Fiberarmering sin påverknad av ferskeigenskapar i betong

MARGUNN HELLELAND

VEILEDER
Rein Terje Thorstensen

Universitetet i Agder, 2022
Fakultet for teknologi og realfag
Institutt for ingeniørvitskap

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

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

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	☒
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.	☒
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	☒
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	☒
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	☒
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	☒

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).
Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjennelse.

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

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

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)? ☐JA ☒NEI
(Båndleggingsavtale må fylles ut)
- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over? ☐JA ☐NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet? ☐JA ☒NEI
(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Dette spesialiseringsprosjektet er utarbeida ved Institutt for Ingeniørvitskap som ein del av masterprogrammet for Konstruksjonsteknikk ved Universitet i Agder. Spesialiseringsprosjektet er ei oppgåve i emnet BYG515 og blei utarbeida i det tredje semesteret. Eg vil nytte anledninga til å takke rettleiaren min ved Universitet i Agder, Rein Terje Thorstensen for alt engasjement, oppfølging og fagleg innsikt.

Målet med spesialiseringsprosjektet var å tileigne meg djupare kompetanse for bruk av fiberarmert betong og ferskeigenskapar. I tillegg skulle spesialiseringsprosjektet gi meg tilstrekkelege kunnskapar for å kunne setje i gong med masteroppgåve i neste semester.

Grimstad, november 2022

Margunn Helleland

Margunn Helleland

Summary

Traditional concrete has low tensile strength and strain capacity and is therefore vulnerable to cracks and crack formations. By adding steel fibers, one can potentially improve mechanical properties to a large extent. Fiber reinforcement can be used both as an alternative and as a supplement to traditional reinforcement, but this requires sufficient workability to be able to achieve strength, durability, and volume stability in the finished concrete. In this specialization project, it is therefore desirable to investigate how different amounts of steel fiber will affect the concrete's properties in its fresh state. The result is based on laboratory experiments and literature study. The conclusion is that increasing the fiber content reduces the workability, regardless of fiber type and geometry. Addition of fibers reduce both mobility, stability and compressibility. In addition, both plastic viscosity and yield stress increases.

Furthermore, comparisons have been made to find suitable test methods, as there are no standardized test methods for fiber-reinforced concrete as of today. One can conclude that the LCPC box provides a good indicator of the filling capacity of concrete, as well as a relatively accurate indirect measurements of dynamic yield stress. Nevertheless, it must be supplemented with other methods to cover the entire spectrum of workability. Additionally, the rheometer is particularly appropriate to use when developing databases that present rheological properties in fiber concrete.

The results from experimental trials and literature studies have also been evaluated against the particle matrix method, as the method does not currently show consideration for the changes that occur when fiber reinforcement is added. No firm conclusions can be drawn, but one can determine that increasing the matrix-content gives better flow and filling ability, as well as reduces the static and dynamic yield stress. The literature can also confirm negative effects with larger and coarser particle phase.

Innhaldsliste

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring ii
Publiseringsavtale iii
Forord iv
Summary v
Innhaldsliste vi
Figurliste viii
Tabelliste ix
1 Innleiing 1
2 Samfunnsperspektiv 2
2.1 Miljø og berekraft 2
2.2 Produktivitet og økonomi 3
2.3 HMS 3
3 Kunnskapsbakgrunn 4
3.1 Fiberarmert betong 4
3.2 Støypeevne 5
3.3 Partikkel-matriks metoden 13
4 Forskingsspørsmål 14
4.1 Avgrensing 14
5 Case og materialar 15
5.1 Forskingsprosjektet FiberCon 15
5.2 Laboratoriemateriell og dataprogram 17
6 Metode 19
6.1 Eksperimentelt forsøk på laboratoriet 19
6.2 Litteraturstudium 27
7 Resultat 28
7.1 Resultat frå eige laboratorieforsøk 28
7.2 Litteraturstudium 33
8 Diskusjon 43
8.1 Samanlikning mellom eksperimentelle forsøk og litteraturstudium 43
8.2 Kva testmetodar er mest hensiktsmessige til bruk i fiberarmert betong? 53
8.3 Korleis kan mine resultat foreinast med partikkel matriks metoden 55
8.4 Feilkjelder 57
9 Konklusjon 58

10 Anbefalingar 59
11 Referansar 60
12 Vedlegg 62

Figurliste

Figur 2.1 Verktøy for reduksjon av CO_2 utslepp i sementnæringa [7] 2
Figur 3.1 Ulike typar fibergeometri [11] 4
Figur 3.2 Bingham modellen [2] 8
Figur 3.3 Materialadferd i fersk betong [2] 9
Figur 3.4 Illustrasjon av utbreiing frå kjegle [1] 10
Figur 3.5 J-ring [1] 10
Figur 3.6 Ve-Be test [2] 11
Figur 3.7 V-trakt [1] 11
Figur 3.8 Fyllingsbokstest [1] 12
Figur 3.9 L-boks [1] 12
Figur 3.10 Illustrasjon av LCPC-boks [14] 12
Figur 3.11 Partikkel-matriks modellen[2] 13
Figur 5.1 FiberCon-forsøket sine resultat på maksimal utbreiingsdiameter frå kjegle [15] 16
Figur 5.2 FiberCon-forsøket sine resultat på T500-test [15] 16
Figur 6.1 Modifisering av resept ved tilsetning av SP og finfiller (basert på utbreiingsdiameter) 21
Figur 6.2 Oppstart av testprosedyrar 26
Figur 7.1 Resultat frå 22 ulike studiar: utbreiingsdiameter ved aukande fiberinnhald [1] 37
Figur 7.2 Effekt av tilslagsstorleik på fiberfordeling [1] 39
Figur 7.3 Illustrasjon av testing i LCPC-boks [14] 41
Figur 8.1 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner maks utbreiing frå kjegle. 46
Figur 8.2 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner T500 i kjegle (målt i sekund) 47
Figur 8.3 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner utbreiingslengd i LCPC boks. 48
Figur 8.4 Resultat frå utrekningar av dynamisk flyteskjerspenning basert på LCPC målingar 49
Figur 8.5 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner dynamisk flyteskjerspenning 50
Figur 8.6 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner statisk flyteskjerspenning 51
Figur 8.7 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner plastisk viskositet 52

Tabelliste

Tabell 3.1 Inndeling av konseptet støypeevne 6
Tabell 3.2 Enkle metodar for testing av støypeevne 10
Tabell 5.1 Basis-resept for FiberCon forsøk [15] 15
Tabell 5.2 Materialmengder 17
Tabell 5.3 Testutstyr som er nytta i eksperimentelt forsøk 18
Tabell 6.1 Oppstarts-resept basert på FiberCon prosjektet sin basis-resept 20
Tabell 6.2 Endeleg basis resept etter justering med SP og finfiller 21
Tabell 6.3 Basis resept med inndeling i matriks- og partikkelfase 23
Tabell 6.4 Modifisert resept med matrikstilsetning på 20 l/m^3 24
Tabell 7.1 Testresultat frå kjegle 28
Tabell 7.2 Testresultat frå LCPC-boks 29
Tabell 7.3 Testresultat frå Spenningsvekst-test (Stress Growth Test) 30
Tabell 7.4 Testresultat frå Flytekurve-test (Flow Curve Test) 31
Tabell 7.5 Grad av homogenitet 32
Tabell 7.6 Relevante funn frå litteraturgjennomgangen [1] 34
Tabell 7.7 Testresultat frå doktoravhandling, inkludert bruk av LCPC-boks [24] 42

1 Innleiing

Tradisjonell betong har låg strekkfastheit og tøyingskapasitet, og er difor sårbar for riss- og sprekkdanning. Ved tilsetjing av stålfibrar i betongen, kan ein potensielt betre desse eigenskapane i stor grad [1]. I mellomtida krev alle betongkomposisjonar tilstrekkeleg støypeevne for å kunne oppnå styrke, varigheit og volumstabilitet i den ferdige betongen. I tradisjonell betong er støypeevna avhengig av eigenskapane til tilslaget, sementpastaen, samt volumetriske proporsjonar mellom desse [2]. Men korleis påverkast støypeevna ved tilsetning av stålfiber?

Det å studere bruk av «nye» materialar i byggeindustrien er viktig, då det kan skape betydeleg effektivisering av produktivitet og økonomi, samt løyse utfordringar knytt til kontrollarbeid, berekraft og arbeidsmiljø [3]. Problemområdet er bruk av fiberarmert betong både som alternativ og supplement til tradisjonell armering. Dette stiller krav til ytterlegare kompetanse og erfaring, samt etablering av standardiserte metodar for proporsjonering, produksjon og støyping av fiberbetong [3].

2 Samfunnsperspektiv

Bruk av fiberarmert betong som alternativ eller supplement til tradisjonell armering, har potensiale for betring av både berekraft, produktivitet og økonomi i byggeprosjektet [3]. I tillegg kan det i somme tilfelle leggje til rette for betre HMS på byggeplass [4][3]. Tematikken byggjer difor opp under fleire av berekraftsmåla til FN [5]. Berekraftsmåla som er særskilt nemneverdige for prosjektet er innlemma i underkapitalane som følgjer.

2.1 Miljø og berekraft

Hovudutfordringa som samfunnet står ovanfor i dag er global oppvarming. Det trettande berekraftsmålet til FN dreiar seg om å *«handle augeblikkeleg for å kjempa mot klimaendringane og konsekvensane av dei»* [5]. Byggeindustrien har difor eit ansvar for å ta klimautfordringane på alvor. Når det gjeld betong som konstruksjonsmateriale står ein ovanfor store utfordringar når det kjem til gassar som bidreg til drivhuseffekt, då sementindustrien utgjer 8–10 % av verdsproduksjonen. Bruk av sement bidreg difor til aukande global oppvarming og klimaendringane som følgjer. Likevel er befolkninga per i dag avhengig av betong som byggemateriale for menneskeleg utvikling, og forbruket aukar jamt med stigninga i verdas befolkning [6]. Det er kjent at betong med fiberarmering krev auking i sementinnhald, men det manglar kunnskap om behovet som trengs, samt miljøkonsekvensane av dette. Det bør difor tileignast meir kunnskap om proporsjonering med omsyn til klimagassutslepp [3].

På den andre sida er det utvikla konkrete verktøy for å redusere miljøpåverknaden frå sement i tradisjonell betong. Artikkelen *«Tools for Carbon Emissions Due to Cement Consumption»* [7] presenterer tre essensielle verktøy via trekanten som er illustrert i Figur 2.1.

Figur 2.1 Verktøy for reduksjon av CO_2 utslepp i sementnæringa [7]

Det å tilsette fiber i betong aukar styrken og levetida til betongkonstruksjonen, og kan difor assosierast med verktøy 1 i Figur 2.1. Det å forlenge levetida til den opprinelege konstruksjonen minskar behovet for utskifting, og bidreg dermed til å minske forbruket av betong på lang sikt [7]. Denne strategien kan også foreinast med berekraftsmål 13.1, med dette å «*styrke evna til å stå imot og tilpasse seg klimarelaterte farar og naturkatastrofar i alle land*». Det å tileigne seg ytterlegare kompetanse og erfaringar ved bruk av fiberarmert betong bidreg på denne måten mot ei berekraftig utvikling. Samstundes er det behov for meir forsking på området. Prosjektbeskrivinga for forskingsprosjektet «FiberCon» poengterer at det bør utarbeidast modellar som ser på utslepp i eit livssyklusperspektiv [3].

2.2 Produktivitet og økonomi

Fiberarmert betong har i tillegg stort potensiale når det gjeld FNs delmål nr. 8.2, som omhandlar auke av økonomisk produktivitet med utgangspunkt i innovasjon og teknologisk framgang [5]. Ein kan anta at dimensjonering av armering utgjer 50 % av kostnadane ved betongdimensjonering. I tillegg reknast omkring 40% av utføringskostnadane å gå til arbeid med armering. Ein delvis eller full erstatning av tradisjonell stang-armering, gir difor stort potensiale for innsparingar både ved produktivitet og kostnad. [3].

Fiberarmert betong nyttast i dag i hovudsak for golv på grunn og i sprøytebetong [8]. Det er håp om at fiberbetong også kan nyttast som både alternativ og supplement til tradisjonell armering i bærande konstruksjonar framover [8]. Difor kan problemområdet reknast som innovativ forsking. På denne måten kan prosjektets problemområde også knytast opp til FNs berekraftsmål nr. 9 om å *«fremme inkluderande og berekraftig industrialisering og innovasjon».* Særleg delmål 9.5 understrekjer viktigheita av *«vitskapleg forsking og oppgradering av teknologi»* [5].

2.3 HMS

I somme tilfelle (derav golv, veggar, ringmurar og bankettar) kan bruk av fiberarmert betong erstatte behovet for stang-armering [4]. Stang-armering er gunstig å avstå ved krevjande monteringar med uynskte arbeidsstillingar. Eit mindre fysisk belastande arbeidsmiljø kan i tillegg skape aukande rekruttering av kvinner i arbeidet som betong-arbeidar, og dermed skape betre kjønnsbalanse i bransjen[3]. Dermed kan bruk av fiberarmert betong også foreinast med FNs delmål 8.8, som poengterer det å *«fremme eit trygt og sikkert arbeidsmiljø for alle arbeidstakarar»* [5].

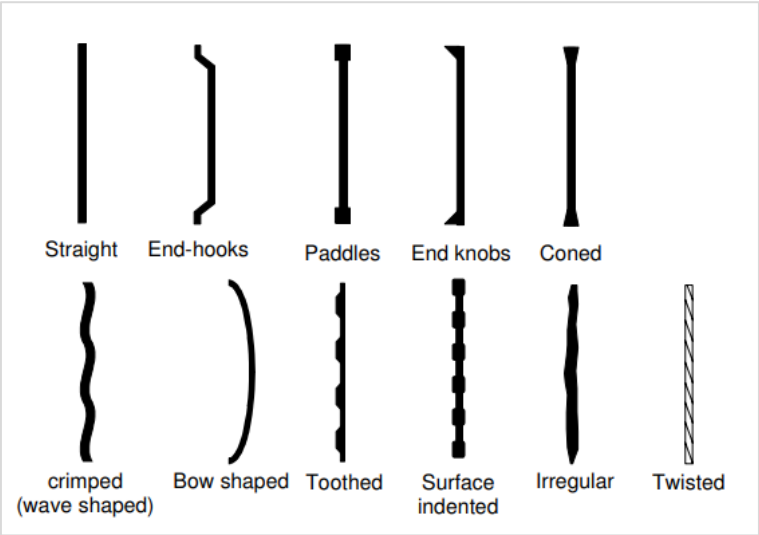
3 Kunnskapsbakgrunn

3.1 Fiberarmert betong

Årsaka til at ein ynskjer å inkludere fiber i betong er at tradisjonell betong har låg strekkfastheit og tøyingskapasitet, og difor er sårbar for riss- og sprekkdanning. Ved å tilføye fiber i betongen, vil ein kunne løyse denne problemstillinga [1]. Fiberarmert betong er difor å rekne som ein autonom sjølvhelingsmetode. Ein autonom sjølvhelingsmetode er definert som det å bruke manuelle teknikkar for å skape ein betong som har evne til å tette indre sprekkdanningar [9]. I nokre tilfelle vil fiberarmering kunne erstatte det eventuelle behovet for skjær-armering (i for eksempel pelefundamenterte botnplater). I andre anledningar gir fiberarmering mogelegheit til å redusere betongtjukkleik og omfanget av stang-armering. I tillegg kan ein i nokre golv, veggar, ringmurar og bankettar bruke fiberarmert betong utan stang-armering [4].

Foreløpig er bruk av fiberarmering for bærande konstruksjonar ikkje medrekna i EC2 [10] for prosjektering av betong. Men Norsk Betongforeining har utarbeida ein nasjonal tilvising (publikasjon nr. 38) med rettleiingar [8]. Materialtypane som i hovudsak er representert ved tidlegare studiar er: stålfiber, basaltfiber, glasfiber, karbonfiber polymerfiber (typisk PP, PA, PE og PVA) [1]. Vidare poengterer publikasjonen frå Norsk Betongforeining at materialtypane stålfibrar, polymerfibrar og ulike typar kompositt-fibrar, er aktuelle ved bruk i bærande konstruksjonar [8].

Tverrsnittet til fibrane kan være både sirkulære, flate, rektangulære, diamant-forma, kvadratiske, trekanta og mangekanta. Den tradisjonelle fiberen er heilt rett langs lengderetninga, men det er produsert fleire justeringar for å betre evna til å binde seg til omkringliggjande materiale. Difor er nokre fibrar hakkete, kveila og vridd, medan andre har innskjeringar i overflata. I somme tilfelle er geometrien berre modifisert i enden av fibrane, for å skape forankringar. Ulik geometri er presentert i Figur 3.1 [11].



Figur 3.1 Ulike typar fibergeometri [11]

Vidare er fiberarmering vanleg å tilsetje i følgande komposisjonar: sjølvkomprimerande betong (SCC), lett sjølvkomprimerande betong (LWSCC), Konstruerte sementholdige kompositter (ECC) og Ultra High Preformance Concrete (UHPC). Med dette kan ein fastslå at fiberarmering bidreg til utviding av mogelege bruksområde for betong [1].

Bruk av fiberarmering i betong betrar mekaniske eigenskapar som slagfastheit, slitestyrke motstand mot utmatting. I tillegg reduserast sannsynet for riss/svinn og permeabilitet. Samstundes betrast konstruktive eigenskapar som trykk-kapasitet, statisk bøyefastheit, skjerkapasitet og strekkapasitet. Når det er sagt, er ein avhengig av god stabilitet og støypeevne i fersk tilstand, for å kunne oppnå ein tett struktur med høg styrke i det ferdige produktet [1].

3.2 Støypeevne

Støypeevne er betongen sine eigenskapar i fersk tilstand, og er grunnleggande for korleis betongen er å handsame i form av komprimering og omarbeiding under støypeprosessen. Likevel er det store variasjonar i kva som er rekna som god og dårleg støypeevne. Krava som blir sett til støypeevne er avhengig av type struktur, transport, lokal distribusjon, støype- og komprimeringsteknikk. Eksempelvis er betong for asfaltering nokså stiv og krev mykje komprimering, medan sjølv-komprimerande betong i stor grad er flytande og ikkje har behov for komprimering [2].

Det som avgjer kva ferskeigenskapar til tradisjonell konstruktiv betong, er eigenskapane til tilslaget, sementpastaen, samt volumetriske proporsjonar mellom desse. I tillegg fører også bruk av vassreduserande-, stabiliserande- og luftinnførande tilsetningsstoff til endringar i støypeevne. Ferskeigenskapane til betongen omtalast også som reologiske eigenskapar [2].

3.2.1 Kvalitativ beskriving av støypeevne

Tabell 3.1 presenterer korleis støypeevne-konseptet er inndelt i tre reologiske eigenskapar: stabilitet, mobilitet og komprimeringsevne [2]. I tillegg er det vanleg å bruke andre uttrykk for å beskrive støypeevne [1], men alle kan knytast opp til desse tre hovudeigenskapane.

Tabell 3.1 Inndeling av konseptet støypeevne

HOVUDEIGENSKAP	*FORKLARING AV EIGENSKAPEN*	*ANDRE UTTRYKK SOM BRUKAST FOR Å BESKRIVE EIGENSKAPEN*
Stabilitet	Stabilitet handlar om evna betongen har til å oppretthalde homogenitet i fersk fase. Eigenskapane til betongen skal være like frå eit punkt i massen til eit anna, både i kvilande tilstand og under omarbeiding/transport [2]. Ved mangel på stabilitet, oppstår **separasjon**. Dette oppstår som eit resultat av for låg indre kohesjon. Ved låg indre kohesjon, er kreftene mellom partiklar i blandinga for små til å motstå at partiklar med ulik densitet sklir ifrå kvarandre [2].	Segregering (separasjon av grovt tilslag) [2] Vassutskiljing / bleeeding (separasjon av vatn) [2]
Mobilitet	Mobilitet er evna betongen har til å bevege seg (flyte) på grunnlag av kreftene som verkar på den [2]. Krefter som gir motstand for mobilitet: • Partikkelfriksjon • Kohesjon innvendig • Kohesjon (klistreevne) mot forskaling/ faste overflater • krefter som skapar indre motstand mot flyt, for eksempel store mengder grovmasse [2]	Flyteevne [1]
Komprimerings-evne	Komprimeringsevne fortel om evna betongen har til å fylle ut i forskalinga og sleppe ut eventuelle luftlommer som er innkapsla i blandinga under omarbeiding [2]. Avhenger av: • Mobilitet • Kohesjon (klistreevne) mot forskaling/ faste overflater • Tettleik • Luftinnhald • Stabilitet av holrom [2]	Fyllingsevne [1] Deformasjonsevne (evne til å endre form) [1] Passeringsevne (evne til å flyte gjennom armeringsstenger) [1]

Ved bruk av uttrykksbanken som er presentert i Tabell 3.1, beskriv ein støypeevna til betong på ein kvalitativ måte. Men når ein ynskjer å finne konkrete samanhengar, treng ein verdiar på grunnleggjande fysiske storleikar. Difor brukast vitskaplege modellar frå liknande materialar. Blant anna brukast modellar frå geoteknikk, veskemekanikk, kollogal kjemi og reologi. Både partikkelkontakt (friksjon), kohesjon og viskositet er fysiske storleikar som beskriv dei ferske eigenskapane til konstruktiv betong [2]. I dette spesialiseringsprosjektet er materialmodellen «Bingham» særleg viktig. Denne modellen er henta frå vitskapen om reologiske samanhengar.

