

Adrian Adamski
Andreas Erlien Grefstad

Partikkel-Matriks modellering av fersk betong med hensyn til ønsket betongflyt

TKT4950 Konstruksjonsteknikk, masteroppgave

Masteroppgave i Konstruksjonsteknikk
Veileder: Stefan Jacobsen
Juni 2022

Adrian Adamski
Andreas Erlien Grefstad

Partikkel-Matriks modellering av fersk betong med hensyn til ønsket betongflyt

TKT4950 Konstruksjonsteknikk, masteroppgave

Masteroppgave i Konstruksjonsteknikk
Veileder: Stefan Jacobsen
Juni 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Effektivisering i proporsjonering av betong forutsetter gode verktøy som enkelt kan beregne ulike resepter etter ønskede egenskaper. I forbindelse med MiKS-prosjektet er det påbegynt et proporsjoneringsverktøy som beregner betongresepter med hensyn til ønsket synkutbredelse. Ferdigstilling av dette er hovedmålet i denne oppgaven. Det nye proporsjoneringsverktøyet tar utgangspunkt i et eksisterende proporsjoneringsverktøy, utviklet av Sverre Smeplass. Videre er det implementert tre moduler, estimering av flytmotstand (λ_Q) basert på Elisabeth Leite Skares formel [1], estimering av hulrom (H) og konsistenfunksjon (k_{pu}) av Ernst Mørtzell [2] for å bestemme sammenheng mellom matriksvolum og synkutbredelse. Nødvendig overskuddsmatriks er «bestemt» til å være avhengig av flytmotstanden til matriks. Konsistenfunksjonens øvre asymptote (maksimal synkutbredelse) er bestemt til å være avhengig av SP-dosering. Fullskalaforsøkene i forbindelse med MiKS-prosjektet, er benyttet som utgangspunkt for kalibrering av verktøyet. Forsøkene består av totalt 22 resepter, av to produsenter (Betong Øst/Velde), fordelt på to betongkvaliteter (M40/M60). Flytmotstand (λ_Q) er målt for åtte resepter ved bruk av FlowCyl. Hulrom (H) er målt fire ulike tilslags sammensetninger ved NorBetong-metoden.

Resultatene i avhandlingen viser at modellert flytmotstand korrelerer dårlig med utførte laboratoriemålinger. Videre analyse av resultatene viser at beregningsmodulen for flytmotstand ikke justerer for endring i fillermengde. Det er ukjent om feilkilden ligger i Skares formel eller andre deler av modulen. I den forbindelse er det gjennomført en parameterstudie. Studien viser at filler har stor påvirkning på flytmotstand, som styrker at beregningsmodulen ikke tar høyde for fillerbidraget. Ut over dette viser kalibrerte verdier for modellert hulrom god korrelasjon med laboratoriemålingene.

Det konkluderes med at verktøyet ikke kan ferdigstilles grunnet avvik i modellert flytmotstand. Verktøyet er et godt utgangspunkt for hvordan teorien bak et fremtidig velfungerende verktøy kan bygges opp, men feilen ved beregningsmodulen for flytmotstand bør undersøkes nærmere. Modulen er avgjørende for at verktøyet skal virke, slik at verktøyet klarer å proporsjonere betongresepter med tanke på ønsket betongflyt.

Abstract

A method to achieve efficiency in concrete proportion is to take advantage of tools to calculate mix-designs according to desired properties. During the MiKS-project, the development of a new proportioning tool was begun. The goal of the new tool was to proportion concrete recipes with manufactured sand and determine matrix volume according to desired slump flow. The tool was never completed, so the main task of this master's thesis has been to complete the tool. Sverre Smeplass and Rolands Cepuritis which started working on developing the new tool, used Smeplass's "old" proportioning tool, "Proporsjonering" as a starting point. Furthermore, three modules were implemented, estimation of flow resistance based on Elisabeth Leite Skare's formula [1], estimation of air void space, and a workability function based on Ernts Mørtzell's consistency function [2]. A linear distribution for matrix surplus based on flow resistance is suggested. Furthermore, the workability function's upper asymptote (maximal slump flow) is determined by the SP dosage, due to its influence on yield stress. The full-scale experiments during the MiKS-project are utilized as a calibration basis for the new proportion tool. More specifically, eight experiments on flow resistance (FlowCyl) and four experiments on air void space (NorBetong-method), were completed during this thesis.

The results shows that the modeled flow resistance does not correlate to the FlowCyl-results. Further analysis shows that the module does not adjust for the filler contribution when the matrix volume is changed. It is unknown if the source of error is located in the module, or in the formula itself. According to a parameter study on Skare's formula, the filler has great influence on flow resistance, especially filler with high volumetric specific surface area (VSSA). This indicates a possible error located somewhere in the proportioning tool or the module itself. Moreover, the module for air void space seems to show usable results compared with the experiments.

The conclusion is that the tool cannot be completed due to deviations in modeled flow resistance, but the theory behind the tool shows great promise for a future tool. Further investigation of the flow resistance module, as well as a greater calibration basis should be carried out to fully complete the tool.

Forord

Denne rapporten er skrevet av studentene Adrian Adamski og Andreas Erlien Grefstad, som en avslutning på 2-årig masterstudium, Bygg- og Miljøteknikk (MIBYGG), konstruksjonsteknikk med spesialisering innen betongteknologi. Masteroppgaven er skrevet under emnet TKT4950, Konstruksjonsteknikk. Arbeidet med oppgaven tar utgangspunkt i litteraturstudier gjort under fordypningsprosjektet høst 2021, TKT4550 [3].

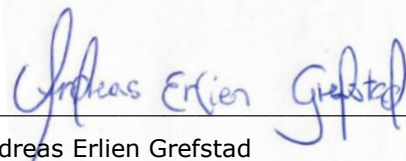
Valg av masteroppgave ble gjort med utgangspunkt i tidligere deltakelse som forskningsassistenter i MiKS-prosjektet, og faglig interesse innen betongteknologi. Det falt derfor naturlig å velge mikroproporsjonering av betong som hovedtema for oppgaven. Et av målene i MiKS-prosjektet var å utvikle et proporsjoneringsverktøy basert på laboratorieforsøk og beregningssimuleringer for knust sand. Verktøyet ble påbegynt under prosjektet, men ikke ferdigstilt. Vi ble i den sammenheng tilbudt å fullføre regneverktøyet som vår masteroppgave.

Vi håper med dette at resultatene i rapporten vil bli nyttig for videre arbeid, og forskning knyttet til temaet.

Trondheim, 11.06.2022



Adrian Adamski



Andreas Erlien Grefstad

Takksigelser

Først og fremst rettes det en stor takk til alle som har hjulpet og veiledet oss under masteravhandlingen. For det første ønsker vi å takke vår veileder, professor Stefan Jacobsen for å ha gitt oss muligheten til å skrive denne avhandlingen som en del av MiKS-prosjektet. Vi er takknemlig for hans ekspertise innen betongteknologi, tålmodighet og tid han har brukt for å rådgive oss under både prosjekt- og masteroppgaven.

For det andre, og likeledes rettes det en stor takk til Sverre Smeplass, sjefsrådgiver i betongteknologiavdelingen ved Skanska Norge AS og tidligere professor ved institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU. Vi er takknemlige for at han har gitt oss muligheten til å videreutvikle sitt eget proporsjoneringsverktøy. Det rettes en spesiell takk til hans ekspertise innen betongproporsjonering og den veiledningen han har gitt oss.

For det tredje, vil vi takke Rolands Cepuritis, førsteamanuensis ved institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU og senior prosjektleder ved Norcem AS, FoU-avdelingen. Vi er takknemlig for han har tatt seg tid til å hjelpe oss med utviklingen av proporsjoneringsverktøyet, forklare teori og hjelpe oss med kalibreringen av verktøyet. Vi er også takknemlig for rådgiving under prosjektoppgaven.

For det fjerde, vil vi takke alle bidragsyttere ved Feiring Bruk AS og Velde AS. Vi takker for et godt samarbeid og alle materialforsendelser dere har bistått med.

Det rettes også en stor takk til ansatte ved laboratorium på materialteknisk, NTNU og SINTEF. Vi takker for at vi har fått muligheten til å bruke betonglaboratoriet og måleinstrumenter brukt under forsøkene i rapporten. Det rettes en spesiell takk til Per Øystein Nordtug, soneansvarlig ved betonglaboratoriet, for å ha tatt imot forsendelser, samt gitt oss tillatelse til å oppholde på laboratoriet etter arbeidstid. I forbindelse med hulromsmålinger, rettes også en spesiell takk til Yannick Martin Anton, ansatt ved SINTEF, for veiledning ved både gjennomføring og beregninger.

Sist, men ikke minst rettes det en stor takk til familie og venner for å ha støttet oss under arbeidet med masteravhandlingen.

Innholdsfortegnelse

SAMMENDRAG	I
ABSTRACT	III
FORORD	V
TAKKSIGELSER	VI
FIGURLISTE	X
TABELLISTE	XI
SYMBOLLISTE	XII
FORKLARINGER	XIII
1 INTRODUKSJON	1
1.1 BAKGRUNN.....	1
1.2 HENSIKT.....	2
1.3 AVGRENSNINGER.....	3
2 TEORIGRUNNLAG	4
2.1 REOLOGI.....	4
2.1.1 <i>Bingham-modellen</i>	5
2.2 PARTIKKEL-MATRIKS MODELLEN.....	6
2.2.1 <i>Matriksfasen</i>	7
2.2.2 <i>Partikkelfasen</i>	7
2.3 KONSISTENSFUNKSJON (<i>KP</i>).....	8
2.4 ESTIMERING AV FLYTMOTSTAND.....	10
2.5 DELMATERIALENES BETYDNING I FERSK BETONG.....	11
2.5.1 <i>Vann</i>	12
2.5.2 <i>Sement</i>	13
2.5.3 <i>Tilsetningsstoff</i>	13
2.5.4 <i>Pozzolaner</i>	14
2.5.5 <i>Tilslag</i>	14
2.5.6 <i>Luft</i>	18
2.6 PROPORSJONERING AV BETONG I HENHOLD TIL PMM.....	18
2.6.1 <i>Tilslagssammensetning</i>	19
2.6.2 <i>Matrikssammensetning</i>	20
2.7 «PROPORSJONERING» AV SVERRE SMEPLASS.....	20
3 FULLSKALAFORSØK	24
3.1 BETONGRESEPTER FULLSKALAFORSØK.....	24

3.1.1	Tilslagssammensetninger	24
3.1.2	Matrikssammensetninger	25
4	METODE, PARAMETERE OG MODELLER.....	27
4.1	LABORATORIEFORSØK	27
4.1.1	Flytmotstand (λ_Q)	27
4.1.2	Hulromsmålinger (H)	29
4.2	UTVIKLING AV REVIDERT VERSJON AV «PROPORSJONERING»	32
4.2.1	Flytmotstand (λ_Q)	32
4.2.2	Estimere hulrom i partikkelfasen (H)	35
4.2.3	Støpelighetsfunksjon (K_{pu})	36
4.2.4	Formatering.....	40
4.2.5	Versjoner	40
4.2.6	Kalibrering av revidert proporsjoneringsverktøy	41
4.3	PARAMETERSTUDIE FLYTMOTSTAND	42
5	RESULTAT OG ANALYSE.....	44
5.1	LABORATORIEFORSØK	44
5.2	REVIDERT PROPORSJONERINGSVERKTØY.....	46
5.2.1	Resultat før kalibrering	46
5.2.2	Kalibrering av hulrom	48
5.2.3	Kalibrering av flytmotstand.....	49
5.2.4	Kalibrering av støpelighetsfunksjon (K_{pu})	52
5.3	PARAMETERSTUDIE FLYTMOTSTAND	60
5.3.1	SP vs. flytmotstand (λ_Q).....	61
6	DISKUSJON.....	62
6.1	FEILKILDER LABORATORIEFORSØK	62
6.1.1	FlowCyl.....	62
6.1.2	NorBetong-metoden	63
6.2	RESULTATER OG KALIBRERING AV PROPORSJONERINGSVERKTØY	64
6.2.1	Flytmotstand.....	64
6.2.2	Hulrom	66
6.2.3	Støpelighetsfunksjonen.....	67
6.3	REVIDERT PROPORSJONERINGSVERKTØY.....	68
7	KONKLUSJON.....	69
8	VIDERE FORSKNINGSARBEID	70
9	REFERANSER	71

INFORMASJON OM VEDLEGG	74
VEDLEGG A PROPORSJONERINGSVERKTØY	75
VEDLEGG B BRUKERMANUAL FOR REVIDERT PROP.VERKTØY	76
VEDLEGG C BRUKERMANUAL FOR GAMMELT PROP.VERKTØY	83
VEDLEGG D FORHÅNDPROPORSJONERTE BETONGRESEPTER (FULLSKALA)	87
VEDLEGG E REVIDERT PROP.VERKTØY, INKL. DATA FRA FULLSKALA	88
VEDLEGG F BEREGNINGSVERKTØY FOR FLOWCYL-FORSØK	89
VEDLEGG G BEREGNINGSVERKTØY FOR HULROMSFORSØK.....	90
VEDLEGG H PROSEDYRE FOR FLOWCYL-FORSØK	91
VEDLEGG I PROSEDYRE FOR TESTING AV PAKNINGSGRAD – TILSLAG	92
VEDLEGG J RAPPORT FULLSKALAFORSØK VELDE.....	94
VEDLEGG K RAPPORT FULLSKALAFORSØK FEIRING/BETONG ØST.....	102
VEDLEGG L BEREGNINGSVERKTØY PARAMETERSTUDIE, FLYTMOTSTAND	133

Figurliste

Figur 2-1 Ulike typer materialdeformasjon [8]	4
Figur 2-2 Bingham-modell [10].....	5
Figur 2-3 Betongens reologiske egenskaper som funksjon av fasenes egenskaper og volumforhold.	6
Figur 2-4 Hyperbolsk tangens (formfunksjon), GeoGebra	8
Figur 2-5 Konsistensfunksjon (K_{p_u}) med tangent (K_{t_u}) i vendepunktet	10
Figur 2-6 Delmaterialers betydning for BHP (a), og effekt av kornform og sandinnhold (b) [15]	12
Figur 2-7 Flytmotstand som funksjon av v/b [7].	12
Figur 2-8 Åpen, rett og tett gradering av sand (uten filler) [27]	16
Figur 2-9 Hulromskurve for tilslag med forskjellig D_{max} [27]	16
Figur 2-10 VSSA vs. flytmotstand for fillere av ulik mineralogisk opprinnelse [19]	17
Figur 2-11 (a) Matriks fyller hulrom i partikkelfase, (b) matriksoverskudd separerer partikler [31]	19
Figur 2-12 Utklipp fra matrikssammensetning under «Matriks»-fanen i «Proporsjonering»	20
Figur 2-13 Utklipp fra tilslagssammensetningen under «Sammensatt tilslag» i «Proporsjonering»	21
Figur 2-14 Eksempel på sammensatt kornfordelingskurve i «Proporsjonering».....	21
Figur 2-15 Eksempel på resept i «Proporsjonering»	22
Figur 2-16 Utklipp blandeskjema fra «Proporsjonering»	22
Figur 4-1 FlowCyl-måleinstrument (a), Wet Mixing med drill (b), instrumentdimensjoner (c) [1]	29
Figur 4-2 Siktekurve for fraksjonsområde 0,063-0,25mm, B30M60 – Velde.....	30
Figur 4-3 (a) «Luftbøtte» med tørt tilslag, (b) «luftbøtte» med tilslag + vann	31
Figur 4-4 Tabell for estimering av flytmotstand i proporsjoneringsverktøy ved bruk av formel [4-1] ..	33
Figur 4-5 Tabell for matriksproporsjonering	34
Figur 4-6 Tabell med faktorer for karakterisering av tilslag i forbindelse med estimering av hulrom ...	35
Figur 4-7 (a) Tabell for korreksjon av referanse-hulromskurve, (b) korrigert hulromskurve med hensyn på steinandel (> 8 mm)	36
Figur 4-8 Grafisk modell av støpelighetsfunksjonen i proporsjoneringsverktøyet.....	37
Figur 4-9 Sammenheng mellom SP-dosering og maksimalt oppnåelig synkutbredelse i betong	38
Figur 4-10 Lineær fordeling for bestemmelse av overskuddsmatriks for «zero slump»	39
Figur 4-11 Tabell for beregning av offset av hulrom	39
Figur 4-12 Kontrollpanel i proporsjoneringsverktøy	40
Figur 5-1 Sammenligning av pakningsgrad M40 og M60, Feiring Bruk/Betong Øst	45
Figur 5-2 Sammenligning av pakningsgrad M40 og M60, Velde	45
Figur 5-3 Sammenligning av konsistenskurver M60 Betong Øst (resept 1.1)	53
Figur 5-4 Sammenligning av konsistenskurver M60 Velde (resept 1.3).....	54
Figur 5-5 Sammenligning av konsistenskurvene M40 Betong Øst (resept 2.3).....	55
Figur 5-6 Sammenligning av konsistenskurver M40 Velde (resept 2.1).....	56
Figur 5-7 Resultat kurvetilpasning M60 Betong Øst (Resept 1.1)	58
Figur 5-8 Resultat kurvetilpasning M60 Velde (resept 1.3).....	58
Figur 5-9 Resultat kurvetilpasning M40 Betong Øst (resept 2.3).....	59
Figur 5-10 Resultat kurvetilpasning M40 Velde (resept 2.1).....	59
Figur 5-11 Parameterstudie, formel forflytmotstand	60
Figur 5-12 Sammenligning plot av SP vs. λ_Q	61

