alle de eksperimentelle resultatene for den ferske betongen er vist i Tabell 6-1.

Tabell 6-1: Eksperimentelle resultater for fersk betong.

Resept:	1 (REF)	2 (1,0%SF)	3 (1,5%SF)	4 (1,5%BF)	5 (3,0%BF)
Synkmål [mm]:	220	95	55	175	120
Luft [%] :	1,6	1,7	2	1,9	2,2
Densitet [kg/m ³] :	2456	2485	2512	2480	2396

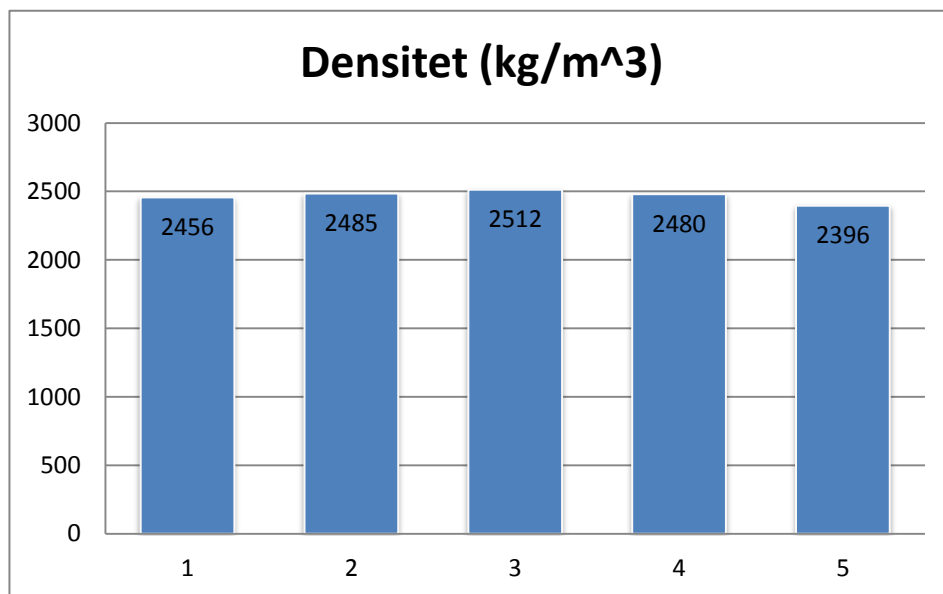
6.1.1. Synkmål



Figur 35: Synkmål.

Synkmålet varierer relativt mye for de forskjellige reseptene. Det var ønskelig å oppnå et synkmål på ca 200 mm. Dette målet ble kun nådd med referanseblandingen, da støpeligheten sank betraktelig med tilsetning av fiber. Som vist i Tabell 6-1 og Figur 35 har referanseblandingen et synkmål på 220 mm, mens resepten med 1,0% stålfiber har 95 mm i synkmål, resepten med 1,5% stålfiber har 55 mm i synkmål, resepten med 1,5% basaltfiber har 175 mm i synkmål og resepten med 3,0% basaltfiber har 120 mm i synkmål. Det er også lett å se av figuren at synkmålet synker med økende mengde fiber. Synkmålet kan også være påvirket av fuktigheten til tilslaget, da denne var vanskelig å måle nøyaktig. Fuktinnholdet i sanden ble målt før hvert støp og forsøk ble gjort ved å blande sand fra flere nivåer i siloen for

å få ut en gjennomsnittlig fukt. Steinfraksjonene ble lagret ute, noe som gjør fukten svært utsatt for variasjoner ut ifra værforholdene. Fukten i tilslaget vil ha en innvirkning både på synkmålet og v/c tallet til blandingene.

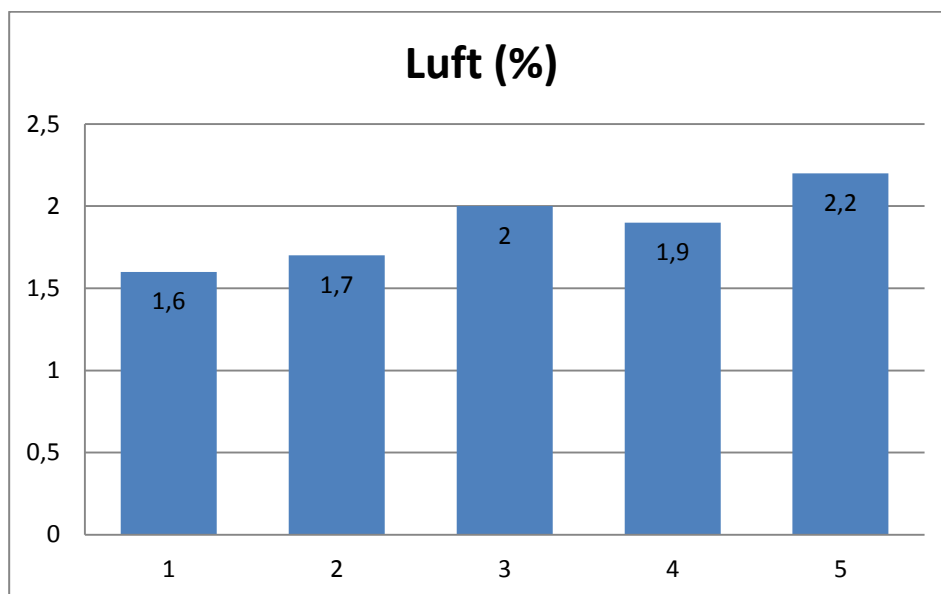


6.1.2. Densitet

Figur 36: Densitet.

Densitetene holder seg relativt jevne for alle reseptene. Det ble ikke definert noe krav om densitet i forkant av støping, men forventet densitet var på ca 2450-2500 kg/m³. Som en ser i Tabell 6-1 og Figur 36 er densiteten til referanseblandingen 2460 kg/m³, densiteten til blandingen med 1,0% stålfiber er 2490 kg/m³, densiteten til blandingen med 1,5% stålfiber er 2510 kg/m³, densiteten til blandingen med 1,5% basaltfiber er 2480 kg/m³ og densiteten til blandingen med 3,0% basaltfiber er 2400 kg/m³. Det sees fra tabellen og figuren at densiteten øker med økt mengde stålfiber, noe som stemmer godt, da stålfiberen har en densitet på 7800 kg/m³, noe som er over 3 ganger så mye som betongen. Tilsvarende synker densiteten med økende mengde basaltfiber, med unntak av resept 4, som er noe høyere enn referanseblandingen. Dette gir også mening, da basaltfiberen har en densitet på 1900 kg/m³. Avvik i densiteten fra forventede verdier kan forklares med varierende innhold av luft, se 6.1.3, samt nøyaktigheten på målingene.

6.1.3. Luftinnhold



Figur 37: Luft.

Luftinnholdet i den ferske betongen er vist i Tabell 6-1 og Figur 37. Det ble ikke definert noe krav til luft i forkant av måling, men det var forventet at nivået skulle holde seg relativt stabilt. Luftinnholdet i referanseblandingen er på 1,6%, for blandingen med 1,0% stålfiber er luftinnholdet på 1,7%, for blandingen med 1,5% stålfiber er luftinnholdet på 2,0 %, for blandingen med 1,5% basaltfiber er luftinnholdet 1,9% og for blandingen med 3,0% basaltfiber er luftinnholdet 2,2%. Det kommer frem at luftinnholdet øker med økende mengde fiber. Dette kan ha sammenheng med at blandingene ble kjørt lenger i blanderen etter tilsetning av fiber for å sikre god utblanding og fordeling av fiber.

6.2. Herdet betong

I dette kapittelet legges det frem eksperimentelle resultater for prøving av herdet betong, samt en diskusjon av disse resultatene.

6.2.1. Trykkfasthet

Trykkfastheten testes ved 3, 7 og 28 døgn. 3 og 7 døgn testingen blir gjennomført for å få en indikasjon på fasthetsutviklingen. Ønsket fasthet etter 28 døgn er omtrent 100 MPa.

Tabell 6-2: Eksperimentelle resultater for trykkfasthet 3 døgn.

Trykkfasthet 3 døgn [MPa]					
Resept:	1 (REF)	2 (1,0%SF)	3 (1,5%SF)	4 (1,5%BF)	5 (3,0%BF)
Bruddlast [kN]	723,3	619,0	739,7	692,3	605,5
Trykkfasthet [MPa]	72,5	62,0	74,0	69,0	60,5
Styrke i forhold til REF [%]	REF	85,5	102,1	95,2	83,4

Tabell 6-2 viser trykkfastheten etter 3 døgn. Som tallene fra tabellen viser, blir ikke trykkfastheten høyere av tilsetning av fiber. Den eneste resepten som har en fasthet høyere enn referanseblandingen er resepten med 1,5% stålfiber. Variasjonen fra høyeste til laveste fasthet er på hele 13,5 MPa. Dette kan ha sammenheng med fuktvariasjon i tilslaget og dets innvirkning på betongens v/c-tall.

Tabell 6-3: Eksperimentelle resultater for trykkfasthet 7 døgn.

Trykkfasthet 7 døgn [MPa]					
Resept:	1 (REF)	2 (1,0%SF)	3 (1,5%SF)	4 (1,5%BF)	5 (3,0%BF)
Bruddlast [kN]	910,6	872,4	910,1	862,8	812,8
Trykkfasthet [MPa]	91,0	87,0	91,0	86,5	81,5
Styrke i forhold til REF [%]	REF	95,6	100,0	95,1	89,6

Tabell 6-3 viser trykkfastheten etter 7 døgn. Som tabellen viser, har ingen resepter med fiber høyere fasthet enn referanseblandingen.

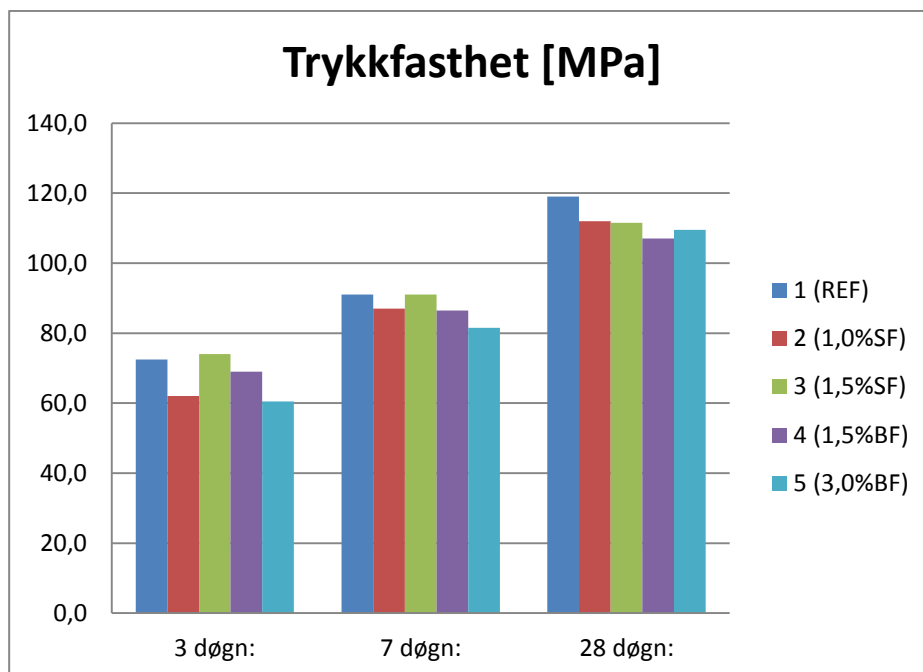
Tabell 6-4: Eksperimentelle resultater for trykkfasthet 28 døgn.

Trykkfasthet 28 døgn [MPa]					
Resept:	1 (REF)	2 (1,0%SF)	3 (1,5%SF)	4 (1,5%BF)	5 (3,0%BF)
Bruddlast 1 [kN]	1257,5	1108,0	1128,9	1029,6	1073,3
Bruddlast 2 [kN]	1125,64	1133,18	1100,12	1106,2	1114,47
Gjennomsnittlig bruddlast [kN]	1191,6	1120,6	1114,5	1067,9	1093,9
Trykkfasthet [MPa]	119,2	112,1	111,5	106,8	109,4
Styrke i forhold til REF [%]	REF	94,0	93,5	89,6	91,8

Tabell 6-4 viser trykkfastheten etter 28 døgn. Som en kan se fra tabellen, ligger alle fasthetene for reseptene med fiber under referanseblandingen. Alle reseptene har en terningfasthet over 100 MPa, og resultatene er relativt jevne.

Det ble under testing observert at terningene med fiber holdt bedre sammen etter brudd. Terningene fra referanseblandingen hadde et eksplosjonsartet brudd. Alle reseptene er basert på samme blanding, den eneste forskjellen er innholdet av fiber og fukten i tilslaget, med unntak av resept 4 og 5, der 16-22 mm fraksjonen er fjernet. Fastheten skulle i utgangspunktet vært identisk på alle reseptene, noe som ikke stemmer. Da innhold av fiber og fukt i tilslaget er de eneste parameterene som forandrer seg fra resept til resept virker det som at fuktinnholdet i tilslaget har mye å si for trykkfastheten til betongen. En annen faktor som kan spille inn er utstøpingen av terningene.

En grafisk fremstilling av trykkfastheten er vist i Figur 38.



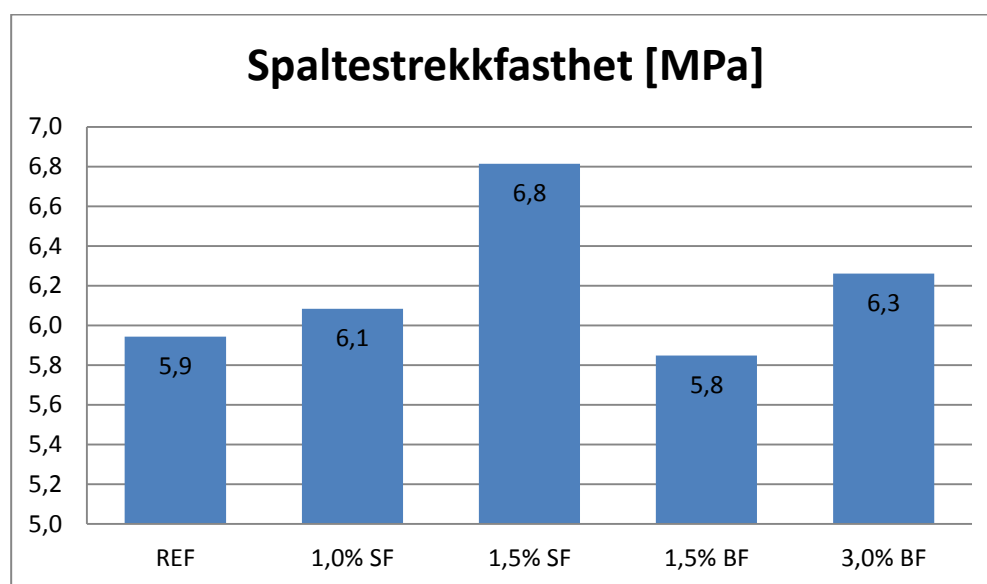
Figur 38: Trykkfasthet.

6.2.2. Spaltestrekkfasthet

Alle prøvestykkene for spaltestrekkfasthet blir testet etter 28 døgns herding. Det ble ikke satt noe krav om spaltestrekkfastheten i forkant av testing, men det var forventet at den ville øke med økt mengde fiber.

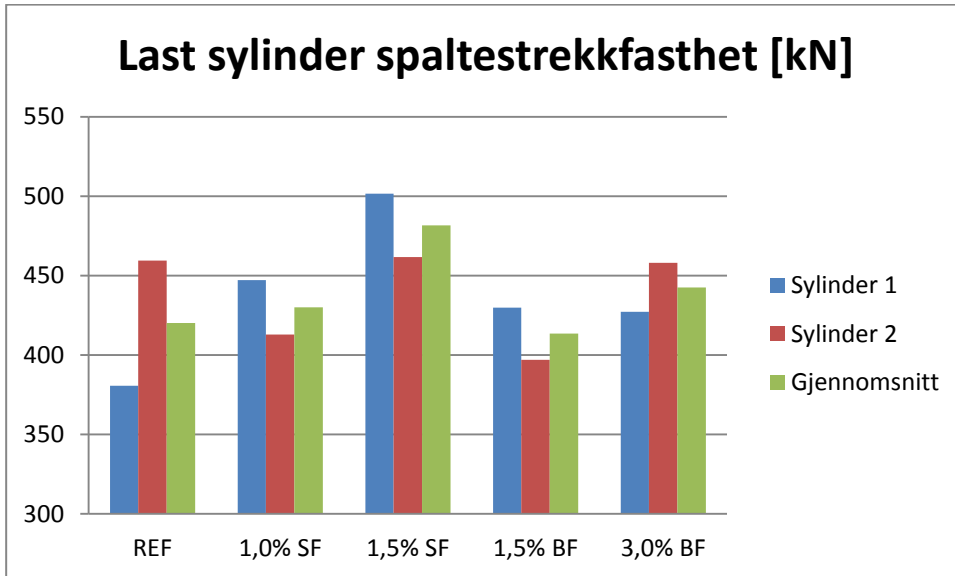
Tabell 6-5: Eksperimentelle resultater for spaltestrekkfasthet.

Spaltestrekkfasthet [MPa]					
Resept:	REF	1,0% SF	1,5% SF	1,5% BF	3,0% BF
Maks last Sylinder 1 [kN]:	380,67	447,14	501,66	429,92	427,11
Maks last Sylinder 2 [kN]:	459,51	412,91	461,75	396,97	458,07
Maks last Gjennomsnitt [kN]:	420,09	430,025	481,705	413,445	442,59
Spaltestrekkfasthet, f_{ct} [Mpa]	5,9	6,1	6,8	5,8	6,3
Styrke i forhold til REF [%]	REF	103,4	115,2	98,3	106,8



Figur 39: Spaltestrekkfasthet (gjennomsnitt av to prøvestykker).

Tabell 6-5 og Figur 39 viser spaltestrekkfastheten for alle reseptene. Begge reseptene med stålfiber har en høyere spaltestrekkfasthet enn referanseblandingen, og en ser spesielt en økning i resepten med 1,5% stålfiber; denne er hele 15,2 % sterkere. Resepten med 1,5% basaltfiber ligger rett under referanseblandingen, mens resepten med 3,0% basaltfiber har økt spaltestrekkfasthet i forhold til referansen. For samtlige resepter med fiber hang sylindere mer sammen ved brudd enn referanseblandingen, som hadde et eksplosjonsartet brudd, der de to delene av sylindere spratt fra hverandre. Ut ifra resultatene fra disse testene, kan en si at tilsetning av stålfiber gir en økt spaltestrekkfasthet. Tilsetning av basaltfiber gir her ingen effekt ved en såpass liten dosering som 1,5%, men gir en effekt ved 3,0%.








Figur 40: Sylinterlast spaltestrekkfasthet.

I Figur 40 er lasten på sylindere brukt for prøving av spaltestrekkfasthet vist grafisk. Som en ser av figuren er det for enkelte av reseptene relativt stor variasjon i sylinterlasten. Dette kan for reseptene med fiber forklares med at mengden og fordelingen av fiber varierer, slik at plasseringen enten er fordelaktig eller ufordelaktig. Utstøpingen av sylindere kan også ha en innvirkning på resultatet.

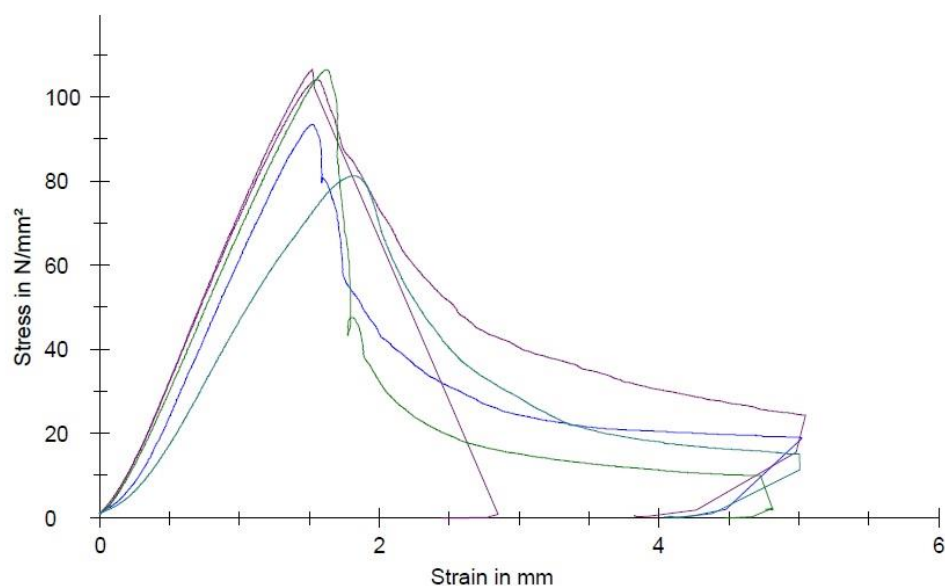
6.2.3. Arbeidsdiagram – trykk

Det forventes at sylindere med fiber vil ha mer motstand mot trykk etter brudd, dvs at de har et seigere brudd enn referansesylindere. E-modulen blir beregnet etter formel i kapittel 4.3.3. I figur Figur 41 vises et arbeidsdiagram trykk for hver resept. Reseptene omtales i figuren som «blanding x»

Resultater:

Legends	Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	d mm	h mm
	3	blanding 2 02.04	1650,64	93,41	150,0	300,0
	5	blanding 1 02.04	1882,55	106,53	150,0	300,0
	10	blanding 3 04.04	1837,21	103,96	150,0	300,0
	12	blanding 4 10.04	1880,20	106,40	150,0	300,0
	14	blanding 5 10.04	1435,09	81,21	150,0	300,0

Grafisk fremstilling:



Figur 41: Arbeidsdiagram trykk.

Som en ser fra Figur 41 går prøvestykkene fra resept 1 rett til brudd etter at makspenning oppnås. Prøvestykkene fra reseptene med fiber har en jevnere nedgang i spenning med økende deformasjon. Prøvestykkene fra resepten med 1,5% stålfiber har høyest spenning ved 5 mm deformasjon, mens prøvestykkene fra resepten med 1,5% basaltfiber har lavest spenning ved 5 mm deformasjon. Prøvestykkene fra resepten med 1,0% stålfiber ligger litt under prøvestykkene fra resepten med 1,5% stålfiber og prøvestykkene fra resepten med 3,0% basaltfiber ligger rett under prøvestykkene fra resepten med 1,0% stålfiber. Alle kurvene for prøvestykkene fra reseptene med fiber har reeltvis lik form, men varierer i spenningsfall etter oppnådd bruddspenning.

På grunn av usikkerhet rundt gjennomføring av prøvingsmetoden og leveranse av strekkklapper ble ikke alle sylindere testet etter 28 døgns herding. Under følger en tabell over herdetid for de forskjellige reseptene.

Tabell 6-6: Herdetid.