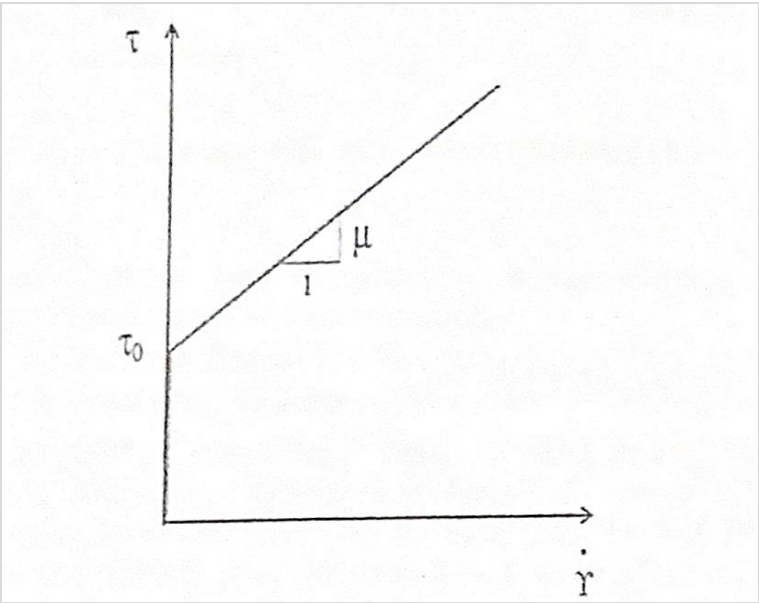
3.2.2 Bingham modellens beskriving av støypeevne

Bingham-modellen (illustrert i Figur 3.2) forklarar forhaldet mellom lokal skjær-spenning (τ) og skjær-hastigheit ($\dot{\gamma}$), og er gitt av følgande:

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \dot{\gamma}$$

- τ er lokal skjærspenning, og skildrast som motstanden mot deformasjon. Måleeininga er pascal (Pa). I engelskspråkleg litteratur omtalast dette som «shear stress» [2].
- τ_0 er flyteskjerspenninga til betongen, og skildrast som minimum spenning som må påførast for å igangsette eller oppretthalde flyt. Denne kan lesast av figuren i skjeringspunktet mellom linja og y-aksen. I engelskspråkleg litteratur omtalast dette som «yield» eller «yield shear stress» [2].
- μ_0 er den plastiske viskositeten, og skildrast som materialets motstand mot flyt, og relaterast ofte til klistreevne. Denne kan lesast av figuren som stigningstalet til linja. I engelskspråkleg litteratur omtalast dette som «plastic viscosity» [2].
- $\dot{\gamma}$ er skjer-hastigheit, og skildrast som deformasjonshastigheit eller skjerhastigheit (skjerfrekvens). Måleeininga skjerdeformasjon (γ) per tidseining ($d\gamma/dt$). I engelskspråkleg litteratur omtalast dette som «Rate of shear» [2].

Enkelt forklart vil alle materialar som er å kategorisere som ei «Bingham»-veske bli flytande etter å ha blitt belasta opp til ein gitt verdi (flyteskjærspenning τ_0). Materialar med høg flyteskjerspenning opplevast som relativt flytande. Når det gjeld fersk betong er høg flyteskjerpenning ynskjeleg fordi det lettar trykket på forskalinga, og har betre motstand mot segregering. Likevel er det behov for lågare flyteskjerspenning for effektiv pumping, plassering og konsolidering [12]. Etter materialet har oppnådd flyteskjerspenning vil materialåtferda kunne reknast som ein lineær samanheng mellom skjær-hastigheit ($\dot{\gamma}$) og lokal skjær-spenning (τ). Der endring i flyteskjerspenning per endring i skjer-hastigheit kallast plastisk viskositet μ_0 [2]. Materialar med høg plastisk viskositet (at linja har høgt stigningstal) opplevast som relativt seige og klissete. På den andre sida vil materialar med låg plastisk viskositet være utsett for segregering [12].



Figur 3.2 Bingham modellen [2]

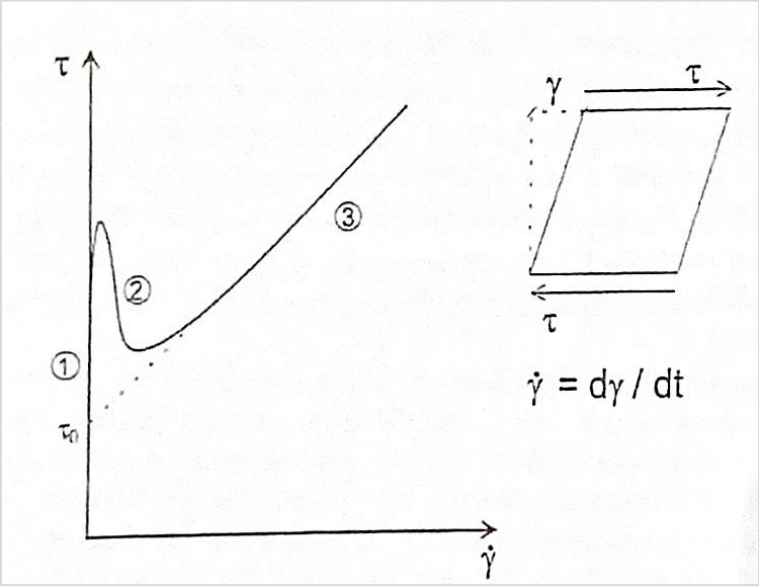
Fersk betong kan karakteriserast som ei veske som vil flyte ved påverking av skjærspenning [12]. Når ein analyserer korleis betong oppfører seg i fersk tilstand ser ein klare likskapar med bingham-modellen, og skilnaden reknast som neglisjerbar. Difor byggjer fleire test-metodar på Bingham-modellen.

Figur 3.3 illustrerer materialåtferda til betong i fersk tilstand. På same måte som i Bingham-modellen, syner x-aksen skjerhastigheit ($\dot{\gamma}$) medan y-aksen syner lokal skjærspenning (τ). Når deformasjon oppstår i område 1 i Figur 3.3, aukar skjerspenninga (τ) tilnærma lineært. Dette er på grunn av varierande bindingar mellom partiklane som gir materialet styrke. Her er det elastiske eigenskapar som dominerer. I tillegg er skjerdeformasjonen (γ) relativt liten i denne fasen, og difor kan skjer-hastigheita ($\dot{\gamma}$) neglisjerast. På eit visst nivå av skjerspenning blir den elastiske kapasiteten overskrida og det oppstår brot i form av glideplan i den ferske betongen [2].

Når ein får eit aukande tal glideplan i massen, reduserast kohesjonskreftene sidan bindingane mellom partiklane blir brotne. Dermed går betongen inn i ein plastisk fase der skjerdeformasjonen (γ) over tid aukar så mykje at ein beskriv materialeigenskapane som avhengig av deformasjonstid ($d\gamma/dt$). Aukande tal glideplan, fører til at partiklane i tilslaget orienterar seg på ein viss måte og skapar dårlegare friksjon mellom glideplana. Altså fører den aukande skjerhastigheit ($\dot{\gamma}$) til reduksjon i deformasjonsmotstanden (reduksjon i lokal skjærspenning τ), som synt i område 2 i Figur 3.3 [2].

På eit visst punkt har den ferske betongen så mange glideplan at betongen går frå plastisk til viskøs oppførsel. I denne tilstanden har betongen tilnærma lineær oppførsel mellom skjerhastigheit ($\dot{\gamma}$) og skjerspenning (τ). Område 3 i Figur 3.3 representerer denne tilstanden. Ved reduksjon av skjerhastigheit vil betongen ha tilnærma viskøs oppførsel helt til den står heilt stille. Då har betongen gått inn i en ny fase, og full kohesjon og friksjon er gjenskapt [2]. Dette er fordi partiklane gjenopprettar bindingar og skapar eit rammeverk igjen [12]. Denne siste fallande delen av kurva er

vist med stipla linje i Figur 3.3. Den lågaste skjerspenninga som trengs for å halde den ferske betongen i rørsle kallast flyteskjærspenning (τ_0) [2].



Figur 3.3 Materialadferd i fersk betong [2]

Skilnaden mellom aukande og minkande skjerhastigheit er typisk for materialar med tilnærma viskøs oppførsel og kallast tiksotropi [2]. Det at betong har tiksotropisk åtferd medfører at det krevst ei høg flyteskjerspenning for å setje i gong flyt når betongen har vore i ro, ettersom ein må bryte ned tiksotropisk struktur. Deretter trengst det ei lågare flyteskjerspenning for å oppretthalde flyt. Derfor skil ein mellom statisk og dynamisk flyteskjerspenning [12].

- Statisk flyteskjerpenning er minimum skjerspenning som trengst for å igangsette flyt frå kvilande tilstand.
- Dynamisk flyteskjerpenning er minimum skjerspenning som trengst for å oppretthalde flyt etter nedbryting av tiksotropisk struktur.

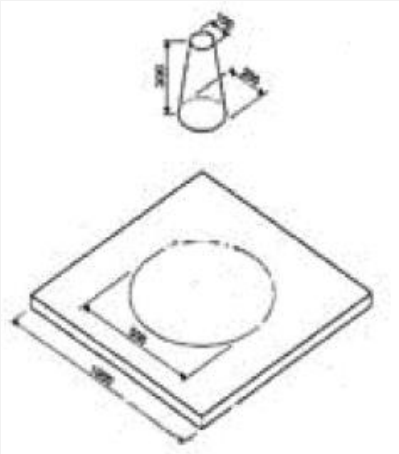
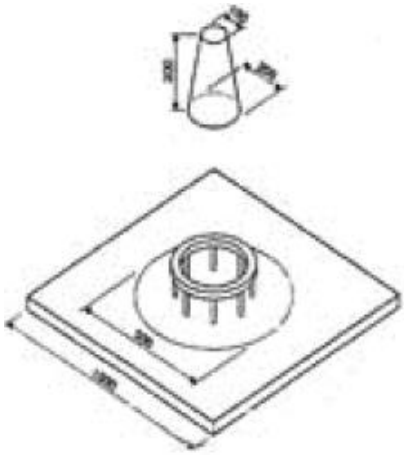
Med tida aukar både statiske og dynamiske flytespenningar ettersom effektiviteten til vassreduserande tilsetningsstoff minkar [12].

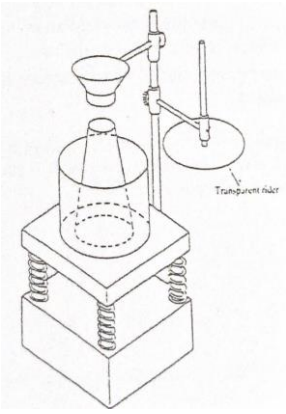
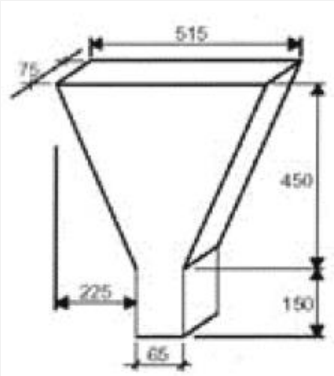
3.2.3 Testing av støypeevne

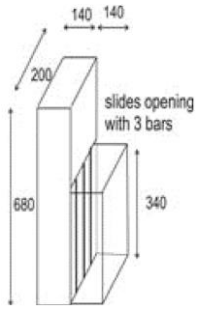
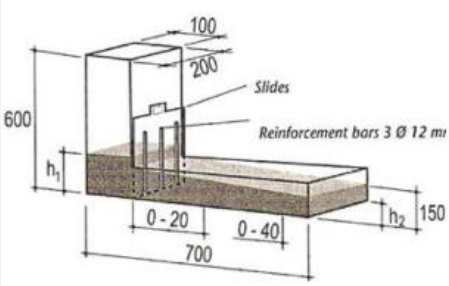
Det manglar standardisering av metodar for testing av støypeevna til fiberarmert betong. Ettersom støypeevna er avhengig av mange parameterar, er det per i dag nødvendig å bruke fleire ulike apparat og metodar for å fastslå eit tydeleg resultat [1]. Dei fleste testar for fastsetjing av støypeevne er etablert på grunnlag av praktiske erfaringar. Betongen er unikt tilpassa kvar enkelt støypeprosess, og det er difor urimeleg å basere testar på vitskaplege teoriar og modellar i mange tilfelle [2]. På den andre sida er det ynskjeleg å utvikle ein database som presenterer reologiske eigenskapar i fiberarmert betong. Dette er problematisk når reologi ikkje er grunnleggjande teori for fleire av testmetodane [2].

Tabell 3.2 presenterer enkle metodar for testing av støypeevne som er brukt i tidlegare studiar for fiberarmert betong. Tabellen framstiller korte beskrivingar av testane, samt kva resultat som er ynskjeleg å oppnå. Dette legg grunnlag for å diskutere korleis dei eignar seg for bruk i fiberbetong vidare i prosjektet.

Tabell 3.2 Enkle metodar for testing av støypeevne

TESTMETODE	*UTFØRING*	*RESULTAT*
Utbreiing frå kjegle  *Figur 3.4 Illustrasjon av utbreiing frå kjegle* [1]	Sentrerer kjegla på stiv underlagsplate med markert sirkel for 500 mm i diameter (illustrert i Figur 3.4). Fyller heile kjegla utan komprimering. Kjegla blir løfta vertikalt i ein og same bevegelse. Filmar heile operasjonen for tidtaking før oppnådd utbreiing på 500 mm. Måler deretter største utbreiings-diameter, når betongen har slutta å bevege seg (gjennomsnittet av to vinkelrette målingar) [1].	Testen måler deformasjonsevne under uavgrensa forhald. I tillegg estimerer den flyte-faktoren til betongen ved å måle maksimal spreiingsdiameter. Flyte-faktoren er relatert til flyteskjerspenning. Testen gir også indikator på fyllingsevne (evne til å fylle ut i forskalinga), der høge verdiar for spreiingsdiameter viser til god fyllingsevne [1]. T500 gir ein indikator på dynamisk viskositet, samt evna til å motstå separasjon og stabilitet [1].
J-ring  *Figur 3.5 J-ring* [1]	J-ring er ein utvida versjon av utbreiing frå kjegle. Som illustrert i Figur 3.5, blir ringen plassert rundt kjegla. Her målast høgdeforskjellen av betongmassen frå innsida til utsida av ringen [1].	Metoden gir verdiar som beskriv evne til å flyte gjennom armeringsstenger (passeringsevne), samt deformasjonsevne under avgrensa tilhøve. [1].

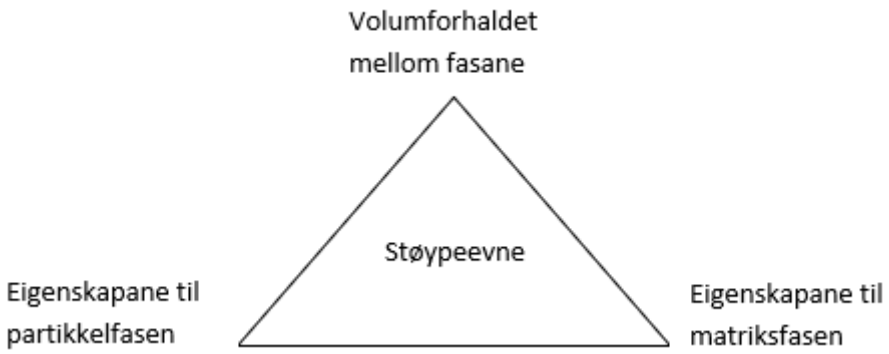
Mini-synk frå kjegle	Testen fungerer på same måte som standard synk frå kjegle, berre at den er utført med eit mindre test-apparat. I staden for maksimal utbreiingsdiameter som førstnemnte testmetode, måler ein heller høgdeforskjellen til massen [1].	Gir indikasjonar på flyteskjerspenning [1].
Ve-Be test  *Figur 3.6 Ve-Be test* [2]	Som illustrert i Figur 3.6, blir betongen fylt i ei kjegle, som er plassert i ein sylindrisk behaldar. Deretter fjernast kjegla, og ei gjennomsiktig plate blir plassert på toppen av massen. Deretter vibrerer ein behaldaren, og plata følgjer massen, medan den flyt nedover. Ein måler tida frå vibreringa startar, til betongen fyller heilt ut under plata. [2]	Ve-be testen blir brukt for blandingar med svært stiv konsistens (som omtrent står av seg sjølv etter fjerning av kjegla) [2] Testen indikerer komprimerings-evne. [2]
V-trakt  *Figur 3.7 V-trakt* [1]	V-trakt er illustrert i Figur 3.7 [1]. Trakta blir fylt med omtrent 12 liter betong. Ein måler tida betongen brukar på å flyte gjennom trakta. Ein kan også måle T_{5min}, der ein let betongen liggje i trakta i 5 minuttar for å sette seg. Dersom betongen er segregert, vil tida auke betydeleg i forhold til første test [13].	Metoden gir resultat på flyteevne og fyllingsevne. Testen gir også god indikasjon på plastisk viskositet [1] T_{5min} gir indikasjon på eventuell segregering [13].

Fyllingsbokstest  *Figur 3.8 Fyllingsbokstest* [1]	Som illustrert i Figur 3.8, har fyllingsbokstesten tett fordelte stenger som betongen skal flyte gjennom. Ein måler blokkerings-motstand som forhaldet mellom fyllingsarealet til betongen, og det totale arealet av behaldaren. Prosessen er lik L-boks, berre utan måling av horisontal flyte tid [1].	Gir verdiar som beskriv passeringsevne [1].
L-boks  *Figur 3.9 L-boks* [1]	Figur 3.9 viser L-boks testen [1]. Her fyllast den vertikale delen av behaldaren med betong. Deretter opnar ein porten inn til den horisontale delen av behaldaren. Tre armerings-stenger er plassert i opninga. Ein måler forhaldet h_2/h_1 som illustrert i figuren [13].	Gir verdiar som beskriv passeringsevne og strømmingshastigheit [1]
LCPC boks Figur 3.10 Illustrasjon av LCPC-boks [14]	Figur 3.10 illustrerer parameterane som blir målt frå boksen etter fylling frå venstre side. Betongmassen er illustrert med grå farge [14].	Måler maksimal spreiingslengd og høgde ved fyllingskant, som nyttast for karakterisering av fyllingsevne. Ved å i tillegg måle densitet av testmassen, kan ein rekne ut dynamisk flyteskjerspenning [14].

I tillegg finnast det meir avanserte test-metodar som resulterer i konkrete verdiar for reologiske eigenskapar. Desse utførast ved å teste den ferske betongen i eit instrument som kallast reometer. Generelt påfører instrumentet varierande belastning på den ferske betongen, for deretter å kunne kontrollere korleis dette påverkar reologiske verdiar. Det er eit nyttig instrument for å kunne bekrefte skilnadar i materialåtferd som oppstår ved bruk av ulike bestanddelar i komposisjonen [1]. I det eksperimentelle forsøket som er utført for denne oppgåva, er reometeret frå leverandøren ICAR brukt [12]. Utover dette finnast det fleire andre alternativ på marknaden, deriblant er følgande instrument brukt ved tidlegare studiar: *«ConTec BML Viscometer, Rheometer CAD, BTRHEOM rheometer, Brookfield DV III ULTRA, Brookfield RST-SST, Heidolph RZR 2102, Viskomat rheometer»* [1].

3.3 Partikkel-matriks metoden

Partikkel-matriks metoden (PMM) er ein materialmodell som beskriv forhaldet mellom støypeevne og betongproporsjonering. Metoden brukast både for standard konstruksjonsbetong og for sjølv-komprimerande betong. Det som kjenneteiknar metoden, er at dei ulike komponentane i betongblandinga blir gruppert i to fasar (matriksfasen og partikkelfasen). Støypeevna til betongen kjem som eit resultat av eigenskapane til matriksfasen, eigenskapane til partikkelfasen og volumforhaldet mellom fasane. Figur 3.11 skisserer dette forhaldet.[2]



Figur 3.11 Partikkel-matriks modellen[2]

Matriksfasen er å betrakte som ein tung tjuktflytande veske i betongen, og har som formål å omringe dei faste partiklane og fylle alle holrom i tilslaget. Fasen består av dei minste partiklane, altså partiklar mindre enn 0,125 mm. Det vil seie sement, tilslag (< 0,125mm), fritt vatn og eventuelle tilsetningsstoff og tilsetningsmaterialar. Partikkelfasen er derimot å beskrive som eit friksjons-materiale. Fasen består av alle partiklar som er større enn 0,125 mm, og utgjer difor dei resterande delane av tilslaget. Vatnet som er absorbert i tilslaget, er også ein del av partikkelfasen [2].

3.3.1 Alternativ metode og kvifor ein vel å bruke PPM

Thaulow metoden er ein annan metode for betongproporsjonering. I motsetnad til PPM, vurderer ein med denne metoden kvar enkelt komponent for seg sjølv (utan grupperingar/fase-inndeling). Dette leier til ei mangelfull forståing av korleis kvar av dei ulike komponentane påverkar støypeevna til betongen [2].

4 Forskingsspørsmål

Rapporten skal gi svar på følgande hovudproblemstilling:

Korleis vil ulike mengder stålfiber påverke betongen sine ferskeigenskapar?

For å byggje opp under forskingsspørsmålet er det i tillegg utarbeida fire underspørsmål. Med dette skal følgande spørsmål svarast på:

- *Kva resultat oppnåast ved eksperimentelle forsøk på laboratoriet?*
- *Kva har andre studiar om stålfiber i betong konkludert med?*
- *Kva metodar er hensiktsmessige å bruke for å måle ferskeigenskapar i fiberarmert betong.*
- *korleis kan resultat frå eksperimentelle forsøk og litteraturstudium foreinast med partikkel matriks metoden?*

4.1 Avgrensing

Det eksperimentelle forsøket er avgrensa til berre å gjelde stålfibrar, men ved samanlikning mot litterære kjelder, kan tendensar ved bruk av andre materialtypar også takast i bruk. I tillegg må det eksperimentelle forsøket på laboratoriet nødvendigvis avgrensast med omsyn til tidsbruk. Det skal utarbeidast eit forsøk som kan gjennomførast på to dagar.

Korleis betongen oppfører seg i herda tilstand, er ikkje vist omsyn til. Spesialiseringsprosjektet rettar seg berre mot ferskeigenskapar.

5 Case og materialar

5.1 Forskingsprosjektet FiberCon

Innovasjonsprosjektet FiberCon er utgangspunktet for spesialiseringsprosjektet. Prosjektet er eit samarbeid mellom elleve bedrifter innanfor byggenæringa, to universitet (UiA og NTNU), samt forskingsinstituttet SINTEF. Målet med prosjektet er å skape innovasjon innanfor bruk av fiberarmering, ved etablering av metodar for proporsjonering, produksjon og støyping av fiberbetong mfl.. Den overordna idéen er å skape betydeleg effektivisering av produktivitet og økonomi ved å utnytte fiberarmering i betongkonstruksjonar. I tillegg vil ein ved hjelp av rasjonelle, brukarvennlege og digitaliserte løysingar kunne løyse utfordringar knytt til kontrollarbeid, berekraft og arbeidsmiljø [3].

