

Wendel Kifle
Sunniva Kulkarni

Effekten av å gjenbruke betongslam i betong

The Effects of Reusing Concrete Slurry in Concrete

Bacheloroppgave i Bygg og miljø
Veileder: Arne Mathias Selberg
Medveileder: Kari Aarstad
Mai 2024

BYGT 2900 Bacheloroppgave bygg

Wendel Kifle
Sunniva Kulkarni

Effekten av å gjenbruke betongslam i betong

The Effects of Reusing Concrete Slurry in Concrete

Bacheloroppgave i Bygg og miljø
Veileder: Arne Mathias Selberg
Medveileder: Kari Aarstad
Mai 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Rapporten er ÅPEN

Problemdefinering og resultatmål

Hensikten med prosjektet er å kunne bidra med å gjøre betongproduksjonen mer bærekraftig. Når gruppen kom i kontakt med Unicon, hadde de allerede en problemstilling de ønsket å se på. 01.01.23 trådte det i kraft en ny forskrift som betongprodusentene må følge. Dette er forskriften mot forurensing fra betongproduksjonen.

Unicon har i dag et avansert renseanlegg for betongtromlene som kommer inn til fabrikken. I dette renseanlegget klarer de å skille ut betongslam, som de ønsker å se om det er mulig å gjenbruke. Det er tenkt å lage ulike blandinger, hvor det byttes ut deler av 0/8 tilslaget med dette slammet. Prosessavløpsvannet som kommer fra renseanlegget, skal også brukes i blandningene. Når gruppen fikk oppgaven ble veileder kontaktet for å sjekke om det var mulig å bruke laben på NTNU, dette ble godkjent.

Det er laget en forsøksmatrise med 9 ulike prøver som skal testes. Etter 28 dager skal trykkfastheten på den herdete betongen også testes. I blandningene skal 10 kg og 50 kg av 0/8 tilslaget byttes ut med tilsvarende mengde slam. Disse skal testes for synk, utbredelse og luftinnhold. Det blir laget tre kuber av hver blanding for å få en vurdering på hvor nøyaktig testing av fasthet er. Det er også tatt med en blanding som er nesten lik original resepten, utenom at det brukes prosessavløpsvann, for å ha noe å sammenligne resultatene med.

Stikkord fra prosjektet:

Betongproduksjon, gjenbruk, laboratorium arbeid, bærekraft, tilslag, slam, trykkfasthet og forskning

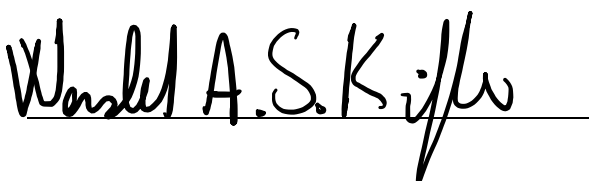
Forord

Denne oppgaven er skrevet av to bachelor studenter ved Instituttet for konstruksjonsteknikk ved NTNU i Trondheim. Oppgaven dekker de siste 20 studiepoengene i studieløpet og gjennomføres våren 2024, med forarbeid høsten 2023.

Høsten 2023 begynte gruppen å kontakte ulike bedrifter for å finne en samarbeidspartner. Begge studentene hadde en interesse for betong og det var derfor mest aktuelt å kontakte bedrifter som arbeidet innenfor dette feltet. Gruppen kom i kontakt med Unicon, som allerede hadde en problemstilling som kunne være aktuell. Denne synes gruppen var interessant og valgte derfor å gå videre med dette. Oppgaven åpnet for en mulighet til å bli bedre kjent med betongteknologi og en dypere forståelse av betongmaterialet.

Vi ønsker å rette en stor takk til vår intern veileder Arne Mathias Selberg, universitetslektor ved Institutt for konstruksjonsteknikk, for oppmuntring og veiledning gjennom oppgaven. Det er også en stor takk til dem på betonglaben på NTNU, som lot oss bruke utstyret de hadde tilgjengelig i begynnelsen av semesteret. Det er en spesiell takk til Kåre Brottveit Olsby for bistand under og etter lab arbeidet. Vi ønsker også å takke vår eksterne veileder Kari Aarstad for alle møtene og hjelpen underveis. Til slutt takker vi alle forelesere som har hjulpet oss på veien gjennom møter med veiledning og mailer, og som har gitt oss tilgang til fagpensum.

Trondheim, 21.05.24



Wendel Abeba Sagen Kifle



Sunniva Kulkarni

Sammendrag

I dag produseres det store mengder av betong i verden på grunn av at betong er et av de mest brukte materialene i bygge industrien. Produksjonen av betong produserer store mengder avfall og er lite bærekraftig. Et avfallsprodukt som blir produsert, er filterkaker av betongslam fra rengjøring av betongtromler. I denne prosessen blir det også produsert prosessavløpsvann. I dag blir disse kakene sendt til deponering. For å gå i retning av en mer bærekraftig fremtid, er det relevant å undersøke om disse kan gjenbrukes. Denne studien undersøker muligheten for å erstatte sand med betongslam, samt effekten ulike erstatningsgrader har på kvaliteten til betongen.

En av de viktigste egenskapene for en god betong er at den skal være lett å støpe på byggeplassen, samtidig som den opprettholder tilstrekkelig styrke. Det er blitt laget to ulike blandinger hvor henholdsvis 10 kg sand og 50 kg sand er erstattet med tilsvarende mengde slam, i tillegg til en referanse blanding uten slam. I alle blandinger ble det brukt prosessavløpsvann som blandevann. For å måle støpeligheten til den ferske betongen, ble det utført tester av synkmål, utbredelse og luftinnhold. Styrken ble målt gjennom en trykkfasthetstest.

Resultatene viser at små mengder betongslam har en minimal effekt på støpeligheten og styrken til betongen. Ved større mengder slam ble det observert at både støpeligheten og styrken var noe redusert. For å kunne erstatte større mengder sand er det essensielt å utvikle en bedre metode for å bestemme det absorberte fuktinnholdet til betongslammet. Videre forskning er nødvendig for å fastslå den optimale erstatningsgraden. Bruken av betongslam i betong er fortsatt et nytt forskningsområde, og denne oppgaven danner et godt grunnlag for videre studier.

Abstract

Large quantities of concrete are manufactured worldwide due to the widespread use of the material in the construction industry. The production of concrete generates a large amount of waste and is not sustainable. Some of the waste produced is filter cakes of concrete slurry from the concrete mixers, in addition to the process wastewater. Currently, these cakes are sent to disposal. To move towards a more sustainable future, it is relevant to investigate whether this waste can be reused. This study explores the opportunities of using concrete slurry as a substitute for the sand, and the effect of varying degree of substitution on the quality of concrete

Key aspects of good concrete is that it should be easy to cast on the construction site, while also having a sufficient strength. Two different mixtures were prepared where 10 kg sand and 50 kg sand is exchanged with the equivalent amount of slurry, in addition to the reference 0 kg substitution. It has been used process wastewater in all the mixtures. The workability of the concrete is measured through slump test, spread test and air content test. A compressive strength test is conducted to measure strength.

It was found that small amounts of slurry have minimal impact on the workability and strength of the concrete. With larger substitution the workability is somewhat reduced. There is also a negative impact on strength. To replace larger quantities of slurry, it is essential to develop a better method to determine the absorbed moisture content of the concrete slurry. More work is needed to draw definitive conclusions on optimum substitution level. Reusing of concrete slurry is still a novel concept, and this study is a great foundation for future research.

Innholdsfortegnelse

Problemdefinerings og resultatmål	I
Forord	II
Sammendrag	III
Abstract	IV
Innholdsfortegnelse	V
Figurliste.....	VIII
Tabelliste.....	IX
Begrepsforklaring.....	X
1 Innledning	11
1.1 Oppgavebeskrivelse.....	11
1.2 Avgrensninger	11
1.3 Disposisjon.....	12
2 Bakgrunn for problemstilling	13
2.1 Forskrift.....	13
2.2 Problemer knyttet til deponering.....	13
3 Teori	14
3.1 Hydratisering.....	14
3.2 Materialer.....	15
3.2.1 Sement	15
3.2.2 Pozzolaner	15
3.2.3 Silikastøv	15
3.2.4 Superplastiserende stoff.....	16
3.2.5 Tilslag	16
3.2.6 Vann.....	18
3.3 Porøsitet	19
3.4 Slam	19
3.4.1 Slemmeanalyse	21
3.5 Proporsjonering	21
3.5.1 Matriksfase	22
3.5.2 Partikkelfase	23
3.5.3 Partikkel- vs matriksdominant.....	23
3.6 Støpeligheit.....	24
4 Metode.....	25
4.1 Forsøksmatrise	25

4.2	<i>Fuktinnhold - tilslag og slam</i>	25
4.3	<i>Valg av materialer</i>	26
4.3.1	Sement	26
4.3.2	Silika.....	26
4.3.3	Tilslag	26
4.3.4	Superplastiserende stoff.....	26
4.3.5	Blandevann	27
4.4	<i>Proporsjonering</i>	27
4.5	<i>Slam</i>	31
4.5.1	Behandling av slam	31
4.5.2	Slemmeanalyse	32
4.6	<i>Blanding av betong</i>	33
4.7	<i>Tester på fersk betong</i>	35
4.7.1	Synk.....	35
4.7.2	Utbredelse.....	36
4.7.3	Luftinnhold	36
4.7.4	Densitet.....	37
4.8	<i>Støping og herding</i>	37
4.9	<i>Trykkfasthet på herdet betong</i>	38
5	Resultater	39
5.1	<i>Densitet</i>	39
5.1.1	Fersk betong	39
5.1.2	Herdet betong	39
5.2	<i>Slam</i>	40
5.2.1	Fuktinnhold slam	40
5.2.2	Slemmeanalyse	40
5.3	<i>Resultater på fersk betong</i>	41
5.3.1	Synk.....	41
5.3.2	Utbredelse.....	41
5.3.3	Luftinnhold	41
5.4	<i>Resultater trykkfasthet</i>	42
6	Diskusjon	43
6.1	<i>Slam</i>	43
6.1.1	Vann i slam.....	44
6.2	<i>Diskusjon av resultater for fersk betong</i>	45
6.2.1	Synk.....	45
6.2.2	Utbredelse.....	45
6.2.3	Luftinnhold	46
6.3	<i>Diskusjon av målt densitet</i>	47
6.4	<i>Diskusjon av resultater for trykkfasthet</i>	47
6.5	<i>Begrensninger og videre forskning</i>	49
7	Konklusjon	50

8	Bibliografi	51
9	Vedlegg	54

Figurliste

Figur 1: Flytmotstand mot filler sitt overflateareal [10, s. 4-33].....	17
Figur 2: Sammenheng flytmotstand og v/b-tall [10, s. 4-11].	18
Figur 3: Siktkurve slam	20
Figur 4: Eksempel på forhold mellom sement, trykkfasthet og masseforhold [8].....	22
Figur 5: Forhold mellom matriksvolum og synk [18].....	23
Figur 6: Fiktiv siktekurve slam	28
Figur 7: Riktig siktekurve slam.....	28
Figur 8: Sammensatt tilslag - blanding 2	28
Figur 9: Matriks ark.....	29
Figur 10: Vektfordeling – blanding 2.....	30
Figur 11: Slam før tørking.....	31
Figur 12: Utstyr brukt til behandling av slam	32
Figur 13: Slam etter knusing	32
Figur 14: 45L betongblander.....	34
Figur 15: Komprimering av blanding.....	35
Figur 16: Måling av synk	35
Figur 17: Måling av utbredelse	36
Figur 18: Trykkmåler	37
Figur 19: Betongen når den skulle avformes	38
Figur 20: Tilfredsstillende bruddformer.....	38
Figur 21: Siktekurve - test 1	40
Figur 22: Diagram for trykkfasthet	42

Tabelliste

Tabell 1: Sement kjemiske formler	14
Tabell 2: Siktgjennomgang slam.....	20
Tabell 3: Forsøksmatrise	25
Tabell 4: Fremgangsmåte for blanding av betong.....	34
Tabell 5: Mengde superplastiserende i blanding.....	35
Tabell 6: Densitet på fersk betong.....	39
Tabell 7: Målt densitet.....	39
Tabell 8: Resultater synkmål.....	41
Tabell 9: Resultater utbredelse	41
Tabell 10: Resultater luftinnhold.....	41
Tabell 11: Resultater trykkfasthet	42

Begrepsforklaring

C-H-S	Kalsiumsilikathydrat
CH	Kalsiumhydroksid
Filler	Partikler < 0,063 mm
Finstoff	Partikler < 0,125 mm
Lab	Laboratorium
S	Silisiumoksid
SP	Superplastiserende
v/b - tall	Vann/ binder

1 Innledning

Bygge bransjen bidrar til store mengder avfall i dagens samfunn. Nye regler og forskrifter, som stadig retter seg mot en mer bærekraftig fremtid, gjør at bedriftene er nødt til å omstille seg for en mer bærekraftig og gjenbrukbar industri. I 2023 kom det en ny forskrift som krever at betongbedrifter endrer måten de håndterer avfallet på. I dag er det både dyrt og upraktisk måten betongavfall håndteres. Det er derfor aktuelt å finne en alternativ måte å håndtere dette avfallet på.

1.1 Oppgavebeskrivelse

Hensikten med oppgaven er å se hvilke effekter betongslam har på betongens egenskaper. For å vurdere om det er aktuelt å gjenbruke slammet, er det derfor viktig å gjennomføre ulike forsøk hvor slammet blir benyttet. I oppgaven er det valgt å ha fokus på hvordan slammet påvirker egenskaper som støpelighet og styrke. Det er derfor valgt å gjøre tester som synk, utbredelse, luftinnhold og trykkfasthet. I blandingene er det også brukt prosessavløpsvann som blandevann.

Med dette som utgangspunkt, er det valgt å lage tre ulike blandinger i dette forsøket. Det er to referanser hvor 10 kg sand og 50 kg sand er byttet ut med tilsvarende mengder slam, i tillegg til kontroll referansen uten tilsatt slam. Det er også laget en forsøksmatrise i forkant av testene, hvor det er beregnet tre prøvelegemer per blanding. Dette gir totalt ni ulike prøvelegemer som skal testes for trykkfasthet. Ved proporsjonering av betong er det gjort ulike antagelser for verdier på slammet som vil bli begrunnet gjennom teksten.