Resept	Støpedato	Prøvingsdato	Herdetid [døgn]
1 (REF)	11.feb	02.apr	50
2 (1,0%SF)	18.feb	02.apr	43
3 (1,5%SF)	24.feb	04.apr	39
4 (1,5%BF)	25.feb	10.apr	44
5 (3,0%BF)	11.mar	10.apr	30

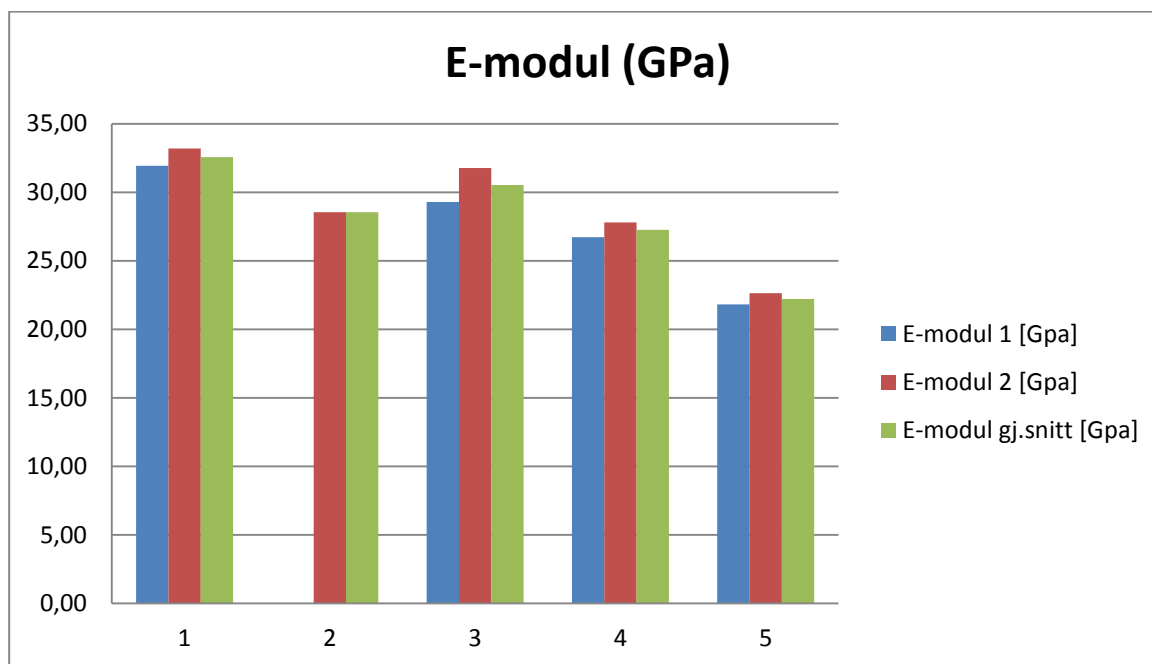
I Tabell 6-7 presenteres de eksperimentelle resultatene for arbeidsdiagram trykk.

Tabell 6-7: Eksperimentelle resultater arbeidsdiagram – trykk.

Resept	1 (REF)	2 (1,0%SF)	3 (1,5%SF)	4 (1,5%BF)	5 (3,0%BF)
Bruddspenning 1 [MPa]	106,50	93,40	103,00	109,50	75,20
Bruddspenning 2 [MPa]	93,60	90,00	104,00	106,40	81,20
Bruddspenning gj.snitt [MPa]	100,05	91,70	103,50	107,95	78,20
Bruddeformasjon 1 [mm/m]	3,34	2,04	3,52	4,10	3,45
Bruddeformasjon 2 [mm/m]	2,82	3,15	3,27	3,83	3,59
Bruddeformasjon gj.snitt [mm/m]	3,08	2,60	3,40	3,96	3,52
E-modul 1 [Gpa]	31,92	45,81	29,29	26,73	21,80
E-modul 2 [Gpa]	33,19	28,55	31,77	27,80	22,64
E-modul gj.snitt [Gpa]	32,56	28,55	30,53	27,26	22,22

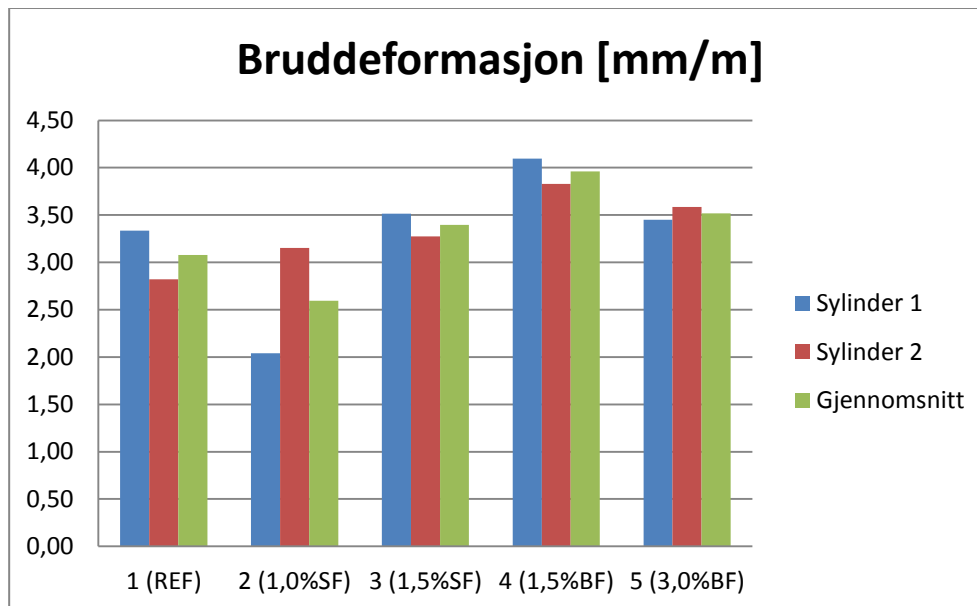
Som tabellen over viser varierer E-modulen fra arbeidsdiagrammet relativt mye. For resept 2 er den ene verdien for E-modulen ekstremt mye høyere enn den andre for samme resepten og alle verdiene for de andre reseptene, så denne velges derfor bort. E-modulen presenteres grafisk i Figur 42. Det er fortsatt stor variasjon i verdiene for E-modulen, helt fra 32,56 GPa til 22,22 GPa. Dette kan forklares med at verdiene blir feilaktige på grunn av at de måles med bruddlast og brudddeformasjon fra arbeidsdiagrammet, istedenfor ved en last tilsvarende omtrent 45% av makslast.

Ut ifra Figur 41 virker det som om det er reseptene med stålfiber som har mest motstand etter brudd, og dermed er mest duktile. Reseptene med basaltfiber har også en viss motstand etter brudd, men denne er lavere enn for reseptene med stålfiber.



Figur 42: E-modul.

Referanseblandingen har den høyeste E-modulen, mens resepten med 3,0% basaltfiber har den laveste. Om en ser bort fra sylinder 1 i resept 2, er resultatene ganske jevne internt i reseptene.



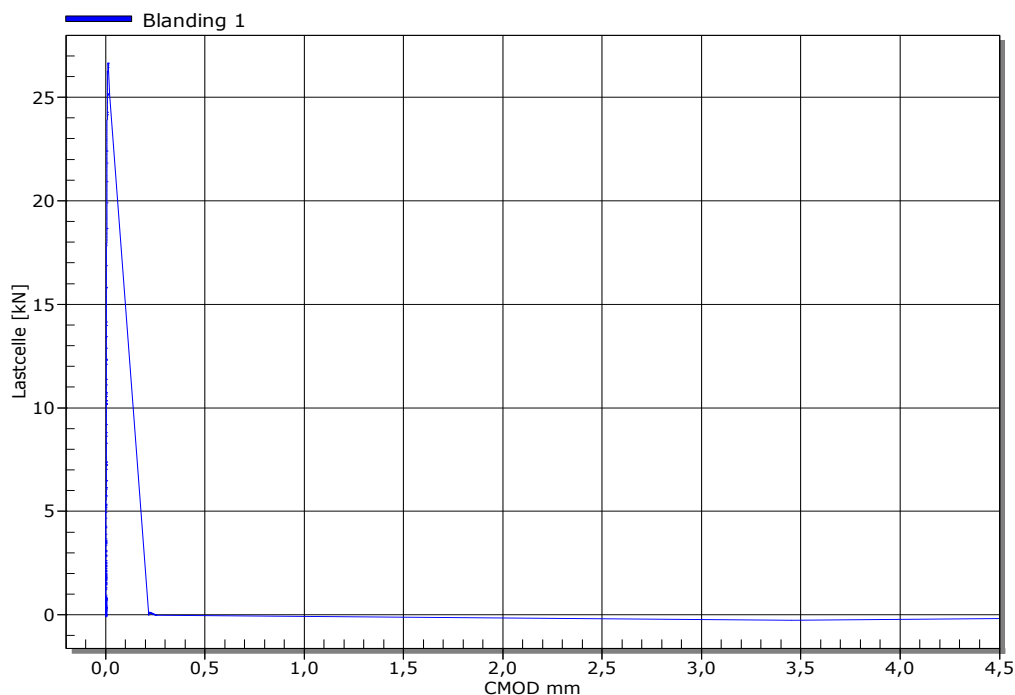
Figur 43: Bruddeformasjon.

Som en ser av Figur 43 varierer også bruddeformasjonen relativt mye. Den er jevn internt i reseptene om en ser bort ifra sylinder 1 i resept 2. For betong med denne fastheten er det som nevnt i kapittel 1.9.2 forventet å få en bruddeformasjon på ca 2,6 %. Bruddeformasjonen varierer her mellom 2,6 og 4,1 %, om man ser bort ifra sylinder 1 i resept 2, som har en bruddeformasjon på 2,04%.

6.2.4. Bøystrekkfasthet

Det ble på forhånd forventet at reseptene med fiber ville ha høyere bøystrekkfasthet, samt at rest strekkfasthet ville øke med fibermengden. Det presenteres ett Last-CMOD diagram per resept, samt en tabell med eksperimentelle resultater for hver resept. Resten av Last-CMOD diagrammene finnes som vedlegg.

6.2.4.1. Resept 1 (REF)



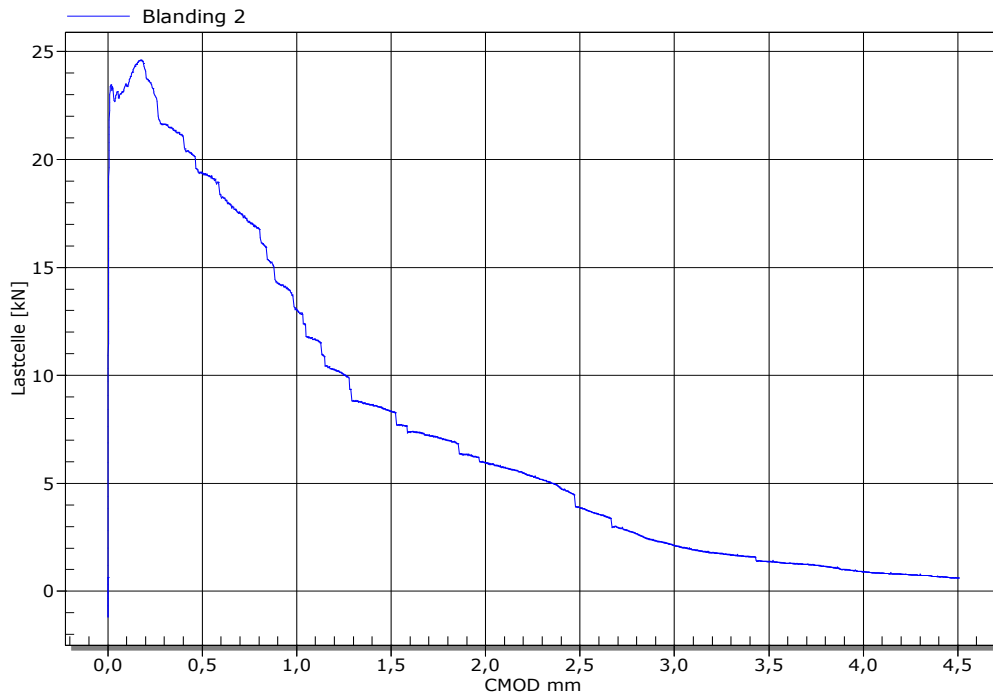
Figur 44: Last-CMOD diagram resept 1 (REF)

Som man ser fra Figur 44 er betongen meget sprø uten fiber. Med en gang lasten når bruddlast, knekker bjelken tvert av. Det er på grunn av dette ingen rest bøystrekkfasthet i referanseblandingen, som vist i Tabell 6-8. Makslasten er identisk med lasten ved proporsjonalitetsgrensen. Resultatene fra referanseblandingen er som forventet. Det blir kun presentert en bjelke for denne resepten, da resultatene fra den ene bjelken ble borte etter testing, på grunn av en feil i programmet.

Tabell 6-8: Eksperimentelle resultater bøystrekkfasthet resept 1.

	Bjelke 1	Bjelke 2	Gjennomsnitt
b [mm]	150	150	150
h_{sp} [mm]	125	125	125
l [mm]	500	500	500
F_{maks} [kN]	-	26,7	26,7
F_L [kN]	-	26,7	26,7
f_{ct,L}^f [MPa]	-	8,544	8,544
f_{R,1} [MPa]	-	0	0
f_{R,2} [MPa]	-	0	0
f_{R,3} [MPa]	-	0	0
f_{R,4} [MPa]	-	0	0

6.2.4.2. Resept 2 (1,0%SF)



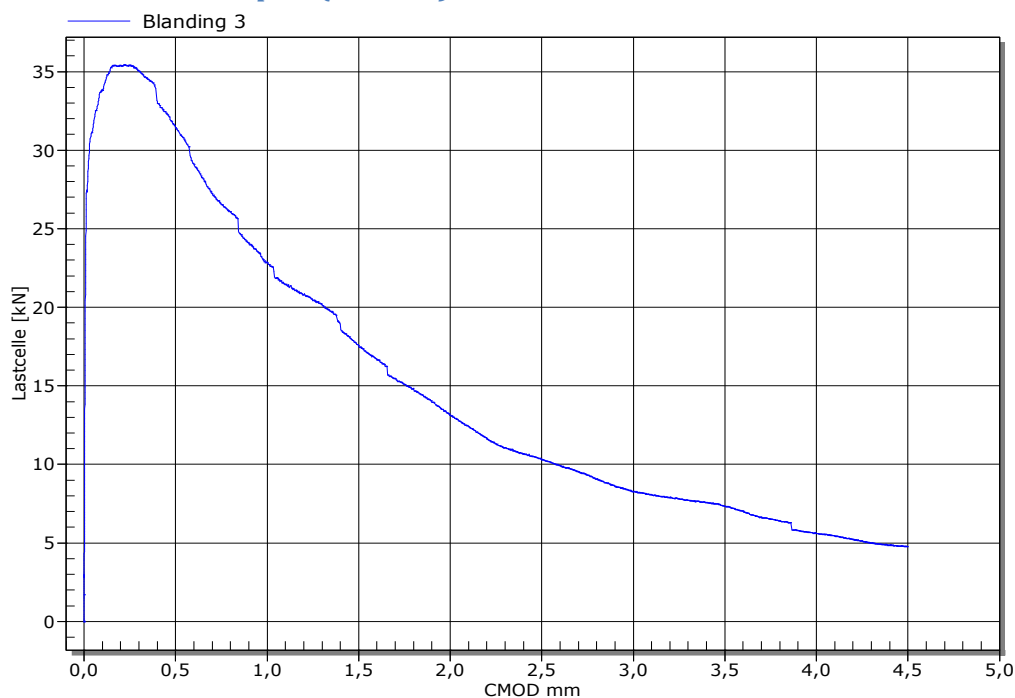
Figur 45: Last-CMOD diagram resept 2 (1,0%SF)

I Figur 45 vises last-CMOD diagrammet for resept 2. Som en ser utifra figuren går bjelken til brudd på omtrent samme lastnivå som resept 1, men beholder en del kapasitet etter brudd. Gjennomsnittlig bruddlast er noe høyere enn for referanseblandingen. Oppførsel etter brudd er derimot helt annerledes enn referansebjelken, da bjelken beholder noe kapasitet etter at bruddlasten er nådd. Resultatene viser at makslasten er høyere enn lasten ved proporsjonalitetsgrensen. Bøyestrekfastheten er også hacket høyere enn for referanseblandingen. Som en ser fra tabellen under er det realtvt stor forskjell på de to bjelkene i denne resepten. Dette kan skyldes en fordelaktig mengde og fordeling av fibere i den ene bjelken.

Tabell 6-9: Eksperimentelle resultater bøyestrekfasthet resept 2.

	Bjelke 1	Bjelke 2	Gjennomsnitt
b [mm]	150	150	150
h_{sp} [mm]	125	125	125
l [mm]	500	500	500
F_{maks} [kN]	24,4	38,8	31,6
F_L [kN]	23,3	37,2	30,25
f_{ct,L}^f [MPa]	7,456	11,904	9,68
f_{R,1} [MPa]	6,208	8,992	7,6
f_{R,2} [MPa]	2,656	3,552	3,104
f_{R,3} [MPa]	1,264	1,6	1,432
f_{R,4} [MPa]	0,48	0,864	0,672

6.2.4.3. Resept 3 (1,5%SF)



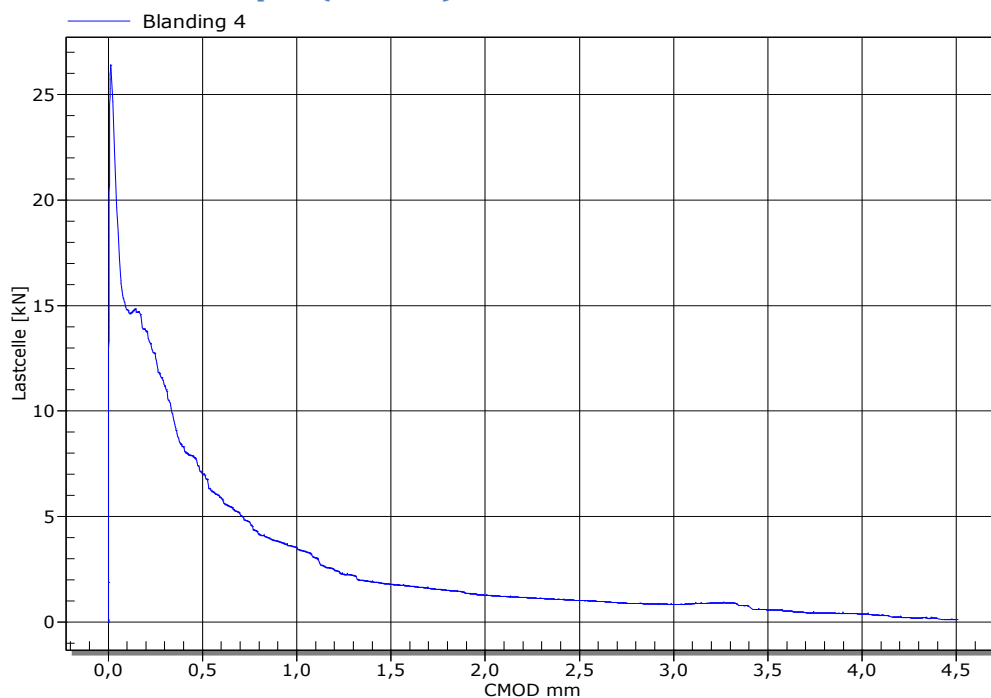
Figur 46: Last-CMOD diagram resept 3 (1,5%SF)

Som en ser fra Figur 46 og Tabell 6-10 er både lastnivået og bøyestrekfastheten i denne resepten litt høyere enn i resept 2. Last-CMOD diagrammet har tilnærmet samme form som resept 2, men holder seg på et høyere lastnivå over hele. Resultatene for bjelkene i denne resepten er relativt jevne. Også for denne resepten er makslasten høyere enn lasten ved proporsjonalitetsgrensen.

Tabell 6-10: Eksperimentelle resultater bøyestrekfasthet resept 3.

	Bjelke 1	Bjelke 2	Gjennomsnitt
b [mm]	150	150	150
h_{sp} [mm]	125	125	125
I [mm]	500	500	500
F_{maks} [kN]	30	35,3	32,65
F_L [kN]	30	33,5	31,75
f_{ct,L}^f [MPa]	9,6	10,72	10,16
f_{R,1} [MPa]	7,744	9,984	8,864
f_{R,2} [MPa]	5,088	5,568	5,328
f_{R,3} [MPa]	4,032	3,296	3,664
f_{R,4} [MPa]	3,04	2,24	2,64

6.2.4.4. Resept 4 (1,5%BF)



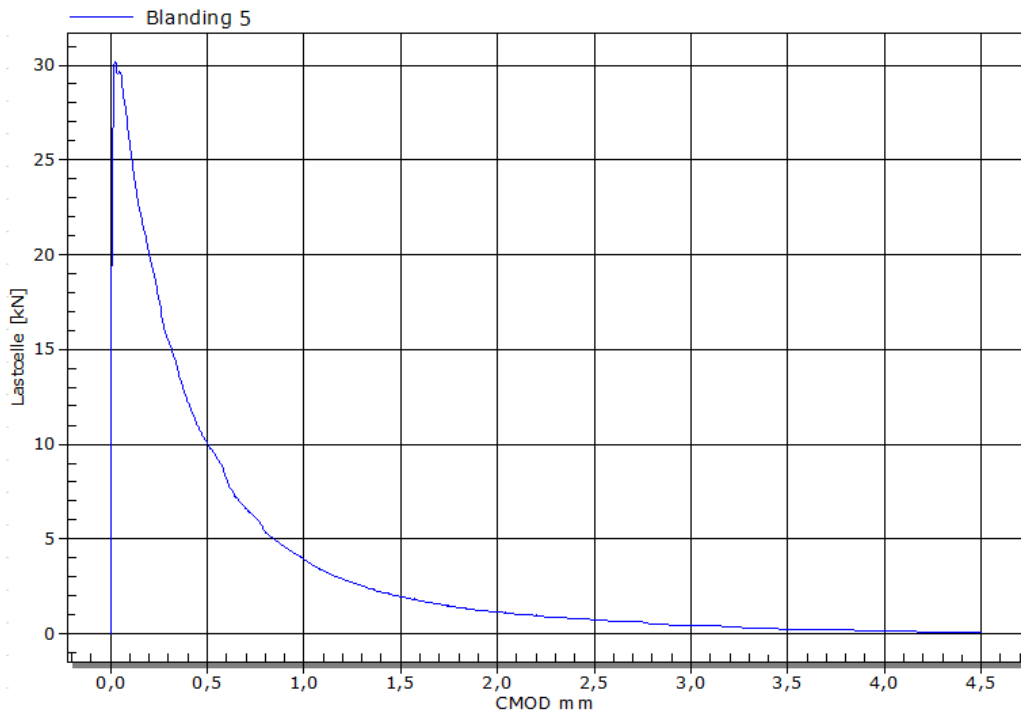
Figur 47: Last-CMOD diagram resept 4 (1,5%BF)

Som en ser av Figur 47 og Tabell 6-11 har denne resepten en gjennomsnittlig makslast rett under referansen. Last-CMOD diagrammet har en ganske kraftig reduksjon rett etter makslast, hvor lasten synker voldsomt, helt til en CMOD på ca 1,5 mm, hvor kurven jevner seg ut. Som en ser fra tabellen under har denne resepten mye lavere rest bøyestrekfastheter enn reseptene med stålfiber. Makslasten og lasten ved proporsjonalitetsgrensen er for denne resepten identiske.

Tabell 6-11: Eksperimentelle resultater bøyestrekfasthet resept 4.

	Bjelke 1	Bjelke 2	Gjennomsnitt
b [mm]	150	150	150
h_{sp} [mm]	125	125	125
l [mm]	500	500	500
F_{maks} [kN]	23,95	26,3	25,125
F_L [kN]	23,95	26,3	25,125
f_{ct,L}^f [MPa]	7,664	8,416	8,04
f_{R,1} [MPa]	2,144	2,224	2,184
f_{R,2} [MPa]	0,288	0,608	0,448
f_{R,3} [MPa]	0,128	0,352	0,24
f_{R,4} [MPa]	0	0,128	0,064

6.2.4.5. Resept 5 (3,0%BF)



Figur 48: Last-CMOD diagram resept 5 (3,0%BF)

Denne resepten har en høyere gjennomsnittlig makslast og bøyestrekfasthet enn resepten med 1,5% basaltfiber, men verdiene er lavere sammenlignet med begge stålfiberreseptene. Formen på kurven er relativ lik som for resepten med 1,5% basaltfiber. Både makslast og bøyestrekfasthet er for denne resepten høyere enn for referanseblandingen. Makslasten og lasten ved proporsjonalitetsgrensen er identiske.

Tabell 6-12: Eksperimentelle resultater bøyestrekfasthet resept 5.