Tabelliste

Tabell 2-1 Bidragfaktorer (k_x) for λ_Q [1].....	11
Tabell 3-1 Forhåndsproporsjonerte tilslagssammensetninger, «Bør-verdier»	24
Tabell 3-2 Matrikssammensetning og SU, Velde M60.....	25
Tabell 3-3 Matrikssammensetning og SU, Velde M40.....	25
Tabell 3-4 Matrikssammensetning og SU, Betong Øst M60.....	26
Tabell 3-5 Matrikssammensetning og SU, Betong Øst M40.....	26
Tabell 4-1 Fullskalresepter, målt med FlowCyl.....	28
Tabell 4-2 Tilslagssammensetning - Hulromsforsøk, Feiring bruk M60/M40	30
Tabell 4-3 Bidragsfaktorer, (j_x) for λ_Q	33
Tabell 4-4 Opprinnelige j_1 - og j_3 -konstanter før kalibrering.....	41
Tabell 4-5 Utgangspunkt for materialparametere i matrikssammensetningen	43
Tabell 4-6 Parameternes variasjonsområde	43
Tabell 4-7 Bidragsfaktorer	43
Tabell 4-8 Utvalg av resepter fra Skares avhandling [1] med kun variasjon i SP-dosering	43
Tabell 5-1 Resultater fra laboratorieforsøk (FlowCyl og NorBetong-metode).....	44
Tabell 5-2 Estimerte verdier beregnet med proporsjoneringsverktøyet før kalibrering (modell) vs. laboratorieforsøk/fullskalaforsøk.....	47
Tabell 5-3 Resultat ved bruk av Solver på referanseverdier for hulromskurver	48
Tabell 5-4 Kalibrerte referanseverdier for hulromskurve	48
Tabell 5-5 Estimert hulrom med kalibrert hulromskurve	49
Tabell 5-6 Endring av j_1 - og j_3 -konstanter for kalibrering av flytmotstand-modul	49
Tabell 5-7 Endring av j_3 - og j_4 -konstanter for kalibrering av flytmotstand-modul	50
Tabell 5-8 Endring av kun j_4 -konstant for kalibrering av flytmotstand-modul	50
Tabell 5-9 Resultater med konstanter, (k_x) fra Skares avhandling [1]	51
Tabell 5-10 Sammenligning mellom faktisk og estimert matriksvolum med korrekt hulrom og flytmotstand	52
Tabell 5-11 Kurvetilpasning ved endring av offset og konstant ($-4/3$) i a	57

Symbolliste

λ_Q	Flytmotstand
τ	Skjærspenning
μ	Plastisk viskositet
τ_0	Flyteskjærspenning
$\dot{\gamma}$	Skjærhastigheten
Γ	Virkårlig reologisk parameter
a	Formfunksjonen stigningsparameter.
β	Utrykk for formfunksjonens plassering
ρ	Densitet
$Tanh$	Tangens hyperbolikus
Hm	Hulromsmodul
Fp	Fillermodifisert pasta (matriksvolum)
H	Hulrom
O	Offset
Fm	Finhetsmodulen
Kp	Konsistensfunksjon for mørtel og betong
Kp,u	Konsistensfunksjon, synkutbredelse for mørtel og betong
n og m	Øvre og nedre måleverdi for synk og utbredelse

Forklaringer

PMM	Partikkel-Matriks modell
SU	Synkutbredelse
Mv	Matriksvolum
NS-EN	Norsk Standard
SP	Superplastiserende tilsetningsstoff
MiKS	Mikroproporsjonering i knust sand, forskningsprosjekt (2016-2021)
SINTEF	Stiftelsen for Industriell og Teknisk forening
vs.	Versus (sammenlignet med)
Filler/finstoff	Partikler $\leq 0,125$ mm
Natursand	Naturlig fremstilt sand
Knust sand	Maskinknust sand
BØ	Betong Øst AS
FB	Feiring Bruk AS
Lab	Laboratorium
Solver	Regresjonsanalyse i Microsoft Excel

1 INTRODUKSJON

1.1 Bakgrunn

Betong regnes som et av de mest brukte bygningsmaterialene i verden og har i lang tid hatt en sentral plass i norsk byggevirksomhet. I betongbransjen, særlig blant entreprenører har bearbeidheten og støpeligheten i fersk betong vært av særlig interesse, blant annet da dette har stor betydning for arbeidsmengden ved støpearbeid. Ved bestilling av betong er det vanlig å oppgi ønsket konsistens av fersk betong. I dag er det ikke noe verktøy som kan brukes til å proporsjonere en resept basert på ønsket konsistens. Det finnes verktøy for proporsjonering av betong med hensyn til betongkvalitet og styrke, men slike verktøy er avhengig av praktiske forsøk med betongblanding for å finne konsistensen i betongen. Selvfølgelig kan man forutse hvordan konsistensen påvirkes basert på erfaring, men dette gir ikke noe godt grunnlag for proporsjonering av betong. Sverre Smeplass, sjefsrådgiver i betongteknologiavdelingen ved Skanska Norge AS og tidligere professor ved institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, har utviklet et proporsjoneringsverktøy for betong. Verktøyet er basert på Ernst Mørtzell sin Partikkel-Matriks modell, og proporsjonerer betong med hensyn til ønsket masseforhold og matriksvolum. Verktøyet krever også at man definerer hvilke materialer som skal benyttes i resepten.

Sementproduksjon bidrar til store CO₂-utslipp på verdensbasis [4], noe som setter press på optimalisering av betongreseptene for å kutte unødvendig sementforbruk. Dette forutsetter god kunnskap om betong og alle parameterne som påvirker egenskapene i betong. I nyere tid har natursand blitt en begrenset ressurs og at tilgangen til gode natursand-ressurser har blitt utfordrende. Dette har gjort det nødvendig å fremstille sand ved å knuse stein. I den forbindelse har det vist seg at sand har andre egenskaper enn natursand, spesielt med tanke på kornform [5]. Norges forskningsråd har derfor finansiert et prosjekt kartlegge effekten av knust sand på betongreologi, også kjent som *MiKS-prosjektet*, (2016-2021). Sammen med NTNU har Velde AS og Feiring Bruk AS/Betong Øst, gjennomført fullskalatester med knust tilslag. Et av målene med prosjektet var å utarbeide et mikroproporsjoneringsverktøy basert disse eksperimentene [6]. Dette blir bakgrunnen for denne masteroppgaven.

På bakgrunn av nødvendigheten av kunnskap knyttet til betongsammensetning er det utviklet modeller og verktøy, for å enklere kunne forstå sammenhengen. I arbeidet med denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i Ernst Mørtzells Partikkel-Matriks modell og Sverre Smeplass proporsjoneringsverktøy. Fremtidig etterspørsel etter nye og optimaliserte betongresepter forutsetter robusthet og kvalitet i utviklede modeller og verktøy, som aktørene på markedet kan ha god nytte av. Intensjonen med et nytt og forbedret proporsjoneringsverktøy er å bespare betongleverandørene for prøveblandinger, samtidig som proporsjoneringen støttes på teori. Dette er både tid og økonomisk besparende, og vil samtidig sikre god kvalitet i reseptene.

Arbeidet med verktøyet er påbegynt forut av denne masteroppgaven, men ikke ferdigstilt. Sverre Smeplass og Rolands Cepuritis er sentrale i arbeidet, og begge står bak store deler av beregningene.

1.2 Hensikt

Hensikten i masteroppgaven er å ferdigstille arbeidet med verktøyet som er påbegynt i MiKS-prosjektet. I praksis betyr dette å videreutvikle Sverre Smeplass sitt proporsjoneringsverktøy slik at det fremstiller betongresepter basert på ønsket betongflyt. Dette gjøres ved å implementere en «støpeligheitsfunksjon» i verktøyet som ut ifra flytmotstanden (λ_0) i matriksfasen og hulrommet i partikkelfasen, estimerer hvilket matriksvolum som er nødvendig for å oppnå ønsket konsistens. Støpeligheitsfunksjonen baseres på Mørtsells konsistensfunksjon for mørtel og betong, likning [8-3] i hans avhandling [2]. Videre vil fullskalatestene i forbindelse med MiKS-prosjektet bli brukt som grunnlag for kalibrering av verktøyet.

1.3 Avgrensninger

Rapporten er på et generelt detaljeringsnivå og tilpasset lesere med grunnkurs i betongteknologi. Det samme er gjeldende for brukere av proporsjoneringsverktøy som presenteres i avhandlingen. Oppgaven avgrenses til norske standarder og norsk praktisering for proporsjonering av betong.

I arbeidet med denne oppgaven er det valgt å ikke ta hensyn til faktorene stabilitet og tidsparameteren. Verktøyet som utvikles i forbindelse med oppgaven, vil derfor estimere konsistens kort tid etter blanding.

Arbeidet med kalibreringen av verktøyet avgrenses til tilgjengelig data og resepter brukt i MiKS-prosjektet (fullskalaforsøkene).

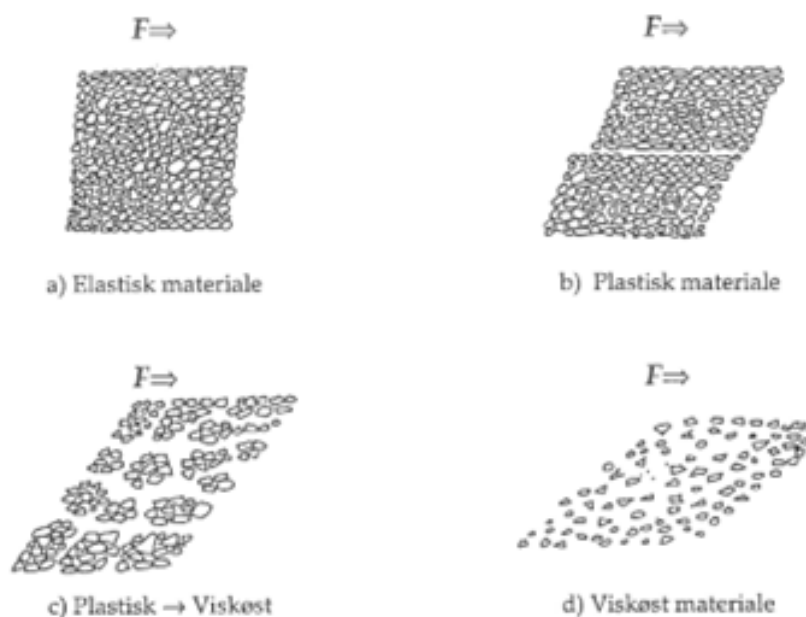
2 TEORIGRUNNLAG

2.1 Reologi

En væskes indre motstand mot strømming når det utsettes for krefter kan defineres som viskositeten til et materiale. Mer teoretisk kan viskositeten defineres som relasjonen mellom indre skjærspenning og skjærhastighet materialet er utsatt for [7]. I praksis vil væskens viskositet fortelle noe om konsistensens, hvor, «tynt» eller «seigt» et materiale er.

Reologi defineres som «læren om flyte- og deformasjonsegenskapene hos materialer under en gitt belastning» [5]. Begrepet er mer sammensatt enn viskositet og omfatter komplekse væsker som er vanskeligere å beskrive i forhold til bevegelse og deformasjon. I motsetning til enkle væsker vil mer komplekse væsker som betong, ikke kunne karakteriseres ved viskositet. Konsistensen til tiksotropiske materialer som betong vil avhenge av belastningen væsken er utsatt for, samt motstanden partiklene innad i væsken skaper, skjærspenningen (τ). Nærmere beskrivelser og teori rundt begrepet reologi er beskrevet i [5], [2].

Betongens oppførsel kan variere basert på spenningstilstand og materialsammensetning. Det skilles mellom fire tilstander, elastisk, plastisk, plastisk-viskøst og viskøst materiale, som vist på Figur 2-1. De ulike fasene kan defineres ved Hooke's law og viskositetsteorien. Overgangen mellom plastisk og viskøs, (viskoplastisk) tilstand er av særlig interesse, Figur 2-1 c). Materialoppførselen til betong og sementbaserte suspensjoner kan beskrives ved Bingham-modellen. Modellen karakteriserer flyteegenskaper ved bingham-parameterne (BHP), flyteskjærspenning (τ_0) [Pa] og plastisk viskositet (μ). I denne avhandlingen ses det nærmere på fersk betong som et viskoplastisk materiale og relevante parametere for å beskrive reologiske egenskaper.



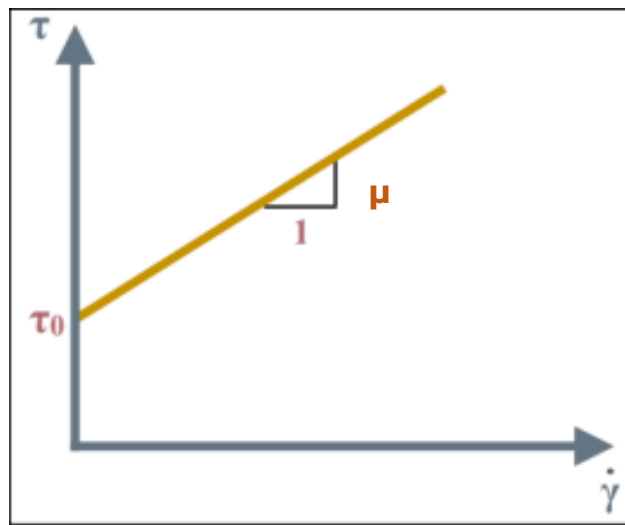
Figur 2-1 Ulike typer materialdeformasjon [8]

2.1.1 Bingham-modellen

Bingham-modellen foreslått av Tatterson og Banfill [9], kan brukes til å beskrive oppførselen til en viskoplastisk væske uttrykt ved skjærspenning (τ), og skjærhastigheten ($\dot{\gamma}$). I motsetning til en viskøs væske må betongen utsettes for en initial skjærspenning før den begynner å flyte (τ_0), Figur 2-2. Betong regnes som en viskoplastisk væske og kan dermed bli karakterisert som en «bingham-væske», uttrykt ved formel [2-1]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad [2-1]$$

Modellen kan brukes til å beskrive betongens reologiske egenskaper i fersk fase. Flyteskjærspenning (τ_0) og plastisk viskositet (μ) er mulig å måle ved hjelp av et Rheometer [7].



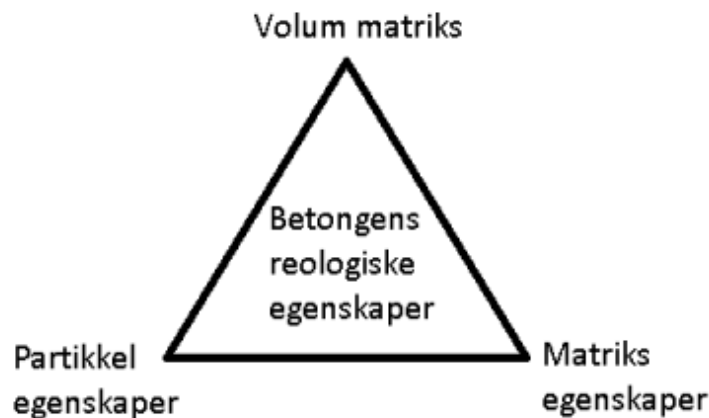
Figur 2-2 Bingham-modell [10]

Figur 2-2 viser sammenhengen mellom skjærspenning (τ) og skjærhastigheten ($\dot{\gamma}$) som et lineært forhold, hvor plastisk viskositet (μ) defineres som stigningstallet mellom skjærspenning (τ) og skjærhastigheten ($\dot{\gamma}$). Verdi på minimum flyteskjærspenning (τ_0) er avhengig av betongens sammensetning og dens indre motstand mot flyt.

