



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjonsteknikk	Vårsemesteret, 2021 Åpen / Konfidensiell
Forfattere: Håvard Bjelland Per Kristian Moi
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder(e): Kjell Tore Fosså	
Tittel på masteroppgaven: Alternative bindemidlers effekt på betong Engelsk tittel: Alternative binders' effect on concrete	
Studiepoeng: 20	
Emneord: Alternative bindemidler Egenskaper Miljøvennlig betong Reologi	Sidetall: 46 + vedlegg/annet: 32 Stavanger, 15.05.21

Forord

Først og fremst vil vi takke veilederen vår Kjell Tore Fosså for hans bidrag med veiledning både før valg av emne og underveis igjennom hele dette semesteret.

Gjennom denne oppgaven har vi gjennomført flere tester ved laboratoriet ved Universitetet i Stavanger. Takk til Samdar Kakay og Jarle Berge for god hjelp og innspill ved utførelsen av de forskjellige forsøkene som er gjennomført i forbindelse med oppgaven.

Avhandlingen har blitt utført på Universitetet i Stavanger, ved det Teknisk-Naturvitenskaplige fakultet, som også har dekket de nødvendige økonomiske utgiftene. Dette er en todelt oppgave som består av et litteraturstudium og eksperimentelle forsøk som er gjennomført i laboratoriet.

Stavanger 15.05.2021

Håvard Bjelland og Per Kristian Moi

Sammendrag

Denne oppgaven tar for seg både de ferske og de herdede egenskapene til miljøbetonger, hvor Anleggsement blir brukt som referanse. Sammen med veileder ble vi enige om en prøveplan over hvilke bindemidler vi skulle ta for oss, for å sammenligne opp mot referanseblandingen. Vi ser nærmere på hvordan alternative bindemidler påvirker betongens karaktertrekk, spesielt de reologiske egenskapene, men også egenskaper som trykkfasthet, elastisitetsmodul og bestandighet.

Da oppgaven er todelt, blir aktuell teori fra kjent litteratur og forsøk tatt for seg, hovedsakelig informasjon knyttet til reologien til betong. Flygeaske og slagg sin innvirkning på betongblandingen blir gjennomgått, og gir en viss indikasjon på hva en kan forvente fra resultatene av de ulike forsøkene.

Fra resultatene blir forskjeller, likheter, usikkerheter og feilkilder diskutert nøye i resultatdelen. Resultatene blir gjennomgått steg for steg ved hjelp av tabeller og figurer som er hentet fra testene. Resultatene fra de ferske testene viser at anleggsbetongen gir best støpelighet. Trykkfasthet viser en treigere fasthetsutvikling for Anleggsement FA enn for referanseblandingen. Dette gjaldt også for Lavvarmebetongen. Begge betongene med alternative bindemidler har en høyere porøsitet, som også gir en lavere elastisitetsmodul.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning	6
1.1 Bakgrunn	6
1.2 Problemstilling	6
2. Teori	7
2.1 Hva er betong	7
2.2 Betong og miljø.....	7
2.3 Betongens delmaterialer	8
2.3.1 Tilslag	8
2.3.2 Anleggsement.....	8
2.3.3 Anleggsement FA	9
2.3.4 Lavvarmesement	10
2.4 Alternative bindemidler i betong.....	11
2.4.1 Flygeaske.....	11
2.4.2 Effekten av flygeaske	11
2.4.3 Slagg	12
2.4.4 Effekten av slagg	13
2.5 Reologi.....	13
2.5.1 Viskositet og flyteskjærspenning	14
2.5.2 Bingham modell	15
2.5.3 Tiksotropi.....	15
2.5.4 Støpelighet	16
2.5.7 Vanninnhold og v/c-tall	17
3. Metoder laboratorieprogram.....	18
3.1 Blanding	18
3.1.1 Proporsjonering	18
3.1.2 Blandeprosedyre	18
3.2 Fersk betong	18
3.2.1 Synkmål	18
3.2.2 Densitet.....	19
3.2.3 Luftinnhold	19
3.2.4 Reometer	21

3.3 Utstøping	23
3.3.1 Terninger	23
3.3.2 Sylinder	23
3.4 Prøving herdet betong	23
3.4.1 Trykkfasthet	23
3.4.2 Elastisitetsmodul	24
3.4.3 Kapillær sugeshastighet og porøsitet	26
4. Prøveprogram og materialer	27
4.1 Info prøveprogram.....	27
5. Resultat og diskusjon	28
5.1 Fersk Betong synk og utbredelse	28
5.2 Densitet og luftinnhold	29
5.3 Reometer målinger.....	30
5.4 Herdet betong	32
5.4.1 Trykkfasthet	32
5.4.2 Elastisitetsmodul	33
5.4.3 Kapillær sugeshastighet og porøsitet	34
5.5 Feilkilder	38
6. Konklusjon.....	39
7. Forslag til framtidig arbeid.....	41
Litteraturliste	42
Figurliste	44
Tabell liste	45
Vedlegg	46

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Betong er det byggematerialet som er mest brukt på verdensbasis, grunnet sine gode egenskaper som styrke, levetid og lave driftskostnader. Sementproduksjonen er den største miljøutfordringen når det kommer til betong, og blir anslått til å stå for fem prosent av det totale CO₂-utslippet på tvers av all industri og sektorer (Norcem 2020b). Verdens befolkning fortsetter å vokse, samtidig som krav og ønsker om høyere levestandard. Dette gjør at vi står ovenfor store mangler på ressurser og energi, som også skaper store mengder avfall. For byggenæringen samt andre næringer blir det satt søkelys på å redusere klimagassutslippene. Tidligere har hovedfokuset vært på å bygge energieffektive konstruksjoner, men nå stilles det mer og mer krav til helheten av miljøpåvirkningen til et bygg. Miljøvennlige materialer står nå i fokus.

1.2 Problemstilling

I denne oppgaven skal vi se nærmere på bindemiddelet til betongen. Vi skal ta for oss tre forskjellige sementtyper med Anleggsement som referanse. Hovedfokuset ligger på de ferske egenskapene av betongen, men vi ser også nærmere på fasthetsutvikling og egenskapene som har en tilknytning til bestandigheten. Problemstillingen blir formulert:

Hvordan fungerer betong blandningene i forhold til støpelighet? Vil bruken av reometer gi andre eller mer pålitelige målinger på de ferske egenskapene satt opp mot synkmålene?

Hva er betongens evne til å motstå nedbrytende krefter, motstandsevnen til å transportere fukt og aggressiver, med andre ord tetthet/porøsitet?

Hvordan vil fasthetsutviklingen til de to miljøbetongene bli over tid?

Hvor egnet er bruken av betong med høy flygeaske dosering, eller en lavvarmesement med høyt innhold av slagg, i forhold til en ordinær betong sammensetning?

2. Teori

2.1 Hva er betong

Betong er det mest brukte konstruksjonsmaterialet verden over, og består av vann, sement, tilslag og tilsetningsstoffer (Kontrollrådet 2019). Betongkvaliteten er avhengig av tilsatt volum av de forskjellige tilsetningsstoffene. Tilslag skal utgjøre 65-75 %, sement 10-12% og vann 15-20% av det totale volumet. Tilsetningsstoffer tilsettes for å justere egenskapene til betongen etter behov i fersk eller herdet form (Pedersen 2019). Betongen blir laget med flere forskjellige typer sement som også inneholder pozzolaner, flygeaske, slagg, mikro silika, tilsetningsstoffer, polymerere, fibrer og så videre.

Ved blanding av betong kan det dukke opp hva som er forholdet mellom bestanddelen i blandingen. For det første kan man se produktene av hydreringen av sementen, med tilslag som fyller rollen som et billig eller billigere fortynningsmiddel. Man kan bruke det grove tilslaget som en slags mini murverk som sammenføres med mørtel, dvs. av en blanding av hydratisert sement og fine tilslag. Betong består som en første tilnærming av to faser, hydrert sementpasta og tilslag, og som et resultat styres betongens egenskaper av egenskapene til de to fasene, og også av tilstedeværelsen av grensesnittet mellom dem (Neville og Brooks 2010).

2.2 Betong og miljø

Behovet av sement i Norge ligger på ca. 2,0 millioner tonn årlig. Dette utgjør litt i overkant av 4,4 mill. m³ betong og andre prefabrikkerte betongelementer. Når betong konstruksjoner blir satt opp vil det alltid være noen utfordringer ved valg av materialer med tanke på miljøprofilen. Når det blir valgt materialer skal det inngås overenskomster som omhandler miljøavtrykk, brukervennlighet, levetid og miljøpåvirkning i bruksfasen. Om hovedfokuset blir liggende på miljøavtrykket fremfor fremstillingen av byggematerialer, kan det oppstå problemer med bygg som må renoveres etter kort tid. Om man bruker en mer miljøvennlig betong er det nødvendig at kvaliteten er god nok, fordi dersom bygget trenger renovasjon/vedlikehold i brukstiden, vil det stort sett komme dårligere ut miljømessig (Sørli 2016).

Ved fabrikking av betong medføres det store utslipp av CO₂, men med gode kvalitetssikringer og prosjektering av konstruksjonene vil man kunne redusere de totale miljøpåkjenningene. Betong har en veldig god bestandighet, og riktige valg av materialer vil gi redusert utslipp og energibruk, samt styrke vedlikeholdsbudsjettet.

For å redusere sementbehovet kan man benytte seg av tiltak som å optimalisere bruken av sement i betongblandinger, bruke betongen mer effektivt, minimere avfall i konstruksjonen og maksimere levetiden på bygninger. Effektivisering av materialer har fått økende støtte de siste årene, og sementproduksjonen har ikke økt omfattende de siste fem årene (Levi mfl. 2020).

Klinker er hovedingrediensen i sement. Ved produksjon av sementklinker, dannes det store mengder CO₂ når kalken blir kalsinert. I de senere årene har produsentene av sementklinkeren klart å utslagsgivende redusere CO₂- utslippene. Deler av klinkeren som er tilsatt i sementen kan nå bli erstattet med mineraler som har tilsvarende sammensetning. De mineralene inneholder en større andel pozzolaner, og kommer ofte fra restproduksjon fra andre industrier. Dette gjør at nødvendigheten med å tilsette klinker synker og som følger av dette vil CO₂- utslippene bli redusert. De mest normale mineralene for å erstatte klinker i sementen, er på verdensbasis flygeaske og slagg (Sørli 2016). Hvor forsvarlig det er å øke produsert mengde flygeaske ved forbrenning av kull er en egen debatt, men når flygeaske allerede finnes i store mengder er det ingen tvil at det gagnar både miljøet og bruken av ressurser ved å utnytte dette i sement (Pettersen 2016).

2.3 Betongens delmaterialer

2.3.1 Tilslag

Normalt sett utgjør tilslaget 65-75% av betongvolumet som nevnt tidligere, som gjør at tilslaget vil ha en stor betydning for betongens kvalitet og egenskaper. Sammensetningen av de forskjellige tilslagene vil også spille en stor rolle på egenskapene og kvaliteten til den ferdige betongen, dette gjelder både fersk betong, betong under herding og ferdig herdet betong (Byggforsk 2018). Man skiller mellom to ulike typer tilslag, og dette er fint tilslag eller sand med korngradering på 0-8 mm. Den andre typen tilslag er grovt og kornstørrelsen på den strekker seg fra 8-16 mm.

Korngraderingen er med på å skape en jevn og god fordeling av de forskjellige kornstørrelsene. Det fine tilslaget er med på å fylle opp hulrom og luftbobler som danner seg mellom det grove tilslaget. Dette skaper en kraftigere betong og den ferske betongen blir lettere å jobbe med.

2.3.2 Anleggsement

Anleggsement er en type Portland sement som er utviklet til konstruksjoner som broer og havner; dette er konstruksjoner som er lagd med en betong med bestandighetsklasse M45 og MF 45 eller strengere. Denne sementen har veldig gode bestandighetsegenskaper ved lavt v/c-tall og har høy fasthet etter 28 dager, dette gjør Anleggsementen bra egnet ved bruk av høyere

bestandighetsklasser (Maage mfl. 2016). Denne sementen har et lavt alkaliinnhold som gjør at man kan bruke alkalireaktive tilslag, for å kunne produsere en holdbar betong (Maage mfl. 2016).

Tabell 1: Norcem Anleggsement

ANLEGGSEMENT (CEM I 52,5 N)	
Finhet [m ² /kg]	415
Spesifikk vekt [kg/m ³]	3.14
Begynnende størkning [min]	120
Sulfat (SO ₃) [%]	≤ 4.0
Klorid (Cl ⁻) [%]	≤ 0.07
Alkalier (Na ₂ O _{ekv}) [%]	0.6
Klinker [%]	96
Sekundære bestanddeler [%]	4

2.3.3 Anleggsement FA

Produsenten selv, Norcem, beskriver sementen som en spesialsement for anleggskonstruksjoner med mulighet for bruk i alle eksponering-, bestandighet- og fasthetsklasser. Videre så er den tilpasset for bruk i norske forhold med tanke på bestandighetsklasse M45 og MF45 eller strengere. Den lave varmeutviklingen fra sementen gjør den velegnet for bruk i mer massive konstruksjoner (Norcem 2020a). Anlegg FA er designet til å samsvare egenskapene til vanlig Anleggsement. Dette blir oppnådd ved å male opp klinker delen av Anlegg FA veldig fin for å kompensere for den lave reaktiviteten til FA på kort tid (Maage mfl. 2016).

Tabell 2: Norcem Anleggsement FA

ANLEGGSEMENT FA (CEM II/A-V 42.5N)	
Finhet [m^2/kg]	390
Spesifikk vekt [kg/m^3]	3.02
Begynnende størkning [min]	165
Sulfat (SO_3) [%]	≤ 3.5
Klorid (Cl^-) [%]	≤ 0.085
Alkalier ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$) [%]	0.6
Klinker [%]	83
Flygeaske [%]	17

2.3.4 Lavvarmesement

Hensikten med Lavvarmesement er å produsere en betong med redusert varmeutvikling. Tiltak for å få redusere varmeutviklingen i betongen oppnås ved å bruke tilsetningsmaterialer i stedet for portlandsementen. Dette er tilsetningsstoffer som, f.eks. flygeaske eller slag (Norsk Betongforening 2018).

For å oppnå en Lavvarmesement tilsettes store mengder flygeaske og slag, man kan også bruke flygeaske og slag som erstatninger for deler av sementen. Varmeutviklingen i betongen styres av sementmengden, og av denne grunn bør det benyttes så lite sement som mulig. Andre tiltak som gjøres for å dempe varmeutviklinga er å ta i bruk et tilslag som er lite vannkrevende, benytte seg av så stort steininnhold som mulig i proporsjoneringa og eventuelt bruke tilsetningsstoffer i stedet for sement for å regulere konsistens (Byggforsk 2016).

Lavvarmesement er et alternativ for en mer miljøvennlig betong, siden innholdet av ren sement er vesentlig mindre enn vanlig Portland sement, som da gir mindre klimagassutslipp. Dette har også en effekt på fasthetsutviklingen til betongen, da det lave innholdet av ren sement demper denne prosessen. Dette kan ha en konsekvens for framdriften i prosjekter der de er avhengige av fasthetsutviklingen for å kunne fortsette. (Byggforsk 2016)

Tabell 3: Schwenk Lavvarmesement

LAVVARMESEMENT (CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na))	
Finhet [m^2/kg]	470
Spesifikk vekt [kg/m^3]	2.98
Begynnende størkning [min]	230
Sulfat (SO_3) [%]	≤ 2.1
Klorid (Cl^-) [%]	≤ 0.05
Alkalier ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$) [%]	0.79
Klinker [%]	30
Slagg [%]	70

2.4 Alternative bindemidler i betong

2.4.1 Flygeaske

Flygeaske, et gråaktig pulver bestående av kuleformede glassaktige partikler, er den ikke forbrente delen av kullet som blir utfelt elektrostatisk eller mekanisk fra forbrenningsgassene i kullfyrte kraftverk. Majoriteten av partiklene har en diameter varierende fra $1\mu\text{m}$ til $100\mu\text{m}$ (Neville 2011).

Dette pulveret kategoriseres som et pozzolan; et materiale bestående i stor grad av silisiumforbindelser, som alene har små eller ingen sementlignende egenskaper, men vil ved visse kornstørrelser sammen med vann til stede, kjemisk reagere med kalsiumhydroksid ved ordinære temperaturer og dermed resultere i et element med sementlignende egenskaper. Pozzolan er ikke ansett som et hydraulisk materiale, dermed vil det ikke skje en kjemisk reaksjon med vann alene, men med kalsiumhydroksid eller $\text{CA}(\text{OH})_2$ som er en del av sements hydratiseringsprosess og danne binnemiddelet C-S-H (Neville 2011)

2.4.2 Effekten av flygeaske

Flygeaskens reologiske effekt i betongen er i stor grad knyttet til formen og størrelsen på flygeaske partiklene; sfæriske, mer avrundet og ulike størrelser, dermed minkes den interne friksjon i sementpastaen og fører bl.a. til en lavere viskositet, men også en økt mobilitet (Neville 2011). Partiklene virker også som filler; hulrom mellom sementpartiklene blir fylt, mindre vann er nødvendig for å oppnå en lik synk som ved ordinær portlandsement, i tillegg vil filler-effekten øke betongens stabilitet, samt bidra positivt til dens støpelighet. Flygeaske

inneholder ubrent kull (begrenset til 4-10% i Standardene) som kan føre til at kullet muligens absorberer opp tilsetningsstoffer (Maage mfl. 2016).

Pozzolan reaksjonen til flygeaske i betong foregår betydelig senere enn den mellom sement og vann som er umiddelbar. Dette kan ta så mye som en uke eller enda mer som er tiden det tar før porevannet er alkalisk nok til å bryte ned glassfasen til partiklene. En høy pH kreves, minst 13,2, og for å oppnå det må en ganske substansiell andel av Portlandsement være hydratisert. Denne langsomme reaksjonen gir dermed betong som inneholder flygeaske en langsom tilvekst av både fasthet og tetthet, hvor en økende mengde med flygeaske retarderer prosessen ytterligere (Neville 2011).

Flygeaske gir i all hovedsak en økning i kloridmotstand, et resultat fra dannelse av C-S-H gel som gir en forfining av porestrukturen, men den langsomme pozzolan reaksjonen gjør at betongen er mer utsatt i ung alder som en konsekvens av en mer åpen porestruktur (Pettersen 2016). Permeabilitet, som er en materies evne til å transportere væske eller gass, blir redusert som følge av at reaksjons produktene til flygeaskens pozzolan prosess delvis fyller porene med vann som hydratiserings produktene fra sementen ikke klarte (K. Bremseth 2010). En erstatning av sementen med lik mengde pozzolan vil således øke kapillærporøsiteten, dermed også en økt total porøsitet sammenlignet med en vanlig portlandsement.

2.4.3 Slagg

Råjernslag eller slagg, er et restprodukt fra produksjonen av slagg. I hovedsak blir vann brukt til å hurtig kjøle ned slagget, og det dannes da et glassaktig granulat som senere blir malt til små finkornede partikler med en mer firkantet form.

Slagg er i motsetning til flygeaske ikke et pozzolanisk material, men et latent hydraulisk materiale som betyr at det alene ikke har en reaksjon med vann og må derfor bli kjemisk aktivert. Dette skjer oftest ved at slagg blir blandet sammen med portlandsement, hvor kalsiumhydroksid fra hydratiseringen aktiverer slagget (Pettersen 2016). Fordi en blanding av portlandsement og slagg inneholder mer silika og mindre kalk enn portlandsementen alene, vil hydratiseringen av blandingen produsere mer C-S-H som resulterer i en mer tettpakket mikrostruktur (Neville 2011).

Normalt sett blir mengder mellom 30 og 65% med slagg brukt til å erstatte sement (større andel enn andre alternative bindemidler), og en finner dette stort sett i form av slaggsementer i Norge (Maage mfl. 2016).

2.4.4 Effekten av slagg

Til tross av hva som i prinsippet er forskjellige reaksjonsmekanismer mellom flygeaske og slagg, har de lignende effekter på betong. På tilsvarende måte som flygeaske, resulterer bruken av slagg til et minkende behov av vann for å oppnå et visst synkmål. I motsetning til flygeaske så er slagg bestående av mer kantete og firkantede formede partikler, ergo ingen «kulelager effekt». Slaggs effekt på støpeligheten er mye mindre enn flygeaskens i tilfeller hvor et konstant synkmål er opprettholdt (P. Koehler og W. Fowler 2004)

Den kontinuerlige utfellingen av alkalier fra slagg, sammen med kalsiumhydroksid fra portlandsementen, fører til at slagg vil fortsette å reagere over en lang periode. Derfor vil betongen få en langvarig fasthetsutvikling. Denne reaksjonen (som allerede er mer langsom enn sement) er betydelig raskere enn flygeaskens (Neville 2011). De mekaniske egenskapene til slagg (naturligvis også flygeaske) vil etter 28 døgn ligge etter i forhold til en vanlig Portland sement referanse (Maage mfl. 2016).

Innholdet av silika vil være større hos en slaggsement enn vanlig portlandsement, følgelig produseres det mer C-S-H gel som fyller opp porene og resulterer i en tettere porestruktur (Neville 2011). Studier viser at betonger med slagg gir lignende egenskaper som flygeaske; en forfining av porene som gir en lav permeabilitet til vann som inneholder bl.a. klorider, dermed meget bra motstand mot kloridinntrengning. Ved mange tilfeller er motstanden mot frostnedbrytning for slagg (også gjeldende for flygeaske) vist til å være bedre enn for en vanlig portlandsement, men også lignende egenskaper for portlandsement (Pettersen 2016). Denne forbedringen kan sees i sammenheng med de forfinede porene, hvor vannet fryser ved kaldere temperaturer sammenlignet med vannet som er i de mer grove porene. Slaggbetonger kan vise til lignende diffusjonsegenskaper som Portlandsement etter 7 døgn, og etter den tid, mye bedre egenskaper (Pettersen 2016).

2.5 Reologi

Reologi er en vitenskapelig beskrivelse av både strømming og deformasjon av materie (væske eller et «mykt» fast stoff) under virkningen av en påført kraft. Begrepet reologi tar for seg materialer med komplekse strukturer som oppfører seg på en interessant eller uvanlig måte (sjokolade, brøddeig eller betong), hvor strømming egenskapene er mer omfattende enn vanlige eller Newtonske væsker (luft, vann eller honning) (GERMANN u.å.). Den handler av den grunn i stor grad om hvordan viskositeten forandrer seg ettersom de ytre påkjenningene som skjærspenning (da også flyte-hastighet) forandres (Holtebekk 2020).