	Bjelke 1	Bjelke 2	Gjennomsnitt
b [mm]	150	150	150
h_{sp} [mm]	125	125	125
l [mm]	500	500	500
F_{maks} [kN]	30,2	28,4	29,3
F_L [kN]	30,2	28,4	29,3
f_{ct,L}^f [MPa]	9,664	9,088	9,376
f_{R,1} [MPa]	3,2	2,432	2,816
f_{R,2} [MPa]	0,672	0,576	0,624
f_{R,3} [MPa]	0,304	0,32	0,312
f_{R,4} [MPa]	0,128	0,096	0,112

Som en kan se ut fra figurene og tabellene for samtlige resepter, gir tilsetning av stålfiber til betongen en økning i makslast og bøyestrekfasthet, samt økt duktilitet. Tilsetning av basaltfiber kan sies å ikke påvirke dette like mye, selv om resepten med 3,0% basaltfiber gir en liten økning i makslast og bøyestrekfasthet. Basaltfibertilsetningen gjør også betongen mer duktil, men ikke i like stor grad som stålfiber.

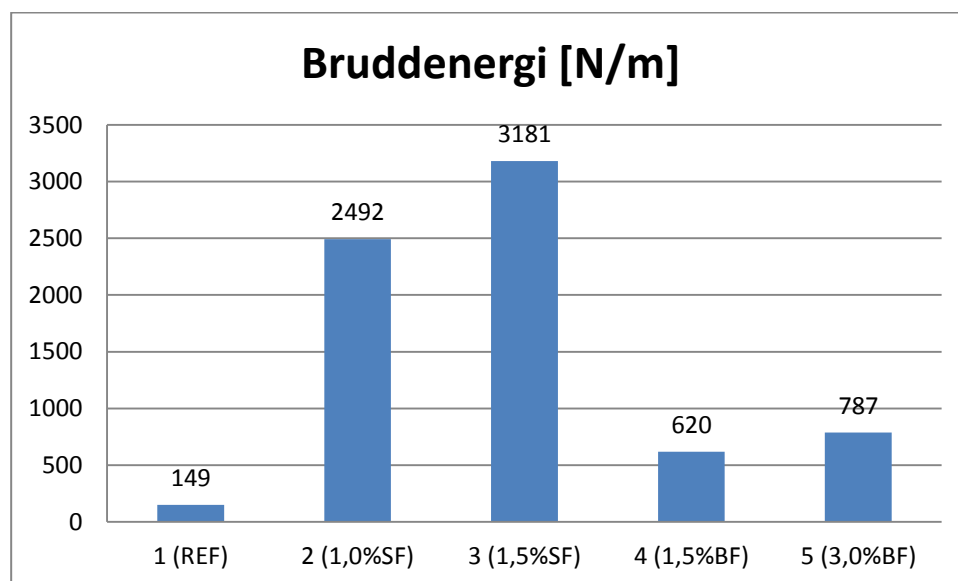
6.2.4.6. Bruddenergi

Til bestemmelse av bruddenergien blir formel I kapittel 1.9.3 benyttet. For å finne W_f blir arealet under Last-CMOD diagrammene grovt regnet ut for hånd frem til en CMOD på 3,5 mm. Denne verdien blir valgt da det er frem til denne verdien det beregnes rest bøyestrekfasthet i tillegg til at bidraget etter dette er reelt lite. Dette ble gjort da det på forhånd ikke ble lagt inn i testprogrammet at dette var ønskelig å få ut, og det i etterkant viste seg å være vanskelig å endre utdataene fra programmet.

Bruddenergien er presentert i Tabell 6-13 og i Figur 49.

Tabell 6-13: Eksperimentelle resultater bruddenergi.

Resept	1 (REF)	2 (1,0%SF)	3 (1,5%SF)	4 (1,5%BF)	5 (3,0%BF)
W_{f1} [Nmm]	-	34088	57750	10663	16763
W_{f2} [Nmm]	2803	59354	61525	12575	12750
$W_{f, \text{gjennomsnitt}}$ [Nmm]	2803	46721	59638	11619	14757
b [mm]	150	150	150	150	150
h_{sp} [mm]	125	125	125	125	125
G_f [N/m]	149	2492	3181	620	787



Figur 49: Bruddenergi.

Reseptene med tilsatt stålfiber har klart høyest bruddenergi. Resepten med 1,5% stålfiber har hele 20 ganger så høy bruddenergi som referanseblandingen. Som en ser av figuren over øker bruddenergien med økende fibermengde. Dette gjelder både for stålfiber og basaltfiber, selv om reseptene med basaltfiber ligger mye lavere enn reseptene med stålfiber. Prosentmessig øker både resepten med mest stålfiber i forhold til resepten med minst stålfiber og resepten med mest basaltfiber i forhold til resepten med minst basaltfiber omtrent like mye, med ca 27%. Bruddenergien henger direkte sammen med rest bøyestrekfasthet, da formelen baserer seg på areal under Last-CMOD diagrammet. Det gir derfor mening at basaltfiberreseptene har

såpass mye lavere bruddenergi, da rest bøyestrekfasthet for disse reseptene er en størrelsesorden under reseptene med stålfiber.

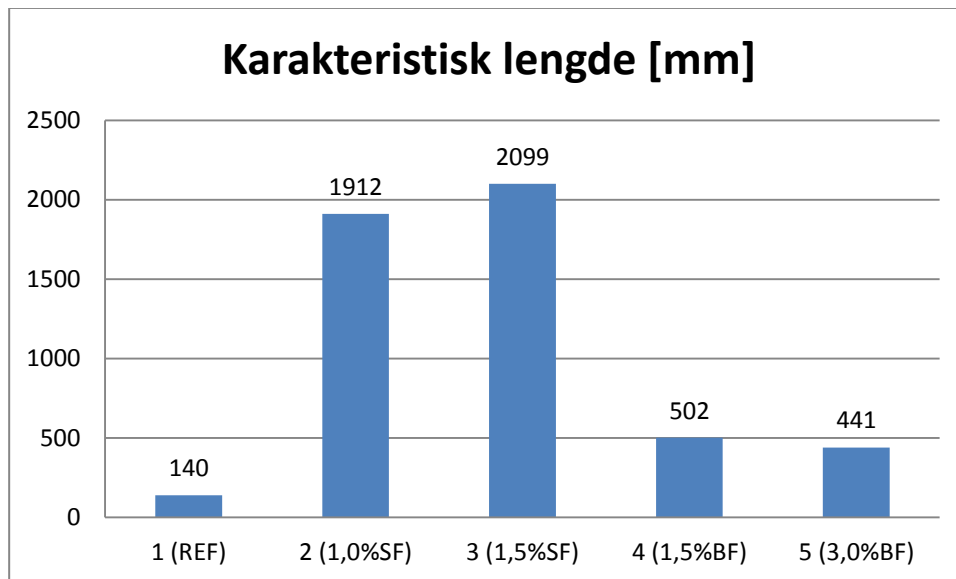
6.2.4.7. Karakteristisk lengde

Den karakteristiske lengden er avhengig av strekkfastheten til betongen, og i denne oppgaven benyttes spaltestrekfastheten som strekkfasthet, f_{ctm} . Karakteristisk lengde blir beregnet ut ifra formelen i kapittel 1.9.4.

Karakteristisk lengde er presentert i Tabell 6-14 og i Figur 50.

Tabell 6-14: Eksperimentelle resultater karakteristisk lengde.

Resept	1 (REF)	2 (1,0%SF)	3 (1,5%SF)	4 (1,5%BF)	5 (3,0%BF)
G_f [N/m]	149	2492	3181	620	787
E [Gpa]	32,56	28,55	30,52	27,26	22,22
f_{ctm} [MPa]	5,9	6,1	6,8	5,8	6,3
l_{ch} [mm]	140	1912	2099	502	441



Figur 50: Karakteristisk lengde.

Karakteristisk lengde beskriver betongens sprøhet. Lave verdier indikerer en mer sprø betong enn høye verdier. Da formelen for karakteristisk lengde er avhengig av E-modulen til betongen, vil resultatene variere med hensyn på denne. Reseptene med stålfiber har de helt klart største karakteristiske lengdene, og de oppfattes derfor som de mest duktile reseptene. Reseptene med lavere karakteristisk lengde har bratt nedadgående kurve rett etter opprissing i Last-CMOD diagrammene, mens begge stålfiberreseptene har en slakere kurve. Som forventet har referanseblandingen klart lavest karakteristisk lengde, og blir derfor sett på som mest sprø.

6.2.4.8. Brittleness number

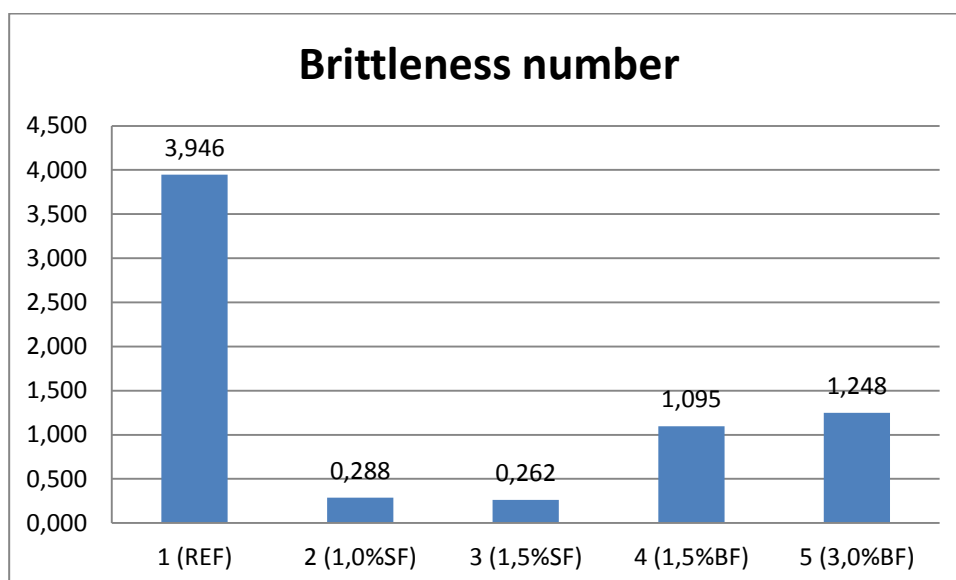
Også brittleness number er avhengig av strekkfastheten til betongen, og som for karakteristisk lengde benyttes spaltestrekfastheten. Brittleness number blir beregnet fra formel i kapittel 1.9.5.

Brittleness number er som nevnt et mål på hvor sprø betongen er. Høye verdier indikerer en sprø betong, mens lave verdier indikerer en mer duktil betong.

Brittleness number er presentert i Tabell 6-15 og i Figur 51.

Tabell 6-15: Eksperimentelle resultater brittleness number.

Resept	1 (REF)	2 (1,0%SF)	3 (1,5%SF)	4 (1,5%BF)	5 (3,0%BF)
f_{ctm} [MPa]	5,9	6,1	6,8	5,8	6,3
l [mm]	550	550	550	550	550
G_f [N/m]	149	2492	3181	620	787
E [Gpa]	32,56	28,55	30,52	27,26	22,22
β	3,946	0,288	0,262	1,095	1,248



Figur 51: Brittleness number.

Som forventet har referanseblandingen høyest brittleness number, noe som indikerer at det er den mest sprø resepten. Begge reseptene med stål er mye lavere og resepten med 1,5% stålfiber har den laveste verdien av alle reseptene. Basaltfiberreseptene ligger et godt stykke over stålfiberreseptene, men er fortsatt mye lavere enn referanseblandingen.

6.2.5. Arbeidsdiagram – strekk

Arbeidsdiagram for strekk testes som beskrevet i kapittel 4.3.5. Det ble på forhånd forventet at referansebjelken ville gå rett til brudd ved makslast, mens bjelkene med fiber ville ha noe motstand også etter brudd, og at denne motstanden ville øke med økt fibermengde.

Det blir bestemt at bjelkene skal testes til en deformasjon på 7 mm, eller til lasten er så godt som 0. Dette ble fastslått etter at resept 2 ble testet, så denne går bare til 5 mm.

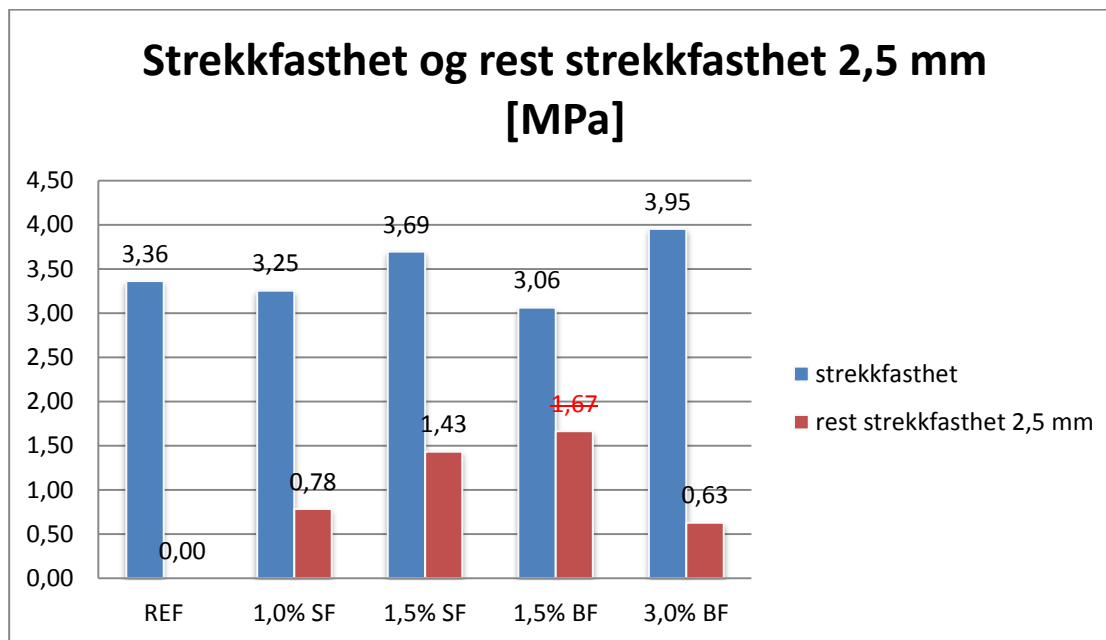
I Tabell 6-16 presenteres de eksperimentelle resultatene for strekkbjelkene. Det presenteres et arbeidsdiagram med begge bjelkene for hver resept. Det velges å se på restlast, rest strekkfasthet ved en 2,5 mm forlengelse og forlengelse ved brudd for å kunne sammenligne de forskjellige reseptenes duktile egenskaper.

Tabell 6-16: Eksperimentelle resultater for strekkbjelker.

Resept:	1 (REF)	2 (1,0% SF)	3 (1,5% SF)	4 (1,5% BF)	5 (3,0% BF)
Bruddlast 1 [kN]	32,07	27,31	32,42	34,83	37,09
Bruddlast 2 [kN]	28,11	30,15	33,91	26,41	31,98
Bruddlast gjennomsnitt [kN]	30,09	28,73	33,17	30,62	34,54
Forlengelse v/ brudd 1 [mm]	1,23	0,62	1,72	2,26	2,10
Forlengelse v/ brudd 2 [mm]	1,26	0,87	2,15	1,55	1,93
Forlengelse v/brudd gj.snitt [mm]	1,24	0,75	1,93	1,91	2,01
Areal 1 [mm²]	8736	8930	8930	-	8742
Areal 2 [mm²]	9216	8740	9025	-	8740
Strekkfasthet 1 [MPa]	3,67	3,06	3,63	3,48	4,24
Strekkfasthet 2 [MPa]	3,05	3,45	3,76	2,64	3,66
Strekkfasthet gj.snitt [MPa]	3,36	3,25	3,69	3,06	3,95
Restlast 2,5mm forlengelse 1 [kN]	0,00	5,50	15,00	22,50	7,00
Restlast 2,5mm forlengelse 2 [kN]	0,00	8,30	10,70	10,80	4,00
Restlast 2,5mm forlengelse gj.snitt [kN]	0,00	6,90	12,85	16,65	5,50
Rest strekkfasthet 2,5mm forlengelse 1 [MPa]	0,00	0,62	1,68	2,25	0,80
Rest strekkfasthet 2,5mm forlengelse 2 [MPa]	0,00	0,95	1,19	1,08	0,46
Rest strekkfasthet 2,5mm forlengelse gj.snitt [MPa]	0,00	0,78	1,43	1,67	0,63

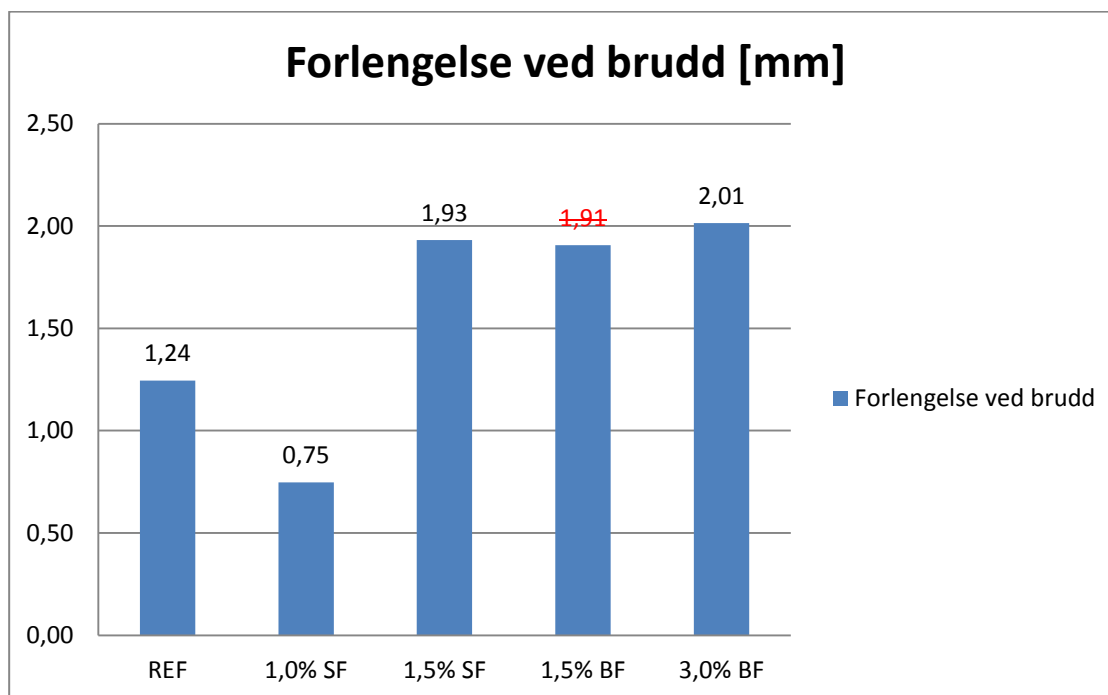
Som en kan se ut fra tabellen over, er det ikke stor forskjell på de forskjellige bruddlastene. Referanse ligger på ca 30kN, resepten med 1,0% stålfiber går litt ned, til ca 28kN, mens den øker til ca 33kN for resepten med 1,5% stålfiber. For resepten med 1,5% basaltfiber gikk bruddet ved de innstøpte boltene i begge bjelkene, istedenfor i den forhåndsdefinerte sprekk. Alle verdiene for denne resepten vil bli påvirket av dette, men bruddlasten anses som gyldig, og da også strekkfastheten, da bjelken ikke hadde gått til brudd rundt den forhåndsdefinerte sprekk enda, og det da tolkes som at tverrsnittet innenfor sprekk tålte denne lasten. Alle de andre bjelkene gikk til brudd på ønsket sted. De tilsagde tverrsnittene ble målt etter brudd for å få et mer nøyaktig tverrsnittsareal. Resepten med 1,5% basaltfiber

ble altså ikke målt, men det antas at tverrsnittet også her er mindre enn 100*100mm, slik at strekkfastheten egentlig er litt høyere enn det som er angitt i tabellen. Den største forskjellen mellom reseptene ligger i både forlengelse ved brudd og rest strekkfasthet. Strekkfasthet, rest strekkfasthet 2,5 mm og forlengelse ved brudd er angitt i Figur 52 og i Figur 53.



Figur 52: Strekkfasthet og rest strekkfasthet 2,5 mm.

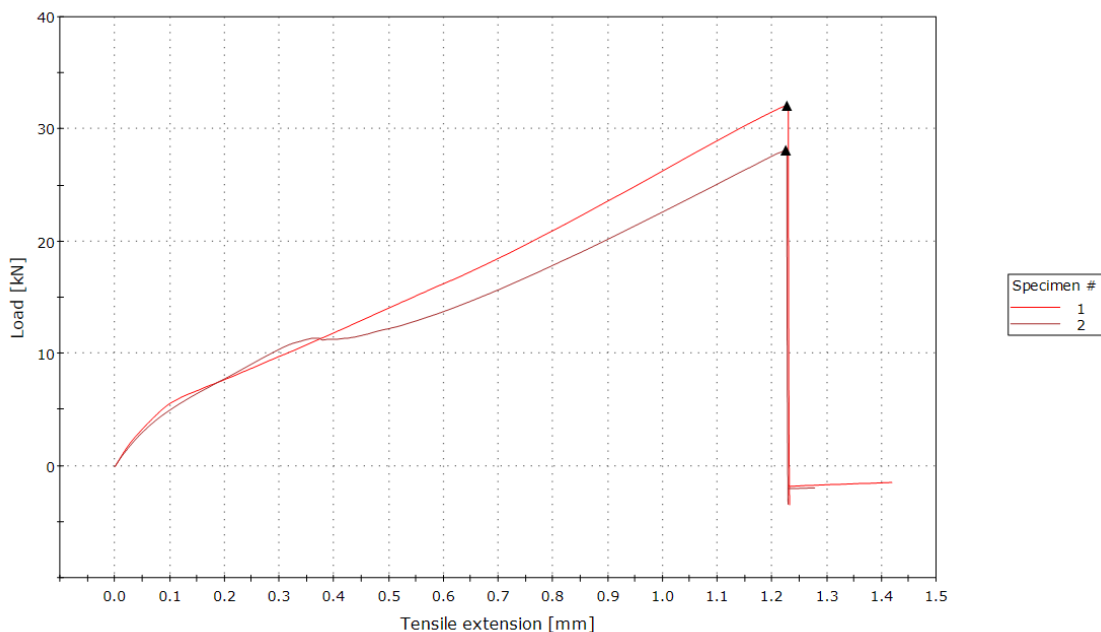
Som en ser fra figuren øker strekkfastheten med økt mengde fiber, selv om referanseblandingen har en høyere strekkfasthet enn både resept 2 og resept 4. Strekkfastheten og bruddlasten kan avhenge sterkt av sentreringen av prøvelegemene. Flere av bjelkene hadde litt skjevt innstøpte forankringer, og måtte derfor bøyes litt for å få de inn i testmaskinen. Dette kan være med på å påvirke resultatene. Rest strekkfasthet er også økende med økt fibermengde, om en ser bort fra resept 4, da disse verdiene som nevnt over anses som ugyldige. Resepten med 1,5% stålfiber har høyest rest strekkfasthet av samtlige resepter. Resepten med 3,0% basaltfiber har den høyeste strekkfastheten, men lavest rest strekkfasthet.



Figur 53: Forlengelse ved brudd.

Noe overaskende har resepten med 1,0% stålfiber mye mindre forlengelse ved brudd enn referansen. Resepten med 1,5% stålfiber har en forlengelse et stykke over referansen, noe som er forventet. Resepten med 1,5% basaltfiber har nesten like lang forlengelse som resepten med 1,5% stålfiber, men denne forlengelsen virker over et mye større område, ettersom denne resepten røk rundt forankringen. Resepten med 3,0% basaltfiber har den lengste forlengelsen ved brudd. Forlengelse ved brudd øker med økende mengde stålfiber. Selv om verdiene for forlengelse ved brudd for resepten med 1,5% basaltfiber er uklare, virker det som om bruddforlengelsen øker med økende mengde fiber også her.

