Universitetet i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer Master i teknologi/siv.ing.	Vårsemesteret, 2019 Åpen / ~~Konfidensiell~~
Forfatter: Niang Ngaih Sian	……Niang Ngaih Sian…… (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså Veileder(e): Kjell Tore Fosså og Samindi Samarakoon	
Tittel på masteroppgaven: Optimalisering av miks proporsjonering for selvkomprimerende lettbetong Engelsk tittel: Optimization of mix proportions for self compacting lightweight concrete	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Selvkomprimerende lettbetong/SKB Miks proporsjonering Kostnad	Sidetall: 38 + vedlegg/annet: 22 Stavanger,14.06.2019

Forside for masteroppgave
Det teknisk-naturvitenskapelige fakultet

OPTIMALISERING AV MIKS PROPORSJONERING FOR SELVKOMPRIMERENDE LETTBETONG

Niang Ngaih Sian

Veiledere

Kjell Tore Fosså

Samindi Samarakoon

14.06.2019

Universitet i Stavanger

Forord

Denne masteroppgaven er det avsluttedet arbeidet for 2-årig masterstudiet innen konstruksjoner og materialer med fordypning i byggkonstruksjoner ved Universitet i Stavanger. Oppgaven er veiledet av Professor Kjell Tore Fosså og Samindi Samarakoon.

Masteroppgaven består av både teoretisk og praktisk arbeid som går ut på å utforske selvkomprimerende lettbetong og finne en optimalisert prøveblanding for den.

Det var både utfordrende og spennende prosjekt og ikke minst lærerikt. Jeg vil takke alle som har gitt råd og hjulpet med både det teoretiske og praktiske arbeidet. Spesielt takk til veileder Professor Kjell Tore Fosså og Samindi Samarakoon for god veiledning og oppfølgning gjennom hele prosjektet. Jeg ønsker også å takke til Jarle Berge og Samdar Kakay for hjelp med støping og testing.

Niang Ngaih Sian

Stavanger, 14.06.2019

Sammendrag

Kunnskap innen moderne betongteknologi vokser stadig og har ført til nyere innnovasjoner, slik som selvkomprimerende betong (SKB) og lettbetong (LB). Disse bidrar til redusering av egenvekt til konstruksjoner og forbedre støpeligheten. Den lave egenvekten til lettbetong gjør at den egner seg til bruer og offshorekonstruksjoner, blant annet har den også god varmeledningsevne. Selvkomprimerende betong har derimot egenskaper som gjør at den flyter ut lettere inn i formene og gjennom tette armeringer uten noe behov for mekanisk vibrasjon. Fordelene til disse to typer betong har bidratt til utvikling av selvkomprimerende lettbetong (SKLB).

I denne oppgaven, er det utarbeidet optimalisert prøveblanding for ulike selvkomprimerende lettbetong. Optimalisering av prøveblanding for SKLB blir gjort med tanke på å redusere sementkostnaden. Siden SKLB er en type SKB, er det benyttet Partikkel-Matriks modellen for proporsjonering av SKLB. Det ble proporsjonert totalt 10 prøveblandinger og prøvestykkene ble testet for trykk, spaltestrekk og E-modul. Resultater fra testene til SKLB ble sammenlignet resultater fra referansebetongen.

Testresultatene viser at man kan produsere SKLB med omtrent lik fasthet som vanlig SKB ved lik v/c-tall på 0,45. Det viser også seg at det er nødvendig med økt matriksmengde for at selvkomprimerende lettbetong skal få god stabilitet for å unngå separasjon. Fordelen med SKLB er at man kan redusere vekten til betongen, men kostnaden for produksjonen av SKLB blir da dyrere sammenlignet med for vanlig SKB.

Abstract

Knowledge in modern concrete technology is constantly growing and has led to new innovations, such as self compacting concrete (SCC) and lightweight concrete (LC). These contribute to the reduction of the structures self-weight and improve the workability. The reduced weight of using lightweight concrete makes it suitable for bridges and offshore constructions and also has good thermal conductivity. Self compacting concrete, on the other hand, has proporties that make it flow out more easily into the molds and through dense reinforcements without the need for mechanical vibration. The advantages of these two types of concrete led to the development of self compacting lightweight concrete (SCLC).

In this project, optimization of mix proportions for various self compacting lightweight concrete has been prepared for. Optimization of mix proportions for SCLC can be done by reducing the cementcontent which will lower the cost. Since SCLC is a type of SCC, the Particle Matrix model is used for proportioning the SCLC. A total of 10 sample mixtures were proportioned and the specimens were tested for compressive strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity. Results from the tests for SCLC were compared with the results from the reference concrete.

Based on the testresults, it can be shown that SCLC can be produced with approximately equal strength as normal SCC at equal water and cement ratio of 0.45. It also turns out that it is necessary to increase the amount of matrix in order for self compacting lightweight concrete to obtain a good stability for to avoid the separation. The advantage of SCLC is that one can reduce the weight of the concrete, but the cost of production for SCLC will then be more expensive compared to the ordinary SCC.

Innhold

Figurliste **IV**

Tabelliste **V**

1 Innledning **1**

2 Litteraturstudie **2**

2.1 Selvkomprimerende lettbetong (SKLB) 2

2.1.1 Lettbetong 2

2.1.2 SKB 3

2.2 Egenskaper 4

2.3 Letttilslag 4

2.3.1 Egenskaper 5

2.3.2 Leca 7

2.3.3 Stalite 8

3 Proporsjonering **9**

3.1 Partikkel matriks modell 9

3.1.1 Matriksegenskaper 10

3.1.2 Partikkelfase 10

3.2 Effekt av matriksvolum 11

4 Metoder **13**

4.1 Blanding av betong 13

4.2 Støping 14

4.3 Fuktmåling 14

4.4 Utbredningsmål 15

4.5 Absorpsjon 16

4.6 Luftmåling 16

4.7 Densitet 17

4.8 Testmetoder 18

4.8.1 Trykkfasthet 18

4.8.2 Spaltestrekkfasthet 19

4.8.3 Elastisitetsmodul 19

5 Miks proporsjonering **20**

5.1 Fremgangsmåte for proporsjonering 20

5.2 Materialdata 20

5.2.1 Fuktmåling 22

5.2.2 Korngradering 22

5.2.3 Valg av matriksvolum 23

5.3 Betongresept 24

6 Kostnader **26**

6.1 Leca 26

6.2 Stalite 26

6.3 Oversikt over materialkostnader 26

6.4 Pris for betong 27

7 Resultater og Diskusjon **29**

7.1 Egenskaper til fersk betong 29

7.1.1 Synkutbredelse 29

7.1.2 Densitet 30

7.1.3 Luftinnhold 30

7.2 Egenskaper til herdet betong 31

7.2.1 Densitet 31

7.2.2 Trykkfasthet 31

7.2.3 Spaltestrekkfasthet 32

7.2.4 E-modul 32

8 Sammenligning **33**

8.1 Fasthet 33

8.2 Støpelighet 34

8.3 Densitet 34

8.4 Kostnad 35

9 Avslutning **36**

9.1 Konklusjon 36

9.2 Feilkilder 36

9.3 Futher study 36

Referanser **37**

Vedlegg **i**

A Testresultater **ii**

A.1 Trykkfasthet ii

A.2 Spaltestrekkfasthet iv

A.3 E-modul vi

B Proporsjonering **viii**

B.1 Vannabsorpsjonstest for leca viii

B.2 Korngradering av Stalite ix

B.3 Korngradering av Leca xi

C Resepter **xiii**

C.1 Referansebetong, SCC xiii

C.2 SCLC-L3 xvi

C.3 SCLC-L4 xviii

C.4 SCLC-S3 xx

D Produktbeskrivelse for Leca 3-6 mm **xxii**

Figurer

1 Bruddutviklingen hos tilslag i LB og ND 3
2 Ulik fukttilstand i tilslag[10] 6
3 Lecakuler [12] 7
4 Stalite[13] 8
5 Partikkel-Matriksmodell [7] 9
6 Forskjellen i materialinnhold hos SKB og ND 11
7 Relasjon av synkutbredelse og matriksvolum [7] 11
8 Blandemaskin 13
9 Sylinder og terning form 14
10 Synkutbredelse måling [14] 15
11 Karakteristisk trykkfasthet for lettbetong [4] 18
12 Spaltestrekk brudd 19
13 Siktekurve for Leca 22
14 Siktekurve for Stalite 23
15 Proporsjonert betong for SCC 25
16 Kostnad for de ulike betong (kr/m^3) 27
17 Mengde av materialer brukt i de ulike betong 34

Tabeller

1 Verdier for flytmotstanden, λ_Q [7] 10
2 Produktbeskrivelse for Stalite 21
3 Produktbeskrivelse for Leca 21
4 Prøveplan for proporsjonering 23
5 Proporsjonert betong for SCC 24
6 Miks proporsjonering 25
7 Oversikt over materialkostnader 27
8 Resultat av synkutbredelse 29
9 Densitet i fersk betong 30
10 Densitet i herdet betong 31
11 Resultat av trykkfasthet 31
12 Resultat av spaltestrekkfasthet 32
13 Resultat av E-modul 32
14 Fasthet for ulike betong 33
15 Densitetsforskjell 35
16 Prisforskjell 35

1 Innledning

Betong er den mest kjente byggemateriale i verden. Den er en blanding av grus, sand, sement, vann, tilsetningsstoffer og mineraltilsetninger slik som pozzolaner. Circa 70% av totale volumet består av fin og grov tilslag mens 30% er av sementpasta[1]. Betong kan formes etter ønskede egenskaper basert på ulike type og mengde materialer som tilsettes. I og med at betong er den mest kjente og brukte byggemateriale, er den derfor i stadig utvikling. Den moderne betongteknologien har ført til introduksjonen av ulike typer betong, slik som lettbetong (LB), selvkomprimerende betong (SKB) og selvkomprimerende lettbetong (SKLB) som er en kombinasjon av LB og SKB.

Lettbetong har vært benyttet som konstruksjonsmateriale i flere tiår. Den er kjent for å redusere egenvekten til konstruksjoner ved at den redusere tversnittsarealer til betongelementer[2]. Bruk av LB vil da være kostnadsbesparende med tanke på produksjon og transport av prefabrikkerte betongelementer. SKB derimot er har gode egenskapsfordeler som gjør at flyter under sin egenvekt og fyller inn i formene uten at det er hebov for mekanisk vibrasjon. Konstruksjoner med lange spenn, høye bygninger og områder der det er dårlig fundament forhold egner seg derfor å benytte LB og SKB.

Selvkomprimerende lettbetong (SKLB) er nytt i betongverden. Det er forventet at denne type betong vil være mer flytende og gir lavere densitet. Tidligere studie har funnet ut at for land som blir påvirket av seismiske laster, vil da SKLB være en god alternativ til å benytte da den gir god motstand mot seismisk laster[3]. Foreløpig er det få studier som er blitt gjort for SKLB. Det er derfor av interesse om å studere på denne typen kombinasjonsbetong.

Fokuset til oppgaven er å lage en optimalisert betongresept for SKLB ved å redusere sementmengden samtidig oppnå høy fasthet også sørger for at separasjon unngås. Det vil bli proporsjonert en referansebetong som SKLB skal sammenlignes med. Leca og Stalite er to typer letttilslag med forskjellige egenskaper som blir benyttet for proporsjonering av SKLB. Egenskaper hos fersk og herdet SKLB vil bli studert og diskutert. Oppgaven vil også se på totale materialkostnader for produksjon av SKLB.

2 Litteraturstudie

2.1 Selvkomprimerende lettbetong (SKLB)

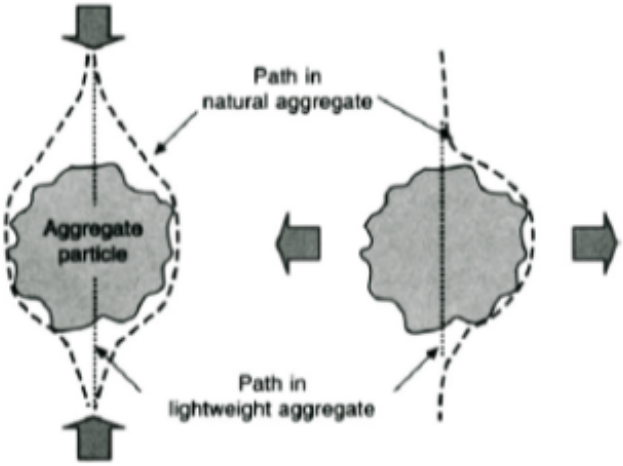
Selvkomprimerende lettbetong, nærmere bestemt som SKLB er en type selvkomprimerende betong som inneholder lett tilslag. Dermed vil SKLB være betong som er lettere og mer flytende enn SKB[3]. For bedre forståelsen av SKLB, vil det bli utarbeidet litteraturstudie om LB og SKB.

2.1.1 Lettbetong

I følge Eurokode 2, defineres lettbetong med densitet under 2200 kg/m^3 [4]. På samme måte som normal densitets betong består også lettbetong av sand, grus, sement, vann og tilsetningsstoffer. Forskjellen er at lettbetong inneholder tilslag som er lettere enn vanlig tilslag. Letttilslag kan være av ekspandert leire, ekspandert skifer eller pulverisert aske fra olje og kullfyrte kraftverk [5]. Produksjonen av letttilslag resulterer at det danner seg luftporer. Det er luftporene hos letttilslagene som forårsaker den lavere vekten og styrken. Lettbetong er ikke noe nytt i betongverden, og har blitt kjent og benyttet for første gang for 2000 år siden[6]. De mest kjente konstruksjoner bygget med lettbetong var under det romerske imperiet. Disse er Port of Cosa, Pantheon templet og Colosseum[5]. Fastheten og densitet til lettbetong er stort sett styrt av egenskaper til letttilslaget. Derfor jo høyere fasthet til betongen man ønsker å oppnå jo høyere styrke må tilslaget ha. Det er angitt fasthetsklasser for lettbetong som rangerer fra LC15-LC85[4].

Egenskaper

Slik det er forklart ovenfor, er fastheten avhengig av egenskaper til letttilslaget. Andre faktorer som påvirke fastheten er styrken til mørtelen, v/c-tallet og bindingene mellom sement og tilslaget. Hos LC har mørtel og tilslag like styrke- og stivhetsegenskaper. Dette resulterer at spenningene som oppstår får en jevn fordeling i mørtel og tilslag. Dermed blir kontaktsonen mellom disse to mindre kritisk[5]. Bruddlinjen vil da gå gjennom tilslaget istedetfor at den går rundt tilslagskornet som er hos normal betong, slik det er vist på figur 1. Tilslagets og mørtelens styrke og stivhet blir da funksjon for trykkfastheten i lettbetong. Fasthetsutviklingen hos lettbetong skjer ganske raskt enn hos normalbetong. Dette gjelder for eksempel for høyfast lettbetong vil klare å oppnå 90% av 28døgnsfastheten allerede etter 7 dager sammenlignet med normalbetong som vil kun oppnå 40% [5].