5.1.1 Resultatnotat per desember 2021

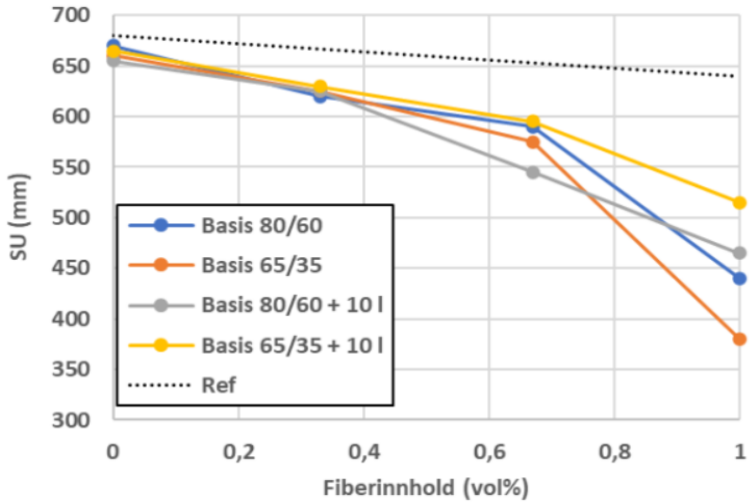
Dokumentet «Resultatnotat per desember 2021», er overlevert frå rettleiar av spesialiseringsprosjektet. Skrivet legg fram ein presentasjon av eit forsøk som er gjennomført i samanheng med FiberCon-prosjektet, inkludert korte forklaringar av utføring og resultat. Forsøket går ut på å teste sjølvkomprimerande fiberbetong sine ferskeigenskapar ved tilsetning av 0%, 0,33%, 0,66% og 1% fiber. Testande er gjennomført med to ulike fibertypar: Dramix 80/60 3D og to med Dramix 65/35 3D. I tillegg er alle testane gjennomført ved bruk av ein basis-resept for sjølvkomprimerande betong, men også med ein modifikasjon av basis-resepten der det er tilsett 10 liter matriks per kubikk. Dette dokumentet er eit serdeles viktig utgangspunkt for gjennomføring av oppgåvas eksperimentelle forsøk på lab, og brukast også som samanlikningsgrunnlag i diskusjonsdelen av oppgåva. [15]

Tabell 5.1 er eit utklipp frå resultatnotatet som syner basis-resepten som er brukt i forsøka. Dette er ein M60 resept. Den viste seg å være ein god referanse for forsøket, men kunne moglegvis vore justert for å oppnå ein utbreiingsdiameter frå kjegle på 700 mm, med 0% fiberinnhald. (Resepten resulterte i ein utbreiingsdiameter på 680 mm, med 0% fiberinnhald). [15] Modifisert resept med matrikstilsetning er ikkje vist i resultatnotatet.

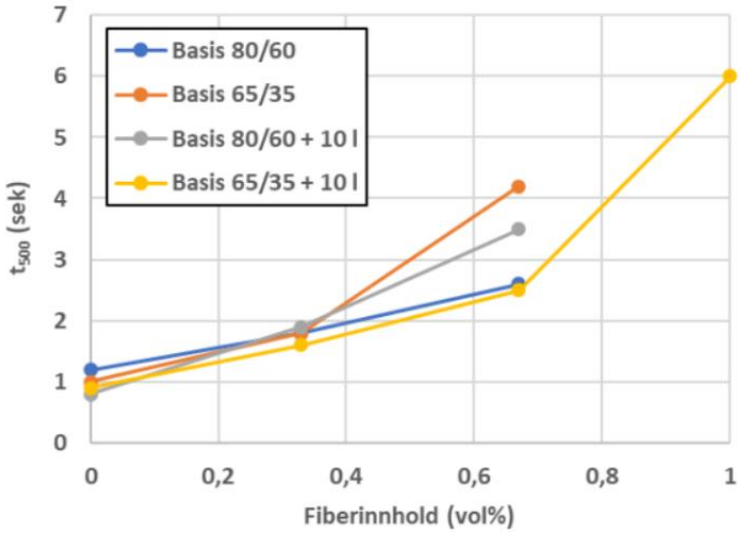
Tabell 5.1 Basis-resept for FiberCon forsøk [15]

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

Figur 5.1 syner forsøket sine resultat på maksimal utbreiingsdiameter frå kjegle, medan Figur 5.2 syner resultat på T500-test. Testresultata indikerer reduksjon i støypeevne ved gradvis auke av fiberinnhald. I tillegg fastslår resultata at ekstra matriks gir noko betre støypeevne. Ettersom bruk av dei 80/60 fibrane gir stor separasjon i blandinga, skapar dette forstyrringar i målingane. [15]



Figur 5.1 FiberCon-forsøket sine resultat på maksimal utbreiingsdiameter frå kjegle [15]



Figur 5.2 FiberCon-forsøket sine resultat på T500-test [15]

I tillegg er det observert aukande grad av separasjon med aukande fiberinnhald, der tilslaget og fibrane dannar nettverkstruktur og dermed resulterer i ein ujamn utbreiingssirkel. Resultatdokumentet påpeikar difor at dei ynskjer å undersøkje bruk av «LCPC-boks» i vidare arbeid, som eit betre alternativ til utbreiing og T500 frå kjegle [15].

5.2 Laboratoriemateriell og dataprogram

5.2.1 Materialbruk i eksperimentelt forsøk på laboratoriet

Først og fremst er det nytta materialar for å komponere betong. Materialar og mengder er synt i Tabell 5.2. Merk at behovet for Reddal 0/8 (< 0,125 mm) utgjer 4,14% av 0/8 tilslaget. Dette innhaldet er skilt ut av 0/8 tilslaget ved sikting for riktig resultat.

Tabell 5.2 Materialmengder

	MENGDE PER BLANDING [KG]				
MATERIALAR	*F1 - BASIS RESEPT*	*F2 - TILSATT 20 L MATRIX*	*F3- TILSATT 15 L MATRIX*	*F4 - TILSATT 12,5 L MATRIX*	***SUM [KG]***
Rapid Aalborg	7,700	8,077	7,982	7,935	31,694
Elkem Microsilica 971u	0,515	0,540	0,534	0,531	2,120
VELDE finfiller 0,0725	2,553	2,678	2,647	2,631	10,509
Fritt vann	4,798	5,032	4,974	4,944	19,748
Sp stoff Mapei Dynamon Xtend U-100	0,122	0,128	0,126	0,126	0,502
MAPETARD R	0,031	0,032	0,032	0,032	0,127
Reddal 0/8 mm	25,060	25,060	25,060	25,060	100,240
Reddal 0/8 (< 0,125 mm)		0,051	0,038	0,032	2,923*
Årdal 8/16 mm	17,435	17,435	17,435	17,435	69,740
Dramix 4D	0,577	0,577	0,577	0,577	2,308

* Treng 0,121 kg årdal 0/8 (< 0,125 mm) men dette er berre 4,14% av 0/8 tilslaget.
Treng difor: 2,923 kg

5.2.2 Testutstyr

I tillegg til materialar er det naturlegvis nytta laboratoriemateriell for å blanding og testing av betongen. Tabell 5.3 er ei oversikt over utstyret som er nytta i dei ulike testmetodane.

Tabell 5.3 Testutstyr som er nytta i eksperimentelt forsøk

	KJEGLE	*LCPC-BOKS*	*REOMETER*
Klargjering	Rikeleg med vatn for spyling og reinsing av alt utstyr, samt tørkehandklede for fjerning av overflødig fukt.	Rikeleg med vatn for spyling og reinsing av alt utstyr, samt tørkehandklede for fjerning av overflødig fukt.	Rikeleg med vatn for spyling og reinsing av prøvebehaldar, samt tørkehandklede for fjerning av overflødig fukt.
Hovudutstyr	Kjegle: Diameter topp = 100 mm Diameter botn = 200 mm Høgde = 300 mm Stiv plate som underlag med sirklar som måler diameter.	Rektangulær boks med pleksiglas i kvar lengderetning	• Behaldar for maksimalt 19 mm tilslag [12] • Visp med fire knivar [12] • Ramme [12] • Reometer [12]
Utstyr for måling	Linjal Stoppeklokke / mobiltelefon for filming	Linjal Vekt og ein behaldar på 6 liter med kjent vekt for måling av densitet	Datamaskin med tilhøyrande program som utfører og registrerer resultatet frå testane, samt lagrar resultatfiler.

5.2.3 Dataverktøy

Det tilhøyrande dataverktøyet til rheometeret nytta for å kunne styre og fastslå testresultat. I tillegg er Excel nytta for å modifisering av resept, samt for å skape presentable tabellar og grafar for forsøksresultata.

6 Metode

Resultata er først og fremst henta frå utføring av eksperimentelle forsøk på laboratoriet. I tillegg er det henta inn resultat frå tidlegare arbeid via litteraturstudium. Vidare følgjer beskriving av prosedyrar for lab-gjennomføring, og deretter metodikk for utføring av litteraturstudium.

6.1 Eksperimentelt forsøk på laboratoriet

Det er utført fire forsøk med same framgangsmåte, der ulike mengder matriks er tilsett i resepten. Vidare følgjer eit nummerert samandrag i korte trekk, som forklarar korleis forsøket er gjennomført for kvar av reseptane.

1) Veg opp alle materialar (+/- 1 gram)
2) Køyrer ei blanding med ei bøtte vatn, samt ei måleskje sement for å justere PH-verdien i blandemaskina. Dersom ein startar blandinga i tørr blandemaskin er det fare for at betongen vil oppføre seg annleis enn dersom blandemaskina nettopp blei brukt. Denne blandinga hellast ut igjen før ein startar blandeprosessen med materialane i resepten.
3) Køyrer resepten gjennom blandeprosedyren.
4) Testar blandinga med kjegle (måler utbreiingsdiameter og T500), LCPC-boks (måler densitet, spreiingslengd og høgde ved fylling) og reometer (måler statisk flytespenning, dynamisk flytespenning og viskositet).
5) Heller blandinga tilbake i blandemaskina.
6) Køyrer blandemaskina i 15 sekund, før ein tilset 0,33% fiber gradvis under blanding i 2 minutt. Gjennomfører steg 4 og 5 igjen.
7) Steg 6 gjentakast 2 gongar til.

Forsøka blei gjennomført over to dagar. Første dag måtte basis-resepten justerast ved tilsetning av SP og finfiller som forklart i kapittel 6.1.1. Direkte etter justering av resepten blei den testa i kjegle, LCPC og reometer, både utan og med fiber (som forklart i punkt 4-7 i samandraget ovanfor).

Neste dag blei steg 1-7 gjennomført for tre ulike reseptar. Det var ynskjeleg å finne ei passande mengde matrikstilsetning, slik at testane med fiberinnhald kunne resultere i like gode ferskeigenskapar som utan fiberinnhald. I det første forsøket blei det nytta ein modifikasjon av basis-resepten med matrikstilsetning på 20 l/m^3. Korleis basisresepten blir modifisert er forklart under kapittel 6.1.2. Ettersom resultata i første forsøk viste seg å være langt betre enn basis-resepten utan tilsett fiber, blei det brukt ei mindre matrikstilsetning på 15 l/m^3 i neste forsøk. Også denne resepten viste seg å gi langt betre resultat enn basis-resepten utan tilsett fiber. Difor blei det siste forsøket gjennomført med ei matrikstilsetning på 12,5 l/m^3.

6.1.1 Basis-resept

Prosedyren for gjennomføring og testing på laboratorium, er etablert på grunnlag av FiberCon prosjektet sitt resultatnotat per desember 2021 [15]. Det var ynskjeleg å gjennomføre eit laboratorium-program, der resultata er samanliknbare med FiberCon sine resultat. Difor er basis-resepten som er nytta i forsøket, ein justering av resepten til FiberCon. Justeringar måtte utførast på grunn av manglande tilgang på materialar. I staden for Norcem Standard FA sement, er det heller brukt Rapid Aalborg. I tillegg er kalksteinfiller (VK150) erstatta med VELDE finfiller, og Årdal 0/8 mm

er erstatta med det lokale tilslaget Reddal 0/8. FiberCon har i tillegg nytta både fibertype Dramix 3D 80/60 og Dramix 3D 65/35. Ettersom ingen av desse var tilgjengeleg på laboratoriet, blei Dramix 4D 65/60 brukt i staden. 4D- fibrar har noko større modifikasjonar på geometrien i enden av fiberen. I tillegg presenterer talet framfor brøkstreken fibrane sitt lengde/diameter-forhold (aspect ratio), medan talet bakom brøkstreken presenterer lengda på fibrane [16], [17].

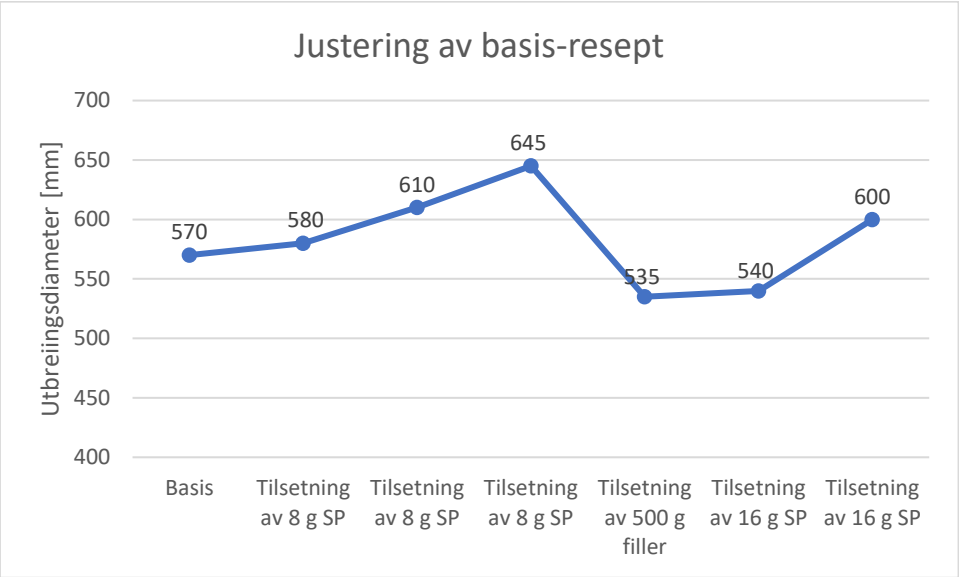
Det var vanskeleg å seie korleis desse justeringane ville påverke støypeevna til basis-resepten. Det er difor valt å justere ned mengda superplastiserande stoff (SP) til 80% av opphaveleg mengde, slik at ein har større rom for å gjere eventuelle justeringar, og dermed kunne oppnå passande flyteevne på basis-resepten. Vidare blei det avklart at det også er behov for tilsetning av retarder, etter samtale med rettleiar av prosjektet og teknologileiar frå lokal betongleverandør. Ettersom gjennomføring av forsøket vil vare over lang tid, er det ikkje ynskjeleg å tape støypeevne som eit resultat av denne tidsbruken. Difor er det tilsett Mapetard R (0,4% av sementvekt) som har ein svakt vannreduserande effekt. Tabell 6.1 syner oppstarts-resepten der justeringane av materialar i forhald til FiberCon-resepten er utført.

Tabell 6.1 Oppstarts-resept basert på FiberCon prosjektet sin basis-resept

MATERIALAR	*MENGDE [KG/M^3]*	*MENGDE [KG/25 L]*
Rapid Aalborg	308	7,700
Elkem Microsilica 940u	20,6	0,515
VELDE finfiller 0,0725	82,1	2,053
Fritt vann	191,9	4,798
Sp stoff Mapei Dynamon Xtend U-100	2,64	0,066
MAPETARD R	1,232	0,031
Reddal 0/8 mm	1002,4	25,060
Årdal 8/16 mm	697,4	17,435

På første forsøksdag blei det kjent ved første forsøk at basis-resepten ikkje hadde tilstrekkeleg flyteevne. Basert på utbreiingsdiameter i kjegle, blei resepten modifisert ved tilsetning av SP og finfiller. Justeringsprosedyren er illustrert i Figur 6.1. Ved første blanding resulterte utbreiingsdiameteren i 570 mm. Difor blei det tilsett 8 gram SP før ny test (8 gram svarar til 10% av opphaveleg mengde i FiberCon-resept på 3,3 kg/m^3). Ved tilsetning av SP blei betongen blanda i 2 minutt før ny test. Denne justeringa måtte utførast på same måte tre gongar til, før utbreiingsdiameteren nådde 645 mm. På dette tidspunktet var det stor separasjon i blandinga. Difor blei det tilsett 0,5 kg filler. Dette reduserte flytteevna til ein utbreiingsdiameter på 535 mm. Dermed måtte det setjast i gong ny justering med SP, for å betre flyteevna igjen. Difor blei det tilsett 16 gram SP før ny test (16 gram svarar til 20% av opphaveleg mengde i FiberCon-resept på 3,3 kg/m^3). Etter to rundar med 16 gram tilsetning, resulterte utbreiingsdiameteren på 600 mm. På dette tidspunktet blei blandinga vurdert til å sannsynlegvis ville få stor separasjon igjen ved ytterlegare tilsetning av SP.

Difor falt valet på å gå vidare med denne resepten, sjølv om den ikkje oppnådde same resultat som FiberCon på 680 mm. [15]



Figur 6.1 Modifisering av resept ved tilsetning av SP og finfiller (basert på utbreiingsdiameter)

Til slutt innehaldt basis-resepten difor ytterlegare 56 g SP, det resulterer i eit totalinnhald på 122 g per 25 l blanding (4,88 kg/m^3). I tillegg auka innhaldet Velde finfiller med 500 gram, det resulterer i eit totalinnhald på 2,553 kg per 25 l blanding (102,12 kg/m^3). Den endelege basis resepten er synt i Tabell 6.2.

Tabell 6.2 Endeleg basis resept etter justering med SP og finfiller

MATERIALAR	*MENGDE [kg/m^3]*	*MENGDE PER BLANDING [kg^3/25 l]*
Rapid Aalborg	308	7,700
Elkem Microsilica 940u	20,6	0,515
VELDE finfiller 0,0725	102,12	2,553
Fritt vann	191,9	4,798
Sp stoff Mapei Dynamon Xtend U-100	4,88	0,122
MAPETARD R	1,232	0,031
Reddal 0/8 mm	1002,400	25,060
Årdal 8/16 mm	697,400	17,435

6.1.2 Matrikstilsetning

I tillegg var det hensiktsmessig å utføre fleire forsøk med ulike mengder matrikstilsetning. Dette fordi det var ynskjeleg å finne ei passande mengde matrikstilsetning, slik at testane med fiberinnhald kunne resultere i like gode ferskeigenskapar som utan fiberinnhald. Dette er eit viktig diskusjonsgrunnlag for prosjektet sitt siste underspørsmål: det å finne samanhengar mellom fiberarmert betong og partikkel matriks metoden. Basert på FiberCon sine resultat, er det tydeleg at tilsetning av ytterlegare 10 liter matriks per kubikk, er langt frå tilstrekkeleg. [15] Det å oppnå like stor utbreiingsdiameter i kjegle og tilsvarande strømmingstid (T500-testen) som basis-resepten fekk utan fiber, ser ut til å krevje langt meir matriks enn 10 l/m^3. Dette er grunnlaget for at ein i dette prosjektet, heller tar sikte på å tilsetje 20 l/m^3, for så å justere opp eller ned matrikstilsetninga ved neste forsøk igjen.

Det blei utarbeida eit Excel-dokument der ein kan justere basis-resepten med ulike mengder matriks-tilsetning. Resepten måtte delast inn i matriksfase og partikkelfase, der alle partiklar større enn 0,125 mm høyrer til partikkelfasen, medan resten kjem inn under matriks. Dette oppsettet er presentert i Tabell 6.3. Ettersom det fine tilslaget «Reddal 0/8» inneheld fraksjonar i begge fasar, måtte innhaldet siktast for å skilje ut matriksinnhaldet. 6 kg tilslag blei sikta, der 248,2 g trengte gjennom sikta for 0,125 mm. Det vil seie at tilslaget inneheld 4,14 % finstoff mindre enn 0,125 mm. FiberCon [15] brukar Årdal 0/8, som inneheld 5% matriksinnhald [2].

Dermed måtte alle densitetar oppsporast for å kunne rekne ut volumet som kvar enkelt komponent utgjer. Densitetane for Rapid Aalborg [18], Elkem Microsilica 940u [19], Sp stoff Mapei Dynamon Xtend U-100 [20] og MAPETARD R [21] er funne via produktblad, og reknast difor som relativt nøyaktige. Samstundes var det vanskeleg å få tak i densiteten for VELDE finfiller 0.0725, og denne blei funnen via ein studie utført ved NTNU [22], og reknast difor som nokså usikker. I tillegg er densiteten til «Årdal 0/8» og «Årdal 8/16» oppgitt i kompendiumet «Concrete Technology 1. TKT 4215»[2]. Densiteten til «Reddal 0/8» er antatt å være den same som «Årdal 0/8».

Dette resulterer i eit totalt volum av matriksfasen på 408,9 l/m^3, samt eit totalt volum av partikkelfasen på 625,8 l/m^3. Vidare gir dette eit totalt volum av begge fasane på 1034,9 l/m^3. Det totale volumet av begge fasane skulle med rett ha vore 1000 l/m^3, og gir difor ein liten feilmargin ved bruk i vidare utrekningar. Eksempelvis, når resepten blir modifisert til å ha ei tilsetning på 20 l matriks per 1000 l (1m^3), har den eigentleg ei tilsetning på 20 l matriks per 1034,6 l. Denne skilnaden reknast som neglisjerbar.