Mengden energi man må tilføre betongen for at den skal flyte uttrykkes ved betongens flyteskjærspenning (τ_0). Med andre ord kan flyteskjærspenning (τ_0) referere direkte til betongens utbredelsesegenskaper. Ved maksimal oppnådd flyteskjærspenning til væsken stoppe å flyte. Plastiske viskositet (μ) beskriver derimot betongens flyteegenskaper under bevegelse. Nærmere teori bak modellen er beskrevet i [9], [8]. Ved videre bruk av flyteskjærspenning (τ_0) og plastisk viskositet (μ) refereres det til væskekarakterisering med Bingham-modellen.

2.2 Partikkel-Matriks modellen

Professor Ernst Mørtzell har som del av sin doktoravhandling [2] utviklet Partikkel-Matriks modellen (PMM). I følge Mørtzells modell vil konsistens være avhengig delmaterialenes respektive egenskaper, volumforholdet og deres kjemiske interaksjon. For å enklere kunne modellere det komplekse systemet tar PMM utgangspunkt i betong som et system bestående av to faser, matriks og partikler. Hensikten med modellen er å enklere kunne beskrive delmaterialenes påvirkning på betongens konsistens. Modellen karakteriserer partikkelfasen som friksjonsmateriale, tilslagspartikler $> 0,125$ mm i kornstørrelse. Matriksfasen karakteriseres som den flytende og viskøse delen, bestående av væsker og partikler $\leq 0,125$ mm i partikkelstørrelse. Egenskaper for partikler ($\leq 0,125$ mm) kontrolleres av overflateegenskaper fremfor tyngde og kornform. Partiklene påvirker i stor grad av vann og annen væske de kommer i kontakt med, noe som gjør det naturlig at de betraktes som en del av matriksfasen [7]. Figur 2-3 illustrerer filosofien bak PMM, hvor betongens reologiske egenskaper er avhengig av egenskapene til hver fase, samt volumforholdet mellom dem. PMM brukes videre som teorigrunnlaget i avhandlingen.



Figur 2-3 *Betongens reologiske egenskaper som funksjon av fasenes egenskaper og volumforhold.*

I praksis karakteriseres modellen med en enkelt-parameter for hver fase, flytmoststand (λ_0) for matriksfasen, og hulromsmodul (Hm) til partikkelfasen [11]. Overnevnte parametere er utgangspunkt for Mørtzells konsistensfunksjon, [8-5] i hans avhandling [2]. Nærmere detaljer om parametere og anvendbarhet presenteres i [12], [2].

2.2.1 Matriksfasen

Matriksfasen inkluderer sement, vann, eventuelle pozzolaner/tilsetningsstoff og filler ($\leq 0,125$ mm) i tilslaget [2]. Overnevnte delmaterialer bestemmer egenskapene til matriks, hvor hvert delmateriale har sitt eget bidrag. Matriksfasen har stor betydning for konsistensen i betong, der både egenskapene og mengden matriks er avgjørende.

Videre i oppgaven karakteriseres matriksens egenskaper ved en enkelt parameter, flytmotstand (λ_Q). Flytmotstanden kan estimeres ved empirisk formel eller ved FlowCyl-forsøk. Målemetoden (FlowCyl) utviklet av Mørtzell [2], baseres på Marsh cone test utviklet av Bartos *et al.* [13]. Den enkle målemetoden karakteriserer matriksen ved suspensjonens indre motstand fra 0 til 1, hvor 0 representerer idealvæsker uten noen form for indre motstand, mens 1 representerer væsker med veldig høy viskositet, som er for viskøse til å måles med FlowCyl-forsøk. Midlertidig viser studier begrensninger til målemetoden, ved at λ_Q korrelerer dårlig med bingham-parameteren, flytskjærspenning [11]. Cepuritis *et al.* [11], fant ut at λ_Q domineres av bingham-parameteren, plastisk viskositet (μ), og at PMM/FlowCyl korrelerer best for matrikser med neglisjerbar flytskjærspenning (τ_0) (høy SP-dosering). Dessuten ses det en sammenheng mellom samtidig endring i begge BHP og λ_Q . Til tross for mye usikkerhet i litteraturen, vil måling av flytmotstand med Flowcyl-forsøk, være i fokus i denne avhandlingen. I forbindelse med flytmotstand som en målbar parameter utviklet også Mørtzell en empirisk formel for estimering av flytmotstand, formel [8-1] i [2]. I nyere tid er denne revidert av Elisabeth Leite Skare [1]. Formelen presenteres i avsnitt 2.4. Mer om delmaterialenes betydning i matriks og for fersk betong presenteres i avsnitt 2.5.

2.2.2 Partikkelfasen

Delmaterialer $> 0,125$ mm regnes som en del av partikkelfasen. Disse omtales som betongens tilslags sammensetning, normalt bestående av flere fraksjoner. Tilslagets egenskaper i fersk betong avhenger av kornfordeling, kornform, mineralogi og overflatestruktur [5]. Overnevnte parametere bestemmer partikkelpakning og hulrom, som sammen med matriksfasen avgjør betongens konsistens. Mer om tilslagets respektive egenskaper og dets betydning for fersk betong presenteres senere i avhandlingen, avsnitt 2.5.5.

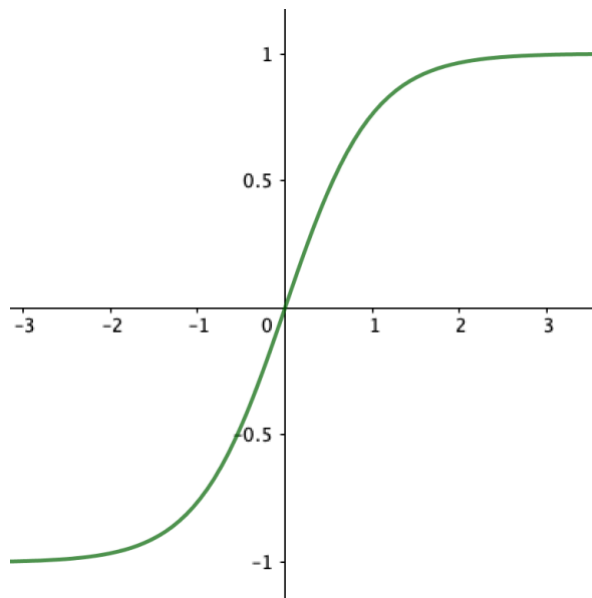
Hulrom og partikkelpakning kan bestemmes ved flere metoder. NorBetong-metoden er utviklet for måling av tilslag med større partikler. I denne avhandlingen er NorBetong-metode benyttet for hulromsforsøk.

I avhandlingen til Ernst Mørtzell karakteriseres partikkelfasen ved hulromsmodulen (Hm), basert på finhetsmodul (Fm) og tilslagets hulrom (H). Parametere og tilhørende ligninger er utviklet for å finne en korrelasjon mellom tilslagets egenskaper og nødvendig matriks for å oppnå flyt i betong. Med andre ord, overskuddsmatriks utover tilgjengelig hulrom, for å oppnå målbar konsistens, «zero slump». Nyere studier viser at det stilles skepsis til Hulromsmodul [5]. Parameteren baseres på korreksjon av hulrom med empiriske tilslagsfaktorer. Hulromsmodul tar ikke høyde for matriksens egenskaper og hvilken påvirkning den har på partikkelseparasjon. Senere i rapporten blir en revidert hulromsmodul foreslått,

derfor er det videre valgt å kun karakterisere partikkelfasen ved hulrom (H). Se avsnitt 4.2.3.2 for introduksjon ny teori.

2.3 Konsistensfunksjon (K_p)

Mørtzell har i sitt arbeid utviklet empiriske formler for å estimere konsistens av betong, bedre kjent som konsistensfunksjon (K_p). Formelen er basert på hyperbolsk tangens funksjon med S-formet kurve, Figur 2-4. Funksjonen gir et godt utgangspunkt for å beskrive forventet konsistens ved forskjellige matriksvolum.



Figur 2-4 Hyperbolsk tangens (formfunksjon), GeoGebra

Konsistensfunksjonen [2-2], er formelen Mørtzell kom frem til i sitt arbeid, som er avhengig av flytmotstand, hulromsmodul og matriksvolum. Formelen estimerer forventet konsistens uttrykt ved synkmål eller synkutbredelse. Videre i rapporten blir konsistensfunksjon for synkutbredelse benyttet (K_{p_u}). Figur 2-5 illustrerer en grafisk fremstilling av konsistensfunksjonen for utbredelse.

$$Kp = \frac{(n - m)}{2} \cdot (\text{Tanh}(x) + 1) + m \quad [2-2]$$

hvor,

- n = øvre asymptote [*mm, synkutbredelse eller synkmål*]
- m = nedre asymptote [*mm, synkutbredelse eller synkmål*]
- x = formfunksjonens argument, angitt som:

$$x = \alpha \cdot (2 \cdot Mv - 1 - \beta) \quad [2-3]$$

hvor,

- Mv = Matriksvolum [*volum-% av betong*]
- a = Uttrykk for stigningsforløpet i vendepunktet for konsistensfunksjonen (Kp)
- β = Uttrykk for plassering av konsistensfunksjonens vendepunkt på en x-akse fra 0-1

Der, a er uttrykt som:

$$\alpha = 19 \cdot e^{-2,45 \cdot \lambda_0} \quad [2-4]$$

I nyere tid har Mørtsell revidert konstanten -2,45 i uttrykket for a , til $-\frac{4}{3}$.

Og, β er uttrykt som:

$$\beta = \frac{2 \cdot Hm}{100} - 1 + \frac{1}{\alpha} \quad [2-5]$$

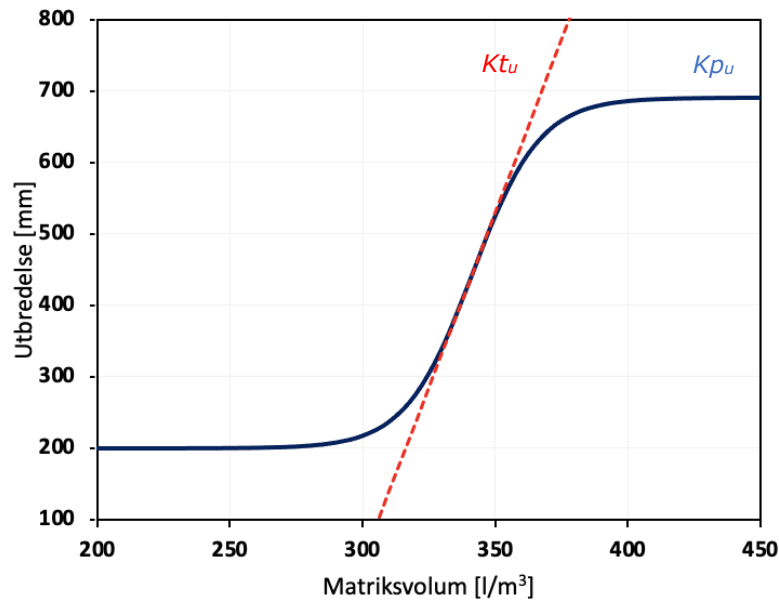
hvor,

- Hm = Hulromsmodul, (formel [8-2] i Mørtsells avhandling [2])

Ved hjelp av formel [6-3] i Mørtsells avhandling [2], kan β omregnes til plasseringen for vendepunktet uttrykt i matriksvolum.

Tangenten (Kt) i vendepunktet for konsistensfunksjonen er gitt som:

$$Kt = \frac{1}{2} \cdot ((n - m) \cdot x + m + n) \quad [2-6]$$



Figur 2-5 Konsistensfunksjon (K_{p_u}) med tangent (K_{t_u}) i vendepunktet

Tangenten (K_{t_u}) viser hvordan stigningsforholdet er gjennom vendepunktet i støpelighetsfunksjonen. Stigningen til funksjonen avgjøres av flytmotstanden i matriksen, hvor høyere flytmotstand gir lavere stigningstall. Denne sammenhengen beskrives av a , der flytmotstanden (λ_Q) inngår. Videre avhenger den horisontale plasseringen av kurven av hulrommet i partikkelfasen. Punktet der kurven begynner å stige fra den nedre asymptoten, representerer nødvendig matriksvolum som gir tilstrekkelig partikkelseparasjon slik at betongen initierer flyt. Dette punktet representeres av hulromsmodulen (H_m), som er inkludert i uttrykket for β , som for øvrig uttrykker hvor vendepunktet for funksjonen ligger på x-aksen.

2.4 Estimering av flytmotstand

I forbindelse med sin doktoravhandling, utarbeidet Elisabeth Leite Skare en revidert versjon av Ernst Mørtells empiriske formel for estimering av flytmotstand [1]. Den nye formelen [2-7] gjør det mulig å estimere virkårlige reologiske parametere (Γ); plastisk viskositet (μ) eller flytmotstand (λ_Q). Formelen er utviklet basert på 117 matriks-forsøk, fordelt på fem serier med varierende sammensetning. Reseptene er presentert i [1]. Én type co-polymer (Dynamon SR-N) er benyttet, med 0,75-1,75 % variasjon i dosering. Det er brukt to typer sement, STD FA/Industrisement, og fire ulike knuste tilslagsfillere. Fillerene har varierende VSSA (volumetrisk spesifikt overflateareal) fra 260 til 728 mm²/mm³.

Formel [2-7] tar utgangspunkt i delmaterialenes respektive påvirkning på matriksens reologiske parametere, representert ved materialparametere og bidragsfaktorer (k_x). Verdi på eksponenten (n) avhenger av hvilken reologisk parameter det refereres til. For flytmotstand settes n lik 1. Verdier for materialparametere avhenger av matriks sammensetning. Bidragsfaktorene er konstant for bestemt type material, se Tabell 2-1. Faktorene er bestemt ved regresjonsanalyse. Detaljer rundt formel [2-7] og konstanter i Tabell 2-1 er beskrevet i publikasjon [1].

$$\Gamma = \left(k_1 \cdot \frac{VSSA_{matriks}}{100} - k_2 \cdot \phi - k_3 \cdot \frac{w}{p} - k_{4,i} \cdot \frac{SP}{c} + k_{5,i} \cdot \frac{c}{w} + k_6 \cdot \frac{bio}{f} + k_7 \cdot \frac{FA}{b} + k_8 \cdot \frac{s}{b} + k_{9,j} \cdot \left(\frac{f}{b} \right)^n \right) \quad [2-7]$$

hvor,

$$VSSA_{matriks} = \sum_i VSSA_i \cdot V_i$$

Hvor $VSSA_i$ er $VSSA$ til tørrstoff i , og V_i er volumfraksjon av tørrstoff i av alle tørrstoff, unntatt silikastøv (s).

$$\phi = \text{Totalt volumfraksjon av alt tørrstoff (sement, pozzolan og filler)}$$

Fortegnet foran de ulike faktorene indikerer effekten delmaterialet har på gjeldene reologiske parameter, mens bidragsfaktoren (k_x) indikerer virkningsgraden. Med andre ord hvor mye flytmotstand påvirkes ved endring i materialparameteren i massefraksjon.