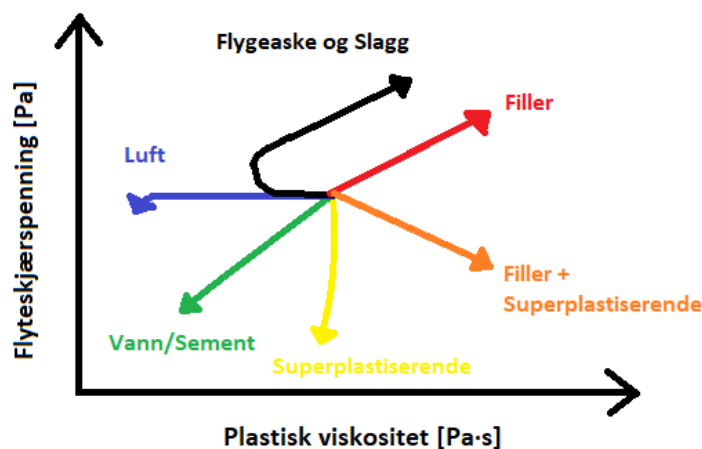
Prinsippet bak reologiske målinger er å få deformert et materiale på en kontrollert måte, hvor en på samme tid registrer dens motstand mot en slik formendring.

2.5.1 Viskositet og flyteskjærspenning

Viskositet er den egenskapen som gir en indikasjon på hvor tyktflytende en væske, en type friksjon mellom partiklene, hvor dens motstand virker som en spenning mellom, også kalt skjærspenning. En kan eksempelvis tenke seg væskene honning og vann, hvor honning er «tykkere», altså mer viskøs enn vann. Denne skjærspenningen øker vanligvis lineært med skjærhastigheten ved bl.a. blandingen eller omrøringen for fersk betong, og viskositeten tolkes her som forholdet mellom skjærspenningen og skjærhastigheten (Holtebekk 2020).

Enkelte materialer kan bli bedre beskrevet som «myke» faste stoffer enn som væsker. Geler og tykke pastaer sin struktur medfører at strømninger ikke vil forekomme med mindre de blir stående i lang tid. Honning kan bli brukt som et eksempel, hvor en kan tenke seg å åpne en krukke med honning uten å riste eller vende på den, og legge den på siden. En vil ikke oppleve merkbare bevegelser på en stund, med andre ord, honningen har en veldig høy viskositet. Sett krukken opp igjen, rør eller bare skyv en kniv sideveis i honningen og den vil deformeres, men ved å fjerne kraften vil den gå tilbake til sin opprinnelige vertikale posisjon. Honning er naturligvis ikke noe fast stoff, det vil strømme gitt lang nok tid, men det kan være fordelaktig å betrakte det som et fast stoff i enkelte tilfeller – ikke bare måle de flytende egenskapene som viskositet, men også faste egenskaper som flyteskjærspenning. Flyteskjærspenning, markeringen av overgangen fra elastisk til plastisk oppførsel, er den minste kraften som må bli påført et fast stoff for å få det til å strømme. Tilbake til honningen, dersom kraften fra kniven overstiger en viss størrelse, vil den ikke gå tilbake til sin opprinnelige posisjon, men gir etter og fører til en permanent (plastisk eller viskøs) deformasjon, enklere fortalt, honningen har strømmet (Cunningham u.å.).

Reologien til en fersk betong styres av små endringer i mengden eller egenskapene til dens bestanddeler. Figur 1 viser hvordan en kan «styre» reologien i ulike retninger. Tilsetning av et fint stoff, filler, binder sammen vannet og øker flyteskjærspenningen. Den økende delen av partikler øker



Figur 1: Bindemidler og tilsetningsstoffer til å kontrollere betongens reologiske egenskaper (GERMANN u.å.)

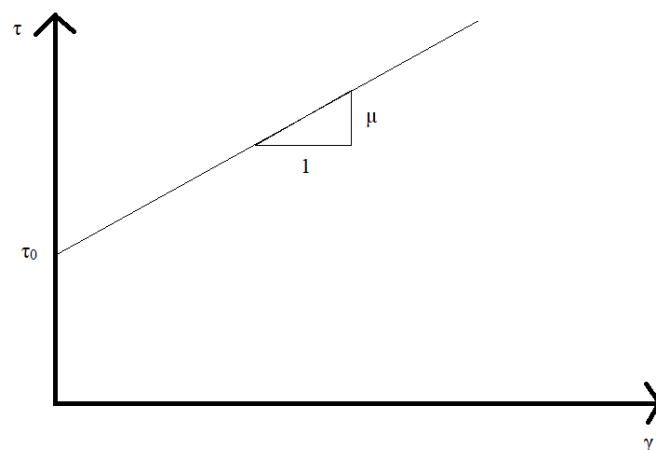
viskositeten. Som tidligere nevnt så har flygeaske og slagg en «kulelager» effekt som reduserer viskositeten, men for mye av dem vil gi en økende verdi for både flyteskjærspenningen og viskositeten, da vann blir bundet opp. Ved å tilsette mer vann eller sement tynnes blandingen ut, dermed reduseres både viskositeten og flyteskjærspenningen. Superplastiserende sprer de små, fine partiklene ut, og som et resultat frigis det innfangede vannet, hvor flyteskjærspenningen minker, samtidig som en minimal reduksjon i viskositet (GERMANN u.å.). Lengden og retningen på pilene vil naturligvis variere avhengig av mengde og hvilke materialer som er brukt.

2.5.2 Bingham modell

Fersk betong kan bli betraktet som en væske, og den ferske betongen vil dermed strømme som et resultat av skjærspenningen. Dens strømming eller flyt egenskaper kan fremstilles ved bruken av følgende likning:

$$\tau = \tau_0 + \mu \gamma$$

Mer kjent som Bingham modell, en lineær funksjon av skjærspenningen, hvor τ_0 representerer flytegrensen, altså hvor mye skjærspenning som er nødvendig for å få væsken til å strømme. Stigningstallet μ er den plastiske viskositeten, og etter at flytegrensen er nådd, er det denne parameteren som virker på



Figur 2: Bingham Modellen (Maage mfl. 2016)

motstanden til strømmingene. Flytekurven som blir dannet som et resultat av likningen gir en detaljert beskrivelse av en væskes strømming eller flyt egenskaper (GERMANN u.å.).

2.5.3 Tiksotropi

Tiksotropi er også en viktig del av vitenskapen om reologi, tatt fra de greske ordene *thixis* (berøring) og *trope* (forandring, vending). Dette viser til at det er en forandring i egenskapene til en væske som følge av berøring, mer spesifikk er det den egenskapen en tyktflytende eller et gele lignende materiale har til å bli mer tyntflytende når utsatt for skjærspenninger (Helseth 2020). Betong har nettopp denne egenskapen, dermed trengs en høy skjærspenning når betongen er «i ro» og en lavere skjærspenning behøves for å opprettholde flyten. Denne tiksotropiske prosessen er reversibel og tidsavhengig som betyr at den flytende betongen kan

stivne og få en geleaktig konsistens dersom holdt i ro. En kan få betongens flyteegenskaper tilbake ved å simpelthen røre i blandingen og bryte opp den tiksotropiske strukturen (GERMANN u.å.)

2.5.4 Støpelighet

Ved å teste egenskapene til en fersk betong får man en beskrivelse av støpeligheten. Betongens støpelighet varierer fra både gode og dårlige egenskaper, ut fra faktorer man får fra testene. Det kreves forskjellige kvaliteter på støpeligheten alt etter hvordan den skal brukes, fra transport av betongen, ulike typer forskalinger og tilgjengelighet.

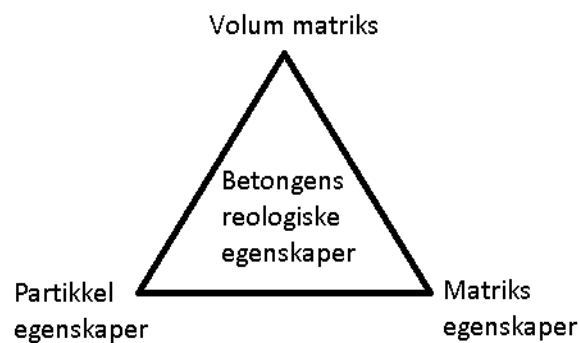
Støpeligheten består av tre forskjellige klasser; stabilitet, mobilitet og komprimerbarhet. Stabilitet er i den forstand om betongen klarer å holde seg konsekvent gjennom hele ferske fasen. Dette gjelder fra betongen er blandet til den blir plassert, altså gjennom hele den ferske prosessen. Fra betongen blir transportert, plassert i forskalinga og komprimert skal den holde seg stabil. Om betongen ikke holder seg stabil kan dette igjen lede til separasjon av betongen. Separasjon oppstår når summen av intern friksjon og kohesjon blir for lav til å motvirke de ulike densitetene som er tilsatt i betongen. Separasjonen i betongen er påvirket av den interne viskøse flytmotstanden (Maage mfl. 2016).

For en vanlig betong er separasjon av vann det mest normale. Denne separasjonen betegnes ved at vannet som er tilsatt flyter opp til overflaten, samtidig som de andre partiklene vil legge seg i bunnen av blandingen. Når dette skjer oppstår det som kalles for blødning altså en vannutskillelse. Om det dannes vannlag i overflaten på betongen øker v/c-tallet, og dette vil være med på å redusere kvaliteten og bestandigheten på betongen. Separasjon av vann kan forhindres om man reduserer vanninnholdet, tilsetter mer pozzolaner, sement eller ved å øke andel fine korn i sanden. Dette gjør at kontaktflatene mellom partiklene og vannet vil øke (Maage mfl. 2016).

Mobiliteten er den egenskapen betong har i henhold til bevegelsen i forhold til kreftene den blir utsatt for. Når det dannes friksjon mellom partiklene påvirkes mobiliteten til den ferske betongen. For å få en høy mobilitet på betongen, kan man ha et redusert innhold av grus tilslag 8-16mm, og et høyere innhold av vann. Dette vil være med på å redusere den interne friksjonen samt gi lav kohesjon og lav intern flytmotstand. Bakdelen med dette er at et økt innhold sementpasta kan føre til riss når strekkapasiteten overbelastes. For å forhindre dette kan vannreducerende tilsetningsstoffer benyttes. Om man har en betong med begrenset mobilitet vil det bli en utfordring med komprimeringen. Dårlige komprimerings egenskaper og lav

stabilitet vil by på problemer. Jo mer komprimering den ferske betongen trenger jo større risiko blir det for separasjon av delmaterialene (Maage mfl. 2016).

En betong med et høyt matriksvolum vil ha lavere partikkelkonsentrasjon som vil si at den viskøse oppførselen fremheves. I en blanding hvor partiklene dominerer vil matrikskonsentrasjonen og partiklene ha mer kontaktflate mellom seg. Da vil den partikkeldominerte betongen ledes av friksjon. Partikkel-matriks modellen viser forbindelsen mellom matriksfasen, partikkelfasen og volumet mellom de to fasene (Maage mfl. 2016). Se figur 3 under.



Figur 3: Betongens reologiske egenskaper

2.5.7 Vanninnhold og v/c-tall

Vanninnholdet i betongen spiller en stor rolle for egenskapene i både fersk og herdet betong. Når det gjelder fersk betong er det støpeligheten som varierer, mer vann vil gi en bedre støpelighet. Vannet som tilsettes vil også ha en direkte betydning på betongens styrke. Masseforholdet mellom vann og sement kan man definere som v/c formel, denne formelen gir en antydning på slutfastheten på ferdig herdet betong. Se formel under:

$$\frac{\text{Totalt vann tilsatt-absorsjon}}{\text{sement}} = \text{masseforhold} = \frac{v}{c} \text{ tall} \quad (1)$$

(Maage mfl. 2016)

3. Metoder laboratorieprogram

3.1 Blanding

3.1.1 Proporsjonering

Proporsjoneringen ble gjennomført ved hjelp av et proporsjonerings skjema som er utviklet av Skanska. For alle de tre forskjellige blandningene ble det bestemt at v/c-tallet skulle være på 0,38 og et matriksvolum på 325 l/m³. Dette ble valgt for å få en god støpelighet for å gjennomføre de reologiske testene. Alle blandeskjemaer er lagt ved i vedlegg.

3.1.2 Blandeprosedyre

Det ble brukt en tvangsblender i lab lokalene ved UiS. Alle materialer ble veid opp før blanding og blandeprosedyren gikk som dette:

1. Tilsette alle tørre materialer, kjøre i 1 min.
2. Tilsette vann, kjøre 3 min.
3. Superplastiserende stoff ble tilsatt etter behov, kjøre i et par minutt til SP stoffet begynner å virke.

3.2 Fersk betong

3.2.1 Synkmål

Denne testen ble gjennomført etter NS-EN 12350-2:2019. Synkmål er det første vi gjorde etter betongen var ferdig blandet. Synk kjeglen som ble brukt ble fuktet og plassert på et plant underlag som også var fuktet. Kjeglen ble fylt opp i tre omtrent like tykke lag, og komprimert for hver tredjedel som blir fylt opp med 25 slag ved hjelp av komprimeringsstang. Dersom betongen sank under komprimeringen fylte vi på, og eventuelle overskuddsmasser ble strøket av.

Før kjeglen ble løftet opp ble det rengjort rundt underlaget, og kjeglen ble løftet forsiktig loddrett opp. Kjeglen ble plassert ved siden av betongprøven som da var formet som en kjegle. Da kan man foreta målingen på hvor stor synk betongen har, etter differansen mellom høyden på toppen av kjeglen og betongen. Synkmålet blir angitt til nærmeste 10 mm.



Figur 4: Synkmål

3.2.2 Densitet

Vi måler densiteten etter NS-EN 12350-6. Samme beholderen som ble brukt til å måle luftinnhold ble benyttet for å måle opp densiteten. Beholderen ble veid før vi hadde i betong blandningene. Vi fylte i betong i tre omganger, der vi komprimerer etter hvert lag som ble tilsatt. Og vi benytter oss av denne formelen for å finne densiteten.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{kap 3,1}) \quad (2)$$

Der

D er densitet av den ferske betongen, i kg/m^3 ;

m_1 er densitetsbeholderens masse, i kg;

m_2 er densitetsbeholderens masse pluss massen av betongprøven, i kg;

V er volumet av beholderen, i m^3 ;

Densiteten blir angitt til nærmeste 10kg/m^3 (Norsk 2019a)

3.2.3 Luftinnhold

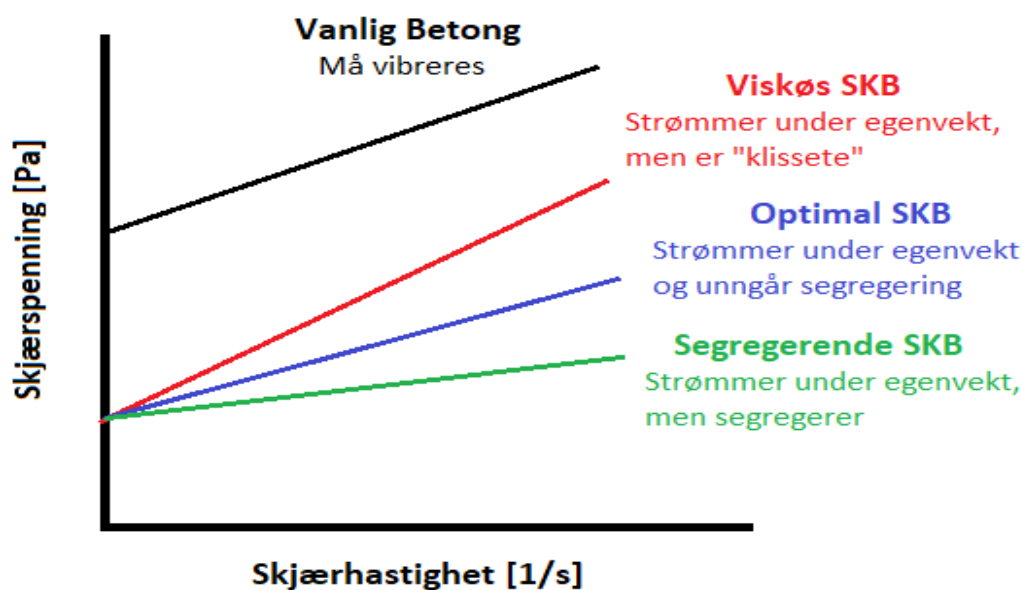
Innholdet av luft blir utført i henhold med NS-EN 12350-7 (2009): *Prøving av fersk betong - Del 7: Luftinnhold –Trykkmetoder*, hvor luftporemåler B2020 blir brukt. Fylte beholderen helt opp med betong i tre like tykke lag, hvor hvert lag ble komprimert ved hjelp av 25 støt med en stikkstang, viktig å unngå at støtene ikke går ned i forrige lag. Avsluttet med å bruke en gummihammer til å slå 10-15 ganger på beholderen. Videre ble toppen av beholderen rengjort med svamp eller lignende og overdelen monteres og klemmes fast. Åpnet så opp begge

ventilene. Brukte en sprøyteflaske til å fylle på vann gjennom en av ventilene helt til vann uten luftbobler kom ut gjennom den andre ventilen. Justeringsventilen skal da være lukket. Løsnet så luftpumpehåndtaket, pumpet opp trykket helt til manometerviseren er rundt 10 mm forbi det røde justeringsmerket. Justerte deretter trykket ved å forsiktig skru opp justeringsventilen til viseren er akkurat over justeringsmerket. Lukket begge ventilene og fra det røde merket starter testen. Presset ned hevarm i om lag 20 sekunder til manometerviseren har falt til ro og mengden luft kan leses av (Servi Hydranor AS 2014).



Figur 5: Luftmåler

3.2.4 Reometer



Figur 6: Dynamisk flytekurve til ulike typer selvkomprimerende betongblandinger (GERMANN u.å.)

Forsøkene ble gjennomført med ICAR Reometer som er et instrument som måler de reologiske egenskapene til fersk betong, mer spesifikk statiske- og dynamiske flytegrensen, samt den plastiske viskositeten til betong. Ved å bestemme flytekurven til betong med ulike sammensetninger, proporsjonering og typer tilsetningsstoffer kan en finne den optimale balansen mellom flyt og resistansen til segregering, noe som ikke er mulig å bestemme med den konvensjonelle synkmål testen (GERMANN u.å.).

Reometeret består av en visp og en beholder med jevnt fordelte riller, hvor vispen blir plassert i midten av denne beholderen og måler torsjons kraften som er nødvendig for å rotere vispen ved angitt fart. Ved start av testene må radiusen på beholderen oppgis i programmet, da dette kan variere alt etter størrelsen på tilslaget. En trykker så på «reset», viktig at det er satt opp slik at vispen ikke rører noe som helst og viser at ingen torsjon virker på den. Dette blir gjort ved start av første test, og mellom hver ny blanding.

To typer tester blir da utført. Starter med en «Stress Growth Test», hvor vispen roterer med den samme lave hastigheten, 0,025 omdreininger/sekund til en oppnår en maksverdi for torsjonen som blir målt. Dette gir den statiske flytegrensen til blandingen som representerer spenningen som trengs for å få masse til å flyte etter den har stått i ro. Neste test er en «Flow Curve Test» som bestemmer den dynamiske flytegrensen, spenningen som oppnås når hastigheten til deformasjonen går fra lave til høye verdier, altså spenningen nødvendig for å holde flyten i

massen gående og henger sammen med synkmålet. En får også den plastiske viskositeten som sier noe om motstanden til å flyte etter at flytegrensen er nådd. Forskjellen mellom statisk- og dynamisk flytegrense gir en viss indikasjon på hvor tiksotropisk betongen oppfører seg (GERMANN u.å.).

«Flow Curve Test» starter med en såkalt «breakdown» periode, hvor vispen roterer på maks fart, som er med på å fjerne eventuelle tiksotropiske strukturer i blandingen for å gi en jevn måling av skjæringen før Bingham parameterne blir målt. Vispens hastighet minkes heretter i et bestemt antall trinn, som ble bestemt til å være syv. Når hvert trinn foregår, holdes vispens fart konstant mens den gjennomsnittlige farten og torsjonen blir registrert. Utfra de observerte målingene blir en lineær graf plottet, torsjon mot vispens rotasjonshastighet, som igjen resulterer i en flytekurve og Bingham parameterne blir kalkulert. Hvor god tilnærming det er på grafen blir gitt som en indikasjon ved R^2 og mse, hvor henholdsvis nærmest mulig 1 og 0 er det ideelle. Det blir gitt ytterligere to verdier «Flow Curve Test»: «Yield Value» (Y-verdi) og Viskositet verdi (V-verdi). Y-verdien forteller om motstanden til å flyte, mens V-verdien gir en indikasjon på hvordan betongen oppfører seg når den har begynt å flyte. (GERMANN u.å.)

Når testene er ferdige, kan resultatene leses av på bunnen av programmet og tekstfilene med de ulike dataene blir lagret og eksporteres til Excel for å lage grafene selv.



Figur 7: Reometer

3.3 Utstøping

3.3.1 Terninger

Trykkfastheten blir målt ved hjelp av en trykkprøvingsmaskin. Det ble støpt åtte terninger per blanding på 100x100x100 mm. Formene fylles opp i tre omganger der det komprimeres etter hvert lag. Formene med den ferske betongen blir dekket til med plastikk og lagret i 24 timer ved $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Terningene blir tatt ut av formene etter 24 timer, da blir de lagret i vannbad ved $20 \pm 2^\circ\text{C}$, frem til testene blir gjennomført etter 7 og 28 dager (Norsk 2019b).

3.3.2 Sylinder

Sylindere ble støpt for å gjennomføre tester for elastisitetsmodul. Sylindrene ble støpt på målene 150x300 mm. Utstøpingen skjer i tre forskjellige lag, hvor det komprimeres for hvert lag som tilsettes. Prøvene blir avrettet lagret med et lokk, viktig å ha prøvene lagret den veien testen skal gjennomføres de første 24 timene. Prøvene blir først lagret i 24 timer ved $20 \pm 5^\circ\text{C}$, og blir så plassert i vannbad ved $20 \pm 2^\circ\text{C}$ når de er tatt ut av formene.