Tabell 6.3 Basis resept med inndeling i matriks- og partikkelfase

FASE	*MATERIALAR*		*MENGDE [kg/m³]*	*DENSITET [kg/m³]*	*VOLUM [l/m³]*	*VOLUM, FASE [l/m³]*
Matriks	**Rapid Aalborg**		308	3140	98,089	408,9
	Elkem Microsilica 940u		20,6	350	58,857	
	VELDE finfiller 0,0725		102,12	2640	38,682	
	Fritt vann		191,9	1000	191,900	
	Sp stoff Mapei Dynamon Xtend U-100		4,88	1070	4,561	
	MAPETARD R		1,232	1100	1,120	
	Reddal 0/8 mm	4,14% < 0,125	41,499	2650	15,660	
Partiklar	**Reddal 0/8 mm**	(100 - 4,14) % > 0,125	960,90	2650	362,604	625,8
	Årdal 8/16 mm		697,4	2650	2 63,170	
					SUM	1034,6

Med dette utgangspunktet kan ein rekne ut kor mykje som skal tilsettast frå kvar av bestanddelane i matriks-fasen ved forskjellige mengder matrikstilsetning. Eksempelvis, ved tilsetning av 20 l/m³, kan ein rekne ut behovet for sement på følgande måte:

$$Sementbehov\ ved\ 20\ \frac{l}{m^3}\ matrikstilsetning = \frac{308\ \frac{kg}{m^3} * 20\ \frac{l}{m^3}}{408{,}9\ \frac{l}{m^3}} = 15{,}066\ \frac{kg}{m^3}$$

I den modifiserte resepten med matrikstilsetning på 20 l/m³, må difor 15,066 kg/m³ adderast med den orginale mengda sement i basis-resepten (308 kg/m³), og resulterer i eit sementbehov på 323,066 kg/m³. Dette utførast på same måte for dei andre bestanddelane. Heile den modifiserte resepten med matrikstilsetning på 20 l/m³ er presentert i Tabell 6.4.

Tabell 6.4 Modifisert resept med matrikstilsetning på 20 l/m³

MATERIALAR	*MENGDE [kg/m³]*	*MENGDE PER BLANDING [kg³/25 l]*
Rapid Aalborg FA	323,066	8,077
Elkem Microsilica 971u	21,608	0,540
VELDE finfiller 0,0725	107,115	2,678
Fritt vann	201,287	5,032
Sp stoff Mapei Dynamon Xtend U-100	5,119	0,128
MAPETARD R	1,292	0,032
Reddal 0/8 mm	1002,400	25,060
Reddal 0/8 (< 0,125 mm)	2,030	0,051
Årdal 8/16 mm	697,400	17,435

Det endelege utkastet av Excel-dokumentet inkludert basis resept, samt dei tre forskjellige matrikstilsetningane som blei brukt i forsøket ligg vedlagt.

6.1.3 Blandingsprosedyre

Før det reelle forsøket, blei det gjennomført ein dag med testing av prosedyre og utstyr på laboratoriet. På denne dagen blei prosedyren frå «NS-EN 1s96-1:2016» forsøkt brukt, men gav store komplikasjonar med at tørre partiklar samla seg rundt kanten av blandemaskina. Difor blei det heller nytta ein blandingsprosedyre som blei tildelt frå teknologileiar i lokal betongleverandør ved gjennomføring av det reelle forsøket. Denne blandingsprosedyren gjennomførast på følgande vis:

1) Miks alt tilslaget saman med omtrent halvparten av vatnet i 2 minutt.
2) Medan maskina er i gong: bland ut «Mapei Dynamon Xtend U-100» i det resterande vatnet (det anbefalast å skole heile begeret med SP i bøtta med vatn for å få ut alt innhaldet)
3) Tilsett vatnet med SP, samt resten av dei oppmålte bestanddelane i miksaren og miks i nye 2 minutt.
4) Stopp maskina, og la blandinga kvile i 2 minutt.
5) Start blandemaskina igjen, og la den blande i nye 2 minutt.

Ved fibertilsetning er det brukt same framgangsmåte som i FiberCon, der ein køyrer blandemaskina i 15 sekund, før ein tilset fiber gradvis under blanding i 2 minutt. [15]

6.1.4 Testing ved bruk av kjegle

Følgande prosedyre er brukt for testing av maksimal utbreiingsdiameter frå kjegle, samt T500 (tida som brukast til betongen når 500 mm i diameter):

- Reingjering og tørking av kjegle og underlagsplate med våt klut, og fjern overflødig fuktigheit.
- Sentrer kjegla i sirklane og stå på fotstykket på kjegla slik at den ikkje bevegar seg.
- Tilset blandinga, og fyll heile kjegla i ein operasjon. Stryk av overflødig betong på toppen.
- Ikkje la kjegla stå i meir enn 30 sekund (fjern eventuell søl på underlagsplata).
- Løft kjegla vertikalt av i ein bevegelse.
- Bruk stoppeklokke, start tida straks etter kjegla misser kontakt med plata. (Det aller beste er å filme testen, og registrere T500 i etterkant)
- Mål deretter største utbreiings-diameter, når betongen har slutta å bevege seg. Mål også i andre retning (90 grader på førre måling). Bruk gjennomsnittet av desse.
- Hell blandinga over i neste test
  [23]

6.1.5 Testing ved bruk av LCPC-boks

Følgande prosedyre er brukt for testing av maksimal spreiingsdiameter i LCPC boks:

- Reingjering og tørking av boksen før bruk.
- Ha betong i ein behaldar på 6 liter med kjent vekt, og mål vekta av betongen. Densiteten reknast ut ved å multiplisere betongens vekt (utan behaldar) med 1000, for så å dele på volumet av behaldaren. [14], [24]
- Hell blandinga direkte frå behaldaren med jamn hastigheit frå eine enden av boksen. [14]
- Vent deretter til blandinga har spreidd seg ut i boksen og ikkje lenger bevegar seg.
- Sjå gjennom pleksiglaset, registrer spreiingslengde.
- Stikk ein linjal ned langs fyllingskanten av boksen, og registrer høgda på betonghaugen.
- Hell blandinga over i neste test.

Måling av densitet og høgda ved ifylling av boksen utførast for å kunne rekne ut dynamisk flytespenning. [14], [24]

6.1.6 Testing ved bruk av ICAR reometer

ICAR reometeret utfører to testar: spenningsvekst (Stress Growth Test) og flytekurve (Flow Curve Test). Før ein startar testing er det serdeles viktig å kople saman alt utstyret og nullstille reometeret i tom behaldar. Deretter kan ein helle prøveblandinga i behaldaren til den dekkjer dei kvite rillene langs kanten på behaldaren. [12]

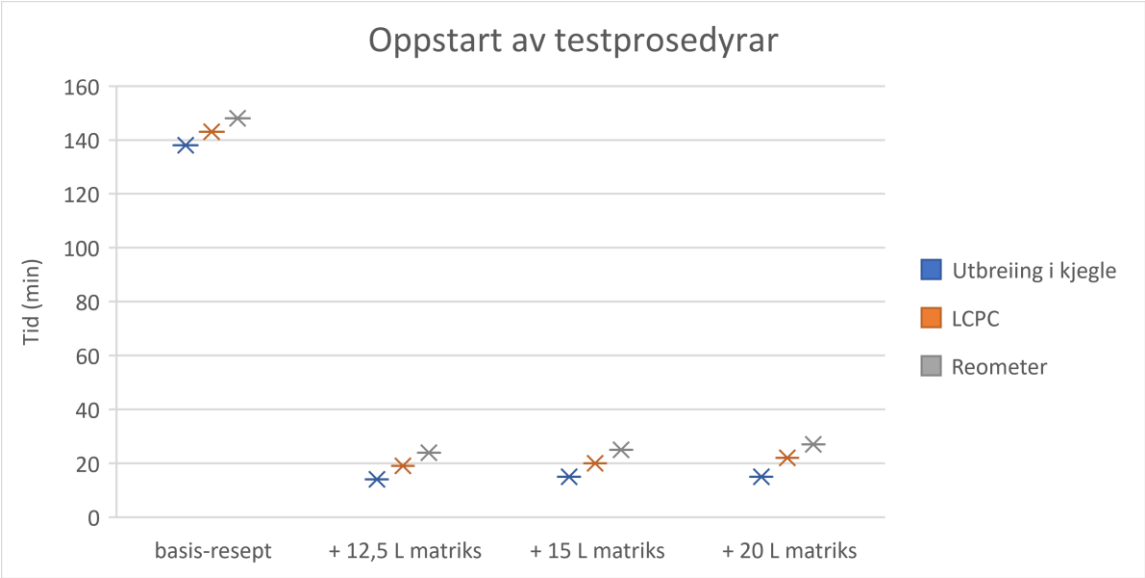
Spenningsvekst (Stress Growth Test) måler statisk flytespenning, ved å rotere vispen i låg hastigheit medan ein måler vekst av spenning. Testen er forhandsinnstilt til å rotere på 0.5 omdreiingar per sekund. Dette er passande for dei aller fleste betongtypar. Når ein startar testen, dukkar opp ein graf i dataverktøyet. Grafen vil auke gradvis opp til eit maksimum, før den daler nedover. Når den har

nådd maksimum kan ein trykke «finish». Resultatet visast under grafen, og gir indikatorar på maksimum dreiemoment og statisk flytespenning. [12]

Flytekurve (Flow Curve Test) vil køyre vispen i sju ulike hastigheiter. Alt mellom 0 og 0.6 omdreiingar per sekund. Hastigheits-parameterane er forhandsinnstilt, slik at dei passar dei aller fleste betongtypar. Når ein startar testen, måler dataverktøyet nedbrytingstid og nedbrytingshastigheit av tiksotropiske samansetningar. I denne perioden roterer vispen med full hastigheit. I nedbrytingsfasen er føremålet å oppnå ei oversikt av skjær-påverking. Denne nyttast vidare til fastsetjing av verdiane i Bingham modellen (dynamisk flytespenning og plastisk viskositet (V)). Resultatet av testen gir også relative parameterar som fortel kor godt resultata er tilpassa ei rett linje i forhald til dreiemoment og rotasjonshastigheit. I tillegg fastslår testen ein verdi som kallast «Mean Square Error» som burde liggje så nært talet null som mogeleg. Samt verdien «R2» for nøyaktigheit av lineær kurve, som burde liggje så nært talet 1 som mogeleg.[12]

6.1.7 Tidsbruk

Med unntak av basis-resepten blei oppstart av testing starta på omtrent same tidspunkt (sett i forhald til oppstart av blandeprosess). Figur 6.2 framstiller tidspunkt for oppstart av kvar test-metode ved testing utan fiberinnhald. Grunnen til at oppstart av testprosedyrane for basis-resepten starta lenge etter oppstart av blandeprosess, er på grunn av justering av resepten i forkant (Sjå Figur 6.1).



Figur 6.2 Oppstart av testprosedyrar

Frå figuren kan ein også sjå at det er liten skilnad i oppstarttidspunktet for kvar test-metode, ved samanlikning mellom blandingane med 12,5-, 15- og 20- liter matrikstilsetning. Det er også registrert at oppstart av testprosedyrar med tilsetning av 0,33%, 0,66% og 1% fiberinnhald, har maksimal skilnad på 5 minuttar, når det gjeld blandingane med 12,5-, 15- og 20- liter matrikstilsetning.

Total tidsbruk for gjennomføring av heile forsøket med basis-resept (inkludert justering i forkant) ligg på omtrent 3,5 timar. Gjennomføring av heile forsøket for dei tre andre blandingane hadde ei omtrentleg total varigheit på 1,5 time.

6.2 Litteraturstudium

I litteraturstudiet er det blant anna undersøkt kva som er gjort av tilsvarande forsking, for å kunne danne eit samanlikningsgrunnlag med det eksperimentelle forsøket. Vidare blei det forsøkt å finne foreiningar med partikkel-matriks metoden. Kjeldene frå litteraturstudiet er i tillegg nytta for generell teori i kunnskapsbakgrunn.

Litteraturstudiet blei gjennomført ved hjelp av teknikkar frå kurset "Academic Information seeking", som er utvikla av universitet i København [25]. Det blei kun brukt nettbaserte søkemotorar: Google Scholar og Scopus. For å snevre inn søket er det blant anna brukt informasjonssøk med «boolske operatorar» [25]. Det er i tillegg lagt inn avgrensingar i søket med omsyn til alder, der kravet er sett til fem år. I tillegg baserast søket på open tilgang via UiA. Fleire søkeresultat blei forkasta på grunnlag av tittel, medan nokre blei vurdert grundig. Funn frå søket som blei rekna som særleg aktuelle, er registrert i søkehistorie (Vedlegg 2).

Etter kvart førte litteratursøket fram til ei omfattande litteraturgjennomgang [1]. Artikkelen er ei sterk kjelde med grundig gjennomgang av tidlegare litteratur. Den inkluderer komplette forklaringar, og gir grunnlag for å diskutere både hovudproblemstilling og underspørsmål i dette spesialiseringsprosjektet. Difor blei andre aktuelle søkeresultat forkasta, då dei ikkje kan føye til kunnskap utover det litteraturgjennomgangen presenterer. Funna som blei forkasta er likevel presentert i søkehistoria (Vedlegg 2).

Litteraturgjennomgangen blir rekna som hovudkjelda for dette spesialiseringsprosjektet, medan annan litteratur er nytta for å tilføye kunnskap utover det litteraturgjennomgangen legg fram. Ettersom hovudkjelda ikkje reknar med LCPC-boks i sine vurderingar, blei støttande litteratur tillagt i litteraturstudiet. Både ei doktoravhandlinga skriven av Elena Vidal Sarmiento [24], samt artikkelen «The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC» [14], opptrer som støttande litteratur for å inkludere LCPC-boks. Doktoravhandlinga kan i tillegg nyttast som samanlikningsgrunnlag opp mot prøveresultat frå utbreiing i kjegle. Begge kjeldene er overlevert frå rettleiar av prosjektet.

7 Resultat

I dette kapittelet presenterast resultat frå eige laboratorieforsøk, samt resultat frå litteraturstudium.

7.1 Resultat frå eige laboratorieforsøk

Resultat frå det eksperimentelle forsøket presenterast i dette kapittelet. Kvart underkapittel tar for seg utfallet frå ein av testane som blei utført på laboratoriet. Kvar test er utført med basis resept, dermed tilsett 12,5 L ekstra matriks, 15 L ekstra matriks og til slutt 20 L ekstra matriks.

7.1.1 Utbreiing frå kjegle

Tabell 7.1 framstiller alle testresultat ved bruk av kjegle.

Tabell 7.1 Testresultat frå kjegle

RESEPT	*FIBERINNHALD*	*T-500 [SEK]*	*MAKS UTBREIINGSDIAMETER [MM]*
Basis-resept	0 %	3,27	60
	0,33 %	X	48,5
	0,66 %	X	41
	1 %	X	25,5
+ 12,5 L matriks	0 %	1,44	71
	0,33 %	1,76	73 (sep)
	0,66 %	1,59	71 (Stor sep)
	1 %	1,83	70 (sep)
+ 15 L matriks	0 %	1,98	69
	0,33 %	2,66	64,5
	0,66 %	2,42	68,5 (separasjon)
	1 %	2,92	66,5 (Stor separasjon)
+ 20 L matriks	0 %	0,77	72,5
	0,33 %	1,6	68
	0,66 %	3,42	67
	1 %	Ugyldig	67

Merk at basis-resept med 0.33%, 0.66% og 1% fiberinnhald har lågare maksimal utbreiingsdiameter enn 500 mm, og difor ikkje gir resultat for T-500 testen. I tillegg blei testen for blandinga tilsett 20 L matriks og 1% fiberinnhald ugyldig, ettersom videoen blei starta for seint.

7.1.2 LCPC-boks

Tabell 7.2 framstiller alle testresultat ved bruk av LCPC-boks

Tabell 7.2 Testresultat frå LCPC-boks

RESEPT	*FIBER-INNHALD*	*HØGDE VED FYLLING (H0)*	*SPREIINGS-LENGD (L) [MM]*	*DENSITET [KG/M^3]*	*UTREKNA FLYTESKJERSPENNING*
Basis-resept	0 %	7,5	73	2876,5	73,59383869
	0,33 %	8,5	66	2902,5	101,3029178
	0,66 %	15,5	36	2957,5	494,7588726
	1 %	18	24	3043,66667	958,4295201
+ 12,5 L matriks	0 %	5	101	3032,16667	27,84151313
	0,33 %	5	100	3018,33333	27,99163969
	0,66 %	10	111	3133,5	84,97787089
	1 %	5	100	3103,16667	28,77837324
+ 15 L matriks	0 %	5,5	98	3007	33,63602976
	0,33 %	6	82	3019,66667	46,96187062
	0,66 %	7	78	3046,66667	64,89934561
	1 %	6	82	3067	47,69799885
+ 20 L matriks	0 %	6	100	2981	38,01563168
	0,33 %	5,5	100	3014,16667	33,04187154
	0,66 %	6	98	3036,83333	39,51801459
	1 %	6	87	3066,16667	44,94451937

7.1.3 Rheometer

ICAR-programmet lagar eit samandrag frå kvar utført test. Verdiane er dermed eksportert til Excel for samanslåing av testresultat frå alle reseptane i ein tabell.

Tabell 7.3 framstiller testresultat frå Spenningsvekst-test (Stress Growth Test) ved bruk av rheometer

Tabell 7.3 Testresultat frå Spenningsvekst-test (Stress Growth Test)

RESEPT	*FIBER-INNHALD*	*PEAK TORQUE (NM)*	*STATISK FLYTESKJERSPENNING (PA)*
Basis-resept	0 %	4,884	1138,332
	0,33 %	6,158	1435,310
	0,66 %	14,715	3429,858
	1 %		
+ 12,5 L matriks	0 %	5,351	1247,348
	0,33 %	6,871	1601,581
	0,66 %	9,485	2210,932
	1 %	14,940	3482,458
+ 15 L matriks	0 %	5,789	1349,412
	0,33 %	5,722	1333,873
	0,66 %	9,822	2289,375
	1 %	14,256	3322,959
+ 20 L matriks	0 %	5,483	1278,076
	0,33 %	6,324	1474,193
	0,66 %	7,842	1827,918
	1 %	13,899	3239,763

Tabell 7.4 framstiller testresultat frå Flytekurve-test (Flow Curve Test) ved bruk av rheometer

Tabell 7.4 Testresultat frå Flytekurve-test (Flow Curve Test)

RESEPT	*FIBER-INNHALD*	*SKJERING I Y-AKSE*	*STIGNINGS-TAL*	*R2*	*DYNAMISK FLYTE-SKJERSPENNING (PA)*	*PLASTISK VISKOSITET (PA.S)*	*MSE*
Basis-resept	0 %	0,391	2,702	1,00	64,50	52,24	0,002
	0,33 %	0,540	4,264	0,98	81,46	85,62	0,014
	0,66 %	0,640	6,823	1,00	102,37	134,16	0,001
	1 %						
+ 12,5 L matriks	0 %	0,121	2,682	0,98	16,50	54,23	0,016
	0,33 %	0,080	2,808	0,99	10,69	56,52	0,012
	0,66 %	0,138	3,330	0,98	18,14	67,59	0,019
	1 %	-0,097	5,205	0,94	0,00	99,73	0,069
+ 15 L matriks	0 %	-0,020	2,928	0,98	0,00	57,29	0,017
	0,33 %	-0,058	3,158	0,98	0,00	59,85	0,023
	0,66 %	-0,101	4,169	0,96	0,00	78,12	0,049
	1 %	-0,008	5,149	0,97	0,00	102,61	0,030
+ 20 L matriks	0 %	0,100	2,876	0,99	14,10	57,70	0,009
	0,33 %	0,054	3,527	0,98	5,61	71,32	0,016
	0,66 %	0,054	4,114	0,98	5,47	83,04	0,015
	1 %	0,022	5,016	0,99	1,67	100,41	0,007

7.1.4 Stabilitet

Tabell 7.5 er ei framstilling som er utarbeida for å syne stabiliteten til alle blandingane, basert på resept og fiberinnhald. Kvart av blandings-bileta har fått tildelt ein farge ved si høgre side, som syner vurdering av visuell stabilitet. Vurderinga er berre basert på visuelle erfaringar, samt korleis massen opplevast under handsaming. Grøn farge illustrerer god homogenitet. Vidare illustrerer gul farge at blandinga er litt separert. Medan raud farge illustrerer stor separasjon i blandinga.

Tabell 7.5 Grad av homogenitet

RESEPT	*0 % FIBERINNHALD*	*0,33 % FIBERINNHALD*	*0,66 % FIBERINNHALD*	*1 % FIBERINNHALD*
Basis-resept				
+ 12,5 L matriks				
+ 15 L matriks				
+ 20 L matriks	Segregeringa opplevast som større enn dette bilete illustrerer.			

7.2 Litteraturstudium

Resultat frå litteraturstudiet presenterast i dette kapittelet. Litteraturen er valt med hensikt å kunne nyttast som samanlikningsgrunnlag for eige laboratorieforsøk. I tillegg er det ettersøkt litteratur som legg grunnlag for å diskutere relevans i forhold til partikkel matriks metoden.

7.2.1 Hovudstudie

Artikkelen *«Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete—A review»* er ein omfattande litteraturgjennomgang basert på dei siste essensielle bidraga frå forsking som omhandlar fiberarmert betong. Artikkelen inkluderer blant anna 44 studiar som har undersøkt eigenskapane ved bruk av stålfiber i betong. Deriblant studiar som omfattar tradisjonell betong, Ultra High Preformance Concrete (UHPC), Konstruerte sementholdige kompositter (ECC), Sjølvkomprimerande betong (SCC) og lett sjølvkomprimerande betong(LWSCC). [1]

Litteraturgjennomgangen tek først og fremst føre seg ulike definisjonar av støypeevne, og dermed ulike reologiske modellar som kan beskrive materialåtferda til fersk betong. Vidare drøftast forskjellige metodar for å vurdere reologiske parameterar. Både «enkle» test-metodar basert på målband og stoppeklokke, samt meir avanserte metodar (reometer) er medrekna i vurderinga. Utover dette vurderast resultat frå ulike studiar når det gjeld fibrane sin påverknad av reologiske og ferske eigenskapar. [1] Det er fleire faktorar som påverkar korleis ferskeigenskapane til komposisjonen blir, artikkelen tek grundig føre seg følgande parameterar:

- Volumfraksjon, geometri, orientering og spreiing av fibrane
- Andre bestanddelar
- Temperaturar og blandingsmetodikk [1]

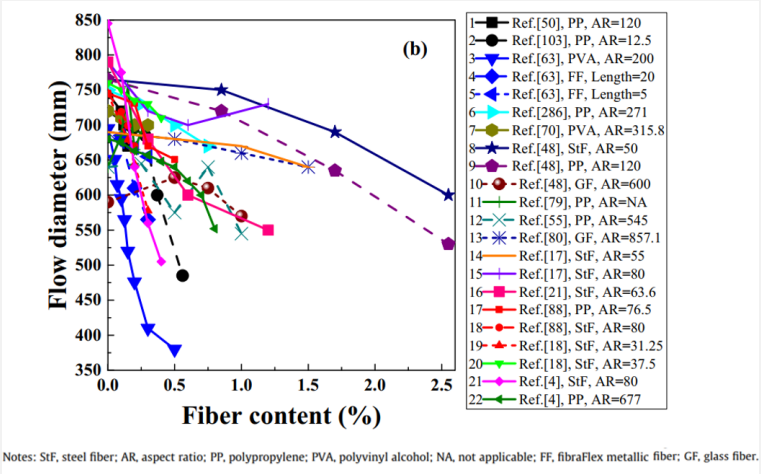
Korleis ulike volum-fraksjonar påverkar ferskeigenskapane til betongen, er den parameteren som er av høgste relevans for dette spesialiseringsprosjektet. Samstundes er det naudsynt å også undersøke dei andre faktorane for å fastslå årsakssamanhengar i samanlikninga opp mot resultata frå eigne eksperimentelle forsøk. Det er også viktig å sjå det totale biletet når det gjeld foreining med partikkel matriks metoden. Relevante funn i artikkelen er presentert i Tabell 7.6.