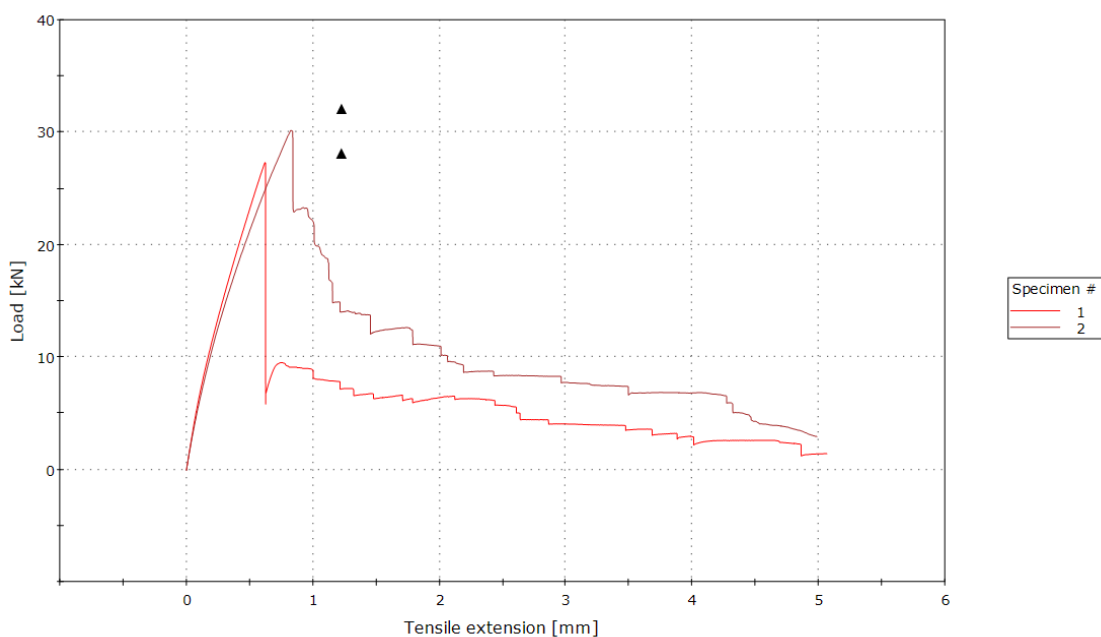
6.2.5.1. Resept 1 (REF)



Figur 54: Arbeidsdiagram strekk – resept 1.

Som en ser av Figur 54 faller lasten rett ned etter at bruddlast oppnås. Dette er fordi det ikke er noe fiber til å oppta kreftene.

6.2.5.2. Resept 2 (1,0%SF)

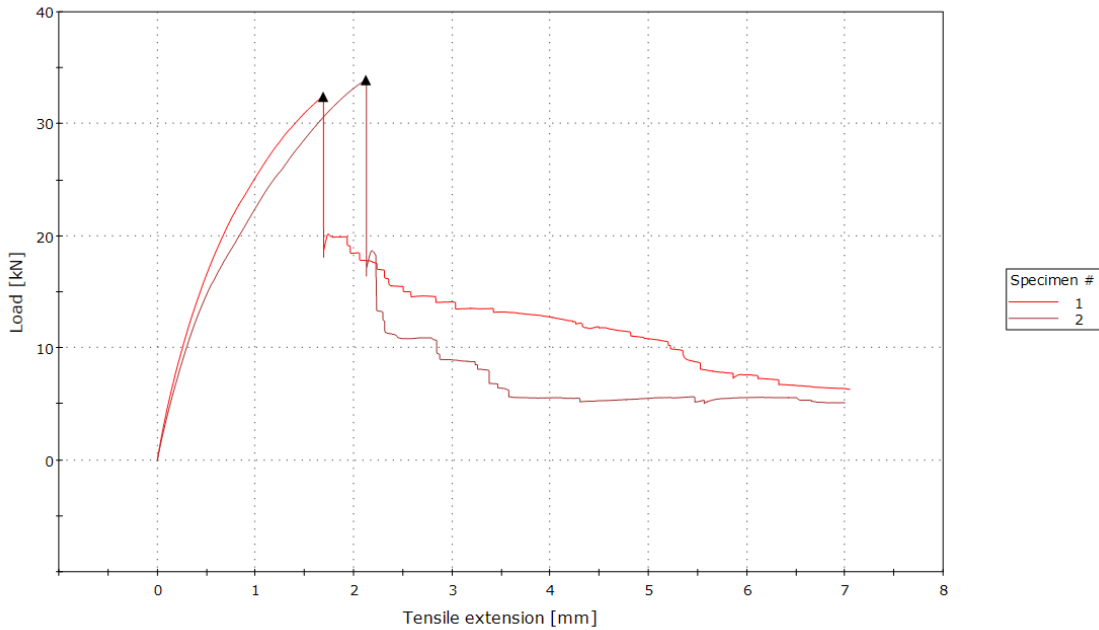


Figur 55: Arbeidsdiagram strekk – resept 2.

Begge bjelkene har et kraftig fall i lastnivå når bruddlasten nås, men fiberen begynner da å ta over kreftene, og en ser at kurvene etter det første lastfallet går jevnt forsiktig nedover med

økende forlengelse. En ser av figuren at kurvene har en slags «trappeform». Dette kan komme av at stålfiberene gir etter en etter en, og dermed får man et lite dropp i lastnivå.

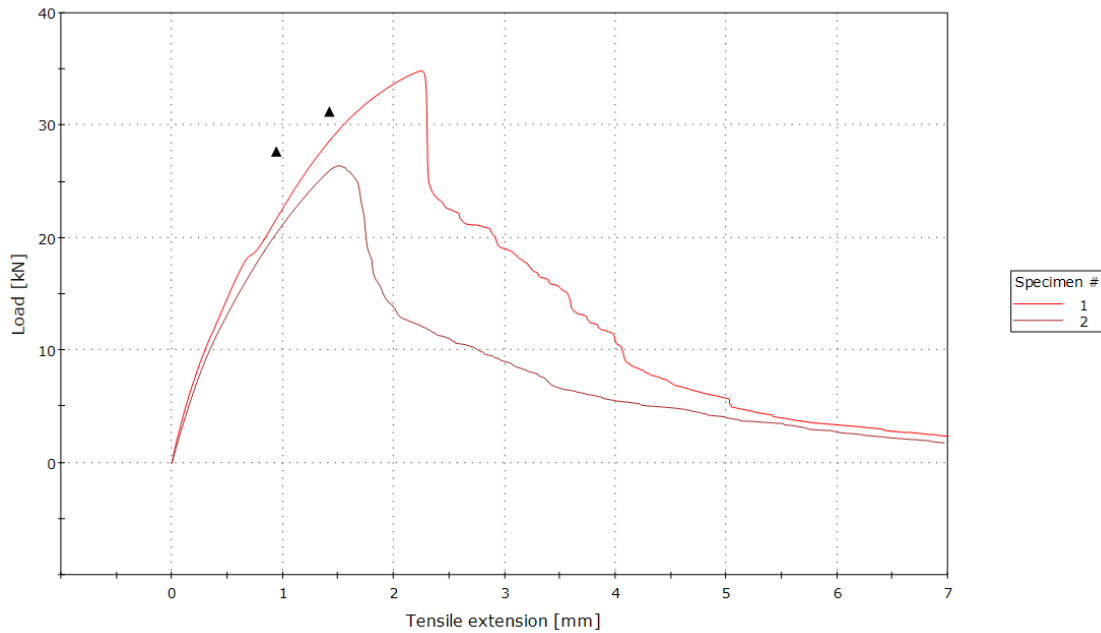
6.2.5.3. Resept 3 (1,5%SF)



Figur 56: Arbeidsdiagram strekk – resept 3.

En ser også i diagrammene for denne resepten et stort fall i last når bruddlast oppnås, men fallet er hakket lavere enn for resept 2. Det kommer også av dette diagrammet frem at når stålfiberene begynner å ta opp kreftene, jevner grafen seg ut, og kurven faller saktere med økt deformasjon. En ser også her at kurvene har en slags trappeform.

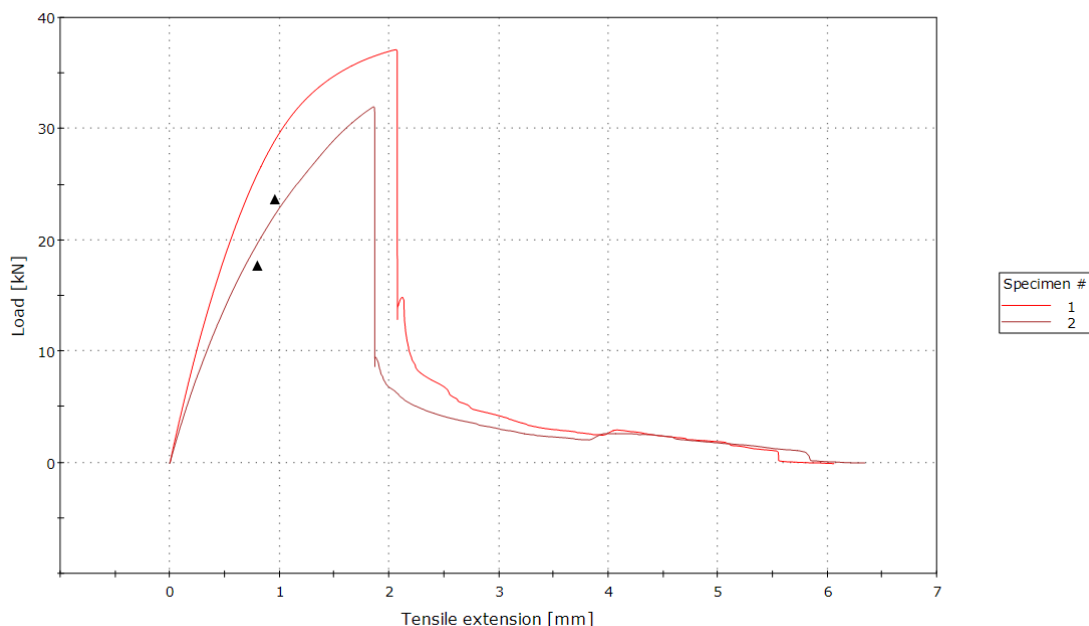
6.2.5.4. Resept 4 (1,5%BF)



Figur 57: Arbeidsdiagram strekk – resept 4.

Disse diagrammene har ikke et like kraftig fall som de foregående reseptene. Dette er mest sannsynlig fordi bruddet kom rundt forankringsboltene, og det ble observert at det bulte sakte ut rundt forankringen etter brudd. Diagrammene faller allikevel mot en lavere verdi mot slutten enn resept 3.

6.2.5.5. Resept 5 (3,0%BF)



Figur 58: Arbeidsdiagram strekk – resept 5.

En ser i disse diagrammene et kraftig fall i lastnivå ved oppnådd bruddlast. Dette fallet er mer dramatisk enn de vi har sett for resept 2 og 3. Etter lastfallet jevner kurven seg ut, men lasten går mot null før 7 mm forlengelse oppnås. Diagrammet er veldig annerledes enn diagrammet for resept 4, noe som som nevnt skyldes at bjelkene i resept 4 gikk til brudd ved de innstøpte boltene. Diagrammet for resept 4 var forventet å ligne mer på diagrammet over.

Ut fra resultatene fra alle arbeidsdiagrammene for strekk og fra Tabell 6-16 virker det som at tilsetning av stålfiber til betongen virker meget positivt inn på betongens duktile egenskaper. De duktile egenskapene til betongen forbedres også ved tilsetning av basaltfiber, men i mye mindre grad.

6.2.6. Rissutvikling v/last + bruddlast

Det forventes på forhånd at tilsetning av fiber vil øke risslasten og bruddlasten i forhold til referansebjelken, samt at det vil bli mindre riss i bjelkene med fiber. Det presenteres en tabell med resultater, samt en tegning med rissmønster for alle bjelkene.

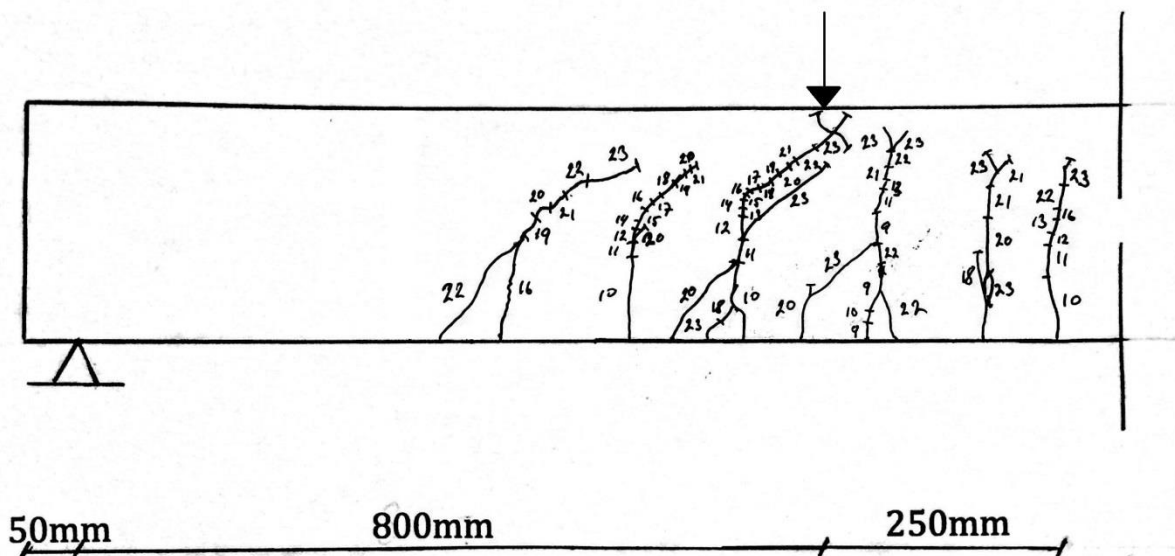
I Tabell 6-17 presenteres de eksperimentelle resultatene for de store bjelkene.

Tabell 6-17: Eksperimentelle resultater for store bjelker.

Bruddlast og risslast					
Resept:	REF	1,0% SF	1,5% SF	1,5% BF	3,0% BF
Risslast [kN]:	90	90	80	60	80
Bruddlast [kN]:	234,6	248,6	269,8	252,8	249,2
Bruddlast i forhold til REF [%]	REF	105,97	115,01	107,76	106,22

Som en ser av tabellen over øker bruddlasten med tilsetning av fiber. For stålfiber blir bruddlasten større med økende mengde fiber, mens den for basaltfiber holder seg relativt lik. Risslasten er lavere for bjelken med 1,5% stålfiber, og for begge bjelkene med basaltfiber. Dette kan ha sammenheng med at observasjonsevnene ble forbedret ettersom flere bjelker ble testet, og at riss derfor ble oppdaget tidligere. Usikkerhet rundt avlesningsmetoden gjør at risslasten tolkes som relativt lik for alle reseptene. Utstøpingen av bjelkene og kvaliteten på betongen kan også spille inn. Den beregnede risslasten er på 50,68 kN, og alle bjelkene har en høyere risslast enn dette. Det er selvfølgelig meget sannsynlig at det har oppstått mikroskopiske riss ved tidlige laster som ikke ble oppdaget. Bruddlasten ble beregnet til 160,15 kN, og samtlige bjelker ligger godt over dette.

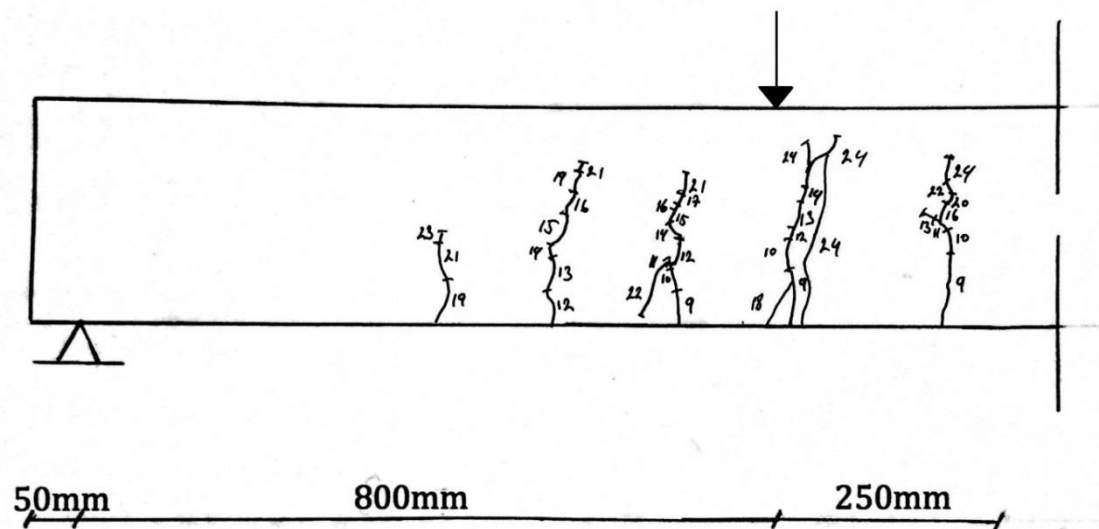
6.2.6.1. *Resept 1 (REF)*



Figur 59: Rissmønster bjelke 1.

Som en ser av Figur 59 oppstår det relativt mange riss i bjelken. Rissene er fordelt med en omtrentlig avstand tilsvarende avstanden mellom armeringsbøylene. Rissene i bjelken beveger seg skrått mot lasten. Første riss observeres ved en last på 90 kN. Det er ingen antydninger til skjærriss.

6.2.6.2. *Resept 2 (1,0%SF)*

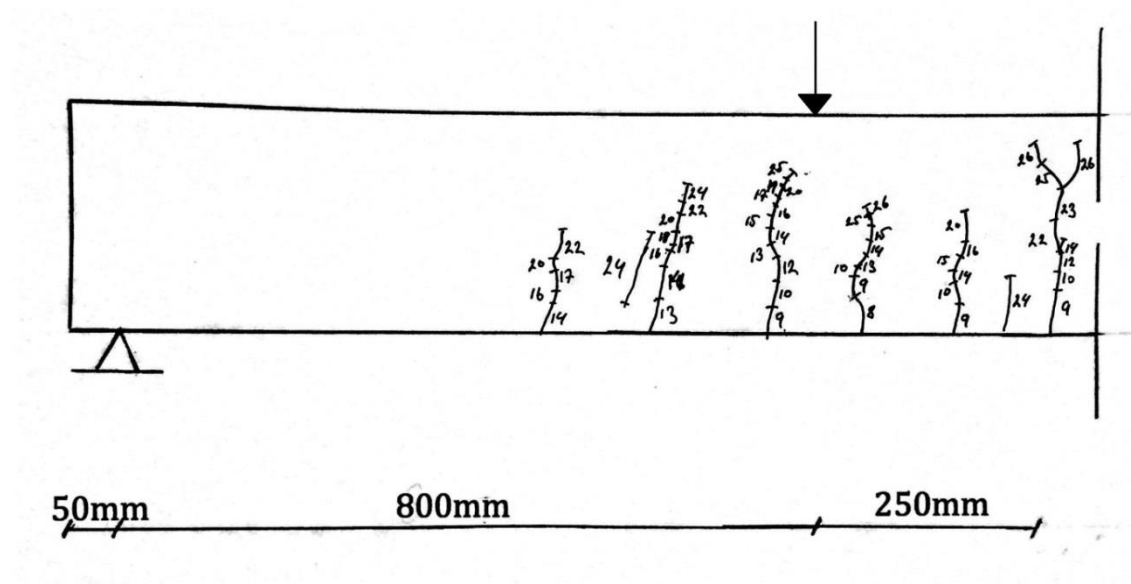


Figur 60: Rissmønster bjelke 2.

Som en ser av Figur 60 er det mye mindre riss i denne bjelken enn i bjelke 1. Dette kan ha sammenheng med at det fra tidligere resultater fremkommer at denne resepten har en høyere spaltestrekkfasthet enn referanseblandingen. Rissene beveger seg også mye rettere oppover enn rissene i bjelke 1. Fordelingen av rissene er tilsvarende som i bjelke 1, altså med en

avstand tilsvarende avstanden mellom armeringsbøylene. Første riss oppdages ved samme lastnivå som på referansebjelken, altså ved 90kN. Det er heller ikke her antydninger til skjærriss.

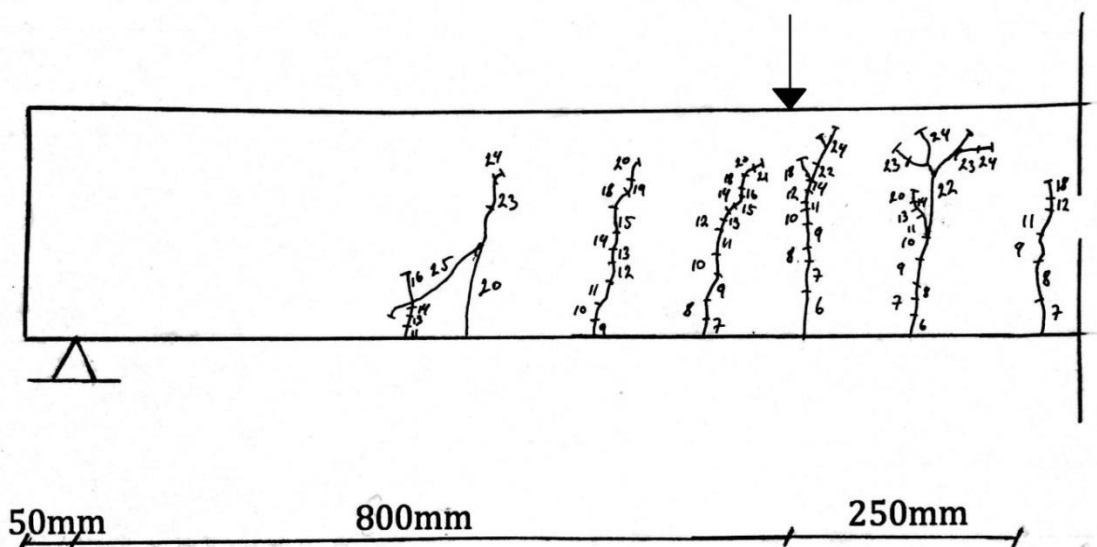
6.2.6.3. Resept 3 (1,5%SF)



Figur 61: Rissmønster bjelke 3.

Også i denne bjelken er det mindre riss enn i bjelke 1. Rissene beveger seg som i bjelke 2 relativt rett oppover. Fordelingen av rissene er som for bjelke 1 og 2. Første riss oppdages ved 80 kN, noe som er tidligere enn for bjelke 1 og 2. Ut fra resultatene fra spaltestrekprøvingen hadde denne resepten den høyeste spaltestrekfastheten, og det var derfor forventet at riss ville oppstå senere i denne bjelken, noe som viste seg å ikke stemme. Ingen antydninger til skjærriss.

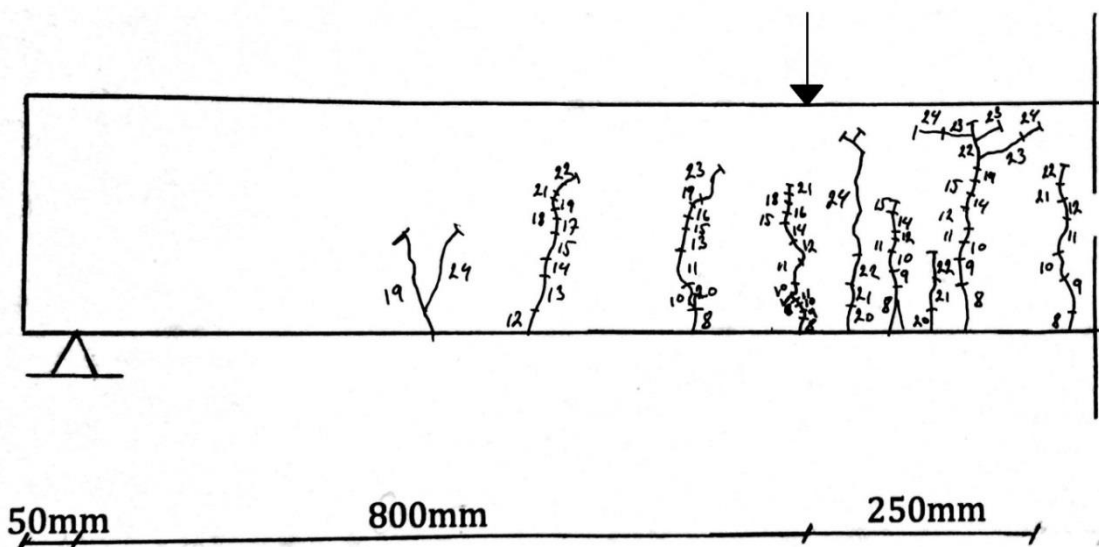
6.2.6.4. Resept 4 (1,5%BF)



Figur 62: Rissmønster bjelke 4.