3.4 Prøving herdet betong

3.4.1 Trykkfasthet

Testet i henhold til NS-EN 12390-3. Trykkfastheten testes ved hjelp av trykkprøvemaskinen og kubene blir herdet i vannbad på 20 ± 2 grader i 7, 28 og 42 dager. Her får man et svar på fasthetsklassen til de forskjellige betong blandingene og kan sammenligne resultatene.



Figur 8: Trykkpressemaskin

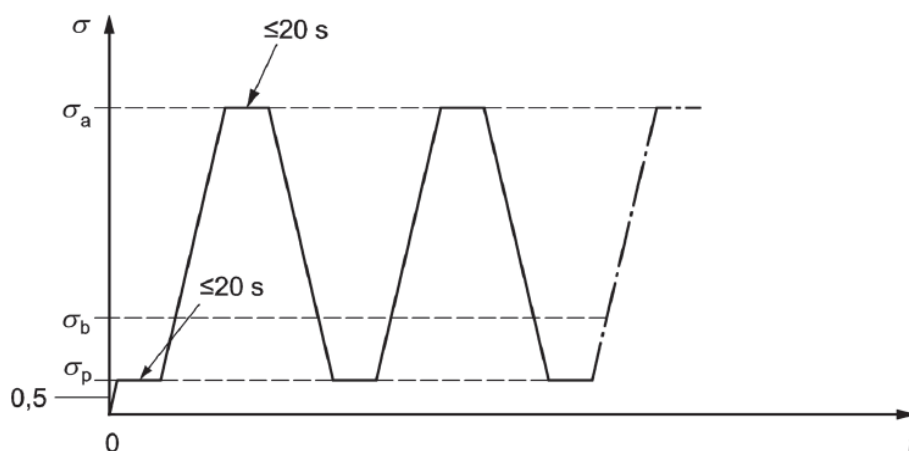
3.4.2 Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodulen ble testet i henhold til NS-EN 1239-13:2013 (Norsk 2014). Denne standarden har to forskjellige fremgangsmåter, metode A og metode B. Her er det metode A som er benyttet ved utregning av elastisitetsmodul. Prøvene som ble benyttet er sylinderformede legemer med diameter på 150mm og lengde 300mm. Herding og vannlagring ble utført i henhold til NS-EN 12390-2 (Norsk 2019).



Figur 9: Prøvestykke med extensometer

Prøvene tas opp fra vannbad minimum 30 min før test, blir rengjort og partikler fjernes. Extensometer blir montert på prøven, denne blir brukt til å måle lengdeforandringer på prøven. Det blir utført tre lastsykluser i trykkpressemaskinen, og elastisitetsmodulen blir beregnet ved siste syklus.



Figur 10: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk (Norsk 2014)

Her er

σ er påført spenning i MPa;

σ_a er spenningsnivå - $f_c/3$;

σ_b er laveste spenningsnivå - $0,10 \cdot f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 \cdot f_c$;

σ_p = forspenning - $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b$;

t er tid i sekunder;

f_c er trykkfasthet;

Trykkfastheten fra to terninger blir testet i forkant, middelverdien av disse skal være med på å bestemme trykkfastheten til sylindren. Trykkfastheten til sylindren finner man ved å multiplisere middelverdien til terningene med 0,8. Da kan man finne verdien σ_a som er spenningen som bestemmer hvilke innstillinger som skal benyttes ved prøvemaskinen. Tøyningen blir regnet ut ved hjelp av denne formelen:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

ε er tøyningen;

ΔL er lengdeforandring i mm;

L_0 er den opprinnelige lengden for instrumentet;

Til slutt for å bestemme elastisitetsmodulen ved hjelp av metode A, er denne formelen brukt:

$$E_{c,s} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{e_{a,3} - e_{b,2}} \quad (4)$$

Der

$E_{c,s}$ er elastisitetsmodulen;

σ_a^m er den øvre registrerte spenningsnivået;

σ_b^m er det laveste registrerte spenningsnivået;

$e_{a,3}$ er tøyningen registrert på slutten av tredje øvre spenningsnivå;

$e_{b,2}$ er tøyningen registrert på slutten av andre laveste spenningsnivå;

Elastisiteten blir målt til nærmeste 0,1 GPa etter NS-EN 1239-13:2013 (Norsk 2014).

3.4.3 Kapillær sugehastighet og porøsitet

Bestemmelsen av betongens porøsitet- og densitetsverdier ble utført i overensstemmelse med *Statens Vegvesens håndbok R210 – 426, PF-metoden* (Statens Vegvesen 2016:327–32). Prøvestykkene blir lagt til tørking i et tørkeskap som har en temperatur på 105 grader celsius. Her ligger de i 7 døgn. Etter prøvestykkene blir tatt ut av tørkeskapet, dekkes de til med plastfolie og avkjøles i minimum 2 timer, deretter veies prøvestykkene og denne verdien er (g_1). Prøvestykkene plasseres i vannspeil der hele sugeflaten er i kontakt med vann uten at vannspeilet blir mer en 1-2 mm opp langs sidene på prøvestykkene, i 4 døgn. Prøvestykkene skal være tildekket med lokk med pakninger for å forhindre kondensert vann. Deretter veies prøvestykkene etter:

- 10 og 30 minutter
- 1, 2, 3, 4 og 6 timer
- 1, 2, 3 og 4 døgn (Vekta etter 4 døgn kaller vi for g_5)

Nå blir prøvestykkene neddykket i vann i 3 døgn, så veid i luft (vekt g_2) og under vann (vekt g_3). Ved siste måling skal prøvestykkene ligge neddykket i vann ved 50 atm trykk, i minimum 1 døgn. Avtørkning skjer umiddelbart etter vi tar opp prøvestykkene og veier i luft, kaller denne (vekt g_4)

Etter notering av resultatene er gjort, benyttes formlene til å bestemme densiteten og porøsiteten til betongen:

$$\text{Prøvestykkets volum:} \quad V = \frac{g_2 - g_3}{\rho_w} \quad [\text{m}^3] \quad (5)$$

$$\text{Tørrdensitet:} \quad \rho_t = \frac{g_1}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (6)$$

$$\text{Faststoffdensitet:} \quad \rho_{fs} = \frac{g_1}{V - (g_4 - g_1)/\rho_w} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (7)$$

$$\text{Sugmettet densitet:} \quad \rho_s = \frac{g_2}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (8)$$

$$\text{Sugporøsitet:} \quad p_s = \frac{g_2 - g_1}{V \cdot \rho_w} \quad (9)$$

$$\text{Makroporøsitet:} \quad p_m = \frac{g_4 - g_2}{V \cdot \rho_w} \quad (10)$$

$$\text{Totalporøsitet:} \quad p_t = p_s + p_m \quad (11)$$

$$\text{PF-verdi:} \quad PF = p_m / p_t \quad (12)$$

$$\text{Åpen makroporøsitet:} \quad P_{\text{åm}} = \frac{g_2 - g_5}{V \cdot \rho_w} \quad (13)$$

Hvor: $\rho_w = \text{vannets densitet (blir satt lik } 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\text{)}$

4. Prøveprogram og materialer

Tabell 4: Prøveprogram

	Sementtype	v/c-tall	FA [%]	Slagg [%]	Klinker [%]	SSP [Kg]
Blanding 1	Norcem Anlegg	0.38	0	0	100	0,285
Blanding 2	Norcem Anlegg FA	0.38	35	0	65	0,157
Blanding 3	Schwenk Lavvarme	0.38	0	70	30	0,244

4.1 Info prøveprogram

Det ble støpt tre forskjellige typer betong; Anleggsement som referanse, Anleggsement FA og Lavvarmesement. Anleggsement FA har et innhold av flygeaske på 17 % som er justert opp til 35%. Lavvarmesement har et høyt innhold av slagg 70 %.

Tabell 5: Fordeling av betongen

Prøve	Antall terninger	Antall sylindere	Reometer [L]	Antall liter [L]
Anlegg	8	1	25	60
Anlegg FA	8	1	25	60
Lavvarme	8	1	25	60

5. Resultat og diskusjon

Tabell 6: Resultat ferske egenskaper

Prøve	Synkmål		Utbredelse		Densitet [kg/m ³]	Luftinnhold [%]
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
	0 min	30 min	0 min	30 min		
Anlegg	210	220	540	510	2430	0,7
Anlegg FA	220	110	420	320	2378	1,0
Lavvarme	240	195	530	490	2405	1,2

5.1 Fersk Betong synk og utbredelse

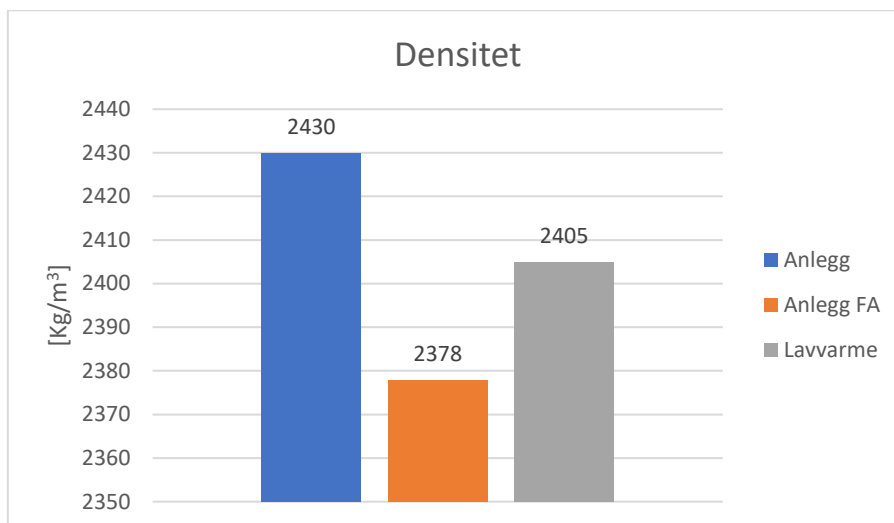
I tabellen over er det presentert resultater over synk og utbredelse fra de forskjellige blandningene. Utenom bindemiddelet er det brukt samme v/c-tall på 0,38, samme tilslaget og noe variert innhold av superplatinerende. Vi får den laveste synk verdien på den vanlige Anleggsementen, og en ganske lik verdi på synk etter 30 minutter. Utbredelsen på Anleggsementen holder seg relativt lik.

For Anleggsement FA ser man et forventet synkmål etter 0 minutter og en noe lavere utbredelse en forventet. Etter 30 minutter får vi noen uventede verdier på både synk og utbredelse. Grunnen til dette kan være at bare femti prosent av det superplastiserende middelet fra resepten ble brukt. Dette innholdet styrte vi ikke selv, men ble tilsatt etter behov. Det ble også i etterkant funnet noen små feil i resepten på denne blandingen, som gjorde at det totale innholdet av vann ble noe redusert.

For lavvarmesementen får vi den høyeste verdien av synk etter 0 min. Etter 30 min, minker synk verdien som forventet. Utbredelsen er så å si den samme som referanseblandingen etter 0 minutter, og blir noe mindre etter 30 minutter som forventet.

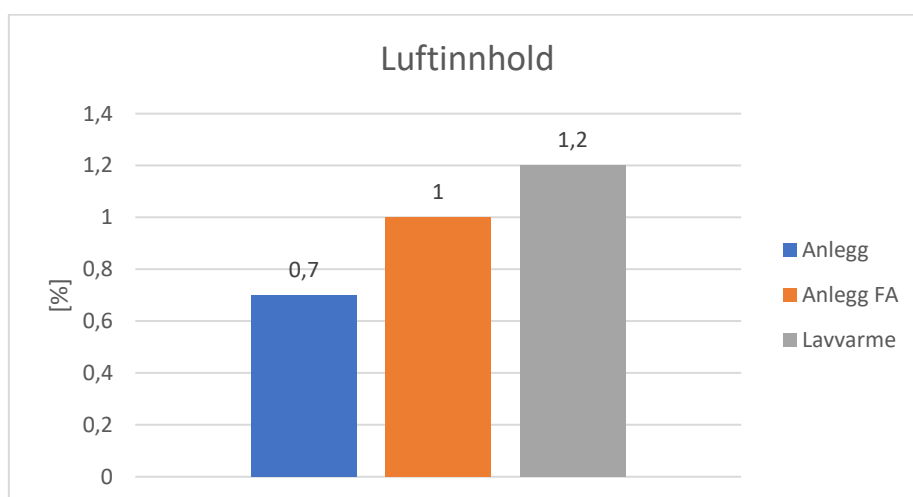
5.2 Densitet og luftinnhold

Densitet



Figur 11: Densitet

Luftinnhold



Figur 12: Luftinnhold

Figur 11 viser at Anleggsementen har den høyeste densiteten som er det motsatte av hva vi antok. Slagg og flygeaskens små partiklers «filler-effekt» vil øke densiteten til deres respektive blandinger, men grunnen til en ikke ser dette i resultatet kan være forårsaket av menneskelige feil, der en eksempelvis ikke har komprimert betongen godt nok før måling. Det samme gjelder også i stor grad for luftinnholdet, hvor det var forventet at Anlegg FA og Lavvarmesementen skulle ha det laveste luftinnholdet, men resultatet viser det motsatte.

5.3 Reometer målinger

Tabell 7: Bingham parametere og relative parametere

«Flow Curve Test»		Bingham parametere			Relative parametere		
		Skjærspenning [Pa]	Plastisk Viskositet [Pa·s]	mse [-]	Yield Value (Y) [Nm]	Viscosity Value (V) [Nm·s]	R ² [-]
Anlegg	0 min	105,5	21,2	0,010	0,51	1,39	0,99
	30 min	166,1	16,3	0,024	0,74	1,27	0,98
Anlegg FA	0 min	249,5	25,5	0,028	1,13	1,92	0,98
	30 min	552,0	30,7	0,065	2,37	2,61	0,95
Lavvarme	0 min	97,3	39,3	0,043	0,59	2,03	0,97
	30 min	171,0	52,2	0,011	0,91	3,04	1,00

Tabell 8: Stress Growth

"Stress Growth Test"		Toppmoment [Nm]	Statisk Flytegrense [Pa]
Anlegg	0 min	3,09	720,9
	30 min	1,99	463,3
Anlegg FA	0 min	3,59	837,2
	30 min	9,13	2128,3
Lavvarme	0 min	2,57	599,9
	30 min	3,03	705,9

For Anleggsegmenten har man veldig gode verdier for Mean-Square-Error og forklaringsgraden R². Skjærspenningen øker fra 105,5 Pa ved 0 minutter til 166,1 Pa etter 30 minutter. Desto høyere y-verdien er, desto lavere vil synk og utbredelse være. Her får man en økning i y-verdi, sammen med at synk blir høyere. Synkmålene er stort sett uendret, som viser at skjærspenningsverdiene og y-verdiene ikke har en sammenheng, det kreves derfor flere tester. Det kan samtidig være menneskelige feil ved utførelse av synk testen, for eksempel at omrøringen i reometer beholderen ikke var god nok. Ser man på verdiene fra statisk flytegrense

som minker, har derimot verdiene fra synk-målingen en relasjon til statisk flytegrense. Den plastiske viskositeten skal holde seg ganske stabil, eller øke gradvis, men her minker den plastiske viskositeten. Dette er ikke i samsvar med resultatene fra målene på utbredelsen. V-verdien går fra 1,39 til 1,27, som betyr at betongen flyter raskere etter 30 min enn ved 0 min og er ikke som forventet, hvorfor dette har skjedd kan være som følge av tiksotropisk dannelse i blandingen.

For Anleggsement FA øker skjærspenningen fra 249,5 Pa etter 0 minutter til 552,0 Pa etter 30 minutter. Y-verdien har også en drastisk økning fra 1,13 Nm til 2,37 Nm, som er det dobbelte av hva som ble målt ved Lavvarme, samt Anleggsement, og kan som tidligere, forklares ved det lave innholdet av SP og det reduserte innholdet av vann i resepten på grunn av noen små feil. Dette viser en riktig sammenheng mellom synk, skjærspenning og y-verdi, da synkmål etter 30 minutter er vesentlig lavere enn etter 0 minutter. Vi ser også en betydelig økning i flyteskjærspenning fra 837,2 Pa til 2128,3 Pa. Sammenlignes dette med synkmålene og de gode verdiene på Mean-Square-Error og forklaringsgraden, kan vi konkludere med at det er en sammenheng. Utbredelsen til Anlegg FA minker med tiden, dette er i samsvar med den plastiske viskositeten som øker med tiden.

Lavvarmesementen sitt synkmål minker fra 240 mm ved 0 minutter til 195 mm ved 30 minutter, samtidig som flyteskjærspenningen øker fra 599,9 Pa til 705,9 Pa og viser en klar sammenheng. Mean-Square-Error og forklaringsgraden gir også gode tall. Blandingens skjærspennings verdier, samt y-verdi øker også i takt med tiden og ytterligere bekrefter sammenhengen mellom synkmålene og de reologiske målingene. Fra tabell 6 minker utbredelsen fra 0 minutter til 30 minutter og henger tydelig sammen med resultatene vi fikk fra betongens y-verdi, men også den plastiske viskositeten som økte fra 39,3 Pa·s til 52,2 Pa·s.

5.4 Herdet betong

5.4.1 Trykkfasthet

Tabell 9: Trykkfasthet

	Trykkfasthet								
	7 dager [MPa]		Gj.snitt	28 dager [MPa]		Gj.snitt	42 dager [MPa]		Gj.snitt
Anlegg	72,3	72,8	72,6	82,2	84,7	83,5	86,0	90,0	88,0
Anlegg FA	37,2	37,4	37,3	51,5	53,6	52,6	57,7	58,1	57,9
Lavvarme	58,3	55,8	57,1	85,9	87,5	86,7	85,6	87,3	86,5

Anleggsementen som er referanseblandingen viser en verdi på 72,6 MPa og har en økning på 12 % etter 28 dager og en verdi på 83,5 MPa. Ut ifra figur som er vedlagt produktdatablad Anleggsement, leses det av en trykkfasthet på ca. 65 MPa etter 7 døgn med ca. det samme v/c-tallet. Etter 28 døgn er forventet trykkfasthet på 82-83 MPa ifølge Norcem sine produktdatablad. Anleggsementen har en vesentlig høyere tidlig fasthet enn miljøsementene som følge av en umiddelbar hydratiseringsprosess, vist i tabellen ovenfor.

Anleggsement FA viser den laveste verdien av trykkfasthet etter både 7 og 28 døgn. Dette er forventet med tanke på det ekstra innholdet av flygeaske. Som forklart i teorien i kapittel 2.4.2 forsinkes fasthetsutviklingen ytterligere ved bruk av ekstra flygeaske.

I tabell 9 over kan man lese av resultatene fra Lavvarmesementen til å være mellom Anlegg og Anlegg FA med en verdi på 57,1 MPa. Dette var også som forventet da en lavvarmesement har enn lavere fasthetsutvikling en Anleggsement, og samtidig har den en raskere fasthetsutvikling i forhold til en betong med økt innhold av flygeaske.

Som vist i tabell 9 har Anleggsement en liten økning i fastheten fra 28 dager til 42 dager, dette er proporsjonalt med forventningene når denne sementen skal ha en høy fasthet etter 28 dager, ingen langvarig fasthetsutvikling. Anleggsement FA fortsetter å ha en økt fasthetsutvikling som først antatt, i motsetning til Lavvarmesementen der utviklingen stoppet ved 42 dager.

5.4.2 Elastisitetsmodul

Tabell 10: Elastisitetsmodul resultater

Prøve	Elastisitetsmodul [GPa]
Anlegg	33,9
Anlegg FA	25,5
Lavvarme	24,5

Elastisitetsmodulen kan beregnes teoretisk ifølge NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2018. Ved hjelp av denne standarden får vi verdier på 38,9 GPa på Anleggsement, 33,8 GPa på Anleggsement FA og 39,3 GPa på Lavvarmesement. Ved å sammenligne disse verdiene med resultater fra laben, ser man at de er vesentlig lavere enn forventet fra standarden. Vi har beskrevet metoden for å finne elastisitetsmodulen i kapittel 3.4.2, og har observert andre master- og bachelorstudenter som også oppnådde lave verdier ved testing. Det er uvisst hva som er grunnen til de lave resultatene, men en potensiell årsak er bruken av måleinstrumentet som ble benyttet under testing, eller innstillingene på dataprogrammet som ble brukt. Uansett kan resultatene som er oppnådd sammenlignes med hverandre.

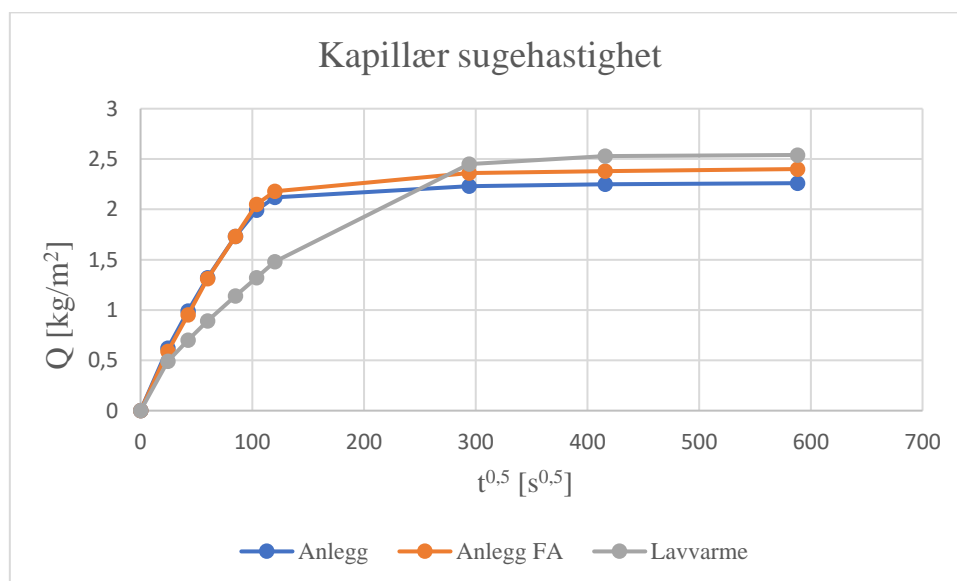
Det er forventet at e-modulen stort sett skal være proporsjonal med trykkfastheten. Dette viser igjen på resultatet i tabell 10 i henhold til Anleggsementen og Anleggsement FA. Der Anlegg har en høyere trykkfasthet enn Anlegg FA etter 28 døgn. Lavvarmesementen viser en merkbar lav verdi av e-modul. Vi kan ikke konkludere med hva som er grunnen, men det kan muligens ha en sammenheng med tilslaget som ble brukt i denne blandingen eller skyldes en målefeil. Dette tilslaget hadde ett høyere innhold av fuktighet ved blanding. En annen grunn kan være at denne sylindren stod tørt i 24 timer før testing, mens de andre to, Anlegg- og Anleggsement FA, ble tatt ut av vannbad 4 timer før testing. Det kan oppstå forskjeller på over 10 % ved målinger av e-modul, når fuktinnholdet i prøvestykket varierer ifølge Kazmierczak (mfl. 2019).