Slammet er hentet fra Unicon sin fabrikk i Trondheim og bedriften har gjennomført tester på både prosessavløpsvann og betongslam for å sjekke om det opprettholder standard krav. Gruppen har også gjennomført tester for å få svar på problemstillinger som har kommet underveis i oppgaven.

1.2 Avgrensninger

- **Tidsbegrensninger:** I begynnelsen av året, var det begrenset med tid før gruppen skulle gjennomføre laboratorium (lab) arbeid. Betongen trenger 28 dager på å herde, og det var derfor viktig at betongen ble støpt tidlig slik at prøvelegemene kunne testes en uke før påskeferien. Mye forberedelser til lab gjorde at det ble begrenset med tid til

å tilegne seg fagkunnskap før proporsjonering og lab arbeid. Tidsbegrensning har ført til innsnevring i oppgaven, og gruppen ble derfor nødt til å begrense antall prøvelegemer og tester som skal gjennomføres.

- **Betongteknologi:** Studentene har ikke hatt faget betongteknologi tidligere, og mye av teorien i oppgaven blir presentert i dette faget. Det var derfor begrenset med bakgrunnskunnskaper og det måtte brukes mer tid på å tilegne seg ny kunnskap.
- **Tidligere forskning:** Dette er et relativt nytt tema, ettersom forskriften kom for to år siden. Det finnes forskning på liknende temaer, men det er lite til ingen artikler som tar for seg hvordan slam påvirker betong. Dette gjør at det var begrenset med tidligere artikler å sammenligne resultat med.

1.3 Disposisjon

Oppgaven er delt opp i fire hoveddeler. Første del tar for seg teorien for oppgaven. Her blir det presentert fakta om temaet og ulike faktorer som kan påvirke betongen. Teorien var en viktig del da den presenterer mye av forkunnskapen gruppen har tilegnet seg gjennom prosjektet. Etter dette kommer metode, som forteller hva gruppen har gjort i perioden. Her er det presentert fremgangsmåter og ulike standarder som er brukt for å gjennomføre tester og kvalitetssikring. Den tredje delen består av resultater, som presenteres i ulike tabeller og figurer. Til slutt blir diskusjonen presentert hvor gruppen knytter teori mot resultater og drøfter ulike feilkilder som har oppstått underveis.

2 Bakgrunn for problemstilling

2.1 Forskrift

I 2021 ble det registrert 1,2 millioner tonn betong- og teglavfall [14]. På bakgrunn av dette har klima- og miljødepartementet foretatt en endring i forskriften om forurensing, hvor de har lagt til kapittel 33 «Forurensing fra produksjon av fabrikkbetong, betongvarer og betongelementer». Endringen er blitt gjort for å begrense avfall fra betongproduksjonen. Det nye kapittelet tredde i kraft fra 01.01.23. I forskriften er det laget definisjoner for ulike begreper:

Betongslam: avfall generert i forbindelse med rengjøring av renseanlegg for prosessavløpsvann.

Prosessavløpsvann: alt vann som oppstår som følge av driften, som spylevann, vaskevann, avrenning fra slam, inkludert overvann som er forurenset med komponenter fra andre kilder, og som føres ut sammen med prosessavløpsvannet [5].

Forskriften gir strengere krav til hvordan en bedrift skal håndtere avfall fra produksjon, samt utslipp av farlige miljøstoffer. I §33-4 stilles det for eksempel krav til vannforbruk og §33-13 forteller om gjenvinning av betongavfall [5]. Dette gjør at dagens betongbedrifter er nødt til å finne metoder for å håndtere avfallet.

2.2 Problemer knyttet til deponering

I dag blir mye av betongavfallet sendt til deponering, men den nye forskriften krever at betongprodusenter gjenbraker så mye av avfallet som mulig. Etter teams møte med Kari Aarstad fra Unicon, ble gruppen informert om at Unicon produserer 2-4 tonn betongslam i uken på en middels stor betongfabrikk. I dag ligger prisen for å deponere disse filterkakene på rundt 200-500 kr/tonn. Pris avhenger av om innholdet i materialet overstiger grenseverdiene i forskriften. I tillegg til at det er dyrt å deponere slammet, koster det også med oppbevaring og transport av slammet til ulike deponi. Dette gjør at det er blitt svært dyrt å deponere filterkakene, og det trengs derfor å finne en alternativ løsning for hvordan dette avfallet skal håndteres. Deponi er heller ikke gunstig med tanke på at det bygges opp store lager med et produkt ingen ønsker å bruke.

3 Teori

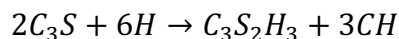
3.1 Hydratisering

Reaksjonen mellom sement og vann kalles hydratisering. Denne reaksjonen skaper sementlimet som binder sammen tilslaget og er viktig for betongens mekaniske styrke og fasthet. I sementkjemien blir det brukt enkelt bokstaver for oksider [10, s. 5-6]. I tabellen under kan du se hva de ulike bokstavene betyr.

Kjemi	Sement kjemi
CaO	C
H ₂ O	H
SiO ₂	S
Ca(OH) ₂	CH

Tabell 1: *Sement kjemiske formler*

Under hydratiseringen blir vann kjemisk bundet med kalsiumsilikatene fra sementen, og det dannes kalsiumsilikathydrat (C-S-H) og kalsiumhydroksid (CH). C-S-H er det viktigste reaksjonsproduktet og i formelen under viser et eksempel på en hydratiseringsprosess med trikalsiumsilikat (C₃S) [10, s. 6-6].



Formel 1: *Hydratiseringsprosess med trikalsiumsilikat*

Ved fullstendig hydratisering består 70 % av sementpasta blandingen av C-S-H [10, s. 6-13]. C-S-H danner en gel lignende struktur sammensatt av nål- og platepartikler med størrelsesorden helt ned til nanometer. Disse nål- og platepartiklene fester seg på overflaten av sementkornene. Etter hvert som det dannes mer reaksjonsprodukt, bindes gel strukturen sammen og danner en mikrostruktur som binder sementkornene sammen.

Hydratiseringstiden blir påvirket av kjemisk inerte finstoffer. Finstoff defineres som materialer under 0,125 mm. Finstoffene har et betydelig større overflateareal, som gir økt reaksjonsområde for hydratiseringen. Dette kalles for en filler-effekt. Resultatet av dette kan bli en noe akselerert hydratiseringsprosess. Økningen i reaksjonsområde medfører også større bindingsområde for C-S-H partiklene å feste seg [11].

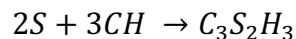
3.2 Materialer

3.2.1 Sement

Sement er et materiale som ved reaksjon med vann herder og får bindende egenskaper. Den sementen det blir brukt mest av i verden er portlandsement [22]. Ifølge NS-EN 197 tilhører sementer som består av 95-100% portlandsementklinker og 0-5% sekundære bestanddeler denne kategorien. Disse blir betegnet som CEM I i NS-EN 197. CEM II Portland-komposit sement er portlandsementer hvor inntil 35% av massen kan være andre materialer enn klinker og sekundære bestanddeler [13, s. 87].

3.2.2 Pozzolaner

Pozzolaner er fellesbetegnelsen på tilsetningsmaterialer som ved reaksjon med kalsiumhydroksid (CH) og vann danner produkter med bindende egenskaper [21]. Den pozzolane reaksjonen danner kalsiumsilikathydrat (C-S-H), som primært bidrar til styrken i sementpastaen. Samtidig forbruker reaksjonen kalsiumhydroksid, som bidrar svært lite til styrken [13, s. 94]. Dette fører til mer effektiv bruk av sement.



Formel 2: Pozzolan reaksjon [10, s. 7-3]

I tillegg til den kjemiske effekten vil pozzolaner ha en fysisk filler effekt på betong [15]. De fine kornene fyller ut hulrommet mellom sement og de finere partiklene fra tilslaget. Dette øker tettheten til betongen samt øker betongens styrke. Denne egenskapen er avhengig av størrelse, form og kvalitet på tilsetningsmateriale.

3.2.3 Silikastøv

Silikastøv er et pozzolansk tilsetningsmateriale som gir flere positive effekter på betong. Det er et biprodukt ved produksjon av silisium- og ferrosilisiummetall [13, s. 45]. Støvet har et høyt innhold av silisiumoksid (S), har en amorf struktur og sfærisk form og har en partikkelstørrelse fra 0,1 til 0,2 μm . Disse egenskapene gjør at silikastøv gir en effektiv pozzolanreaksjon. Dette danner mer C-S-H, som øker mengden fine gelporer. Dette forbedrer betongens porestruktur og kan dermed gi økt styrke og bestandighet [10, s. 8-9].

Silikastøvet overflateareal påvirker egenskapene til den ferske betongen. På grunn av det store overflatearealet benyttes ofte silikastøv sammen med vannreducerende tilsetningsstoff. Dette er for å dispergere partiklene og for å kompensere for det økte vannbehovet som følge

av økt overflateareal. Det store overflatearealet fører til økt kohesjon i betongen, som virker stabiliserende og reduserer separasjon [12]. Generelt krever silikastøv en økning i synkmål på 20-30 mm for å oppnå samme støpelighet som betong uten silikastøv.

K-faktoren i formelen under beskriver hvor mye sement som kan erstattes av tilsetningsmateriale uten at det går på bekostning av egenskapene til betongen. Den finnes ved testing av forskjellige doseringer og forskjellige v/b-tall. V/b – tall er forholdet mellom vann og binder, og kan også refereres til som masseforhold. K-faktoren inkluderes i masseforholdet.

$$m = \frac{w}{c + k * p}$$

Formel 3: Masseforhold

3.2.4 Superplastiserende stoff

Superplastiserende (SP) stoff er et tilsetningsstoff som er med på å forbedre egenskapene til den ferske betongen. I NS-EN 934-2 blir det definert som et tilsetningsstoff som gjør det mulig å redusere vanninnholdet uten å påvirke konsistensen. Det gjør det også mulig å øke synkmålet uten at det trengs å tilsette mer vann.

Dynamon SR-N fra Mapei er et SP-stoff som er basert på akrylbaserte polymerer. SP-stoff basert på akrylbaserte- og andre co-polymerer fungerer på den måten at polymerkjeder binder seg til sementkornene og dispergerer dem slik at de ikke flokkulerer seg sammen. Dette reduserer friksjonen mellom partiklene og gjør det lettere for dem å gli. For mye SP-stoff kan føre til separasjon, det er derfor laget en veileder i NS-EN 206 – 5.2.6 hvor det stilles krav til doseringsmengde.

3.2.5 Tilslag

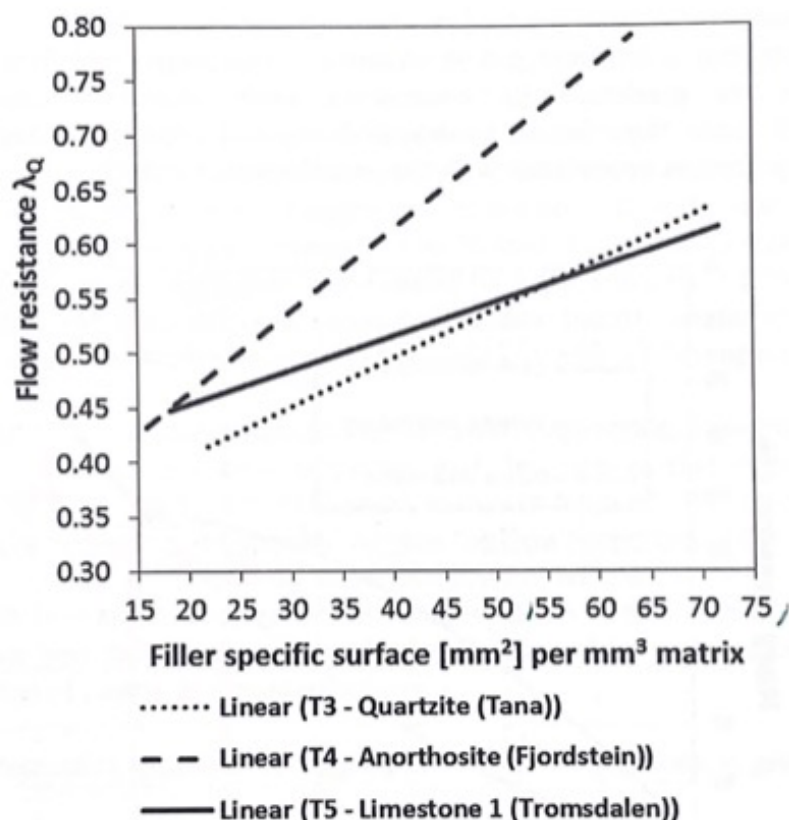
Tilslaget opptar 65 % til 75 % av betong volumet, dermed er det naturlig at tilslagets egenskaper har innflytelse på betongens kvalitet [10, s. 9-11]. I Norge skilles det mellom fint tilslag med gradering 0-8 mm som blir referert til som sand, og grovt tilslag gradert fra 8 mm og større som blir referert til som stein. Gradering er partikkelfordelingen innenfor dette område.

For sanden vil en kornfordelingskurve som er nesten rett og lineær være ønskelig i de fleste betonger [10, s. 9-12]. Da vil det være en god fordeling av partikler med ulike størrelser, hvor mindre partikler fyller hulrommet mellom større partikler. Dette vil føre til bedre pakning.

Pakning vil si den relative tettheten av partikler innenfor et gitt volum [10, s. 9-14]. Bedre pakning betyr at det er mindre hulrom mellom tilslags partiklene.

Egenskapene til tilslaget som påvirker støpeligheten til fersk betong, er i størst grad kornfordelingskurven og kornform [10, s. 9-12]. Runde og kubiske korn fører til bedre pakning og mindre hulrom, imens avlange og flisige korn fører til dårligere pakning og større hulrom.

Partiklene mindre enn 0,063 mm kalles for fillers. De har egenskaper som øker partikkelpakking i sementpastaen, reduserer hulrom og øker tettheten. Dette er faktorer som kan gjøre betongen sterkere. Overflateareal er omvendt proporsjonalt med partikkelstørrelsen, og en økt andel fillers vil dermed føre til økt vannbehov på grunn av det økte overflatearealet. Fillers øker flytmotstand som vist i Figur 1. Videre kan fillers senke interpartikkelfriksjon og øke betongens stabilitet. Fillers kan også en positiv effekt på overgangssonen mellom tilslaget og bindemiddelet, ved å bidra til en tettere mikrostruktur [4][7].