Tabell 7.6 Relevante funn frå litteraturgjennomgangen [1]

TEMATIKK	*RESULTAT*
Kva for enkle test-metodar eignar seg best for måling av reologiske eigenskapar i fiberarmert betong?	Artikkelen har vurdert alle dei «enkle» testmetodane som er nemnt i Tabell 3.2, med unntak av LCPC boks. Artikkelen legg fram følgande konklusjonar når det gjeld kva testmetodar som eignar seg best ved bruk i fiberarmert betong: • Utbreiing frå kjegle Testen gir gode indikasjonar på dynamisk flyteskjerspenning og fyllingsevne. Men spreiingsdiameteren gir ingen måling av plastisk viskositet. T500 gir ein indikator på dynamisk viskositet, men ikkje plastisk viskositet. [1] Når det gjeld fiberarmert betong, kan betongen bli for stiv for måling ved høgt fiberinnhald (og vil i slike tilfelle gi dårlege indikatorar). I tillegg er det særleg viktig å kunne måle deformasjonsevne (evne til å endre form) under avgrensa tilhøve for fiberarmert betong. Medan den under denne metoden berre viser deformasjonsevna i frie tilhøve (betongen kan bevege seg fritt i alle retningar). Bruk av metoden åleine, reknast som ikkje tilstrekkeleg for å evaluere støypeevna til fiberarmert betong, ettersom skjerhastigheita er fast. [1] • Mini-slump kjegle har vist seg å gi konsekvente indikasjonar på flyteskjerspenning. [1] • Ve-Be testen er empirisk, og kan verken måle flyteskjerspenning eller plastisk viskositet. Metoden er vurdert til å være ein betre test-metode enn utbreiing frå kjegle, dersom betongen har svært låg flyteevne. Den reknast ikkje som passande for blandingar med synk-mål større enn 100 mm. Den er eigna for stive massar, som for eksempel ved høgt fiberinnhald. Skjerhastigheita er fast i denne metoden også, og er dermed ikkje tilstrekkeleg åleine. [1] • Fyllingsboks (U-boks) er godt eigna for sjølvkomprimerande/relativt flytande betong, og vurderast som passande for tilpassing av fiberinnhold i betong. Testen gir verdiar som beskriv passeringsevne, og har gitt konsekvente resultat. Blokkeringsforhaldet blir målt, og eit aukande blokkeringsforhald indikerer god passeringsevne. [1]

	• L-boks har dei same funksjonane som fyllingsboks, men gir også verdiar som beskriv strømmingshastigheit. Metoden er meir ømfintleg enn fyllebokstesten. Difor er det ein svært vanleg testmetode for måling av støypeevne. [1] • V-trakt er også eigna for svært flytande betong, og har vist konsekvente resultat på flyteevne og fyllingsevne. Testen gir god indikasjon på plastisk viskositet, og kan difor nyttast for å karakterisere eit passande fiberinnhold for fiberarmert betong. [1] Kombinasjonen av slump-flyt og L-boks har vist seg å være ein god samansetning. [1]
Kvifor brukast reometer, og kva for eit eignar seg best?	Dei «enkle» test-metodane som baserast på målband og stoppeklokke (summert i punktlista ovanfor) kan gi gode indikatorar på reologiske verdiar som viskositet og flyteskjerspenning. Like fullt er desse testane basert på verdiar som er empiriske, subjektive og manglar kvantitativt grunnlag. Ulike typar reometer reduserer påverknad av menneskelege feil og gir direkte resultat på fundamentale reologiske verdiar. På den andre sida er reometer-instrumenta laboratorieorienterte og ikkje passande for bruk på byggeplass. [1] Men sjølv med reometer, er det å problematisk å måle reologiske eigenskapar i fiberarmert betong. Eit vanleg problem er at opninga på testbehaldaren er for liten, og fører til at fibrane skiljast frå betongmassen under testing. Samstundes kan reometeret gi falske verdiar, blant anna som eit resultat av gliding langs innsida av testbehaldaren. I andre tilfelle kan det oppstå sedimentering, der dei største partiklane skil seg ut frå resten av massen og festar seg til avstikkarar i testapparatet. I tillegg oppstår pluggstraum, særleg dersom reometeret nyttar parallelle plater som rotasjonselement. Dersom rotasjonselementet heller består av ein type skovl-struktur, eliminerast dette problemet. Samstundes er det etablert at det med skovl-strukturen berre blir skore et tynt lag i massen med en viss tjukkleik, og difor berre kan nyttast for å bestemme flytespenning (ikkje viskositet). [1]

	I litteraturgjennomgangen er det presentert ei kort vurdering av åtte ulike reometer og viskosimeter som kan nyttast for fiberarmert betong. Fordelar og ulemper for kvart av instrumenta er kort samanfatta. «ICAR Rheometeret» er det einaste instrumentet som både avverjar problematikk rundt gliding og pluggstraum, og samstundes har tilstrekkeleg vid opning på testbehaldaren. Det er heller ikkje etablert andre svakheiter som er knytt til resultatet av målingane. [1] Dei ulike studiane i litteraturgjennomgangen har nytta forskjellige reometer-instrument, materialar og blandingsprosedyrar, noko som skapar stor spreiing i resultata på tvers av studiane. Likevel kan ein fastslå at materialåtferda og trendane er dei same. [1]
Korleis påverkar ulike volum-fraksjonar av stålfiber fersk-eigenskapane til betongen?	Litteraturgjennomgangen peikar på at volumfraksjonen av tilsett stålfiber er ein serdeles viktig faktor når det gjeld støypeevna til fiberarmert betong. Når ein tilset fiberarmering i betong, reduserast støypeevna. Grunnen til dette er blant anna at dimensjonen til fibrane ikkje samsvarar med den relative mobiliteten til grove tilslagspartiklar. Samstundes aukar overflatearealet som må smørast med matriks, noko som krev ein større mengde fritt vatn og sement. Med høge volumfraksjonar er det også sannsynleg at fibrane samlar seg i ballar under blandeprosessen. Difor bør fiberinnhaldet reknast som like viktig som vatn-sement forhald, tilslag-sement-forhald og vassinnhald, med tanke på å oppnå god støypeevne. [1] I tilknyting til testmetodane vil både plastiske viskositet og flyteskjerspenning generelt aukar med aukande fiberinnhold. Også desse resultata er uavhengig av fibertypen som brukast. I tillegg har den plastiske viskositeten ein tendens til å auke kraftig samanlikna med flytespenninga. Resultata peikar også på at passeringsevne reduserast ved aukande mengder stålfiber. [1] Vidare understrekar litteraturgjennomgangen at utbreiingsdiameteren frå kjegle generelt reduserast ved aukande fiberinnhald, uavhengig av fibertype og sideforhald (lengde/diameter). Figur 7.1 syner resultat frå 22 av studiane i litteraturgjennomgangen, som syner utbreiingsdiameter ved aukande fiberinnhald skissert i graf. Med dette kan ein fastslå at aukande fiberinnhald reduserer betongen si flyteevne. [1]



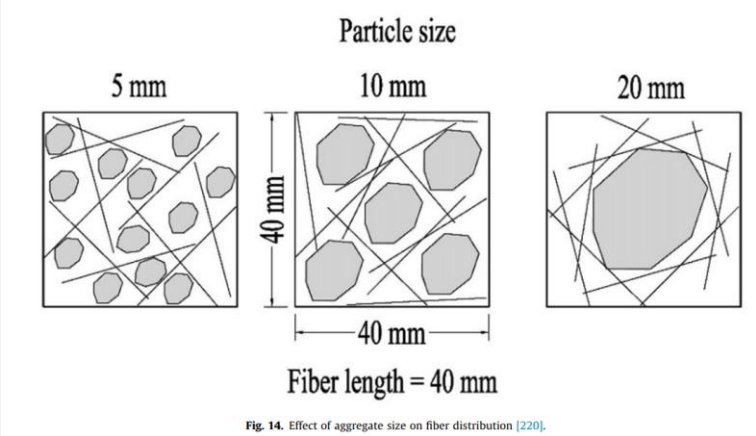
Figur 7.1 Resultat frå 22 ulike studiar: utbreiingsdiameter ved aukande fiberinnhald [1]

I tillegg vil aukande fibermengd også påverke homogeniteten i negativ grad. Det aukar sannsynet for utvikling av nettverksstruktur i blandinga, der fibrane og tilslaget dannar samankoplingar. Dette er også noko av årsaka til at utbreiingsdiameter og strømmingstida aukar. I tillegg fører det til blokkering, som skapar komplikasjonar ved fylling mellom armeringsstenger og ved nivellering/avretting. [1]

Resultat frå nokre av studiane peikar også på at det finnast ei kritisk fiberdosering. Tendensane viser til at ytterlegare fibertilsetning etter kritisk dosering, fører til at flytespenninga får ei kraftig auking medan aukinga av viskositet reduserast/stoppar. Tendensane kan skuldast at førekomsten av nettverksstruktur dominerer strømmingsåtferda. [1]

På den andre sida er den kritiske fiberdoseringa vanskeleg å finne, og studiane har foreslege alt frå 0,35 – 3% stålfiber som høgste dosering. Det ein likevel kan etablere, er at den kritiske doseringa avhenger av sideforhaldet til fibrane, og pakningsfraksjon av fiber og tilslag. Ved å auke mengda med fint tilslag, utan å justere det totale tilslagsinnhaldet, bil ein kunne tilsette meir fiber. Derimot vil ein også kunne tilsette meir fiber, dersom ein berre reduserer det totale tilslagsinnhaldet. [1]

Korleis påverkar geometri, orientering og spreiing av fibrane fersk-eigenskapane til betongen?	**<u>Geometrien til fibrane</u>** har betydning på betongens ferske- og reologiske eigenskapar. Korte fibrar gir betre støypeevne. Både viskositet og flytespenning aukar når fiber-lengda aukar. Korte fibrar reduserer verdiar for flyteevne og passeringsevne mindre enn dei lange fibrane gjer. Funn i studiane tyder på at fiberlengda ikkje har tydleg effekt på viskositet og flytespenning, men at dei lange fibrane aukar sannsynet for å samle seg i klumpar. Korte fibrar gir difor betre homogenitet i betongen. Stålfiber er relativt lange, og reduserer difor støypeevna ytterlegare enn andre fibertypar. [1] I tillegg syner resultata at fibrane med nokså uregelmessig og ujamn geometri reduserer støypeevna meir enn fibrar med rett geometri. Årsaka kjem sannsynlegvis av at uregelmessige/ujamn geometri aukar friksjonen mellom fiber og tilslag. Samt at fibrane er meir tilbøyelege til å feste seg til kvarandre. [1] Resultat syner også at auking i fibersideforhald også reduserer støypeevna. Årsaka er forklart ved at eit større sideforhald gjer det vanskelegare å bevege dei grove tilslagspartiklane. Difor er eit lågare fibersideforhald å streve etter for å oppnå god støypeevne, men dette vil påverke styrken i herda tilstand i negativ grad. Difor anbefalast heller reduksjon i tilslagsstorleik og tilsetning av mørtel, og heller behalde det store fibersideforhaldet. [1] Låg fiberfaktor gir betre støypeevne. Fiberfaktor definerast som volumfraksjon av fiber multiplisert med fiberen sitt sideforhald, og denne kombinerte effekten gir ein god indikasjon på korleis ferskeigenskapane blir påverka. Resultat frå studiane som er gjennomgått i litteraturgjennomgangen viser at både utbreiingsdiameteren og fyllingsevna minkar ved aukande fiberfaktor. [1] Når det gjeld **<u>Orientering av fibrane</u>** er det ynskjeleg å unngå segregering. Difor er det viktig å ha høg nok motstand i form av plastisk viskositet og flytespenning. Samstundes blir orienteringa og spreiing av fibrane dårlegare med for stor plastisk viskositet og flyteskjerspenning. Altså er det viktig å finne eit passande balansepunkt for desse reologiske eigenskapane. Framlagte løysingar i litteraturgjennomgangen er å: auke sementinnhald, auke mengde fint tilslag eller tilsette kjemiske tilsetningar. [1]

Korleis påverkar andre bestanddelar fersk-eigenskapane til betongen?	Støypeevna betrast ved tilsetning av sementholdige materialar. og skape ein smørjande effekt, og dermed minske nettverksstrukturen som dannast mellom tilslag og fiber. Dette bidreg også til å oppretthalde stabilitet og flyteevne i blandinga. [1] Silika har evne til å fylle holrom mellom sand, fibrar og sementpasta, og dermed auke pakningstettheita i blandinga. Då desse holroma elles fyllast med vatn, frigjer Silika mogelegheita for at det tilsette frie vatnet heller kan skape fluiditet i blandinga. Dette betraktast som den smørjande effekten av Silika. Testresultat tyder difor på at bruken av Silika reduserer plastisk viskositet, flyteskjerspenning og segregeringsmotstand, samt betrar passeringsevne og fyllingsevne. [1] Vidare har filler-materialar vist seg å ha god evne til å fylle holrom mellom sandpartiklane når alle holrom er fullstendig fylt. Dette gjer at sandpartiklar enklare kan bevege seg i blandinga. Samstundes vil fyllstoff-forbruket redusere støypeevna ved for store mengder. Ein må streve etter å oppnå ein optimal dose filler i forhald til tilsett sandvolum. [1] Tilslaget har også betydning for støypeevna. Ulike typar, volumfraksjonar, graderingar og partikkelstørrelsar kan påverke støypeevna i stor grad. Ved å avgrense delen grovt tilslag, samt den maksimale tilslagsstørelsen, oppnår ein generelt betre passeringsevne, fyllingsevne og segregeringsmotstand. Eit utklipp frå litteraturgjennomgangen er synt i Figur 7.2, og syner korleis grove tilslagspartiklar gir fibrane mindre opning for å kunne bevege seg. Fibrane vil danne nettverkstrukturar rundt dei grove tilslagspartiklane. [1]  *Figur 7.2 Effekt av tilslagsstorleik på fiberfordeling* [1]

	Samstundes krev svært fine tilslagspartiklar meir vatn og har større overflate enn grovare tilslag. Dette reduserer støypeevna til betongen. Generelt har tilsetning av fin sand liten effekt på flyteskjerspenning, men stor effekt på viskositeten. I tillegg vurderast avrunda tilslagsgeometri til å gi betre støypeevne enn knust tilslag, då kantete steinar skapar eit større behov for vatn. Likevel understrekar litteraturgjennomgangen at geometrien på tilslaget har liten effekt på støypeevne i betong med høgt sementinnhald. [1] Når det gjeld kjemiske tilsetningsstoff, ynskjer ein å tilsette vassreduserande tilsetningsstoff framfor å tilsette fritt vatn. Dette fordi ei ytterlegare tilsetning av fritt vatn kan påverke styrken i betongen negativt. Superplastiserande stoff (SP) har evne til å spreie sementpartiklane og skape betre flyt. Flyteskjerspenning og plastisk viskositet reduserast ved tilsetning av ei passande dosering SP. Difor anbefalast det å tilsette SP som eit tiltak for å betre støypeevna i fiberarmert betong. Samstundes vil for stor dosering kunne skape vassutskiljing. Ein strever difor etter å auke flyteevne utan å skape segregering. [1] På den andre sida har nanomaterialar vist seg å redusere støypeevna kraftig i fiberarmert betong på grunn av høg vassabsorpsjon. Difor må vassmengda justerast ved stort innhald av slike materialar, for å oppretthalde støypeevne og reologiske eigenskapar. Samstundes har desse materialane også vist positive effektar på reologiske eigenskapar, men det er framleis tvil om korleis mekanismen reagerer, og korleis støypeevna påverkast.[1]
Korleis påverkar temperaturar og blandings-metodikk fersk-eigenskapane til betongen?	Støypeevna har ein lett reduksjon ved høgre temperaturar og tidstap.[1] Studien anbefaler følgande blandingsmetodikkar for å betre støypeevna til fiberarmert betong: • Gradvis tilsetting av fibrar under blandeprosessen • Blande alle ingrediensar med vatn før fibrane spreiast i miksaren • Forsinke tilsetning av SP, samt på dette tidspunkt å tilsette ei blanding av SP og vatn [1]

7.2.2 Samanlikning av LCPC og utbreiing frå kjegle

Artikkelen *«The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC»* har som formål å undersøkje eventuelle fordelar med LCPC boks i forhold til den meir tradisjonelle metoden; utbreiing frå kjegle. Begge testane kan nyttast for karakterisering av fyllingsevne i sjølvkomprimerende betong. Hovudskilnaden på metodane, er at utbreiing frå kjegle let massen flyte utover i alle retningar, medan LCPC boksen skapar einsretta flyt langs ei rektangulær form. Artikkelen konkluderer med at synk-utbreiing gir god kvalitetskontroll, då den oppfattar variasjonar i blandinga si proporsjonering. Samstundes det ynskjeleg å kunne bruke målingane indirekte for å rekne ut dynamisk flyteskjerspenning, men her strekk ikkje kjegle-testen til [14].

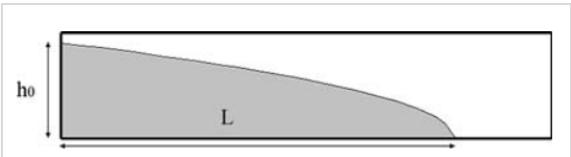
For å kunne finne ein direkte samanheng meg flyteskjerspenning er ein blant anna avhengig av at tjukkelsen på prøven er fem gongar større enn største tilslagsstorleik. Dette er kravet for at massen kan karakteriserast som ei homogen blanding. Ved utbreiing i kjegle vil derimot tjukkelsen på utbreiingssirkelen ikkje bli høgre enn det største tilslaget i massen. Dette fører til at to ulike blandingar med same flyteskjerspenning, kan gi ulik utbreiingsdiameter. Ein stor utbreiingsdiameter oppnåast ved ei blandingssamansetning som er dominert av mykje sementpasta, samt eit lågt tilslagsvolum med fine partiklar. Derimot oppnår ein mindre utbreiingsdiameter ved ei blandingssamansetning som dominerast av eit høgt tilslagsvolum med grove partiklar, samt tilsvarande mindre innhald sementpasta. Difor er det viktig at massen må kunne betraktast som homogen. Dette er årsaka til at utbreiing frå kjegle ikkje har evne til å fastslå nøyaktige parameterar på flytespenning, og difor kan ein ikkje direkte assosiere ein stor utbreiingsdiameter med høg flyteskjerspenning og god fyllingsevne [14].

LCPC-boksen er derimot ein meir rasjonell test. Testen tvingar all massen i ein retning, og oppfyller dermed kravet for minimum tjukkleik, samt andre krav for å kunne finne direkte samanheng med flyteskjerspenning. Den kan i motsetning til synk-utbreiing gi ein enkel og ganske nøyaktig fastsetjing av flyteskjærspenning i sjølvkomprimerande betong. Ved hjelp av dei analytiske uttrykka (1.1) og (1.2) kan ein vurdere flyteskjerpenning ved hjelp av målte parameterar i LCPC boks [14].

$$L = \frac{h_0}{A} + \frac{l_0}{2A} * LN\left(\frac{l_0}{l_0 + 2h_0}\right) => A = \frac{h_0}{L} + \frac{l_0}{2L} * LN\left(\frac{l_0}{l_0 + 2h_0}\right) \tag{1.1}$$

$$A = \frac{2\tau_0}{\rho * g * l_0} => \tau_0 = \frac{A * \rho * g * l_0}{2} \tag{1.2}$$

Der L er spreiingslengda av prøven, h_0 er tjukkelsen av prøven i ytterkant av boksen. l_0 er breidde av test-boksen, ρ er densiteten til betongmassen, g er gravitasjon (= 9,81 m/s^2) og τ_0 er flyteskjærspenning [14]. Dei to førstnemnte parameterane er synt i Figur 7.3.