Figur 1: Bruddutviklingen hos tilslag i LB og ND

Figur 1 viser typisk bruddutvikling hos tilslaget i lettbetong og hos normalbetong. På grunn av det gode forholdet mellom styrke og densitet, egner det seg derfor å benytte lettbetong for konstruksjoner hvor man ønsker lavest mulig vekt. Dette gjelder for eksempel bruer med lange spenn og høye bygninger. Andre fordeler med lettbetong er at den har lavere varmeledningsevne, gode isolasjonsegenskaper og god mostand mot brann. Strekkfasthet er en viktig faktor generelt for betong med tanke på brudd. På samme måte som for trykkfasthet, vil også strekkfasten være påvirket av de samme faktorene.[6].

2.1.2 SKB

Selvkomprimerende betong kan beskrives som en matriksdominert betong, det vil si at betongen har en stor og relativt viskøs matriksfase, og effekten av partikkelinterferens er liten[7]. Matriksvolumet er derfor større hos SKB enn normal betong, ofte høyere enn 340 l/m^3 ved proporsjonering. SKB karakteriseres med synkutbredelse som er større enn 650 mm[8]. Synkutbredelsen beskriver støpelighetegenskapen til SKB. Ofte er SKB produsert med lav v/c-tall, hvor det er høyt innhold av sement for å unngå separasjon og få tidlig fasthet som mulig. Normalt er SKB beskrevet med en materialmodell som kalles Partikkel-matriks modell (PM-modell) [8]. PM-modellen vil bli nærmere beskrevet i kapittel 3.

2.2 Egenskaper

Siden SKLB inneholder lett tilslag, vil egenskaper til SKLB være avhengig av letttilslaget som for vanlig LB. Basert på tidligere studier har vist at SKLB klarer å oppnå høy tidlig fasthet, opptil 60% av 28døgnsfasthet allerede etter 3 dager og 80% av fastheten etter 7 dager[3]. Sammenligning av trykkfastheten for SKB og SKLB viser tydelig at SKLB har tendens til å etablere høyere tidlig fasthet. Årsaken til dette er den høye sementinnholdet, som gir lav vann-bindemiddel forhold enn det er hos SKB. For v/b-forhold på 0.40, er fastheten hos SKLB og SKB mye høyere enn normalbetong rundt 20MPa høyere[9]. På grunn av letttilslag har tendens til å flyte opp i en betongblanding, har tidligere forsøk funnet ut at det kreves høyt sement innhold opptil 500-600 kg/m^3 for å unngå separasjon hos fersk betong [9]. Stivheten til SKLB er også lavere som medfører at E-modulen vil da blir mye lavere sammenlignet med SKB, omtrent 60-85% [3].

2.3 Letttilslag

Letttilslag deles inn i to hovedgrupper:

1. Tilslag som er naturlig forekommende. Dette er for eksempel vulkanske mineraler som blir dannet etter et vulkanskutbrudd.

2. Naturlige materialer, industrielle biprodukter og resirkulerte materialer, hvor disse produseres gjennom varmebehandling. Perlitt, skifer og leire er eksempler på naturlige mineraler. Resirkulerte materialer kan være slagg og pulverisert flyveaske.

Naturlige materialer er det mest brukte tilslaget. Produksjonsprosessen for materialer som må fremstilles gjennom varmebehandlingen er lik for alle. Materialer blir varmet opp i en roterende ovn ved høy temperatur, hvor de blir etterhvert ekspandert og avkjølt. På grunn av denne typen varmebehandlingprossessen, får letttilslag den porøse strukturen og har derfor relativt lav partikkeldensitet.

De mest brukte letttilslagene i Norge er Leca, Liapor, Lytag og Stalite[5].

2.3.1 Egenskaper

Bruk av ulike typer lettvektstilslag har betydning for egenskapene til betong i både fersk og herdet tilstand. Faktorer som påvirker egenskapene til betongen er blant annet:

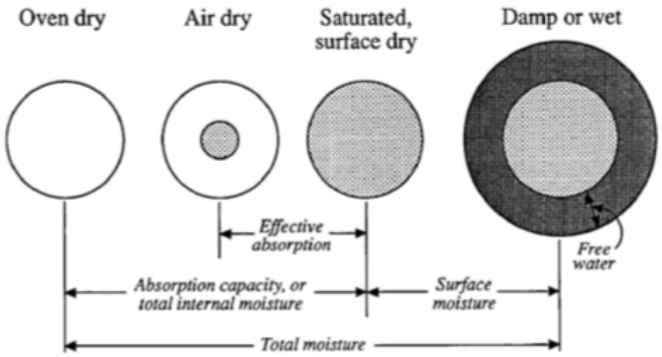
- Partikkelform og overflatestruktur
  Tilslagene kan være i form enten av kubisk, avrundet eller kantet og ha overflatestrukturer som er glatte med små eksponerte porer til store eksponerte porer. Fine og grove tilslag kan påvirker proporsjonering av betongblanding i faktorer som støpelighet, sand/grus andel, bindemiddelforhold, mengden vanninnhold og pumpbarhet[6].

- Densitet
  Den cellulære porestrukturen til letttilslaget gir lavere vekt og dermed får betong med letttilslag lavere densitet[6].

- Styrken til letttilslag
  Slik som partikkelform og overflatestruktur varierer med type og kilde den kommer fra, varierer også styrken på grunn av disse. Jo høyere styrken til tilslaget desto høyere fasthet får betongen.

- Absorpsjon og fuktinnhold
  Letttilslaget har evnen til å absorbere mer vann enn for normaltilslag, hvor porestrukturen er årsaken for dette. Ifølge standarden til American Society for Testing and Materials, ASTM C 127, kan lettvektstilslag absorberer fra 5-25% av tørr vekt, avhengig av poresystemet til tilslaget. Normaltilslag kan derimot absorbere mye mindre, under 2% av fuktighet. Men fuktinnholdet til normaltilslag er relativt høyt, ca.5-10%. Forskjellen av fuktighetsinnholdet hos letttilslag og normaltilslag er at letttilslag absorbere både i det indre av partiklene og på overflaten, mens normaltilslag absorbere kun på overflaten.[6].

Figur 2 viser ulike tilstand av fukt hvor tilslag kan være i.



Figur 2: Ulik fukttilstand i tilslag[10]

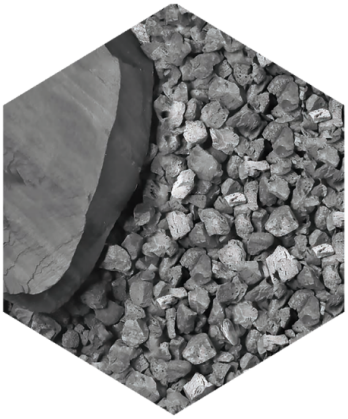
2.3.2 Leca

Navnet Leca er en forkortelse for *Light Expanded Clay Aggregate* og er lettilslag som er fremstilt av leire. Leca kjennetegnes ved at de har runde form og er porøse på innsiden men hardt på det ytre skallet[11]. Siden 1917 har Leca blitt produsert i USA og i Skandinavia siden 1930-årene[12]. Leca produseres i Norge og er dermed en kortreist byggevare. Produksjonen av Leca foregår på Leca-fabrikken i Rælingen, nær Lillestrøm. Materialet som Leca i Norge er laget av norsk leire fra leirfelter i Enebakk i Akershus[11]. Tilslaget Leca er en av de mest vanlige letttilslagene i Norge, sammen med Liapor som er laget av myk leirskifer. Den typen industrielle produksjonen for Leca gjør det mulig å styre egenskaper till lettvekttilslaget og dermed mulig å fremstille Leca i forskjellige klasser. Leca klassifiseres etter bulk densiteten i kg/m^3, og finnes i størrelsesorden fra 2 mm og opp til 32 mm. Figur 3 viser lecakuler i forskjellig størrelser.

Figur 3: Lecakuler [12]

2.3.3 Stalite

Stalite er en type lettvektstilslag som er fremstilt av leirskifer som er blitt knust og ekspandert i roterovn ved temperatur ca.1200 grader. Dette tilslaget er produsert i Nord Carolina i USA. I Norge ble dette produktet benyttet for første gang i 1997 på hovedspennet på Raftsundet bru[5]. Forskjellen mellom de ulike råmaterialer klassifiseres etter styrke, tetthet og absorpsjon. Absorpsjontest etter 24timer viser at stalite har kun 6% sammenlignet med leire som har mellom 15 til 30%. Selv under blanding og pumping er absorpsjonstyrke for Stalite på 9%, mens for leire kan blir så høy som 50%[13]. Den høye materialstyrken til stalite gjør at det kan oppnås høy fasthet med lavere sementinnhold og er dermed økonomiskeffektivt. Figur 4 viser typisk stalite tilslag.



Figur 4: Stalite[13]

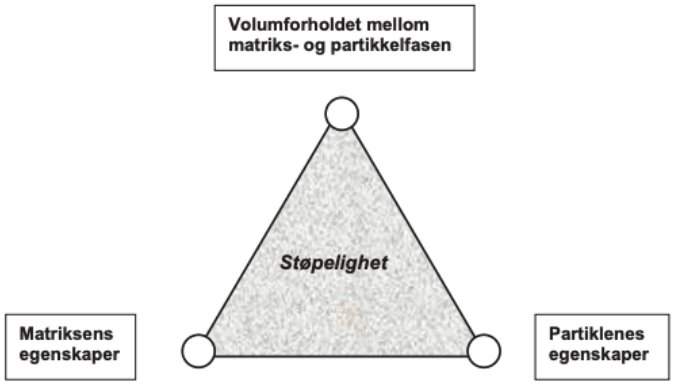
3 Proporsjonering

Proporsjonering av betong går ut på å bestemme hvilke type og mengde materialer som trengs og hvordan de skal blandes sammen, dette for å oppnå ønsket kvalitet på betongen. En betongresept består ofte av 7-8 delmaterialer[7]. Krav til trykkfasthet og bestandighet blir først og fremst bestemt før man skal velge delmaterialene.

Som nevnt tidligere, er SKLB en type selvkomprimerende betong og kan derfor proporsjoneres på samme måte som for vanlig SKB. Det finnes varianter av metoder for proporsjonering av SKB, hvor Partikkel-Matriksmodell er en av disse. Det er denne modellen som blir benyttet i oppgaven. Partikkel-Matriksmodell, også kalt PM-modell, er en type materialmodell som er veldig kjent og ofte blir benyttet i Norge for proporsjonering av blant annet SKB.

3.1 Partikkel matriks modell

PM-modell er en forenklet modell som beskriver egenskaper til fersk betong, samtidig også proporsjonering. Materialer i PM-modell er delt inn i to faser, hvor de kalles for matriksfase og partikkelfase. Matriksfasen inneholder alle faste materialer med partikkel størrelse mindre enn 0,125mm, dette inkluderer sement, silikastøv, tilslagets filler og fritt vann. Matriksfasen blir ofte beskrevet som tungflytende væske som omslutter partikkelfasen og fyller alle hulromene. Partikkelfasen inneholder materialer med størrelse større enn 0.125 mm og absorbert vann i tilslag. PM-modellen beskriver da den volumforholdet mellom disse to fasene. Figur 5 viser at betongens konsistens vil være styrt av volumforholdet mellom matriks- og partikkel fasen.



Figur 5: Partikkel-Matriksmodell [7]

3.1.1 Matriksegenskaper

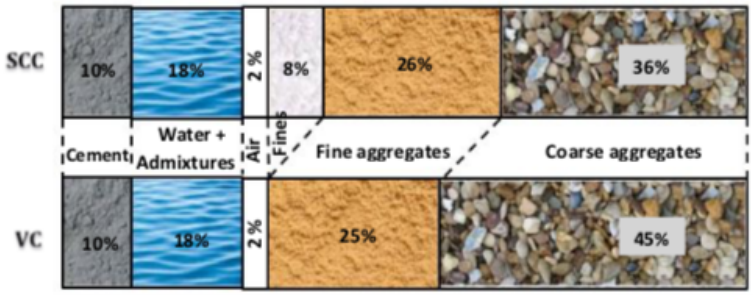
Siden matriksen er en tungflytende væske, blir den karakteriseres med hensyn på dens strømnings-egenskaper. Matriksen måles ved hjelp av testutstyr som kalles FlowCyl. Flowcyl er et kort rør med en trang åpning i den ene enden, og man fyller matriksen i røret og måler strømmen ved hjelp av en elektronisk vekt som er koblet til en datamaskin[7]. Den målte strømmen blir deretter blir sammenlignet med den teoretiske væskestrømmen. Man får en flytmotstand som er definert som den gjennomsnittlige forholdet mellom strømningstapet hos den målte væske og teoretisk væske-strøm hos den ideelle væske. Jo nærmere verdien ligger mot 1, jo tyngere er væsken. Tabell 1 viser typiske verdier for flytmotstanden for de forskjellige materialene, og man ser at matriksen i SKB har størst flytmotstand med andre ord stort matriksvolum.

Tabell 1: Verdier for flytmotstanden, λ_Q [7]

Materiale	λ_Q
Vann	$\approx$ 0,06
Matriks i M60-betong	0,30 - 0,40
Matriks i M40 / MF40-betong	0,50 - 0,60
Matriks i SKB	0,55 - 0,75

3.1.2 Partikkelfase

Partikkelfasen er som nevnt tidligere, består av partikler med størrelse over 0,125 mm og vann som er absorbert i partikkelen eller tilslaget. Egenskaper til partikkelfasen bestemmes av tilslagets gradering, kornform, og friksjon mellom partiklene. For et SKB betong, er partikkelfriksjonen vanligvis liten, da SKB er flytende og matriksvolumet er større. For proporsjonering av SKB er det typisk å bruke matriksvolumet fra 330-360 l/m^3 [7]. Man tilsetter ofte ekstra fin stoff også kalt filler for å få det store matriksvolumet, slik figur 6 viser.