Det er i denne bjelken mer riss enn i begge bjelkene med stålfiber. Rissmengden er omtrent tilsvarende som for bjelke 1. Første riss oppdages ved en last på 60 kN, noe som er den laveste lasten av samtlige bjelker. Det var under spaltestrekkprøvingen denne resepten som hadde lavest spaltestrekkfasthet av samtlige resepter, så det stemmer godt at denne bjelken også har lavest risslast. Rissene beveger seg relativt rett oppover. Det ble observert under testing at selv om det er flere riss, var de mye smalere enn rissene i de foregående bjelkene. Rissfordelingen er som på bjelke 1,2 og 3. Det er heller ikke her antydninger til skjærriss.

6.2.6.5. Resept 5 (3,0%BF)



Figur 63: Rissmønster bjelke 5.

Rissene i denne bjelken er reeltivt like som i bjelke 4. Første riss oppdages ved et lastnivå på 80 kN, tilsvarende som for bjelke 3. Spaltestrekkfastheten til denne resepten ligger på nivå med resept 2, og er høyere enn resept 4. Det stemmer derfor godt at første riss oppdages litt senere enn i bjelke 4. Rissene beveger seg ganske rett oppover. Fordelingen er lik som i alle foregående bjelker, men det oppstår ved høyere laster noe riss mellom hovedrissene. Det ble som for bjelke 4 observert at rissene i denne bjelken var mye smalere enn for bjelke 1,2 og 3. Ingen antydninger til skjærriss.

7. Konklusjon

Følgende konklusjoner blir tatt på grunnlag av resultatene fra prøving av fersk og herdet betong:

1. Den ferske betongen blir påvirket av fiber ved at støpeligheten forverres med økende fibermengde. Densiteten påvirkes i liten grad, men den øker litt med økende mengde stålfiber, og minker litt med økende mengde basaltfiber. Luftinnholdet øker med økende fibermengde.
2. Trykkfastheten påvirkes ikke av tilsetning av fiberarmering. Det ble observert under testing at terningene med fiber holdt mer sammen etter brudd, mens terningene fra referanseblandingen hadde et mer eksplosjonsartet brudd.
3. Spaltestrekkfastheten øker med økende dosering stålfiber. Basaltfiber forbedrer ikke spaltestrekkfastheten ved lav dosering, men en ser en forbedring ved en dosering på 3,0%.
4. Av arbeidsdiagrammene for trykk kommer det frem at reseptene med stålfiber har mer motstand etter brudd enn reseptene med basaltfiber, selv om både stålfiber og basaltfiberreseptene har mer motstand etter brudd enn referanseblandingen.
5. Bøystrekkfastheten øker med økende fibermengde. Det samme gjelder rest bøystrekkfasthet. Resultatene viser at reseptene med stålfiber har mye mer duktile egenskaper enn reseptene med basaltfiber. Dette vises ved at reseptene med stålfiber har mye høyere bruddenergi, lavere brittleness number og høyere karakteristisk lengde enn reseptene med basaltfiber. Basaltfiberreseptene gir bedre resultater enn referanseblandingen.
6. Arbeidsdiagrammene for strekk viser at økende fibermengde gir økende strekkfasthet og rest strekkfasthet ved 2,5mm forlengelse. Resultatene fra disse prøvene viser også at stålfiber gir betongen bedre duktile egenskaper enn basaltfiber. Forlengelse ved brudd øker med økende mengde stålfiber. Det antas at det samme gjelder for basaltfiber.
7. Prøving av de store bjelkene viser at det er et redusert antall riss i bjelkene med stålfiber. Bjelkene med basaltfiber har omtrent like mye riss som referansebjelken, men det observeres under testing at disse er mye smalere. Risslasten holder seg relativt jevn. Bruddlasten øker ved tilsetning av fiber.

8. Feilkilder

- Fuktinnholdet i tilslaget varierte veldig, blant annet på grunn av variasjoner i været. Det var vanskelig å få målt en nøyaktig verdi på fukten. Dette kan derfor virke inn på betongens v/c tall.
- Under prøving av bøyestrekfasthet var det på forhånd lite kunnskap om prøveprogrammet. Det var derfor vanskelig å endre utdata og akseverdier i etterkant. W_f areal under graf, er derfor regnet for hånd.
- Under prøving av strekkbjelkene måtte noen av forankringsboltene bøyes inn i maskinen, da disse var støpt skjevt inn i bjelken. Dette kan påvirke resultatene.

9. Figurliste

Figur 1 : Det tredje fyrhuset på Eddystoneklippene.....	9
Figur 2: Noen bygg med høyfast betong i USA.....	10
Figur 3: Siktekurve.....	14
Figur 4: Kornformdiagram etter stenglighet og flisighet.	15
Figur 5 : Filler effekt av silikastøv	18
Figur 6: Produksjon av sement.....	20
Figur 7: Forskjellige former på fiberarmering	24
Figur 8: Beregningsmodell, momentkapasitet.	30
Figur 9: spennings- og tøyingsfordeling for rektangulært tverrsnitt av fiberarmert betong utsatt for ren bøyning.	33
Figur 10: Uopprisset tverrsnitt, bøyning.	37
Figur 11: Lastifelle stor bjelke.	39
Figur 12: Tvangsblander brukt i oppgaven.	40
Figur 13: Synkmåling.....	41
Figur 14: Luftmåler	43
Figur 15: Til venstre: nominelle størrelser på terninger. Til høyre: støpeform for terninger... 44	
Figur 16: Til venstre: nominelle størrelser på sylindere. Til høyre: støpeform for sylindere. ... 45	
Figur 17: Lagring av sylindere.	45
Figur 18: Til venstre: nominelle størrelser på små bjelker/prismer. Til høyre: støpeform for bjelker til CMOD.	46
Figur 19: Til venstre: støpeform for bjelker til strekktesting. Til høyre: forankringsbolter. ... 46	
Figur 20: Prosedyre for å fylle formen på små bjelker.	46
Figur 21: Til venstre: støpeform stor bjelke. I midten: halvfylt stor bjelke. Til høyre: ferdig støpt stor bjelke	47
Figur 22: Armeringstegning stor bjelke.	47
Figur 23: Tilfredstillende bruddform for terningformede prøvelegemer.	51
Figur 24: Til venstre: skjematisk tegning av jigg. Til høyre: Jigg brukt i oppgaven.	52
Figur 25: Sylindere med pålimte strekkklapper.	54
Figur 26: Posisjonen til den forhåndsdefinerte sprekken.	55
Figur 27: Prinsipp for måling av CMOD.	56
Figur 28: Last-CMOD diagram og F_j ($j = 1, 2, 3, 4$).....	57
Figur 29: Reell og antatt spenningsfordeling.	57
Figur 30: Illustrasjon av relasjonen mellom karakteristisk rest bøyestrekfasthet og karakteristisk rest strekkfasthet.	59
Figur 31: Til venstre: Betongsag. Til høyre: Strekkmaskin.	61
Figur 32: Skjematisk tegning av strekkbjelke brukt i oppgaven.	61
Figur 33: Til venstre: Velde 8-16mm. Til høyre: Velde 16-22mm.....	63
Figur 34: Til venstre: Stålfiber. Til høyre: Basaltfiber.....	64
Figur 35: Synkmål.....	65
Figur 36: Densitet.....	66
Figur 37: Luft.	67
Figur 38: Trykkfasthet.....	69

Figur 39: Spaltestrekkfasthet (gjennomsnitt av to prøvestykker)	70
Figur 40: Sylindertest spaltestrekkfasthet	71
Figur 41: Arbeidsdiagram trykk	72
Figur 42: E-modul	74
Figur 43: Bruddeformasjon	74
Figur 44: Last-CMOD diagram resept 1 (REF)	75
Figur 45: Last-CMOD diagram resept 2 (1,0%SF)	76
Figur 46: Last-CMOD diagram resept 3 (1,5%SF)	77
Figur 47: Last-CMOD diagram resept 4 (1,5%BF)	78
Figur 48: Last-CMOD diagram resept 5 (3,0%BF)	79
Figur 49: Bruddenergi	80
Figur 50: Karakteristisk lengde	81
Figur 51: Brittleness number	82
Figur 52: Strekkfasthet og rest strekkfasthet 2,5 mm	84
Figur 53: Forlengelse ved brudd	85
Figur 54: Arbeidsdiagram strekk – resept 1	86
Figur 55: Arbeidsdiagram strekk – resept 2	86
Figur 56: Arbeidsdiagram strekk – resept 3	87
Figur 57: Arbeidsdiagram strekk – resept 4	88
Figur 58: Arbeidsdiagram strekk – resept 5	89
Figur 59: Rissmønster bjelke 1	91
Figur 60: Rissmønster bjelke 2	91
Figur 61: Rissmønster bjelke 3	92
Figur 62: Rissmønster bjelke 4	93
Figur 63: Rissmønster bjelke 5	94

10. Referanser

- [1] P. Jahren, *Betong - Historie og historier*. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag, 2011, p. 390.
- [2] PCA, “High-Strength Concrete,” *High-Strength Concrete*, 2014. [Online]. Available: <http://www.cement.org/cement-concrete-basics/products/high-strength-concrete>. [Accessed: 24-Apr-2014].
- [3] P.-C. Aitcin, *High-performance concrete*. London: E & FN Spon, 1998, p. 591.
- [4] B. Søpler, *Betongboka*. Gyldendal Undervisning, 2004, p. 318.
- [5] NTNU, *TKT 4215 Concrete Technology 1*. Trondheim: NTNU, 2013.
- [6] P. Gjerp, M. Opsahl, and M. Smeplass, *Grunnleggende betongteknologi*. Byggenæringens Forlag, 2009, p. 191.
- [7] Wikipedia, “Pozzolan,” *Pozzolan*, 2014. [Online]. Available: <http://no.wikipedia.org/wiki/Pozzolan>. [Accessed: 28-Apr-2014].
- [8] COIN, “Forslag til retningslinjer for dimensjonering, utførelse og kontroll av fiberarmerte betongkonstruksjoner,” 2011.
- [9] ReforceTech, “Chopped basalt fibre,” 2013.
- [10] Mapei, “Mapei pp-fiber m6.” [Online]. Available: http://www.mapei.com/public/NO/products/PP-fiber M6_no.pdf. [Accessed: 19-May-2014].
- [11] S. N. Leksikon, “glassfiber,” *Glassfiber*. 2014.
- [12] G. Produkter, “Fiber betong - GBS Produkter.” [Online]. Available: <http://www.gbsprodukter.no/sider/tekst.asp?side=100&valgtmenypunkt=97>. [Accessed: 19-May-2014].
- [13] S. N. Leksikon, “duktilitet,” *Duktilitet*. 2014.
- [14] B. O. Encyclopedia, “ductility (physics),” *ductility (physics)*. 2014.
- [15] S. N. Leksikon, “bruddmekanikk,” *Bruddmekanikk*. 2014.
- [16] N. Standard, “NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008 Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner. Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger,” 2004.
- [17] K. T. Fosså, “Ductility in LWA concrete,” 2013.

- [18] J. Sliper and P. A. Dahl, "Bruddenergi ved 3-punkts bøyning av prismer med kjerv," 1996.
- [19] T. B. Aulia, "Strain Localization and Fracture Energy of High-Strength Concrete under Uniaxial Compression."
- [20] J.P.Ulfkjær, M. S. Henriksen, and B. Aarup, "Fracture behaviour of reinforced ultra high strength concrete beams with stirrups."
- [21] S. I. Sørensen, *Betongkonstruksjoner*. 2009, p. 289.
- [22] N. Standard, "NS-EN 12350-2 Prøving av fersk betong Del 2 : Synkmål," 2000.
- [23] N. Standard, "NS-EN 12350-6 Prøving av fersk betong Del 6: Densitet," 2000.
- [24] N. Standard, "NS-EN 12350-7 Prøving av fersk betong Del 7: Luftinnhold Trykkmetoder," 2000.
- [25] N. Standard, "NS-EN 12390-2 Prøving av herdnet betong Del 2: Støping og herdning av prøvelgemer for fasthetsprøving," 2001.
- [26] Norsk Standard, "NS-EN 14651:2005+A1:2007 Prøvningsmetode for betong med metalliske fibre. Måling av bøyestrekfasthet (proporsjonalitetsgrense og restfastheter)," 2007.
- [27] N. Standard, "NS-EN 12390-3 Prøving av herdnet betong Del 3: Prøvelegemets trykkfasthet," 2002.
- [28] N. Standard, "NS-EN 12390-6 Prøving av herdnet betong Del 6: Prøvelegemers spaltstrekfasthet," 2001.

11. Tabelliste

Tabell 1-1 Markedsandeler plasiserende midler 1996-2006	12
Tabell 1-2: Sikterest og gjennomgang	14
Tabell 1-3 Typisk sammensetning av Portlandklinker	22
Tabell 1-4 De fire hovedfasene i Portlandklinker	22
Tabell 1-5: Fasthetsklasser	23
Tabell 2-1: verdi for α for B20-B95.	32
Tabell 2-2: Verdi av K.	32
Tabell 3-1: Prøveplan	40
Tabell 4-1: Forhold mellom CMOD og nedbøyning.	60
Tabell 5-1: Resepter.	64
Tabell 6-1: Eksperimentelle resultater for fersk betong.	65
Tabell 6-2: Eksperimentelle resultater for trykkfasthet 3 døgn.	68
Tabell 6-3: Eksperimentelle resultater for trykkfasthet 7 døgn.	68
Tabell 6-4: Eksperimentelle resultater for trykkfasthet 28 døgn.	68
Tabell 6-5: Eksperimentelle resultater for spaltestrekfasthet.	70
Tabell 6-6: Herdetid.	73
Tabell 6-7: Eksperimentelle resultater arbeidsdiagram – trykk.	73
Tabell 6-8: Eksperimentelle resultater bøyestrekfasthet resept 1.	75
Tabell 6-9: Eksperimentelle resultater bøyestrekfasthet resept 2.	76
Tabell 6-10: Eksperimentelle resultater bøyestrekfasthet resept 3.	77
Tabell 6-11: Eksperimentelle resultater bøyestrekfasthet resept 4.	78
Tabell 6-12: Eksperimentelle resultater bøyestrekfasthet resept 5.	79
Tabell 6-13: Eksperimentelle resultater bruddenergi.	80
Tabell 6-14: Eksperimentelle resultater karakteristisk lengde.	81
Tabell 6-15: Eksperimentelle resultater brittleness number.	82
Tabell 6-16: Eksperimentelle resultater for strekkbjelker.	83
Tabell 6-17: Eksperimentelle resultater for store bjelker.	90

12. Vedlegg

Vedlegg datablader.....	103
Dynamon SX-N superplastiserende tilsetningstoff.....	103
Norcem Anleggsement FA.....	105
Stålfiber krampeharex DE 60/1,0 NZ.....	107
Basaltfiber Reforcetech chopped basalt fibres.....	110
Siktekurver.....	112
Siktekurve 0-8.....	112
Siktekurve Velse 8-16.....	113
Siktekurve Velde 16-22.....	114
Vedlegg proporsjonering.....	115
Vedlegg testverdier.....	120
Terning trykkfasthet.....	120
Spaltestrekkfasthet.....	122
Arbeidsdiagram strekk.....	123
Arbeidsdiagram trykk.....	128
Store bjelker.....	129
Bøyestrekkfasthet.....	130
Bøyestrekkfasthet kurver.....	131

Vedlegg datablader

Dynamon SX-N superplasterende tilsetningsstoff



PRODUKTBEKRIVELSE

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

Produktet tilhører Dynamonsystemet basert på den Mapeiutviklede 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:

- Vann tett betong med krav til høy eller svært høy fasthet og med strenge krav til bestandighet i aggressive miljøer.
- Betong med særlige krav til høy støpelighet; i konsistensklasser S4 og S5 etter NS-EN 206-1.
- Selvkompimerende betong med ønske om lengre åpenhet. Om nødvendig kan SKB stabiliseres med en viskositetseeker - **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.

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

EGENSKAPER

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

Denne effekten kan prinsipielt uttrykkes 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 styrkningsretarderende stoffer som **Mapetard**. Produktet lar seg også kombinere med luftinnførende tilsetningsstoffer, **Mapeair**, for produksjon av frostbestandig betong.





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

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 bevarer 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 korvensjonelle 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.

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

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.

VERNILTAK

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	
Alkaliinnhold (Na ₂ O-ekvivalenter) %:	< 2,0	
BRUKSEGSKAPER I BETONG		
<i>Som vannreducerende stoff (ik konsistens) T 3.1</i>		
Sementmengde kg/m ³ (Norcem standard)	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt)	0	1,0
Masseforhold (w/c-tall)	0,51	0,41
Vannreduksjon (%)	-	20
Trykkfasthet (i 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 (i % 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



Norcem Anleggsement FA



WWW.NORCEM.NO

Tekniske data
 Norcem Anleggsement FA tilfredsstiller kravene til Portland flyvesteement.
 NS-EN 197-1-CEM III/A-V 42,5 N

Kjemiske data

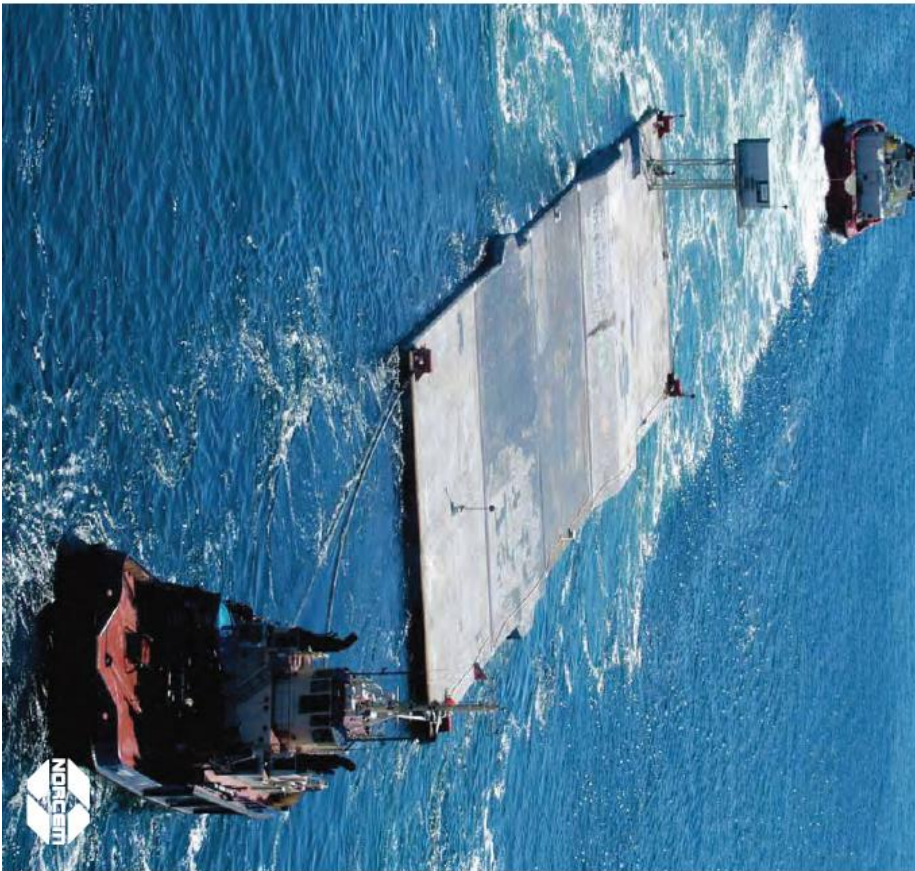
Egenskap	Rechningsgjennomsnittlige verdier	Krav ifølge NS-EN 197-1
Pinhet (blåne)	390 m ² /kg	
Alkali (økv Na ₂ O+K ₂ O) %	0,6 %	
Flyvesteinnhold sulfat (SO ₃)	1,7%	6 - 20%
	2,7%	≤ 2 - 3 %
Klorid	< 0,085 %	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁺⁺	< 2ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt	2,99 kg/dm ³	

*Alkali innhold i blånene

Praktiske data

Egenskap	Rechningsgjennomsnittlige verdier	Krav ifølge NS-EN 197-1
Trykkfasthet 1 døgn	15 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	24 MPa	≥ 10 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	37M Pa	
Trykkfasthet 28 døgn	55 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende blindetid	165 min	≥ 60 min
Ekspansjon	1mm	≤ 10 mm

Oppdatert teknisk datablad – 08/2023



TEKNISK DATABLAD
 Anleggsement FA

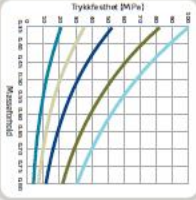


Norcem Anleggsmentent FA er en spesialsement for anleggskonstruksjoner. Sementen kan brukes i alle eksponerings-, bestandighets- og fasthetsklasser. Den er spesielt tilpasset norske forhold for bruk i bestandighetsklasse M45 og M1-F45 eller strengere. Sementen er godt tilpasset for bruk i konstruksjoner med krav til høy sluttfasthet. Anleggsmentent FA kan benyttes i kombinasjon med alkalireaktivt tilslag. Sementen har relativt lav varmekvikling og er velegnet for bruk i massive konstruksjoner. Sementen har meget gode støpeegenskaper.



ANLEGGSEMENT FA

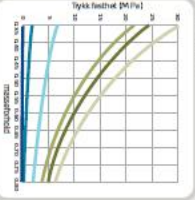
Fasthetsubvikling



Figur 1

Fasthetsubvikling
Fasthetsubvikling er en sentral egenskap for planlegging, styring og utførelse av alle betongarbeider. Fasthetsubviklingen er avhengig av sementtype, masseforhold, herdebetingelser (temperatur, tid og fuktighet) og eventuell bruk av tilsætningsmaterialer eller -stoffer. I figur 1 er vist trykkestyrkeubviklingen som funksjon av masseforhold og alder ved 20°C varmlagring for betong med Norcem Anleggsmentent FA.

Tidligfasthet



Figur 2

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

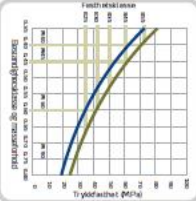
Fasthetsklasse – masseforhold

Med normal, god styring av betongproduksjonen er det behov for en overhøyde på ca. 5 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermåler. Anleggsmentent FA gir følgende retningsegvendte verdier for største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftforfaring.

Fasthetsklasse	B30	B35	B45	B55
Største masseforhold	0,57	0,52	0,45	0,38
Største masseforhold med 5% silika				0,40

Tabell 2

Bestandighetsklasse



Figur 3

Motstand mot alkalireaksjoner
Norcem Anleggsmentent FA kan brukes sammen med alkalireaktivt tilslag. Sementen kommer inn under regel 4.2 (2008-05-28 Addendum) i Norsk Betongforenings publikasjon 21 samt Vedlegg C (Rev 6) til publikasjonen (se www.betong.no). Sementen lages med klinker inneholdende 0,6% Na₂O_{eq}. Alkalier fra hygieneken uelates ved beregning av ekvivalent alkali innhold pr m³ betong. Siden sementen inneholder minimum 17% bygseske, regnes ekvivalent alkali innhold pr m³ betong fra Anleggsmentent FA ut på følgende måte:

$$Na_2O_{eq} \text{ (kg/m}^3\text{)} = \text{Sementmengde (kg/m}^3\text{)} \cdot 0,006 \cdot 1,0 \cdot 1,17$$

Maksimalt tillatt Na₂O_{eq} innhold iht. NB 21 er 3,0 kg/m³ betong.