Figur 7.3 Illustrasjon av testing i LCPC-boks [14]

7.2.3 Eksperimentelle forsøk ved bruk av LCPC-boks

I doktoravhandlinga «Flowable fibre-reinforced concrete for structural applications» skriven av Elena Vidal Sarmiento, er det blant anna utført eksperimentelle forsøk ved bruk av LCPC boks. Forskinga gjeld to blandingar presentert som «batch a» og «batch b». «Batch a» er ei hybrid blanding av fiberarmert betong med 1% fiberinnhald. Blandinga inneheld 0,5% polymerfiber og 0,5% kaldtrekte stålfiber (prosentdel i forhold til 1 m^2 betong). «Batch b» er ei blanding av fiberarmert betong med 2% fiberinnhald, der fibrane består berre av stålfibrar. I metodebeskrivinga for bruk av LCPC-boks, viser avhandlinga til Roussel-artikkelen (presentert i 7.2.2). Tabell 7.7 syner testresultat av ferskeigenskapar, inkludert testresultat ved bruk av LCPC-boks. [24]

Tabell 7.7 Testresultat frå doktoravhandling, inkludert bruk av LCPC-boks [24]

Test	Batch 'a'	Batch 'b'
Before fibre addition:		
Slump-flow	730 mm	725 mm
t500 (+/-0.2 s)	2.8 s	2.8 s
After fibre addition:		
Density	2359 kg/m^3	2508 kg/m^3
Air content	3.7%	1.1%
LCPC box test		
Tested volume	6.0 l	5.7 l
Spread length in the box	55 cm	51 cm
Thickness of the sample at the extremity of the box	6.5 cm	7.5 cm
Yield stress	63 Pa	92 Pa

Utrekningane for flyteskjerpenning er ikkje synt i avhandlinga. Nedanfor er Sarmiento sine målte parameterar for «*batch a*» innsett i formlane (1.1) og (1.2). Frå dette ser ein at resultatet samsvarar med flyteskjerspenninga som er presentert i Tabell 7.7.

$$A = \frac{6{,}5\ cm}{55\ cm} + \frac{20\ cm}{2 * 55\ cm} * LN\left(\frac{20\ cm}{20\ cm + 2 * 6{,}5\ cm}\right) = 0{,}0271 \tag{1.1}$$

$$\tau_0 = \frac{0{,}0271\ * 2359\ \frac{kg}{m^3} * 9{,}81\ \frac{m}{s^2} * 0{,}20\ m}{2} = 62{,}71 Pa \tag{1.2}$$

8 Diskusjon

I dette kapittelet drøftast resultata. Først diskuterast utfallet av eigne eksperimentelle forsøk, og samanliknast med funn frå litteraturstudiet. Dermed diskuterast bruk av ulike test-metodar, basert på eigne forsøk og litteraturstudium. Avslutningsvis vektleggast drøfting av korleis resultat frå både eksperimentelle forsøk og litteraturstudium kan foreinast med partikkel matriks metoden. Kapittelet avsluttast med eventuelle svakheiter/feilkjelder.

8.1 Samanlikning mellom eksperimentelle forsøk og litteraturstudium

Vidare følgjer ei samanlikning mellom eksperimentelle forsøk, litteraturstudium, kunnskapsbakgrunn og Case. Kapitela er bygd opp omkring forsøksresultat frå det eksperimentelle forsøket, medan resultat frå litteraturen er implementert undervegs. Dei første underkappitela (8.1.1 og 8.1.2) drøftar resultata kvalitativt via omgrep som stabilitet, mobilitet og komprimeringsevne. Med dette reknast utbreiing frå kjegle og LCPC-boks som enkle test-metodar som gir ei kvalitativ beskriving av støypeevne. Resultata frå desse testane er difor innlemma i underkapittel 8.1.2, som omhandlar mobilitet og komprimeringsevne. Vidare undersøkjast grunnleggjande fysiske storleikar, som flyteskjerspenning og plastisk viskositet i underkapittel 8.1.3. Desse verdiane er målt direkte ved bruk av reometer. I tillegg kan målingane frå LCPC-boksen gi indirekte måling på dynamisk flytespenning, og brukast difor som samanlikningsgrunnlag for bruk av reometer.

Hovudkjelda frå litteraturstudien konkluderer med at støypeeva generelt sett reduserast ved tilsetning av stålfiber i betong. Grunnen til dette er blant anna at dimensjonen til fibrane ikkje samsvarar med den relative mobiliteten til grove tilslagspartiklar. Samstundes aukar overflatearealet som må smørast med matriks, noko som krev ei større mengde fritt vatn og sement. Med store volumfraksjonar med fiber er det også sannsynleg at fibrane samlar seg i ballar under blandeprosessen. [1] Vidare drøfting vil fastslå om resultat frå det eksperimentelle forsøket også kan understreke denne verknaden.

Resultata framhevar ein nokså stor skilnad mellom støypeevna til basis-resepten og støypeevna til dei andre blandingane. Årsaka til dette er at testing av basis-resepten er gjennomført på eit seinare tidspunkt (relativt til oppstart av blandeprosessen). Tilfellet er diskutert ytterlegare under feilkjelder (0). Ved vidare drøfting kan difor ikkje resultata til basis-resepten samanliknast direkte opp mot dei andre blandingane, men ein ser tendensane som oppstår ved aukande fiber-tilsetning. I tillegg var basis-resepten for stiv for måling i rheometer ved 1% fiberinnhald. Dette er årsaka til at rheometer-testane berre vurderast frå 0 - 0,66 % fiberinnhald når det gjeld basis-blandinga.

8.1.1 Stabilitet

Dårleg stabilitet i blandinga kan skape resultat-forstyrringar. Resultatnotatet til FiberCon prosjektet forklarar at blandinga blei særleg separert ved bruk av 80/60 fibrar, og at dette skapte forstyrringar i målingane [15]. Ettersom dei andre fibrane som blei brukt i FiberCon prosjektet var både kortare og hadde mindre lengde/diameter-forhald (aspect ratio), er det naturleg at homogeniteten blir dårlegare. Dette samsvarar med resultat frå litteraturstudiet [1].

Fibrane som er brukt i dette spesialiseringsprosjektet har lengde på 60 mm, samt lengde/diameter-forhald (aspect ratio) på 65. Det vil seie lik lengde som FiberCon (3D 80/60), men mindre lengde/diameter-forhald. I tillegg har fibrane større modifikasjonar på geometrien i enden av fiberen (4D). Ved samanlikning mot litteraturen, skal meir uregelmessig geometri føre til at fibrane enklare kan feste seg til kvarandre, og dermed redusere støypeevna. Samstundes seier hovudkjelda også at aukande lengde/diameter-forhald reduserer støypeevna, ettersom det hindrar dei grove tilslagspartiklane å bevege seg i forhald til kvarandre [1]. Dermed er fibrane i dette spesialiserings-prosjektet betre på eit område, medan fibrane frå FiberCon prosjektet er betre på eit anna. Likevel er det urimeleg å samanlikne dei på tvers av kvarandre, ettersom resultatet baserast på visuelle/opplevde erfaringar på laboratoriet.

Basert på erfaringar frå det eksperimentelle forsøket, kan ein sjå tendensar til aukande separasjon ved større matrikstilsetning (sett vekk frå basis-resept). Basis-resepten er ei såpass stiv og seig masse, at homogeniteten ikkje er eit problem [12]. Basert på visuelle/opplevde erfaringar på laboratoriet, ser ein tendensar til at 20 liter matrikstilsetning gir betre resultat på homogenitet enn 15 liter matrikstilsetning. Samt at blandingane med 15 liter matrikstilsetning er observert til å ha noko betre homogenitet enn blandingane med 12,5 liter matrikstilsetning. Blandinga med tilsett 12,5L matriks er faktisk vurdert til å ha litt separasjon i alle blandingane, samt svært dårleg homogenitet i blandinga med 0,66% fiberinnhald.

Separasjonen som blei observert er av typen segregering, altså at det grove tilslaget skil seg frå resten av blandinga [2]. Basert på erfaringar frå laboratoriet, kan stor separasjon føre til at massen som blir plukka ut for testing ikkje er representabel for heile blandinga. Ved bruk av kjegle og LCPC boks er det berre 6 liter av blandinga som blir nytta for testing. Dersom ein prøver å helle blandinga oppi testen, fører dette til at grove tilslagspartiklar ligg att (ved stor separasjon). Difor må ein spa ut av blandinga og forsøke å få med seg eit representativt utval til testen, men utfallet kan likevel bli tilfeldig. Ein ser tydeleg frå bileta med stor separasjon, som er presentert i Tabell 7.5, at dei grøvste partiklane samlar seg i midten ved bruk av kjegle som testapparat. Vidare fører segregering til at dei største tilslagspartiklane må skrapast ut frå 6 liters-behaldaren ved slutten av hellingsprosessen i LCPC-testen. Dei grøvste partiklane vil deretter leggje seg som ein ball i det høgste punktet av testen. Separasjon kan difor skape store variasjonar på målingane frå begge testane. Testane i reometeret rommar derimot nesten heile blandinga. Difor er den målte blandinga nokså representabel, sjølv ved stor separasjon. Basert på erfaringane frå laboratoriet, ser ein likevel at dei grøvste tilslagspartiklane samlar seg i botnen av testbehaldaren ved ut-helling. Testen vil sannsynlegvis ikkje måle riktige parameterar på blandinga når separasjonen er stor.

Dei største separasjonane er observert ved 12,5L matriks med 0,66% og 15L matriks med 1%. Altså skapar dei største volumfraksjonane med fiber dei verste separasjonane, men det er ikkje systematisk reduksjon av homogenitet ved aukande fibertilsetning i alle blandingane. I nokre tilfelle betrast faktisk homogeniteten ved ytterlegare tilsetning av fiber, som for eksempel i overgangen frå 0,66% til 1% fiberinnhald i blandinga med 12,5 liter matrikstilsetning. Resultatet frå litteraturen seier at aukande fiberinnhald aukar sannsynet for nettverksstruktur i blandinga, der fibrane og tilslaget dannar samankoplingar[1]. Dermed samsvarar det eksperimentelle forsøket med litteraturen, ettersom dei største separasjonane er observert ved høgt innhald av fiber. Men det at ein i nokre

tilfelle ser betring i stabilitet etter tilsetning av fiber, er sannsynlegvis eit resultat av statistisk variasjon.

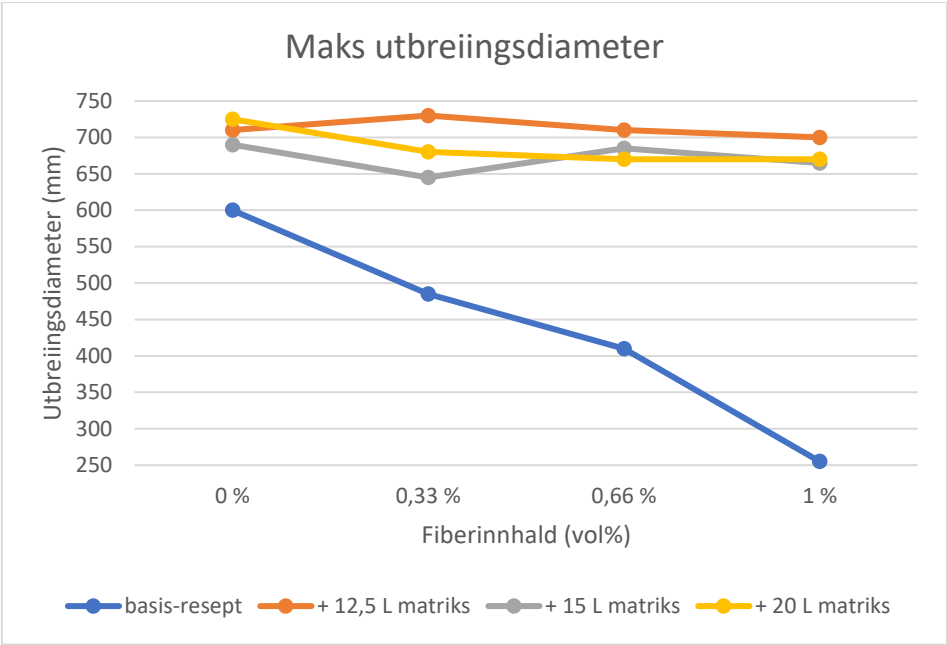
Den store separasjonen ved 0,66% fiberinnhald i blandinga med 12,5 liter matrikstilsetning, er sannsynlegvis årsaka til tvilsamt aukande utbreiingslengd i LCPC boks (Tabell 7.2), minkande T500 (Tabell 7.1), samt aukande dynamisk flytespenning som eit resultat frå både reometer og LCPC (Figur 8.5 og Tabell 7.2). Parameterane indikerer difor betydeleg betre mobilitet i dette punktet. Det poengterast også i hovudkjelda frå litteraturstudiet at separasjon kan være årsaka til at utbreiingsdiameter aukar (indikerer betre mobilitet) [1]. Samstundes ser blandinga med 15 liter matrikstilsetning ut til å ha vel så stor separasjon (ved 1% fiber). Likevel er det ikkje like framståande resultat-forstyrringar på testresultata i denne blandinga. Dette tyder på at stor separasjon skapar uregelmessige resultat, og uvisse rundt gyldigheita av målingane.

Blandinga med tilsett 12,5L matriks gir ualminnelege resultat i alle testar, og viser seg i mange tilfelle å være meir flytande enn ved tilsett 20L matriks. Dette kan som nemnt kome av dårleg stabilitet, men andre mogelege feilkjelder vil drøftast under 8.4. Ved vidare drøfting vil blandinga ikkje visast omsyn til ved samanlikning opp mot andre blandingar. Likevel kan resultata nyttast for å sjå tendensen ved aukande fibertilsetning.

8.1.2 Mobilitet og komprimeringsevne

Figur 8.1 illustrerer resultatet frå maks utbreiing i kjegle. Testen er relatert til flyteskjerspenning, og gir indikator på fyllingsevne, der høge verdiar for spreiingsdiameter viser til god fyllingsevne [1]. Difor gir testen resultat som beskriv både mobilitet og komprimerings-evne. Dei ulike blandingane er presentert med kvar sin farge. X-aksen syner gradvis aukande fiberinnhald (vol%), medan y-aksen syner utbreiingsdiameter i millimeter. Resultatet syner at utbreiingsdiameteren generelt sett reduserast i alle blandingar ved aukande fiberinnhald. Dette samsvarar både med litteraturstudiet [1] [24] og case-forsøket til FiberCon [15]. Alle litteraturkjeldene viser til reduksjon i utbreiingsdiameter ved aukande fiberinnhald, uavhengig av fibertype og geometri.

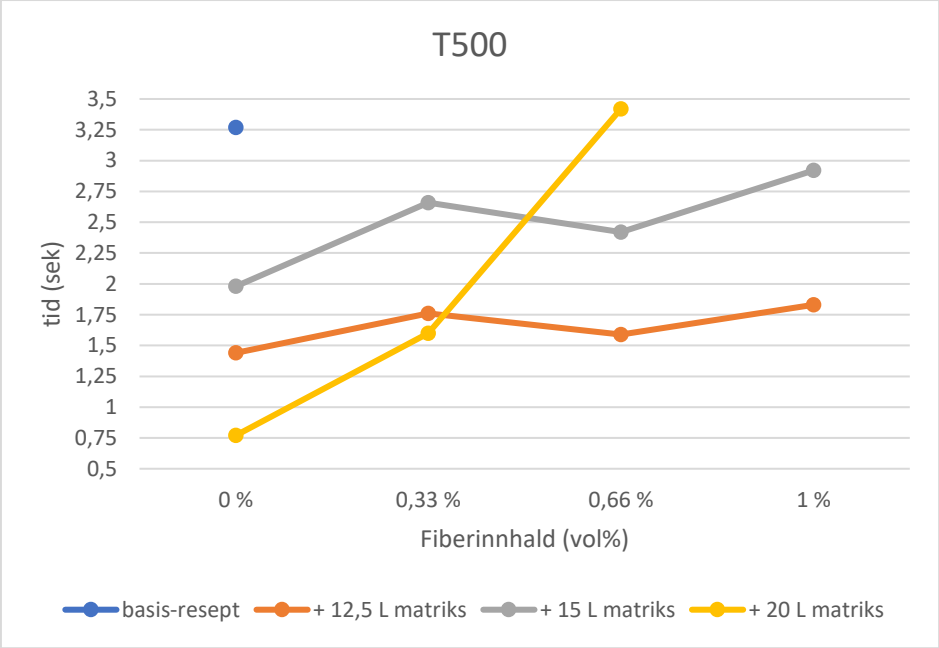
Resultatet viser i tillegg ei større utbreiingsdiameter ved matrikstilsetning på 20 l/m^3 enn ved 15 l/m^3 ved alle fiberinnhald utanom 0,66%. Dei høge verdiane ved 0,66% og 1% fiberinnhald i blandinga med 15 l matrikstilsetning, ser ut til å ha ein samanheng med dårleg stabilitet (sjølv om stabiliteten ved 0,66% ikkje er vurdert som særleg stor). Difor viser resultatet tendensar til aukande mobilitet og komprimeringsevne ved aukande matriksinnhald. Det same resultatet kan trekkjast frå case-forsøket til FiberCon ved ei matrikstilsetning på 10 l/m^3, men også deira forsøk gav lågare utbreiingsdiameter enn basis-resepten ved 0,66% fiberinnhald (ved bruk av 3D 80/65). Case-forsøket til FiberCon gir i tillegg ein tydeleg knekk på tre av fire kurver, i overgangen frå 0,66% - 1% fiberinnhald[15]. Denne overgangen ser ein ikkje antyding til i resultata frå dette spesialiseringsprosjektet, noko som tyder på at ytterlegare tilsetning av matriks held ein jamnare mobilitet, også heilt opp til 1% fiberinnhald.



Figur 8.1 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner maks utbreiing frå kjegle.

Figur 8.2 illustrerer resultatet frå T500-test i kjegle. Dei ulike blandingane presenterast med kvar sin farge. X-aksen syner gradvis aukande fiberinnhald (vol%), medan y-aksen syner tida betongen brukar frå tidspunktet kjegla blir løfta til den strekkjer seg til 500 mm i diameter. Resultatet er noko varierande, særleg i blandingane med 12,5 og 15 liter matrikstilsetning. Dette har sannsynlegvis årsakssamanheng med stabiliteten ved fibertilsetning på 0,66%. Men totalt sett, frå 0% til 1% fiberinnhald, gir alle blandingane ei stigane kurve. Også case-forsøket til FiberCon gir aukande T500 ved aukande fibertilsetning for alle blandingar [15]. På den andre sida gir Sarmientos doktoravhandling same resultat både ved 1% og 2% fiberinnhald, men resultatet kan kome av at ulike fibertypar er nytta i dei to forsøka [24].

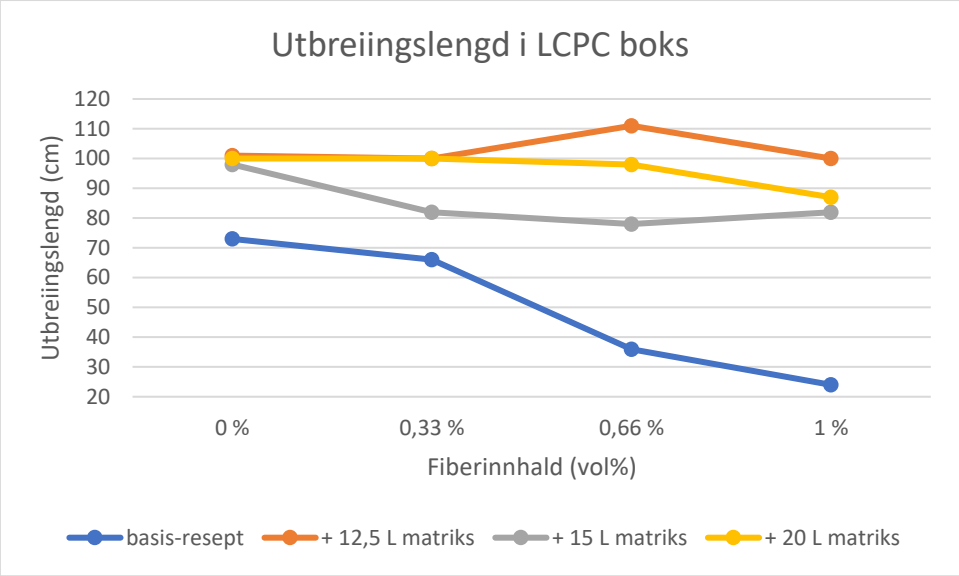
Resultatet i Figur 8.2 syner ikkje systematisk minkande T500 ved aukande matrikstilsetning. Heller ikkje case-forsøket til FiberCon gir systematisk reduksjon i T500 ved matrikstilsetning på 10 l/m^3. Men ein systematisk reduksjon blei likevel observert ved bruk av den minste fibertypen «3D 65/35». Resultatnotatet fastslår at årsaka til usystematisk resultat ved bruk av dei største fibrane «3D 80/60», skuldast separasjon. Samstundes er det verdt å merkje seg at resultatverdiane frå dei fire ulike reseptane i case-forsøket til FiberCon ligg tett samla ved lite fiberinnhald, og sprikjer deretter gradvis ved aukande fiberinnhald [15]. Denne samanhengen kan ikkje antydast i resultata frå det eksperimentelle forsøket i dette spesialiseringsprosjektet, der resultat frå dei ulike blandingane har store avstandar i alle punkt. Alt i alt samsvarar tendensane ved aukande matrikstilsetning dårleg med case-forsøket til FiberCon. Dette kan kome av statistiske variasjonar. Det bør difor utførast vidare arbeid for å trekkje konklusjonar ved desse samanhengane.



Figur 8.2 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner T500 i kjegle (målt i sekund)

Figur 8.3 illustrerer resultatet frå maks utbreiing i LCPC-boks. Dei ulike blandingane presenterast med kvar sin farge. X-aksen syner gradvis aukande fiberinnhald (vol%), medan y-aksen syner utbreiingslengd i centimeter. Resultatet reduserast generelt sett med aukande fiberinnhald. Resultata samsvarar difor med tendensane i Sarmiento si doktoravhandling, som gir reduksjon av utbreiingslengd ved aukande fiberinnhald [24]. Årsaka til at blandinga med tilsett 15 liter matriks stig i overgangen frå 0,66% til 1% fiberinnhald, kjem sannsynlegvis av stor separasjon. Vidare er blandinga med tilsett 12,5 liter matriks som nemnt ikkje til å regne med.

På same måte som ved utbreiing frå kjegle, kan ein registrere større utbreiingslengd ved matrikstilsetning på 20 l/m^3 enn ved 15 l/m^3 ved alle fiberinnhald. I utbreiing frå kjegle kunne ein derimot registrere oppgang i verdiane til blandinga med matrikstilsetning på 15 l/m^3 ved 0,66% og 1% fiberinnhald, medan ein i LCPC berre registrerer oppgang ved 1% fiberinnhald. Det er berre ved 1% fiberinnhald, at blandinga er vurdert til å ha særleg stor separasjon. Det kan difor trekkjast samanhengar ved at LCPC-testen stemmer betre overeins med vurdert/opplevd mobilitet. Men samanhengen bør nødvendigvis etterprøvast ved fleire forsøk.