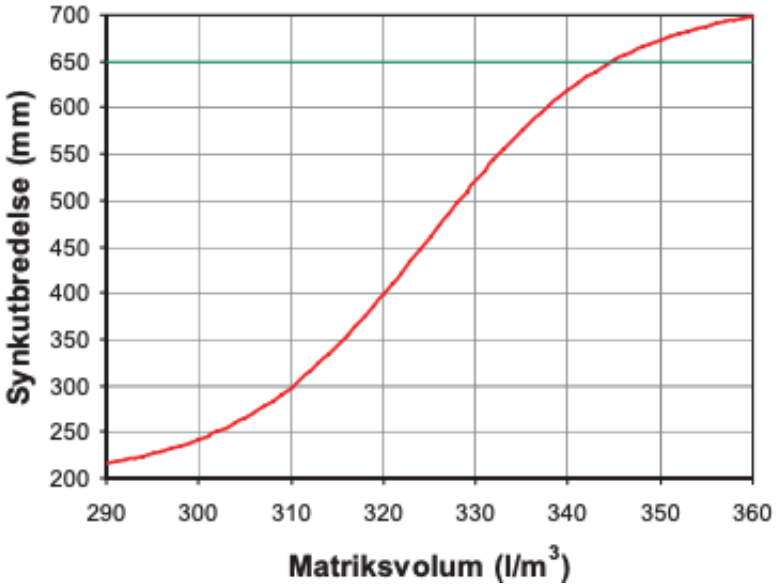


Figur 6: Forskjellen i materialinnhold hos SKB og ND

[14]

3.2 Effekt av matriksvolum

Betongens støpelighet vil være påvirket av matriksvolumet. Støpelighet til betong forteller om hvor lett betongen vil flyter ut uten at det separeres. Et stort matriksvolum er med på å øke avstanden mellom tilslagspartiklene og fører til at friksjonen mellom tilslagene reduseres. Dette fører til at tilslagsegenskaper slik som kornform får mindre innflytelse på betongens støpelighet. Dermed er betongens støpelighet vil da være styrt av matriksen eller kalt sementpasta. Betong med stort matriksvolum betyr at betongen er matriksdominert [7]. Figur 7 viser sammenhengen mellom matriksvolumet og betongens støpelighet for en selvkomprimerende betong. Helningen på kurven er bestemt av flytmotstanden til matriksen. For matriks med høyt flytmotstand og partikkelsystem med lavt hulromsvolum vil få en langstrakt kurve tilsvarende på bildet. Den grønne streken representere at synkutbredelse på 650 mm, kan man karakterisere betong som selvkomprimerende.



Figur 7: Relasjon av synkutbredelse og matriksvolum [7]

Man kan benytte kurven ved bestemmelsen av matriksvolumet for å få ønsket støpelighet med andre ord synkutbredelsen. I oppgaven vil det bli studert om det er mulig å oppnå god støpelighet ved lav matriksvolum, som kan bidrar til redusert sementmengde. Selvom denne kurven er egnet for klassifisering av støpelighetsegenskapene, er det vanskelig å vite om stabiliteten til betongen. Dette vil fører at det blir vanskelig å kontrollere om det har skjedd separasjon i betongen. Betongens evne til å separere er en stor hindring hos støping av selvkomprimerende betong.

4 Metoder

I dette kapitlet presenteres de praktiske og teoretiske metodene for å løse problemstillingen.

4.1 Blanding av betong

Det ble benyttet forskjellig blandemaskin på grunn av blandevolumet varierer fra 8 liter og opptil 50 liter. Materialer veies basert på blandeskjemaet før de gjøres klar til blanding.

Blandeprosedyre er på følgende måte:

- Sand, sement, flyveaske og tilslag ble tørrblandes i ett minutt.
- Deretter tilsettes cirka halvparten av vann pluss superplastiserendestoff i 2 minutter.
- Mikseren skrues av og henstilles i 5 minutter.
- Etter det tilsettes resten av væsken og blandes i cirka ett minutt. Mer tilsetning av superplastiserende ved behov.

Figur 8: Blandemaskin

Figur 8 viser blandemaskinen som ble brukt for miksing av blandevolum på 8-10 liter. Ulike blandemaskin med ulike hastigheter kan ha påvirkning på konsistensen til betongblandingen.

4.2 Støping

For hver blanding, er det planlagt å støpe 3 terninger på størrelse 100x100x100mm. Terninger skal brukes for å sammenligne trykkfastheten mellom SCLC og referansebetongen, SCC. For å teste spaltestrekkfasthet og E-modul, blir sylinder med diameter 150mm og høyde 300mm benyttet. For blandevolum på 50liter blir det støpt 6 sylindere per blanding, og for blandevolum på 8-10liter blir det støpt kun en sylinder per blanding for å teste spaltestrekkfasthet. Prøvestykkene ble avformet etter 24timer og legges i vann for 28døgn for herdning før de ble testet. Metoder for testing av mekaniske egenskaper og støpeligheten er nærmere beskrevet i delkapittel 4.8. Figur 9 viser stålform av sylinder og terning som ble brukt for støping av betong.

Figur 9: Sylinder og terning form

4.3 Fuktmåling

Fuktinnhold hos de ulike tilslagene måles før man skal gjennomføre blandingprosessen. Dette for å kontrollere at det er i samsvar med det som står i proporsjoneringsarket. For å måle fuktinnhold blir det benyttet Speedy Moisture Tester.

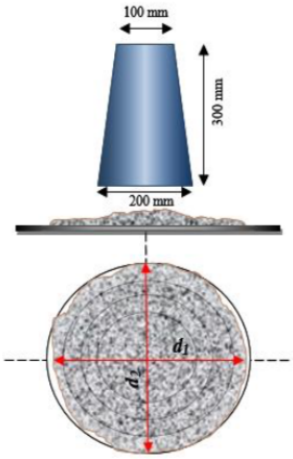
- Rengjør testeren grundig både innsiden og utsiden.
- Veie materiale som man ønsker å finne fuktinnholdet til. Materiale veies til man oppnå riktig vekt.

- Plassere materiale i beholderen, deretter Speedy reaktanten og skruer lokket. Viktig å holde testeren i horisontal posisjon når man tilsetter reaktanten slik at reaktanten og materiale ikke kommer i kontakt med hverandre.
- Speedyen ristet kraftig i ca.5 sekunder i retning som står på brukermanualen. Ristet totalt 3 ganger.
- Fuktinnholdet leses.

4.4 Utbredningsmål

Synkutbredelsen blir målt for å sjekke flytbarheten og gir rask indikasjon på konsistensen av støpeligheten til betongen. Testen ble utført etter standard *NS-EN 12350-5: Utbredningsmål* [15]. Metoden går ut på at man plassere en kjeglen med høyde 200mm på fallbordet på et horisontalt underlag. Kjeglen blir da fylt med betong og deretter løftes kjeglen forsiktig. Betongen vil da flyter ut horisontal på underlaget i form av sirkel. Det blir målt det største utbredningen av betongen i to retninger, d_1 og d_2, vist på figur 3.2. Verdien for synkutbredelsen blir da gjennomsnittet av disse [15].

$$SU = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$$



Figur 10: Synkutbredelse måling [14]

Under testen, sjekker man om betongen er blitt separert. Dette ved å se om det danner seg en ring av sementpasta som går flere millimeter ut over tilslaget [15].

4.5 Absorpsjon

Gjennomføring av absorpsjonstest for letttilslag er utført etter standard *NS-EN 1097-6: Prøvingsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag. Del 6: Bestemmelse av korndensitet og vannabsorpsjon* [16]. På grunn av letttilslag har porøs struktur, må det hensyntas hvor mye tilslag vil absorbere ved blanding med vann. Mengden fritt vann i blandingen vil varierer med fuktinnhold og absorpsjonsegenskaper til tilslaget. I denne oppgaven blir det gjennomført absorpsjonstest basert på 1 time.

Prosedyre for gjennomføring av absorpsjonstest:

- Velge mengden tilslag som skal veies.
- Fyller målekolben med tilslag og vann. Vannnivået og vekten av tilslaget pluss vann registreres.
- Etter 1time, ristes målekolben forsiktig for å fjerne luftboblene. Deretter fyller man vann opptil vannnivået som blir registrert tidligere og registrere ny vekt.

Verdier som man har brukt og funnet ut under testen, brukes videre til å finne ut absorpsjonsverdien ved hjelp av formelen:

$$a[\%] = \frac{(C - B)}{A}$$

, hvor A=vekt av tilslag, B=vekt av tilslag og vann, C=vekt av tilslag og vann etter oppfylling

4.6 Luftmåling

For å måle luftinnholdet i fersk betong blir det benyttet en trykkmåler. Prosedyren for luftmåling blir utført i henhold til standard *NS-EN 12350-7: Prøving av fersk betong Del 7: Luftinnhold Trykkmetoder*.

4.7 Densitet

Det blir målt densitet for betong i både fersk og herdet tilstand.

Fersk betong: For fersk betong, er fremgangsmåten slik at betongen fylles i en beholder med kjent volum og vekten registreres [17]. Densiteten ble regnet ut etter formelen:

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

,hvor D=densitet av fersk betong i kg/m^3, m_1= massen til beholder i kg, m_2= massen til beholder pluss fersk betong i kg, V=volum til beholder i m^3.

Herdnet betong: Måling av densitet i herdet betong ble utført etter standard *NS-EN 12390; Prøving av herdnet betong – Del 7: Densitet av herdnet betong.*[18] Terninger med jevn overflate som blir brukt for å måle densiteten har et volum på 0,001m^3, mens for terninger med ujevn overflate blir volumet bestemt etter formelen:

$$V = \frac{m_a - m_w}{\rho_w}$$

,hvor m_a=massen av prøvestykke i luft, m_w=massen av prøvestykke i vann, ρ_w=vannets densitet lik 998 kg/m^3.

Massen kan bestemmes i tre tilstander; 1) som levert, 2) vannmettet og 3)ovnstørr. I oppgaven er det brukt massen i vannmettet tilstand. Massen og volumet bestemmes, før man regner ut densiteten etter følgende formelen:

$$D = \frac{m_a}{V}$$

, hvor m_a=massen av prøvestykket i bestemt tilstand, i kg, og V= volumet i m^3

Den målte densiteten vil bli kontrollert mot den teoretiske densiteten fra proporsjoneringsarket.

4.8 Testmetoder

4.8.1 Trykkfasthet

Terninger blir testes for trykk for å bestemme trykkfastheten til betongen. De ble testet etter *NS-EN 12390; Prøving av herdnet betong – Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet.*[19] Det ble brukt en datastyrt testmaskin. Terninger ble plassert sentrisk i maskinen med støpesidene vekk fra pålastningsflaten for at lasten som påføres skal påvirker på den glatte overflaten. Betongen blir belastet helt til den går til brudd. Bruddlasten avleses og brukes videre for å finne trykkfastheten.

Trykkfastheten ble regnet ut etter formelen:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

,hvor f_tc=trykkfasthet i MPa, F= bruddlast i *Newton*, A_c=tverrsnittsarealet på prøvelegemet som trykkkraften virker mot, i mm^2

Fasthetsklasse NS	LB12	LB20	LB25	LB30	LB35	LB45	LB55	LB65	LB75
CEN-betegnelse	LC12/13	LC20/22	LC25/28	LC30/33	LC35/38	LC45/50	LC55/60		
Karakteristisk sylinderfasthet f_{cck}	12	20	25	30	35	45	55	65	75
Karakteristisk terningfasthet f_{ck} [1)]	13	22	28	33	38	50	60	72	83
[1)] Andre verdier kan benyttes hvis forholdet mellom disse og referansefastheten for sylindere er etablert med tilstrekkelig nøyaktighet og dokumentert for den aktuelle betongsammensetningen									

Figur 11: Karakteristisk trykkfasthet for lettbetong [4]

Figur 11 viser karakteristisk terningsfasthetsklasse for lettbetong. Fasthetsklassen varierer med for lettbetong sammenlignet med normaldensitetsbetong.

4.8.2 Spaltestrekkfasthet

Sylinderne ble brukt til å bestemme spaltestrekkfastheten. Testen blir gjennomført i henhold til standard *NS-EN 12390; Prøving av herdnet betong - Del 6: Prøvelegemers spaltestrekkfasthet*[20]. Det blir brukt samme type testmaskin for testing av spaltestrekkfasthet som for trykkfasthet. Sylindere blir plassert sentrisk i prøvemaskinen ved hjelp av en jigg, vist i figur 12. Prøvestykket blir da påført jevn last med konstant hastighet langs prøvestykkets lengderetning helt til den går til brudd. Spaltestrekkfastheten regnes ut etter formelen:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d}$$

,hvor f_{ct}=spaltestrekkfasthet i MPa, F= bruddlast eller største last i Newton, L= lengden av sylinder i mm, d= diameter til sylinder i mm.

Figur 12: Spaltestrekk brudd

4.8.3 Elastisitetsmodul

Elastisitetsmodul, nærmere bestemt som E-modul, er forholdet mellom fasthet og forlengelse i et materiale, og beskriver materialets motstandsevne mot elastisk deformasjon. Sylinder blir testet for E-modul etter standard *NS-EN 12390; Prøving av herdnet betong - Del 13: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk*. Det finnes to typer metoder, og i oppgaven er det brukt metoden A. Metoden går ut på at sylinderen blir belastet med sykliske laster over 3 intervaller.

5 Miks proporsjonering

I dette kapitlet presenteres fremgangsmåten og de ulike valg som har blitt foretatt for proporsjonering av de ulike betongreseptene. Det vil også bli presentert prøveplan for de ulike forsøk og oversikt over type og mengde materialer brukt for de ulike betongblandingene.

5.1 Fremgangsmåte for proporsjonering

Proporsjonering for de ulike betongblandingene vil basert på PM-modellen, slik det beskrevet i tidligere kapittel 3.

Trinn for proposjonering[8]:

1. Bestemmer ønsket fasthets- og bestandighetsklasse
2. Velger mengden og type tilslag, sement og tilsetningsstoff. Samler relevant data av densitet, tilslagets korngradering, vannabsorpsjon osv.
3. Valg av tilslagetssammensetning. Slik som sand/grus forhold.
4. Bestemmer bindemiddel sammensetning og tilsetningsstoffer.
5. Valg av matriksvolum, som blir bestemt basert på tilslagets og bindemiddel sammensetning.

5.2 Materialdata

Materialer som er benyttet i oppgaven er sement, flyveaske, fin tilslag, grov tilslag og superplastiserende stoffer.

1. Sement

   Norcem Anleggsement FA som inneholder 18% flyveaske blir benyttet. Denne type sement er tilpasset for bestandighetsklasse M45 eller høyere. Sementen kan oppnå 28døgn trykkfasthet på opp til 75 MPa. Densiteten ligger på 3020 kg/m^3.

2. Tilslag

   Fin tilslag som ble benyttet er sand med størrelseorden 0-8 mm fra Årdal. Sand inneholder 2,5% av partikkelstørrelse mindre enn 0,125mm. For grov tilslag blir det benyttet 8-16mm stein fra Årdal, ca.12,7mm Stalite med partikkel densitet 1570kg/m^3 og Leca 3-6 med par-

tikkel densitet 1450kg/m^3.

3. Tilsetningstoffer

   Superplastiserendestoff, Dynamon SX-N ble valgt å bruke for ønske om redusering av tilsatt vannmengden, øker støpeligheten og gir høyere fasthet.

4. Tilsetningsmaterialer

   Flyveaske ble tilsettes for å øke matriksvolumet og stabilitet.

Tabell 2: Produktbeskrivelse for Stalite

Type	Parameter
Bulk Densitet	721 kg/m^3
Ovnstørr Densitet	1435 kg/m^3
Lufttørt Densitet	1511 kg/m^3
24-time Absorpsjon	6%

Tabell 4.1 viser egenskaper til tilslaget Stalite, hentet fra produsentens nettside[13]. Det ble funnet ut at Stalite ikke absorberte vann under vannabsorpsjonstest. Dermed blir det bestemt våt densiteten til tilslaget som er 1570kg/m^3 og det er denne densitet som ble benyttet videre i proporsjoneringen.