Tabell 2-1 Bidragsfaktorer (k_x) for λ_Q [1]

n	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	
λ_Q	1	0.42	2.72	1.47	Std FA 0.06 Industry 0.25	Std FA 0.31 Industry 0.16	1.41	0.31	2.15	Fine 0.47 Int. 0.58 Coarse 0.47 VSI 0.77

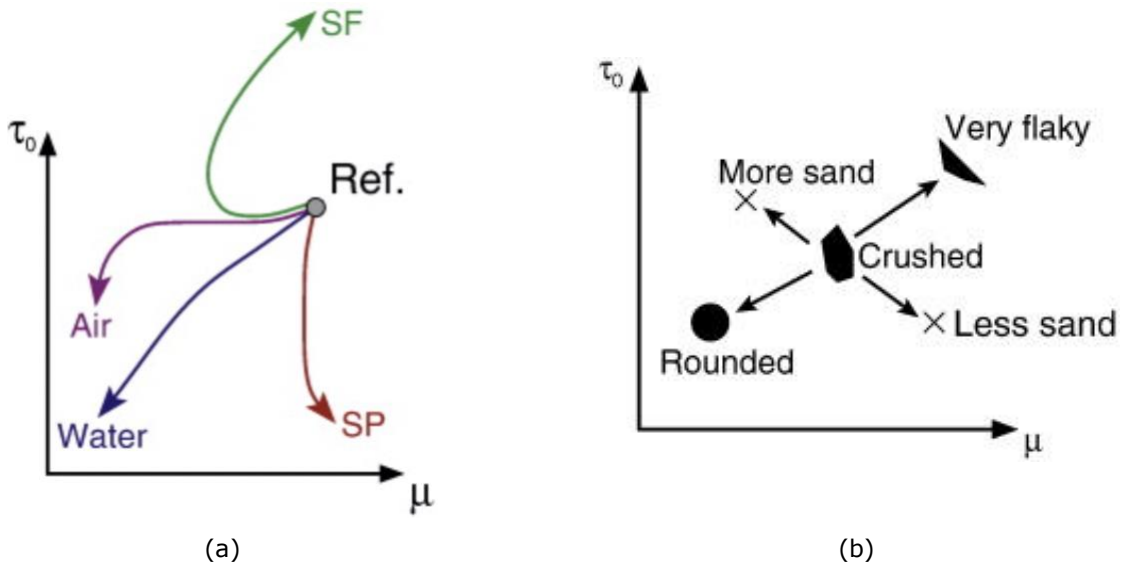
Overnevnte bidragsfaktorene er revidert ytterligere i forkant av denne oppgaven. Disse blir presentert i avsnitt 4.2.1.1.

2.5 Delmaterialenes betydning i fersk betong

Gjeldende krav til betongkvalitet og betongtype er bestemt etter NS-EN 206 [14]. Krav til delmaterialene beskrives også i standarden.

Betong består av flere delkomponenter som hver for seg påvirker betongen på ulikt vis, både i fersk og herdet fase. Delmaterialenes komposisjon, avhenger av ønskede egenskaper i betong, og vil variere avhengig av hvilke egenskaper de relateres til. Endres et delmateriale, kan det påvirke effekten av andre delmaterialer. God betongkvalitet forutsetter derfor at man har kontroll på delmaterialenes egenskaper, samt hvordan de påvirker hverandre. Betongens egenskaper er ikke bare avhengig av delmaterialene selv, men også avhengig av omgivelsesforhold, blandeutstyr, blandeprosess og tid etter blanding. I dette delkapittelet ses det nærmere på delmaterialenes påvirkning i fersk betong rett etter blanding, hvorav betongens reologiske egenskaper er av særlig interesse. Det tas også utgangspunkt i delmaterialers betydning for betong med høy flyt. Videre forutsettes det stabilitet i betongen når det er snakk om konsistens og reologi. Delmaterialenes betydning i fersk betong beskrives videre med hensyn til PMM.

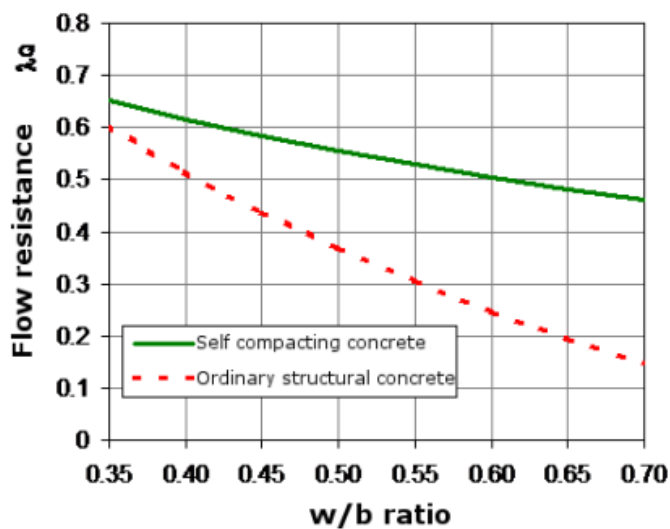
BHP brukes også for å beskrive reologiske egenskaper. Figur 2-6 er hentet fra Wallevik *et al.* Publikasjon [15], og viser delmaterialenes betydning i forhold til BHP (reograf).



Figur 2-6 Delmaterialers betydning for BHP (a), og effekt av kornform og sandinnhold (b) [15]

2.5.1 Vann

Vannmengden i betong bestemmes hovedsakelig etter betongklasse, nærmere bestemt forholdet mellom vann og sement (v/c). Bestandighetsklasser og grenseverdier for v/c finnes i NS-EN 206. Vannets egenskaper i betong knyttes til matriksens flytmotstand eller væskens plastiske viskositet (μ). Vann som idealvæske bidrar til dispergering av partikler noe som reduserer matriksens plastiske viskositet. Figur 2-7 viser sammenhengen mellom v/b og flytmotstand, hvor stigende v/b -tall gir redusert flytmotstand [7]. Det samme vises på reograf i Figur 2-6 (a), hvor økt vannmengde reduserer både flytskjærspenning og plastisk viskositet. Differansene i stigningstall (SKB og OB) kommer av normalt høyere finstoffinnhold i SKB.



Figur 2-7 Flytmotstand som funksjon av v/b [7].

2.5.2 Sement

Sementens geometriske forhold påvirker matriks i stor grad. Densitet, sementgradering, finhet og kornform er avhengig av sementtype. Høyt spesifikt overflateareal (blaine-finhet) vil normalt føre til økt vannbehov i betong grunnet større kontaktflate mot vann. Jo høyere finhet, desto seigere matriks. Overflatespenninger mellom sementpartiklene suspendert i vann har en tendens til å føre til flokkulering. Sementens flokkuleringsegenskaper i vann fører til økt matriksviskositet, og motsatt ved de-flokkulering. Dette bekreftes av H.J Yim *et.al* [16]. Se [16], [18] for nærmere detaljer om sement og dens betydning i fersk betong.

2.5.3 Tilsetningsstoff

NS-EN 934-2 [17] klassifiserer kjemiske tilsetningsstoffer for betong i 11 klasser. Klassifiseringen er gjort etter tilsetningsstoffenes egenskap i betong, deres effekt og virkningsgrad. Betongens reologiske egenskaper påvirkes i stor grad av vannreducerende tilsetningsstoffer. Disse er av særlig interesse i forbindelse med reologi. Også andre tilsetningsstoff påvirker betongens reologi. Disse blir ikke brukt og heller ikke beskrevet i denne avhandlingen.

2.5.3.1 Vannreducerende tilsetningsstoff

Tilsetningsstoffets virkningsgrad på reologi avhenger av dens kjemiske sammensetning. Superplastiserende tilsetningsstoff (SP) basert på co-polymer er den mest effektive [7]. SP-stoff brukes hovedsakelig som vannreducerende i betong, enten for å opprettholde, eller forbedre støpelighet uten å påvirke betongens mekaniske egenskaper. Hovedeffekten er først og fremst dispergere flokkulerte sementpartikler, ved sterisk hindring [7]. Nyere studier viser at SP-stoff også har en dispergerende effekt på filler [19]. Effekten avhenger av mineralogi, overflateareal og SP-dosering.

Wallevik målte sammenhengen mellom BHP og SP-stoff i sin doktoravhandling [8]. Resultatet i doktoravhandlingen viser klar sammenheng mellom SP-stoff og dens påvirkning på flyteskjærspenning. Ifølge Wallevik påvirkes plastisk viskositet minimalt av SP-dosering, som vist i Figur **2-6**. Nyere studier av Q.Meng *et al.* [20] viser også at plastisk viskositet påvirkes av SP (co-polymer) ved doseringsmengder utover suspensjonens metningsnivå (fullstendig partikkeldispergering). Dette medfører økt viskositet i væsken. I forhold til PMM og matrikskarakterisering korrelerer flytmotstanden (λ_Q) godt med plastisk viskositet, men dårlig med flyteskjærspenning [11], [1], [5]. Ved neglisjerbare flyteskjærspenninger (høy SP-dosering) kan λ_Q karakteriseres som plastisk viskositet. Verdier under metningsnivå vil forstyrre flytmotstanden λ_Q slik at den ikke direkte kan karakteriseres ved plastisk viskositet. Dette grunnet høye skjærspenninger ved utløpet på FlowCyl. Det ses fortsatt klar sammenheng mellom SP-dosering og Flytmotstand, der økt SP-dosering medfører en reduksjon i flymotstand λ_Q [7]. På bakgrunn av overnevnt teori antas det videre i rapporten at maks synkutbredelse avhenger av SP-dosering, se avsnitt 4.2.3.1 for innføring av ny formel.

2.5.4 Pozzolaner

Bruk av pozzolaner gjør det mulig å redusere andelen sement i betong. De mest brukte er silika, flygeaske og slagg. Som industrielt biprodukt blir det enten tilsatt i sement eller blandet inn separat under utblanding. Pozzolanenes påvirkning på fersk betong er avhengig av betongsammensetning og andre tilsetningsstoff. Virkningsgrad sammenlignet med sement angis ved effektivitetsfaktoren, k . Faktoren kvantifiserer effekten av pozzolaner sammenlignet med sement i forhold til styrke og bestandighet, og inkluderes i bestemmelse av masseforholdet (v/b). Silika og flyveaske presenteres i de neste avsnittene.

2.5.4.1 Silikastøv (s)

Effekten av silikastøv på matriksegenskaper styres av overflateegenskapene. Høyt spesifikt overflateareal (20000 m²/kg), medfører økt vannbehov ved økt dosering. Silika gir økt kohesjon og friksjon innad i matriks. Resultatene i [21], [22] viser at BHP, (τ_0) og (μ), øker med økt silika-dosering. Det samme bekreftes i doktoravhandlingen til Wallevik [8]. Han konkluderer med at silika som sementerstatning gi reduksjon i plastisk viskositet til en viss terskelmengde, avhengig av sementinnholdet, samtidig som τ_0 påvirkes lite. Doseringer utover terskelgrense gir økning i både τ_0 og μ , se Figur **2-6** (a). For PMM og matriksfasens egenskapsfaktor, λ_Q , gjelder det samme, økt dosering over terskelgrense gir økt flytmoststand [7]. Høye doseringer vil være ugunstige for matriksens konsistens da økt viskositet ikke kan kompenseres med SP-stoff [7]. Silikastøv har en effektivitetsfaktor k lik 2. Mer om effekten av silika på fersk betong er diskutert i [8].

2.5.4.2 Flygeaske (FA)

I Norge finnes flygeaske som innblanding i standardsement, opptil 35 % dosering (STD FA). Partiklene har en blainefinhet på 300-500 m²/kg [7]. Flygeaskens reologiske funksjon i betong er noe lignende sementens egenskaper, og bidrar til økt støpelighet [7]. Økt mengde flygeaske, reduserer (τ_0) og (μ). M.Mapa *et al.* [23] beskriver årsaken til reduksjonen med kulelagereffekten. Flygeaskens harde, sfæriske partikler har en «smørende» effekt på partikkelinteraksjon ved at fillersand kan «rulle» på flygeaskepartiklene. Effektivitetsfaktoren settes vanligvis til k lik 0,7.

2.5.5 Tilslag

Tilslag utgjør vanligvis rundt 70 % av betongens volum avhengig av betongtype og sammensetning. Det er derfor naturlig at tilslagets respektive egenskaper har stor betydning for betongens kvalitet og reologi. Tilslagets gradering, kornform og pakningsgrad er av særlig interesse. For å forenkle begrepet tilslag, betegnet som en samling av fraksjoner, skilles det mellom sand (0-8 mm) og stein (8-D_{max}). Videre tas utgangspunkt i maskinknust tilslag (sand) og hvilke parametere som påvirker partikkelfasens enkelt-parameter hulrom.

Betegnelser på tilslag:

Type	Fraksjonsområde
Filler	> 125 μm
Sand	0 – 8 mm
Stein	8 – D_{max}

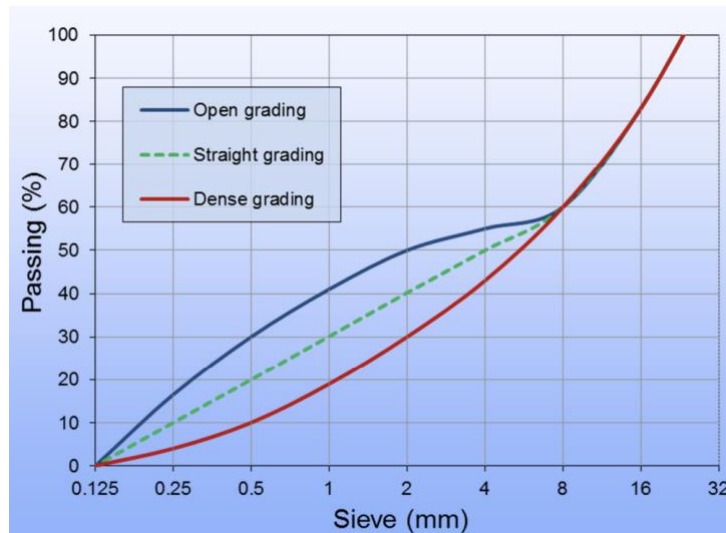
2.5.5.1 Gradering og pakningsgrad

Tilslagetets samlede korngradering (gradering etter NS-EN 933-1 [24]), også kalt PSD (particle-size distribution), regnes som en av parameterne med størst betydning for betongens reologiske egenskaper [2]. Graderingen har direkte sammenheng med tilslagetets totale hulrom, derav nødvendig matriksvolum. Avhengig av gradering vil BHP påvirkes. Lavt hulrom som resultat av gradering har tendens til å redusere BHP [25] ved konstant matriksvolum, ved at matriksoverskuddet øker. Sett fra en annen side, er lavt hulrom er også fordelaktig da nødvendig matriksvolum blir lavere. Noe som ofte er økonomisk gunstig.

Hulrom for en gitt tilslagssammensetning varierer med ulik pakningsgrad. Pakningsgraden er vanskelig å definere da det ikke er en målbar parameter. Dette gjør det vanskelig definere om målt hulrom, tilsvarer hulrom i betong med lik tilslagssammensetning. Pakningsgraden er en sensitiv parameter ved måling av hulrom, da den lett kan påvirkes ved håndtering av tilslag. Dette bekreftes i SINTEFs rapport [26] som viser at forskjellige målemetoder gir forskjellig hulrom for samme tilslagssammensetning.

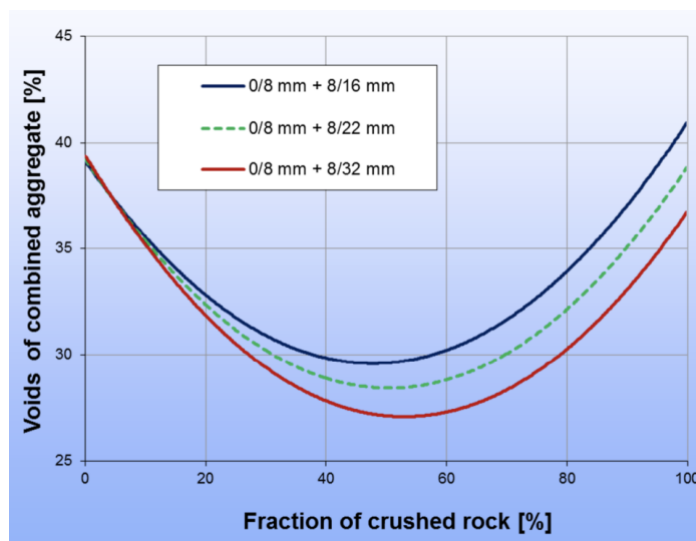
Sandgraderingen i tilslag har stor innvirkning betongens reologiske egenskaper. Det skilles mellom, åpen, rett og tett gradering, se Figur 2-8. Åpen gradering kjennetegnes ved lavere andel fine partikler, noe som gir økt hulrom grunnet redusert naturlig pakningsgrad. Slik gradering vil være ugunstig for betong med høy flyt grunnet lavere kohesjon mellom partikler (lavere andel partikler med lavt spesifikt overflateareal). Parametere som kornform og overflatestruktur har i dette tilfellet mindre påvirkning på hulrommet [7]. PSD med tett gradering kjennetegnes ved større andel fine partikler, og høyere kohesjon som er gunstig i SKB. Det er i midlertidig rette graderinger som gir høyest pakning, derav lavest hulrom.

Figur 2-6 (b) viser hvilken effekt variasjon av sandmengde har på BHP.



Figur 2-8 Åpen, rett og tett gradering av sand (uten filler) [27]

Korngraderingen for steinandelen påvirker totalt hulrom i samlet tilslag. Jevn fordeling av ulike steinstørrelser gir tettere pakning i samlet tilslag, derav lavere hulrom. Reduksjon i D_{max} fører til høyere hulrom [7], se Figur 2-9.