Figur 1: Flytmotstand mot filler sitt overflateareal [10, s. 4-33].

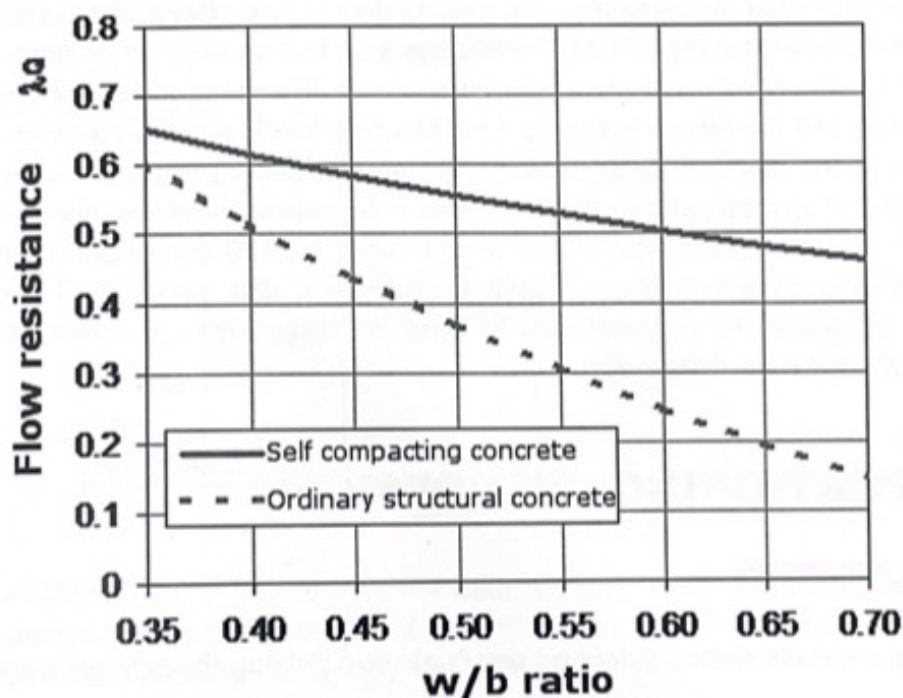
I herdet betongen påvirker styrken til tilslaget i noen grad betongens totale styrke, men normalt sett er det sementpastaen som begrenser fastheten [13, s.137]. Omfanget er avhengig

av styrkeklassen til betongen. En annen viktig faktor for betongens styrke er heft mellom sementpastaen og tilslaget. Dersom det dannes et lag av leire på overflaten til tilslaget, kan dette redusere heften og dermed styrken til betongen [10, s. 9-20].

Absorbert vann til tilslaget er en viktig parameter som påvirker vannbehovet til betongen, og kan ha en sekundær effekt på styrke og støpelighet. Begrepet «absorbert vann» vil si det vannet som finnes i porene i tilslaget, som er bundet til tilslaget og ikke regnes med i v/b-tallet [13, s.163].

3.2.6 Vann

Vanninnholdet i betong spiller en stor rolle for både egenskaper til fersk og herdet betong. Spesielt forholdet mellom vann og sement, uttrykt som v/b-tallet, utgjør en forskjell på dette. Redusert v/b-tall gir høyere styrke, så lenge det er produsert nok hydrater til å binde uhydrert sement, se eksempel på Figur 4. Et større v/b-tall vil derimot gi mer porøse og svakere betonger [10, s. 8-9]. Redusert v/b-tall kan øke stabiliteten i betong, men dette gir en blanding med høyere flytmotstand, og dermed mindre mobilitet. Sammenhengen mellom v/b-tall og flytmotstand er illustrert under.



Figur 2: Sammenheng flytmotstand og v/b-tall [10, s. 4-11].

3.3 Porøsitet

Hydratiseringsreaksjonen resulterer i dannelsen av porer i sementpastaen. Disse porene har stor innvirkning på betongens styrke og tetthet. Porestrukturen består hovedsakelig av gelporer og kapillærporer [3]. Gelporene er de svært små hulrommene mellom de faste C-S-H partiklene, med en størrelse rundt 2 nm [10, s. 8-8]. Kapillærporene utgjør derimot volumet mellom sementpartiklene som ikke blir fylt av hydratiseringsprodukter, med en størrelse fra 4 til 1000 nm [10, s. 8-8]. Det blir også dannet kontraksjonsporer som resultat av det kjemiske svinnet som forekommer av hydratiseringen. Disse betegnes også som kapillærporer [13, s. 58].

Størrelsen på porene bestemmer deres effekt på styrken til betongen. Gelporene sin effekt på styrke kan neglisjeres, ettersom størrelsen er minimal [3]. Kapillærporene derimot har en betydelig innvirkning på styrken til matriksen, og dermed betongen. Om kapillærporene blir for store og kontinuerlige, vil dette ha en negativ effekt på styrke og bestandighet.

Den totale porøsiteten har en sammenheng med hydratiseringsgrad. Hydratiseringsgrad vil si den prosentvise andelen portlandklinker som har reagert med vann [6]. Når hydratiseringsgraden øker, vil det dannes mer hydratiseringsprodukt. Dette produktet tar da opp en større andel av blandingsvolumet og danner en tettere porestruktur, som reduserer volumet av kapillærporer [13, s. 61].

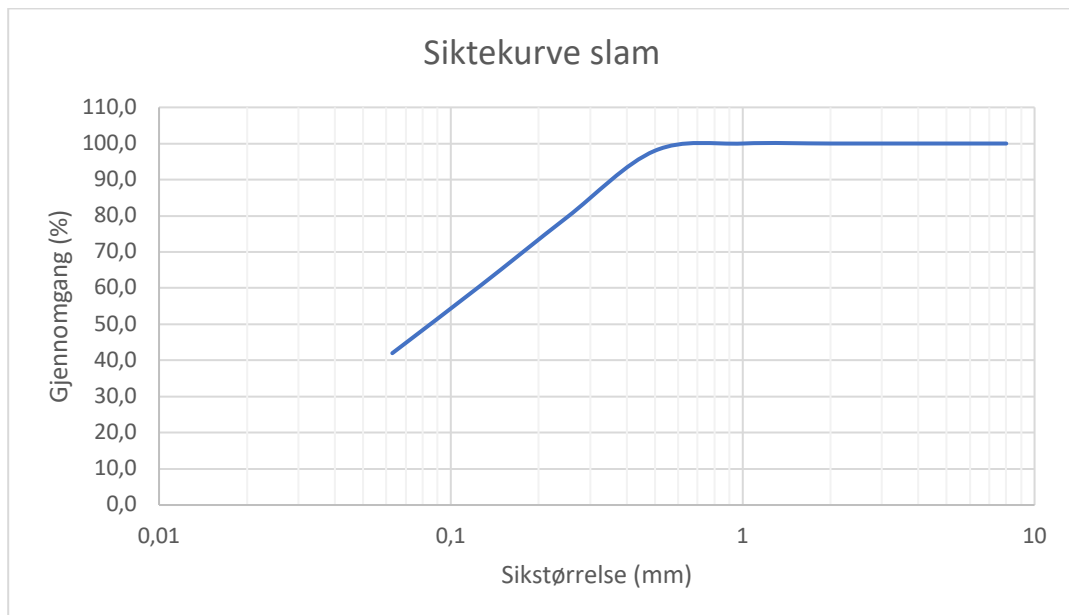
Volumet av kapillærporer avhenger også av v/b-tallet. Når v/b-tallet øker, vil volumet av disse porene også øke [10, s. 8-8]. Dette skyldes overskuddet av vann som ikke reagerer med sement, som danner kapillærporer.

3.4 Slam

Når betongbilene ankommer fabrikken, benyttes en vasketrommel for rengjøring av betongtromlene. Under denne rengjøringsprosessen blir partikler større en 0,2 mm skilt ut [2]. De finere partiklene forblir i vannet, og blir deretter overført til en filterpresse. I filterpressen skilles store deler av vannet fra partiklene. Filterkakene som kommer ut av pressen blir videre referert til som betongslam eller slam. Bedriften har gjennomført diverse analyser av slammet, det vil bli tatt utgangspunkt i verdiene fra analysene i Oslo. En av analysene som er gjennomført er en siktanalyse, som en kan se i figuren under.

Siktstørrelse (mm)	Gjennomgang (%)
8	100
4	100
2	100
1	100
0,5	99,2
0,25	79,6
0,125	60,4
0,063	42,0

Tabell 2: Siktgjennomgang slam



Figur 3: Siktekurve slam

Bedriften har også gjennomført en XRF analyse på den samme prøven. Ettersom slammet er rester av tidligere betongblandinger fra betongtromlene, er det viktig å få oversikt over hva slammet består av. En XRF analyse er en analyse som forteller noe om hvilke og hvor mye av ulike mineraler og grunnstoffer en prøve inneholder [17]. Da kan man finne ut om slammet inneholder stoffer som kan være med å ha en kjemisk virkning på betongen, men også om slammet er innenfor kravene i kapittel 14 a-4 «Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall – Betong og tegl fra riveprosjekter» [1]. Dette har bedriften testet, og slammet er innenfor kravene som står i forskriften.

3.4.1 Slemmeanalyse

En slemmeanalyse gjennomføres for å finne kornstørrelser under 0,063 mm i en jordprøve med vesentlig mye finstoff [19]. For å gjennomføre testen brukes det et hydrometer for å lese av densiteten på vannet. Et hydrometer er et måleinstrument, som brukes for å måle forholdet mellom densiteten til væsken som er blandet og densiteten til rent vann [16].

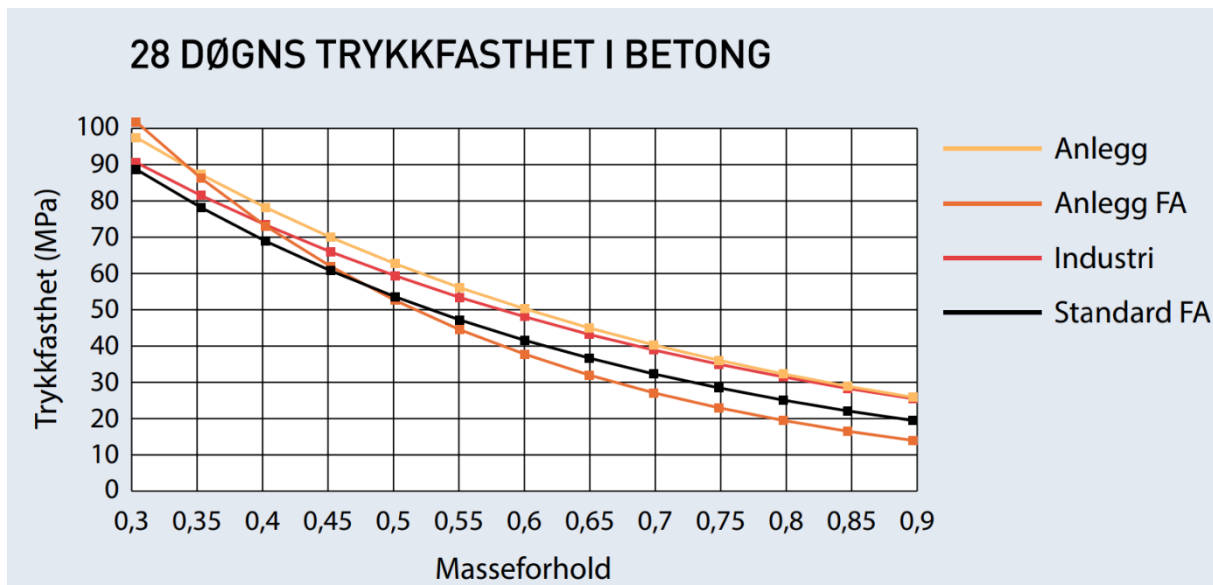
Slemmeanalysen er basert på Stokes lov [19]. Stokes lov beskriver hvordan partikler blir dratt ned i en væske, og at større partikler synker forttere enn mindre partikler [20]. Med avlesningene kan man deretter regne på graderingen til massen og få verdier ned til 1 mikrometer [19]. Når partikkelfordelingen er funnet er det også mulig å regne på overflatearealet til massen. I en masse med mye finstoff kan overflatearealet spille en vesentlig rolle for egenskapene til blandingen.

3.5 Proporsjonering

Når betong blir proporsjonert, er målet å utvikle en kombinasjon av materialer som gir de beste mulige egenskapene for tilegnet bruk [10, s. 4-12]. De ulike materialene har ulike egenskaper de gir betongen. Ved valg av mengde og materialer kan en til en viss grad kontrollere hvilken kvalitet betongen får. Proporsjonering av betong handler ikke bare om egenskapene til betongen, men det er også viktig å tenke på bruk av materialer i forhold til økonomi.

Valg av sement spiller en viktig rolle for å oppnå ulike trykkfasthetsklasser. Grunnen til at sementen spiller en vesentlig rolle for trykkfastheten er fordi sementlimen er det svakeste leddet i matrikssammensetningen [13, s.156]. Hvilken trykkfasthet sementen er beregnet til finner man informasjon om i databladene til produktet.

Ved å velge styrke og bestandighetsklasse, kan man deretter finne hvilket masseforhold man burde bruke. Masseforholdet forteller om forholdet mellom vann, sement og eventuelle tilsetningsstoffer [13, s.13]. Det er en sammenheng mellom valg av masseforhold, sementtype og trykkfasthet, dette er illustrert i figuren under. Her kan man da lese av en verdi for masseforholdet som vil passe til valgt type sement og ønsket trykkfasthet. Det er også mulig å finne en verdi for masseforholdet ved å se på valgt eksponeringsklasse. I standard NS-EN 206, tabell NA.12, finner man anbefalt masseforhold etter valgt eksponeringsklasse og type sement. Etter man har fått to verdier for maks masseforhold, skal man velge den verdien som er lavest slik at man opprettholder begge kravene.



Figur 4: Eksempel på forhold mellom sement, trykkfasthet og masseforhold [8]

Alle tilslag har en porøsitet som vil fylle seg med vann [13, s.163]. Det er derfor vesentlig å skille mellom fritt og absorbert vann. Fritt vann er det vannet som vil brukes i blandingen til sementen og være til stede i matriksen. Det vannet som blir trukket inn i porene regnes som absorbert vann, og vil derfor ikke regnes med i matriksfasen.