Tabell 3: Produktbeskrivelse for Leca

Type	Parameter
Materialtype	Ekspandert leire
Partikkel størrelse	3-6 mm
Bulk Densitet	825 kg/m^3
Partikkel densitet	1450 kg/m^3
Absorpsjon 1 dag	10%
Absorpsjon 28 dager	25%

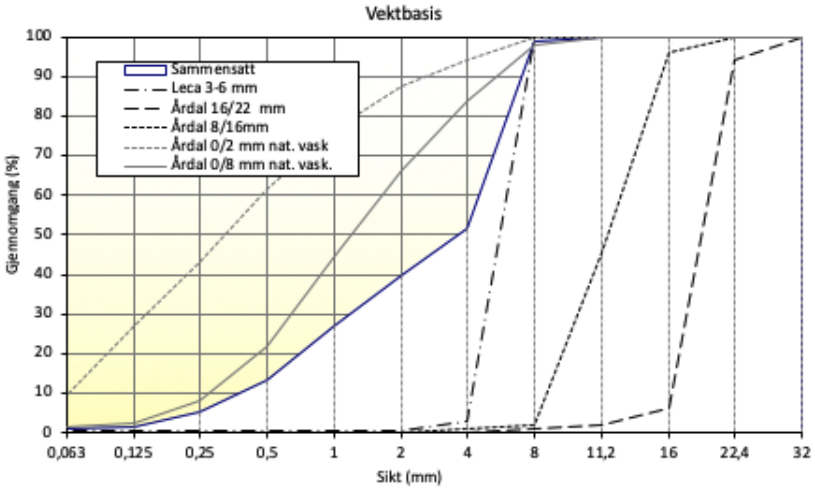
Tabell 3 viser beskrivelen av egenskaper til Leca [21]. Detaljert produktbeskrivelse kan finnes i vedlegg D. Absorpsjonstest utført for Leca viser at tilslaget absorbere cirka 3% i løpet av 1 time, og det er denne verdien som ble brukt videre i proporsjoneringen.

5.2.1 Fuktmåling

Det ble utført fuktmåling for sand (0-8 mm) etter metoden beskrevet i kapittel 4.3. Fuktinnholdet i sand ble målt til 1,5%, og verdien registreres i proporsjoneringsarket. Fuktinnhold i sand ble målt kun en gang, på grunn av begrenset tid.

5.2.2 Korngradering

Det ble utarbeidet siktekurve for letttilslag Leca. For Stalite ble siktekurve som var allerede i proporsjoneringsarket benyttet. For å lage siktekurver, legges bestemt mengden tilslag i et siletårn med siler i forskjellig størrelsesorden hvor silene ble deretter ristet ved hjelp av en rister i ca.10 minutter. Deretter veies mengden som var i hver sil og registreres i proporsjoneringsarket. En velgradert korngradering er ønskelig, da det vil gi mindre hulrom som betyr at behov for sement som skal fylles hulrommene blir mindre.

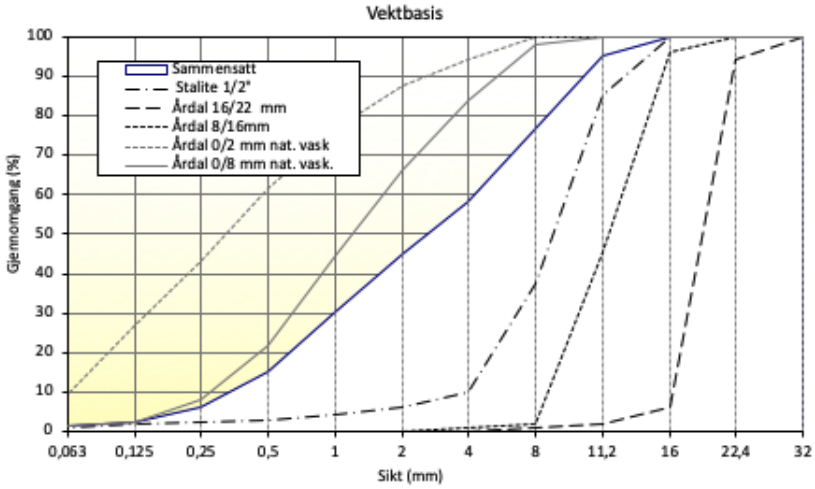


Figur 13: Siktekurve for Leca

Figur 13 og figur 14 er hentet fra proporsjoneringsarket og viser fordeling av partikkelstørrelse for sand, og de ulike grov tilslag. Resultater fra sikting for Leca og Stalite, se vedlegg B.3 og B.2.

Sand/grus forhold

Sand/grus forhold som er brukt for å lage betongresept er 60/40 og 65/35. Dette fordi for proporsjonering av vanling SKB eller SKLB vil det kreves mer filler eller sand innhold, slik det er forklart i kapittel 3. For å lage optimalisert betongresept, vil denne antakelse være fornuftig, da det



Figur 14: Siktekurve for Stalite

vil redusere bruk av sement innholdet ved å erstatte med for eksempel flyveaske som vil redusere kostnaden.

5.2.3 Valg av matriksvolum

Slik det er nevnt i kapittel 3 er det bestemt å benytte matriksvolum på 340 l/m^3. For ønske om å studere effekten av lav matriksvolum har på egenskaper til betongen, er det også blitt proporsjonert betong med lavere matriksvolum på 335 l/m^3. Lav matriksvolum vil da redusere sement mengden.

Tabell 4: Prøveplan for proporsjonering

Blanding type	v/c	Tilsetningstoff	Finstoff	sand/grus	Tilslag	Matriksvolum
SCC	0,45	SP	-	60/40	normal tilslag	340
SCLC-L1	0,45	SP	-	60/40	Leca	340
SCLC-L2	0,45	SP	FA	60/40	Leca	340
SCLC-L3	0,40	SP	FA	60/40	Leca	340
SCLC-L4	0,45	SP	FA	65/35	Leca	340
SCLC-L5	0,45	SP	FA	65/35	Leca	335
SCLC-S1	0,45	SP	-	60/40	Stalite	340
SCLC-S2	0,40	SP	FA	60/40	Stalite	340
SCLC-S3	0,45	SP	FA	65/35	Stalite	340
SCLC-S4	0,45	SP	FA	65/35	Stalite	335

Note: SCC=selvkomprimerende betong, SCLC-L=sevkomprimerende lettbetong med Leca, SCLC-S=selvkomripimerende lettbetong med stalite, SP=superplastiserendestoff, FA=flyveaske

Tabell 4 viser detaljert prøveplan for de ulike betongblandingene. For ønske om optimalisert betongresept, er v/c-tallet satt til 0,45, sand/grus andel 60/40 og matriksvolum på 340 l/m^3. Parameterne som v/c-tall, sand/grus andel, økning av finstoff ble endret etterhvert for å redusere sementinnholdet og ønske om å oppnå fasthet over 45 MPa.

5.3 Betongresept

Betongreseptene som blir utarbeidet skal tilfredsstille kravene som ble bestemt på forhånd. Kravet for fastheten betong skal ha er som nevnt tidligere på over LB45. Proporsjonering for referansebetongen (SCC) ble utarbeidet både ved teoretisk og med hjelp av proporsjoneringsarket fra Smeplass. Tabell 5 viser resultater av mengde materialer som ble funnet ved teoretisk beregning. Se vedlegg C.1 for utfyllende utregning av proporsjoneringen.

Tabell 5: Proporsjonert betong for SCC

Materialer	kg/m^3
Norcem Anleggsement FA	420,9
Årdal 0-8 mm	1041
Årdal 8-16 mm	693,95
Mappei Dynamon SX-N	3,4
Fritt vann	189,4

Figur 15 viser mengde materialer som ble funnet ut ved hjelp av proporsjoneringsarket. Man ser at resultater fra den teoretiske beregningen samsvarer med det fra proporsjoneringsarket.

Betongresept for de ulike blandingene er presentert på tabell 6.

Proporsjonert betong

Materialer	kg/m^3
Norcem Anlegg FA	422,2
	0,0
	0,0
Elkem Microsilica	0,0
Normineral flyveaske	0,0
	0,0
Fritt vann	190,0
Absorbert vann	16,0
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1040,2
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0
Årdal 8/16mm	694,8
Årdal 16/22 mm	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
Mapei Dynamon SX-N	3,50
	0,00
	0,00
	0,00
	0,0
	0,0
Prop. betongdens. (kg/m^3)	2364

Figur 15: Proporsjonert betong for SCC

Tabell 6: Miks proporsjonering

Blanding type	v/c	v/b	Sement (kg/m3)	Flyveaske (kg/m3)	Sand (kg/m3)	Grov tilslag (kg/m3)	SP (kg/m3)	Vann (kg/m3)
SCC	0,45	0,44	422,3	0	1040,2	694,8	3,5	190
SCLC-L1	0,45	0,44	403,1	21,2	783,1	511,9	2,12	1881,1
SCLC-L2	0,45	0,44	403,1	21,2	785,2	510,8	2,97	188
SCLC-L3	0,40	0,39	430,1	22,6	785,2	510,8	3,17	178,4
SCLC-L4	0,45	0,43	381,3	42,4	875,7	462,4	2,08	184,9
SCLC-L5	0,45	0,41	325,9	91,9	889,3	462,4	2,05	175,6
SCLC-S1	0,45	0,41	325,9	0	811,1	546,1	2,92	187,7
SCLC-S2	0,40	0,39	423,2	22,3	811,1	546,1	3,12	175,5
SCLC-S3	0,45	0,44	396	20,8	903,9	491,6	4,17	184,8
SCLC-S4	0,45	0,41	300,5	111,2	910,9	495,4	4,17	170,2

6 Kostnader

I dette kapittelet vil det bli presentert kostnader for de ulike materialene som er brukt og kostnadsoversikt for de ulike betongreseptene. Estimering av totale kostnaden til et prosjekt er nødvendig, når man skal benytte betong med letttilslag istedetfor vanlig tilslag. Dette fordi kostnader per kubikkmeter vil vanligvis være høyere på grunn av den høye prisen for letttilslag.

6.1 Leca

Leca Norge AS leverer lecakuler i forskjellige størrelser og leveranseformer, enten i små sekker eller kubikksekker. Det er også mulig å levere i bulkbiler og biler med blåseaggregat. Ut i fra samtalen med Leca Norge AS og basert på produsentens nettside, er det byggevarehandler i Norge som setter og bestemmer sluttprisen[11]. Derfor er prisen for Leca hentet ut fra byggevarehandleren, byggeshop [22]. For størrelsen på lecakuler 4-10 mm, er prisen per kubikkmeter oppgitt til å være 1947kr. Man antar at prisen vil være lavere for stort kvantum for eksempel ved 10000 tonn. Prisen for større kvantum vil redusere med cirka 20% i forhold til nettprisen, som vil være 1557,6kr. Bruker 1,07 kr/kg for densitet brukt i oppgaven som er 1450 kg/m^3.

6.2 Stalite

Informasjonen av prisen for Stalite er hentet fra en tidligere masteroppgaven utarbeidet av Eivind Årbu[23]. Prisen for Stalite ved en leveranse på 6000-8000 tonn er på 1795,5kr til 1890 kr per kubikk meter. Bruker 1,14kr/kg for densitet brukt i oppgaven som er 1570 kg/m^3.

6.3 Oversikt over materialkostnader

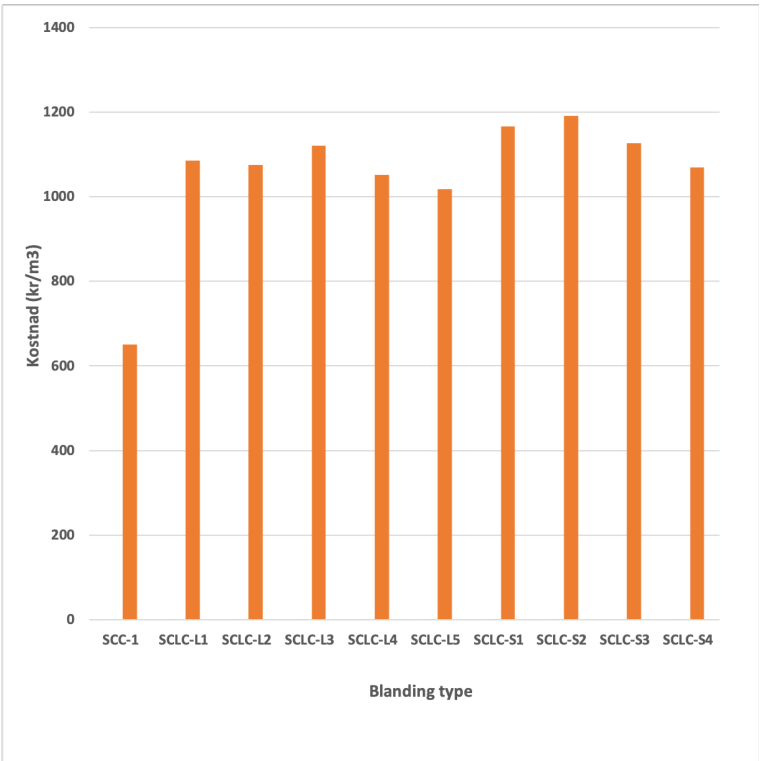
Prisen for de andre råvare er hentet ut fra proporsjoneringsarket. Når det gjelder prisen for flyveaske, er prisen 750 kr/tonn som tilsvarer 0,75kr/kg. Denne informasjonen er hentet fra samtale med markedssjef, Svein B.Eriksson ved Norcem AS. Tabell 7 viser kilo prisen for de ulike materialene som er brukt i proporsjoneringen.

Tabell 7: Oversikt over materialkostnader

Råvare	Pris pr. kg
Norcem Anleggsement FA	0,98
Årdal 0-8 mm	0,12
Årdal 8-16 mm	0,09
Leca 4-10 mm	1,34
Stalite 1/2"	1,14
Flyveaske	0,75
Mappei Dynamon SX-N	12,00
Fritt vann	0,01

6.4 Pris for betong

Det har blitt utarbeidet prisliste for de ulike betongene. Prisliste vil være basert på prisene presentert tidligere på tabell 7.



Figur 16: Kostnad for de ulike betong (kr/m^3)

Figur 16 viser kostnaden for å produsere de ulike betong. Man ser at kostnaden for å produsere betong med som inneholder letttilslag vil gi høye kostnader i forhold til betong med vanlig tilslag. Ulike type lett tilslag med ulike egenskaper vil også gi store pris forskjeller, hvor Stalite med gode mekaniske egenskaper enn Leca vil være dyrere. Dette ser man klart og tydelig for resultat av trykktest, se tabell 11. Blandingene SCLC-L5 og SCLC-S4 hadde begge lik v/c-tall på 0,45, matriksvolum på 335 l/m^3 og sand/grus forhold på 65/35. SCLC-S4 med Stalite som letttilslag hadde høyere fasthet, som forårsaket den høye materialstyrken til tilslaget, forklart i kapittel 2.3.3.