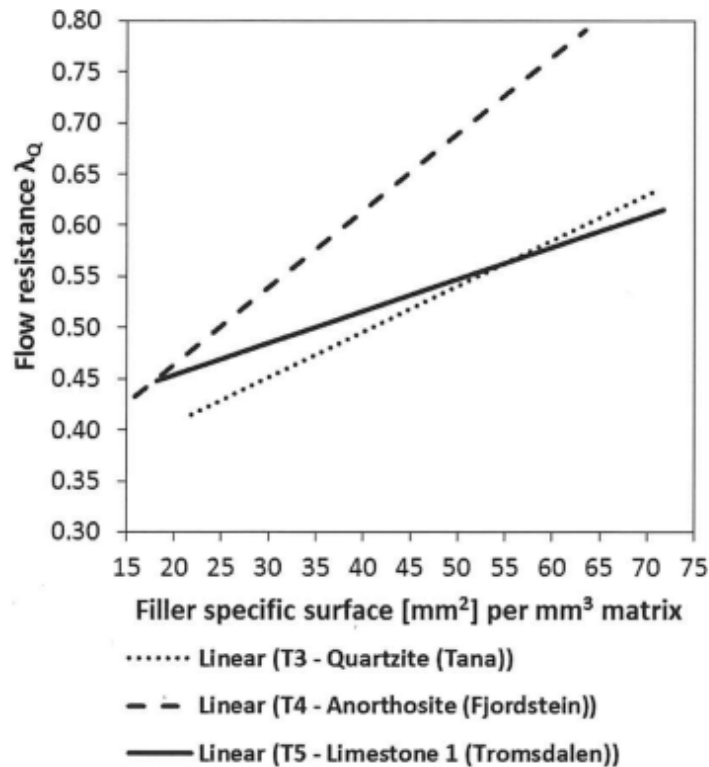


Figur 2-9 Hulromskurve for tilslag med forskjellig D_{max} [27]

2.5.5.2 Fillerbidrag fra tilslagsfraksjoner

Mengde filler (partikler $\leq 0,125$ mm) i tilslag avhenger av partikkelfordelingen i hver fraksjon. Partikkelfordelingen avhenger av tilslagets opprinnelse, om det er knust eller naturlig. Cepuritis [5] avdekker at 0,125 – 2 mm fraksjon og filler $\leq 0,125$ mm i knust maskinsand er dominerende faktorer for betongens reologiske egenskaper. Det kommer fram at matriksens reologiske egenskaper i stor grad styres av fillerens gradering (overflateareal), kornform og mineralogi. Senere studier [19] viser at

matriksfasens egenskaper påvirkes av fillerens overflateareal og interaksjon med SP-stoff. Det konkluderes med at høyt overflateareal øker flyteskjærspenning τ_0 og plastisk viskositet μ , mens lavt overflateareal reduserer flytmotstand. Samme korrelasjoner er funnet i Skare *et al.* [28]. Sistnevnt teori kan forklares med at høyt overflateareal, gir større «kontaktflate» som vannet i sementpasta bindes til. På den måten er det mindre andel fritt vann som bidrar til flyt, og konsistensen blir mer viskøs for en gitt sammensetning [7]. Figur 2-10 viser sammenhengen mellom overflateareal (VSSA) og flytmotstanden for tre ulike maskinknuste fillere. Figuren viser at økt overflateareal, øker flytmotstanden, samtidig som ulik mineralogi også har forskjellig påvirkning.



Figur 2-10 VSSA vs. flytmotstand for fillere av ulik mineralogisk opprinnelse [19]

2.5.5.3 Kornform og overflateegenskaper

Flere studier viser at tilslagets kornform og overflateegenskaper har stor betydning for betongens reologiske egenskaper [5], [2], [29]. Tilslag med rund sfærisk form gir bedre pakningsgrad enn ikke-ekvidimensjonale tilslag (kantede partikler) [7], [25]. Overflatestrukturen på tilslagspartiklene har stor betydning for interaksjonen og friksjon mellom partiklene. Glatte partikkeloverflater er fordelaktig for betongens flyt. Avlange og kantede korn har tendens til å øke friksjonen [29]. Bruk av slikt tilslag gir høyere flyteskjærspenning (τ_0) og plastisk viskositet (μ), derav også flytmotstand. Se Figur 2-6 (b). Høy flisighet krever også mer overskuddsmatriks for tilstrekkelig separering av partiklene, og redusere friksjon [7]. I praksis er det vanskelig å produsere perfekte sfæriske tilslag, men det er mulig å produsere tilslag med relativt lite flisighet ved hjelp VSI-knuser [5].

2.5.6 Luft

Luftbobler i betong regnes ikke som en del av fasene i PMM. I henhold til PMM har dermed luft ingen påvirkning på reologi. Bruk av lufttilførende tilsetningsstoff skaper små runde luftbobler som blant annet påvirker reologi, ved redusert plastisk viskositet [15], [30], se også Figur **2-6** (a). Altså størrelse og mikrostruktur på luftboblene er av betydning. Jevn mikrostruktur har en «smørende» effekt på partikkelfriksjon, kulelagereffekten [7]. Effekten bidrar til bedre flyteegenskaper.

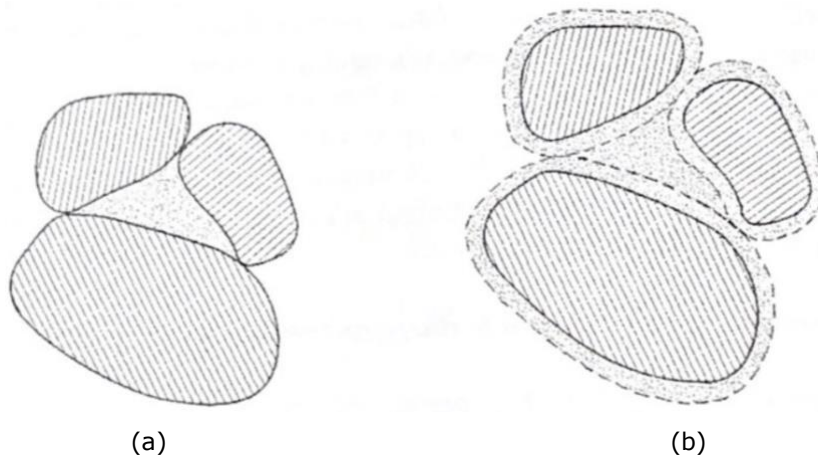
2.6 Proporsjonering av betong i henhold til PMM

Proporsjonering av betong omhandler valg og karakterisering av materialer, samt komposisjonen for å oppnå en tilfredsstillende betong etter kvalitetskrav i NS-EN 206. I praksis vil betongprodusentene proporsjonere og levere betong så:

- Herdet betong tilfredsstillende krav for styrke og bestandighet med god margin.
- Betongen proporsjoneres etter bruksområde med tanke på støpelighet (ønsket konsistens/betongflyt/stabilitet).
- Leverer robust betong som tåler eventuelle påkjenninger som transport, pumping, temperatursvingning og små endringer i resept (eventuelle ekstra tilsetningsstoff på byggeplass/transport).
- Produksjon av betong og innkjøp av materialer er bærekraftig (økonomi og miljø).

Variasjon i råvarer basert på lokasjon og ulik praktisering av proporsjonering, gir ulik kvalitet på betong hos de ulike betongprodusentene på markedet.

Komposisjon av betong bestemmes hovedsakelig av produsentene selv så lenge betongen tilfredsstillende krav. I henhold til PMM proporsjoneres hver fase separat, for så i teorien å blande dem sammen. Betongprodusenten velger mengde matriks med hensyn til hulrom i partikkelfasen, og nødvendig mengde overskuddsmatriks for å oppnå tilstrekkelig partikkelseparasjon. Overskuddsmatriks ut over tilgjengelig hulrom i partikkelfasen vil påvirke betongen ved å skille partikler fra hverandre og dermed gi betongen flyt, se Figur **2-11**.



Figur 2-11 (a) *Matriks fyller hulrom i partikkelfase, (b) matriksoverskudd separerer partikler [31]*

Matriksen er komponenten som gir flyt i betong. Maksimalt oppnåelig flyt begrenses i stor grad av flytmotstanden og egenskapene til matriksen, der friksjon mellom partikler utgjør minimal motstand på grunn av «fullstendig» partikkelseparasjon. Som tidligere nevnt, har hulrommet betydning for hvor stor andel matriks som er nødvendig for å oppnå flyt i betongen, «zero slump». Et lavt hulrom er gunstig da man trenger mindre total mengde matriks for å «skille» partiklene tilstrekkelig. Lav sementandel som følge av lavere matriksvolum er fordelaktig med hensyn til miljø [4].

2.6.1 Tilslagssammensetning

NS-EN 12620 [32] gir føringer og krav for tilslag i betong. Proporsjonering av tilslagssammensetning er i stor grad preget av tilgjengeligheten av råvarer. På grunn av transportkostnader er betongprodusentene i stor grad låst til å benytte lokalt tilslag. God bruk av tilslag i betong forutsetter at produsentene har kontroll på en rekke parametere, eksempelvis:

- Kornfordeling for hver fraksjon
- Mineralogi, kornform og overflateegenskaper
- Fuktinnhold og absorpsjonsevne
- Densitet, kjemisk reaktivitet og kloridinnhold

Tilslaget komponeres normalt av ulike fraksjoner, hvor sammensetningen bestemmes på bakgrunn av tilslagets fysiske egenskaper og effekten de vil ha på betong mtp. styrke, bestandighet og støpelighet. I praksis velges tilslagssammensetningen ved å bestemme andelen av hver fraksjon. Komposisjonen av fraksjonene, sammensatt partikkelfordeling, bestemmes med bakgrunn av ønsket hulrom og andel bestemte fraksjonsområder.

2.6.2 Matrikssammensetning

Matriks regnes som det svakeste leddet i betong, altså den fasen som avgjør betongens kvalitet [7]. Matriksen proporsjoneres derfor på bakgrunn av ønsket kvalitet etter NS-EN 206, som viser til hvilke masseforhold som er akseptert avhengig av materialvalg. Så lenge krav til kvalitet tilfredsstilles, står betongprodusenten fritt til å bestemme hvilke materialer som benyttes. Masseforholdet eller vann/binderforholdet uttrykkes ved $m = v/b = v/(c + \sum k \cdot p)$, hvor binderandelen uttrykkes ved sementandel (c) addert med summen av pozzolaner (p) multiplisert med tilhørende effektivitetsfaktor (k). I tillegg bestemmes andel og type delmaterialer, etter ønskede egenskaper og standardiserte krav. Videre bestemmes matriksvolum i den hensikt å oppnå ønsket betongflyt. Det er viktig å ta hensyn til eventuelt vanninnhold eller vannabsorpsjonsevne i betongens delmaterialer, eksempelvis tilslag eller tilsetningsstoff. Mengden tilsatt vann korrigeres etter dette, for å oppnå ønsket masseforhold i ferdig blandet betong.

2.7 «Proporsjonering» av Sverre Smeplass

Utgangspunktet for arbeidet i avhandlingen knyttes til eksisterende proporsjoneringsverktøy, «Proporsjonering» utviklet av Sverre Smeplass, Vedlegg A, del II. Verktøyet proporsjonerer betongresepter basert på materialvalg og matriksvolum bestemt av brukeren. Verktøyet legger til rette for at matriks- og tilslagssammensetning bestemmes hver for seg, i henhold til PMM, bortsett fra fillerandel som bestemmes i tilslagssammensetningen.

Figur 2-12 viser et utklipp av hvordan sammensetningen av matriks gjøres i proporsjoneringsverktøyet, under fanen «Matriks». Her bestemmes masseforholdet, antatt luftinnhold, delmaterialene i matriksfasen, samt matriksvolumet i resepten.

Initialparametre	Verdi						
$m = v/(c+S_{kp})$	0,55						
Luftinnhold	2,0 %						
Sementtype	Andel	Andel klinker	Andel FA	Andel slagg	[kg/m ³]	Alkalier	Klorider
Norcem Standard FA	100,0 %	78,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	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 og fillere	Type	Andel (av tot. b)	k	[kg/m ³]	Alkalier	Klorider	
Elkem Microsilica	Silika	2,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %	
Elkem Microsilica	Silika	0,0 %	0,0	2200	1,0 %	0,3 %	
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,7	2200	1,0 %	0,3 %	
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,0	2200	0,0 %	0,0 %	
Slagg	Slagg	0,0 %	0,6	3000	0,0 %	0,0 %	
Tilsetningsstoff	% av b	[kg/m ³]	Tørrstoff	[kg/m ³ TS]	Alkalier	Klorider	
Mapei Dynamon SX-23	0,7 %	1050	23,0 %	1261	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/m ³]					
	0,0 %	7800					
	0,0 %	1050					
Matriks	Verdi						
Ønsket matriksvolum [l/m ³]	320						

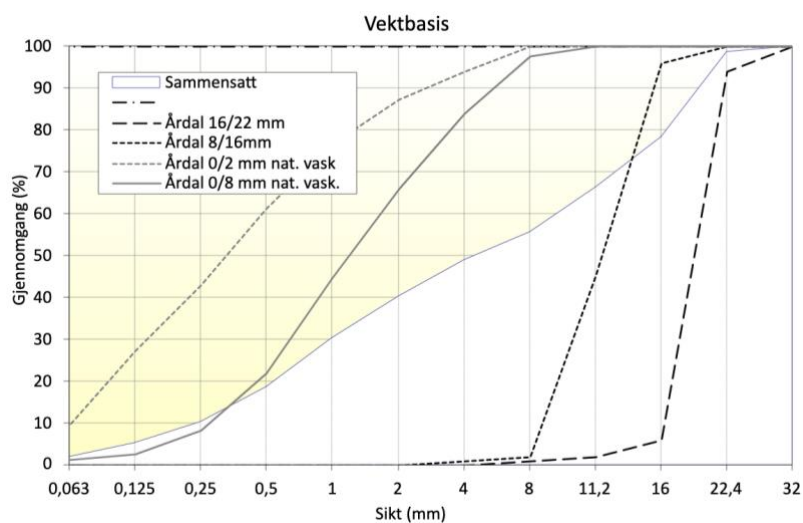
Figur 2-12 Utklipp fra matrikssammensetning under «Matriks»-fanen i «Proporsjonering»

Som nevnt bestemmes fillerandelen i tilslagssammensetningen, som bestemmes under fansen «Sammensatt tilslag», som vist i Figur 2-13. Her velges vektandelen av hver fraksjon i kolonne *Andel vekt*. Merk at andelen til sammen må bli 1, ellers blir det feil i proporsjoneringen.

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	0,403	0,400	ok
II	Årdal 0/2 mm nat. vask	2650	0,5	0,0	0,00	0,161	0,160	ok
III	Årdal 8/16mm	2700	0,5	0,0	0,00	0,218	0,220	ok
IV	Årdal 16/22 mm	2700	0,5	0,0	0,00	0,218	0,220	ok
V		2700	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	
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 2-13 Utklipp fra tilslagssammensetningen under «Sammensatt tilslag» i «Proporsjonering»

Fraksjonene legges inn i verktøyet under egne faner, ved å legge inn sikterestene fra sikteanalysen. Verktøyet kalkulerer partikkelfordelingen, og fremstiller siktekurver. Når sammensetningen er valgt genererer verktøyet en sammensatt kornfordelingskurve, slik Figur 2-14 viser. Diagrammet er til god hjelp under valg av tilslagssammensetning, slik at man oppnår ønsket partikkelfordelingen i det sammensatte tilslaget.



Figur 2-14 Eksempel på sammensatt kornfordelingskurve i «Proporsjonering»

Når både matriks- og tilslagssammensetning, samt matriksvolumet er bestemt, kan verktøyet proporsjonere resepten. Dette gjøres ved å trykke på «Beregn»-knappen under fanen «Matriks». Resepten som beregnes finner man under fanen «Resept», se Figur 2-15. Resepten er angitt som kg/m³. Ønsket volum ferdig betong velges også her.

Proporsjonert betong

Materialer	kg/m ³
Norcem Standard FA	311,9
	0,0
	0,0
Elkem Microsilica	6,4
Elkem Microsilica	0,0
Normineral flyveaske	0,0
Normineral flyveaske	0,0
Slagg	0,0
Fritt vann	175,1
Absorbent vann	9,3
Årdal 0/8 mm nat. vask.	745,6
Årdal 0/2 mm nat. vask	298,2
Årdal 8/16mm	410,1
Årdal 16/22 mm	410,1
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
	0,0
Mapei Dynamon SX-23	2,23
	0,00
	0,00
	0,00
	0,0
	0,0
Prop. betongdens. (kg/m ³)	2367

Figur 2-15 Eksempel på resept i «Proporsjonering»

Basert på resepten, ønsket volum betong, vanninnhold og -absorpsjon, beregnes nødvendig mengde (kg) av hvert delmateriale (Oppveid) under fanen «Blandeskjema», se Figur 2-16.