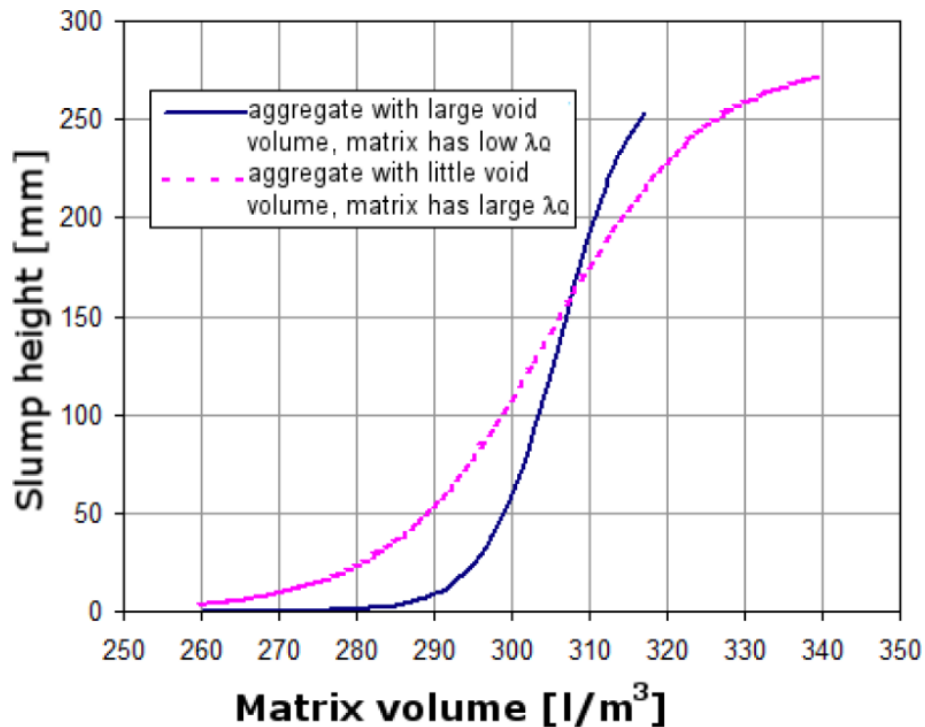
Ved blanding av betong er det flere komponenter som påvirker materialets egenskaper. Det er derfor delt opp i partikkel- og matriksfase, dette kalles partikkel – matriksmodellen. Det er delt i to faser etter hvilke egenskaper materialene gir til blandingen [13, s.143]. Matriksfasen består av finstoffer, dette vil si materialer finere enn 0,125 mm. Dette er materialer som sement, vann, tilsetningsstoffer, pozzolane materialer og tilslag finere enn 0,125 mm [10, s. 4-3]. Partikkel fasen består av tilslag større en 0,125 mm.

3.5.1 Matriksfase

Matriks er den flytende komponenten som omslutter den faste partikkelfasen og fyller hulrommet mellom tilslaget [10, s. 4-3]. Egenskapene til de fine materialene blir definert av overflatearealet i motsetning med partikkelfasen som defineres av kornstørrelse og form. Matriksen påvirker hovedsakelig egenskapene til den herdede betongen, men kan også ha en innflytelse på støpeligheten til den ferske betongen.

For å oppnå en betong med høy styrke og bestandighet, er det behov for mer sement i blandingen. Dette vil medføre et lavere masseforhold [10, s. 4-7]. En økning i sementinnholdet vil også føre til en økning i flytmotstanden til matriksen. For at en betongblanding skal ha god støpelighet, er det ikke gunstig med en høy flytmotstand, fordi det

kan redusere synkmålet til betongen. En måte å redusere flytmotstanden på er ved å øke masseforholdet eller øke dosen med SP-stoff. Flytmotstanden kan også reduseres dersom man øker matriksvolumet betydelig i blandingen, se figuren under. Matriksvolum er det totale volumet for matriksen i en blanding.



Figur 5: Forhold mellom matriksvolum og synk [18]

3.5.2 Partikkelfase

Partikkelfasens egenskaper, i motsetning til matriksfasens, er påvirket av gradering og kornform og kan defineres som et friksjonsmateriale [13, s.177]. Tilslaget utgjør store deler av blandingen og bidrar til å gjøre betongen stabil. Gradering er viktig fordi det kan fortelle noe om hulrommene mellom partiklene. Det er mulig å beregne tilslagets hulromsvolum og med dette kan man også finne matriksoverskuddet. Matriksoverskuddet er differansen mellom matriksvolumet og tilslagets hulromsvolum [13, s.148].

3.5.3 Partikkel- vs matriksdominant

I tillegg til å skille mellom partikkel- og matriksfase, skilles det også mellom en partikkel- og matriksdominant blanding. En matriksdominert blanding, er en blanding som har et stort nok matriksvolum til at det påvirker egenskapene til partiklene [10, s. 4-8]. Dette vil redusere egenskapene til tilslaget som kontaktrykk, friksjon og blokkeringseffekter. En partikkeldominert betong vil være mer påvirket av kontakten mellom tilslagspartiklene.

Grunnen til at det skilles mellom en partikkel- og matriksdominert blanding, er at partikkel-matriksmodellen ikke tar hensyn til stabiliteten til betongen [10, s. 4-9]. Det skal lite endring til i matriksvolum for å gå fra partikkeldominert til matriksdominert. Når matriksvolumet øker og reduserer partiklenes bidrag til stabilitet i betongen, er det større sjanse for å få en separabel betong. Det skal da en liten økning i matriksvolumet før man risikerer å få en betong som vil separere seg.

3.6 Støpelighet

Støpelighet er en betegnelse på hvor lett det er å arbeide med betongblandingen. Det er ikke en entydig betegnelse på hva som er god eller dårlig støpelighet, dette avhenger av hvilken type konstruksjon som skal bygges. Støpelighet deles opp i tre betegnelser: stabilitet, mobilitet og komprimerbarhet.

Det er flere ulike faktorer som er med på å spille inn på betongens støpelighet. Stabilitet forteller noe om betongens evne til å holde seg homogen [13, s.181]. Om betongen ikke holder seg homogen kan man risikere at betongen separerer seg. Det er flere ulike metoder for å unngå en separabel betong, men det avhenger også av hva slags type separasjon man har.

Betongens evne til å motstå bevegelse ved ytre påkjenning defineres gjennom mobilitet. Dette avhenger av f.eks. matriksens flytmotstand, eller friksjon og blokkeringstendenser mellom partiklene [13, s.183]. Her kan et tiltak for å få bedre mobilitet være å tilsette plastifiserende tilsetningsstoffer. Det er også mulig å øke matriksvolum og senke steinandel, men dette kan bli uøkonomisk dersom det betyr å tilsette større mengder med sement [13, s.183].

Komprimerbarhet beskriver betongens evne til å fylle forskalingen og andre hulrom når den støpes. Hvor lett det er å komprimere avhenger av mobiliteten til betongen. Dersom betongen ikke kan komprimeres effektivt, kan en risikere at det oppstår komprimeringsporer. Dette er ikke det samme som de ønskede luft porene, men heller grove porer som kan redusere fastheten til betongen [13, s.184]. Det er derfor viktig at betongen komprimeres riktig.

Det er ikke rett frem å lage en betong med god støpelighet, ettersom flere av faktorene spiller inn på hverandre. Tiltak for å redusere vannseparasjon, kan f.eks. være tiltak som gjør betongen stivere og mer tungt flyttende [13, s.183]. Dette kan da være med å gi betongen enn dårligere mobilitet. Det er ulike tester man kan gjennomføre for å se på betongens støpelighet. Eksempel på dette er synkmål og utbredelsesmål, som begge er typiske tester for betongens støpelighet.

4 Metode

4.1 Forsøksmatrise

I forkant av testene ble det laget en forsøksmatrise. Hensikten med testene er å se hvordan slammet vil påvirke egenskapene til den ferske og herdede betongen. Det ble derfor valgt å bytte ut en del av 0/8 – tilslaget med tilsvarende mengde slam, og i referansene er det da valgt å bytte ut en mengde på 10 kg sand og en med 50 kg sand. Det ble vurdert å ta med en referanse hvor 30 kg sand ble byttet ut, men pga. kapasitet på lab og mengde data som skulle bli analysert ble dette alternativet forkastet. Det var ikke gjennomført tester med slammet før og var derfor relevant å ha to referansepunkter med betydelig forskjell, for å få mer varierende resultater. Det er også laget en blanding med original resept, for å kunne sammenligne resultatene med utgangspunktet til resepten. For hver blanding ble det laget 3 prøvelegemer, for å kunne regne på standardavvik og få en vurdering på hvor pålitelige testene er.

De ulike blandingene vil videre bli referert til som blanding 1, 2 og 3. Hvor blanding 1 er original resept, blanding 2 er referansen med 10 kg og blanding 3 er referansen med 50kg. I tabellen under kan en også se at hvert enkelt prøvelegeme har fått tildelt en ID.

Blanding	Referanse ID	Resept	Sand (kg)
1	1.1	B35	0
	1.2	B35	0
	1.3	B35	0
2	2.1	B35	10
	2.2	B35	10
	2.3	B35	10
3	3.1	B35	50
	3.2	B35	50
	3.3	B35	50

Tabell 3: Forsøksmatrise

4.2 Fuktinnehold - tilslag og slam

For å kunne proporsjonere resepten er det viktig med riktig fuktinnhold på tilslaget. Dette er fordi det frie og absorberte vannet på tilslaget har en stor betydning for v/b-tallet.

Fuktinnholdet til tilslaget på laben var allerede målt. Det ble målt til å være lavere enn den

absorberte fukten, noe som kan føre til unøyaktigheter ettersom det er uvisst hvor mye vann slammet absorberer.

Fuktinnholdet til slam ble målt ved å bruke samme metode som for tilslaget. Ovnene som prøvene skulle tørkes i var satt på 105 °C, her sto prøvene i 20 min. Deretter ble fuktinnholdet regnet ut ved å bruke Formel 4. En feilkilde er at det ikke ble kontrollert for konstant vekt. Altså at vekten etter tørking er omtrent lik i to intervaller etter hverandre. I denne målingen ble det ikke tatt hensyn til absorbert fukt i slammet. Dermed er det ikke sikkert hvor mye av dette fuktinnholdet som er fritt vann og hvor mye som fyller porene i slammet.

$$fuktinnhold = \frac{masse\ våt - masse\ tørr}{masse\ tørr}$$

Formel 4: Fuktinnhold

4.3 Valg av materialer

Denne delen vil vise materialene som er brukt i blandingen på laben. Det er også brukt slam, men dette vil bli omtalt mer detaljert i delkapittel 4.5.

4.3.1 Sement

Det ble benyttet Standardsement FA fra Norcem produsert i Kjølsvik, klassifisert som CEM 2/B-M(V-L) 42,5 R i henhold til NS-EN 197-1. Sementen har densitet 3000 kg/m³ og inneholder 18% flygeaske, 76% klinker og 6% kalksteinfiller.

4.3.2 Silika

Det ble benyttet Elkem Microsilica med k-verdi lik 2 gitt i tabell NA.10 i NS-EN 206. Silikastøvet har en densitet på 2200 kg/m³.

4.3.3 Tilslag

Tilslaget som er benyttet i alle blandingene er sand og stein fra Årdal. Sanden som er benyttet har en densitet på 2650 kg/m³ og steinen har en densitet på 2700 kg/m³.

4.3.4 Superplastiserende stoff

Det ble benyttet superplastiserende tilsetningsstoff av typen Dynamon SR-N fra Mapei Norge AS. Stoffet har en densitet på 1050 kg/dm³ og tørrstoffinnhold på 17,5 %.

4.3.5 Blandevann

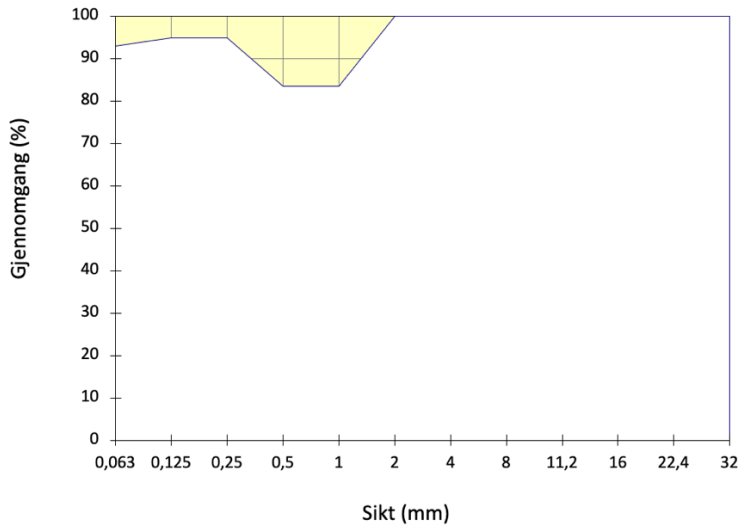
Blandevann som er brukt i alle blandinger, er restvann fra filterpressen, også omtalt som prosessavløpsvann. Blandevann gjenvunnet fra prosesser i betongindustri skal være i henhold til NS-EN 1008, tillegg A. Bedriften har godkjent og testet at vannet tilfredsstillende kravene, og oppgitt at mengden tørrstoff i vannet tilfredsstillende kravene, se vedlegg C.

4.4 Proporsjonering

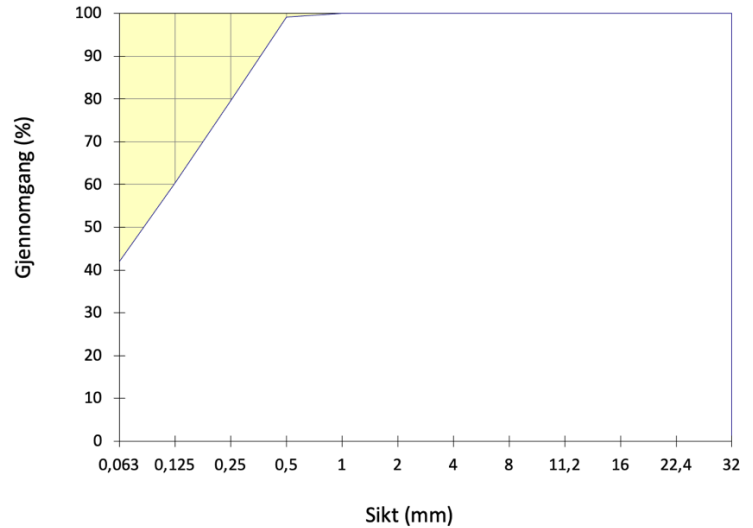
Det ble brukt proporsjoneringsark fra Skanska, tilsendt fra betonglaben på NTNU.