7 Resultater og Diskusjon

7.1 Egenskaper til fersk betong

7.1.1 Synkutbredelse

Slik det er beskrevet i kapittel 4.4 er synkutbredelsen den horisontale spredningen av fersk betongen ved vanlig synkprøving. Resultater av synkutbredelsen for alle blandinger er vist på tabell 8. Referansebetongen, SCC hadde synkutbredelsen på 690 mm og kan derfor karakteriseres som selvkomprimerende betong. Når det gjelder SKLB, er det kun blanding SCLC-L3, SCLC-S3 og SCLC-S4 som kan karakteriseres som selvkomprimerende på grunn av de hadde synkutbredelse på over 650 mm. Det viser seg også at blanding SCLC-S4 med matriksvolum på 335 l/m^3 har god støpelighetegenskaper og god stablitet, det vil si at det ikke oppstår noe separasjon. Den hadde synkutbredelse på 685 mm.

Tabell 8: Resultat av synkutbredelse

Blanding type	Synkutbredelse [mm]
SCC	690
SCLC-L1	-
SCLC-L2	500
SCLC-L3	740
SCLC-L4	550
SCLC-L5	565
SCLC-S1	540
SCLC-S2	450
SCLC-S3	800
SCLC-S4	685

7.1.2 Densitet

Det ble målt densitet for betongblanding SCC, SCLC-L3, SCLC-S1 og SCLC-S2. Måling av densitet hos fersk betong er utført etter metoden forklart i kapittel 4.7 Det viser seg at densiteten til de blandingene, ligger litt over det teoretiske densitet som ble proporsjonert. Grunnen til dette kan være forskjellen på densiteten til både normal og lett tilslag ikke stemmer helt med det som ble brukt under proporsjonering.

Tabell 9: Densitet i fersk betong

Blanding type	Teoretisk densitet [kg/m^3]	Densitet [kg/m^3]
SCC	2364	2408
SCLC-L3	1953	1928
SCLC-S1	1971	1963
SCLC-S2	1987	1995

7.1.3 Luftinnhold

Luftinnhold ble målt kun for referansebetong, SCLC-L2 og SCLC-S1. Dette på grunn av blandevolum for disse var på 50 liter, mens de andre hadde mye mindre blandevolum på 8-10 liter. Luftinnhold til referansebetongen ble målt til 0,5%, som er 1,5% lavere enn det som var proporsjonert for. For blanding SCLC-L2, hvor Leca er benyttet som letttilslag var luftinnholdet målt til 4%, dobbelt så høyt som det var brukt i proporsjoneringen. Men for blanding SCLC-S3 med Stalite som letttilslag, var luftinnholdet 2,5%. Så lenge luftinnholdet ikke øker mer enn 4% har det sannsynligvis lite å si for endringen av fastheten. Ulempen med økning av luftinnholdet er at fastheten vil reduseres med 5% for luftinnhold høyere enn 4%. Fordelen med økt innhold av luft er at betongen vil ha bedre frostmotstand og gir bedre isolasjonsevne.

Resultater av luftinnhold måling fra tidligere studier for SKLB viser at de ligger på mellom 1,2-3,7% som er relativt lavt og at det ikke påvirker så mye på fastheten[3]. I følge den amerikanske standard for proporsjonering av lettbetong, er reduksjonen av fastheten til betongen små så lenge luftinnholdet ligger på 4 til 6%, definert som normal luftinnhold[10].

7.2 Egenskaper til herdet betong

7.2.1 Densitet

Det er kun vannmettet densitet som ble testet for terningene etter at de har ligget i vannbad i 28døgn. Fremgangsmåten for beregning av vannmettet densitet er forklart i tidligere kapittel 4.7. Tabell 10 vier at densiteten for referansebetongen ligger på 2499 kg/m^3 mens for SKLB varierer densiteten mellom 1881-2127 kg/m^3. Dette ligger under kravet for maksimal densitet på 2200 kg/m^3 som er for vanlig letbetong. Antar at ovnstørr densiteten for SKLB vil være mindre enn mettet densitet.

Tabell 10: Densitet i herdet betong

Blanding type	1	2	3	Gjennomsnitt [kg/m^3]
SCC	2492	2512	2493	2499
SCLC-L1	1995	2035	1978	2003
SCLC-L2	2006	2004	2015	2009
SCLC-L3	2078	2040	2058	2059
SCLC-L4	1993	2039	1997	2010
SCLC-L5	2016	2011	2022	2016
SCLC-S1	1978	1976	2001	1985
SCLC-S2	2026	2016	2028	2023
SCLC-S3	1884	1874	1886	1881
SCLC-S4	2120	2141	2120	2127

7.2.2 Trykkfasthet

Terninger ble testet for trykk etter de har ligget 28døgn i vannbad. Trykktesten ble utført etter metoden beskrevet i kapittel 4.8.1.

Tabell 11: Resultat av trykkfasthet

Blanding type	SCC	SCLC-L1	SCLC-L2	SCLC-L3	SCLC-L4	SCLC-L5	SCLC-S1	SCLC-S2	SCLC-S3	SCLC-S4
Trykkfasthet [MPa]	59,1	33,4	37,0	49,7	56,5	46,8	42,6	33,9	48,1	71,5

Tabell 11 viser resultater av trykkfastheten til blandingene. Referansebetongen hadde fasthet som

var høyere enn forventet, B45. Dette kan være på grunn av den varierte fuktinnholdet til tilslagene. Kun blanding SCLC-L3, SCLC-L4 og SCLC-S3 hadde omtrent lik fasthet som referansebetongen, og det er disse som skal tas med videre for sammenligning.

7.2.3 Spaltestrekkfasthet

Sylinderne ble testet for spaltestrekkfasthet etter at de har ligget 28 døgn i vannbad. Bruddlasten er hentet fra testresultater, se vedlegg A.2, for å regne ut spaltestrekkfasthet slik det er forklart i kapittel 4.8.2. For noe av blandingene er det kun benyttet en sylinder for spaltestrekktest, og dette vil fører til at resultatene vil være unøyaktig. Dette gjelder for blanding SCLC-L3 og SCLC-L3.

Tabell 12: Resultat av spaltestrekkfasthet

Blanding type	SCC	SCLC-L2	SCLC-L3	SCLC-S1	SCLC-S2
Spaltestrekkfasthet [MPa]	2,8	2,3	3,1	2,7	3,7

7.2.4 E-modul

Tabell 13 viser resultater fra E-modul testen. Verdier er hentet fra vedlegg A.3. Det er kun gjennomført E-modul test for større blandinger og kun en sylinder som blir brukt for testing. Dette kan medfører at resultatene vil blir unøyaktig. Basert på tidligere studie burde E-modulen for SKLB vært lavere enn vanlig SKB på grunn av den porøse egenskapen til letttilslag [3] [9]. Desto høyere matriksmengden og lavere innhold av letttilslag vil gir en økning i E-modulen[9].

Tabell 13: Resultat av E-modul

Blanding type	E-modul [GPa]
SCC	14,1
SCLC-L2	21,2
SCLC-L3	34,1
SCLC-S1	21,8

8 Sammenligning

Ulike blandinger av selvkomprimerende lettbetong ble testet med tanke på fasthet, støpelighet, spaltestrekkfasthet og elastisitetsmodul. Siden nesten alle prøveblandingene ble proporsjonert for en liten støp, dermed var det kun få prøvestykker som blir testet for spaltestrekkfasthet og E-modul. Resultater fra disse to testene ble da ikke tatt med videre i sammenligningen. Prøveresultatene for trykkfasthet, støpelighet og kostnad til selvkomprimerende lettbetong sammenlignes med resultater fra referansebetongen.

8.1 Fasthet

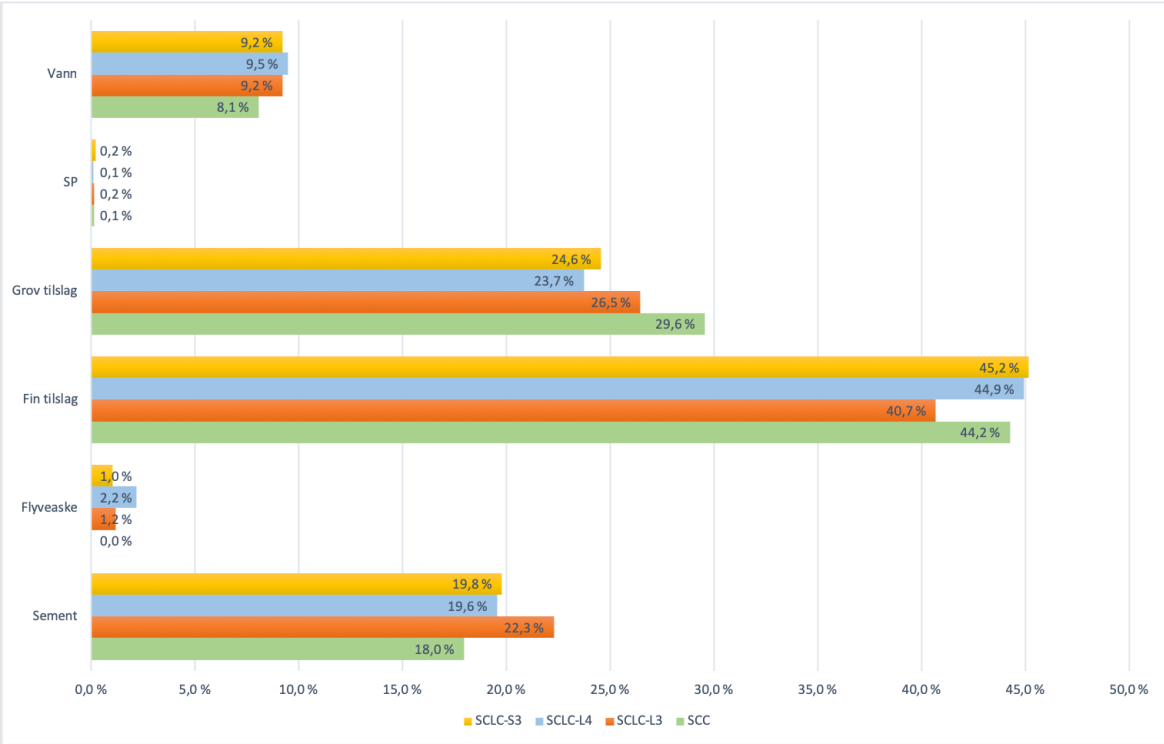
Tabell 14 viser oppnådde fasthet etter 28døgn for de betongene som skal sammenlignes. Slik det er forklart tidligere i kapittel 2.1.1, er fastheten påvirket av egenskapene til letttilslaget, styrken til mørtelen og bindingen mellom sement og tilslaget.

Tabell 14: Fasthet for ulike betong

Blanding type	Trykkfasthet[MPa]
SCC	59,1
SCLC-L3	49,7
SCLC-L4	56,5
SCLC-S3	48,1

Basert på resultatene fra trykktest, var SCLC-L4 den som hadde omtrent lik fasthet som referansebetongen ved samme v/c-tall på 0,45. Dette skyldes at matriksmengden hos SCLC-L4 er litt større enn referansebetongen. For SCLC-S3, er matriksvolumet og den økte matriksmengden åresaken til den høye fastheten, og kan derfor sammenlignes med referansebetongen. Selvkomprimerende lettbetong med Leca som letttilslag kan oppnå fasthet omtrent lik SCC på 48,1 MPa ved å redusere v/c-tallet. Parameterne som er avgjørende for økning av fastheten hos SKLB er derfor ekstra tilsetning av matriksmengden enten ved å øke filler eller sand/grus forhold. Dette vil gir et lavere v/c-tall enn det som er for referansebetongen.

Figur6 viser oversikt av mengde materialer som er brukt for de ulike betongblandingene.



Figur 17: Mengde av materialer brukt i de ulike betong

8.2 Støpelighet

Synkutbredelsesmåling ble utført for å undersøke støpeligheten til selvkomprimerende lettbetong. Det viste seg at SKLB blandingene hadde god nok støpelighet basert på resultater fra kapittel 7.1.1. Men det er også blitt observert under synkutbredelsesmåling at stabiliteten ble redusert på grunn av den lave bindemiddelinnhold brukt i oppgaven som er 400 kg/m^3. Et høyere matriksvolum er da ønskelig for å gi god stabilitet. Siden oppgaven går ut på å optimalisere betongresept for SKLB, er det kun benyttet matriksvolum på 340 og 335 l/m^3, som er den laveste man kan starte med for proporsjonering av selvkomprimerende betong. Blanding SCLC-S4 med matriksvolum på 335 l/m^3, var den som hadde best stabilitet av de ulike SKLB.

8.3 Densitet

Faktorer som v/c-tall og letttilslagets egenskaper påvirker også densiteten. Bruk av økt tilslag vil redusere densiteten, men vil også gir en lavere fasthet. Figur 17 viser SCLC-S3 hadde størst tilsetning av lett tilslag, som gjør at densiteten ble mye lavere sammenlignet med de to andre selvkomprimerende lettbetongene. Tabell 15 viser at selvkomprimerende lettbetong med Stalite var den som ga mest vekt reduksjon med 25 %.

Tabell 15: Densitetsforskjell

Blanding type	Densitet [kg/m^3]	Vektdifferanse [kg/m^3]	Prosent lavere [%]
SCC	2499	-	-
SCLC-L3	2059	440	18
SCLC-L4	2010	489	20
SCLC-S3	1881	618	25

8.4 Kostnad

Tabell 16 viser at bruk av betong med lett tilslag vil gir økt kostnad, som var forventet. For å produsere en selvkomprimerende lettbetong med tilslag som Leca og Stalite vil være dyrere, opp til 60% sammenlignet med vanlig SKB ved v/c-tall på 0,45. Dette på grunn av prisen for Stalite som nevnt i tidligere kapittel 6.2 er litt høyere enn Leca.

Tabell 16: Prisforskjell

Blanding type	Pris [Nok/m^3]	Kostnadsdifferanse [Nok]	Prosent dyrere [%]
SCC	650,7	-	-
SCLC-L3	1120,5	469,8	58
SCLC-L4	1052,2	401,5	62
SCLC-S3	1126,1	475,4	58

9 Avslutning

9.1 Konklusjon

I denne oppgaven var målet å utarbeide en optimalisert betongresept for selvkomprimerende lettbetong. Dette ble utført ved å redusere sementinnholdet mest mulig som vil gi lavere kostnad. Det ble undersøkt og sammenlignet egenskaper til SKLB med vanlig SKB, hvor v/c-tall og matriksvolum er uendret for de fleste betongblandingene.