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Standard FA	311,9	311,939			311,939
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	6,4	6,366	0,0	0,000	6,366
Elkem Microsilica	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Normineral flyveaske	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Slagg	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Fritt vann	175,1	175,068		-31,912	143,156
Absorbent vann	9,3	9,320			9,320
Årdal 0/8 mm nat. vask.	745,6	745,587	3,5	26,096	771,682
Årdal 0/2 mm nat. vask	298,2	298,235	0,0	0,000	298,235
Årdal 8/16mm	410,1	410,073	0,5	2,050	412,123
Årdal 16/22 mm	410,1	410,073	0,5	2,050	412,123
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-23	2,2	2,228	77	1,716	2,228
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000

152,476

Figur 2-16 Utklipp blandeskjema fra «Proporsjonering»

Som tidligere nevnt beregner ikke verktøyet konsistens eller andre egenskaper ved den proporsjonerte resepten. Det er opp til brukeren å selv velge matriksvolum i den hensikt å oppnå ønsket konsistens. God erfaring innen proporsjonering og delmaterialene, kan gi utgangspunkt for å si noe om egenskapene ved den ferske betongen, men det er tilnærmet umulig å faktisk bestemme dette uten å knytte dette opp mot beregninger. Små variasjoner eller «nye» materialer kan påvirke egenskapene forskjellig, noe som gjør det veldig vanskelig å forutsi hvordan samspillet faktisk blir. Derfor er man avhengig av å fysisk gjennomføre forsøk for å finne konsistensen til resepten.

Brukermanual for «*Proporsjonering*» er lagt ved i Vedlegg C.

3 FULLSKALAFORSØK

I dette avsnittet presenteres fullskalaforsøkene gjennomført av Betong Øst/Feiring Bruk og Velde, i forbindelse med MiKS-prosjektet. Dette blir kalibreringsgrunnlaget for utviklet proporsjoneringsverktøy, utarbeidet i denne avhandlingen. Vedlegg D viser til Excel-filer med proporsjonerte resepter, utarbeidet av Rolands Cepuritis. Vedlegg J og Vedlegg K er henholdsvis rapportene fra fullskalaforsøkene for Velde og Betong Øst/Feiring Bruk.

3.1 Betongresepter fullskalaforsøk

Reseptene som er brukt i fullskalaforsøkene under MiKS-prosjektet består av to betongkvaliteter, B30M60 og B45M40. Velde AS og Betong Øst AS blandet til sammen 22 resepter, likt fordelt på de to kvalitetene. Reseptene under hver kvalitet skiller ved stegvis endring i matriksvolum, med samme tilslagssammensetning. For å fremstille resultater som viser sammenheng mellom matriksvolum og synkutbredelse (SU), er reseptene proporsjonert med 10 liter forskjell i matriksvolum. Faktiske resepter avviker noe fra de proporsjonerte reseptene («Bør-verdier» i rapportene) på bakgrunn av noe unøyaktighet ved oppmåling ved blandeverkene. Faktiske resepter («Er-verdier» i rapportene) blir utgangspunktet for kalibreringen. I kommende avsnitt presenteres tilslag- og matriksresepter, samt resultater fra fullskalaforsøk i MiKS-prosjektet.

3.1.1 Tilslagssammensetninger

Tabulerte tilslagssammensetninger er hentet fra Cepuritis forhåndsproporsjonerte resepter, Vedlegg D. Tabell 3-1 viser fraksjonenes vektandel i prosent av totalt tilslag. Siktekurver og andre spesifikke detaljer knyttet til tilslaget er også presentert i Vedlegg D.

Tabell 3-1 Forhåndsproporsjonerte tilslagssammensetninger, «Bør-verdier»

Fraksjon (mm)	M60 (%-vektandel)	M40 (%-vektandel)
Feiring Bruk		
0-2	45	40
2-4	7	10
4-8	7	8
11-16	19	18
16-22	22	24
Velde		
0.063-0.25	6	0
0.25-2	45	47
2-5	5	6
5-8	5	6
8-11	12	12
11-16	12	14
16-22	15	15

Merk at verdiene i Tabell 3-1 avviker fra faktiske vektandeler ($\pm 2.00\%$), på bakgrunn av unøyaktighet i oppmåling ved blandeverkene. Se laboratorieprotokoller Vedlegg J og Vedlegg K, for faktiske oppmålte verdier. Legg også merke til at Feirings tilslagssammensetning har et «hull». Sammensetningen har ingen fraksjoner som spesifikt dekker fraksjonsområde 8-11 mm.

3.1.2 Matrikssammensetninger

Matrikssammensetningene med tilhørende utbredelsesresultater er hentet fra Velde og Betong Øst sine rapporter, Vedlegg J og Vedlegg K. Faktisk oppmålte verdier presenteres i alle tabulerte matriksresepter.

3.1.2.1 Velde

Tabell 3-2 og Tabell 3-3 viser matrikssammensetningene og SU-resultater for Velde, henholdsvis M60 og M40 kvaliteter.

Tabell 3-2 Matrikssammensetning og SU, Velde M60

Resept	Proporsjonert Matriksvolum [l/m ³]	SU [mm]	v/c	STD FA [kg/m ³]	Silika [kg/m ³]	SX-N [kg/m ³]	Totalt Vann [kg/m ³]	Luft [%]
1.1 (A12)	370	730	0,539	350,5	-	4,6	188,8	1,51
1.2 (A13)	360	710	0,533	339,7	-	4,6	180,9	1,5
1.3.1 (A14)	350	635	0,537	328,7	-	4,5	176,4	1,5
1.3.2 (A14)	350	640	0,534	325,7	-	4,4	173,7	1,5
1.4 (A15)	340	470	0,530	315,7	-	4,3	167,2	1,5
1.5 (A16)	330	300	0,534	300,5	-	4,1	160,4	1,51
1.6 (A17)	320	270	0,519	295,5	-	3,93	153,1	1,5

Betong 1.1 og 1.2 separerte under forsøkene (markert med rødt), merk også at 1.3 er blandet to ganger. Separasjonen forklarer den høye utbredelsen.

Tabell 3-3 Matrikssammensetning og SU, Velde M40

Resept	Proporsjonert Matriksvolum [l/m ³]	SU [mm]	v/c	STD FA [kg/m ³]	Silika [kg/m ³]	SX-N [kg/m ³]	Totalt Vann [kg/m ³]	Luft [%]
2.1 (A22)	385	640	0,393	452,5	19,0	7,4	192,2	1,51
2.2 (A23)	375	660	0,395	436,9	17,0	7,2	185,9	1,50
2.3 (A24)	365	600	0,394	424,7	17,1	7,0	181,0	1,49
2.4 (A25)	355	570	0,388	416,6	17,0	6,7	174,9	1,50
2.5 (A26)	345	460	0,388	394,8	16,9	6,4	166,5	1,51
2.6 (A27)	335	470	0,393	378,6	15,9	6,2	161,2	1,51

3.1.2.2 Betong Øst/Feiring Bruk

Tabell 3-4 og Tabell 3-5 viser matrikssammensetningene og SU-resultatene for Betong Øst. Merk at resepter fra Betong Øst inkluderer to ulike SP-stoff, Mapei Dynamon SR-N og Mapei Dynamon SX-23. Merk at luftinnhold er ikke målt for 1.1.

Tabell 3-4 Matrikssammensetning og SU, Betong Øst M60

Resept	Proporsjonert Matriksvolum [l/m ³]	Utbredelse [mm]	v/b	STD FA [kg/m ³]	Silika [kg/m ³]	SR-N/SX-23 [kg/m ³]	Totalt Vann [kg/m ³]	Luft [%]
1.1 (3200K1)	375	660	0,538	374,9	-	1,9/2,7	202	-
1.2 (3200K2)	365	660	0,537	365,3	-	1,8/2,6	196	0,8
1.3 (3200K3REF)	355	610	0,540	350,1	-	1,8/2,5	189	0,9
1.4 (3200K4)	345	500	0,540	337,0	-	2,4/1,7	182	1,5
1.5 (3200K5)	335	350	0,535	326,7	-	1,6/2,3	175	1,9

Tabell 3-5 Matrikssammensetning og SU, Betong Øst M40

Resept	Proporsjonert Matriksvolum [l/m ³]	Utbredelse [mm]	v/b	STD FA [kg/m ³]	Silika [kg/m ³]	SR-N/SX-23 [kg/m ³]	Totalt Vann [kg/m ³]	Luft [%]
2.1 + 10l vann (4700K5)	405	685	0,396	488,5	19	4,6/4,9	201	0,5
2.1 + 5l vann (4700K6)	400	605	0,394	476,7	18	4,5/4,7	195	0,8
2.1 (4700K1)	395	580	0,397	462,0	20,5	4,4/4,6	191	1,6
2.2 (4700K2)	385	540	0,395	450,8	20,1	4,2/4,5	186	1,6
2.3 (4700K3REF)	375	450	0,396	432,4	18	4,1/4,3	178	1,4

4 METODE, PARAMETERE OG MODELLER

I dette kapitlet presenteres gjennomføringen av laboratorieforsøk gjort i forbindelse med avhandlingen. Hensikten med forsøkene er å komplettere fullskalaforsøkene, ved å måle flytmotstand og hulrom i reseptene, da dette ikke ble gjort i forbindelse med MiKS-prosjektet. Resultatet av disse blir videre brukt i kalibreringen av den nye versjonen av proporsjoneringsverktøyet. Dette kapitlet tar også for seg hvordan den nye versjonen er fremstilt, hvilke nye funksjoner som er implementert, samt kalibrering av disse. Som en del av kalibreringen, er det også gjennomført en parameterstudie på formel for flytmotstand.

4.1 Laboratorieforsøk

Det er tatt utgangspunkt i tilslag- og matrikssammensetninger presentert i avsnitt 3.1. I dette avsnittet presenteres målemetoder, prosedyrer og resepter brukt i forsøkene. Både Velde og Feiring Bruk har vært behjelpelig med supplering av materialer brukt i forsøkene. Resepter for laboratorieforsøkene er basert på faktiske verdier fra fullskala-reseptene. Reseptene har blitt fremstilt ved nedskalering eller egne regneverktøy. Manglende produktspesifikasjoner er hentet fra produsentenes nettsider.

For besparelse av tid er det valgt å utføre målinger kun på enkelte av blandingene. Målinger på flytmotstand er gjennomført på resepter med minimum og maksimum matriksvolum for hver betongkvalitet, fra hver produsent. På den måten kan verdiene for de øvrige målingene antas, ved at øvre og nedre grense er kjent. Det er gjort åtte målinger på flytmotstand og fire på hulrom, en for hver tilslags sammensetning. FlowCyl er benyttet for måling av flytmotstand, og NorBetong-metoden for hulrom i tilslag.

4.1.1 Flytmotstand (λ_Q)

Som innledende beskrevet kan betongens reologiske egenskaper karakteriseres ved matriksens flytmotstand og måles ved FlowCyl. Instrumentet er sammensatt av en sylinder og en traktformet bunn med åpning. Se Figur 4-1 (c). Ved måling installeres instrumentet vertikalt til et stativ med elektrisk vekt i underkant, se Figur 4-1 (a). Vekt per tidsenhet registreres. Målingen sammenlignes med en idealvæske uten indre motstand. Differansen mellom målt og idealvæske betegnes som «flyttapet». Gjennomsnittsraten på flyttapet defineres som λ_Q , væskens flytmotstand.

4.1.1.1 Resepter

Matriksresepter brukt i FlowCyl er hentet fra «Er-verdier», Vedlegg J og Vedlegg K. Eget beregningsverktøy for FlowCyl er benyttet til proporsjonering av matriksresept og beregning av flytmotstand (λ_Q), se Vedlegg F. Vedlegget inneholder filer med resepter brukt i FlowCyl-forsøk. Tabell 4-1 viser hvilke blandinger fra fullskalaforsøkene, som er valgt å gjøre forsøk på.

Tabell 4-1 Fullskalresepter, målt med FlowCyl

Resept	Proporsjonert Matriksvolum [l/m ³]	Utbredelse SU [mm]
Feiring Bruk – Betong Øst		
1.5 (3200K5)	335	350
1.1 (3200K1)	375	660
2.3 (4700K3REF)	375	450
2.1 + 10l vann (4700K5)	405	685
Velde		
1.6 (A17)	320	270
1.1 (A12)	370	730
2.6 (A27)	335	470
2.1 (A22)	385	640

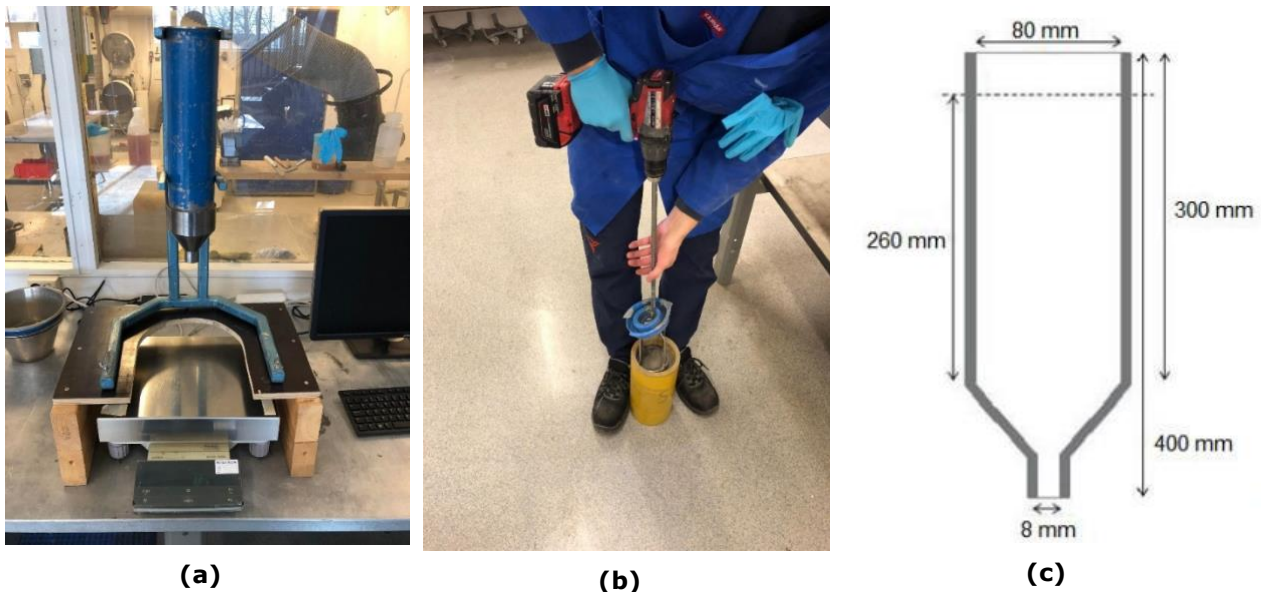
Merk at fillermengden brukt i matriksreseptene er beregnet ut ifra samlet fillerandel i forhåndsproporsjonerte tilslagssammensetninger, Vedlegg D. Det er altså antatt at fillerandel (%) i faktiske oppmålte verdier tilsvarer forhåndsproporsjonerte resepter.

4.1.1.2 Prosedyre

Blandeprosedyre for matrikser er hentet fra Vedlegg H. Utstyrsliste og nærmere beskrivelser er presentert i [33].

Før oppveing av materialer ble FlowCyl-måleinstrument kalibrert og stilt inn på 1 sekunds måleintervaller. Alle delmaterialene ble oppveid med 0,1 g nøyaktighet.

Mikseprosedyren ble delt inn i to deler; Pre-Miks og en Wet-Miks i henhold til blandeprosedyre. For Pre-Miks ble tørrstoff mikset i en Hobart-mikser, mens vann og tilsetningsstoff ble mikset sammen i en beholder for hånd. Senere ble det tørre og det våte mikset med drill sammen i en sylindrisk beholder som vist på Figur 4-1 (b). For å unngå Flash-Set, ble det gjort to blandeintervaller med pause mellom. Tid og blande-hastighet for blandeintervallene, Wet-Miks er presentert i blandeprosedyre. Blandet matriks ble så fylt i FlowCyl, og forsøket ble gjennomført. For kalkulasjon av flytmotstand ble rådata fra forsøket plottet i eget beregningsverktøy (Excel) for flytmotstand.