Proporsjoneringsarket er basert på partikkel-matriksmodellen. Når gruppen skulle på lab, var det begrenset med tid til å sette seg inn i fagstoff om proporsjonering og hvordan proporsjoneringsarket virker. Mye av proporsjoneringen ble derfor gjort i samarbeid med dem på laben og andre veiledere. Det er i etterkant funnet et par feil som kunne vært unngått dersom en kunne mer om teorien bak arbeidet på forhånd.

Første steg i proporsjoneringen er å legge inn hvilket tilslag som skal brukes. I proporsjoneringsarket er det allerede registrert de diverse tilslagene som laben har på lager sammen med siktekurvene. Data som densitet, fukt og absorbert fukt ligger også inne i proporsjoneringsarket, disse er det mulig å regulere. For å få inn data til slammet, redigerer en «Fraksjon_V». På det planlagte tidspunktet for å støpe betongen var det ikke gjennomført en slemmeanalyse eller blitt tilsendt slammets siktekurve. Det ble derfor laget en fiktiv siktekurve for slammet. Denne ser en klart er feil i etterkant, fordi det ikke skal være mulig for en siktekurve å gå opp og ned i gjennomgang, slik en ser i figuren under. Feilen kan komme av at proporsjoneringsarket ble utarbeidet i hastverk på grunn av tidsbegrensninger. I Figur 6 og Figur 7 kan en se den fiktive og reelle siktekurven opp mot hverandre. Det ble antatt en densitet på 2700 kg/m^3 for slammet.

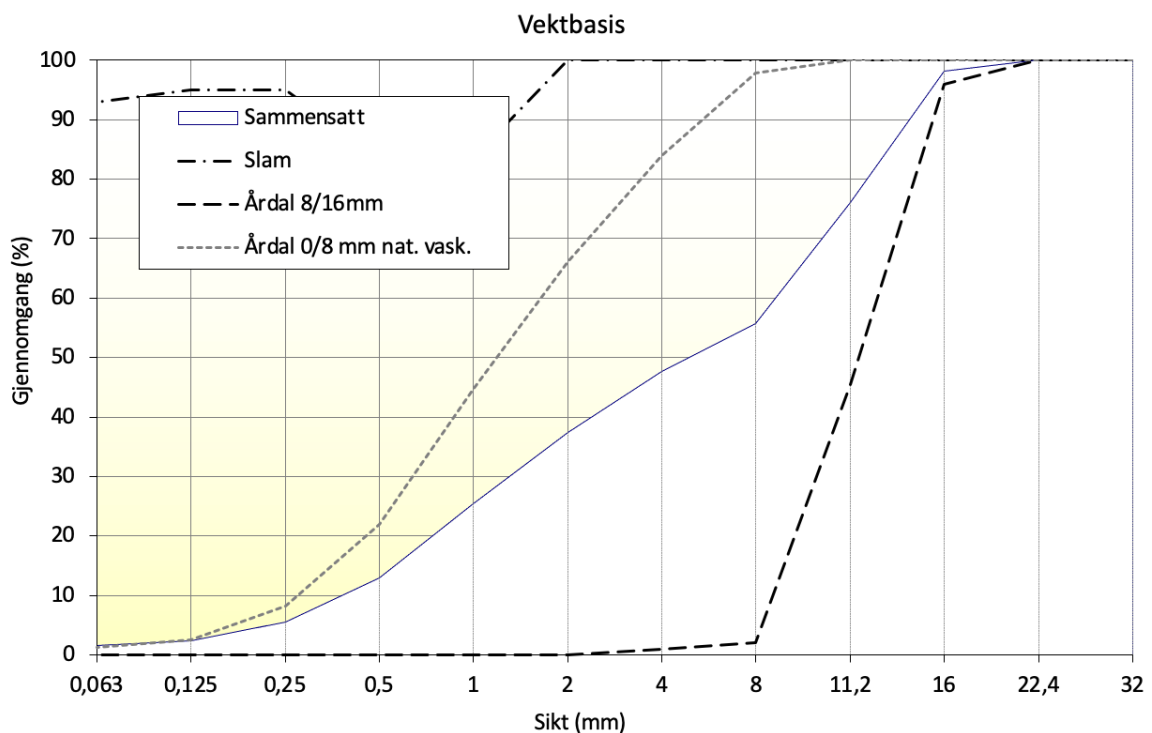


Figur 6: Fiktiv siktekurve slam



Figur 7: Riktig siktekurve slam

Neste steg er å legge inn ønsket vekt i «Sammensatt tilslag». På denne siden lages det en siktekurve som slår sammen de ulike siktekurvene for tilslagene som brukes. Figuren under viser et eksempel på hvordan en sammensatt siktekurve basert på vekt kan se ut, alle siktekurvene er lagt inn i vedlegg E. På disse kan man lese av hvor mange prosent av tilslaget som vil være filler eller som regnes inn i matrikssammensetningen.



Figur 8: Sammensatt tilslag - blanding 2

På samme side er det mulig å legge inn absorbert fukt i tilslag. Her ligger det en verdi på 0,5% inne på sand og stein. Det er lagt inn en absorbert fukt på 28 % i arket, som mulig er feil.

Dette kan være en feil ettersom en i neste avsnitt ser at det også er registrert et fuktinnhold på 28 %. Det kan antas at den absorberte fukten skulle vært lavere enn 28 %.

Videre i «Blandeskjema» er det mulig å registrere hvilket fuktinnhold til tilslagene har. Her ble det lagt inn en verdi på 0,3 % på sand og stein, som er verdien gruppen har fått fra laben. Fuktinnholdet i slammet er målt til å være 28 % og blir registrert i arket.

Resepten er laget for en trykkfasthetsklasse B35 og bestandighetsklasse M45. På «Matriks» ble det lagt inn et masseforhold på 0,45 og et luftinnhold på 3,5 %. Virkningsgraden til silika er lagt inn til å være en verdi på 2. Alle verdiene er hentet fra resepten i vedlegg D.

Initialparametre	Verdi		
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,45		
Luftinnhold	3,5 %		
Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA
Norcem Standard FA	100,0 %	78,0 %	18,0 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %
Tilsetningsmaterialer og fillere	Type	Andel (av tot. b)	k
Elkem Microsilica	Silika	3,9 %	2,0
Elkem Microsilica	Silika	0,0 %	0,0
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,7
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,0
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6
Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m ³]	Tørrstoff
Mapei Dynamon SX-23	2,0 %	1050	16,0 %
	0,2 %	1000	100,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %
Fiber	Vol %	[kg/m ³]	
	0,0 %	7800	
	0,0 %	1050	
Matriks	Verdi		
Ønsket matriksvolum [l/m ³]	335		
Oppnådd matriksvolum [l/m ³]	335		

Figur 9: Matriks ark

Matriksvolumet ble funnet med prøving og testing. Dette ble gjort i samarbeid med bedriften. For å finne det passende matriksvolumet gikk man mellom sidene «Matriks» og «Resept» og regulerte volumet til man fikk en resept som var tilnærmet lik resepten fra bedriften. Det ble da valgt å ha et matriksvolum på 335 l/m³.

Etter alle verdiene er lagt inn, måtte resepten nedskaleres til den mengden som skulle blandes. For hver blanding ble det beregnet 8L til blanding, 3L til hver prøve og 1L til evt. svinn. Dette gir et ønsket volum på 12L.

Hver blanding har nesten samme fremgangsmåte, det som skiller dem er at i «Sammensatt tilslag» er det endret på kolonnen «Andel-vekt». Tallene som lå inne fra før var 0,56 for sand og 0,44 for stein. Forholdet mellom disse var tilnærmet lik forholdet mellom sand og stein i resepten, valgte man å bruke disse verdiene til blanding 1. For å fjerne ønsket mengde sand, fjernet man tilsvarende bit fra andel vekt og la inn i slam. For 10 kg ble det da 0,55 andel sand, 0,44 andel stein og 0,01 med slam. For 50 kg ble det da 0,51 andel sand, 0,44 andel stein og 0,05 med slam.

Sammensatt tilslag

Fraksjon	Navn	Densitet [kg/m ³]	Abs. fukt [%]	Alk. reakt. Sv[%]	Klorider [%]	Andel		Bruk
						volum	vekt	
I	Årdal 0/8 mm nat. vask.	2650	0,5	0,0	0,00	0,555	0,550	ok
II	Årdal 0/2 mm nat. vask	2650	0,5	0,0	0,00	0,000	0,000	
III	Årdal 8/16mm	2700	0,5	0,0	0,00	0,435	0,440	ok
IV	Årdal 16/22 mm	2700	0,5	0,0	0,00	0,000	0,000	
V	Slam	2700	28,0	0,0	0,00	0,010	0,010	ok
VI		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
VIII		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
IX		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
X		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
Sammensatt		2672		0,0	0,00	1,000	1,000	

Figur 10: Vektfordeling – blanding 2

Etter alle verdiene er lagt inn og tilslagene er tilpasset slik man ønsker blir det laget et blandeskjema for de ulike reseptene. Her ligger mengdene som er brukt i de ulike blandingene. Dette er presentert i arket «Blandeskjema». Alle blandeskjemaene er presentert i vedlegg F. De oppskalte blandeskjemaene er også lagt ved.

Når gruppen i etterkant har prøvd å finne de ulike proporsjoneringsarkene, er det registrert en feil ved lagring av blanding 3. Blandeskjemaet i arket er ikke likt det som ble printet ut og brukt på laben. Vedlegg F.3, er det blandeskjemaet som er brukt ved blanding av blanding 3, men «Sammensatt tilslag», teoretisk densitet og oppskalt blandeskjema vil bli annerledes da disse er hentet fra arket i etterkant av blandingen. Årsaken til denne feilen er usikkert.

4.5 Slam

Det kan ha gått alt fra en uke til en måned fra den ferske betongen ble blandet, trommelen blir rensert og det blir presset ut filterkaker av betongslam. Tidspunktet for blanding av betong har mye å si for hydratiseringsgraden, ettersom den øker med tiden. Dette har igjen noe å si for andelen av delmaterialer som er tilgjengelig for videre reaksjon. For slammet som ble brukt i blandingen er det ikke spesifisert tiden fra betongen ble blandet, til det ble mottatt ved betonglaben. Dette er en svakhet ved studien, ettersom det er vanskelig å vite i hvilken grad stoffene har reagert.

En annen mulig svakhet knyttet til slammet er at densiteten ble antatt og ikke målt. Dette skyldes tidsbegrensninger i forkant av betongblanding. Densiteten ble antatt basert på den antagelsen at slam burde ligge et sted mellom densiteten til de ulike bestanddelene i betongen. Densiteten ble da antatt til å være den samme som sanden.

4.5.1 Behandling av slam

På dagen for den planlagte blandingen, mottok gruppen slammet. Det ble vurdert at slammet var såpass fuktig og kompakt at det ikke ville fungert som erstatte for tilslaget uten ytterligere tiltak. Det var også viktig å måle fukten på slammet for å kunne ha kontroll over masseforholdet til betongen.



Figur 11: Slam før tørking

Med tanke på tilgjengelig utstyr på laben, ble det vurdert at den beste metoden for å behandle slammet var å knuse det manuelt. Utstyret som ble brukt var en gummihammer og en fille, som illustrert i Figur 12. Metoden besto av å samle en liten mengde slam i fillen og deretter slå det i intervaller mens man ristet på innholdet. Denne prosessen fortsatte til slammet var tilstrekkelig knust, som illustrert i Figur 13. En begrensning ved metoden var at det ikke ble målt tid på hvor lenge hver bit slam ble slått, noe som kan resultere i ulik grad av knusing mellom ulike fraksjoner. Det ble vurdert visuelt om slammet var tilstrekkelig knust. På grunn av slammet sin høye fuktighet og fine partikler, hadde det en tendens til å klumpe seg sammen. Det var også noen biter som ikke lot seg knuse med hammer.



Figur 12: Utstyr brukt til behandling av slam



Figur 13: Slam etter knusing

Under knusingen av slam, ble ikke det ferdig knuste slammet tildekket. Dermed kan de første delene av slammet ha tørket mer i forhold til det fuktinnholdet som ble målt før knusing. Etter alt slammet var bearbeidet ble det oppbevart i en bøtte med plast over. Det ble oppbevart slik i 3 dager før betongen skulle blandes. Hvor mye slammet har tørket på disse dagene er usikkert ettersom det ikke ble gjort ny fuktmåling.

4.5.2 Slemmeanalyse

I siktekurven på Figur 3 kan en se at omtrentlig 40% av innholdet i slammet er under 0,063. Det var derfor aktuelt å gjennomføre en slemmeanalyse i etterkant av støpningen for å få en bedre innsikt i hvordan den store andelen finstoff kan ha påvirket betongens styrke og støpelighet.

Slemmeanalysen ble gjennomført på NTNU sin geoteknikk lab. Det ble brukt metode-arket fra laben som tar utgangspunkt i SVV sin håndbok for laboratorieundersøkelser, 214 Slemmeanalyse [19]. Det ble gjennomført to ulike tester for å ha to referanser som kunne sammenlignes.

Første steg var å veie opp 50 g slam og sikte det gjennom en 0,063 mm sikt. Sikten ble ikke veid før finstoffet ble siktet. Dette gjorde at det var vanskelig å få et nøyaktig tall på hvor mye av prøven som er over 0,063 mm. Ettersom det er en liten mengde som skulle siktes, kan små korn og støv som lå i sikten ha økt vekten av stoffet etterpå. Det ble valgt å veie sikten etter prøven var tørket og kastet, for å få et tilnærmet tall på hvor mye sikten veide.

Selv om slammet ble slått var det fortsatt biter som ikke ville siktes eller dele seg opp, og dette førte til at det var klumper som lå igjen med massen over 0,063 mm. Disse klumpene kan ha inneholdt filler som ikke blir registrert i analysen.