Bestandighetsklasse

NS-EN 206-1 klassifiserer betongens miljøpåvirkning i eksponeringsklasser. I nasjonalt tillegg til denne standarden er de ulike eksponeringsklassene gruppert i seks bestandighetsklasser med krav til betongens maksimale masseforhold (se tabell 3). Tabell 2 viser anbefalt kombinasjoner av bestandighets- og fasthetsklasser. Retningsegvendte 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 varslingsbrev forfattersket av ulike produktionsforutsetninger. Figuren gjelder for Anleggsmentent FA uten luftforfaring.

Anbefalte kombinasjoner

Bestandighetsklasse M45	Fasthetsklasse B35 eller høyere
Bestandighetsklasse M40	Fasthetsklasse B45 eller høyere
Starens vegvesen SV/40	Fasthetsklasse B45 eller høyere
Starens vegvesen SV/30	Fasthetsklasse B45 eller høyere

Tabell 2

Stålfiber krampeharex DE 60/1,0 NZ



Stahlfasern | steel fibres



Datenblatt | Data Sheet

Übersicht | Overview

KrampeHarex® Stahldrahtfaser mit Endverankerung | steel wire fibre with hooked ends

Bei der Herstellung von Drahtfasern werden Drähte verschiedener Durchmesser und Festigkeiten, je nach gewünschtem Stahlfasertyp, durch zwei gegenläufige Walzen geführt. Hierbei werden je nach verwendetem Segment auf den Walzen die Drähte in ihre spezielle Form gebogen und auf Länge geschnitten. KrampeHarex Stahldrahtfasern werden standardmäßig in 30 mm, 45 mm, 50 mm und 60 mm Länge hergestellt. Die Drahtdurchmesser liegen zwischen 0,5 mm und 1,2 mm. Zur Verankerung in der Betonmatrix besitzen sie entweder Endhaken oder sind über die gesamte Länge gewellt. Die Wahl der jeweiligen Fasertypen wird durch den Anwendungsfall bestimmt. Es gilt jedoch je länger und dünner Drahtfasern sind, desto schwerer sind sie zu dosieren und zu verarbeiten. Da Schlankheiten (Länge/Durchmesser) von mehr als 60 nur mit zusätzlichen Maßnahmen, wie zum Beispiel Einblasgeräten zu dosieren sind, haben sich im üblichen Industriebodenbau und Wohnungsbau die Fasertypen DE 50/1,0 N und DE 60/1,0 N bewährt. Bei höheren Betongütern müssen auch die Festigkeiten der Stahlfasern erhöht werden. Hier können mittelfeste (z.B. DE 60/1,0 M) oder hochfeste Fasern eingesetzt werden (z.B. DE 60/1,0 H) werden. Drahtfasern sind in der Lage Risse zu überbrücken und so Kräfte von Rissufer zu Rissufer zu übertragen. Der Stahlfaserbeton mit Drahtfasern ist duktil und kann im gerissenen Zustand noch Kräfte aufnehmen.



For manufacturing wire fibres, wires of different diameters and strengths according to the desired type of steel fibre are passed through two rollers working in opposite direction. Depending on the segment used on the rollers, the wires are bent to their specific form and cut to length in the course of this operation. KrampeHarex steel wire fibres are normally manufactured in lengths of 30 mm, 45 mm, 50 mm and 60 mm. The wire diameters range from 0.5 mm to 1.2 mm. For anchorage in the concrete matrix, they either possess hooked ends or are corrugated over the whole length. The selection of the respective type of fibre depends on the case of application. However, the longer and thinner the wire fibres, the more difficult they are to be dosed and worked. As aspect ratios (length/diameter) over 60 may only be dosed by means of additional measures, such as injection devices, the fibre types DE 50/1.0 N and DE 60/1.0 N have proved successful in conventional industrial flooring and house building. When using superior concrete grades, also the strengths of the steel fibres should be increased. In this case, fibres of medium strength (e.g. DE 60/1.0 M) or high strength (e.g. DE 60/1.0 H) may be used. Wire fibres are able to bridge cracks, and thus to transmit forces from one crack edge to the other. Concrete reinforced by wire fibres is characterised by ductility and may even accept forces after cracking.



KrampeHarex® GmbH & Co. KG · Pferdekaamp 6-8 · 59075 Hamm · Germany
Phone +49 (0)23 81 · 977 977 · Fax +49 (0) 23 81 · 977 955 · www.krampeharex.com · info@krampeharex.com

KrampeHarex® CZ spol. s.r.o. · Osvořocení 234 · 664 81 Ostrovačice · Czech Republic
Phone +42 (0) 549 · 245 064 · Fax +42 (0) 0549 · 245 065 · www.krampeharex.cz · info@krampeharex.cz

KrampeHarex® Fibrin Gesellschaft mbH & Co. KG · Lindengasse 20 · 4040 Linz · Austria
Phone +43 (0) 732 731 011 · Fax +43 (0) 732 · 731 011 73 · www.krampefibrin.com · info@krampefibrin.com



Bezeichnung Name	Länge Length (mm)	Durchmesser Diameter (mm)	Querschnitt Cross section	Form Shape	Material Material	Werkstoff-Nr. Material-No.	Zugfestigkeit Tensile strength (N/mm ²)
DE 60/1,0 N DE 60/1,0 M DE 60/1,0 H	60 ±10%	1,00 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1100 ±15% 1400 ±15% 2400 ±15%
DE 60/0,8 N DE 60/0,8 M DE 60/0,8 H	60 ±10%	0,80 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 60/0,6 N DE 60/0,6 M DE 60/0,6 H	60 ±10%	0,60 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 50/1,0 N DE 50/1,0 M DE 50/1,0 H	50 ±10%	1,00 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1100 ±15% 1400 ±15% 2400 ±15%
DE 50/0,8 N DE 50/0,8 M DE 50/0,8 H	50 ±10%	0,80 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 50/0,6 N DE 50/0,6 M DE 50/0,6 H	50 ±10%	0,60 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 45/1,0 N DE 45/1,0 M DE 45/1,0 H	45 ±10%	1,00 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1100 ±15% 1400 ±15% 2400 ±15%
DE 45/0,8 N DE 45/0,8 M DE 45/0,8 H	45 ±10%	0,80 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 35/0,8 N DE 35/0,8 M DE 35/0,8 H	35 ±10%	0,80 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 35/0,6 N DE 35/0,6 M DE 35/0,6 H	35 ±10%	0,60 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 35/0,5 N DE 35/0,5 M DE 35/0,5 H	35 ±10%	0,50 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 30/0,8 N DE 30/0,8 M DE 30/0,8 H	30 ±10%	0,80 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1200 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 30/0,6 N DE 30/0,6 M DE 30/0,6 H	30 ±10%	0,60 ±10%	rund round	—	C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%

KrampeHarex® GmbH & Co. KG · Pferdekamp 6-8 · 59075 Hamm · Germany
Phone +49 (0)23 81 · 977 977 · Fax +49 (0) 23 81 · 977 955 · www.krampeharex.com · info@krampeharex.com




KrampeHarex® CZ spol. s r.o. · Osvočená 234 · 664 81 Ostrovačice · Czech Republic
Phone +42 (0) 549 · 245 064 · Fax +42 (0) 0549 · 245 065 · www.krampeharex.cz · info@krampeharex.cz

KrampeHarex® Fibrin Gesellschaft mbH & Co. KG · Lindengasse 20 · 4040 Linz · Austria
Phone +43 (0) 732 731 011 · Fax +43 (0) 732 · 731 011 73 · www.krampefibrin.com · info@krampefibrin.com



Stahlfasern | steel fibres



Bezeichnung Name	Länge Length (mm)	Durchmesser Diameter (mm)	Querschnitt Cross section	Form Shape	Material Material	Werkstoff-Nr. Material-No.	Zugfestigkeit Tensile strength (N/mm ²)
DE 30/0,5 N DE 30/0,5 M DE 30/0,5 H	30 ±10%	0,50 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 25/0,6 N DE 25/0,6 M DE 25/0,6 H	25 ±10%	0,60 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%
DE 25/0,5 N DE 25/0,5 M DE 25/0,5 H	25 ±10%	0,50 ±10%	rund round		C7D C9D C38D	1.0313 1.0304 1.0516	1250 ±15% 1550 ±15% 2400 ±15%

KrampeHarex® GmbH & Co. KG · Pferdekaamp 6-8 · 59075 Hamm · Germany
Phone +49 (0)23 81 · 977 977 · Fax +49 (0) 23 81 · 977 955 · www.krampeharex.com · info@krampeharex.com

KrampeHarex® CZ spol. s.r.o. · Osvobození 234 · 664 81 Ostrovažice · Czech Republic
Phone +42 (0) 549 · 245 064 · Fax +42 (0) 0549 · 245 065 · www.krampeharex.cz · info@krampeharex.cz

KrampeHarex® Fibrin Gesellschaft mbH & Co. KG · Lindengasse 20 · 4040 Linz · Austria
Phone +43 (0) 732 731 011 · Fax +43 (0) 732 · 731 011 73 · www.krampefibrin.com · info@krampefibrin.com

Basaltfiber reforcetech chopped basalt fibres



ReforceTech™

Basalt Fiber Reinforcement Technology

CHOPPED BASALT FIBER

ReforceTech's Chopped Basalt Fiber is an engineered crack control product with high integrity, high thermal resistance and alkali-resistance designed to control shrinkage cracks in concrete.

ReforceTech's Basalt Fiber's are engineered to have the required properties to process and use the fibers in the aggressive high alkaline concrete applications.

From melted volcanic basalt stone, thin basalt threads are pulled to form continuous filaments at a specified diameter which are coated by a sizing suitable for the concrete applications. These fibres are assembled into basalt strands which are chopped to length as determined by the application..

FROM RAW MATERIAL TO CHOPPED FIBER



Basalt stone

⇒



Melted Basalt

⇒



Fiber

⇒



Chopped Fiber

UNIQUE ADVANTAGES - CHOPPED BASALT FIBERS

- Non corrosive/ non conductive/ non magnetic
- High Tensile strength relative to steel, AR glass fibers, and polypropylene
- Low weight (Density 1/3 of steel)
- No sharp ends protruding from concrete after mixing
- Abrasion resistance improved
- Longer lifetime and lower life cycle costs
- Improves freeze thaw resistance 1.5 to 2 times
- Increases chemical resistance due to up to 95% reduction of shrinkage cracks

PROPERTIES


- Fast and effective mixing
- Does not float or sink
- Excellent compatibility with concrete with excellent adhesion
- Smooth finish
- Durable
- Safe and easy to handle

APPLICATIONS

- Alternative crack control material in commercial and industrial flooring, slabs
- Suitable for aggressive saline environments
- Suitable for areas exposed to high temperatures; airports or industrial floors

Head office:
ReforceTech Limited (registered no. 470617)
Pamukölen House
Doonahyle Road
Limerick
Republic of Ireland
Phone: +47 66 76 77 80
Fax: +47 66 76 77 81
www.reforcetech.com

Subsidiary offices:
ReforceTech AS
Lufthøien 4
NO-3440 Rayken,
Norway
Org. nr.: NO 957 577 067 MVA



ReforceTech™ CHOPPED BASALT FIBER
Basalt Fiber Reinforcement Technology

MATERIAL PROPERTIES

<p>Material - Basalt Design - Monofilament Diameter – 13 to 20 µm Specific Gravity – 2.68 g/cm3</p>	<p>Color - Bronze Thermal Operating Range - -260 to + 700 C Electrical Conductivity - None Resistance to Corrosion – Non Corrosive</p>
--	---

COMPARISON TO ALTERNATIVE CRACK CONTROL ADDITIVES

	Tensile Strength	E Mod	Density
Basalt Fiber	3200 MPA	90 GPa	2.68
AR Glass Fibers	1700 MPA	72 GPa	1.3
Polypropylene	455 MPA	3.5 GPa	1.34
High Mod Polypropylene	550 MPA	7 GPa	1.14
Steel	1100 MPA	200 GPa	7.2

DOSAGE

Testing recommended for the specific applicaion, 0.5 to 3.0 Kg per M3 concrete

PACKAGING

500 Kg bags or alternative sizes as requested

RECOMMENDATIONS

- Add fibers any time prior to pouring or at site
- Follow ACI or EU design guidelines
- Mix for 3 to 5 minutes
- Do not substitute BF Chopped Fibers for structural reinforcement
- Do not add Water

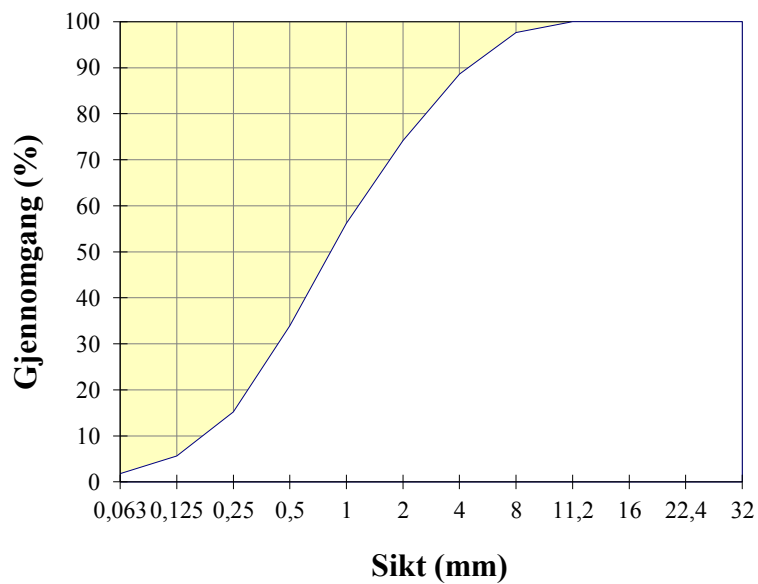
The information shown here inclusive of all drawings and tables is for informational purposes only. Details are subject to change, every effort has been made to ensure accuracy. The user shall ensure the appropriate guidelines and building codes are followed. ReforceTech has no control over the use of their products and assumes no responsibility for the end products or uses of our materials.

<p>Head office: ReforceTech Limited (registered no. 430617) Pansikollen House Doonskyle Road Limerick Republic of Ireland Phone: +47 66 76 77 80 Fax: +47 66 76 77 81 www.reforce.tech</p>	<p>Subsidiary offices: ReforceTech AS Luftveien4 NO-3440 Rayken, Norway Org. nr.: NO 957 577 067 MVA</p>
---	--

Siktekurver

Siktekurve 0-8

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	14,4	35,8	2,4	97,6
4	78,6	163,9	11,4	88,6
2	207,1	343,4	25,9	74,1
1	392,5	540,1	43,8	56,2
0,5	628,4	778,4	66,1	33,9
0,25	836,9	969,1	84,8	15,2
0,125	944,7	1065,0	94,4	5,6
0,063	982,4	1108,9	98,2	1,8
Bunn	999	1130		



Siktekurve Velde 8-16

Legg inn fraksjon: **8/16mm.**

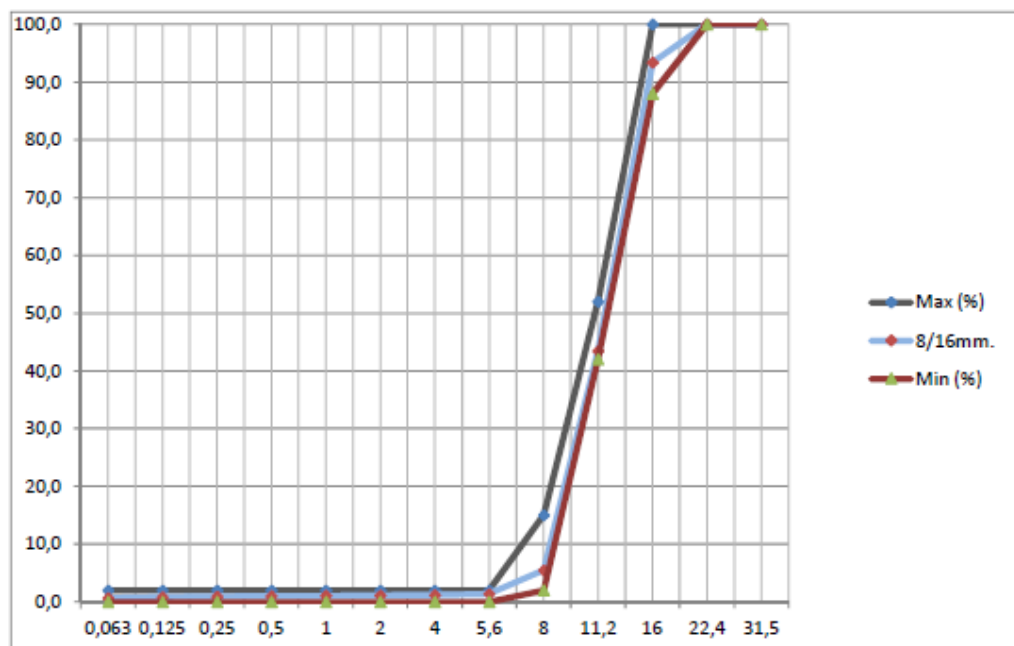
Dato **21.01.2014**
Innlagt av **Michal**



Vekt våt **2932,8 g**
innveid masse **2918 g**

Vekt tørr **2918 g**

Åpning (mm)	Sikterest (g)	Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
32	0	0,0 %	100 %
22,4	0	0,0 %	100 %
16	193	6,6 %	93 %
11,2	1650,3	56,6 %	43 %
8	2758,3	94,5 %	5 %
5,6	2877,4	98,6 %	1 %
4	2883,5	98,8 %	1 %
2	2885,5	98,9 %	1 %
1	2887	98,9 %	1 %
0,5	2888,8	99,0 %	1 %
0,25	2891,3	99,1 %	1 %
0,125	2894,5	99,2 %	1 %
0,063	2898,7	99,3 %	1 %
Bunn	2917		
Siktetap	0,0 %	Overstørrelse	7 %
Fukthalt	0,50 %	Understørrelse	5 %



Siktekurve Velde 16-22

Legg inn fraksjon: **16/22 mm**

Silotopp

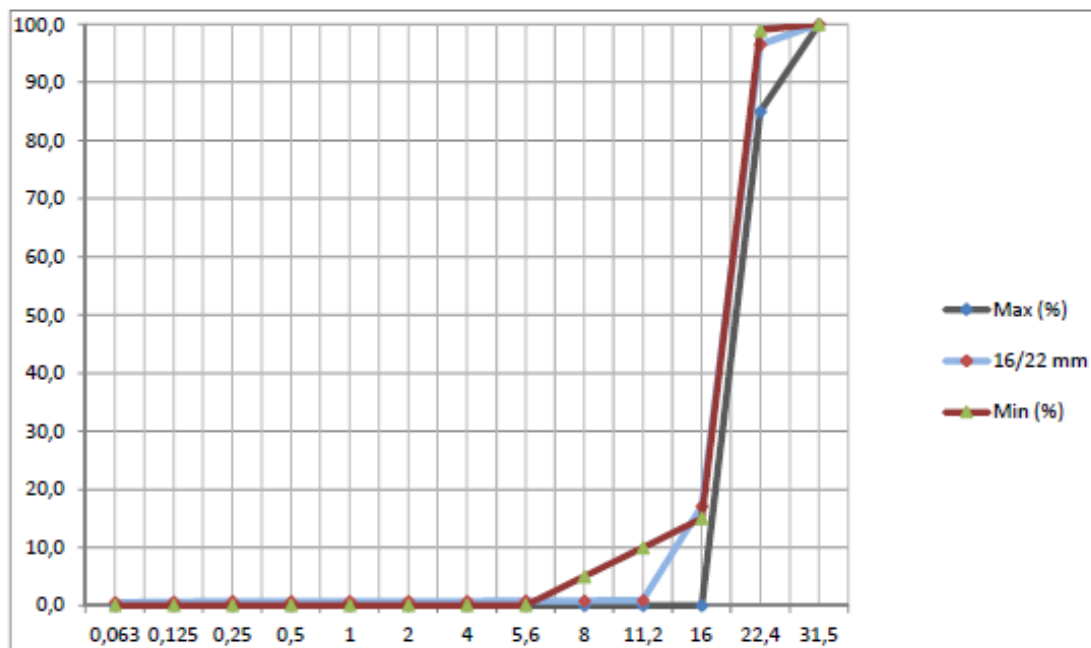


Dato: 23.01.2014
Innlagt av: Michal

innveid masse: 5036,7 g
5027,7 g

Vekt tørr: 5027,7 g

Åpning (mm)	Sikterest (g)	Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
32	0	0,0 %	100 %
22,4	175,4	3,5 %	97 %
16	4169,1	82,9 %	17 %
11,2	4981,8	99,1 %	1 %
8	4987	99,2 %	1 %
5,6	4987,6	99,2 %	1 %
4	4988,4	99,2 %	1 %
2	4989,2	99,2 %	1 %
1	4990,2	99,3 %	1 %
0,5	4991,3	99,3 %	1 %
0,25	4992,6	99,3 %	1 %
0,125	4994,4	99,3 %	1 %
0,063	4998,5	99,4 %	1 %
Bunn	5025		
Siktetap	0,0 %	Overstørrelse	3 %
Fukthalt	0,18 %	Understørrelse	17 %



Vedlegg proporsjonering

Prosj./id.:	Resept 1 (REF)
--------------------	-----------------------

Blandevolum:	90 liter
Dato:	14.feb
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Jan Erik Waage
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Anlegg	368,1	33,127			33,127	
Elkem Microsilica	29,4	2,650	0	0,000	2,650	
Flyveaske	75,5	6,791	0	0,000	6,791	
Fritt vann	137,1	12,343		- 1,477	10,866	10,866
Absorbert vann	0,0	0,000			0,000	
Forsand 0/8 mm nat. vask.	935,7	84,216	0,8	0,674	84,889	
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Velde 8/16mm	402,4	36,216	0,5	0,181	36,397	
Velde 16/22 mm	485,9	43,732	0,2	0,079	43,811	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Dynamon	7,4	0,663	82	0,543	0,663	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
	0,0	0,000	100	0,000	0,000	
Stålfiber	0,0	0,000			0,000	
PP-fiber	0,0	0,000			0,000	

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	4				
150x300 sylindre		4			
100x200 sylindre					
Stor bjelke			1		
Små bjelker				4	

Duktilitet i fiberarmert høyfast normalbetong

Prosj./id.: **Resept 2: 1vol% stålfiber**

Blandevolum:	85 liter
Dato:	17.feb
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Jan Erik Waage
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg	369,3	31,393			31,393
Elkem Microsilica	29,5	2,511	0	0,000	2,511
Flyveaske	75,7	6,435	0	0,000	6,435
Fritt vann	137,6	11,697		- 3,938	7,759
Absorbert vann	0,0	0,000			0,000
Forsand 0/8 mm nat. vask.	893,2	75,922	4,2	3,189	79,110
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Velde 8/16mm	384,1	32,649	0,5	0,163	32,813
Velde 16/22 mm	463,8	39,425	0,2	0,071	39,496
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon	7,4	0,628	82	0,515	0,628
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	78,0	6,630			6,630
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

7,759

*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	4				
150x300 sylindre		4			
100x200 sylindre					
Stor bjelke			1		
Små bjelker				4	

Duktilitet i fiberarmert høyfast normalbetong

Prosj./id.: **Resept 3: 1,5vol% stålfiber**

Blandevolum:	50 liter
Dato:	27.feb
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Jan Erik Waage
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg	368,6	18,431			18,431
Elkem Microsilica	29,5	1,474	0	0,000	1,474
Flyveaske	75,6	3,778	0	0,000	3,778
Fritt vann	137,3	6,867		-	5,426
Absorbent vann	0,0	0,000		1,442	0,000
Forsand 0/8 mm nat. vask.	914,5	45,723	2,5	1,143	46,866
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Velde 8/16mm	393,3	19,663	0,0	0,000	19,663
Velde 16/22 mm	474,9	23,744	0,0	0,000	23,744
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon	7,4	0,369	81	0,299	0,369
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	117,0	5,850			5,850
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