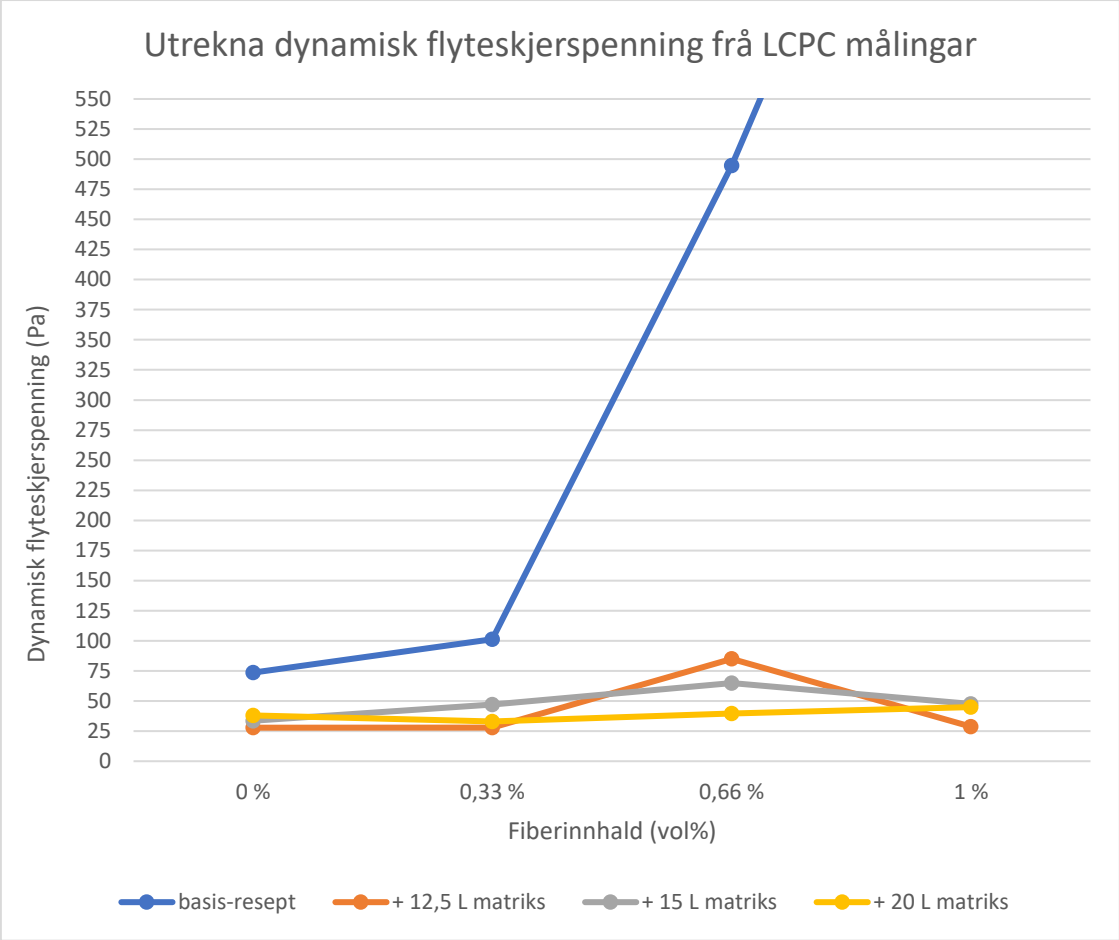


Figur 8.3 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner utbreiingslengd i LCPC boks.

I tillegg er LCPC målingane brukt for å rekne ut flyteskjerspenning ved hjelp av formlane som er synt i kapittel 7.2.2. Dette er ei indirekte måling av ein grunnleggjande fysisk storleik. Dynamisk flyteskjerpenning er minimum skjerspenning som trengst for å oppretthalde flyt etter nedbryting av tiksotropisk struktur [12]. Figur 8.4 syner resultat frå utrekningane. Grafen er kutta langs y-aksen for å tydeleggjere verdiane frå blandingane med tilsett matriks. Resultatet syner gradvis auke i dynamisk flyteskjerspenning ved gradvis tilsetning av fiber. Resultat av utrekna flyteskjerspenning frå LCPC-boksen samsvarar også med tendensane i Sarmiento si doktoravhandling, der det blei observert aukande dynamisk flyteskjerspenning ved stigande fiberinnhald [24]. Dette framkjem også frå hovudkjelda i litteraturstudiet, som viser til at flyteskjerspenninga generelt sett aukar med stigande fiber-innhald [1].

Hovudkjelda viser også til at det vil vanlegvis oppstår ei kritisk dosering med fiber, som fører til at flytespenninga får ei kraftig auke [1]. Dette kan være årsaka til at basis-resepten får ein svært tydleg oppgang i flyteskjerspenning etter tilsetning av 0,33% fiber. Dersom ein ser vekk frå tap av flyteskjerspenning som eit resultat av tidsbruk, kan dette tyde på at basis-blandinga har si kritiske dosering allereie på 0,33%. Samstundes får blandinga med 12,5 liter matrikstilsetning ei nokså brå oppgang ved det same fiberinnhaldet, som kan tyde på at også denne når si kritiske doseringa her. Men grafen går også ned igjen ved 1%, så resultatet er utydeleg. Vidare ser ein at blandingane med matrikstilsetning på 15 og 20 liter har nokså lågt stigningstal heile vegen, som tyder på at desse ikkje når si kritiske dosering ved testing frå 0% til 1% fiberinnhald.

Samstundes kan ein sjå tendensar til lågare dynamisk flyteskjerspenning, ved aukande tilsetningar av matriksinnhald (sett vekk frå ualminnelege resultat frå resepten med 12,5 liter matriks per kubikk).



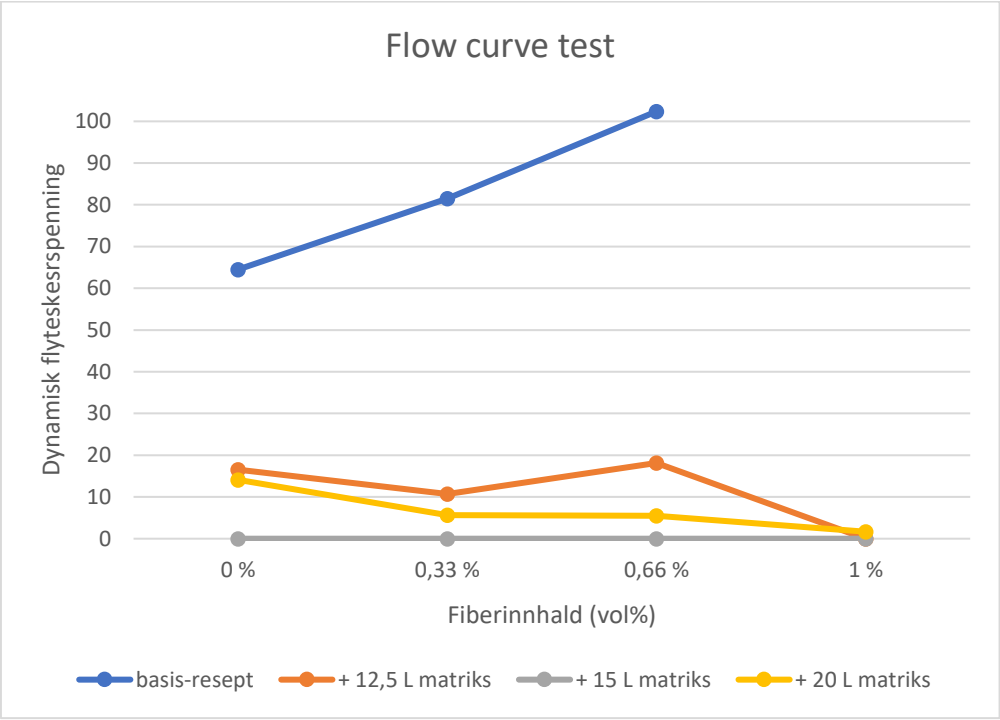
Figur 8.4 Resultat frå utrekningar av dynamisk flyteskjerspenning basert på LCPC målingar

8.1.3 Grunnleggjande fysiske storleikar

Reometer-testane måler grunnleggjande fysiske storleikar i form av flyteskjerspenning og plastisk viskositet. I dette underkapittelet samanliknast resultat frå reometeret sine testar («stress growth test» og «flow curve test») med resultat frå litteraturstudiet. I tillegg presiserast naudsynte samanlikningar ved resultat frå enkle test-metodar som er beskrive i føregåande kapittel.

I dei eksperimentelle forsøka er dynamisk flytespenning målt ved hjelp av «flow growth test» i rheometeret. Resultatet er presentert i Figur 8.5. Dette er i motsetnad til LCPC-testen ein direkte måling av denne grunnleggjande fysiske storleiken. Testane gir likevel fleire underlege resultat. Fleire av testane resulterer i null flyteskjerspenning, blant anna alle målingar for blandinga med matrikstilsetning på 15 l/m^3. Vidare er det målt verdiar større enn null, både ved matrikstilsetning på 12,5 l/m^3 og 20 l/m^3. Difor er dette sannsynlegvis ein feil i testapparatet som har oppstått under forsøket. Det er også vert å merke seg at dynamisk flytespenning i basis-resepten aukar ved gradvis tilsetning av fiber, medan resultat frå blandingane med matrikstilsetning gir reduksjon i dynamisk flyteskjerspenning ved tilsetning av fiber. Dette samsvarar heller ikkje med litteraturen, som viser til at flyteskjerspenninga generelt sett aukar med stigande fiber-innhald [1]. Ettersom rheometeret syner fleire usannsynlege tendensar, er det vanskeleg å seie kva for verdiar som er til å stole på.

Indirekte utrekningar av dynamisk flyteskjerspenning frå målingar i LCPC-boks, gir generelt sett høgre verdiar enn resultat frå rheometeret. Men ettersom LCPC-verdiane er indirekte målingar, er dei sannsynlegvis ikkje heilt riktige. Likevel stemmer tendensane frå utrekna flyteskjerspenning i LCPC-boks betre med litteraturen enn reometer-målingane. Dette gjeld både samanhengen med aukande flyteskjerspenning ved stigande fiberinnhald og tendensar ved kritisk fiberdosering [1]. Difor kan ein heilt klart trekkje slutningar mot at indirekte utrekningar frå LCPC-boks gir tydlegare resultat enn reometeret i dette tilfellet.



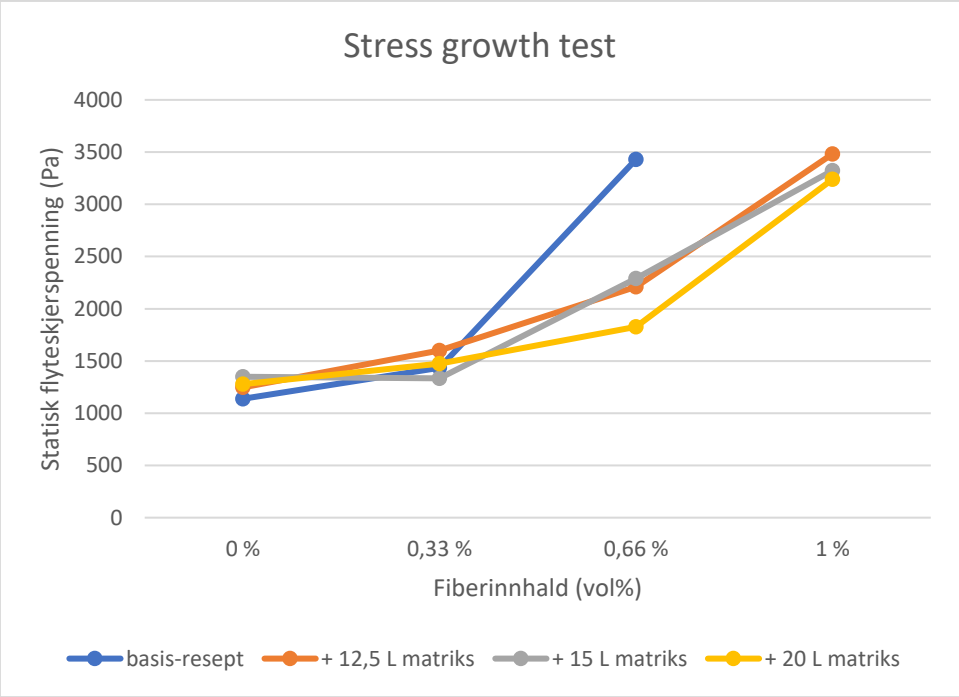
Figur 8.5 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner dynamisk flyteskjerspenning

Statisk flyteskjerpenning er minimum skjerspenning som trengst for å igangsette flyt frå kvilande tilstand [12]. I dei eksperimentelle forsøka er statisk flytespenning målt ved hjelp av «Stress growth test» i rheometeret. Figur 8.6 illustrerer resultatet frå dei ulike blandingane med kvar sin farge. X-aksen syner gradvis aukande fiberinnhald (vol%), medan y-aksen syner statisk flyteskjerspenning. Samla sett gir alle blandingane aukande statisk flyteskjerspenning ved aukande fiberinnhald. Hovudkjelda frå litteraturstudiet skil ikkje mellom statisk og dynamisk flyteskjerspenning [1]. Og difor kan ein anta at tendensane som er presentert i litteraturgjennomgangen gjeld begge typar flyteskjerspenning. Dermed samsvarar resultatet med hovudkjelda, som viser til at flyteskjerspenninga generelt sett aukar med stigande fiber-innhald [1].

Også her kan tendensane med brå auking av flyteskjerspenning tyde på at blandingane når si kritiske fiberdosering [1]. Faktisk gir denne grafen endå meir framståande tendensar på dette fenomenet. Resultata tyder på at auking av flyteskjerspenning frå 0 - 0,33 % fiberinnhald er relativt liten for alle blandingar. Deretter får kurva ei brå auking i stigningstal for basis-resepten ved tilsetning av ytterlegare 0,33% fiber. Aukande stigningstal førekjem også for blandinga med matrikstilsetning på 15 l/m^3, men endringa er mindre enn sistnemnte. På den andre sida held blandinga med tilsett 20 l/m^3 ei lineær linje frå 0 – 0,66 % fiberinnhald, og oppgangen i stigningstal førekjem heller i

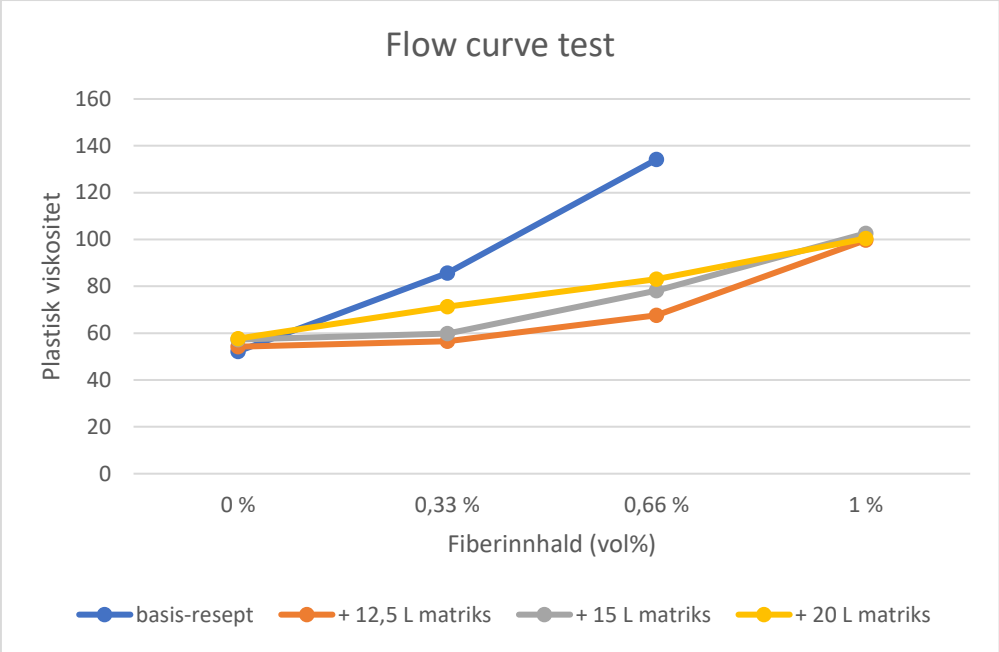
overgangen frå 0,66 – 1 % fiberinnhald. Dette tyder på at aukande matriksinnhald gjer at statisk flyteskjerspenning held seg på eit lågare nivå ved aukande fibertilsetning, og at kritisk dosering difor oppstår ved høgre fibertilsetningar. Med denne tendensen kan ein anta at flyteskjerspenninga hadde helde seg på eit relativt lite nivå også ved 1% fiberinnhald, ved ytterlegare tilsetning matriks (for eksempel ved tilsett 25L matriks per kubikk).

På same måte som ved dynamisk flyteskjerspenning (ved utrekningar frå LCPC-målingar), kan også ved denne testen sjå tendensar til lågare statisk flyteskjerspenning ved aukande tilsetningar av matriksinnhald. Tendensen er ikkje like tydeleg som ved dynamisk flyteskjerspenning.



Figur 8.6 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner statisk flyteskjerspenning

Vidare er også plastisk viskositet målt ved hjelp av «flow growth test» i rheometeret. Denne grunnleggjande fysiske storleiken skildrast som materialets motstand mot flyt, og relaterast ofte til klistreevne. [2] Figur 8.7 illustrerer resultatet frå dei ulike blandingane med kvar sin farge. X-aksen syner gradvis aukande fiberinnhald (vol%), medan y-aksen syner plastisk viskositet. Samla sett gir alle blandingane aukande plastisk viskositet ved større fiberinnhald. Dette samsvarar med at blandinga også får gradvis minkande utbreiing i både kjegle og LCPC-boks. Blandinga blir med andre ord mindre og mindre flytande med aukande fiberinnhald. Hovudkjelda frå litteraturstudiet peikar også på at plastisk viskositet generelt sett aukar ved ytterlegare fibertilsetning [1], og resultatet stemmer difor godt overeins med litteraturen.



Figur 8.7 Resultat frå eksperimentelle forsøk som syner plastisk viskositet

Samstundes er det verdt å merkje seg at aukande mengde matrikstilsetning gir aukande plastisk viskositet (sett vekk frå basis-resept). Dette motstår eigne hypotesar i forkant, som peika mot at plastisk viskositet sannsynlegvis ville reduserast med aukande matrikstilsetning. Ei mogeleg forklaring på resultatet, er at det tilsette matriksinnhaldet i seg sjølv har svært høg plastisk viskositet. Altså at matriks-tilsetninga er ei såpass seig/klistrete masse, at den påfører større motstand mot flyt i blandinga totalt sett. Ein kan også knyte denne samanhengen til at låg plastisk viskositet aukar mogelegheita for segregering [12]. Dermed bør det faktum at plastisk viskositet aukar ved aukande matrikstilsetning, også føre til at separasjonen minkar med aukande matrikstilsetning. Denne samanhengen kan ein faktisk sjå tendensar til basert på visuelle/opplevde erfaringar på laboratoriet, noko som tyder på at reometer-resultatet stemmer.

Resultatet med aukande viskositet ved aukande matrikstilsetning, kan også kome av statistiske variasjonar. Men ettersom resultata syner systematisk auking av plastisk viskositet ved ytterlegare tilsetningar av matriks, er statistiske variasjonar tvilsamt. Testen kunne også ha vore feil, ettersom testen av plastisk viskositet er gjennomført i same prosedyre som dynamisk flytespenning i reometeret. Og sidan dynamisk flytespenning heilt klart er prega av feil, kan også den plastiske viskositeten være det. Men dette verkar urimeleg, då testen frå eit anna synspunkt gir «riktige» resultat. Med dette meinast at alle blandingane får aukande plastisk viskositet ved aukande fiberinnhald (som stemmer overeins med resultat i litteraturstudiet) [1]. Det er altså fleire konkurrerande forklaringsmodellar på resultatet med plastisk viskositet, men det kan ikkje trekkjast konklusjonar. Det bør difor utførast vidare arbeid for å trekkje konklusjonar ved desse samanhengane.

8.2 Kva testmetodar er mest hensiktsmessige til bruk i fiberarmert betong?

Vidare følgjer ei drøfting som vurderer val av test-metode for å fastsetje ferske- og reologiske eigenskapar i fiberarmert betong. Litteraturstudiet gir anbefalingar, medan test-metodane som er nytta ved eksperimentelle forsøk også kan vurderast basert på eigne opplevingar og resultat.

8.2.1 Enkle test-metodar

Hovudkjelda frå litteraturstudiet «Ferske og reologiske kjenneteikn av fiberarmert betong», vektlegg følgande parameterar ved vurdering av ferskeigenskapar i fiberarmert betong: flyteevne, plastisk viskositet, fyllingskapasitet og passerings-evne. Artikkelen påpeikar at desse parameterane er særleg viktige når det gjeld sjølvkomprimerande fiberarmert betong. I deira vurdering har V-trakt og fyllingsboks gitt konsekvente resultat, og reknast difor som godt eigna ved karakterisering av fiberinnhald i betong. I tillegg reknast Ve-be testen som god indikator på komprimeringsevne, dersom betongen er veldig stiv (for eksempel ved høgt fiberinnhald). Studien peikar også på at L-boks og utbreiing frå kjegle er ein god kombinasjon, utan å leggje særleg forklaring bak dette. [1] Sannsynlegvis er årsaka at ein oppnår indikasjonar på både mobilitet og stabilitet ved utbreiingsdiameter og T500, medan L-boks gir indikasjon på komprimeringsevne. Dermed ser ein på heile spekteret av ferskeigenskapar ved kombinering av desse testane. Hovudkjelda har ikkje medrekna LCPC-boks i sine vurderingar.

Resultatnotatet frå case-forsøket til FiberCon påpeikar at utbreiing frå kjegle og T500 har avgrensingar på grunn av ujamne utbreiingssirklar i blandingar med separasjon [15]. I det eksperimentelle forsøket som er utført for dette spesialiseringsprosjektet, var ujamne utbreiingssirklar berre problematisk ved testing basis-resepten. Resultatdokumentet påpeikar vidare at dei ynskjer å undersøkje bruk av «LCPC-boks» som eit betre alternativ til utbreiing og T500 frå kjegle [15].