Basert på resultater, kan følgende konkluderes:

- Ved økt matriksmengden kan man få SKLB med omtrent lik fasthet som vanlig SKB ved lik v/c-tall.
- For SKLB med Stalite som lett tilslag og matriksvolum på 335 l/m^3, er det mulig å få en selvkomprimerende lettbetong med god stabilitet og synkutbredelsesmål på over 650 mm.
- Vekten til SKLB kan reduseres med 25% og beholde fasthet tilsvarende referansebetongen med samme v/c-tall.
- Kostnaden for å produsere SKLB kan være opp til 60% dyrere ved tilsvarende fasthet som for referansebetongen.

9.2 Feilkilder

- Unøyaktighet ved densitetsmåling.
- Støpekvalitet og ujevne betongoverflater ved testing.
- Eventuelle avvik ved absorpsjonstest.
- Avvik på fuktinnhold av tilslag.

9.3 Futher study

- Videre studier av SKLB med Leca og Stalite ved større støp.
- Studere SKLB med større bindemiddelinnhold.

Referanser

[1] M. Maage, «TKT 4215 Concrete Technology 1. Chapter 1- Practice», *Trondheim: Norwegian University of Science and Technology-Department of Structural Engineering*, 2008.

[2] A. Bentur, S.-i. Igarashi og K. Kovler, «Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates», *Cement and concrete research*, årg. 31, nr. 11, s. 1587–1591, 2001.

[3] H.-J. Chen, K.-C. Wu, C.-W. Tang og C.-H. Huang, «Engineering properties of self-consolidating lightweight aggregate concrete and its application in prestressed concrete members», *Sustainability*, årg. 10, nr. 1, s. 142, 2018.

[4] *Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar*. NS-EN 206-1, 2000.

[5] Betongforening, N, «Publikasjons nr.23», *Lettbetong prosjekteringsveiledning*, 1999.

[6] American Concrete Institute. Committee 213, «Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI213.R-03)», American Concrete Institute, 1999.

[7] Betongforening, N, «Publikasjons nr.29», *Spesifikasjon og produksjonsveiledning for selvkomprimerende betong*, 2007.

[8] S. Smeplass, «TKT 4215 Concrete Technology 1. Chapter 4- Fresh concrete - proportioning», *Trondheim: Norwegian University of Science and Technology-Department of Structural Engineering*, 2004.

[9] T. Lo, P. Tang, H. Cui og A. Nadeem, «Comparison of workability and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete and normal self-compacting concrete», *Materials Research Innovations*, årg. 11, nr. 1, s. 45–50, 2007.

[10] American Concrete Institute. Committee 211, «Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lighweight Concrete (ACI211.2-98)», American Concrete Institute, 1998.

[11] Leca Norge AS, *Om leca*. side: https://leca.no/om-leca/produksjon/.

[12] Store Norske Leksikon, *Leca*. side: https://snl.no/Leca.

[13] Carolina Stalite Company, *Structural Applications*. side: https://www.stalite.com/productio n.

[14] A. Dhaheer og S. Mohammed, «Design and properties of self-compacting concrete mixes and their simulation in the J-ring test», ph.d.-avh., Cardiff University, 2016.

[15] *Prøving av fersk betong. Del 5: Utbredningsmål*. NS-EN 12350-5, 2009.

[16] *Prøvingsmetoder for mekaniske og fysiske egenskaper for tilslag. Del 6: Bestemmelse av korndensitet og vannabsorpsjon*. NS-EN 1097-6, 2013.

[17] *Prøving av fersk betong. Del 6: Densitet*. NS-EN 12350-6, 2009.

[18] *Prøving av herdet betong. Del 7: Densitet av herdet betong*. NS-EN 12390-7, 2009.

[19] *Prøving av herdet betong. Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet*. NS-EN 12390-3, 2009.

[20] *Prøving av herdet betong. Del 6: Prøvelegemers spaltestrekkfasthet*. NS-EN 12390-6, 2009.

[21] Filtralite, *Produktbeskrivelse for Leca*. side: https://filtralite.com/en/products/filtraliter-clean-hr-3-6 (sjekket 03.2019).

[22] Pris for Leca. side: https://byggeshop.no/leca-lettklinker-i-storsekk-1m3-4-10.

[23] E. V. Årbu, «Kostnads-og egenskapsfordeler ved bruk av lettbetong i betongelementer», masteroppg., University of Stavanger, Norway, 2017.

Vedlegg

A Testresultater

A.1 Trykkfasthet

Toni Technik

Simple standard protocol **10.06.2019**

Parameter table:

Test protocol :
Tester : Niang Ngaih Sian
Customer :
Test standard : Trykktest
Strength grade :
Other :

Type strain extensometer :
Machine data : Controller TT1412
PistonStroke
LoadCell 3 MN

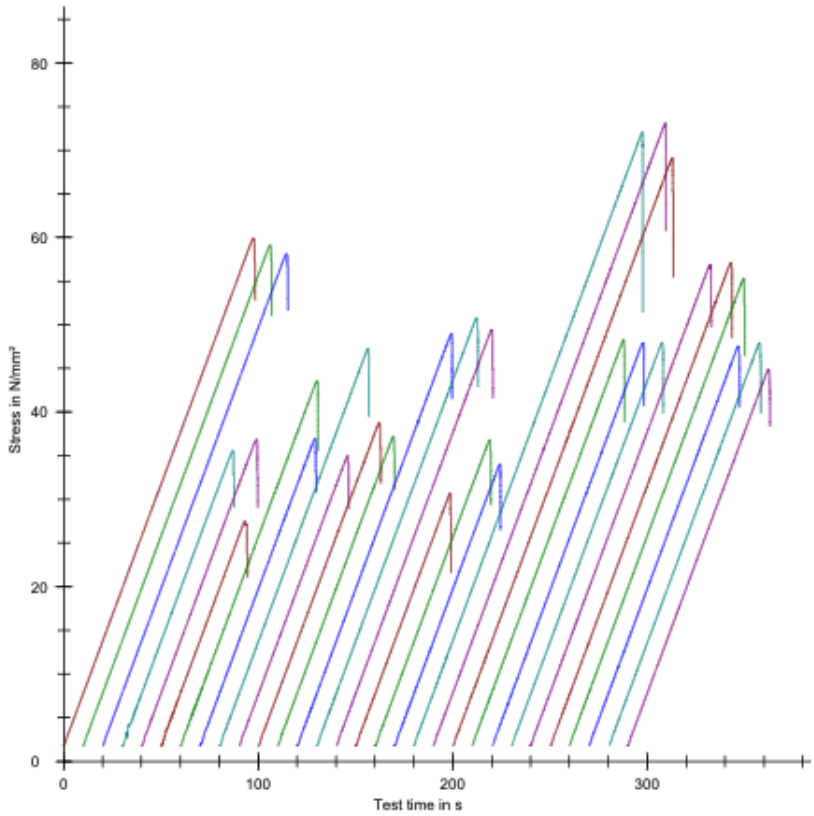
Results:

Nr	Date	ID	a mm	b mm	F_m kN	Clock time	σ_m N/mm²
1	08.04.2019	SCC-1	100,0	100,0	599,94	13:37:14p.m.	59,99
2	08.04.2019	SCC-1	100,0	100,0	591,93	13:40:32p.m.	59,19
3	08.04.2019	SCC-1	100,0	100,0	581,50	13:43:53p.m.	58,15
4	16.04.2019	SCLC-L1	100,0	100,0	356,18	10:27:31a.m.	35,62
5	16.04.2019	SCLC-L1	100,0	100,0	369,10	10:34:06a.m.	36,91
6	16.04.2019	SCLC-L1	100,0	100,0	275,15	10:36:49a.m.	27,51
7	16.04.2019	SCLC-S1	100,0	100,0	435,70	10:40:22a.m.	43,57
8	16.04.2019	SCLC-S1	100,0	100,0	369,80	10:43:03a.m.	36,98
9	16.04.2019	SCLC-S1	100,0	100,0	472,97	10:45:39a.m.	47,30
10	16.04.2019	SCLC-L2	100,0	100,0	350,45	10:48:10a.m.	35,05
11	16.04.2019	SCLC-L2	100,0	100,0	388,13	10:50:50a.m.	38,81
12	16.04.2019	SCLC-L2	100,0	100,0	372,71	10:53:34a.m.	37,27
13	23.04.2019	SCLC-L3	100,0	100,0	489,91	11:10:17a.m.	48,99
14	23.04.2019	SCLC-L3	100,0	100,0	508,10	11:13:06a.m.	50,81
15	23.04.2019	SCLC-L3	100,0	100,0	494,31	11:15:50a.m.	49,43
16	23.04.2019	SCLC-S2	100,0	100,0	306,93	11:17:53a.m.	30,69
17	23.04.2019	SCLC-S2	100,0	100,0	368,59	11:20:07a.m.	36,86
18	23.04.2019	SCLC-S2	100,0	100,0	340,57	11:22:07a.m.	34,06
25	02.06.2019	SCLC-S4	100,0	100,0	721,16	13:45:03p.m.	72,12
26	02.06.2019	SCLC-S4	100,0	100,0	732,17	13:47:57p.m.	73,22
28	02.06.2019	SCLC-S4	100,0	100,0	691,99	13:51:28p.m.	69,20
29	02.06.2019	SCLC-S3	100,0	100,0	483,22	13:55:00p.m.	48,32
31	02.06.2019	SCLC-S3	100,0	100,0	479,44	13:58:33p.m.	47,94
32	02.06.2019	SCLC-S3	100,0	100,0	479,94	14:01:46p.m.	47,99
34	02.06.2019	SCLC-L4	100,0	100,0	568,83	14:08:28p.m.	56,88
33	02.06.2019	SCLC-L4	100,0	100,0	571,68	14:05:02p.m.	57,17
35	02.06.2019	SCLC-L4	100,0	100,0	553,00	14:11:38p.m.	55,30
36	02.06.2019	SCLC-L5	100,0	100,0	475,57	14:14:37p.m.	47,56
37	02.06.2019	SCLC-L5	100,0	100,0	479,79	14:17:01p.m.	47,98
38	02.06.2019	SCLC-L5	100,0	100,0	449,00	14:19:09p.m.	44,90

Toni Technik

Simple standard protocol **10.06.2019**

Series graphics:



Statistics:

Series n = 30	a mm	b mm	F_m kN	σ_m N/mm²
n	30	30	30	30
$\bar{x}$	100,0	100,0	478,59	47,86
s	0,0	0,0	118,88	11,89
max.	100,0	100,0	732,17	73,22
min	100,0	100,0	275,15	27,51
med	100,0	100,0	479,61	47,96
v	0,00	0,00	24,84	24,84

A.2 Spaltestrekkfasthet

Toni Technik

Simple standard protocol **10.06.2019**

Parameter table:

Test protocol :
Tester : Niang Ngaih Sian
Customer :
Test standard : Spaltestrekk
Strength grade :
Creation date :
Age : 0 T
Other :

Type strain extensometer :
Machine data : Controller TT1412
PistonStroke
LoadCell 3 MN

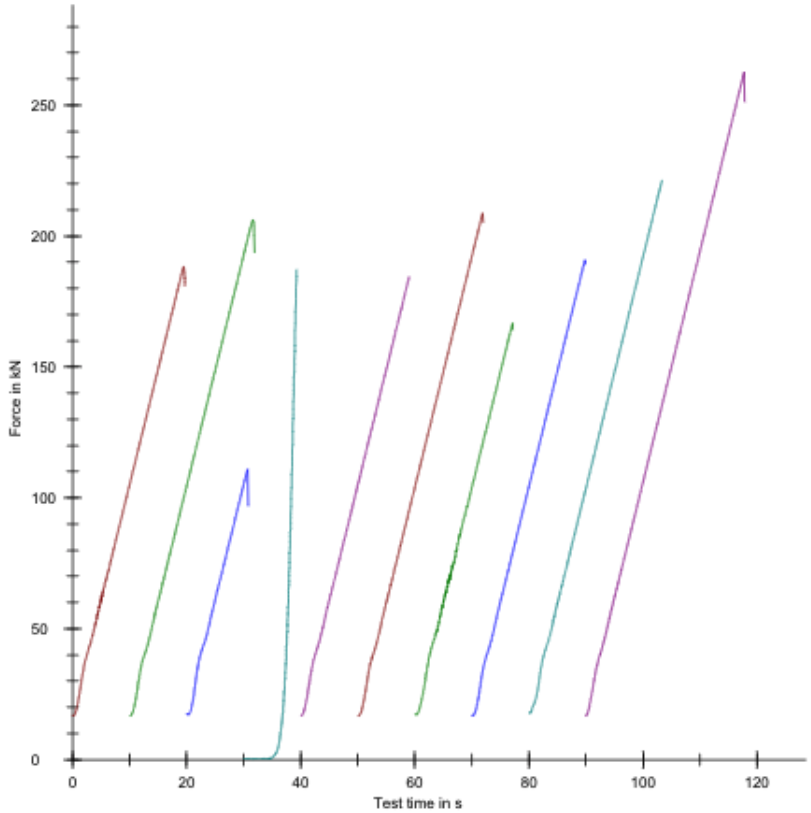
Results:

Nr	Date	ID	Break	F_m kN
1	08.04.2019	SCC-1	0,00	188,48
2	08.04.2019	SCC-1	0,00	206,23
3	16.04.2019	SCLC-L2	0,00	110,93
4	16.04.2019	SCLC-L2	0,00	187,12
5	16.04.2019	SCLC-L2	1,00	184,45
6	16.04.2019	SCLC-S1	1,00	208,79
7	16.04.2019	SCLC-S1	0,00	166,63
8	16.04.2019	SCLC-S1	0,00	190,82
9	23.04.2019	SCLC-L3	1,00	221,14
10	23.04.2019	SCLC-S2	1,00	262,67
13		SCLC-S3	-	-

Toni Technik

Simple standard protocol **10.06.2019**

Series graphics:



Statistics:

Series n = 10	Break	F_m kN
n	10	10
x̄	0,40	192,72
s	0,52	38,92
max.	1,00	262,67
min	0,00	110,93
med	0,00	189,65
v	-	20,19

A.3 E-modul

Toni Technik

Simple standard protocol **02.06.2019**

Parameter table:

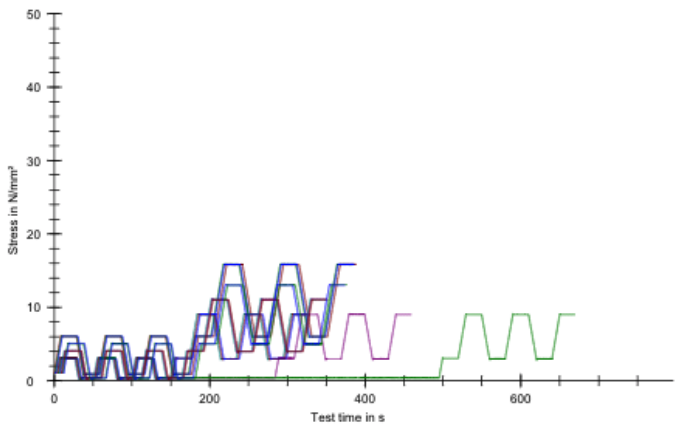
Test protocol :
Tester : Niang Ngaih Sian
Customer :
Test standard : EN12390-13 method A
Strength grade :
Creation date :
Age : 0 T
Other :