5,426

*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	4				
150x300 sylindre		4			
100x200 sylindre					
Stor bjelke			1		
Små bjelker				4	

Duktilitet i fiberarmert høyfast normalbetong

Prosj./id.: **Resept 4: 1,5vol% basaltfiber**

Blandevolum:	65 liter
Dato:	27.feb
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Jan Erik Waage
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg	369,6	24,027			24,027
Elkem Microsilica	29,6	1,922	0	0,000	1,922
Flyveaske	75,8	4,926	0	0,000	4,926
Fritt vann	137,7	8,952		- 1,776	7,176
Absorbert vann	0,0	0,000			0,000
Forsand 0/8 mm nat. vask.	853,4	55,474	2,5	1,387	56,861
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Velde 8/16mm	928,0	60,322	0,0	0,000	60,322
Velde 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon	7,4	0,481	81	0,389	0,481
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	28,5	1,853			1,853

7,176

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	4				
150x300 sylindre		4			
100x200 sylindre					
Stor bjelke			1		
Små bjelker				4	

Duktilitet i fiberarmert høyfast normalbetong

Prosj./id.: Resept 5: 3vol% basaltfiber

Blandevolum:	67 liter
Dato:	11.mar
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Jan Erik Waage
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anlegg	370,2	24,806			24,806
Elkem Microsilica	29,6	1,985	0	0,000	1,985
Flyveaske	75,9	5,085	0	0,000	5,085
Fritt vann	138,0	9,243		-	7,724
Absorbert vann	0,0	0,000			0,000
Forsand 0/8 mm nat. vask.	833,6	55,851	2,0	1,117	56,968
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Velde 8/16mm	906,4	60,732	0,0	0,000	60,732
Velde 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Dynamon	7,4	0,496	81	0,402	0,496
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
Basaltfiber	57,0	3,819			3,819

7,724

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning					
Synkmål					
Utbredelsesmål					
Luft					
Densitet					

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger	4				
150x300 sylindre		4			
100x200 sylindre					
Stor bjelke			1		
Små bjelker				4	

Vedlegg testverdier

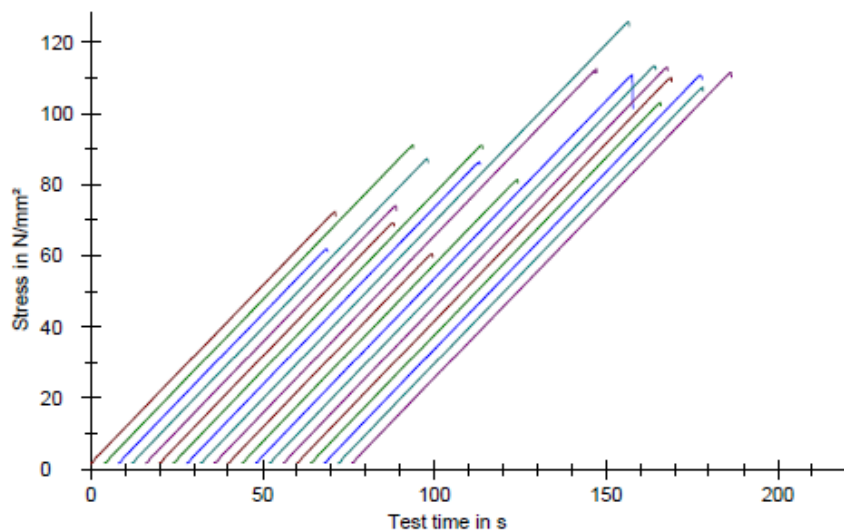
Terning trykkfasthet



Resultater:

Legends	Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
	1	blanding 1dag3	723,25	72,32	100,0	100,0	100,0
	2	blanding1dag7	910,58	91,06	100,0	100,0	100,0
	3	blanding2dag3	618,99	61,90	100,0	100,0	100,0
	4	blanding2dag7	872,38	87,24	100,0	100,0	100,0
	5	blanding3dag3	739,68	73,97	100,0	100,0	100,0
	6	blanding4dag3	692,27	69,23	100,0	100,0	100,0
	7	blanding3dag7	910,05	91,00	100,0	100,0	100,0
	8	blanding4dag7	862,81	86,28	100,0	100,0	100,0
	9	blanding 1dag28	1257,50	125,75	100,0	100,0	100,0
	10	blanding 1dag28	1125,64	112,56	100,0	100,0	100,0
	11	blanding5dag3	605,49	60,55	100,0	100,0	100,0
	12	blanding5dag7	812,79	81,28	100,0	100,0	100,0
	13	blanding2dag28	1107,97	110,80	100,0	100,0	100,0
	14	blanding2dag28	1133,18	113,32	100,0	100,0	100,0
	15	blanding3dag28	1128,88	112,89	100,0	100,0	100,0
	16	blanding3dag28	1100,12	110,01	100,0	100,0	100,0
	17	blanding4dag28	1029,56	102,96	100,0	100,0	100,0
	18	blanding4dag28	1106,20	110,62	100,0	100,0	100,0
	19	blanding5dag28	1073,32	107,33	100,0	100,0	100,0
	20	blanding5dag28	1114,47	111,45	100,0	100,0	100,0

Grafisk fremstilling:





Statistikk:

Series n = 20	F _m kN	σ _m N/mm ²	a mm	b mm	h mm
x	946,26	94,63	100,0	100,0	100,0
s	196,96	19,70	0,0	0,0	0,0
v	20,81	20,81	0,00	0,00	0,00

Testen utført av:

Spaltestrekkfasthet



Universitetet
i Stavanger

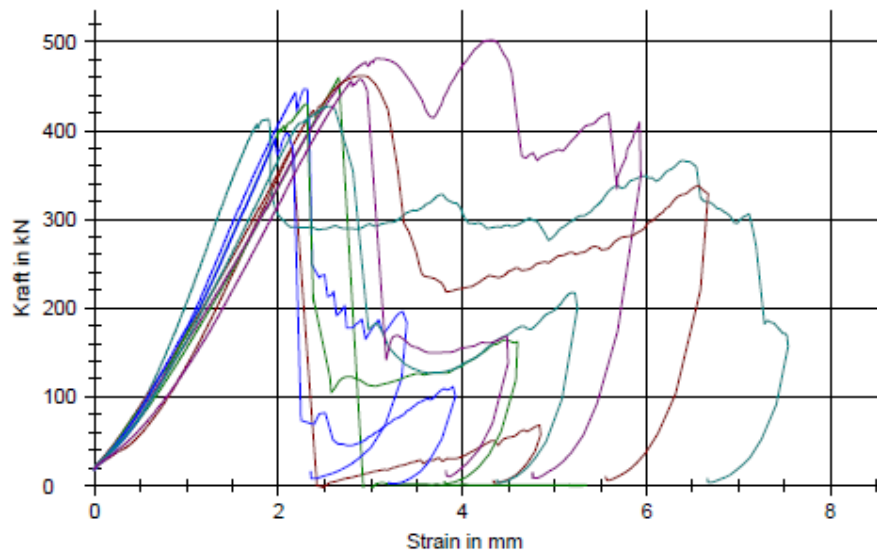
Universitetet i Stavanger

26.05.14

Resultater:

Nr	d mm	F _m kN	h mm	ID
1	150,0	380,67	300,0	blanding1 dag28
2	150,0	459,51	300,0	blanding1 dag28
3	150,0	447,14	300,0	blanding2 dag28
4	150,0	412,91	300,0	blanding2 dag28
5	150,0	501,66	300,0	blanding3 dag28
6	150,0	461,75	300,0	blanding3 dag28
7	150,0	429,92	300,0	blanding4 dag28
8	150,0	396,97	300,0	blanding4 dag28
9	150,0	427,11	300,0	blanding5 dag28
10	150,0	458,07	300,0	blanding5 dag28

Grafisk fremstilling:



Belastningshastigheten = 2,8 kN/s -NS-EN12390-6

Arbeidsdiagram strekk

Resept 1



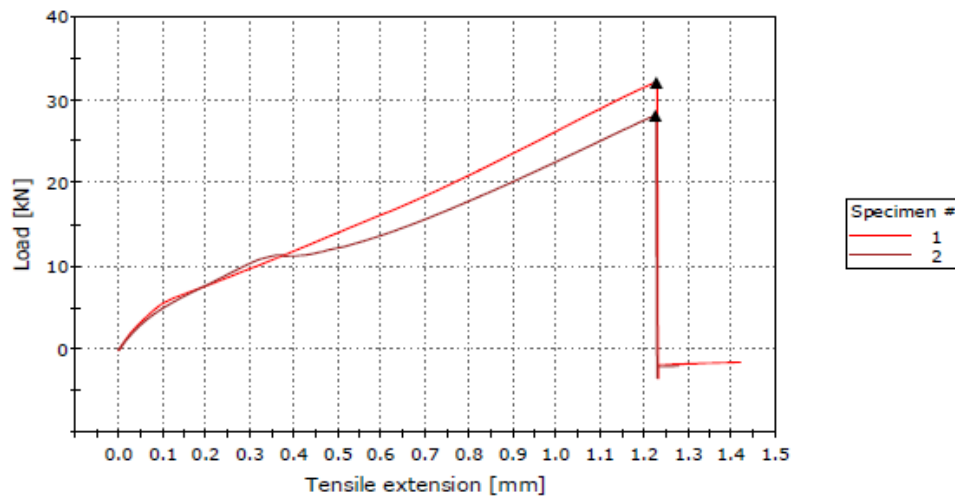
02 May 2014

Instron Applications Laboratory

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (Included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
1 Test	> 32.07	0.000	-----	> 1	> 1.22865	> 3.20671	> 1.00000
2 Test	> 28.11	0.000	-----	> 2	> 1.26133	> 2.81122	> 1.00000
Mean	30.09	0.000	-----	2	1.24499	3.00896	1.00000
Std Dev	2.797	0.000	-----	0.707	0.023	0.280	0.000
Maximum	32.07	0.000	-----	2	1.26133	3.20671	1.00000

Resept 2



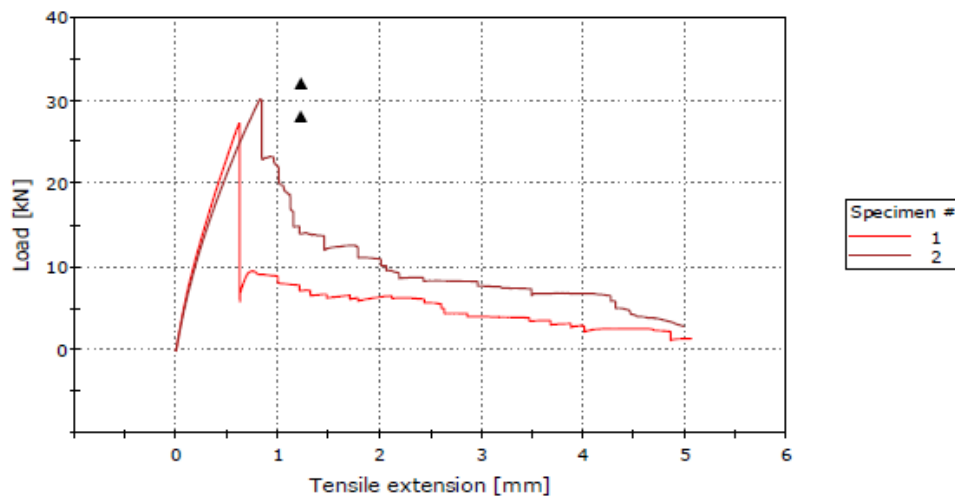
02 May 2014

Instron Applications Laboratory

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (Included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
1	27.31	0.000	-----	> 1	0.62165	2.73110	> 1.00000
2	30.15	0.000	-----	> 2	0.87343	3.01530	> 1.00000
Mean	28.73	0.000	-----	2	0.74754	2.87329	1.00000
Std Dev	2.010	0.000	-----	0.707	0.178	0.201	0.000
Maximum	30.15	0.000	-----	2	0.87343	3.01530	1.00000

Resept 3



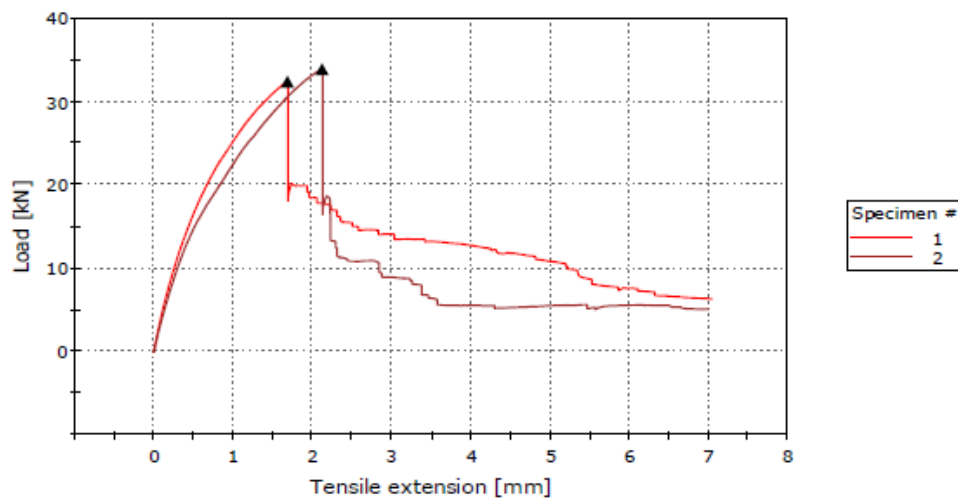
02 May 2014

Instron Applications Laboratory

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (Included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
1	32.42	0.000	-----	> 1	> 1.71635	> 3.24153	> 1.00000
2	33.91	0.000	-----	> 2	> 2.14791	> 3.39060	> 1.00000
Mean	33.16	0.000	-----	2	1.93213	3.31607	1.00000
Std Dev	1.054	0.000	-----	0.707	0.305	0.105	0.000
Maximum	33.91	0.000	-----	2	2.14791	3.39060	1.00000

Resept 4



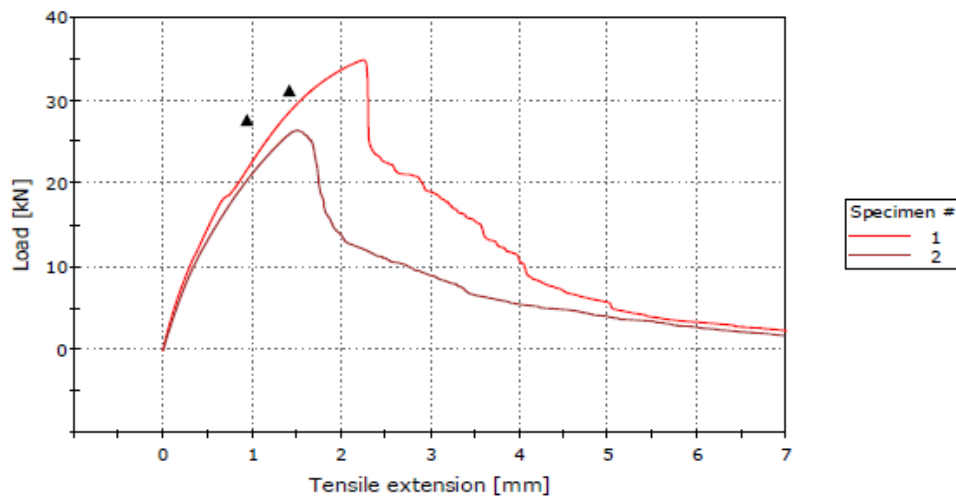
02 May 2014

Instron Applications Laboratory

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (Included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
1 Test	> 34.83	0.000	-----	> 1	> 2.25897	> 3.48323	> 1.00000
2 Test	> 26.41	0.000	-----	> 2	> 1.55336	> 2.64093	> 1.00000
Mean	30.62	0.000	-----	2	1.90516	3.06208	1.00000
Std Dev	5.956	0.000	-----	0.707	0.499	0.596	0.000
Maximum	34.83	0.000	-----	2	2.25897	3.48323	1.00000

Resept 5



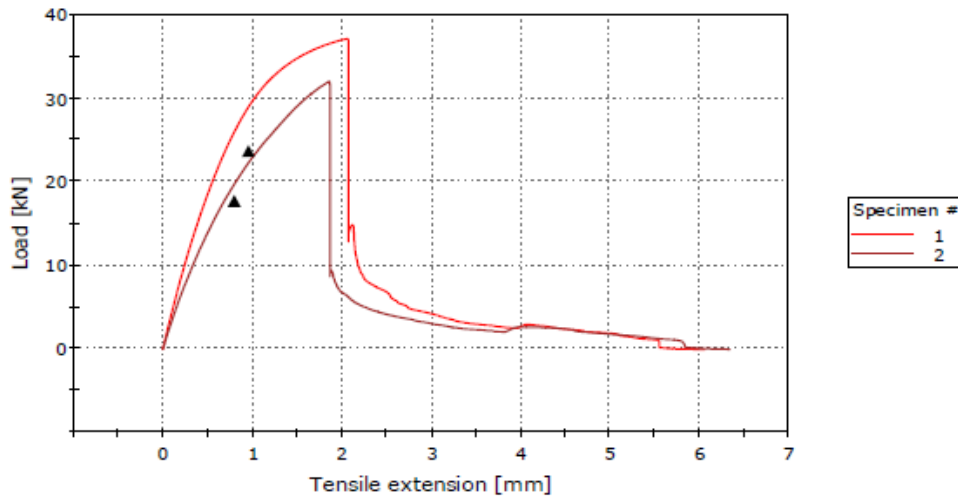
02 May 2014

Instron Applications Laboratory

Strekktest av betongbjelke

Material	Concrete
Grade	60
Sample ID	Test
Control mode 1	Extension
Rate 1	0.50000 mm/min
Control mode 2	Extension
Rate 2	0.00000 mm/min
Control mode 3	Extension
Rate 3	0.00000 mm/min
Method Rev Date	02/05/2014

Specimen 1 to 2



Specimen label	Peak Load [kN]	Elongation (Manual) [%]	Modulus (Young's) [GPa]	Specimen number (Included)	Extension at Tensile strength [mm]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Final mark separation at Elongation after fracture [mm]
1	37.09	0.000	-----	1	2.10227	3.70860	1.00000
2	31.98	0.000	-----	2	1.92716	3.19782	1.00000
Mean	34.53	0.000	-----	2	2.01471	3.45323	1.00000
Std Dev	3.611	0.000	-----	0.707	0.124	0.361	0.000
Maximum	37.09	0.000	-----	2	2.10227	3.70860	1.00000

Arbeidsdiagram trykk



Universitetet
i Stavanger

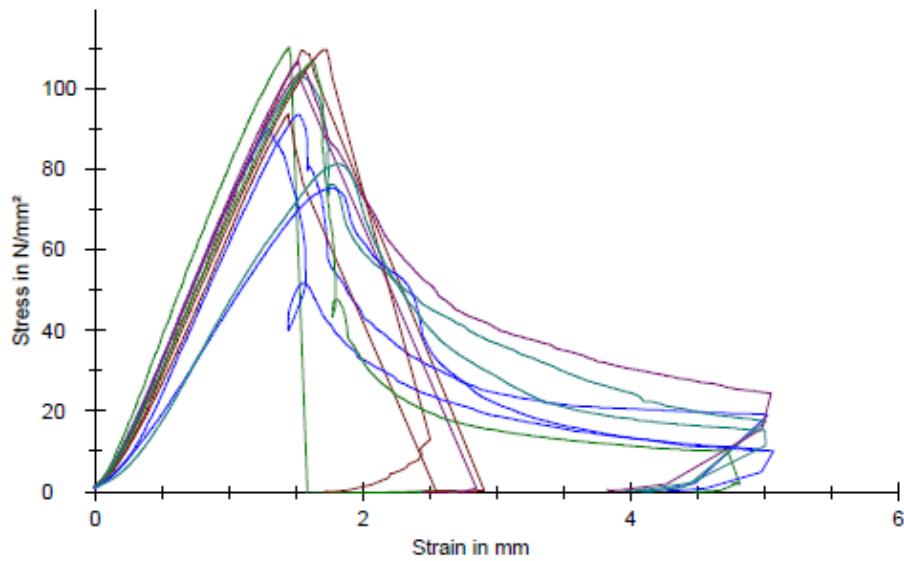
Universitetet i Stavanger

26.05.14

Resultater:

Legends	Nr	ID	F_m kN	σ_m N/mm ²	d mm	h mm
	1	test1	1933,31	109,40	150,0	300,0
	2	test2	1946,99	110,18	150,0	300,0
	3	blanding 2 02.04	1650,64	93,41	150,0	300,0
	5	blanding 1 02.04	1882,55	106,53	150,0	300,0
	6	blanding 1 02.04	1653,82	93,59	150,0	300,0
	8	blanding 2 02.04	1588,59	89,90	150,0	300,0
	9	blanding 3 04.04	1819,36	102,95	150,0	300,0
	10	blanding 3 04.04	1837,21	103,96	150,0	300,0
	11	blanding 4 10.04	1934,80	109,49	150,0	300,0
	12	blanding 4 10.04	1880,20	106,40	150,0	300,0
	13	blanding 5 10.04	1328,91	75,20	150,0	300,0
	14	blanding 5 10.04	1435,09	81,21	150,0	300,0

Grafisk fremstilling:



Statistikk:

Series	F_m kN	σ_m N/mm ²	d mm	h mm
n = 12				
\bar{x}	1740,96	98,52	150,0	300,0
s	207,62	11,75	0,0	0,0
v	11,93	11,93	0,00	0,00

Testen utført av:

Store bjelker



Simple standard protocol

26.05.2014

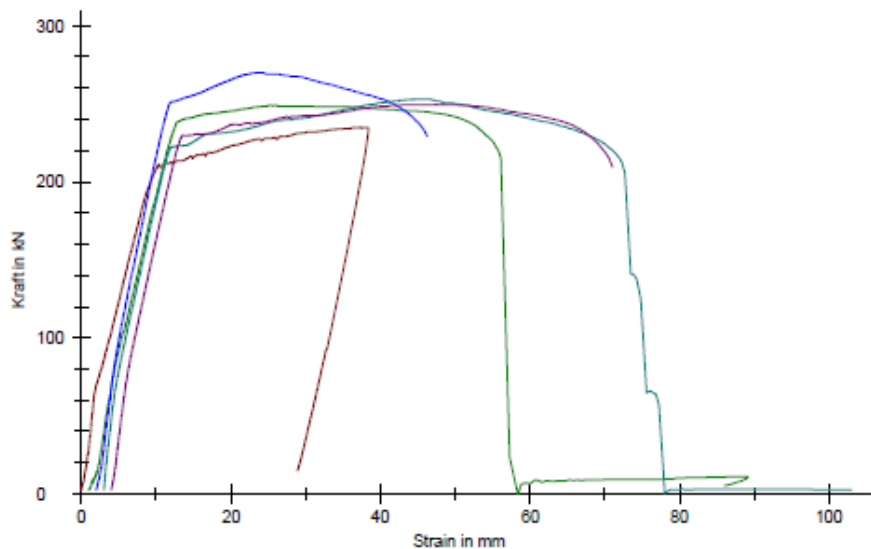
Parameter table:

Test protocol :	Type strain extensometer:
Tester :	Machine data : Controller TT0322
Customer :	PistonStroke
Test standard :	LoadCell 400 kN
Strength grade :	
Creation date :	
Age : 0 T	
Other :	

Results:

Nr	a mm	b mm	F _m kN	h mm	ID
1	250,0	2200,0	234,57	300,0	Blanding 1 - 13.03
2	250,0	2200,0	248,57	300,0	Blanding 2 - 26.03
3	250,0	2200,0	269,77	300,0	Blanding 3 - 26.03
4	250,0	2200,0	252,78	300,0	Blanding 4 - 27.03
5	250,0	2200,0	249,18	300,0	Blanding 5 - 07.04