Figur 4-1 FlowCyl-måleinstrument (a), Wet Mixing med drill (b), instrumentdimensjoner (c) [1]

4.1.2 Hulromsmålinger (H)

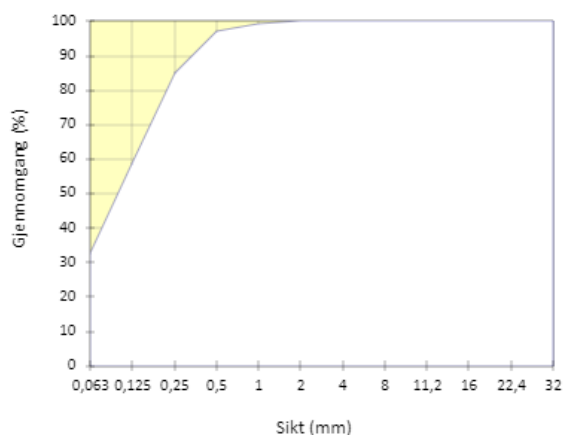
Matriksmengde til en vilkårlig betong bestemmes blant annet av partikkelfasen, tilslagets totale hulrom. Hulrommet er avhengig av tilslagssammensetningen, partikkelfordeling, samt pakningsgraden av tilslaget. Det er utviklet flere målemetoder for hulromsmålinger, blant annet NorBetong-metoden. Metoden tar utgangspunkt i at tilslaget ikke komprimeres slik at pakningsgraden blir som ved naturlig omstendigheter. Det er utført fire målinger på fire forskjellige tilslagssammensetninger, to for hver betongkvalitet.

I PMM regnes filler som en del av matriksfasen. Det har dermed vært nødvendig å sikte ut fillerandelen i flere fraksjoner, henholdsvis 0-2 mm fra Feiring, og 0,063-0,25 mm og 0,25-2 mm fra Velde. Som vist på sikteanalyser i proporsjoneringsarkene (Vedlegg D), inneholder flere av tilslagsfraksjonene filler. Se eksempel i Figur 4-2, der fillerandelen for 0,063-0,25 mm (Velde) er på 58,7 %. Fillerandeler under 3 % neglisjeres, da det antas at bidraget ikke vil ha noen stor påvirkning på hulrommet. Filler ble tørrsiktet ut etter metode beskrevet i NS-EN 12620. Siktemaskin opplevdes lite effektiv, og sikting ble derfor gjort for hånd. Siktestørrelse 0,125 mm ble brukt som nederste maskestørrelse. Fuktinhold ble målt på nytt etter sikting.

Fraksjon I

Type:	0,063-0,25mm, (B30M60, 1.1)
Dato:	08.09.2021
FM =	0,39

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	0	0	0,0	100,0
4	0	0	0,0	100,0
2	0	0	0,0	100,0
1	0,5	0,5	0,5	99,5
0,5	2,9	2,9	2,9	97,1
0,25	14,8	14,8	14,8	85,2
0,125	41,3	41,3	41,3	58,7
0,063	67,1	67,1	67,1	32,9
Bunn	100	100		



Figur 4-2 Siktekurve for fraksjonsområde 0,063-0,25mm, B30M60 – Velde

4.1.2.1 Resepter

Tilslagssammensetninger brukt i hulromsmålingene er fremstilt ved nedskalering av faktiske verdier fra fullskalarapportene. Tabell 4-2 viser resepter for både Feiring Bruk og Velde, nedskalert til henholdsvis 0,5 og 1%. Verdiene er bestemt med bakgrunn at tilslaget må fylle hele «luftbøtten» som rommet 8 liter.

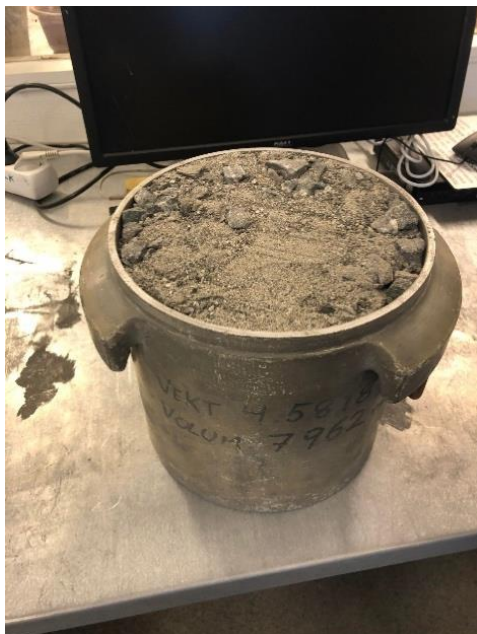
Tabell 4-2 Tilslagssammensetning - Hulromsforsøk, Feiring bruk M60/M40

Fraksjon (mm)	Resept M60 (kg)	Resept M40 (kg)
Feiring Bruk		
0-2 (uten filler)	7,821	6,5542
2-4	1,405	1,92
4-8	1,315	1,47
11-16	3,78	3,355
16-22	4,005	4,3
Velde		
0,063-0,25 (uten filler)	0,4419	0
0,25-2 (uten filler)	7,0335	6,8669
2-5	0,88	0,97
5-8	0,89	0,98
8-11	2,18	2,01
11-16	2,14	2,33
16-22	2,66	2,53

4.1.2.2 Prosedyre

Prosedyre og utstyrsliste for NorBetong-metoden er vedlagt i Vedlegg I. Før oppveining ble fuktinnhold i alle fraksjoner målt.

Alle fraksjonene ble oppveid og blandet manuelt i egen beholder. Deretter ble tilslaget fylt i «luftbøtten» stegvis som beskrevet i prosedyren, til bøtten var fylt, Figur **4-3** (a). Vekt med bøtte, tilslag og glassplate ble registrert, før det ble helt over i en ny beholder. Tilslaget og vann ble deretter fylt om hverandre tilbake i «luftbøtten», slik at vannspeilet var på likt nivå som tilslagsspeilet. Se Figur **4-3** (b). Glassplaten ble lagt på, og vekten ble registrert. Videre ble hulrommet under glassplaten flyt med vann, slik at «luftbøtta» var helt full. Vekt med luftbøtte, glassplate, tilslag, vann og ekstra vann ble registret. Målte verdier (kg), resepter, fuktinnhold og vannabsorpsjon, ble senere plottet inn i eget Excel-ark for beregning av hulrom, Vedlegg G.



(a)



(b)

Figur 4-3 (a) «Luftbøtte» med tørt tilslag, (b) «luftbøtte» med tilslag + vann

4.2 Utvikling av revidert versjon av «Proporsjonering»

Som innledende beskrevet i rapporten har Sverre Smeplass laget et verktøy for proporsjonering av betong (Vedlegg A, del II). Det har blitt lagt ned mye tid i å utarbeide en ny versjon av verktøyet, som har i hensikt å proporsjonere betongresepter med bakgrunn i ønsket betongflyt i fersk betong. Dette er gjort ved å implementere en «støpelighetsfunksjon», basert på Mørtsells konsistensfunksjon, beskrevet i avsnitt 2.3. Funksjonen tar utgangspunkt i flytmotstanden i matriksfasen, og hulrommet i partikkelfasen, for å estimere nødvendig matriksvolum. For å få til dette må både flytmotstanden i matriksen, og hulrommet i partiklene bestemmes basert på valgt sammensetning og delmaterialer. To moduler for estimering av flytmotstand og hulrom, er derfor implementert i verktøyet for at støpelighetsfunksjonen skal kunne beregne nødvendig matriksvolum.

Sverre Smeplass og Rolands Cepuritis begynte arbeidet med å utvikle en ny versjon av proporsjoneringsverktøyet i forkant av denne avhandlingen, og står bak modellene i verktøyet. Undertegnede har hovedsakelig vært med på å samkjøre alle beregningene, samt kalibrere mot fullskalaforsøkene i forbindelse med MiKS-prosjektet. Metoder, implementerte modeller, ny formler og kalibrering av disse beskrives i de kommende avsnittene.

4.2.1 Flytmotstand (λ_Q)

4.2.1.1 Estimere flytmotstand (λ_Q)

For å estimere flytmotstanden for matriks sammensetningen er det tatt utgangspunkt i formel [2-7], utarbeidet av Elisabeth Leite Skare. Formelen avhenger av en rekke parametere som beskrevet i avsnitt 2.4. Hvert ledd avhenger av en konstant k_x (bidragsfaktorer) som beskriver egenskapene til materialet og samspillet mellom dem. I forbindelse med revideringen av proporsjoneringsverktøyet er det foreslått nye bidragsfaktorer av Skare, som er vist i formel [4-1] og Figur 4-5. Disse skiller fra de opprinnelige konstantene i Skares avhandling [1], presentert i Tabell 2-1. I verktøyet estimeres flytmotstand derfor med formel [4-1]. De opprinnelige konstantene fra Skares avhandling er også forsøkt benyttet i forbindelse med kalibreringen av modulen. På bakgrunn av ukjent materialgrunnlag for konstantene i formel [4-1] og Tabell 4-3, er det antatt at materialgrunnlaget er det samme som for Skares opprinnelige bidragsfaktorer i Tabell 2-1.

De ukjente konstantene i formelen (j_x), velges med bakgrunn i hvilke materialer (sement og filler) som velges. De øvrige bidragsfaktorene er konstant, og er forhåndsbestemt basert på materialene i Tabell 4-3. Eksponenten n som opprinnelig inngår i Skares formel [2-7], er lik 1 for beregning av flytmotstand (λ_Q) [1], og inngår derfor ikke i formel [4-1].

$$\lambda_Q = \frac{0,38 * VSSA_{matriks}}{100} - 1,07 * \phi - 1,44 * \frac{w}{p} - j_{1,i} * \frac{SP}{b} + j_{2,i} * \frac{1}{w/c} - 0,10 * \frac{FA}{b} + 1,60 * \frac{s}{b} + j_{3,j} * \frac{f}{b} \quad [4-1]$$

Tabell 4-3 Bidragsfaktorer, (j_x) for λ_Q

Sementtype	Klinker	FA	Slagg	[kg/m ³]	Alkalier	Klorider	VSSA	J ₁	J ₂	
									w/c ≤ 0.5	w/c > 0.5
Norcem Standard FA	78%	18%	0%	3000	1,4%	0,1%	829	0.07	0.17	0.13
Norcem Industrisement	100%	0%	0%	3130	1,3 %	0,1%	1302	0.30	0.09	0.03
Tilslag				[kg/m ³]			VSSA	J ₃		
Velde Fine				2650			728	0.37		
Velde Intermediate				2650			367	0.41		
Velde Coarse				2650			522	0.31		
Feiring VSI				2750			260	0.62		
Tilsetningsmaterialer				[kg/m ³]	Alkalier	Klorider	VSSA			
Elkem Microsilica				2200	0,1%	0,1%	-			
Norcem FA				2380	1,0%	0,3%	970			

Merk at (j_2) varier for v/c over og under 0,5. Betingelsen er satt på bakgrunn av at friksjonen mellom sementpartikler domineres mer for lave v/c-tall, mens viskositet domineres ved høy v/c [1].

Modulen for estimering av flytmotstand er implementert i verktøyet som en ny fane, «*Flytmotstand*». Figur 4-4 viser tabellen i verktøyet som beregner flytmotstanden, der bidragene fra hvert ledd beregnes i den hvite kolonnen, som så summeres opp til estimert flytmotstand nederst i tabellen.

Beregning av flytmotstand		
VSSA _{matriks}	283	1,077
ϕ	0,373	-0,399
w/p	0,565	-0,813
j _{1,1}	0,070	-
j _{1,2}	0,000	-
j _{1,3}	0,000	-
j _{2,1}	0,130	-
j _{2,2}	0,000	-
j _{2,3}	0,000	-
j _{3,1}	0,000	-
j _{3,2}	0,000	-
j _{3,3}	0,000	-
j _{3,4}	0,226	-
w/c	0,608	0,214
SP/b	0,007	0,000
FA/b	0,000	0,000
s/b	0,050	0,080
f ₁ /b	0,000	0,000
f ₂ /b	0,000	0,000
f ₃ /b	0,000	0,000
f ₄ /b	0,023	0,005
λ_Q		0,16

Figur 4-4 Tabell for estimering av flytmotstand i proporsjoneringsverktøy ved bruk av formel [4-1]

4.2.1.2 Matriksproporsjonering

For å bestemme materialparameterne som inngår i ligning [4-1], må matrikssammensetningen proporsjoneres på forhånd. Dette gjøres med utgangspunkt i andeler av delmaterialer og v/b-tall for matriksen, bestemt av brukeren. Rent praktisk, skjer proporsjoneringen ved at mengde sement velges gjennom en regresjonsanalyse, slik at volumet av matriksen til sammen blir 1 m³/m³ (se Figur 4-5). De øvrige mengdene beregnes ut ifra mengden av sement, slik at ønsket masseforhold og andel delmaterialer oppfylles.

Matriksproporsjonering			
<i>Delmateriale</i>	<i>Resept</i>	<i>Type matr.</i>	<i>Volum</i>
Norcem Standard FA	1193,96	CEM II B\I	0,3980
	0,00		0,0000
	0,00		0,0000
Elkem microsilica	49,75	Silika	0,0226
	0,00		0,0000
	0,00		0,0000
	0,00		0,0000
	0,00		0,0000
	0,00		0,0000
	0,00		0,0000
Filler fra sammensatt tilslag	124,93	Filler	0,0440
Vann	512,21	Vann	0,5122
Mapei Dynamon SR-N	11,82	SP	0,0114
Mapei Dynamon SX-23	12,44	SP	0,0118
	0,00		0,0000
	0,00		0,0000
Matriksdensitet (kg/dm³)	1905,09		1,0000

Figur 4-5 Tabell for matriksproporsjonering

Når det gjelder fillerandel i matriksen så avhenger denne av matriksvolumet. Matriksvolumet bestemmes av støpelighetsfunksjonen først i etterkant av estimeringen av flytmotstand. Derfor er det nødvendig å anslå et matriksvolum for å kunne bestemme andelen filler i matriksproporsjoneringen. Det har blitt bestemt et matriksvolum på 340 l/m³, som antas å være en middelvei som best mulig vil representere variasjon i faktisk matriksvolum. Partikkelvolumet (1 - matriksvolum) multipliseres så med prosentandelen filler i valgt sammensatt tilslag for å beregne mengden filler i matriksen.

Merk at matrikssammensetningen som proporsjoneres i denne modulen, kun gir utgangspunkt for beregning av flytmotstand. Når nødvendig matriksvolum senere bestemmes, proporsjoneres matriksen i betongresepten med utgangspunkt i dette, på samme måte som i original versjon av proporsjoneringsverktøyet.

4.2.2 Estimere hulrom i partikkelfasen (H)

Når det kommer til estimering av hulrom (H), finnes det ingen metode som med sikkerhet kan beregne dette. Usikkerheten knyttet til pakningsgrad, gjør dette vanskelig. Det mulig å angi akseptable estimat for hulrom, basert på erfaringstall. Rolands Cepuritis, som har doktorgrad der han forsket på fremstilling av knust tilslag til betong [5], står bak modulen for estimering av hulrom i proporsjoneringsverktøyet. Modulen setter sammen en U-formet hulromskurve, som bestemmer hulrom basert på andel stein (> 8 mm) i tilslaget. Modulen tar utgangspunkt i en referansekurve, basert på erfaringstall, som korrigeres etter D_{max} og kornform på valgt tilslag. Under kalibreringen av modulen ble verdiene for referansekurven kalibrert mot fullskalaforsøkene.

For å estimere hulrommet i partikkelfasen, må tilslagssammensetningen først bestemmes. Dette gjøres på samme metode som i original versjon av verktøyet. Neste steg er å karakterisere tilslaget med faktorene D_{max} , kornform og form på siktekurven ≤ 8 mm (se Figur 4-6), i den hensikt å si noe om hvordan hulrommet blir påvirket av kornform og partikkelfordeling. Kornform karakteriseres med *naturlig (avrundet)*, *konknust (kantet)* eller *VSI-knust (kubisk)*. Nøyaktige grenseverdiene for klassifiseringene er ikke angitt, men i dialog med Cepuritis, så kan det antas at *VSI-knust* er tilslag med flisighetsindeks under 10-12 %. Ut over dette så er navnene på klassifiseringene relativt selvforklarende i forhold til hvordan tilslaget er fremstilt. Verdier for korreksjonsfaktorene er basert på erfaringstall, men kan også endres av brukeren dersom det skulle bli nødvendig.