Etter massen var siktet, blir den siktede massen blandet med vann og dispergeringsmiddel. Dispergeringsmiddelet legges til for at finstoffene ikke skal flokkulere seg sammen. Etter dette er blandingen klar for å måles. Målingene blir gjort i intervaller med et hydrometer. Disse målingene ble unøyaktige, ettersom det er målt av feil på hydrometeret. Målingene skal synke i verdi og på test 1 ser en at de f.eks. går fra 2 til 2,5 mellom 5 og 10 min, se alle målinger i vedlegg I. Dette blir feil fordi densiteten til væsken vil synke når flere partikler synker. Selv om dette blir en feilkilde, så er det ikke store sprang mellom verdiene og det blir evt mulig å lage en fiktiv lik måling. Feilkildene kan komme av menneskelige feil og at gruppen ikke visste hvordan en skulle lese av hydrometeret.

For å gjennomføre beregningene, ble det brukt to grafer fra laben for å finne K og Zr. Etter dette ble beregning utført inn i et Excel-ark. Her ble det også laget en siktekurve for den fiktive kurven. Forutsetningene for å lage den fiktive kurven, var å endre på plassen til de allerede målte verdiene. Slik at de gikk i den rekkefølgen som ville vært logisk.

4.6 Blanding av betong

Betongen ble blandet i en ZK50HE fra Pemat som er en 45L blandemaskin. I forkant av blandingen ble alle materialene veid nøyaktig i forhold til resepten. Til dette ble det brukt en kalibrert Mettler Toledo SB32001 med nøyaktighet på 0,1 g. Før en begynner å blande er det viktig å fukte alle overflater av stål for å mette dem. Dette vil si både bolle og annet utstyr

som f.eks. murerskje. Dette er for at stålet ikke skal ta til seg noe av vannet som trengs til blandingen, som kan endre på blandingens masseforhold.



Figur 14: 45L betongblander

Det er brukt laboratoriets blandeprosedyre når betongen skulle blandes. I tabellen under er fremgangsmåten presentert til venstre med kommentarer til høyre.

Fremgangsmåte	Kommentar
1 min tørrblanding	Sement, tilslag, silika og evt. slam der det er aktuelt blandes
2 min våtblanding	Vann tilsettes de første 30 sek sammen med SP-stoff
2 min henstilling	Tid for å la betongen sette seg/ vann og sement skal få mulighet til å reagere
1 min blanding	

Tabell 4: Fremgangsmåte for blanding av betong

Beholderen med SP-stoff blir veid før og etter tilsetning, dette er for å vite eksakt hvor mye SP-stoff som er blitt brukt. Etter 2 min med henstilling stoppes maskinen for å se på konsistensen til blandingen. Blanding ble her rørt litt i manuelt for å sjekke at alt er blandet godt nok sammen.

Blanding	Mengde SP-stoff [g]
1	58,6
2	61,0
3	53,6

Tabell 5: Mengde superplastiserende i blanding

4.7 Tester på fersk betong

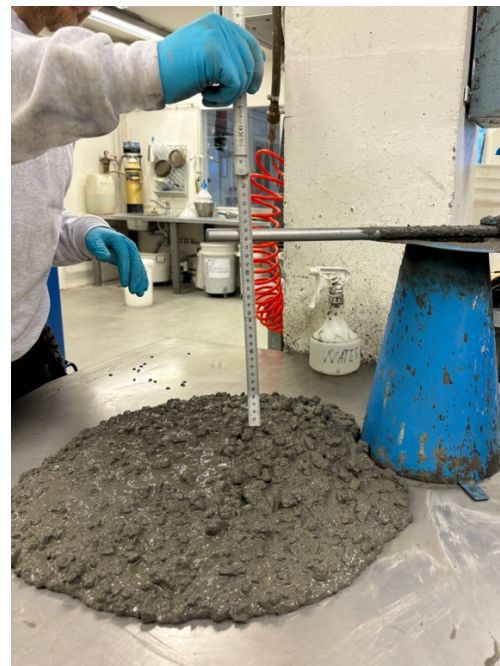
Alle testene på fersk betong ble gjennomført på betonglaboratoriet på NTNU, og ble gjennomført sammen med betongarbeidere på laben. Testene ble gjennomført i samsvar med Norsk Standard sin «Prøving av fersk betong».

4.7.1 Synk

Synk er et mål på støpeligheten til betongen, og er gjennomført i samsvar med NS-EN 12350-2. Ifølge standarden er metoden aktuell å bruke dersom det ikke er tilslag grovere enn 40mm. Det stilles krav til at kjeglen skal løftes jevnt oppover i 2-5 sekunder og derfor burde en person gjøre alle testene som skal sammenlignes. Dette er fordi det skal lite endringer i gjennomføring for å påvirke resultatene [10, s. 3-13]. Ettersom det ble byttet på hvem som fylte, komprimerte og løfte kjeglen, kan dette være en feilkilde. På test to ble kjeglen løftet for raskt, noe som kan ha påvirket målingen i liten grad.



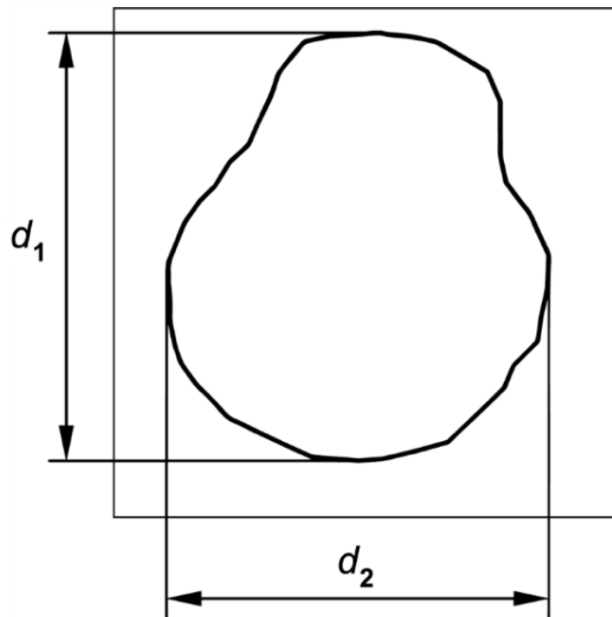
Figur 15: Komprimering av blanding



Figur 16: Måling av synk

4.7.2 Utbredelse

Utbredelse er også et mål på støpeligheten til betongen. Dersom synkmålet er veldig høyt kan det være aktuelt å gjennomføre et utbredelsesmål for å få et bedre inntrykk av betongens konsistens. Testen ble gjennomført etter synk, hvor bredden til massen blir målt på de to bredeste områdene hvor d_1 og d_2 ligger, se figuren under. Figuren er hentet fra NS-EN 12350-5. Betongens utbredelse blir funnet ved å ta gjennomsnittet av de to målingene.



Figur 17: Måling av utbredelse

4.7.3 Luftinnhold

Luftinnhold ble målt i samsvar med NS-EN 12350-7. I standarden er det to metoder for å måle luftinnholdet til betongen, og testen ble gjennomført etter «Trykkmålemetoden».

Komprimering ble gjort med komprimeringsstav, og det er regnet med at korreksjons faktor G er lik 0.



Figur 18: Trykkmåler

4.7.4 Densitet

Densiteten til hver av blandingene ble målt i samsvar med NS-EN 12350-6. Betongen ble komprimert med komprimeringsstav, med 25 støt for hvert av de tre lagene. Testen er svært sensitiv for feil i avrettingen av beholderen, den ble derfor nøye rengjort på utsiden før veing. Det er samme beholder som er brukt for måling av luftinnhold.

Før testing av trykkfasthet ble hver enkelt kube veid på en kalibrert vekt som oppga massen i gram. Siden hver kube var 1000 cm^3 kunne densiteten finnes ved å ta massen delt på volumet.

4.8 Støping og herding

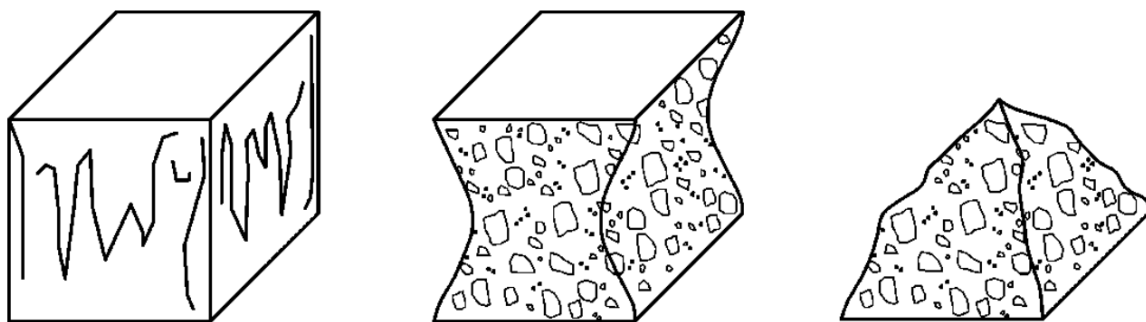
Støping av betong ble gjort i henhold til standard NS-EN 12390-2. Prøvene ble støpt i kuber, med dimensjoner $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$. Prøvelegemene ble lagt til herding ved NTNU sitt herderom. I herderommet er det konstant $20 \text{ }^\circ\text{C}$ med en relativ luftfuktighet på 90-95 %. Prøvene ble av formet etter 4 døgn.



Figur 19: Betongen når den skulle avformes

4.9 Trykkfasthet på herdet betong

Testing av trykkfasthet ble gjennomført i samsvar med NS-EN 12390-3. Prøvene ble testet den samme timen de ble tatt ut av herderommet, og ble påført en pålastningshastighet på $0,6 \text{ N/mm}^2\text{s}$. Ingen av kubene ble det målt dimensjonene på før de ble satt inn i trykkprøvingsmaskinen, siden de på laben ikke har opplevd at kubene ikke overholder standarden ved bruk av formene de har. Alle kubene må tilfredstille bruddformer for terningformede prøvelegemer ifølge standarden. Figuren under er hentet fra NS-EN 12390-3.



Figur 20: Tilfredsstillende bruddformer

5 Resultater

5.1 Densitet

5.1.1 Fersk betong

Densiteten blir beregnet fra for mel (1) i NS-EN 12350-6. Volumet på beholderen er 7962 mL og vekten av beholderen er 4,5818 kg. Densiteten angis til nærmeste 10 kg/m³.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Formel 5: Densitet

Blanding	Densitet [kg/m ³]
1	2400
2	2430
3	2360

Tabell 6: Densitet på fersk betong

5.1.2 Herdet betong

Densiteten ble målt etter metoden gitt i delkapittel 4.7.4. Resultatene av målt densitet er gitt i tabellen under.

Blanding	Referanse ID	Densitet [kg/m ³]
1	1.1	2430
	1.2	2400
	1.3	2400
2	2.1	2430
	2.2	2430
	2.3	2430
3	3.1	2350
	3.2	2380
	3.3	2360

Tabell 7: Målt densitet

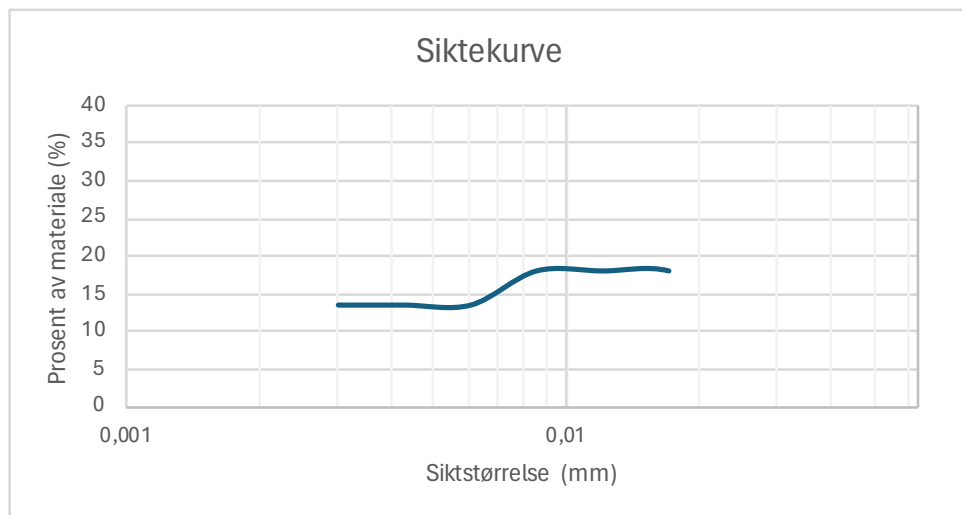
5.2 Slam

5.2.1 Fuktinnhold slam

Fuktinnholdet ble funnet i samsvar med metoden gitt i delkapittel 4.2. Det ble målt et fuktinnhold på 28,2 %.

5.2.2 Slemmeanalyse

Selv om slemmeanalysen ble gjennomført feil, er det laget en siktekurve med verdiene som ble registrert i test 1 og 2. I vedlegg I kan en se resultatene i fra avlesningene sammen med siktekurve for testen. Her kan en se at resultatene fra test 2 blir feil, da kolonnen «Grain size dist.for soil < 0.063 mm» får negative verdier. Dette kan komme av feilkilden hvor sikting ikke ble veid før sikting. En kan også se i verdien for «Masse > 0,063 tørket» at den tørkede massen er over 50 g, som tydelig er feil. Figuren under viser eksempel på siktekurven fra test 1.



Figur 21: Siktekurve - test 1

5.3 Resultater på fersk betong

5.3.1 Synk

Resultatene av synkmål er gitt i tabellen under.

Blanding	Synkmål [mm]
1	240
2	240
3	220

Tabell 8: Resultater synkmål

5.3.2 Utbredelse

Resultatene av utbredelsesmål er gitt i tabellen under.

Blanding	Utbredelsesmål [mm]
1	485
2	515
3	355

Tabell 9: Resultater utbredelse

5.3.3 Luftinnhold

Det ble proporsjonert for et luftinnhold på 3,5 %. I tabellen under kan en se resultatene på luftinnhold på fersk betong.