I dei eksperimentelle forsøka har LCPC-testen vist seg å framheve tendensar som samsvarar svært godt med tidlegare litteratur, når det gjeld påverknad av aukande fiberinnhald i betong. I tillegg er målingane brukt for indirekte fastsetjing av dynamisk flytespenning i det eksperimentelle forsøket, og viste seg å gi meir pålitelege resultat enn direkte måling med reometer. Ved samanlikning opp mot utbreiing frå kjegle, viste LCPC-testen seg å samsvare betre med erfart homogenitet. Det vil seie at ein lettare kunne knyte samanhengar med stor separasjon, ved utfall av unaturlege resultat på testing av spreiingslengd.

Roussel-artikkelen samanliknar bruk av kjegle og LCPC boks i sjølvkomprimerande betong, men inkluderer ikkje bruk av fiber. Artikkelen poengterer at synk-utbreiing har evne til å oppfatte variasjonar i blandinga si proporsjonering, men strekk ikkje til for å bruke målingane indirekte for utrekning av dynamisk flyteskjerspenning. LCPC-boks kan derimot gi ein enkel og ganske nøyaktig fastsetjing av flyteskjærspenning i sjølvkomprimerande betong [14]. Ut frå det eksperimentelle forsøket, ser LCPC-boksen ut til å kunne fastsetje pålitelege resultat for dynamisk flyteskjerspenning også ved bruk av fiberarmert betong. Dette stemmer også overeins med bruken av LCPC boks i doktoravhandlinga til Sarmiento [24].

LCPC manglar samstundes mål på passeringsevne, og kan heller ikkje gi indikasjon på stabilitet og evna til å motstå separasjon. Basert på hovudkjelda, er det berre T500 testen som gir indikator på stabilitet. Difor misser ein denne indikatoren ved eventuell erstatning av utbreiing frå kjegle (inkludert T500) med LCPC, men får til gjengjeld betre indikatorar på flyteskjerspenning og fyllingsevne. Manglande indikator på passeringsevne (og dermed også komprimeringsevne), kan løysast ved å kombinere bruk av LCPC med L-boks eller fyllingsboks-test.

8.2.2 Rheometer

Hovudkjelda poengterer at det ikkje er tilstrekkeleg med enkle, empiriske og subjektive test-metodar. Det er ynskjeleg å utvikle ein database som presenterer reologiske eigenskapar i fiberarmert betong [1]. Men dette er problematisk når reologi ikkje er grunnleggjande teori for fleire av testmetodane [2]. Ein bør difor bruke reometer som kan måle fundamentale eigenskapar frå reologien direkte. Difor er reometer er eit svært nyttig instrument for å kunne bekrefte skilnadar i materialåtferd som oppstår ved bruk av ulike bestanddelar i komposisjonen [1].

I det eksperimentelle forsøket for dette spesialiseringsprosjektet viste det seg å oppstå feil i testresultata frå ICAR reometeret. Dette betyr ikkje nødvendigvis at reometeret er dårleg eigna for fiberarmert betong. Feilen i det eksperimentelle forsøket er sannsynlegvis mogeleg å finne årsaka til, og forsøket bør gjennomførast fleire gongar for å kunne fastslå om dette er eit vedvarande problem. Typiske problemstillingar som kan føre til feilverdiar ved bruk av fiberbetong i reometer er; pluggstraum, sedimentering av grovt tilslag, gliding, samt at opninga på testbehaldaren ikkje er stor nok for dei lange fibrane. Likevel kan dei beste reometer-instrumenta avverje mange av desse problemstillingane. ICAR reometeret reknast som eit av dei beste [1].

Likevel må ein ha tilgang til enkle test-metodar, ettersom reometer ikkje er passande for bruk på byggeplass [1]. Boka «Concrete Technology 1. TKT 4215. Kompendium» påstår i tillegg at betongen er unikt tilpassa kvar enkelt støypeprosess, og at det er difor urimeleg å basere testar på vitskaplege teoriar og modellar i fleire tilfelle [2].

8.3 Korleis kan mine resultat foreinast med partikkel matriks metoden

Vidare følgjer diskusjonar på korleis resultat frå det eksperimentelle forsøket kan foreinast med partikkel matriks metoden, og deretter korleis resultat frå litteraturstudiet kan foreinast med partikkel matriks metoden

8.3.1 Kan forsøksresultata foreinast med partikkel matriks metoden?

I det eksperimentelle forsøket blei det utført fleire forsøk med ulike mengder matrikstilsetning. Det var ynskjeleg å finne ei passande mengde matrikstilsetning, slik at testane med fiberinnhald kunne resultere i like gode ferskeigenskapar som utan fiberinnhald. Det blei antatt at tilsetning av 10 liter matriks per kubikk ikkje var tilstrekkeleg, basert på FiberCon sine resultat [15]. Difor blei det i dette prosjektet forsøkt å tilsetje 20 l/m^3, 15 l/m^3 og 12,5 l/m^3. Alle blandingane med matrikstilsetning gav langt betre resultat på støypeevne enn basis-blandinga, sjølv med 1% fiberinnhald. Men som tidlegare nemnt, bør ikkje resultat frå basis-resepten samanliknast direkte med dei andre blandingane på grunn av tidsbruk på justering i forkant. Sannsynlegvis ville resultat frå basis-resepten vore nærare resultata frå dei andre blandingane dersom testane blei gjennomført på same tidspunkt (i forhold til oppstart av blandeprosess). På grunn av dette, er det ikkje mogeleg å diskutere kor stor matrikstilsetninga skal være, for at testane med fiberinnhald skal oppnå like gode resultat som utan fiberinnhald.

Dersom ein som tidlegare nemnt, tek utgangspunkt i at blandinga med 12,5 l/m^3 matrikstilsetning gir missvisande resultat, samt at basis-resepten har langt dårlegare støypeevne enn den ville hatt utan justering i forkant. Kan ein konkludere med at aukande matrikstilsetning gir jamt over betre ferskeigenskapar på dei fleste testane. Ein kan konkludere med betre flyt og fyllingsevne, som eit resultat av utbreiing frå kjegle og LCPC boks. I tillegg kan ein slå fast mindre statisk flyteskjerspenning ved aukande matrikstilsetning frå reometer-testane, samt mindre dynamisk flyteskjerspenning ved aukande matrikstilsetning frå indirekte målingar i LCPC boks. Resultat på dynamisk flyteskjerspenning frå reometer blir sett vekk ifrå, då dei verkar missleiande.

På den andre sida, aukar plastisk viskositet ved aukande matrikstilsetning i dei eksperimentelle forsøka. Det kan ikkje konkluderast med om dette er ein kjend samanheng, ettersom det ikkje er funne liknande litteratur som beviser det same. Sannsynlegvis vil dette avhenge av bestanddelane som er nytta i matriksfasen [1], som drøftast vidare i kapittel 8.3.2. Likevel er ikkje aukande plastisk viskositet nødvendigvis negativt, då det minkar mogelegheita for segregering [12]. Samstundes vil ei for stiv masse minske mobilitet og komprimeringsevne. Så det gjeld difor å finne den riktige dosen matrikstilsetning for å oppnå eit godt resultat.

8.3.2 Kan litteraturstudiet foreinast med partikkel matriks metoden?

Forsøksresultatet; at aukande matrikstilsetning betrar ferskeigenskapane i fiberbetongen, kan grunngjevast basert på resultat frå hovudkjelda i litteraturstudiet. Litteraturen bekreftar nemleg at bestandane som er i matriks-fasen betrar støypeevna, medan bestanddelane i partikkel-fasen reduserer støypeevna. Ein ser at tilsetning av både sementholdige materialar, silika, filler-materialar og SP har evna til å betre ferskeigenskapane. Medan store mengder grovt tilslag (som utgjer store delar av partikkelfasen) gir negative verknadar på støypeevna [1].

Ein ser at sementholdige materialar gir smørjande effekt og minskar nettverksstruktur mellom tilslag og fiber. Medan silika skapar fluiditet i blandinga, ved å fylle holrom mellom sand, fibrar og sementpasta. I tillegg gir filler-materialane rom for at sandpartiklar skal kunne bevege seg i blandinga, medan ei passande dosering SP vil spreie sementpartiklane og skape flyt i blandinga [1]. Alt dette er verknaden av matriks-fasen.

Hovudkjelda bekreftar på den andre sida at ein bør avgrense delen grovt tilslag, samt redusere den maksimale tilslagsstørelsen. Med dette oppnår ein generelt betre passeringsevne, fyllingsevne og segregeringsmotstand. Grovt tilslag gir fibrane mindre rørsle-friheit, då fibrane vil danne nettverksstrukturar rundt dei grove tilslags-partiklane. Når ein derimot har ein større del fint tilslag, vil ein kunne implementere meir fiber. Men det er viktig å understreke at eit stort innhald av veldig små tilslagspartiklar også er negativt, då det vil krevje meir vatn. Hovudkjelda understrekar også at eit lågare volum av tilslaget totalt sett (både grovt og fint), gir rom for større fiberinnhald [1].

Ei hypotese som kan trekkjast ut frå hovudkjelda sine resultat, er at mengda matriksinnhald som bør tilsetjast for å oppnå same støypeevne som utan fiberinnhald, også vil være avhengig av geometrien til fibrane. Det er tydeleg frå litteraturen at eit større lengde/diameter-forhold (aspect-ratio), reduserer støypeevna. Men ettersom eit lågare lengde/diameter-forhold også gir dårlegare styrke, anbefaler studien reduksjon i tilslagsstorleik og tilsetning av mørtel og heller behalde det store fibersideforhaldet. Også meir uregelmessig fiberform har større negative påverknadar på støypeevna [1], og vil sannsynlegvis krevje meir matrikstilsetning enn rette fibrar. Samstundes er det å auke sementinnhald og fint tilslag, eller tilsette kjemiske tilsetningar, også anbefalt for at fibrane orienterast betre. Her er det viktig å finne eit balansepunkt med plastisk viskositet og flyteskjerspenning (ikkje for stor og ikkje for liten) [1]. Altså bør ein også tenkje over fiberorientering ved val av matrikstilsetning.

Hovudstudien påpeikar også at fiberinnhaldet må reknast som like viktig som vatn-sement forhald, tilslag-sement-forhald og vassinnhald, for å oppnå god støypeevne i fiberbetong [1].

8.4 Feilkjelder

Nokre feilkjelder er allereie nemnt i føregåande drøftingskapittel. Vidare følgjer ein gjennomgang av feilkjeldene som er særleg verd å merkje seg, både når det gjeld eksperimentelle forsøk og litteraturstudium.

8.4.1 Eksperimentelle forsøk

Resultata framhevar ein nokså stor skilnad mellom støypeevna til basis-resepten og støypeevna til dei andre blandingane. Årsaka til dette er tidsbruk tillagt justering av basis-resepten i forkant av testing. Sjølv om retarder er tilsett i resepten, vil betongen framleis tape støypeevne som eit resultat av tid. Det er kjent at både statiske og dynamiske flytespenningar aukar med tid, ettersom effektiviteten til vassreduserande tilsetningsstoff minkar [12]. Når skilnaden i tidsbruk mellom basis-resepten og dei andre blandingane ligg i nærleiken av to timar (kap. 6.1.7) , vil dette skape framståande endringar i konsistensen.

Blandinga med matrikstilsetning på 12 l/m^3 gir merkelege resultat på uvisst grunnlag. Då det har vist seg at aukande matrikstilsetning betrar den plastiske viskositeten i blandinga, føreligg det ein sterk indikasjon på at dette har samanheng med stabiliteten til blandinga. Likevel kan det ha årsakssamanheng med andre mogelege feilkjelder, som for eksempel feil ved innveging av materialar. Særleg ville ei unøyaktig oppmåling av SP stemme godt overeins med den blandinga som opplevast. Ved større tilsetning av SP får blandinga større mobilitet, samt auka mogelegheit for separasjon.

Dersom ein hadde utført alle forsøka fleire gongar, ville ein sannsynlegvis oppdaga fleire variasjonar. Dette kallast statistiske variasjonar. Dette kan liggje til grunn i alle testresultata, ettersom kvar resept berre er testa ein gong. Ved tydlege og systematiske tendensar i målingane, minskar sannsynet for at ein statistisk variasjon føreligg.

8.4.2 Litteraturstudium

Eksperimentelle forsøk som er utført i ulike laboratorium, utført av ulike personar på ulike premissar byr på mange utfordringar. For å kunne utføre ei fullverdig samanlikning er kvar minste detalj av betydning. Som hovudkjelda syner er det mange komponentar som er avgjerande for reologiske og ferske eigenskapar i betong; geometrien til fibrane, bestanddelane i betongen, blanding, temperaturar osv. [1]. På den andre sida er det ikkje konkrete resultat som er samanlikna i denne rapporten, men tendensar basert på mange kjelder. Difor er ikkje detaljane av like stor betydning.

9 Konklusjon

Aukande volumfraksjon med stålfiber reduserer støypeevna til betong. Dersom ein beskriv støypeevna kvalitativt, ser ein at aukande volumfraksjonar med fiber reduserer både mobilitet, stabilitet og komprimeringsevne. Desse tendensane er plukka opp ved hjelp av enkle, empiriske test-metodar, samt bekrefta frå litterære kjelder. Vidare ser ein også at fundamentale verdiar basert på vitskap frå reologi, plastisk viskositet og flyteskjerspenning, generelt aukar ved aukande fiberinnhald. Resultat frå studiar peikar også på at det finnast ei kritisk fiberdosering, der flytespenninga vil få ei kraftig auking ved ytterlegare fibertilsetning. Dette fenomenet kunne ein også sjå tendensar til basert på resultat frå det eksperimentelle forsøket.

Reometer er særleg hensiktsmessige å bruke ved utvikling av databasar som presenterer reologiske eigenskapar i fiberbetong, og dei beste instrumenta kan avverje mesteparten av problematikken knytt til fiberbetong i reometer. På den andre sida er reometer eit laboratorieorientert instrument, og eignar seg difor ikkje på byggeplass. Ein har difor også bruk for enklare testmetodar. Per i dag manglar det standardiserte testmetodar for fiberarmert betong, og ulike testmetodar er difor samanlikna. Ein kan konkludere med at LCPC-boksen eignar seg betre for bruk i fiberbetong enn utbreiing frå kjegle. LCPC gir god indikator på fyllingsevna til betongen, samt ei relativt nøyaktig indirekte måling av dynamisk flyteskjerspenning. Men ved eventuell erstatning av utbreiing frå kjegle (inkludert T500), misser ein indikator på stabilitet. I tillegg bør LCPC-boksen supplerast med L-boks eller fyllingsboks-test for å kunne gi indikator på passeringsevne.

Ettersom partikkel matriks metoden foreløpig ikkje viser omsyn til endringane som oppstår ved tilføying av fiberarmering i betongblandinga, er resultat frå eksperimentelle forsøk og litteraturstudium vurdert opp mot denne metoden. Det var ynskjeleg å finne ei passande mengde matrikstilsetning, slik at testane med fiberinnhald kunne resultere i like gode ferskeigenskapar som utan fiberinnhald. Resultata kunne dessverre ikkje gi konkrete konklusjonar for ei passande matrikstilsetning, men ein fastslå at aukande matrikstilsetning gir betre flyt og fyllingsevne, samt mindre statisk og dynamisk flyteskjerspenning. Dette kan også bekreftast frå litterære kjelder. På den andre sida, syner laboratorieresultatet aukande plastisk viskositet ved aukande matrikstilsetning. Men det kan ikkje trekkjast konklusjonar ved at dette er ein kjend samanheng.

Litteraturen kan i tillegg bekrefte negative effektar ved aukande partikkelfase. Store volumfraksjonar med tilslag totalt sett (både grovt og fint) reduserer støypeevna. Særleg bruk av store mengder grovt tilslag, då dei dannar nettverksstruktur med fibrane. Sannsynlegvis er ei passande matrikstilsetning også avhengig av geometrien til fibrane. Hovudstudien påpeikar også at fiberinnhaldet må reknast som like viktig som vatn-sement forhald, tilslag-sement-forhald og vassinnhald, for å oppnå god støypeevne i fiberbetong.

10 Anbefalingar

Ved vidare arbeid anbefalast det å gjennomføre heile det eksperimentelle forsøket om igjen fleire gongar. Med dette kunne ein analysert eventuelle statistiske variasjonar. I tillegg ville det å gjennomføre forsøket utan justering av basis-resept i forkant, eventuelt brukt FiberCon-resepten utan utskifting av materialar, gitt langt meir presise resultat. Dermed ville ein sannsynlegvis fått sterkare indikasjonar på kva ei passande matrikstilsetning vil være, og kunne med dette ha fastslått konkrete relasjonar til partikkel matriks metoden. I tillegg er det viktig å halde fram med utvikling av databasar som presenterer reologiske eigenskapar, samt etablering av standardiserte testmetodar for fiberarmert betong.

11 Referansar

[1] W. Wang, A. Shen, Z. Lyu, Z. He, og K. T. Q. Nguyen, «Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete——A review», *Constr. Build. Mater.*, bd. 296, aug. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123734.

[2] M. Maage *mfl.*, *Concrete Technology 1. TKT 4215. Kompendium*. Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2016.

[3] FiberCon, «Prosjektbeskrivelse for innovasjonsprosjekt i næringslivet», 2021.

[4] S. Sandbakk, «Ny publikasjon: NB38 'Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner'», *mur+betong*, s. 1–2, 2020, Vitja: sep. 30, 2022. [Online]. Tilgjengeleg på: https://murbetong.no/wp-content/uploads/2022/01/2002-fiberarmert.pdf.

[5] FN-sambandet, «FNs bærekraftsmål», *United nations association of Norway*, sep. 16, 2022. https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal (vitja okt. 04, 2022).

[6] J. H. A. Rocha, R. D. Toledo Filho, og N. G. Cayo-Chileno, «Sustainable alternatives to CO2 reduction in the cement industry: A short review», *Mater. Today Proc.*, bd. 57, s. 436–439, 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.12.565.

[7] P. Kumar Mehta, H. Meryman, og L. Ap, «Tools for Reducing Carbon Emissions Due to Cement Consumption», *Build. blocks*, s. 11–15, jan. 2009, Vitja: okt. 04, 2022. [Online]. Tilgjengeleg på: https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2014/08/C-BB-SustainableConcrete_MehtaMeryman-Jan091.pdf.

[8] T. Kanstad *mfl.*, «Publikasjon nr. 38: Fiberarmert betong i bærende konstruksjoner», *Nor. Betongforen.*, s. 98, 2020.

[9] B. Han, L. Zhang, og J. Ou, *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*. Singapore: Springer Singapore Pte. Limited, 2017.

[10] Standard Norge, «Eurokode 2», *Standard Norge*. https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/produktpresentasjon/?ProductID=424306 (vitja nov. 16, 2022).

[11] I. Löfgren, «Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis», 2005.

[12] Germann Instruments, «Technical datasheet for ICAR Plus».

[13] P. Aggarwal, A. Elrahman Elbaz, R. Siddique, Y. Aggarwal, og S. M. Gupta, «Self-compacting concrete-procedure for mix design», *Academia*, bd. January-June, nr. 12, s. 15–24, 2008, Vitja: nov. 23, 2022. [Online]. Tilgjengeleg på: http://lejpt.academicdirect.org.

[14] N. Roussel, «The LCPC BOX: A cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC», *Mater. Struct. Constr.*, bd. 40, nr. 9, s. 889–896, nov. 2007, doi: 10.1617/S11527-007-9230-4.

[15] T. A. Martius-Hammer og O. Skjølsvold, «Fibercon AP1 Materialløsninger, resultater per des 2021», Trondheim, 2022.

[16] Dramix, «Datasheet 4D 65/60 BG», 2015. [Online]. Tilgjengeleg på: https://www.bekaert.com/en/product-catalog/content/dop/~//-/media/Files/ImportFiles/DRAMIX-4D/Dramix-4D-6560BG-6560BG.pdf?sc_lang=en-US.

[17] Dramix, «Datasheet 3D 65/35 BG», *Bekaert*, s. 1, 2015, [Online]. Tilgjengeleg på: https://www.bekaert.com/en/product-catalog/content/dop/~%7B%7D//-/media/Files/ImportFiles/DRAMIX-3D/Dramix-3D-6535BG-6535BG.pdf?sc_lang=en-US.

[18] Aalborg Portland, «Produktdatablad RAPID® cement / RAPID® AALBORG CEMENT®», *Aalborg Portland*, okt. 2018. https://assets.starkgroup.structpim.com/?id=58279 (vitja nov. 15, 2022).

[19] Elkem, «Product data sheet Elkem Microsilica® 940 Concrete applications», *Elkem ASA Silicon Products*, aug. 01, 2021. https://www.elkem.com/globalassets/silicon-products/construction/concrete/elkem-microsilica-940.pdf (vitja nov. 15, 2022).

[20] Mapei, «PRODUKTBESKRIVELSE Dynamon XTend-U100», *Mapei*, 2018. https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider60/products-documents/1_428-dynamonxtendu100-no_347951f308f94f8bbadc54209790bff9.pdf?sfvrsn=6463256d_0 (vitja

nov. 15, 2022).
[21] Mapei, «MAPETARD R Størkningsretarderende tilsetningsstoff», *Mapei*, 2020. https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider60/products-documents/1_06883_mapetard-r_no_4fbaee374ee041dca8ad33f2bfdf74ca.pdf?sfvrsn=5ed9ef2_0 (vitja nov. 15, 2022).
[22] P. Ysabel Sosa, S. Jacobsen, K. Co-supervisor, R. Cepuritis, og K. Elisabeth Leite Skare, «Particle Size Distribution and Specific Surface Area Measurements with X-ray SediGraph on Filler, Cement and Fly Ash», *NTNU Open*, s. 1–112, jun. 2017, Vitja: nov. 15, 2022. [Online]. Tilgjengeleg på: https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2455576.
[23] Standard Norge, «NS-EN 12350-1:2019», *Standard Norge*. s. 1–12, des. 01, 2019, Vitja: nov. 23, 2022. [Online]. Tilgjengeleg på: https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1106510.
[24] E. V. Sarmiento, «Flowable fibre-reinforced concrete for structural applications», Norwegian University of Science and Technology, 2015.
[25] «Academic Information Seeking - University of Copenhagen, Technical University of Denmark (DTU) - Course Info | Coursera». https://www.coursera.org/learn/academicinfoseek/home/info (vitja nov. 12, 2021).

12 Vedlegg

Vedlegg 1: Basis-resept og modifiserte reseptar.
Vedlegg 2: Søkehistorie.
Vedlegg 3: Framdriftsplan.
Vedlegg 4: Plakat.