Type strain extensometer :
Machine data : Controller TT0322
PistonStroke
LoadCell 3 MN
Extensometer
Extensometer2

Results:

Nr	$\varepsilon_{b2,E1}$ mm	$\varepsilon_{b2,E2}$ mm	$\varepsilon_{b3,E1}$ mm	$\varepsilon_{b3,E2}$ mm	$\Delta\varepsilon_{b23,}$ %	$\Delta\varepsilon_{b23,}$ %	$\Delta\varepsilon_{b3,E}$ %	$\sigma_{m\,a,1}$ N/mn	$\sigma_{m\,b,0}$ N/mn	$\varepsilon_{a,1}$ mm	$\varepsilon_{b,0}$ mm	$E_{C,0}$ N/mn	$\sigma_{m\,a,3}$ N/mn	$\sigma_{m\,b,2}$ N/mn	$\varepsilon_{a,3}$ mm	$\varepsilon_{b,2}$ mm	$E_{C,S}$ N/mn
max.					10,0	10,0	20,0										
min					-10,0	-10,0	-20,0										
1	0,150	0,062	0,151	0,062	0,1	0,0	>20,9	15,82	6,01	0,212	0,062	1304	15,82	5,97	0,218	0,094	1578
2	0,163	0,073	0,163	0,073	0,1	0,0	18,9	15,82	6,01	0,236	0,073	1197	15,82	5,97	0,241	0,096	1360
3	0,103	0,108	0,103	0,109	0,0	0,2	1,4	15,82	6,02	0,334	0,110	8755	15,82	5,97	0,347	0,185	1223
4	0,031	0,029	0,030	0,028	0,3	0,3	1,6	9,01	3,01	0,108	0,028	1493	9,03	2,95	0,111	0,038	1660
5	0,041	0,012	0,040	0,013	0,7	1,1	>26,2	9,02	3,03	0,050	0,013	3229	9,01	2,96	0,050	0,002	2536
6	0,035	0,019	0,035	0,019	0,1	0,0	14,7	9,02	3,02	0,076	0,019	2092	9,02	2,96	0,076	0,019	2107
7	0,044	0,008	0,042	0,008	0,9	2,7	>33,3	9,02	3,01	0,059	0,009	2419	9,02	2,97	0,060	0,008	2307
8	0,031	0,019	0,032	0,019	0,2	0,0	12,3	9,03	3,01	0,078	0,019	2038	9,02	2,98	0,079	0,022	2137
9	0,030	0,028	0,030	0,029	0,2	0,6	0,8	11,03	4,02	0,097	0,029	2059	11,02	3,99	0,100	0,039	2285
10	0,035	0,027	0,034	0,028	0,3	1,0	4,5	11,03	4,02	0,088	0,029	2367	11,05	3,98	0,091	0,039	2535
11	0,031	0,029	0,031	0,030	0,5	0,7	0,5	11,02	4,03	0,089	0,031	2376	11,02	3,96	0,092	0,038	2628
12	0,064	0,018	0,065	0,017	0,1	0,8	>28,8	13,01	5,02	0,042	0,017	6392	13,04	4,97	0,043	0,006	4326
13	0,055	0,032	0,055	0,031	0,1	0,5	13,7	13,02	5,02	0,073	0,031	3815	13,02	4,96	0,070	0,023	3410

Series graphics:



Toni Technik

Simple standard protocol

02.06.2019

Statistics:

Series n = 13	σ_m N/mm²	$E_{C,0}$ N/mm²	$E_{C,S}$ N/mm²
$\bar{x}$	11,75	24355,58	23152,75
s	2,76	14361,43	8460,80
v	23,47	58,97	36,54

B Proporsjonering

B.1 Vannabsorpsjonstest for leca

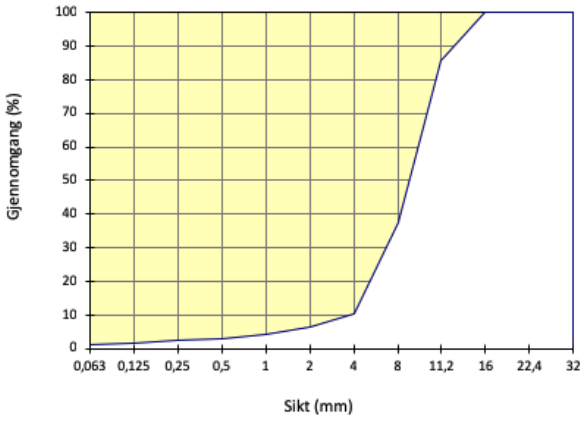
Utregnet etter formel: $a[\%] = (C - B)/A$

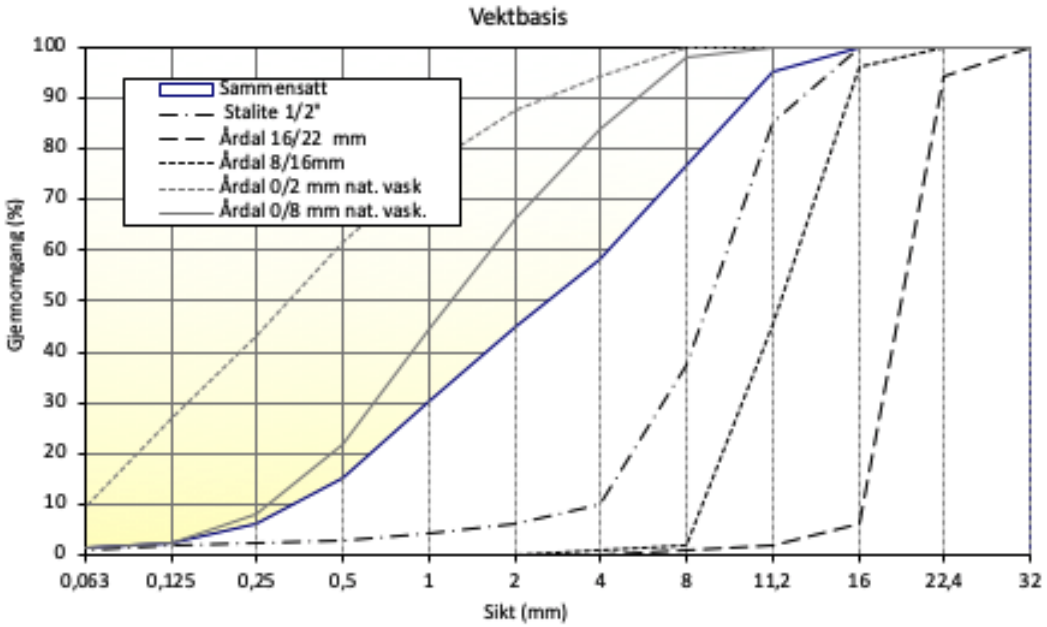
Prøve nr.	Vekt,prøve(g) [A]	Vekt,prøve+vann (g)[B]	Vekt etter 1 time(g)[C]	Absorpsjon[%]
1	685,6	1230	1254,2	3,5
2	704,6	1240,2	1259,8	2,8
Gjennomsnitt				3,2

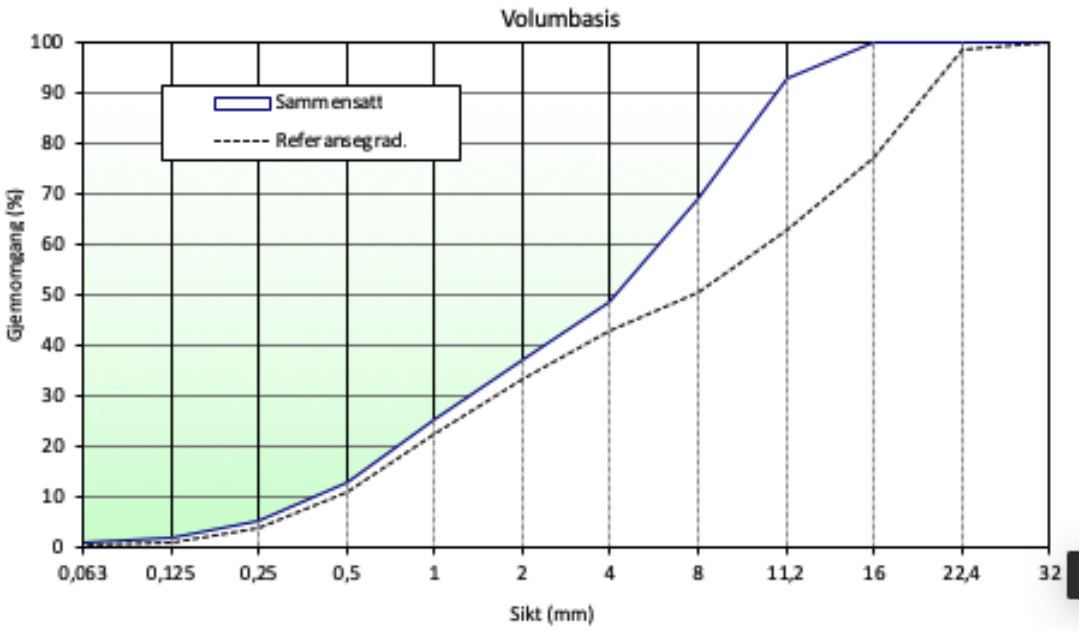
B.2 Korngradering av Stalite

Type:	Stalite 1/2"
Dato:	18/02/2015
FM =	5,85

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest	Gjennom-gang
	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	389	220	14,6	85,4
8	1455	1162	62,6	37,4
4	1993	1760	89,8	10,2
2	2065	1849	93,7	6,3
1	2107	1896	95,8	4,2
0,5	2135	1914	96,9	3,1
0,25	2161	1917	97,6	2,4
0,125	2187	1917	98,2	1,8
0,063	2210	1917	98,8	1,2
Bunn	2262	1917		





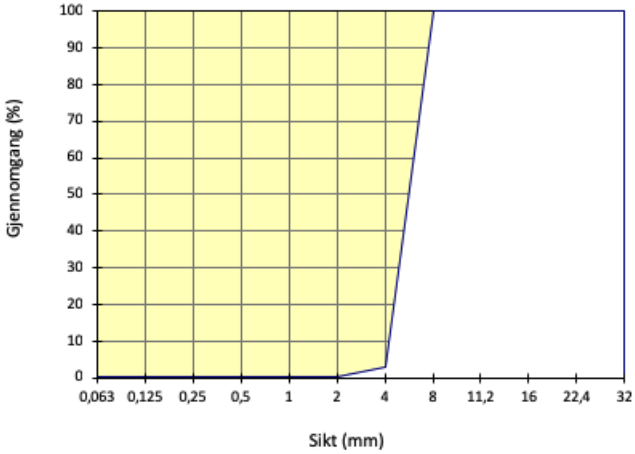

Volumbasis
Sammensatt
Referansegrad.
Gjennomgang (%)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,063
0,125
0,25
0,5
1
2
4
8
11,2
16
22,4
32
Sikt (mm)

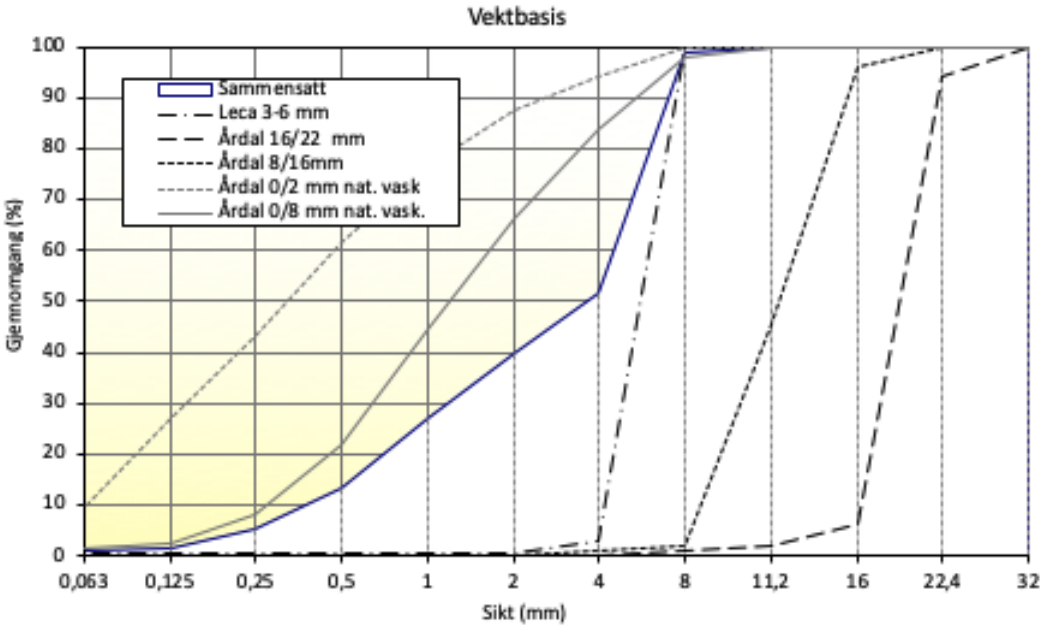
B.3 Korngradering av Leca

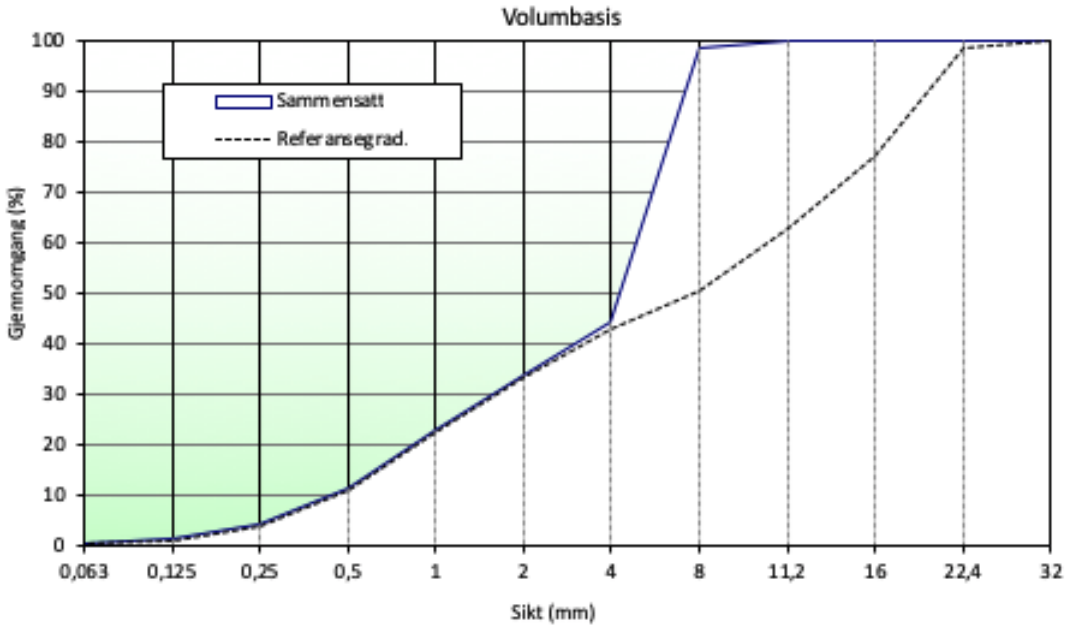
Fraksjon V

Type:	Leca 3-6 mm
Dato:	12/03/2019
FM =	5,46

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest	Gjennom-gang
	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	0,9	0,9	0,1	99,9
4	811,5	827,2	97,2	2,8
2	831,8	849,1	99,7	0,3
1	831,8	849,1	99,7	0,3
0,5	831,8	849,1	99,7	0,3
0,25	831,8	849,1	99,7	0,3
0,125	831,8	849,1	99,7	0,3
0,063	831,8	849	99,7	0,3
Bunn	834,5	852		