5.4.3 Kapillær sugehastighet og porøsitet

Det ble benyttet fire prøvestykker fra hver blanding, hvor gjennomsnittet fra disse ble brukt til å regne ut alle verdiene av kapillær sugehastighet og porøsitet.

Tabell 11: Kapillær sugehastighet

t_{kap} (s)	\sqrt{tid}	Anlegg	Anlegg FA	Lavvarme
0	0	0	0	0
600	24,5	0,62	0,59	0,49
1800	42,4	0,99	0,95	0,70
3600	60	1,32	1,31	0,89
7200	84,9	1,73	1,73	1,14
10800	103,9	1,99	2,05	1,32
14400	120	2,12	2,18	1,48
86400	293,9	2,23	2,36	2,45
172800	415,7	2,25	2,38	2,53
345600	587,9	2,26	2,40	2,54



Figur 13: Kapillær sugehastighet

Lavvarmesementen med omkring 70% slagg har en tettere porestruktur, følgelig suger til seg vann saktere enn for både Anlegg- og Anleggsement FA, se figur 13. Av den grunn har Lavvarmesement også et vesentlig lavere kapillaritetstall. Lavvarmesement har en merkbar høy økning i vann oppsuget fra 4 timer til 1 døgn.

Figur 13 viser til at de resterende kurvene til Anlegg- og Anleggsement FA har et mer tradisjonelt absorpsjonsforløp, hvor stigningen er lineær. Dermed vil også bruken av regresjon til å finne de respektive kapillær- og motstandstall være egnet. Betongen som inneholder flygeaske har en åpen porestruktur i ung alder, som beskrevet i kapittel 2.4.2, og samsvarer med resultatene fra 0 til 4 timer sammenlignet med Anleggsement.

Vann-oppstuget for prøvestykke med slagg går saktere enn ved de andre betongene og har derfor heller ikke den samme lineære sammenhengen med \sqrt{t} . Kurven får derfor ikke det gunstige skjæringspunktet som brukes for utregning av motstandstall og kapillaritetstall, dermed vil også resultatene bare bli veiledende.

Tabell 12: Kapillaritetstall og motstandstall

	$k = Q_{kap}/\sqrt{t_{kap}}$ [kg/m ² s ^{0,5}]	$m = t_{kap}/h^2$ [s/m ²]
Anlegg	1,89E-2	3,41E+7
Anlegg FA	1,93E-2	3,64E+7
Lavvarme	1,24E-2	9,81E+7

Motstandstallet har en relativ spredning fra Lavvarmesement til Anlegg- og Anleggsement FA. Dette tilsier at slagget er ansvarlig for en finere porestruktur, som gjør at tiden vannfronten vil bruke til å trenge gjennom prøvestykket økes.

Anleggsement FA burde hatt en høyere verdi av motstandstall, med tanke på innholdet av flygeaske. En forklaring på dette kan være manglende tildekning av plast under herding, se figur 14 i vedlegg.

Kapillaritetstallet viser like tendenser som motstandstallet. Ut ifra tabell 12 ser man også at Anleggsement og Anleggsement FA er vesentlig mindre tette enn Lavvarmesement. Det høye kapillaritetstall til betongen med flygeaske henger sannsynligvis sammen med som tidligere nevnt, en åpen porestruktur i en tidlig alder.

Tabell 13: Densitet beregninger

Prøvestykke	Prøvestykkets volum [m³]	Tørrdensitet [Kg/m³]	Faststoffdensitet [Kg/m³]
Anlegg	2,0E-4	2168	2467
Anlegg FA	2,0E-4	2124	2456
Lavvarme	2,0E-4	2125	2477

Utifra verdiene fra tabell 13 ser man at faststoffdensiteten er stort sett lik for alle tre blandningene, og det samme gjelder også for tørrdensiteten. Dette stemmer overens med resultatene fra de ferske densitet målingene, se tabell 6.

Tabell 14: Porøsitet, PF-verdi

Prøvestykke	Sugporøsitet [%]	Makroporøsitet [%]	Totalporøsitet [%]	PF-verdi [%]
Anlegg	11,56	0,550	12,11	4,04
Anlegg FA	12,60	0,913	13,51	6,75
Lavvarme	13,23	0,963	14,19	6,80

Sugporøsitet er ett uttrykk for andel porer i betongen som suger vann kapillært. Kapillærporøsiteten er avhengig av betongvolumet, og da er det naturlig at referansebetongen, med vanlig Anleggsement har en høyere sugporøsitet, men her var ikke det tilfelle da begge miljøsementene har en høyere sugporøsitet. Det er kjent ved at ved å erstatte en andel av sementen med flygeaske (pozzolaner), vil sugporøsitet øke. Tabell 14 viser at prøvestykket med Lavvarmesement har en høyere verdi av sugporøsitet en Anleggsement, men samtidig en mindre verdi enn betongen med innhold av ekstra flygeaske.

Makroporøsitet gir en god indikasjon på luftinnholdet i betongen. Resultatene står i samsvar med de ferske luftinnhold målingene fra tabell 6. Her har også Anleggsement den laveste verdien av makroporøsitet, mens de to prøvestykkene med alternative bindemidler har en vesentlig høyere verdi. Makroporøsiteten viser en lavere verdi av luftinnhold i herdnet betong, dette er på grunn av at noe av luften vil forsvinne under utstøping. Fra prøvestykkene var i vannspeil til prøvestykkene blir lagt i vannbad utgjør vann oppsuget normalt ca. 0,5 prosent

(Maage mfl. 2016). Når verdien er større en 0,5 prosent, er dette en indikator på at makroporene er uendret, og kan komme av blant annet dårlig komprimering.

Porøsiteten har en sammenheng med elastisitetsmodulen, hvor en høy verdi av e-modul skal gi en mindre porøs betong. Dette stemmer overens med resultatene fra testing av e- modul, se tabell 10. Betongen med Anleggsement har den høyeste verdien av e-modul og er også den minst porøse. Også prøvestykket med Anleggsement FA har en høyere verdi enn den for Lavvarmen, samtidig en lavere porøsitet.

Porebeskyttelsesfaktoren er forholdet mellom makroporøsitet og total porøsitet. Makroporene blir ikke mettet ved vanlig kapillært sug, og finnes ved å utsette prøvene for trykk i en trykktank. PF-verdien gir en prosent på andel porer som ikke er fylt med vann. Ut ifra tabell 14 ser man at både Anleggsement FA og Lavvarmesementen har den høyeste verdien av PF, som betyr at det er mindre vanninntrengning i makroporene som gir en bedre frostbestandighet. Både Anleggsement FA og Lavvarmesementen, med innhold av henholdsvis flygeaske og slagg, har en finere porestruktur i forhold til Anleggsement.

5.5 Feilkilder

- Tilsatt andel superplastiserende middel varierer sannsynligvis for mye fra blanding til blanding, da dette viser seg å ha et stort utslag på resultatene.
- Avvik ved første døgn med herding pga. praktiske problemer så ble ikke tildekning av plastikk benyttet på hverken Anleggs- og Anleggsement FA.
- Under testing av synkmål er det en mulighet for at menneskelige feil oppstod ved utførelse av målinger.
- Ved måling av prøvestykker under vann oppstod det problemer og dermed brukte vi heller beregnet volum av prøvestykket for utregning ved PF-metoden.
- Tilslaget til Lavvarmesementen ble i motsetning til Anlegg- og Anleggsement FA ikke stående lagret over tid.
- Trykktanken klarte ikke holde et stabilt trykk på 50 bar over 24 timer, kan være en feil på utstyret.

6. Konklusjon

Formålet med denne oppgaven var å se nærmere på effekten av mer miljøvennlige bindemidler. Hovedsakelig ble de ferske egenskapene testet, men testet også de mekaniske egenskapene. Samtidig ble det gjennomført et litteraturstudium som tar for seg hva som allerede er kjent i dette område. Etter gjennomførte forsøk ved laboratoriet kan følgende konklusjoner trekkes:

1. Støpeligheten varierte mellom de forskjellige blandningene, og ut ifra resultatene kan man konkludere med at Anleggsement og Lavvarmesement har den beste støpeligheten. Med denne dataen kan vi også konkludere med at superplastiserende i stor grad styrer støpeligheten til betongen, da det i litteraturundersøkelsen viste seg at slagg og flygeaske skal ha en vesentlig økning ved støpelighet. En høy statisk skjærspenning slik som for Anleggsement FA, kan være ønsket da dette reduserer trykket på forskalingen og er mer motvillig til å segregere seg, men krever vibrering. For å oppnå en betong som er pumpbar, har bedre støpelighet og er selvkomprimerende, er en lav statisk skjærspenning nødvendig. Dermed bestemmer betongens flyteskjæring bruksområde og hva som er foretrukket.
2. Observasjoner fra bruken av reometeret tilsier at det gir mer presise målinger enn ved bruken av en synk test, da menneskelige feil har en mindre innflytelse på bruken av reometer. I tillegg blir det gitt to verdier fra reometeret, mse og R^2 , og disse to gir en indikasjon på henholdsvis hvor sikre og pålitelige målingene er. Dette får en derimot ikke ved en synk test, der må en selv bemerke om utførelsen er «god nok». Av den grunn kan det konkluderes med at bruken av reometer gir en bedre oversikt over de ferske egenskapene i betongen.
3. Trykkfastheten påvirkes i større grad for betonger med tilsatt alternative bindemidler, spesielt når det gjelder tidligfasthet og tregere utvikling, med unntak av Lavvarmesementen. Betongen med flygeaske har en klart lavere fasthet på alle målingene, mens Lavvarmesement kan måle seg med referanse betongen først etter 28 døgn. Derfor vil ingen av de miljøvennlige betongene være foretrukket ved ønsket høy tidlig fasthet, eventuelt kan herdningsakselerator benyttes for å fremskynde fasthetsutviklingen.
4. Fra test av e-modul kommer det fram at Anleggsement har den største motstandsevnen mot elastisk deformasjon, og er proporsjonal med trykkfastheten. Ut fra resultatene burde Lavvarmesementen hatt den høyeste verdien av e-modul. Målefeil kan være årsaken til at elastisitetsmodul ikke står i samsvar med trykkfastheten her. Anlegg FA får naturligvis en

lav elastisitetsmodul på grunn av sin trege fasthetsutvikling. Anleggsementen viser seg som best egnet for å motstå strekkreftene i en jomfruelig alder.

5. Alle blandningene har det samme matriksvolumet og krav til kvalitet, og som følge av det kan de bli sammenlignet. Sementen med stor andel slagg viser seg å være den klart tettete betongen med den laveste permeabiliteten. Alle tre blandningene blir definert som vanntette, da v/c -tallet er lavere enn 0,5, men det kan også være problematisk for en har ikke sammenlikningsgrunnlag til å se hvor pålitelige resultatene er. Det kommer tydelig frem i resultatene at effekten av slagg og flygeaske på betongen, gir en forfining av porestrukturen og dermed en økt frostbestandighet eller PF-verdi.
6. Det er ingen tvil om at det er store utslipp knyttet til produksjon av betong, hovedsakelig produksjonen av klinker, og grep må dermed bli tatt for å redusere klimaavtrykket. Bruken av flygeaske eller slagg som erstatning for klinker kan være alternativ for å redusere gassutslipp. Alternative bindemidler i betongen har sine klare klimafordeler, men sammenlignet med Anleggsement har for eksempel disse bindemidlene lavere fasthetsutvikling, som ofte er uønsket. Ut ifra alle undersøkelsene kan vi konkludere med at det stort sett egner seg å bruke referanse blandingen, men i noen tilfeller der en tett og bestandig betong er ønsket, kan bruk av alternative bindemidler være et alternativ som gir en miljøvennlig gevinst.

7. Forslag til framtidig arbeid

- Utføre flere tester. Ved å ha flere tester eliminerer en mer av usikkerheten i testene. Det blir lettere å både se og velge bort eventuelle resultat som er skiller seg ut fra resten av resultatene.
- Det blir ikke tatt hensyn til tiksotropien eller hydratiseringen av betongen ved bruken av Bingham modellen. Det kunne derfor vært interessant og sjekket effekten av tiksotropi mer omfattende.
- Undersøke om det kan være andre metoder for å sjekke betongens vanninntrenging. Det er i denne oppgaven for eksempel vist at en svært tett betong ikke får den lineære sammenhengen mellom vannabsorpsjon og roten av tiden.
- Teste effekten av andre miljøvennlige betonger, for å kunne sammenligne flere.

Litteraturliste

- Byggforsk. 2016. *Betong. Typer, egenskaper og bruksområder*.
- Byggforsk. 2018. «520.024 Naturlig tilslag i betong. Egenskaper og dokumentasjon - Byggforskserien». Hentet 3. februar 2021 (https://www.byggforsk.no/dokument/284/naturlig_tilslag_i_betong_egenskaper_og_dokumentasjon?fbclid=IwAR0K8nAqwcAos5JEjPbo2fFW1bf82UpNw95lcJY6eTIY9Oy3dVJHn5b1zIA).
- Cunningham, Neil. u.å. «What Is Yield Stress and Why Does It Matter?» 3.
- GERMANN. u.å. «ICAR Plus Rheometer | GERMANN». Hentet 25. mars 2021a (<http://germann.org/products-by-application/rheology-of-concrete/icar-rheometer>).
- GERMANN. u.å. «Rheology using the ICAR Plus—An Introduction».
- Helseth, Lars Egil. 2020. «tikotropi». *Store norske leksikon*.
- Holtebekk, Trygve. 2020. «viskositet». *Store norske leksikon*.
- K. Bremseth, Sigurd. 2010. *Fly ash in concrete - A literature study of the advantages and disadvantages*. COIN Project report no 18.
- Kazmierczak, Claudio de Souza, Joana Kirchner Benetti Boaro, Monique Palavro Lunardi, Marlova Piva Kulakowski, Mauricio Mancio, Claudio de Souza Kazmierczak, Joana Kirchner Benetti Boaro, Monique Palavro Lunardi, Marlova Piva Kulakowski, og Mauricio Mancio. 2019. «Influence of the Moisture Content on the Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete Made with Recycled Aggregate». *Ambiente Construído* 19(2):79–89. doi: 10.1590/s1678-86212019000200309.
- Kontrollrådet. 2019. «Betongens ABC». Hentet 27. januar 2021 (<https://kontrollbetong.no/aktuelt/betongens-abc/>).
- Levi, Peter, Tiffany Vass, Hana Mandova, og Alexandre Gouy. 2020. *Cement More efforts needed*.
- Maage, Magne, Sverre Smeplass, Knut O. Kjellsen, Erik Johan Sellevold, Jan Lindgård, Rolands Cepuritis, Roar Myrdal, Øyvind Bjønregaard, Mette Rica Geiker, og Stefan Jacobsen. 2016. *Concrete Technology 1. TKT 4215. Kompendium*. Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Neville, Adam M. 2011. *Properties of concrete*. 5th ed. Harlow, England ; New York: Pearson.
- Neville, Adam M., og J. J. Brooks. 2010. *Concrete Technology*. 2. ed. Harlow: Prentice Hall.
- Norcem. 2020a. «Anleggsement FA». Hentet 4. februar 2021 (<https://www.norcem.no/no/AnleggFA>).

- Norcem. 2020b. «Sementproduksjon og CO2». Hentet 30. mars 2021 (<https://www.norcem.no/no/sementproduksjon-co2>).
- Norsk Betongforening. 2018. *Beskrivelse av spesialbetonger Lavvarmebetong*.
- Norsk, Standard. 2014. «Prøving av herdnet betong - Del 13: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk». Hentet 15. april 2021 (<https://www-standard-no.ezproxy.uis.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=674103>).
- Norsk, Standard. 2019a. *NS-EN 12350-2:2019 Prøving av fersk betong - Del 2: Synkmål*.
- Norsk, Standard. 2019b. *NS-EN 12390-3:2019 Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet*.
- Norsk, Standard. 2019c. «Prøving av herdnet betong - Del 2: Støping og herdning av prøvelegemer for fasthetsprøving».
- P. Koehler, Eric, og David W. Fowler. 2004. *Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete*. ICAR 105-3F. International Center for Aggregates Research, The University of Texas at Austin.
- Pedersen, Bård. 2019. *Effekt av tilslag på betongens mekaniske egenskaper : Trykkfasthet, E-modul og spaltestrekkfasthet. Report*. Statens vegvesen.
- Pettersen, Bård. 2016. *Sementer med flygeaske og slag: Lab- og felterfaringer*. 517.
- Servi Hydranor AS. 2014. «BETJENINGSVEILEDNING FTS - LUFTPOREMÅLER B 2020 8 LITER FOR BETONG».
- Statens Vegvesen. 2016. «R210 Laboratorieundersøkelser». 431.
- Sørli, Jan Christian. 2016. «DEN MILJØMESSIGE VEKTSTANGA». 8.

Figurliste

Figur 1: Bindemidler og tilsetningsstoffer til å kontrollere betongens reologiske egenskaper (GERMANN u.å.)	14
Figur 2: Bingham Modellen (Maage mfl. 2016)	15
Figur 3: Betongens reologiske egenskaper	17
Figur 4: Synkmål	19
Figur 5: Luftmåler	20
Figur 6: Dynamisk flytekurve til ulike typer selvkomprimerende betong blandinger (GERMANN u.å.)	21
Figur 7: Reometer	22
Figur 8: Trykkpressemaskin	23
Figur 9: Prøvestykke med extensometer	24
Figur 10: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk (Norsk 2014)	24
Figur 11: Densitet	29
Figur 12: Luftinnhold	29
Figur 13: Kapillær sugehastighet	34
Figur 14: Sammenheng mellom motstandstall og v/c-tall (Maage mfl. 2016)	63
Figur 15: Beregning av motstandstall og kapillaritetstall	63

Tabell liste

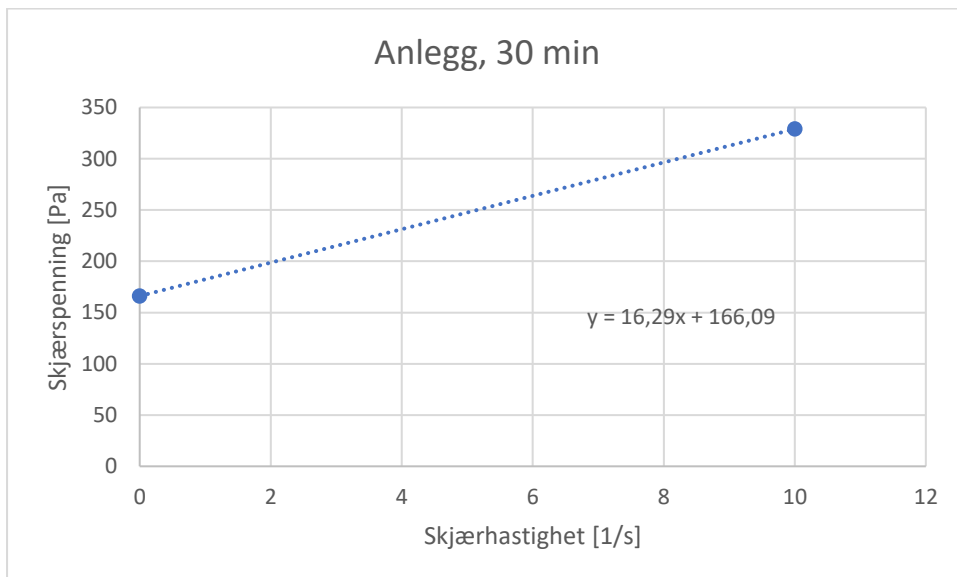
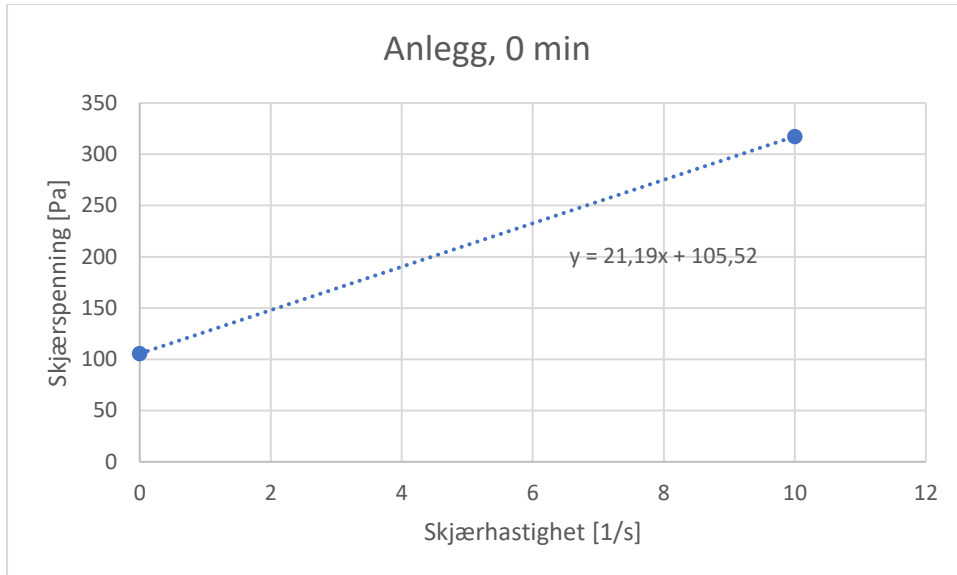
Tabell 1: Norcem Anleggsement	9
Tabell 2: Norcem Anleggsement FA	10
Tabell 3: Schwenk Lavvarmesement	11
Tabell 4: Prøveprogram	27
Tabell 5: Fordeling av betongen	27
Tabell 6: Resultat ferske egenskaper	28
Tabell 7: Bingham parametere og relative parametere	30
Tabell 8: Stress Growth	30
Tabell 9: Trykkfasthet	32
Tabell 10: Elastisitetsmodul resultater	33
Tabell 11: Kapillær sugehastighet	34
Tabell 12: Kapillaritetstall og motstandstall	35
Tabell 13: Densitet beregninger	36
Tabell 14: Porøsitet, PF-verdi	36