Blanding	Luftinnhold [%]
1	0,8
2	0,1
3	0,5

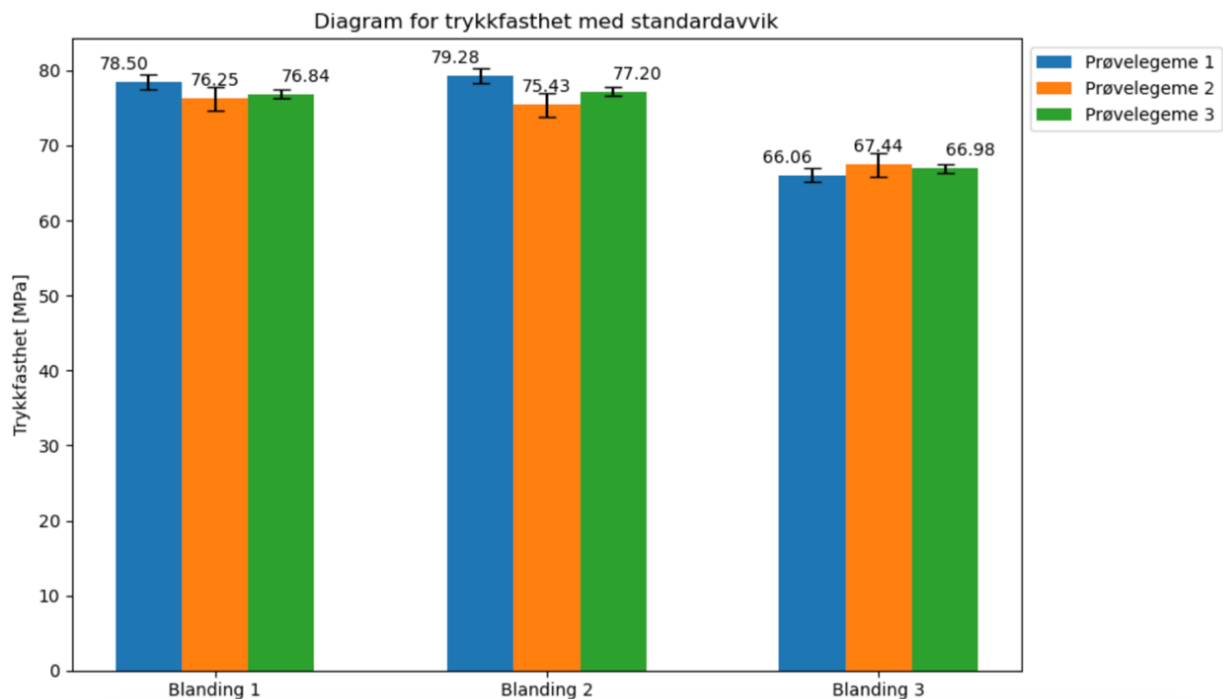
Tabell 10: Resultater luftinnhold

5.4 Resultater trykkfasthet

Resultatene fra trykkfasthetstesten er registrert i tabellen under. Det i kolonnene til høyre er gjennomsnitt for hver blanding og standardavvik regnet. I figuren under er trykkfasthetene representert i et søylediagram med standardavvik.

Blanding	Referanse ID	Trykkfasthet [MPa]	Gjennomsnitt [MPa]	Standardavvik [MPa]
1	1.1	78,5	77,2	0,96
	1.2	76,3		
	1.3	76,8		
2	2.1	79,3	77,3	1,57
	2.2	75,4		
	2.3	77,2		
3	3.1	66,1	66,8	0,57
	3.2	67,4		
	3.3	67,0		

Tabell 11: Resultater trykkfasthet



Figur 22: Diagram for trykkfasthet

6 Diskusjon

6.1 Slam

Når gruppen fikk slammet, var det lite analyser og tester som var gjort på det. Verdiene og infoen som kom fra fabrikken var kun at slammet er innenfor kravene i forskriften og derfor er mulig å bruke. Det var derfor mye ukjent med materialet. Etter arbeid med både proporsjonerings og tester, ser en at det skulle vært mer fokus på å lære om materialet før det ble tatt i bruk.

Siden siktekurven var feil, kan det ha påvirket matriksvolumet. I den fiktive siktekurven som var lagt inn, se Figur 6, står det at mer enn 90 % av materialet er mindre enn 0,125 mm. I den reelle siktekurven på Figur 7, ser en at ca. 60 % går gjennom samme siktnivå. For blanding 2 trenger ikke dette å ha spilt en vesentlig rolle, ettersom slammet blir en liten prosentandel av sammensatt tilslag. For blanding 3 kan det derimot ha en mye viktigere rolle. Ved å legge inn en siktekurve som sier at det er 90% finstoff, når det i realiteten er 60 %, kan utgjøre en avgjørende forskjell på matriksvolumet. Det er derfor mulig at det samlede matriksvolumet i den reelle blandingen er blitt mindre enn det det er proporsjonert for, på bakgrunn av feil mengde finstoff registrert. Når de ulike blandeskjemaene sammenlignes, kan en se at mengden sement blir mindre for hver blanding. Dette kan komme av at slammet inneholder mye finstoffer.

Det ble gjennomført en slemmeanalyse for å se graderingen under 0,063mm. Resultatene fra slemmeanalyse ble delvis feil ettersom avlesning på hydrometeret ble unøyaktig og mengden som har kommet gjennom sikten kan være feil. Selv om avlesingen er unøyaktige, er forskjellen i verdiene såpass små at det fortsatt kan antas at siktekurven ville vært noe lignende det gruppen har fått. Ved gjennomføring av slemmeanalyse hadde det også åpnet for muligheten til å gjennomføre beregninger på overflatearealet. I videre forskning kan dette være svært relevant for å finne ut av hvor mye vann slammet vil ta opp. Dersom det er flere fine partikler vil det trekke opp mer vann enn om det er større.

Noe som kunne løst et par problemer, for å få et bedre svar på hva testene har gitt svar på, er å finne det nye masseforholdet til blandingene. Dette er spesielt relevant for blanding 3. Med for mye vann og mulig mindre matriks enn beregnet, vil masseforholdet ha kunnet økt kraftig, dette kan være muligheten for at resultatene på blanding 3 sin trykkfasthet har blitt lavere enn de to resterende.

Som nevnt tidligere, vil feilene ha mindre påvirkning på blanding 2 enn på blanding 3. Dette er fordi prosentandelen med slam er større i blanding 3 enn i blanding 2. Det er derfor viktig å ta hensyn til dette når dataen fra blanding 3 analyseres. Med feil absorbert fukt, kan blanding 3 ha blitt tilsatt for mye vann enn resepten skulle hatt, og med feil siktekurve vil det spille en vesentlig rolle for trykkfastheten da mengde med sement kan ha blitt redusert.

6.1.1 Vann i slam

Slammet består av fine partikler som har ligget i vann, for deretter å bli sendt gjennom en filterpresse. Dette gjør at det inneholder svært mye væske og finstoff. Gruppen hadde ikke verdier på fuktinnholdet, densiteten eller absorbert fukt før prosjektet startet. Det ble tilsendt en siktekurve av slammet, men dette var etter proporsjoneringen var gjennomført. Feil bruk av verdier har vært en betydningsfull feilkilde i prosjektarbeidet. Fuktinnholdet ble funnet før betongen ble blandet og dette hadde en høy verdi. Det var viktig å vite verdien på fuktinnholdet, da feil verdi kan føre til tilsetning av feil mengde vann i blandingen.

Ved etterarbeid av proporsjoneringsarket, ble gruppen gjort oppmerksom på usikkerheten av hvor mye vann slammet absorberer. I proporsjoneringsarket ble det lagt inn en absorbert fukt på 28 %. Fuktinnholdet i slammet ble målt til å være 28 %, og det er derfor mulig at verdien har blitt skrevet inn i absorbert fukt med en feil, at det er blitt blandet mellom fuktinnhold og absorbert fukt.

Absorbert fukt er vesentlig å finne verdien på. Hadde det vært undersøkt hvor mye hydratisert sement og tilslag slammet inneholder, ville det vært lettere å anta en absorbert fukt til slammet. Dersom det er mye tilslag i slammet, kan det være mulig å anta at slammet har en absorbert fukt på 0,5-1 %. Består det derimot av mer hydratisert sement vil det ha en absorbert fukt nærmere 30 %. Det samme gjelder antagelse for densitet. Er det mer tilslag vil slammet ha en densitet nærmere 2700 kg/m³ og dersom det er mer hydratisert sement vil det være en verdi nærmere 2200 kg/m³. Tallene som er oppgitt er fra et teams møte 14.05.24 med Sverre Smeplass.

Forutsatt at absorbert fukt skulle vært nærmere 0,5 %, vil det bety at det er tilsatt for mye vann i blandingen. Det er fordi en høyere absorbert fukt vil proporsjonere for at slammet tar til seg mer vann. Dette kan resultere i et v/b-tall som blir høyere enn det er proporsjonert for, og ha en påvirkning for trykkfastheten til betongen. Det kan være dette som har skjedd på blanding 3. Det kunne derfor vært aktuelt å gjøre etterregninger på hvilket masseforhold de

ulike blandningene har fått. Dette kan være med å fortelle om den absorberte fukten er registrert altfor høy eller ikke.

6.2 Diskusjon av resultater for fersk betong

6.2.1 Synk

Det valgte matriksvolumet ble funnet gjennom prøving og feiling for å få en resept som var tilnærmet lik bedriften sin. Det ble da brukt et matriksvolum på 335 l/m^3 , som er en relativt høy verdi. Dette vil da i følge Figur 5 gi et høyt synkmål, noe som bekreftes i resultatene også. De observerte verdiene er noe lavere enn det som er vist i figuren, men dette kan komme av mindre bruk av SP-stoff eller at figuren er en tilnærming.

I blanding 2 og 3 er det mer filler i matriksen. Dette kan være med å påvirke flytmotstanden til blandingen, og det kunne derfor forventes noe lavere synk. Det er derimot observert at synkmålet er helt likt i blanding 2 og noe lavere i blanding 3. En mulig årsak til at blanding 1 og 2 er like, kan komme av at det er brukt litt mer SP-stoff i blanding 2. Mer SP-stoff kan ha motvirket en mulig økning i flytmotstand, som resultat av mer filler i blandingen.

Sammenlignes sammensatt tilslag for original og 10 kg resepten, ser en at prosenten med filler ikke har økt betydelig mye mellom disse. Det kan derfor argumenteres for at filleren ikke har spilt en vesentlig rolle her, og de små mengdene med SP-stoff ikke har noe betydning.

Blanding 3 har et synkmål som er noe lavere enn original resepten, men dette er også i liten grad. Det er mulig å se på faktumet at det er brukt mindre SP-stoff i denne blandingen, men dette er heller ikke i vesentlige mengder. Ettersom alle synkmålene er noenlunde like, kan det argumenteres for at filleren ikke har spilt den rollen den skulle, og noe av dette kan komme av feil vannmengde i blandingen. I teorien ville en blanding med mer finstoff trengt mer vann for å dekke overflatearealet som nå er blitt større. Dette ville da spilt en stor rolle i å øke flytmotstanden, som skulle resultert i dårligere synk. Det kan da argumenteres for at vannmengden som det er tilsatt for mye av, dekker det store overflatearealet som man får med mye filler, som har gjort blandingen mer mobil.

6.2.2 Utbredelse

Selv om det er et høyt synkmål på betongblandningene, er det fortsatt flere faktorer som spiller inn på betongens støpelighet. Det er derfor aktuelt å gjennomføre en utbredelsestest på betonger med høye synk verdier [13, s.187]. Mellom resultatene på blanding 1 og 2 er det

ikke store forskjeller, men blanding 3 er det derimot en betydelig lavere verdi på. Det er mulig tilsetning av mer SP-stoff kunne gjort en forskjell her, ved å gi bedre flyt.

Beregning av matriksoverskudd kunne gitt en bedre forståelse av betongblandingen. For å finne dette hadde det vært relevant å finne hulromsvolumet til tilslaget. Med et høyt matriksoverskudd får man en blanding som vil bidra til å redusere kontakten mellom partiklene, og kan betegnes som matriksdominert. På bildene av blandingen, se Figur 16, kan en observere at betongen ser stabil ut. Det kan derfor tyde på at matriksen ikke har gitt noe utslag for å gjøre betongen ustabil, slik en kan risikere med en matriksdominert blanding. Det som kan ha gjort blanding 3 noe stivere, er at matriksen inneholder mer filler som bidrar til økt flytmotstand.

6.2.3 Luftinnhold

Betongen var proporsjonert for et luftinnhold på 3,5 %, men resultatene viser en betydelig mindre verdi. Grunnen til dette er at det ikke er blitt brukt luftinnførende stoffer i betongblandingen, som det var ført opp i proporsjoneringsarket.

I blandingene med slam, er det en reduksjon i luftinnhold. For blanding 2 er det svært lite luft sammenlignet med blanding 1. En mulig årsak kan være at de fine partiklene i slammet har fylt hulrommene. Det er vanskelig å si i hvilken grad dette kan ha påvirket luftinnholdet, ettersom variasjoner i blandingsprosedyren også kan ha spilt en rolle. Som tidligere nevnt, måtte blandingen utføres delvis manuelt. Variasjoner i dette samt komprimering kan være årsaken til avviket.

Densiteten til betong ved herdet tilstand kan indikere graden av komprimering og luftinnhold. Densiteten ved herdet tilstand viser mindre varians mellom de ulike blandingene, noe som tyder på at graden av komprimering er relativt lik. Dette kan bety at avviket i målt densitet for fersk betong har blitt utjevnet under herdingen. Den avtagende variansen kan også skyldes filler effekten under hydratisering, som gir en tettere porestruktur.

Luftinnhold har en betydning for styrken til betongen. En tommelfinger regel for herdet betong er at en økning av luftinnholdet på 1 % gir en reduksjon i styrke på 5 % [10, s. 12-19]. Dermed kunne blanding 1 forventes å være noe svakere enn blanding 2. Luftinnholdet er målt for fersk betong, og det kan være derfor tommelfingerregelen ikke stemmer overens med resultatene.

6.3 Diskusjon av målt densitet

Den herdede betongens densitet er relativt lik for alle blandingene. Blanding 2 har en verdi noe høyere enn normalen, mens blanding 3 har en noe lavere verdi. Dette mønsteret gjelder også for densiteten av fersk betong. Årsaken til variasjonen kan være ulik mengde luftinnhold ved blanding for fersk betong. Økt luftinnhold gir lavere densitet. Det kan tyde på at blanding 2 har blitt komprimert noe bedre enn blanding 1, ettersom blanding 2 har høyere densitet for både målinger av herdet og fersk betong.