Series graphics:



Statistics:

Series n = 5	a mm	b mm	F _m kN	h mm
x	250,0	2200,0	250,97	300,0
s	0,0	0,0	12,59	0,0
v	0,00	0,00	5,02	0,00

Bøyestrekfasthet



Simple standard protocol

26.05.2014

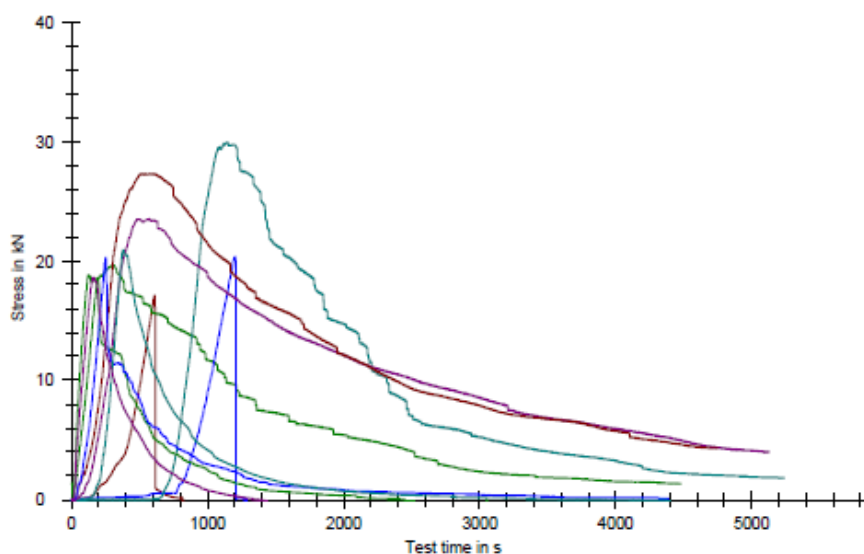
Parameter table:

Test protocol :	Type strain extensometer:
Tester :	Machine data :
Customer :	Controller TT0322
Test standard :	PistonStroke
Strength grade:	LoadCell 400 kN
Creation date :	
Age : 0 T	
Other :	

Results:

Nr	a mm	b mm	F _m kN	ID
1	150,0	550,0	17,09	blanding 1 19.03
2	150,0	550,0	19,64	blanding 2 20.03
3	150,0	550,0	20,35	blanding 1 20.03
4	150,0	550,0	29,95	blanding 2 20.03
5	150,0	550,0	23,52	blanding 3 25.03
6	150,0	550,0	27,33	blanding 3 25.03
7	150,0	550,0	18,57	blanding 4 25.03
8	150,0	550,0	20,30	blanding 4 25.03
9	150,0	550,0	20,94	blanding 5 10.04
10	150,0	550,0	18,61	blanding 5 10.04

Series graphics:

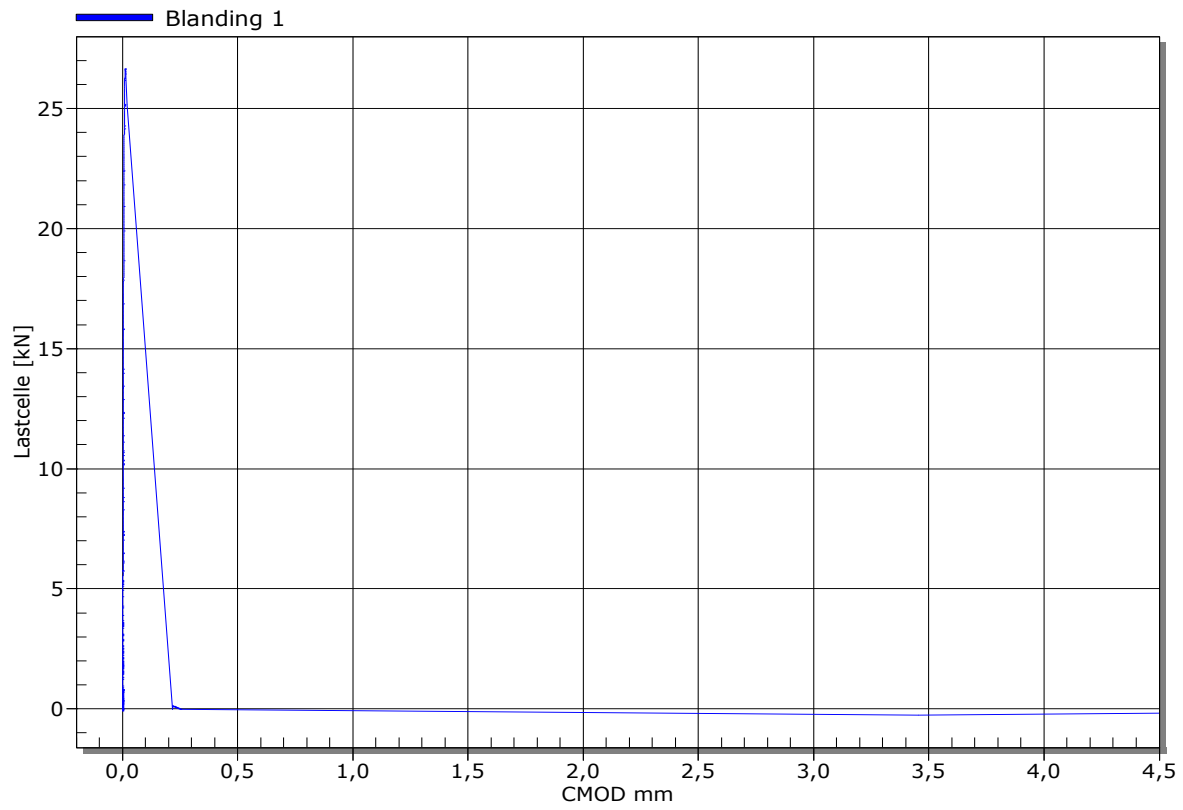


Statistics:

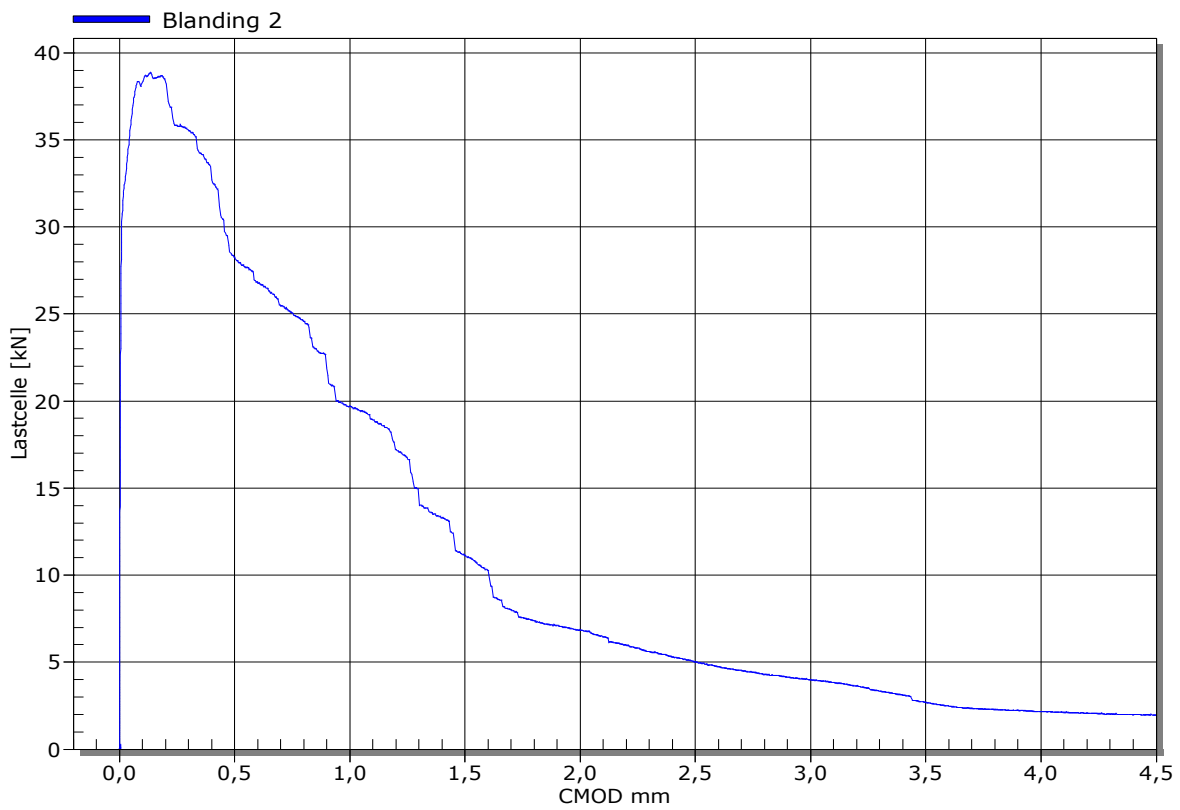
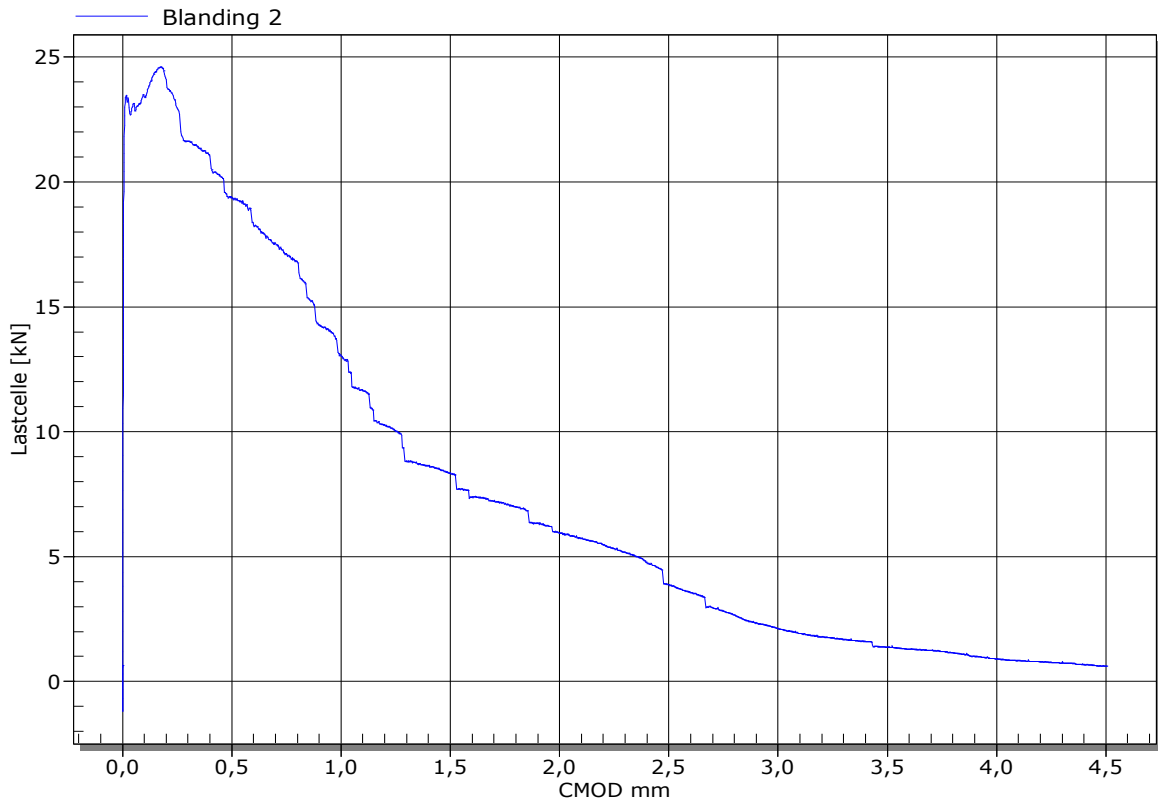
Series	a mm	b mm	F _m kN
n = 10			
\bar{x}	150,0	550,0	21,63
s	0,0	0,0	4,11
v	0,00	0,00	19,01

Bøystrekkfasthet kurver

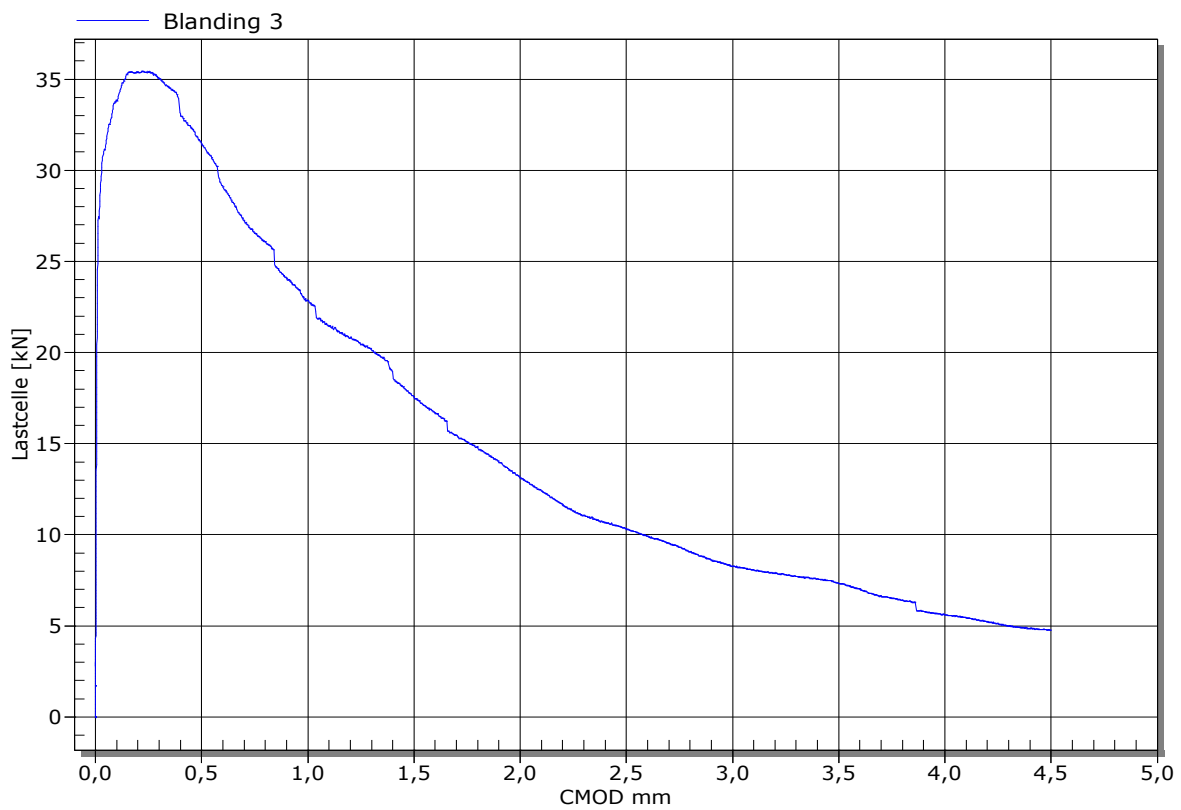
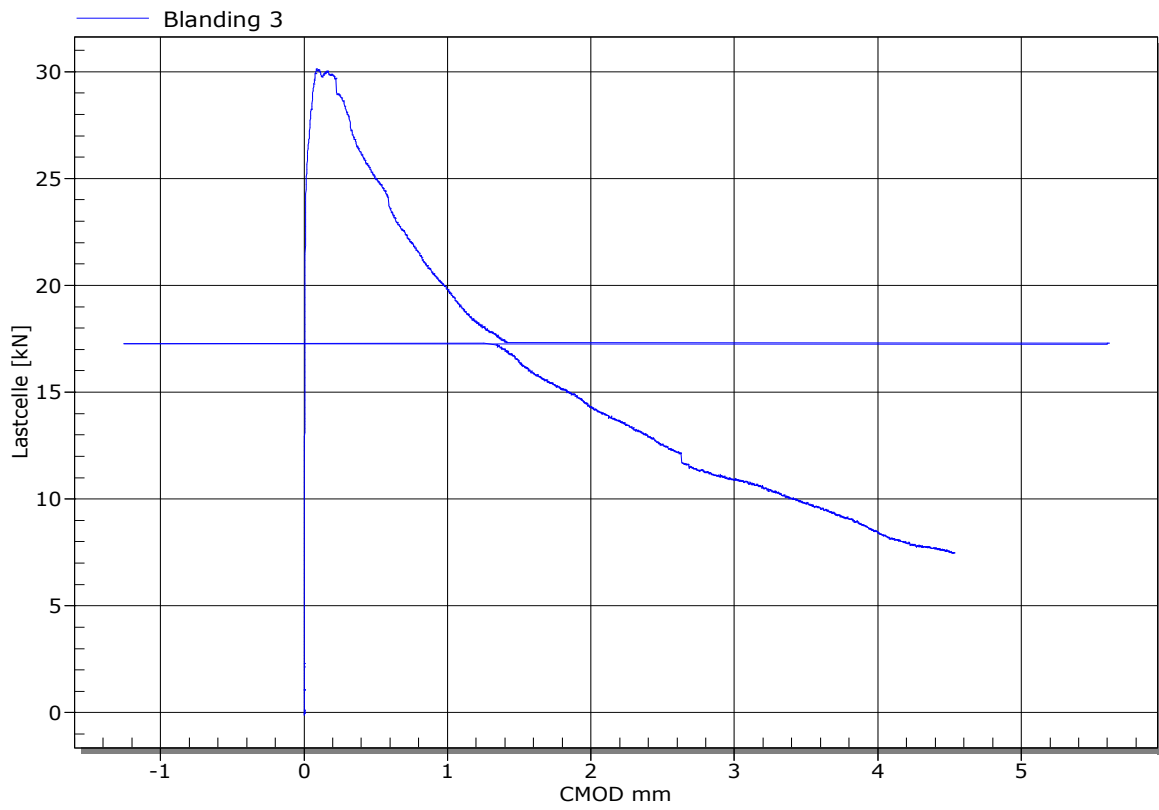
Resept 1



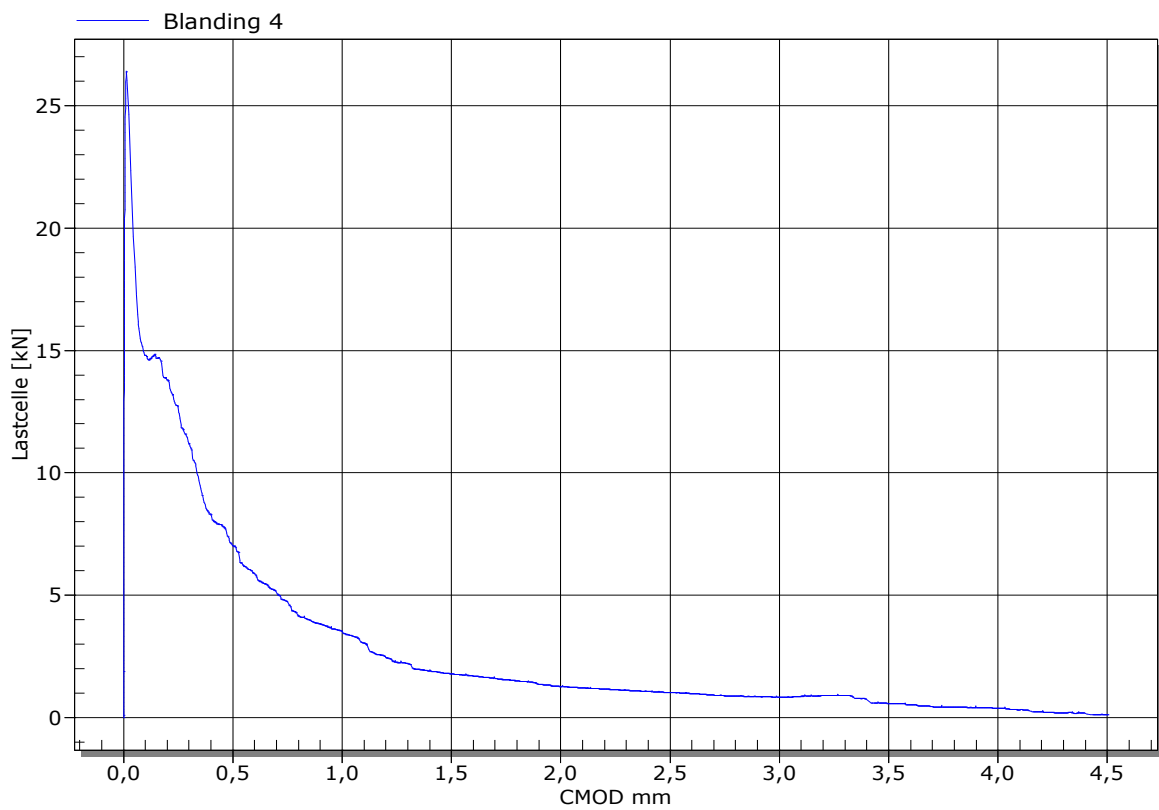
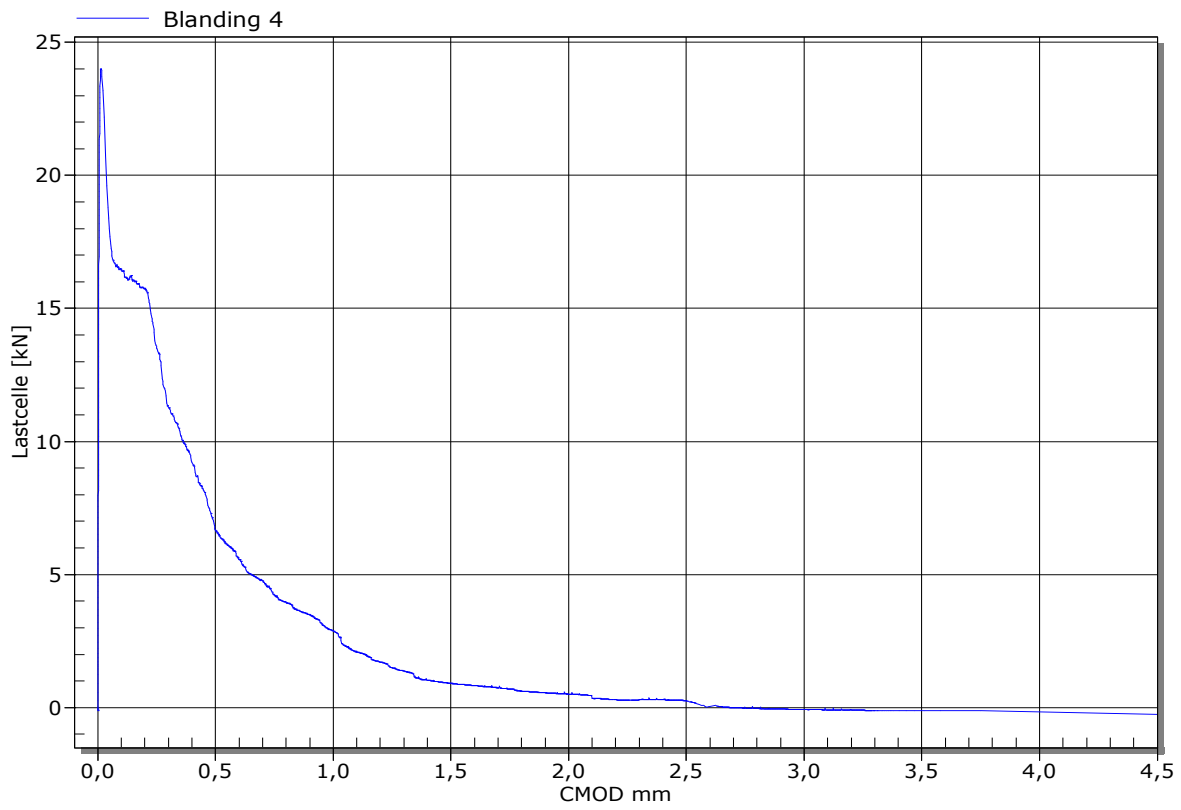
Resept 2



Resept 3



Resept 4



Resept 5