Vedlegg

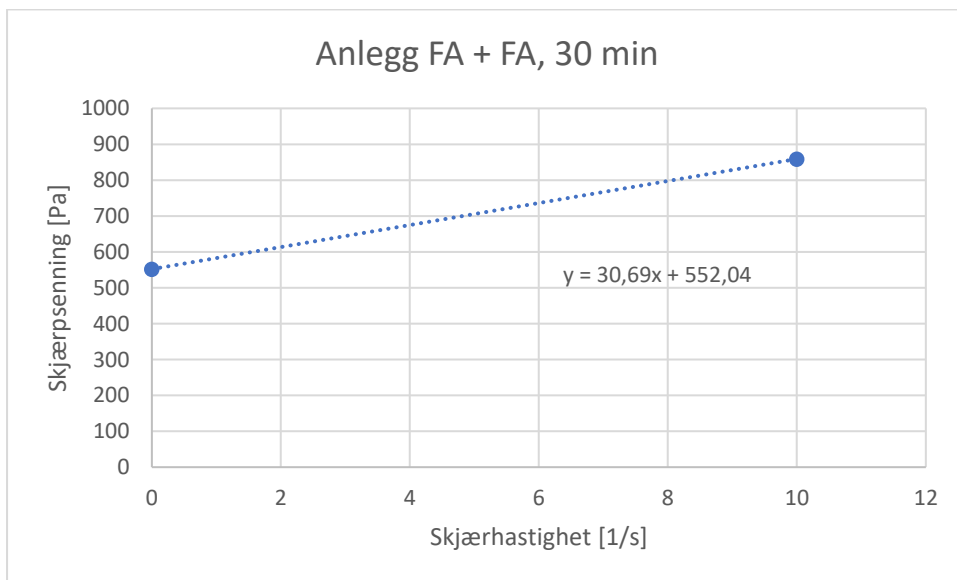
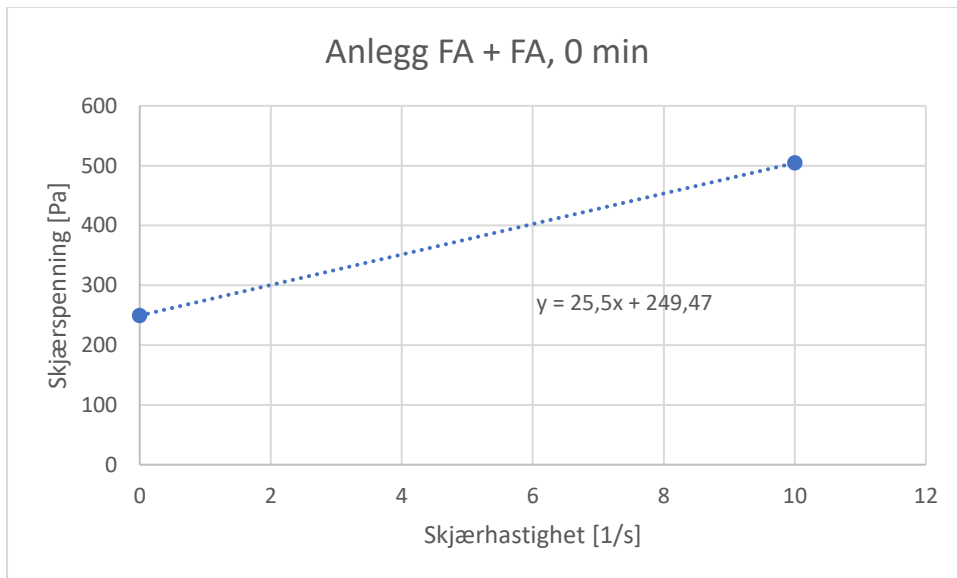
Bingham modell.....	47
Anlegg.....	47
Anlegg FA + FA	48
Lavvarme	49
Stress Growth & Flow Curve.....	50
Anlegg, 0 min.....	50
Anlegg, 30min.....	51
Anlegg FA + FA, 0 min	53
Anlegg FA + FA, 30 min	54
Lavvarme, 0 min	56
Lavvarme, 30 min	57
Synkmål og utbredelse.....	58
Trykkfasthet	60
Elastisitetsmodul	62
Kapillær sugeshastighet og porøsitet.....	63
Resepter (mix design)	65
Anlegg.....	65
Anlegg FA + FA	66
Lavvarme	67
Tilslag siktekurver	68
Produktdatablad	71
Norcem Anleggsement.....	71
Norcem Anlegg FA.....	75
Scwenk lavvamresement.....	76
Norcem Flygeaske	77

Bingham modell

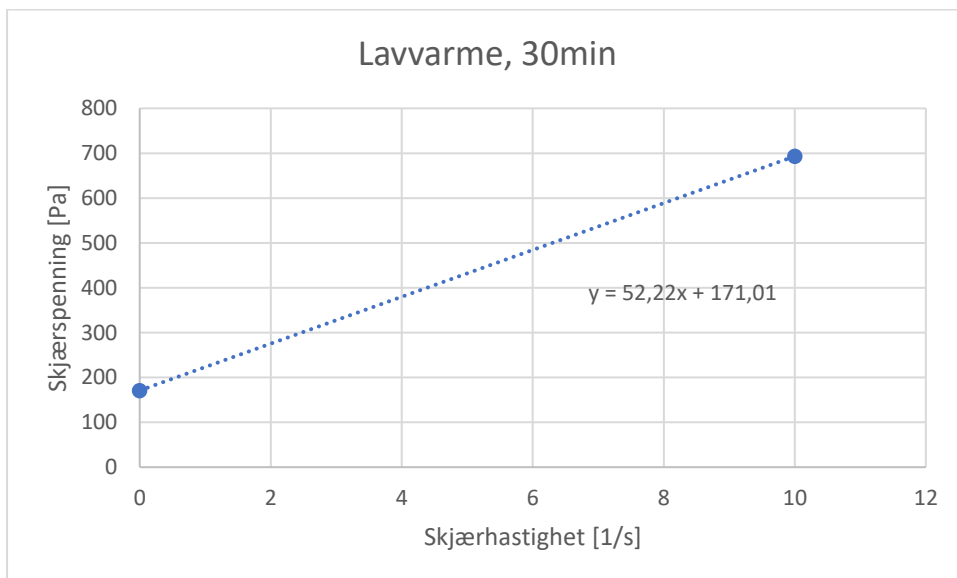
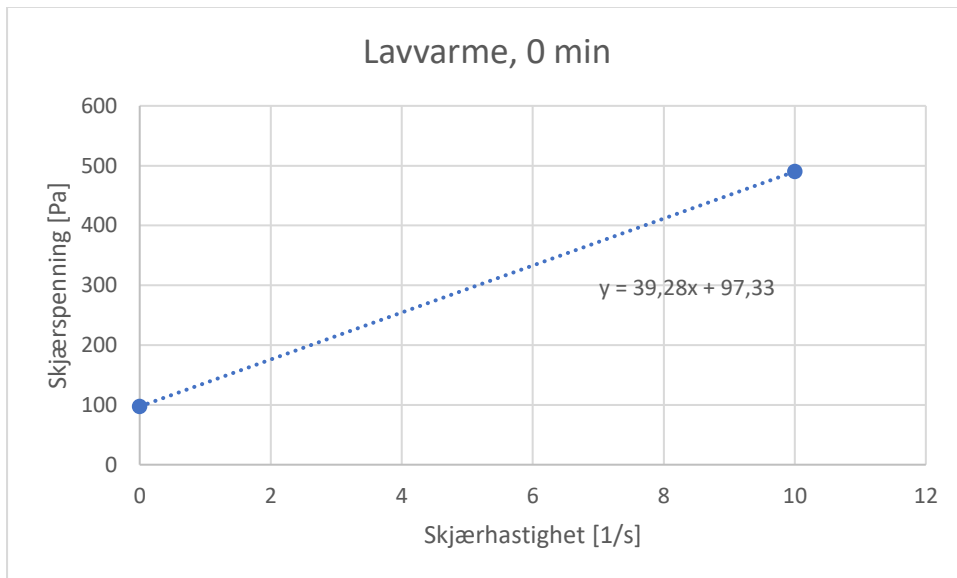
Anlegg



Anlegg FA + FA

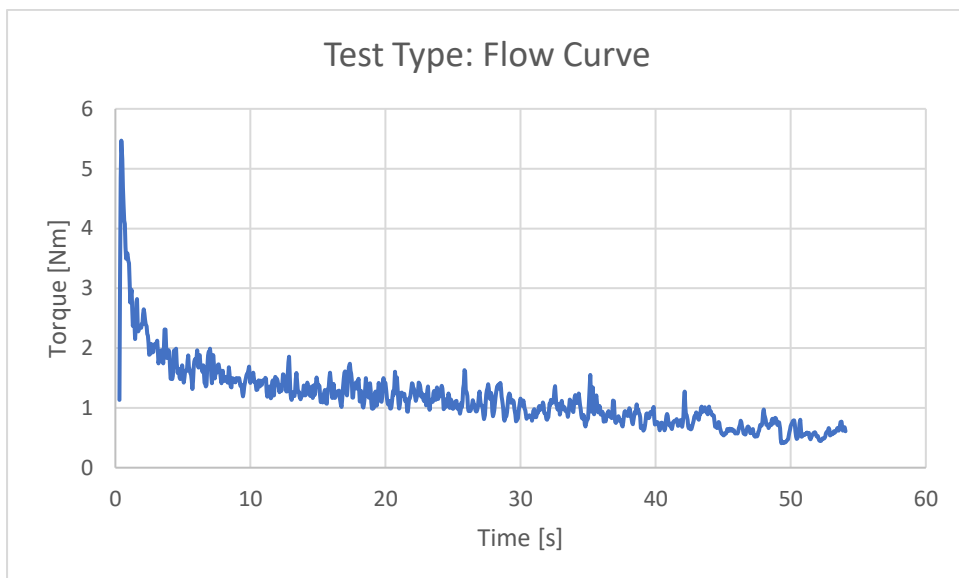
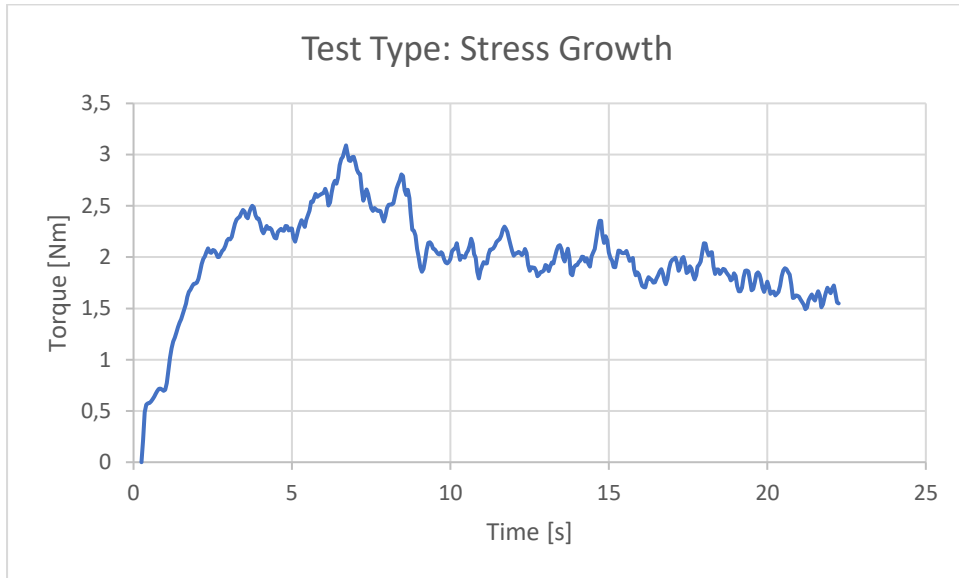


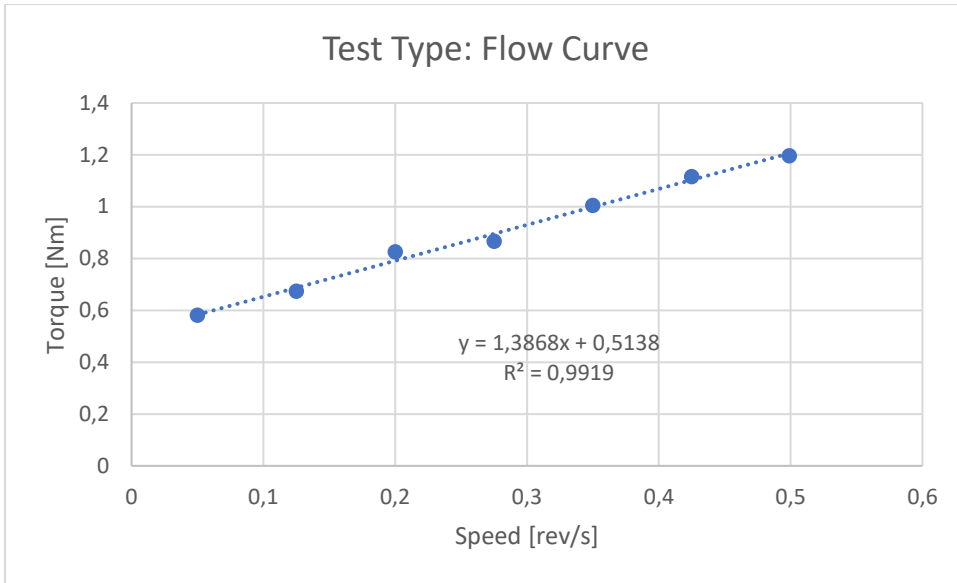
Lavvarme



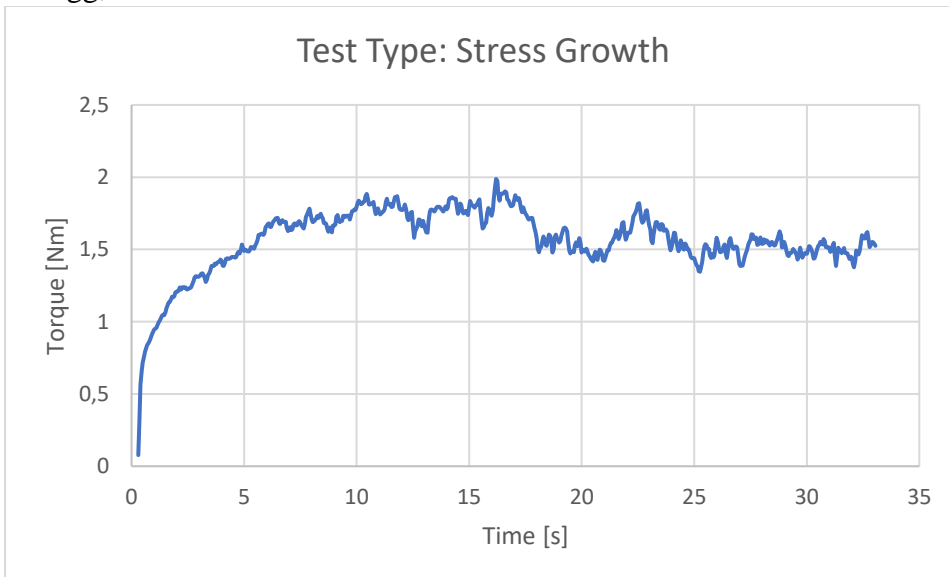
Stress Growth & Flow Curve

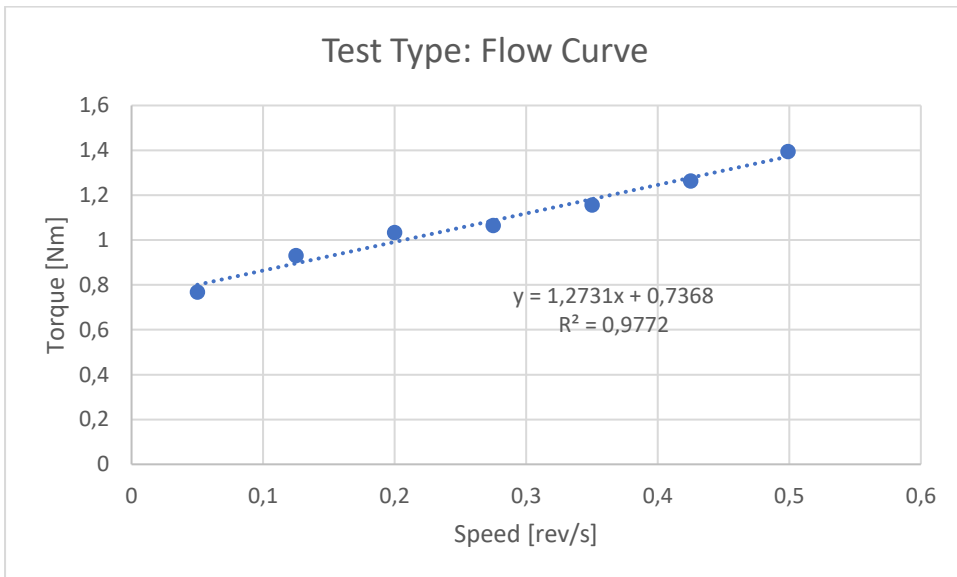
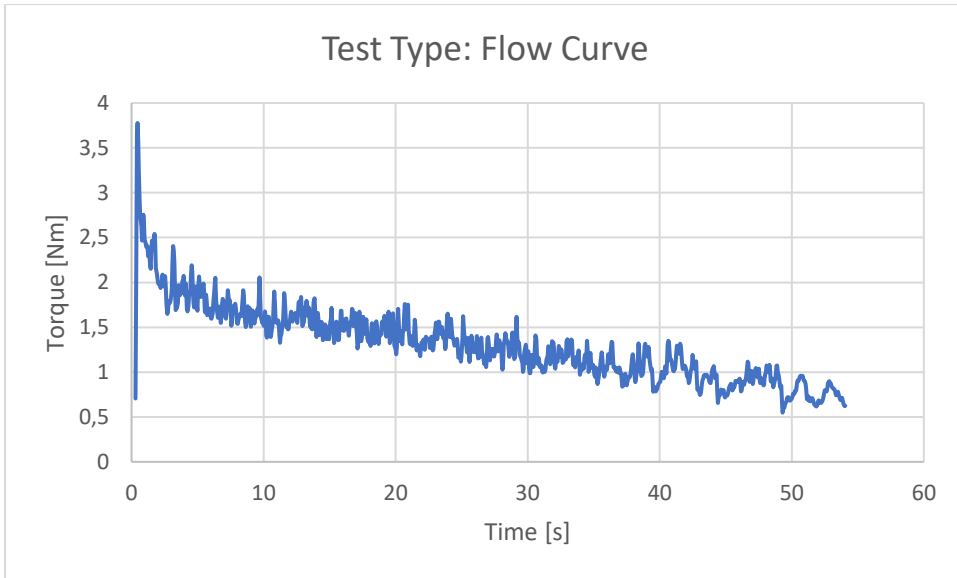
Anlegg, 0 min



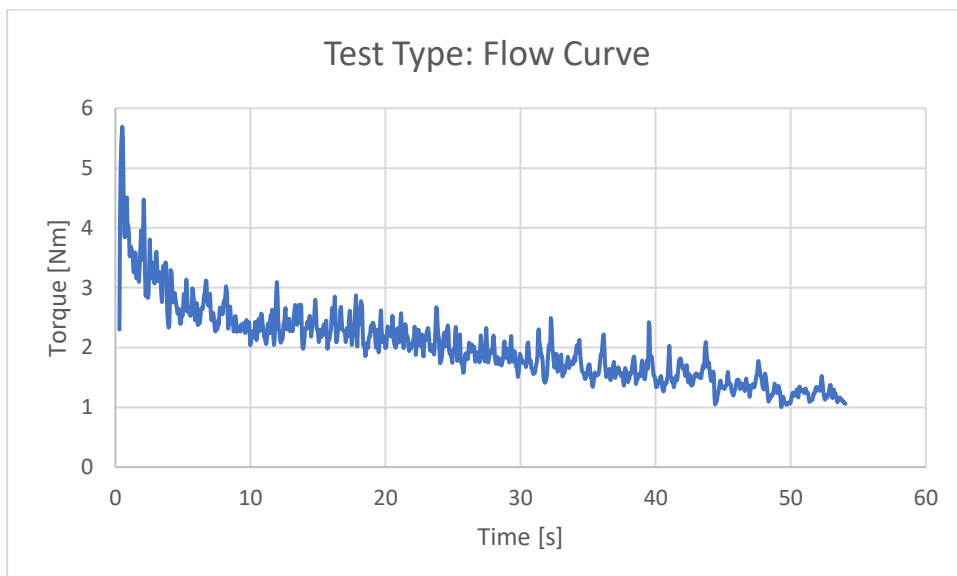
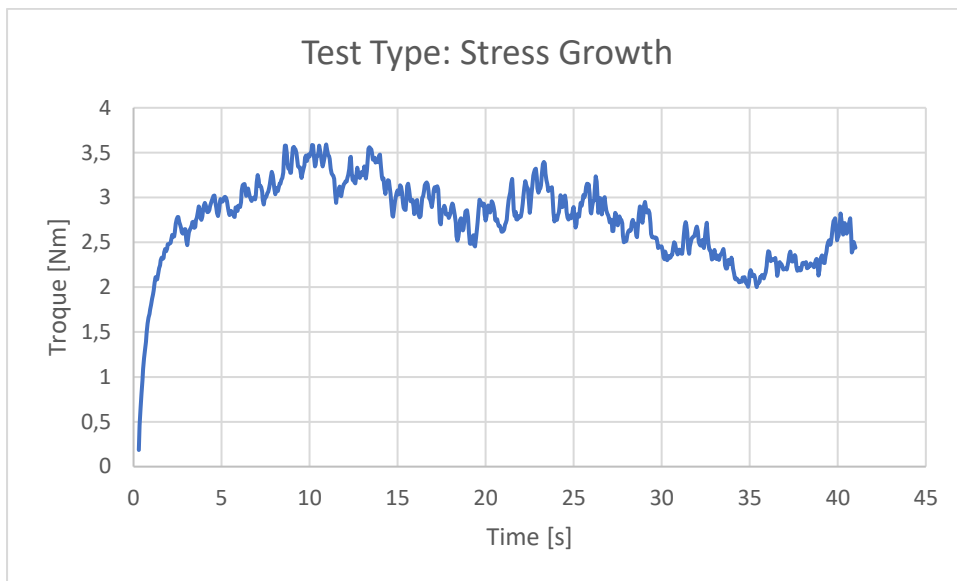