En forklaring på hvorfor densiteten til blanding 3 er lavere enn de andre, er knyttet til feilkilden som har ført til at det er tilsatt for mye vann. Fra teorien gir økt v/b -tall økt porøsitet, som reduserer densiteten. Dette ville ikke spilt en stor rolle ved blanding av betong, ettersom porøsiteten øker med hydratiseringsgrad. Siden blanding 3 hadde lavere densitet selv ved måling av fersk betong, kan det være andre årsaker til dette. Forskjellen i densitet er fortsatt veldig lav for de ulike blandingene.

En annen årsak kan være feil antatt verdi av densiteten til slam. Blanding 3 har en høyere andel slam, samtidig som den har lavere densitet enn blanding 1, som kun består av sand. Dette kan tyde på at densiteten til slam er lavere enn sand. Dette er i motsetning til hva som er ført opp i proporsjoneringsarket, hvor det er angitt tilnærmet lik verdi for både sand og slam.

Høyere densitet har en sammenheng med høyere mekanisk styrke, ettersom det gir en mer pakket og fast betong [9]. Dermed kan det forventes at blanding 2 vil ha større styrke enn de andre blandingene, noe som stemmer med resultatet for trykkfasthet.

6.4 Diskusjon av resultater for trykkfasthet

Resultatene viser at trykkfastheten er ca. lik for blanding 1 og 2, mens trykkfastheten for blanding 3 er lavere. Variansen mellom de ulike kubene er liten, som antyder en konsistent betongproduksjon. Gjennomsnittsverdien for trykkfastheten til blanding 3 er redusert med ca. 13,5 % sammenlignet med normalen. Dette kommer trolig av feilen i proporsjoneringen, som har påvirket det effektive v/b -tallet. Dermed kan slammets påvirkning på trykkfastheten bli noe overskygget, spesielt i blanding 3 hvor slam er en større prosentandel av det totale tilslaget.

Basert på teorien over kan en forvente at slammets bidrar med en filler effekt i betongen. Som vist i Figur 3, inneholder slammets en betydelig mengde filler. Filler effekten gjør matriksen

tettere ved å øke pakningen av matriksen. Dette reduserer antallet hulrom i matriksen. Det er ofte matriksen som er den begrensende faktoren for trykkfastheten. Dermed vil en økt densitet av matriksen føre til økt styrke. Det økte overflatearealet til slammet kan øke hydratiseringsgraden som forklart i teorien. Dette reduserer kapillærporøsiteten og resulterer i en tettere porestruktur, som gir en sterkere betong.

Det er gjort en XRF analyse på slammet som vist i vedlegg A, og det er funnet en andel CaO og SiO₂. Denne andelen kan bidra til en viss styrkeutvikling, gjennom å ha en pozzolanreaksjon. Effekten forventes å være i svært liten grad ettersom slammet har hatt tid til å hydratisere. Dermed har store deler av molekylene XRF fanger opp, mest sannsynlig allerede reagert.

Slammet kan ha en negativ effekt på betongen hvis det danner et lag på overflaten av det grove tilslaget, og dermed redusere heften mellom dem. Dette vil gjøre betongen svakere. En annen negativ effekt er at når større deler av sand blir erstattet med slam, forandres også den sammenlagte tilslagskurven. Ettersom de største partiklene i slam er 0,5 mm, imens graderingen for sand er opp til 8 mm. Når en reduserer disse mellomstore partiklene i sanden, kan en få noe dårligere pakning, og dermed hulrom som må fylles med matriks.

Tidligere i diskusjonen er det skrevet at det er mulig det er registrert feil absorbert fukt i slammet. Dersom den absorberte fukten skulle vært lavere, vil dette påvirke hvor mye vann som er tilsatt i betongen og det har da blitt tilsatt for mye vann. Med for mye vann i blandingen, vil det gi et større v/b-tall enn det det er proporsjonert for. Dette kan bidra til å gi lavere styrke til betongen. Dette kan være en årsak til at blanding 3 er lavere i trykkfasthet enn de to resterende blandingene. Blanding 3 har vesentlig mer slam i blandingen og det er derfor flere av feilene er tydeligere på denne blandingen enn for blanding 2.

På grunn av feilkilden er det vanskelig å si noe om slammet sin effekt på trykkfasthet, spesielt for blanding 3 hvor feilkilden har en større innflytelse. Det er mulig å anta hvordan slammet hadde påvirket trykkfastheten basert på teori og prøvene på slammet, men ettersom v/b-tallet er en såpass dominerende faktor for styrke, vil det være vanskelig å se noe om slammet sin effekt i praksis.

Resultatene for trykkfasthet er høye for fasthetsklassen betongen er proporsjonert for. Når betongen ble proporsjonert, ble den proporsjonert for en betong med fasthetskklasse B35 og bestandighetsklasse M45. Dette ga et masseforhold på 0,45 som i Figur 4 vil gi en relativt høy

trykkfasthet med sementen som er brukt. Det var ikke gruppen som valgte disse klassene, men de var tilsendt med resepten. Det er mulig det hadde vært gunstig å øke bestandighetsklassen, slik at masseforholdet også øker og gir lavere trykkfasthet.

6.5 Begrensninger og videre forskning

Det finnes flere andre tester som kunne vært aktuelle å gjøre på slammet og betongen. På grunn av begrenset tid er det derfor ikke alt som kan gjennomgås, men det er skrevet noen forslag under til videre forskning.

Det er flere elementer som kunne blitt undersøkt, men noen ting er vanskeligere å gjennomføre enn andre. Et eksempel på dette er absorbert fukt. Etter samtale med Ola Skjølvold ble det fortalt at det å finne verdien for absorbert fukt kan være vanskelig. Dette er fordi metoden som brukes på sand, ikke er egnet for slam og det er vanskelig å finne ut av når slammet er overflate tørt.

Det vil også være vesentlig å finne en måte å kategorisere slammet det filtrerte slammet. Når betongtromlene blir rensset, er det ikke en sikker måte å vite at det som kommer i filterkakene alltid vil være likt. En mulighet her kunne være å teste slammet fra tromlene som inneholder samme resept, og se om disse vil inneholde de samme materialene.

Slammet inneholder flere ulike typer materialer, ettersom det er rester fra tidligere betongblandinger. Fra XRF analysen ser en at det inneholder ulike kjemiske stoffer. Det kan derfor være aktuelt å se på herdetiden til betongen. Dette er for å se om det er noen kjemisk reaksjons om kan ha en påvirkning på betongen.

7 Konklusjon

Hensikten med studien var å finne ut hvilke effekter betongslam vil ha på betongens støpelighet og styrke, dersom deler av sanden blir byttet ut med dette. Studiene viser at betongslam kan være aktuelt å bruke som erstatter for sand i enkelte tilfeller. For blandinger med små, mengder slam er det ikke store utslag på resultatene sammenlignet med original resepten. Testene for støpelighet har fått tilnærmet like verdier og trykkfastheten er på enkelte prøvelegemer blitt noe sterkere. Luftinnhold er den ene testen som har fått lavere verdi, men dette kan komme av andre faktorer enn av betongslammet.

For blandinger med større mengder slam er forskjellene i resultatene mer markante. Synkmålet er ikke vesentlig lavere enn originalen, men utbredelse er blitt betraktelig lavere. Dette indikerer en redusert støpelighet. Egenskapene til den herdede betongen er også blitt noe redusert. Det er usikkerhet rundt estimeringen av den absorberte fukten. Fremtidige studier bør derfor gjøre tester for å finne en bedre metode for dette. Om det er tilsetning av for mye vann som er grunnen til en lavere trykkfasthet, eller andre årsaker, vil være usikkert før en finner en bedre metode for estimering av absorbert fukt.

Fra sikteanalysen ser en at slammet består av store mengder partikler under 0,063 mm. Dette er en større andel fine partikler enn i sanden, og spiller derfor en vesentlig rolle for hvordan betongen opptrer. Med analyser fra bedriften og egne resultater på tester har gruppen fått bedre kjennskap til hva slammet består av. Studiene viser at det er potensial for å bruke betongslammet som erstatter. Videre studier anbefales for å konkludere på hvor mye slam som kan erstatte sand uten å påvirke betongen signifikant.

8 Bibliografi

1. Avfallsforskriften (2004) *Forskriften om gjenvinning og behandling av avfall (avfallsforskriften)* (FOR-2004-06-01-930) Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-930> (Hentet: 19 mai 2024)
2. Betong Fokus (u.å.) 6. *Alternative anleggsløsninger*. Tilgjengelig fra: <https://www.resirkulering.betongfokus.no/6-alternative-anleggsløsninger/> (Hentet: 19 mai 2024)
3. Canut, M. M. C. (2011). *Pore structure in blended cement pastes*. Dr.art. Danmarks tekniske universitet. Tilgjengelig fra: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/12598622/Mariana_Moreiras_phd_fra_a_Rosendals.pdf (Hentet: 19 mai 2024)
4. Dobiszewska, M., Schindler, A. K., & Pichór, W. (2018). Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition. *Construction and Building Materials*, 177, s. 222-229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.133>
5. Endr. i forurensingsforskriften (2022) *Forskrift om endring i forskrift om begrenning av forurensing (nytt kapitell om forurensing fra produksjon av betong)*. (FOR-2022-12-20-2410). Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/LTI/forskrift/2022-12-20-2410> (Hentet: 19 mai 2024)
6. Fagerlund, G. (2009). *Chemically bound water as measure of degree of hydration: method and potential errors*. (Report TVBM; Vol. 3150). Sverige: Lund University - Division of Building Materials. Tilgjengelig fra: <https://lucris.lub.lu.se/ws/files/3583346/1580156.pdf> (Hentet: 19 mai 2024)
7. Goldman, A. & Bentur, A. (1993) The influence of microfillers on enhancement of concrete strength, *Cement and concrete research*, 23 (4), s.962-972. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469390050J?via%3Dihub>

8. Heidelberg Materials (u.å) *Herdeteknologi*. Tilgjengelig fra:
https://www.sement.heidelbergmaterials.no/sites/default/files/assets/document/bb/11/herdeteknologi_lav.pdf (Hentet: 19 mai 2024)
9. Iffat, S. (2015) *Relation between density and compressive strength of hardened concrete*, 6(4), s. 182-189. Tilgjengelig fra:
<https://core.ac.uk/download/pdf/234103467.pdf> (Hentet: 20 mai 2024)
10. Jacobsen, S., Maage, M., Smeplass, S., Kjellssen, K. O., Sellevold, E. J., Lindgård, J., Cepuritis, R., Myrdal, R., Bjøntegaard, Ø., Geiker, M. m.fl. (2023). *Concrete Technology*. Trondheim: NTNU.
11. Kumar, A., Oey, T., Falzone, G., Huang, J., Bauchy, M., Balonis, M., Neithalath, N., Bullard, J., & Sant, G. (2017). The filler effect: The influence of filler content and type on the hydration rate of tricalcium silicate. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(12), 3316-3328. <https://doi.org/10.1111/jace.14859>
12. Lewis, R. C. (2018). Silica fume. In N. De Belie et al. (Eds.), *Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials* (RILEM State-of-the-Art Reports 25). Springer, s.99-121 https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_3
13. Maage, M. (2015) *Betong: Regelverk, teknologi og utførelse*. 1.utg. Byggenæringens Forlag AS
14. Miljødirektoratet (2022) *Betong- og teglavfall*. Tilgjengelig fra:
<https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/avfall/betong--og-teglavfall/> (Hentet: 19 mai 2024)
15. Moosberg-Bustnes, H., Lagerblad, B. & Forssberg, E. The function of fillers in concrete. *Materials and Structures* 37, 74–81 (2004).
<https://doi.org/10.1007/BF02486602>

16. NDLA (2020) *Laboratorieundersøkelse med brine*. Tilgjengelig fra:
<https://ndla.no/nb/subject:1:6951e039-c23e-483f-94bf-2194a1fb197d/topic:4a0c17f9-0d27-4ac7-99b2-6fb272b2d90c/resource:1:149007/266> (Hentet: 19 mai 2024)
17. Norge geologiske undersøkelse (2005) *XRF-analyser*. Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: https://www.ngu.no/lito/analyse_info_files/NGU_LAB_XRF_anal.pdf (Hentet: 19 mai 2024)
18. Smeplass, S. 2024. Concrete Proportioning. *TKT 4215 Betongteknologi 1*. Tilgjengelig fra: https://ntnu.blackboard.com/ultra/courses/_42056_1/cl/outline (Hentet: 19 mai 2024)
19. Statens vegvesen (2016) *Laboratorieundersøkelser*. Håndbok R210. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r210-laboratorieundersokelser-2016.pdf> (Hentet: 19 mai 2024)
20. Stokes lov (2021) *UIO – Institutt for biovitenskap*. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/s/stokes.html> (Hentet: 19 mai 2024)
21. Store norske leksikon (2019) *Pozzolan*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/pozzolan> (Hentet: 20 mai 2024)
22. Årtun, T., Nesse, N., Eide, I. B. (2023) *Sement*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/sement> (Hentet: 19 mai 2024)

9 Vedlegg

VEDLEGG A – Sikteanalyse og XRF av slam

VEDLEGG B – Forsøksmatrise

VEDLEGG C – Gjennomsnittlig tørrstoffinnhold i gjenbruksvann

VEDLEGG D – Resept fra Unicon

VEDLEGG E – Proporsjoneringsark

E.1 Fraksjon V med fiktiv siktekurve

E.2 Fraksjon V med riktig siktekurve

E.3 Sammensatt tilslag – blanding 1

E.4 Sammensatt tilslag – blanding 2 (med fiktiv siktekurve)

E.5 Sammensatt tilslag – blanding 3 (med fiktiv siktekurve)

E.6 Sammensatt tilslag – blanding 2 (med riktig siktekurve)

E.7 Sammensatt tilslag – blanding 3 (med riktig siktekurve)

E.8 Matriks ark

E.9 Resept ark

VEDLEGG F – Blandeskjema

F.1 Blanding 1

F.2 Blanding 2

F.3 Blanding 3

F.4 Blanding 1 (oppskalert)

F.5 Blanding 2 (oppskalert)

F.6 Blanding 3 (oppskalert)

VEDLEGG G – Metode slemmeanalyse

VEDLEGG H – Faktorer til slemmeanalyse

H.1 Z-faktor

H.2 K-faktor

VEDLEGG I – Slemmeanalyse

I.1 Verdier fra test 1 med siktekurve

I.2 Fiktive verdier for test 1 med siktekurve

I.3 Verdier fra test 2 med siktekurve

I.4 Fiktive verdier for test 2 med siktekurve