Volumbasis
Sammensatt
Referansegrad.
Gjennomgang (%)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0,063
0,125
0,25
0,5
1
2
4
8
11,2
16
22,4
32
Sikt (mm)

C Resepter

C.1 Referansebetong, SCC

MIX DESIGN CALCULATION

- fasthetsklasse: B45
- bestandighetsklasse: M45
- masseforhold: 0,45

SKB
- matriksvolum(M): 340/m^3
- partikkelvolum(P): 640l/m^3
- luftinnhold (L): 2% ~ 20l/m^3 (forventet)
- synkutbredelse > 650mm
- Totalt volum: 1000liter=M+P+L

Partikkelvolum
- partikkelstørrelse >0.125mm
- sand fra Årdal ~ 0/8 mm
- grov tilslag fra Årdal ~ 8/16 mm

$\rho_{sand} := 2650$ kg/m3 $\rho_{grus} := 2700$ kg/m3

- sand/grus forhold: 60/40, hvor sand fraksjon er 5-10% større i SKB enn for normal betong.
- ut ifra siktekurve: 97.5% har > 0.125 mm

Partikkelvolum: 640l/m3=volum av sand + volum av grus

$$\frac{640}{1000} = \frac{sand}{\rho_{sand}} \cdot \frac{97.5}{100} + \frac{grus}{\rho_{grus}}$$

$$grus := \frac{\frac{640}{1000}}{\left(\frac{60}{40} \cdot \frac{97.5}{100} \cdot \frac{1}{2650} + \frac{1}{2700}\right)} = 693.95$$

$$sand := \frac{60}{40} \cdot grus = 1.041 \cdot 10^3$$

Matriksvolum
- partikkelstørrelse < 0.125 mm
- Norcem Anlegg FA, C
- Mappei Dynamon SX-N, A
- vann, ν
- ut ifra siktekurve: 2.5% sand < 0.125 mm

$\rho_v := 1000$ kg/m3 $\rho_c := 3020$ kg/m3 $\rho_A := 1060$ kg/m3

Matriksvolum: 340l/m3= sement + sand + vann + tilsetningsstoffer

$$\frac{340}{1000} = \frac{C}{\rho_c} + \frac{v}{\rho_v} + \frac{A}{\rho_A} + \frac{sand \cdot \frac{2.5}{100}}{\rho_{sand}}$$

A= $\frac{0.8}{100} \cdot C$ $\frac{v}{C}$ =0.45 v =0.45C

$$C := \frac{\left(0.34 - sand \cdot \frac{2.5}{100 \cdot 2650}\right)}{\left(\frac{1}{3020} + \frac{0.45}{1000} + \frac{0.0036}{1060}\right)} = 420.868$$

$A := \frac{0.8}{100} \cdot C = 3.367$ kg

$\nu := 0.45 \cdot C = 189.39$ kg

Vannabsorpsjon og fukt innhold

- fukt i sand(0/8 mm): 1.5% $s1 := \frac{1.5}{100} \cdot sand = 15.614$

vann absorbert i sand 1%

- fukt i grus(8/16 mm): 0.5% $s2 := \frac{0.5}{100} \cdot grus = 3.47$

vann absorbert i grus 0.8%

- vann absorbert i tilsetningstoff(dynamon): 84%

masseforhold, v/c $k1 := \frac{(\nu + 0.84 \cdot A)}{C} = 0.457$

vann/bindemiddel, v/b $k2 := \frac{(\nu + 0.84 \cdot A)}{\left(C + \frac{1.5}{100} \cdot sand\right)} = 0.44$

- Totalt vann som legges til:

$$wateradd := \nu - 0.84 \cdot A - s1 - s2 + \frac{1}{100} \cdot sand + \frac{0.8}{100} \cdot grus = 183.439$$

Prosjekt	Regnearkutvikling
Reseptnummer	SCC-1
Tilsiktet kvalitet	B45 MF45
Utført av	Sverre Smeplass, Skanska Teknikk, Betongteknologiavdelingen
Dato	11/03/2019

Initialparametre	Verdi
m = v/(c+Σkp)	0,45
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m^3]	Alkalier	Klorider
Norcem Anlegg FA	100,0 %	81,0 %	15,0 %	0,0 %	3020	1,4 %	0,1 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	[kg/m^3]	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	0,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,7	2200	1,0 %	0,3 %
	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m^3]	Tørrstoff	[kg/m^3] TS	Alkalier	Klorider
Mapei Dynamon SX-N	0,8 %	1060	16,0 %	1547	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m3]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matriksvolum [l/m^3]	340
Oppnådd matriksvolum [l/m^3]	340
Klinkerandel i bindemiddel	81,0 %
Total FA- andel av bindemiddel	15,0 %
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %
Volum sementlim [l/m^3]	330,1
Effektivt vanninnhold [l/m^3]	190,0
v/p	0,42
Effektivt bindemiddel [kg/m^3]	422
Totalt bindemiddel [kg/m^3]	422

Beregn

Proporsjonert betong

Materialer	kg/m^3
Norcem Anlegg FA	422,2
	0,0
	0,0
Elkem Microsilica	0,0
Normineral flyveaske	0,0
	0,0
Fritt vann	190,0
Absorbert vann	16,0
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1040,2
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0
Årdal 8/16mm	694,8
Årdal 16/22 mm	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
Mapei Dynamon SX-N	3,50
	0,00
	0,00
	0,00
	0,0
	0,0
Prop. betongdens. (kg/m^3)	2364

C.2 SCLC-L3

Prosjekt	Regnearkutvikling
Reseptnummer	SCLC-L3
Tilsiktet kvalitet	LB45 MF45
Utført av	Sverre Smeplass, Skanska Teknikk, Betongteknologiavdelingen
Dato	21/03/2019

Initialparametre	Verdi
m = v/(c+Σkp)	0,40
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m^3]	Alkalier	Klorider
Norcem Anlegg FA	100,0 %	82,0 %	18,0 %	0,0 %	3020	1,4 %	0,1 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	[kg/m^3]	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	0,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	5,0 %	0,7	2200	1,0 %	0,3 %
	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m^3]	Tørrstoff	[kg/m^3] TS	Alkalier	Klorider
Mapei Dynamon SX-N	0,7 %	1060	16,0 %	1547	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m3]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matriksvolum [l/m^3]	340
Oppnådd matriksvolum [l/m^3]	340
Klinkerandel i bindemiddel	77,9 %
Total FA- andel av bindemiddel	22,1 %
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %
Volum sementlim [l/m^3]	331,4
Effektivt vanninnhold [l/m^3]	178,4
v/p	0,38
Effektivt bindemiddel [kg/m^3]	446
Totalt bindemiddel [kg/m^3]	453

Beregn

Proporsjonert betong

Materialer	kg/m^3
Norcem Anlegg FA	430,1
	0,0
	0,0
Elkem Microsilica	0,0
Normineral flyveaske	22,6
	0,0
Fritt vann	178,4
Absorbert vann	25,7
Årdal 0/8 mm nat. vask.	785,2
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0
Årdal 8/16mm	0,0
Årdal 16/22 mm	0,0
Leca 3-6 mm	510,8
0	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
Mapei Dynamon SX-N	3,17
	0,00
	0,00
	0,00
	0,0
	0,0
Prop. betongdens. (kg/m^3)	1953

C.3 SCLC-L4

Prosjekt	Regnearkutvikling
Reseptnummer	SCLC-L4
Tilsiktet kvalitet	LB45 MF45
Utført av	Sverre Smeplass, Skanska Teknikk, Betongteknologiavdelingen
Dato	04/05/2019

Initialparametre	**Verdi**
m = v/(c+Σkp)	0,45
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	**Andel**	**Andel klinker**	**Andel FA**	**Andel slagg**	**[kg/m^3]**	**Alkalier**	**Klorider**
Norcem Anlegg FA	100,0 %	82,0 %	18,0 %	0,0 %	3020	1,4 %	0,1 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Tilsetningsmaterialer	**Type**	**Andel (av b)**	**k**	**[kg/m^3]**	**Alkalier**	**Klorider**
Elkem Microsilica	Silika	0,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	10,0 %	0,7	2200	1,0 %	0,3 %
	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %

Tilsetningsstoff	**% av b**	**[kg/m^3]**	**Tørrstoff**	**[kg/m^3] TS**	**Alkalier**	**Klorider**
Mapei Dynamon SX-N	0,9 %	1060	16,0 %	1547	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	**Vol %**	**[kg/m3]**
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	**Verdi**
Ønsket matriksvolum [l/m^3]	340
Oppnådd matriksvolum [l/m^3]	340
Klinkerandel i bindemiddel	73,8 %
Total FA- andel av bindemiddel	26,2 %
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %
Volum sementlim [l/m^3]	330,6
Effektivt vanninnhold [l/m^3]	184,8
v/p	0,42
Effektivt bindemiddel [kg/m^3]	411
Totalt bindemiddel [kg/m^3]	423

Beregn

Proporsjonert betong

Materialer	kg/m^3
Norcem Anlegg FA	381,1
	0,0
	0,0
Elkem Microsilica	0,0
Normineral flyveaske	42,3
	0,0
Fritt vann	184,8
Absorbert vann	22,6
Årdal 0/8 mm nat. vask.	875,7
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0
Årdal 8/16mm	0,0
Årdal 16/22 mm	0,0
Leca 3-6 mm	462,4
0	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
Mapei Dynamon SX-N	3,64
	0,00
	0,00
	0,00
	0,0
	0,0
Prop. betongdens. (kg/m^3)	1970

volum ok

C.4 SCLC-S3

Prosjekt	Regnearkutvikling
Reseptnummer	SCLC-S3
Tilsiktet kvalitet	LB45 MF45
Utført av	Sverre Smeplass, Skanska Teknikk, Betongteknologiavdelingen
Dato	03/04/2019

Initialparametre	Verdi
m = v/(c+Σkp)	0,45
Luftinnhold	2,0 %

Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m^3]	Alkalier	Klorider
Norcem Anlegg FA	100,0 %	82,0 %	18,0 %	0,0 %	3020	1,4 %	0,1 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Tilsetningsmaterialer	Type	Andel (av b)	k	[kg/m^3]	Alkalier	Klorider
Elkem Microsilica	Silika	0,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	5,0 %	0,7	2200	1,0 %	0,3 %
	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %

Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m^3]	Tørrstoff	[kg/m^3] TS	Alkalier	Klorider
Mapei Dynamon SX-N	1,0 %	1060	16,0 %	1547	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m3]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matriks	Verdi
Ønsket matriksvolum [l/m^3]	340
Oppnådd matriksvolum [l/m^3]	340
Klinkerandel i bindemiddel	77,9 %
Total FA- andel av bindemiddel	22,1 %
Total slaggandel av bindemiddel	0,0 %
Volum sementlim [l/m^3]	325,8
Effektivt vanninnhold [l/m^3]	184,8
v/p	0,41
Effektivt bindemiddel [kg/m^3]	411
Totalt bindemiddel [kg/m^3]	417

Beregn

Proporsjonert betong

Materialer	kg/m^3
Norcem Anlegg FA	396,0
	0,0
	0,0
Elkem Microsilica	0,0
Normineral flyveaske	20,8
	0,0
Fritt vann	184,8
Absorbert vann	9,0
Årdal 0/8 mm nat. vask.	903,9
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0
Årdal 8/16mm	0,0
Årdal 16/22 mm	0,0
Stalite 1/2"	491,6
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
Mapei Dynamon SX-N	4,17
	0,00
	0,00
	0,00
	0,0
	0,0
Prop. betongdens. (kg/m^3)	2007

volum ok

D Produktbeskrivelse for Leca 3-6 mm

PRODUCT SPECIFICATION OF FILTRALITE®
Filter media

FILTRALITE ® HR 3-6 mm

Commercial name	FILTRALITE ® HR 3-6 mm
Density	Bulk density: 825 kg/m^3 particle density: 1450 kg/m^3
Type of material	Expanded clay
Appearance	Round particles, smooth surface structure
Manufactured by	Weber Leca Rælingen, Norway

Size and weight	Value	Deviation	Comments
Effective size	3,5 mm	± 0,3 mm	d_{10}
Particle size range	3-6 mm	< 2,5 mm max 3 % + Δ < 0,125 mm > 6,0 mm max. 5 %	
Coefficient of uniformity	< 1,5		d_{60} / d_{10}
Bulk density, dry	825 kg/m^3	± 75 kg/m^3	EN 1097-3
Particle density, dry (PDD)	1450 kg/m^3	± 100 kg/m^3	Exclay Norm

Other properties	Value	Comments
Floating particles	< 2%	Maximum volume floating particles after 2 days in water.
Particle porosity	46 %	Porosity internal particle: (1-PDD/2700 kg/m^3)*100
Voids	43 %	EN 1097-3
Acid solubility	< 4 %	EN 12902
Friability loss	< 4 %	EN 12902
Water adsorption 1 day	10 %	Approximately value. Exclay Norm
Water adsorption 28 days	25 %	Approximately value. Exclay Norm
Water adsorption 1 year	30 %	Approximately value. Exclay Norm
Settling velocity	0,2 m/s	Approximately value. Exclay Norm (water saturated)
Mohs' hardness	6	

Chemical composition, average values:

SiO_2	Al_2O_3	FeO_3	K_2O	MgO	CaO	Na_2O	C_{tot}
62%	18%	7%	4%	3%	3%	2%	0,02%

Weber
Saint-Gobain Byggevarer AS
P.O. Box 216 Alnabru
0614 Oslo, Norway

Further information:
www.filtralite.com
E-mail: info@weber-norge.no

Telephone:
+47 22 88 77 00
Telefax:
+47 22 64 54 54

filtralite

weber SAINT-GOBAIN