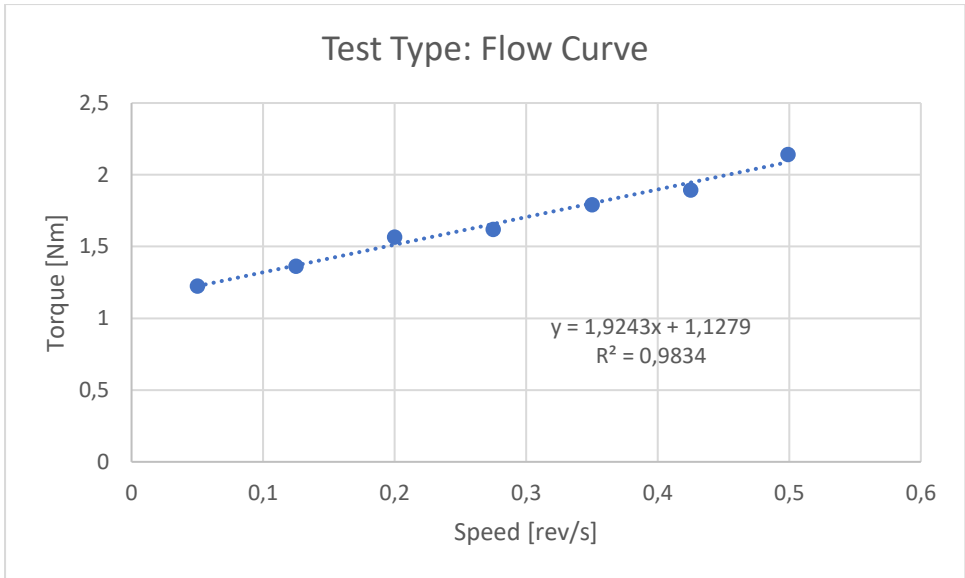
Anlegg, 30min



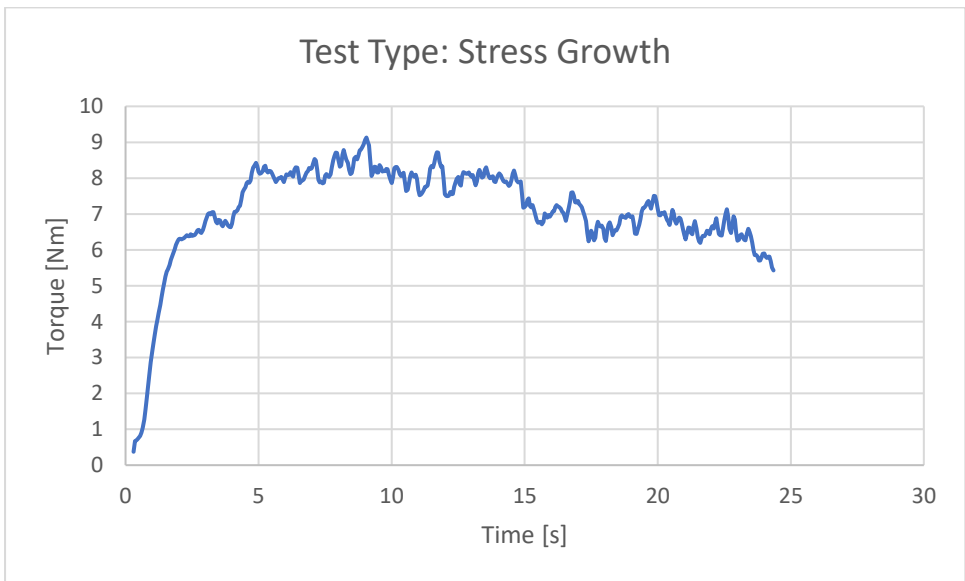


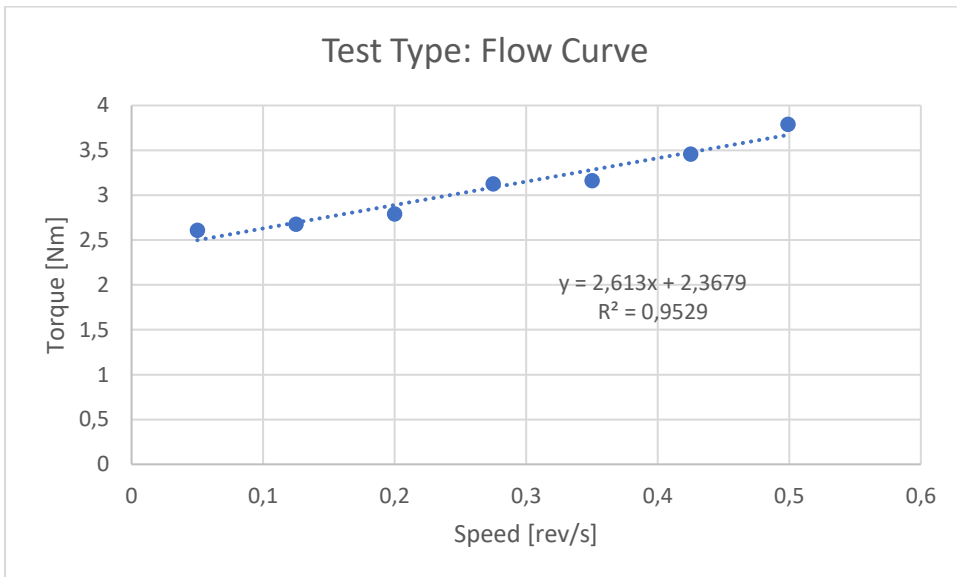
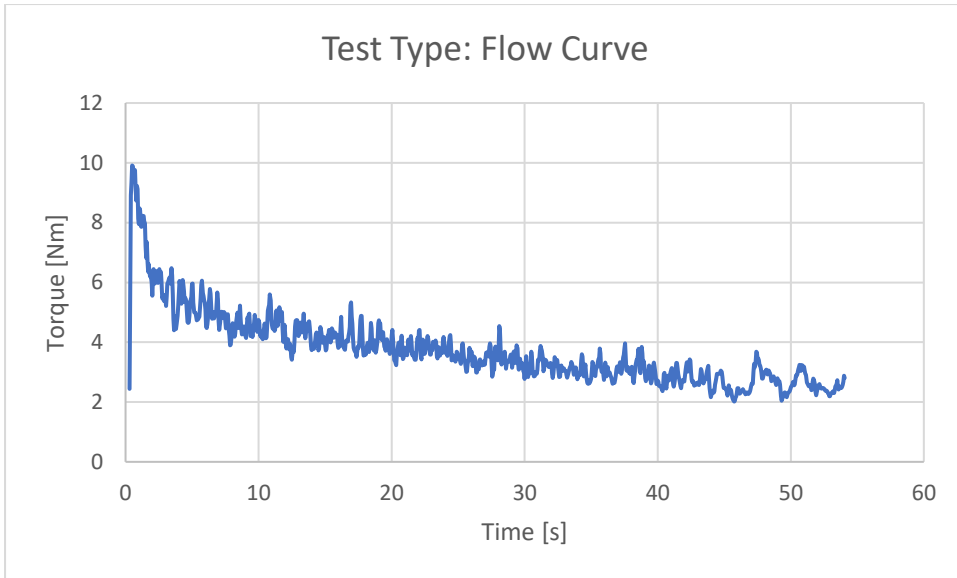
Anlegg FA + FA, 0 min



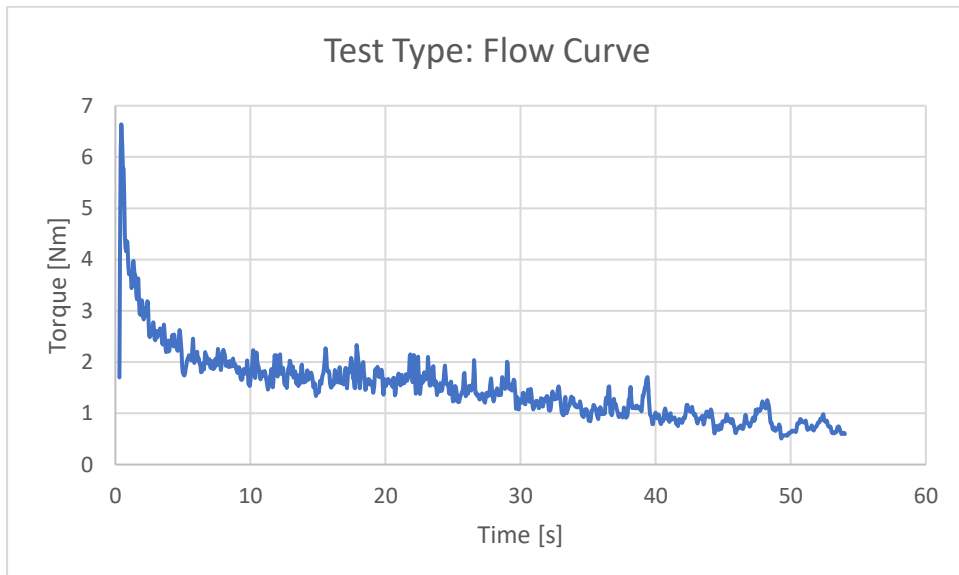
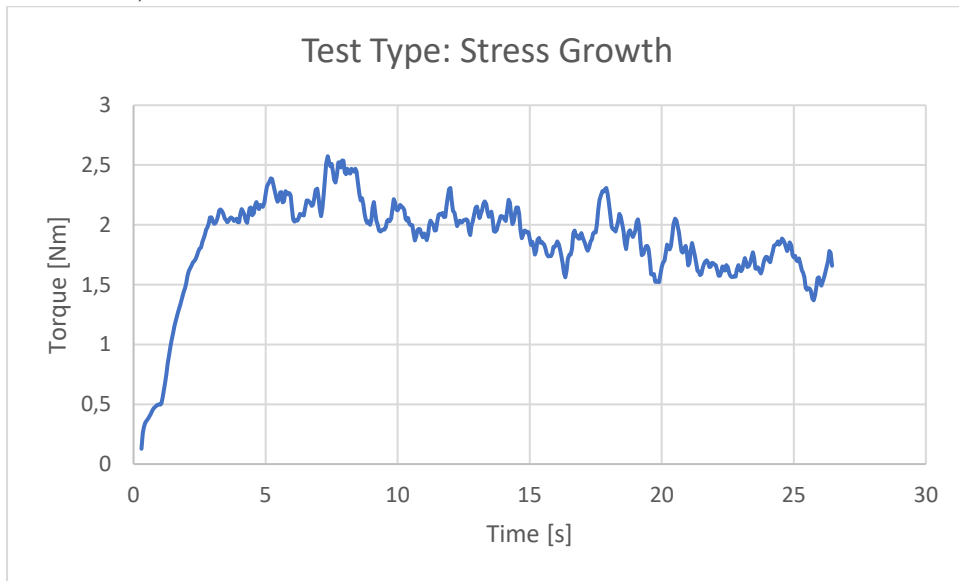


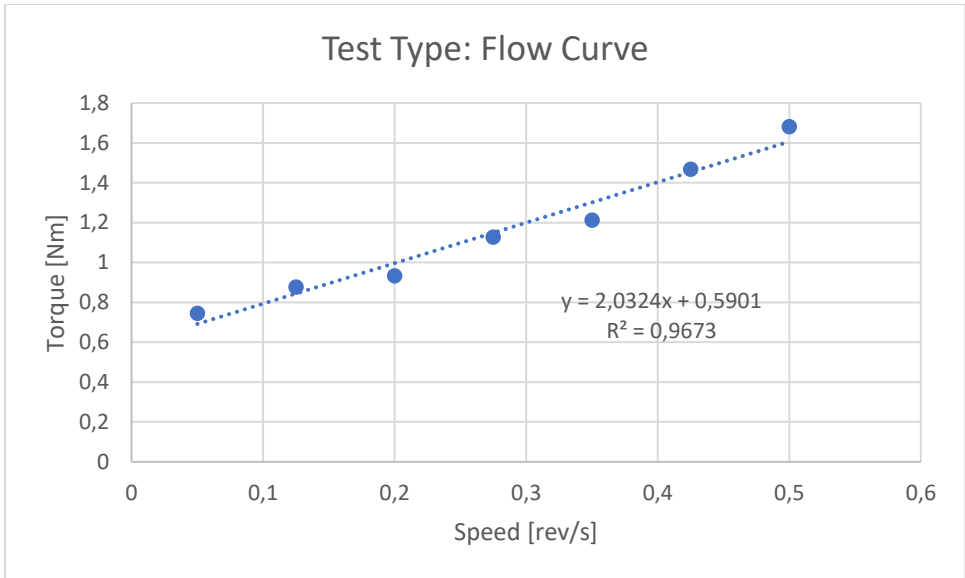
Anlegg FA + FA, 30 min



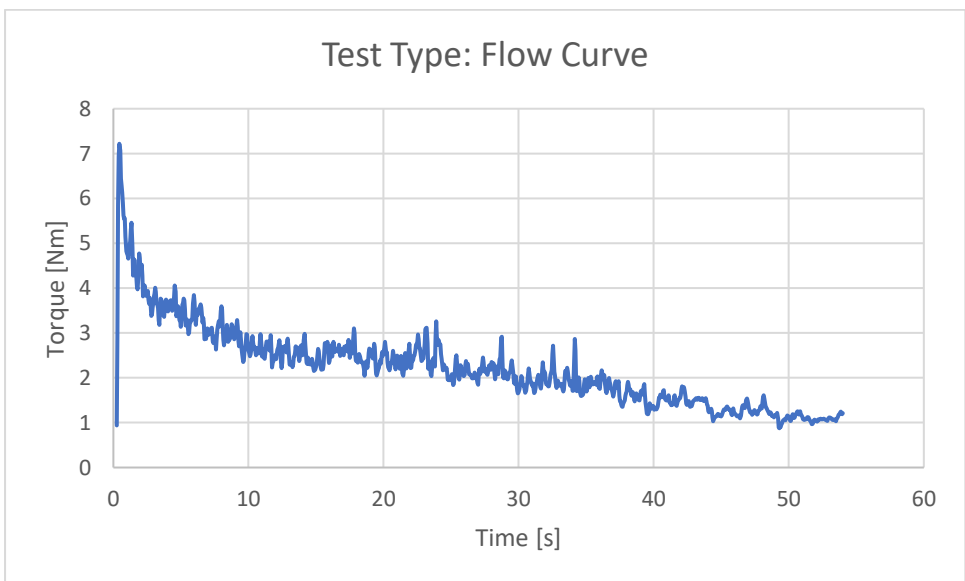
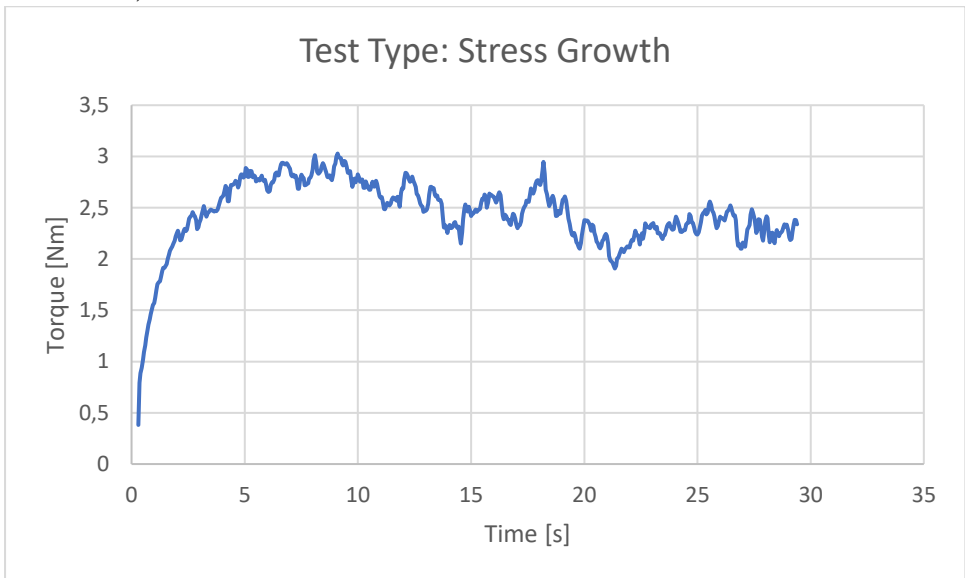


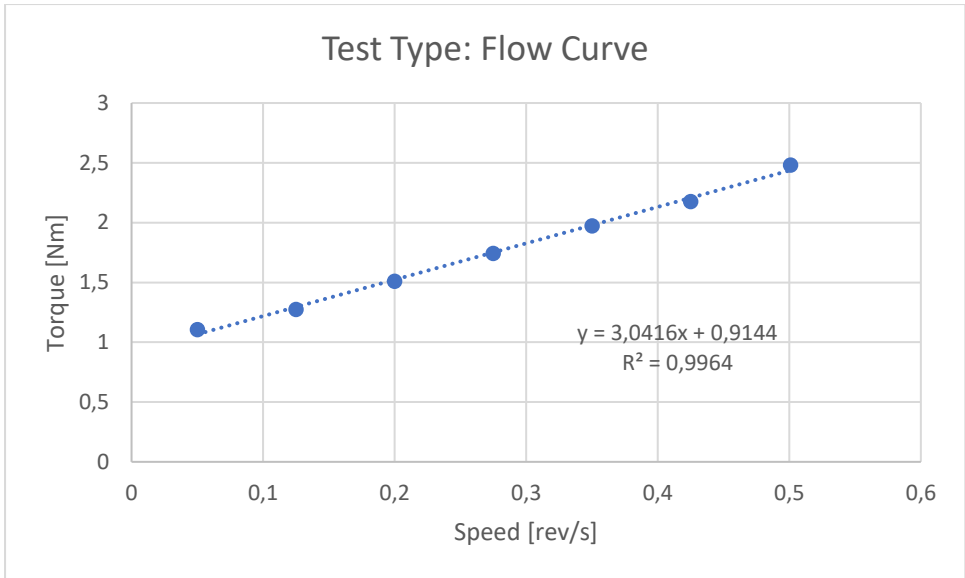
Lavvarme, 0 min



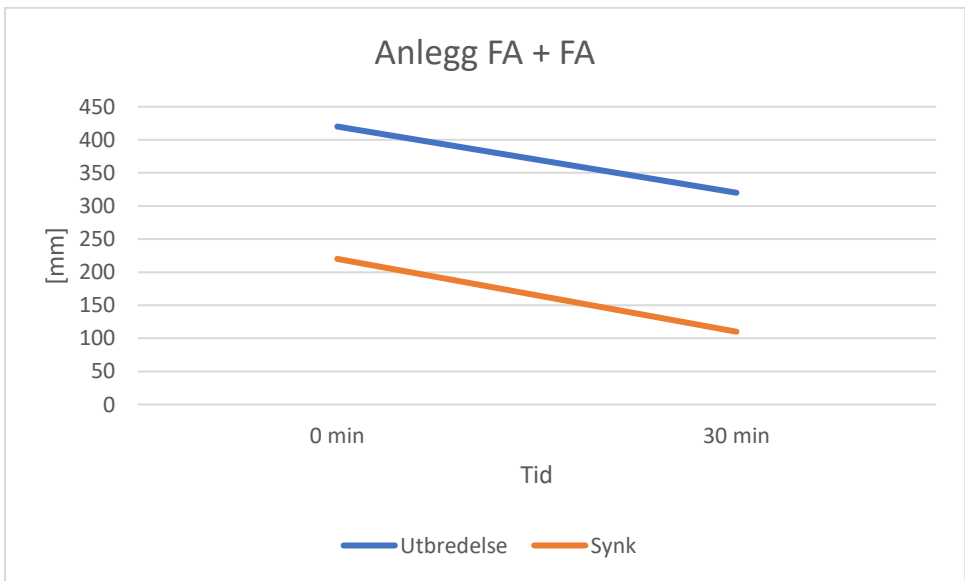
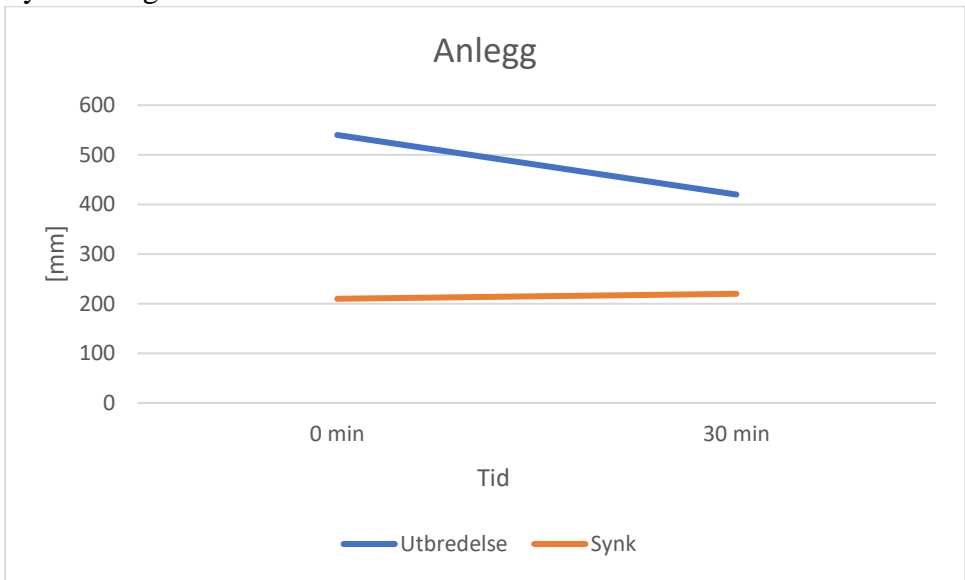


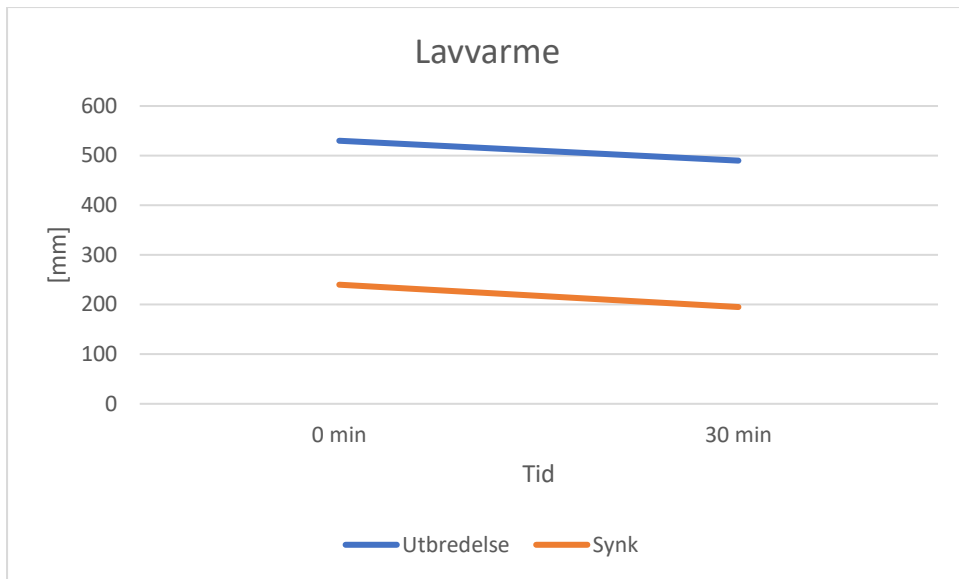
Lavvarme, 30 min





Synkmål og utbredelse





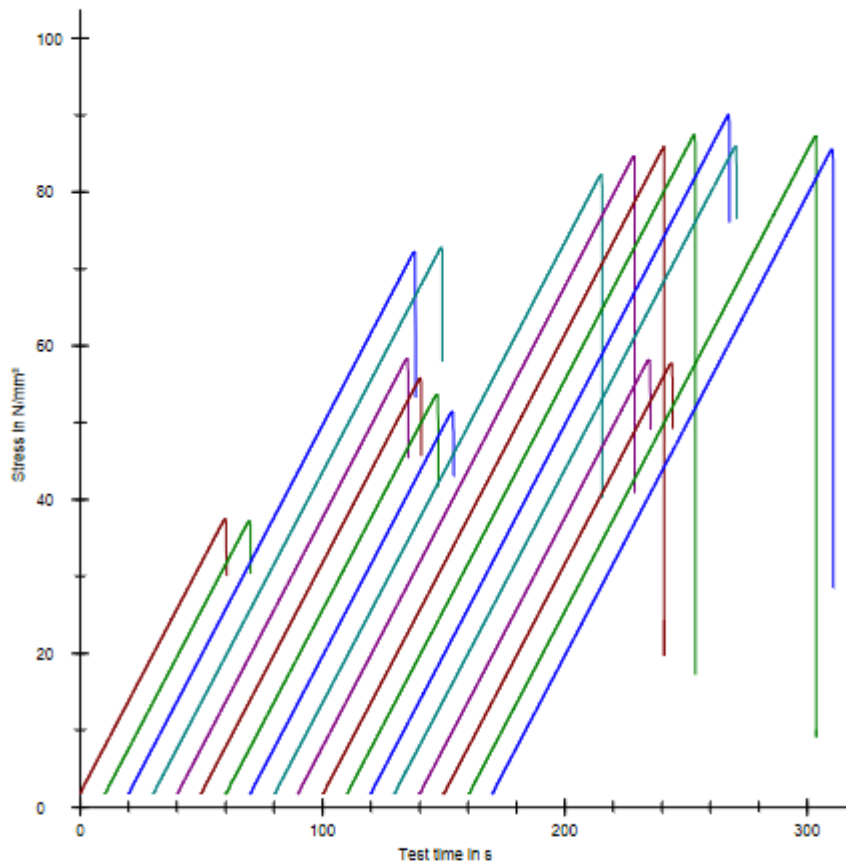
Parameter table:

Test protocol	: Bachelor oppgave	Type strain extensometer:	
Tester	: Håvard Bjelland og Per Kristian Moi	Machine data	: Controller TT1412
Customer	:		PistonStroke
Test standard	:		LoadCell 3 MN
Strength grade	:		
Other	:		

Results:

Nr	Date	ID	a mm	b mm	F _m kN	Clock time	σ _m N/mm ²
1	25.03.2021	Anlegg FA	100,0	100,0	374,43	11.24.29	37,44
2	25.03.2021	Anlegg FA 7 døgn	100,0	100,0	372,11	11.27.38	37,21
3	25.03.2021	Anlegg 7 døgn	100,0	100,0	722,49	11.31.19	72,25
4	25.03.2021	Anlegg 7 døgn	100,0	100,0	728,01	11.35.10	72,80
5	26.03.2021	Lavvarme 7 døgn	100,0	100,0	583,32	09.25.47	58,33
6	26.03.2021	Lavvarme 7 døgn	100,0	100,0	557,95	09.28.39	55,79
7	15.04.2021	Anlegg FA 28 døgn	100,0	100,0	536,28	12.43.34	53,63
8	15.04.2021	Anlegg FA 28 døgn	100,0	100,0	514,64	12.46.20	51,46
9	15.04.2021	Anlegg 28 døgn	100,0	100,0	822,43	12.51.22	82,24
10	15.04.2021	Anlegg 28 døgn	100,0	100,0	846,66	12.55.12	84,67
11	16.04.2021	Lavvarme 28 døgn	100,0	100,0	858,93	09.25.41	85,89
12	16.04.2021	Lavvarme 28 døgn	100,0	100,0	875,07	09.30.02	87,51
13	29.04.2021	Anlegg 42 døgn	100,0	100,0	900,26	10.04.10	90,03
14	29.04.2021	Anlegg 42 døgn	100,0	100,0	859,83	10.08.17	85,98
15	29.04.2021	Anlegg FA 42 døgn	100,0	100,0	581,32	10.11.26	58,13
16	29.04.2021	Anlegg FA 42 døgn	100,0	100,0	577,36	10.14.22	57,74
17	30.04.2021	Lavvarme 42 døgn	100,0	100,0	873,29	09.44.56	87,33
18	30.04.2021	Lavvarme 42 døgn	100,0	100,0	855,79	09.49.11	85,58

Series graphics:



Statistics:

Series	a	b	F _m	σ _m
n = 18	mm	mm	kN	N/mm ²
n	18	18	18	18
x	100,0	100,0	691,12	69,11
s	0,0	0,0	179,84	17,98
max.	100,0	100,0	900,26	90,03
min	100,0	100,0	372,11	37,21
med	100,0	100,0	725,25	72,53
v	0,00	0,00	26,02	26,02

Elastisitetsmodul

Toni / Technik

Simple standard protocol

16.04.2021

Parameter table:

Test protocol :	Type strain extensometer:
Tester :	Machine data :
Customer :	Controller TT0322
Test standard : EN12390-13 method A	PistonStroke
Strength grade :	LoadCell 3 MN
Creation date :	Extensometer
Age : 0 T	Extensometer2
Other :	

Results:

Nr	$\epsilon_{0,E1}$ mm	$\epsilon_{0,E2}$ mm	$\epsilon_{0,E1}$ mm	$\epsilon_{0,E2}$ mm	$\Delta\epsilon_{0,23,E}$ %	$\Delta\epsilon_{0,23,E}$ %	$\Delta\epsilon_{0,23,E}$ %	$\sigma_{m,a,1}$ N/mm	$\sigma_{m,b,0}$ N/mm	$\epsilon_{a,1}$ mm	$\epsilon_{b,0}$ mm	$E_{C,0}$ N/mm	$\sigma_{m,a,3}$ N/mm	$\sigma_{m,b,2}$ N/mm	$\epsilon_{a,3}$ mm	$\epsilon_{b,2}$ mm	$E_{C,S}$ N/mm
max.					10,00	10,00	20,00										
min					-10,00	-10,00	-20,00										
1	0,022	0,040	0,022	0,040	0,13	0,13	14,42	22,28	7,04	0,144	0,040	29555	22,30	6,95	0,146	0,056	33935
2	0,029	0,056	0,029	0,057	0,52	0,41	15,80	23,15	8,05	0,207	0,058	20138	23,19	7,96	0,212	0,088	24456
3	0,021	0,029	0,021	0,028	0,24	0,36	7,46	14,06	5,04	0,117	0,028	20177	14,05	4,94	0,118	0,047	25453

Series graphics:

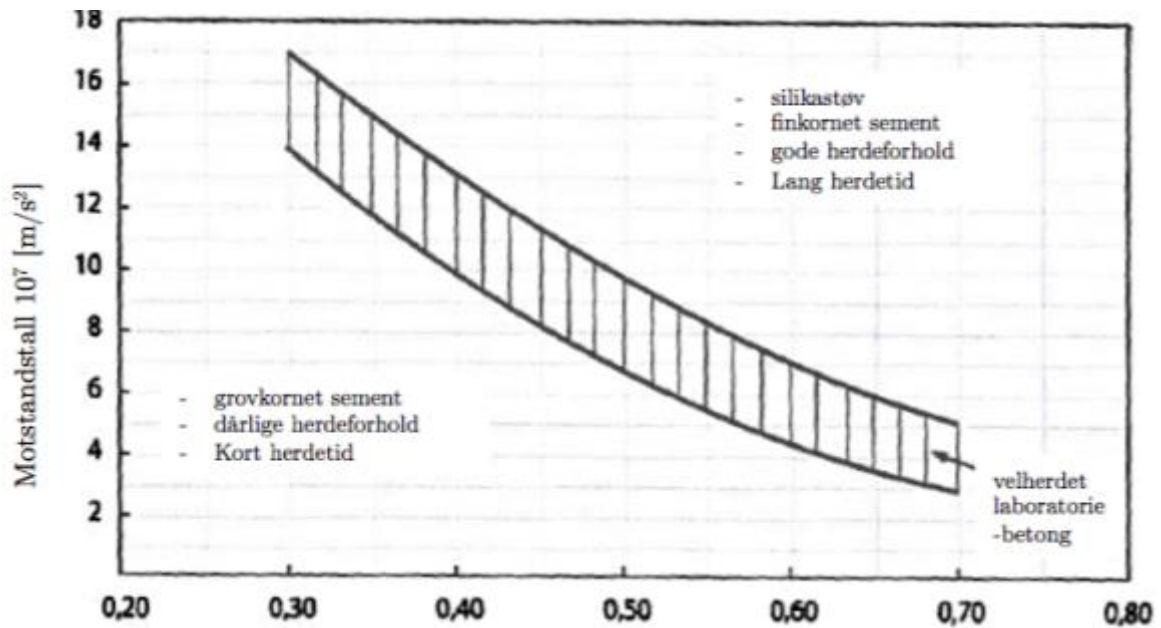
The graph plots Stress in N/mm² on the y-axis (0 to 50) against Test time in s on the x-axis (0 to 350). Three data series are shown: blue, red, and green. Each series exhibits a similar pattern of stress increases followed by plateaus and then decreases. The blue series reaches a peak stress of approximately 15 N/mm², the red series reaches approximately 23 N/mm², and the green series reaches approximately 24 N/mm². The test concludes around 350 seconds.

Statistics:

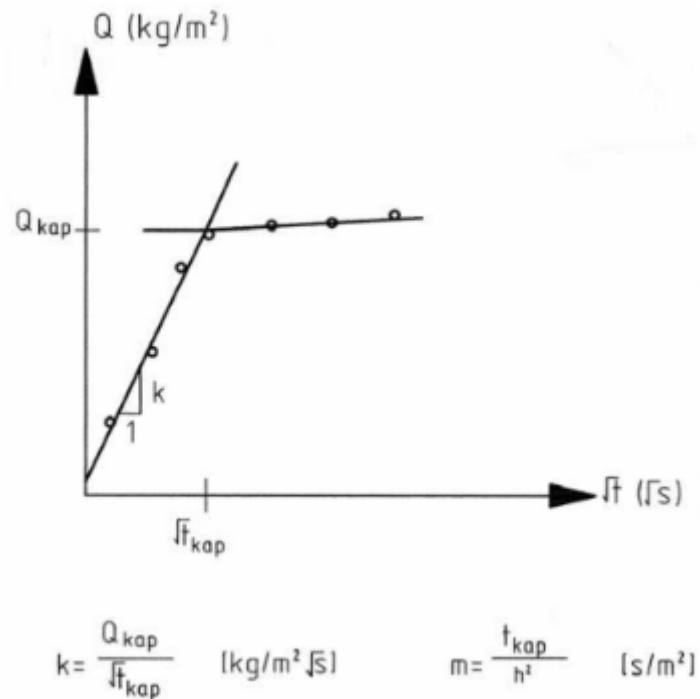
Series	σ_m N/mm²	$E_{C,0}$ N/mm²	$E_{C,S}$ N/mm²
n = 3			
\bar{x}	19,94	23290,57	27948,43
s	5,02	5425,95	5209,01
v	25,17	23,30	18,64

Kapillær sugehastighet og porøsitet

Motstandstall



Figur 14: Sammenheng mellom motstandstall og v/c-tall (Maage mfl. 2016)



Figur 15: Beregning av motstandstall og kapillaritetstall

Resepter (mix design)

Anlegg

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Anlegg	431,7	25,901			25,901
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	164,0	9,842		-1,485	8,358
Absorbed water	13,6	0,816			0,816
Sand 0/8 mm	905,5	54,329	1,8	0,951	55,280
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	910,0	54,599	0,5	0,273	54,872
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	5,2	0,311	84	0,261	0,311
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000

9,174

Anlegg FA + FA

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Standard FA	327,3	19,640			19,640
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	90,7	5,443			5,443
	0,0	0,000			0,000
Free water	148,5	8,911		-1,477	7,434
Absorbed water	13,6	0,816			0,816
Sand 0/8 mm	905,5	54,329	1,8	0,951	55,280
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	910,0	54,599	0,5	0,273	54,872
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	5,0	0,301	84	0,253	0,301
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000

8,251

Lavvarme

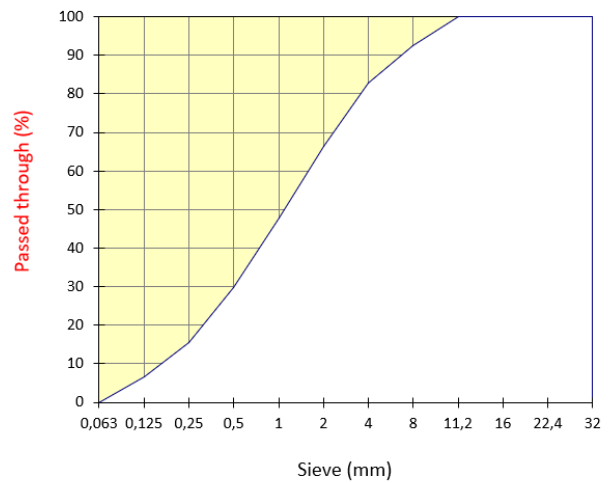
Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Lavvarme sement	425,4	25,527			25,527
0	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	161,7	9,700		-1,481	8,219
Absorbed water	13,6	0,816			0,816
Sand 0/8 mm	905,5	54,329	1,8	0,951	55,280
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	910,0	54,599	0,5	0,273	54,872
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	5,1	0,306	84	0,257	0,306
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000

9,035

Tilslag siktekurver 0-8mm tilslag (sand)

Type:	Sand 0/8 mm
Date:	21.11.2008
FM =	3,12

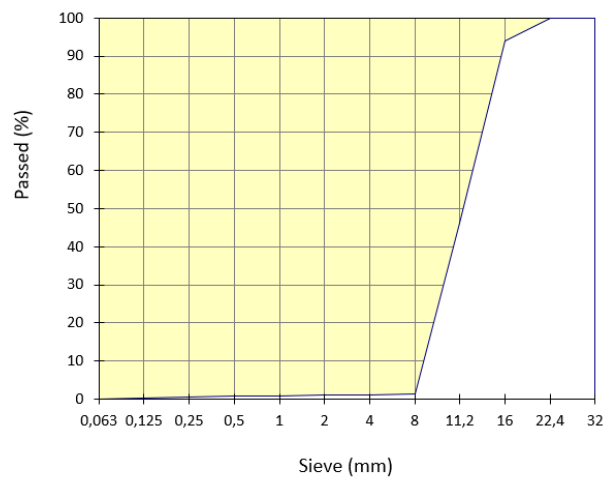
Opning	sieve residue (g)		sieve residu (%)	Passed-through (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	68	68	7,6	92,4
4	152,2	152,2	17,1	82,9
2	300,1	300,1	33,7	66,3
1	464,5	464,5	52,1	47,9
0,5	625,6	625,6	70,2	29,8
0,25	754,1	754,1	84,6	15,4
0,125	833,2	833,2	93,4	6,6
0,063	891,8	891,8	100,0	0,0
Bottom	892	892		



8-16mm tilslag

Type:	Årdal 8/16mm
Date:	27.03.2020
FM =	6,50

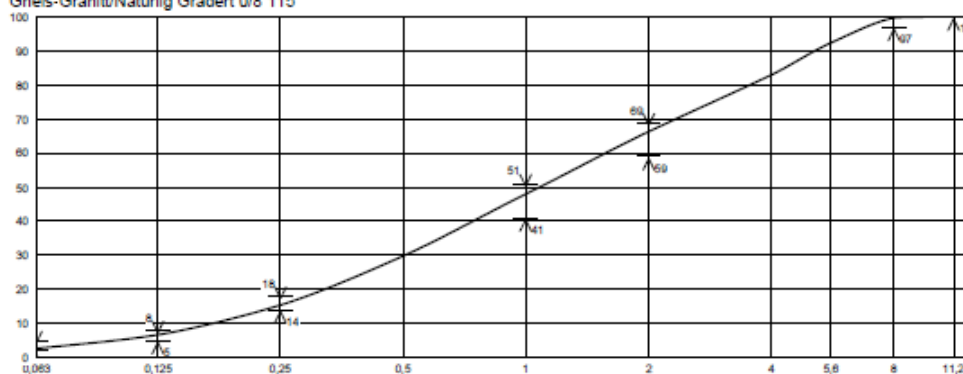
Opning	Sieve residue (g)		Sieve residu (%)	Passed-Through (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	124,1	124,1	6,0	94,0
11,2	1112,1	1112,1	53,8	46,2
8	2039,6	2039,6	98,6	1,4
4	2045	2045	98,9	1,1
2	2048	2048	99,0	1,0
1	2051	2051	99,1	0,9
0,5	2053	2053	99,2	0,8
0,25	2057	2057	99,4	0,6
0,125	2061	2061	99,6	0,4
0,063	2069	2069	100,0	0,0
Bottom	2069	2069		



Dato:	19.12.2017	Kunde:	UIS
Materiale:	0/8 mm System 2+	Havn:	
Varenr:	101718-115	Båt:	
Følgeseddel nr.:			
Test	NS-EN 933-1	Laboratorium	NorStone Årdal
Identifikasjon av prøven	0/8 mm 115	Operator	Sæbø
Dato mottatt/uttatt	16.10.2017	Dato utført	19.12.2017
Metod (angi)	<input type="checkbox"/> Vasking og sikting	Standard	NS-EN 12620
	<input checked="" type="checkbox"/> Torr sikting	Sertifikat:	1111-CPD-0007
		Produksjonssted	NorStone Årdal
Total tørr masse M_1 =		892,1 g	
Tørr masse etter vasking M_2 =		g	
Tørr masse av Finstoff fjernet ved vasking $M_1 - M_2$ =		g	
Vanninnhold (%) NS 1097-5 =			

Sikteåpning (mm)	Masse tilbakehold (g)	Prosentandel (%)	Gjennomgang			
			Akkumulert Prosentandel (%)	Idealkurve (%)	Min (%)	Max (%)
11,2			100,0	100,0	100,0	
8	2,6	0,3	99,7	99,0	97,0	100,0
5,6	65,4	7,3	92,4	90,0		
4	84,2	9,5	82,9	80,0		
2	147,9	16,6	66,3	64,0	50,0	60,0
1	164,4	18,4	47,9	46,0	41,0	51,0
0,5	161,1	18,1	29,8	28,0		
0,25	128,5	14,4	15,4	16,0	14,0	18,0
0,125	79,1	8,8	6,6	7,0	5,0	8,0
0,063	35,5	4,0	2,6	3,0	2,0	5,0
< 0,063	23,1	2,6				
Sum	891,8	100,0	0,0	< 1% Prosentats materiale tapt		

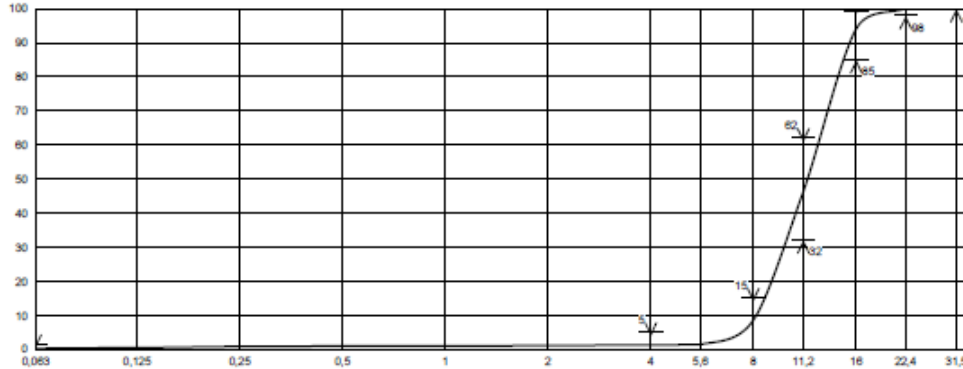
Gneis-Granitt/Naturlig Gradert 0/8 115



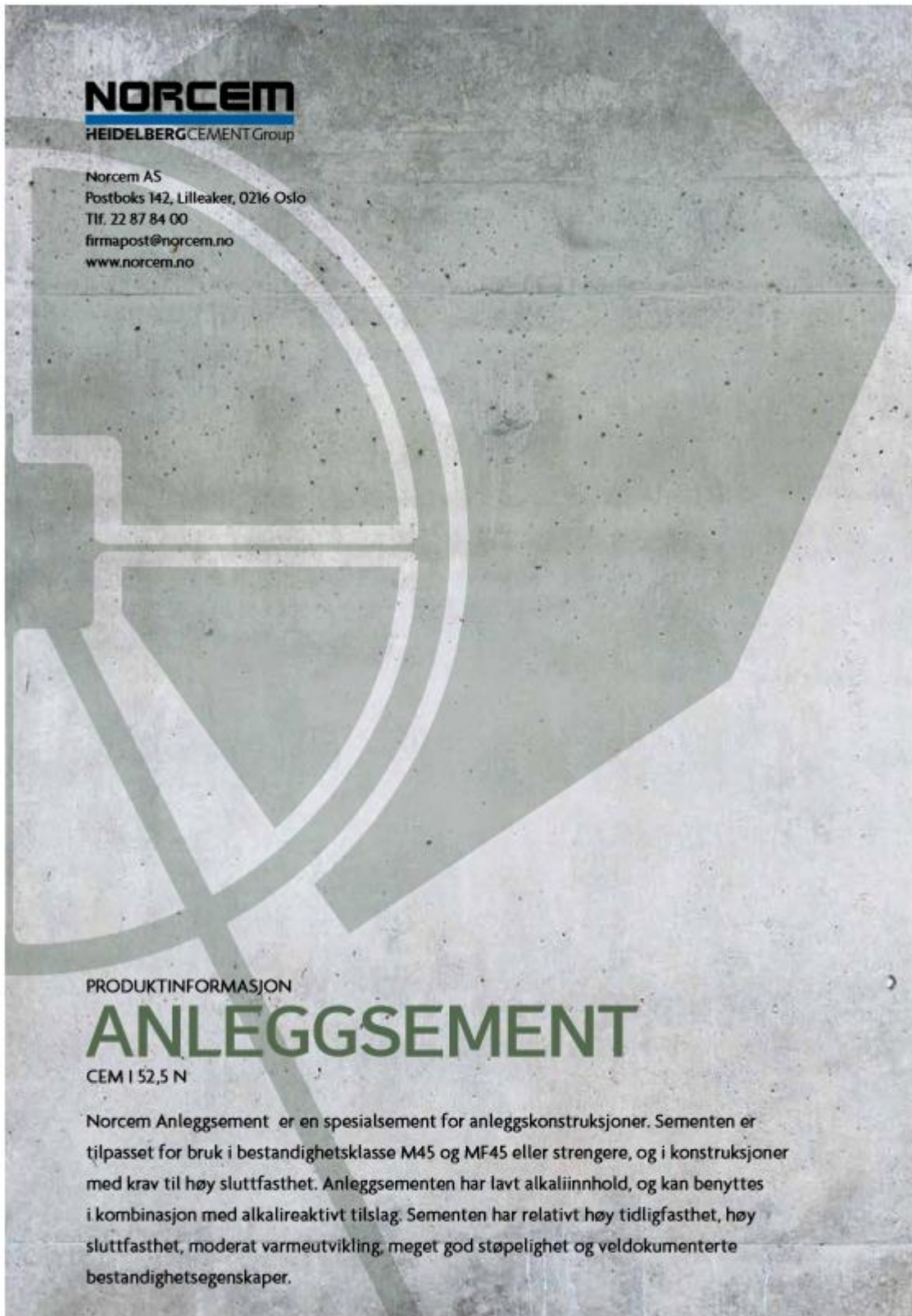
Dato:	19.12.2017	Kunde:	UIS
Materiale:	8/16 mm System 2+	Havn:	
Varenr:	101711-160	Båt:	
Følgeseddel nr:			
Test	NS-EN 933-1	Laboratorium	NorStone Årdal
Identifikasjon av prøven	8/16 mm 160	Operatør	Sæbø
Dato mottatt/uttatt	19.12.2017	Dato utført	20.12.2017
Metod (angi)	<input type="checkbox"/> Vasking og sikting	Standard	NS-EN 12620
	<input checked="" type="checkbox"/> Tørrsikting	Sertifikat:	1111-CPD-0007
		Produksjonssted	NorStone Årdal
Total tørr masse M_1 =		2069,3 g	
Tørr masse etter vasking M_2 =		g	
Tørr masse av Finstoff fjernet ved vasking $M_1 - M_2$ =		g	
Vanninnhold (%) NS 1097-5 =		1,3	

Sikteåpning (mm)	Masse tilbakehold (g)	Prosentandel (%)	Gjennomgang			
			Akkumulert Prosentandel (%)	Idealkurve (%)	Min (%)	Max (%)
31,5					100,0	
22,4			100,0	100,0	98,0	100,0
16	124,1	6,0	94,0	90,8	85,0	99,0
11,2	988,0	47,8	46,2	46,9	32,0	62,0
8	781,1	37,7	8,5	8,9		15,0
5,6	146,4	7,1	1,4	2,7		
4	5,5	0,3	1,1	2,3		5,0
2	2,7	0,1	1,0	2,0		
1	2,9	0,1	0,9	1,7		
0,5	2,5	0,1	0,8	1,3		
0,25	4,0	0,2	0,6	0,9		
0,125	3,8	0,2	0,4	0,6		
0,063	3,0	0,2	0,2	0,4		1,5
< 0,063	4,8	0,2				
Sum	2068,8	100,0	0,0	< 1% Prosentats materiale tapt		

Gneis-Granitt/Grovtt 8/16 160



Produktdatablad
Norcem Anleggsement



NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS
Postboks 142, Lilleaker, 0216 Oslo
Tlf. 22 87 84 00
firmapost@norcem.no
www.norcem.no

PRODUKTINFORMASJON

ANLEGGSEMENT

CEM I 52,5 N

Norcem Anleggsement er en spesialsement for anleggskonstruksjoner. Sementen er tilpasset for bruk i bestandighetsklasse M45 og MF45 eller strengere, og i konstruksjoner med krav til høy sluttfasthet. Anleggsementen har lavt alkaliinnhold, og kan benyttes i kombinasjon med alkalireaktivt tilslag. Sementen har relativt høy tidligfasthet, høy sluttfasthet, moderat varmeutvikling, meget god støpelighet og veldokumenterte bestandighetsegenskaper.

Norcem Anleggsement tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portlandsement CEM I 52,5 N.

Ytelsesdeklarasjon nr.: 1111-DoP-NO11-0413.

Sertifikat-Konstant ytelse nr.: 1111-CPR-0413.

Sist revidert: 2016

DISTRUBISJON OG LAGRING

Sementen leveres i big bag og bulk. Sementen skal lagres i tørr og tett silo da fukt skader sementen. Lagringstiden bør begrenses til 6 måneder. Effekten av kromatreduseringen av sementen er effektiv i 6 måneder etter produksjonsdato, dersom sementen lagres tørt og tett.

SIKKERHET VED BRUK

All sement skal oppbevares utilgjengelig for barn og er farlig å spise. Sement i øynene kan gi alvorlige øyeskader. Fuktig sement danner kalsiumhydroksid som virker irriterende på hud og åndedretsorgan. Sikkerhetsdatablad med fullstendig informasjon finnes på Norcems hjemmeside www.norcem.no under «Våre produkter».

PRODUKTDATA

Produktdata med deklarerte verdier finnes på Norcems hjemmeside www.norcem.no under «Våre produkter».

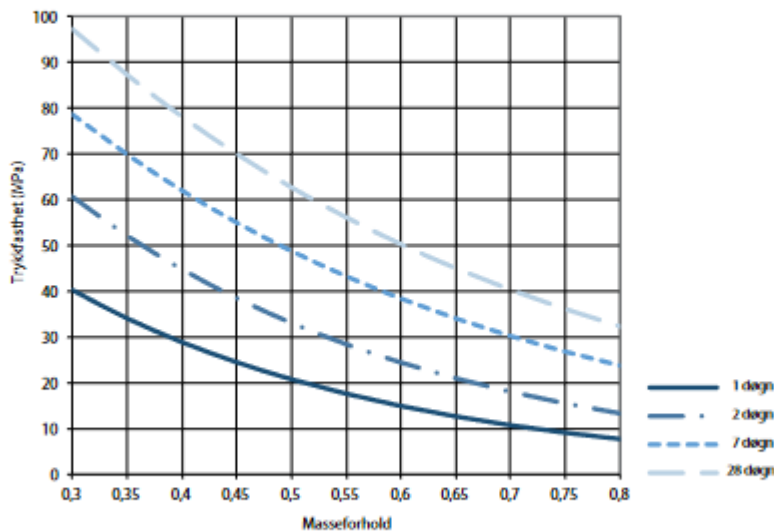
FASTHETSUTVIKLING

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

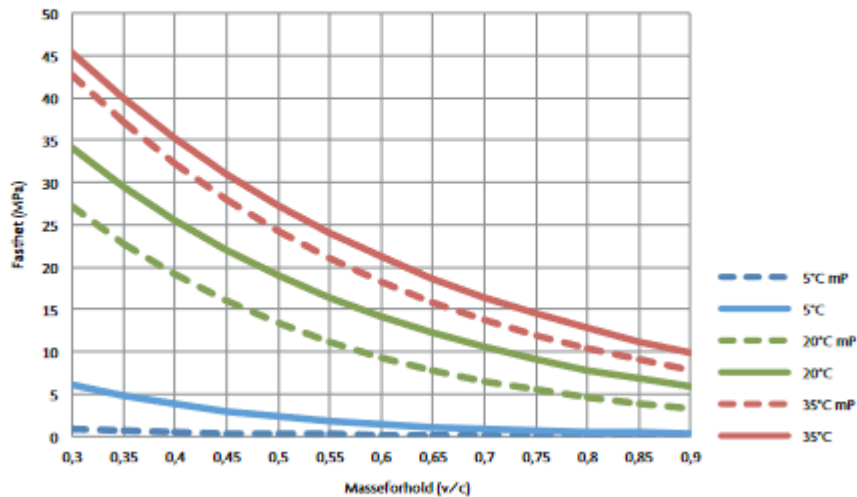
TIDLIGFASTHET

Tidligfastheten i betong er meget avhengig av temperatur og eventuell dosering av tilsetningsstoff med retarderende effekt. I figur 2 er vist trykkfasthet i betong etter 1 døgn med forskjellige masseforhold med og uten plastiserende tilsetningsstoff (1 % Pstoff) med Norcem Anleggsement. Prøvene er vannlagret ved varierende temperatur.

FASTHETSUTVIKLING - fig. 1



TIDLIGFASTHET - fig. 2

**FASTHETSKLASSE – MASSEFORHOLD**

Med normal god styring av betongproduksjonen er det behov for en overhøyde på ca 7 MPa ved de ulike fasthetsklassene for å produsere med tilstrekkelig sikkerhet mot undermålere. Tabell 1

gir følgende retningsgivende verdier for minste og største masseforhold i ulike fasthetsklasser for betong uten luftinnføring og med Norcem Anleggsement.

FASTHETSKLASSE – MASSEFORHOLD				
Fasthetsklasse	B30	B35	B45	B55
Masseforhold minste - største	0.57-0.66	0.50-0.57	0.43-0.50	0.36-0.43

Tabell 1

BESTANDIGHETSKLASSE

NS-EN 206:2013+NA:2014 klassifiserer betongens miljøpåvirkninger i eksponeringsklasser. I nasjonalt tillegg til denne standarden er de ulike eksponeringsklassene gruppert i bestandighetsklasser med krav til betongens største masseforhold (tabell 2). Tabell 3 viser anbefalte kombinasjoner av bestan-

dighet- og fasthetsklasser. I figur 3 er vist sammenhengen mellom bestandighet- og fasthetsklasse, i et variasjonsbelte forårsaket av ulike produksjonsforutsetninger (bl.a. tilslag). Figur 3 gjelder for betong uten luftinnføring med Norcem Anleggsement vannlagret i 20°C i 28 døgn.

VALG AV BESTANDIGHETSKLASSE (NASJONALE KRAV)

Eksponeeringsklasse	M90	M60	M45	MF45*	M40	MF40*
X0	*	*	*	*	*	*
XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		*	*	*	*	*
XD1, XS1, XA1, XA2, XA4			*	*	*	*
XF2, XF3, XF4				*		*
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3					*	*
XSA	Betongsammensetning og beskyttelsestiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstille kravene til M40.					
Største masseforhold	0.90	0.60	0.45	0.45	0.40	0.40

* Spesielle krav, se NS-EN 206:2013+NA:2014

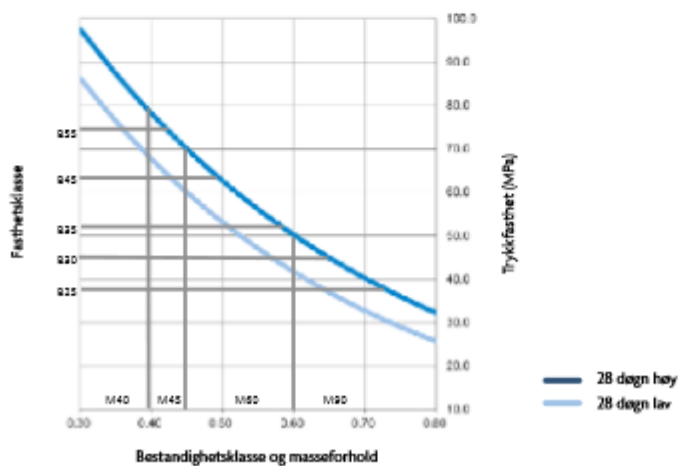
Tabell 2

ANBEFALTE KOMBINASJONER

Bestandighetsklasse	Fasthetsklasse
M60	B30 eller høyere
M45	B45 eller høyere
M40	B55 eller høyere

Tabell 3

BESTANDIGHETSKLASSE - FASTHETSKLASSE - fig. 3



PRODUKTDATABLAD

STANDARDSEMENT FA

CEM II/B-M

SIST REVIDERT AUGUST 2017

Sementen tilfredsstillter kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portland blandingssement CEM II/B-M 42,5 R.

Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m ² /kg)		450	
Spesifikk vekt (kg/dm ³)		3,00 (B) / 2,99 (K)	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnende styrkning (min)		140	≥ 60
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	20	
	2 døgn	31	≥ 20
	7 døgn	42	
	28 døgn	55	≥ 42,5 ≤ 62,5
Sulfat (% SO ₃)		≤ 4,0	≤ 4,0
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,085	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalier (% Na ₂ O _{equiv})		1,4 (B) / 1,5 (K)	
Klinker (%)		78	65-79
Flygeaske (%)		18	21-35
Kalkmel (%)		4	

1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII point 47 krom VI forbindelser.

B = Brevik og K = Kjøpsvik

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, Postboks 142, Lilleaker, 0216 Oslo
Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

Teknisk datablad

Lavvvarmesement

CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na)
Rüdersdorf

Sammensetning:	Slaggsement
Bruk:	Til bruk i betongproduksjon. Elementindustri, ferdigbetong og injeksjon.
Egenskaper:	Lav varme- og herdeutvikling. Lavt CO2 avtrykk.

Tilfredsstill kravene ihht. EN 197-1: CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na)
Produktet er sertifisert (CE-merket) ihht. EN 197-1 av VDZ, Tyskland

Typiske data:

Fysiske data

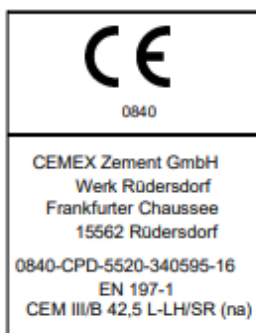
Finhet(blaine)	4700 cm ² /g
Densitet	2,98 g/cm ³
Bulkdensitet	1,1g/cm ³
Andel slagg	Ca 70%
Bindetid	230 min
Ekspansjon	0,3 mm

Trykkfasthet

2d	28 Mpa
7d	36 MPa
28d	58 MPa
56d	64 MPa

Kjemiske data

		vekt %
Kalk	(CaO)	49
Silisium	(SiO ₂)	31
Aluminium	(Al ₂ O ₃)	8,3
Magnesium	(MgO)	6,1
Sulfat	(SO ₃)	2,1
Jern	(Fe ₂ O ₃)	1,6
Kalium	(K ₂ O)	0,6
Natrium	(Na ₂ O)	0,3
Alkali ekv.	(Na ₂ Oekv)	0,79
(C ₂ A)		5,3
Glødetap	(L.O.I)	0,7
Uløselig rest	(i.r)	0,2
Vannløslig klorid	(Cl)	0,05
Vannløslig krom	Cr ^(VI)	< 2 mg/kg



Teknisk spørsmål:

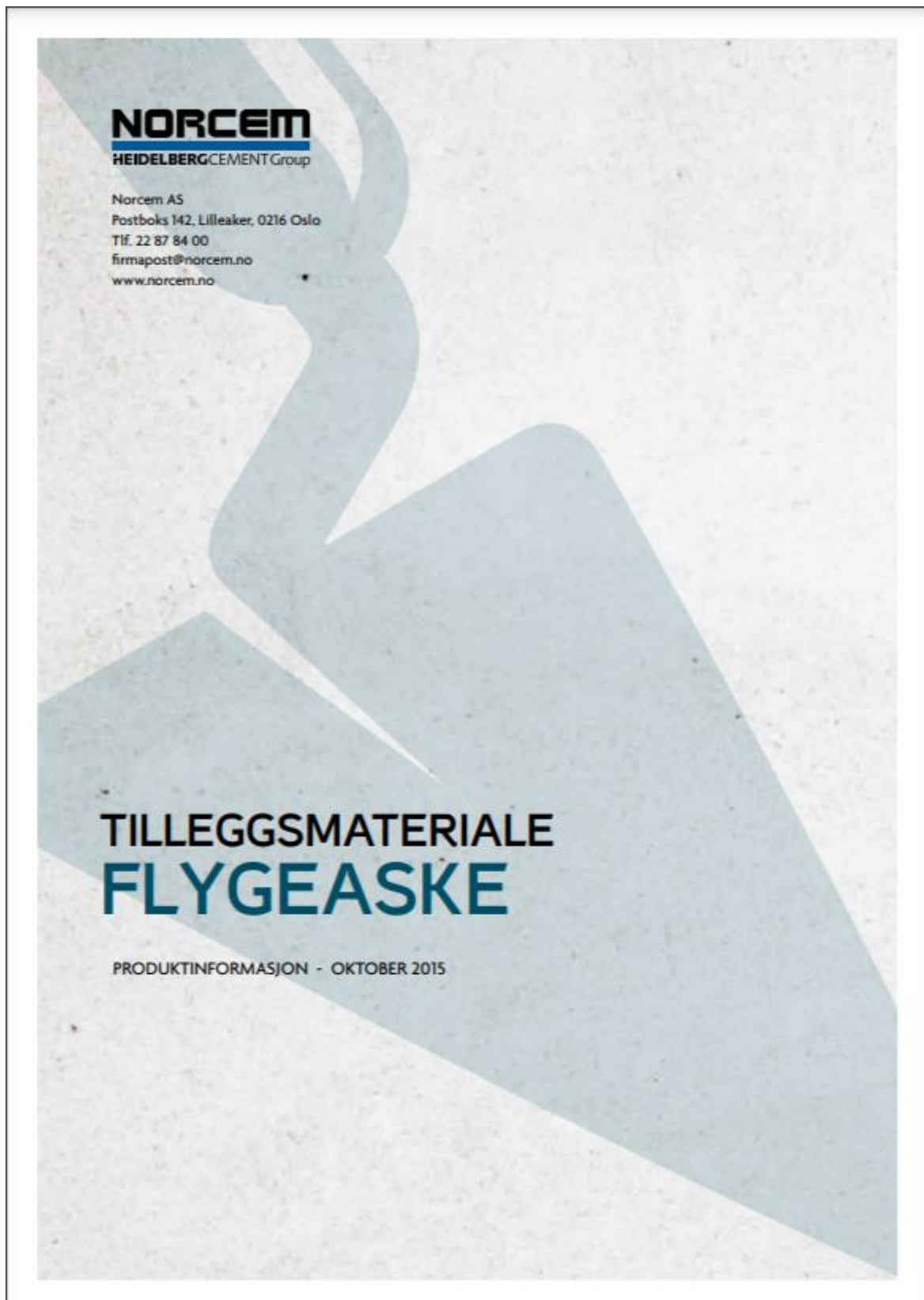
Lars Busterud, tel 908 90 668

- E-Mail lars.busterud@schwenk.no

Versjon August 2019

SCHWENK Norge AS
Grenland 70A, 3045 Drammen
Telefon: +47 31 02 10 11
E-Mail: info@schwenk.no www.schwenk.no

Informasjonen i denne publikasjonen er basert på gjeldende kunnskap og erfaring. De gir en referanseverdi for grunnleggende egnethet og må matches av tester og forsøk av prosessoren til den spesifikke applikasjonen. For dette må de tilsvarende gyldige lover, standarder og retningslinjer samt de generelt anerkjente reglene for byggtøknikk overholdes. Ved publisering av dette tekniske databladet mister tidligere tekniske datablad deres gyldighet. Endringer i rammeproduktet og applikasjonsteknikk utviklingen er reservert. Våre salgs- og leveringsbetingelser i gjeldende versjon gjelder for alle forretningsforbindelser.



Norcem AS ivaretar salg av flygeaske til sement- og betongproduksjon. Flygeasken er sertifisert i overensstemmelse med kravene i NS-EN 450-1, klasse A.

Flygeaske er et bearbejdet restprodukt fra kull brukt i kullkraftverk. Flygeaske er silikatholdig og er et pozzolan som sammen med sement og vann gir en tettere betong. Kombinert med sement har flygeaske vært brukt i Norge siden 80-tallet. Norcem FA-sementer inneholder flygeaske.

DEKLARERTE VERDIER

Flygeasken er sertifisert i overensstemmelse med kravene i NS-EN 450-1:2012, klasse A.

Egenskap	Deklarerte verdier	Krav i henhold til NS-EN 450-1
Glødetap (%)	≤ 5,0	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Klorid (% Cl ⁻)	≤ 0,10	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Sulfat (% SO ₃)	≤ 3,0	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Fritt kalsiumoksid (% fri CaO)	≤ 1,5	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Reaktivt kalsiumoksid (% reaktiv CaO)	≤ 10	Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1
Partikkeldensitet (kg/m ³)	2300	Dekl.verdi +/- 200 kg/m ³
Øvrige kjemiske og fysiske parametere		Tilfredsstiller kravene gitt NS-EN 450-1