Hulrom i Partikkelfase	Verdi
D_{max}	22 mm
Kornform av tilslag 8/ D_{max} mm	Konknust (kantet)
Kornform av tilslag 0.125/8 mm	Naturlig (avrundet)
Gradering av 0.125/8 mm	Rett

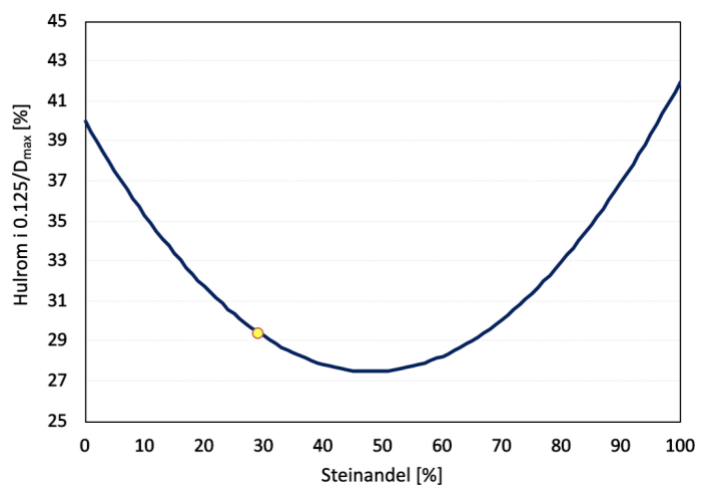
Figur 4-6 Tabell med faktorer for karakterisering av tilslag i forbindelse med estimering av hulrom

Videre fremstilles en hulromskurve basert på en referansekurve, se Figur 4-7 (b). Figur 4-7 (a) viser hvordan referansekurven korrigeres med korreksjonsfaktorene. Verdiene for valgte korreksjonsfaktorer summeres nederst i tabellen, og deretter legges sammen med verdiene for referansekurven. Verdiene danner en korrigert hulromskurve som viser hulrom i valgt tilslagssammensetning, avhengig av steinandel. Gult punkt på kurven viser steinandelen og dermed hulrom i valgt tilslagssammensetning.

«Hulrom i 0.125/8 mm» beskriver hulrom ved 0% steinandel, mens «Hulrom 8/ D_{max} mm» beskriver hulrom ved 100 % steinandel. «Steinandel ved min. hulrom i 0.125/ D_{max} mm» beskriver hvilken steinandel som gir lavest hulrom, altså hvor på x-aksen bunnpunktet for kurven er plassert. «Minimum hulrom i 0.125/ D_{max} mm» viser til hva hulrommet er ved bunnpunktet.

Punkter som definerer hulromskurven		Hulrom i 0.125/8 mm [%]	Hulrom i 8/D _{max} mm [%]	Minimum ved min. hulrom i 0.125/D _{max} [%]	Minimum hulrom i 0.125/D _{max} [%]
Referanse hulromskurve					
		39,0	41,0	50	25,5
Korreksjon av referanse hulromskurve					
D _{max}	16 mm	0	0	0	0
	22 mm	0	-1	2	-1
	32 mm	0	-2	4	-2
Kornform av tilslag 8/D _{max} mm	Naturlig (avrundet)	0	0	0	0
	VSI-knust (kubisk)	0	1	-2	1
	Konknust (kantet)	0	2	-4	2
Kornform av tilslag 0.125/8 mm	Naturlig (avrundet)	0	0	0	0
	VSI-knust (kubisk)	1	0	0	1
	Konknust (kantet)	2	0	0	2
Gradering av 0.125/8 mm	Tett	-1	0	1	-1
	Rett	0	0	0	0
	Åpen	1	0	1	1
	Korreksjon	1	1	-2	2

(a)



(b)

Figur 4-7 (a) Tabell for korreksjon av referanse-hulromskurve, (b) korrigeret hulromskurve med hensyn på steinandel (> 8 mm)

4.2.3 Støpelighetsfunksjon (K_{pu})

Som nevnt, benyttes en støpelighetsfunksjon i proporsjoneringsverktøyet, i den hensikt å beregne nødvendig matriksvolum basert på ønsket synkutbredelse. Funksjonen er en konsistensfunksjon fra Ernst Mørtells doktoravhandling [2], som beskrevet i avsnitt 2.3. Funksjonen modellerer S-kurver for synkutbredelse vs. matriksvolum, på bakgrunn av flytmotstanden i matriksen og hulrommet i partikkelfasen. Mørtells opprinnelige funksjon benytter hulromsmodul (Hm) for å beskrive hvordan hulrommet påvirker plasseringen av S-kurven (K_{pu}) i forhold til x-aksen, altså mengden matriksvolum som er nødvendig for å oppnå flyt i betongen. I forbindelse med arbeidet i oppgaven er valgt å benytte en revidert hulromsmodul, hulrom (H) + offset (O), som tar høyde for egenskapene i matriksen, nærmere bestemt flytmotstand. For nærmere beskrivelse av hulrom + offset, se avsnitt 4.2.3.2.

Nye formler for a og β , inkluderer hulrom + offset, og er utarbeidet av Smeplass og Cepuritis i samarbeid med Mørtsell, formel [4-2] og [4-3]. Formlene er basert på de opprinnelige formlene fra Mørtells avhandling, se avsnitt 2.3. Hulromsmodul (Hm) erstattes med hulrom (H) + offset (O). Konstanten 19 i formel for a , formel [2-4], er også byttet ut med $H+O$, noe som betyr at stigningsforholdet i den nye konsistensfunksjonen også avhenger av hulrom. Hulrom + offset ($H+O$) har også innvirkning på stigningsforholdet ifølge formel [4-2], men under kurvetilpasningen er det observert at ($H+O$) har mindre effekt på stigningsforholdet, sammenlignet med flytmotstand.

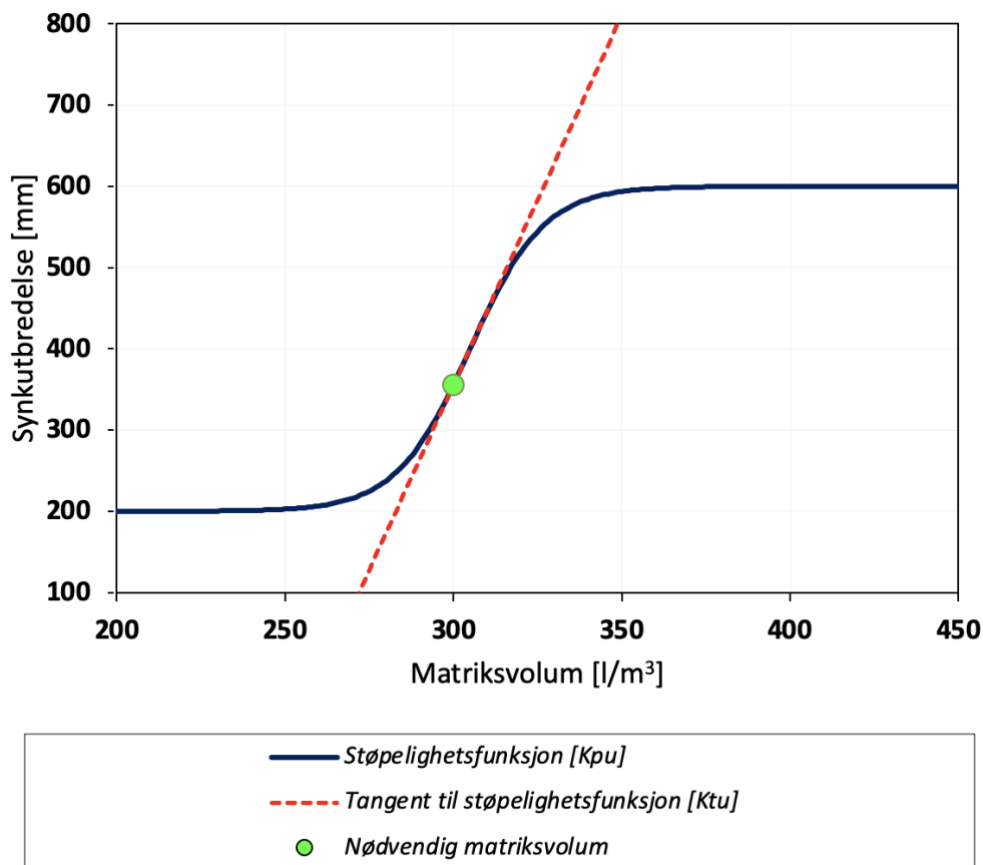
$$\alpha = (H + O) \cdot e^{-\frac{4}{3} \cdot \lambda_Q} \quad [4-2]$$

$$\beta = \frac{2 \cdot (H + O)}{100} - 1 + \frac{1}{\alpha} \quad [4-3]$$

hvor,

H	=	Hulrom [%]
O	=	Offset [%]
λ_Q	=	Flytmotstand

Figur 4-8 viser grafisk hvordan funksjonen ser ut i proporsjoneringsverktøyet, under fanen «Støpelighetsfunksjon». Grafen viser også hvor på kurven, ønsket synkutbredelse ligger (grønt punkt). Punktet gir indikasjon på utnyttelsesgraden av den valgte betongsammensetningen, i forhold til synkutbredelse.



Figur 4-8 Grafisk modell av støpelighetsfunksjonen i proporsjoneringsverktøyet

Det er antatt begrensning for maksimalt matriksvolum på 450 l/m³, uavhengig av betongsammensetning. De fleste betongsammensetninger vil kunne representeres av dette, da tilslagssammensetning ofte bestemmes med ønske om lavt hulrom.

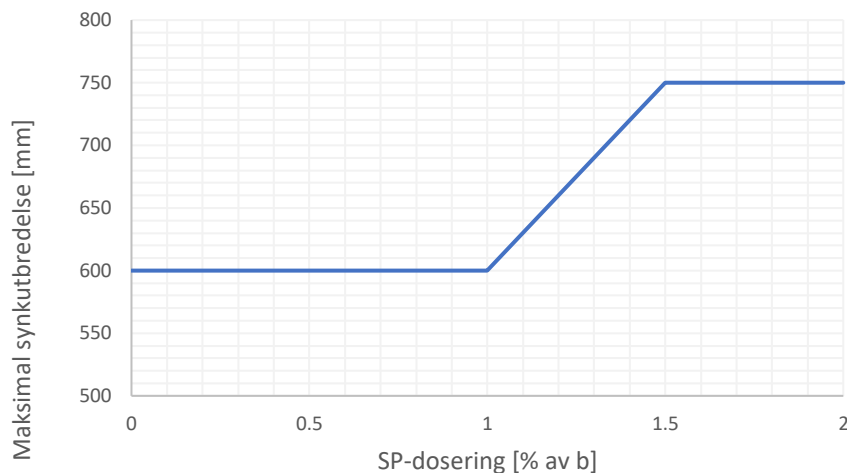
4.2.3.1 Støpelighetsfunksjonens asymptoter

S-kurvens øvre asymptote (n) beskriver betongsammensetningens maksimalt oppnåelig synkutbredelse, og bestemmes etter SP-dosering. Dette med bakgrunn i teorien om at SP-stoff påvirker matriksens flytskjærspenning (τ_0), og at flytskjærspenning direkte korrelerer med synkutbredelse, se avsnitt 2.5.3.1. I det øvre sjiktet av mulig oppnåelig synkutbredelse, vil betongen være matriksdominert, og egenskapene i matriksen vil derfor være avgjørende for maksimal oppnåelig synkutbredelse. I samarbeid med Sverre Smeplass er det antatt at maksimalt oppnåelig synkutbredelse for SP-mettet betong ($\geq 1,5$ % av b) er 750 mm, og 600 mm for SP-dosering ≤ 1 % av b . Dosering mellom dette er antatt lineært fordelt. Formel [4-4] beskriver denne sammenhengen, Figur 4-9 illustrerer dette grafisk.

$$f_n(x) = \begin{cases} 600, & x \leq 1 \\ 300x + 300, & 1 < x < 1,5 \\ 750, & x \geq 1,5 \end{cases} \quad [4-4]$$

hvor,

x = SP-dosering [% av b]



Figur 4-9 Sammenheng mellom SP-dosering og maksimalt oppnåelig synkutbredelse i betong

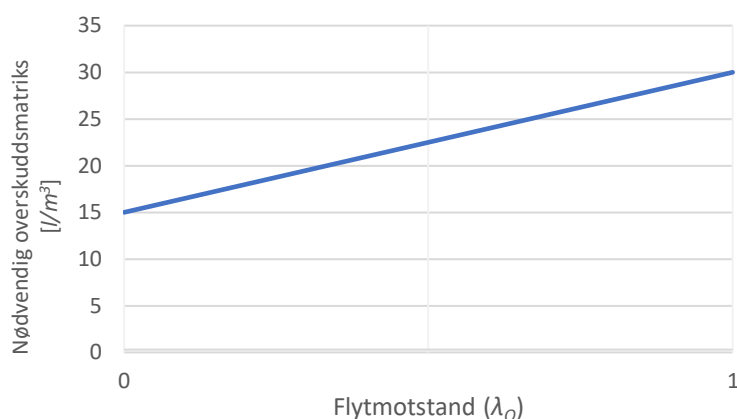
Grenseverdien for $f_n(x) = 600$ (SP_{min}) er antatt avhengig av SP-dosering som gir metning ($SP_{metning}$), med følgende formel:

$$SP_{min} = 0,66 \cdot SP_{metning} \quad [4-5]$$

Nedre asymptote (m) i støpelighetsfunksjonen er bestemt til 200 mm, da dette er diameteren på bunnen av synkkjeglen.

4.2.3.2 Hulrom + offset

Mørtells hulromsmodul (Hm) tar ikke høyde for matriksens egenskaper. I samarbeid med Sverre Smeplass er det antatt at egenskapene i matriks har betydning for hvor mye overskuddsmatriks som er nødvendig for å oppnå tilstrekkelig partikkelseparasjon, og dermed flyt i betong («zero slump»). Nærmere bestemt, er det antatt at flytmotstanden i matriks har direkte påvirkning på nødvendig overskuddsmatriks. Sammenhengen er antatt å være lineært fordelt mellom 15 og 30 l/m³ henholdsvis avhengig av flytmotstand mellom 0 og 1. Figur 4-10 illustrerer denne fordelingen grafisk.



Figur 4-10 Lineær fordeling for bestemmelse av overskuddsmatriks for «zero slump»

I støpelighetsfunksjonen er dette implementert ved å introdusere en variabel Offset (O), som representerer nødvendig overskuddsmatriks for «zero slump». Hulrom + offset utgjør til sammen en volumprosent matriks som gir betongen flyt, og representerer hvor på x-aksen stigningen begynner. Hulrom + offset er dermed med på å bestemme den horisontale plasseringen av kurven (Kpu). Figur 4-11 viser tabellen for beregning av offset i verktøyet, med en formel for lineær fordeling, avhengig av λ_Q . Eksempelet i figuren viser offset-verdi på 2,62 % som tilsvarer 26,2 l/m³ nødvendig matriksoverskudd, for en betong med 0,74 flytmotstand i matriksen.

λ_Q	0,74
Hulrom i 0.125/D _{max} [%]	31,96
Offset til hulrom i 0.125/D _{max} [%]	2,62

Figur 4-11 Tabell for beregning av offset av hulrom

4.2.4 Formatering

I det reviderte proporsjoneringsverktøyet velges delmaterialene i matriksfasen ved hjelp av nedtrekksmenyer. Nedtrekksmenyene henter data for ulike delmaterialer fra datatabell, slik at brukeren slipper å legge inn alle tilhørende data hver gang det byttes mellom delmaterialer. Datatabellen inneholder noen av de vanligste materialene som er brukt i betong i Norge. Dersom brukeren ønsker å benytte andre materialer, kan dette legges inn i datatabellene under fanen «*Datatabell matriks*». Det er viktig at all nødvendig data legges inn for at verktøyet skal kunne fungere optimalt.

For å enklere varsle brukeren om eventuelle feil i verktøyet er det laget et kontrollpanel, kalt «*Beregningskontroll*» (se Figur 4-12).

- *Tilslagssammensetning* karakteriseres med grønt eller rødt statusfelt, som henholdsvis beskriver om valgt tilslagssammensetning er gyldig eller ikke. Kriteriet er om summen av prosentandelene for hver fraksjon blir 1.
- *Matriksproporsjonering* karakteriseres med grønt eller rødt statusfelt, som henholdsvis beskriver om samlet volum av proporsjonert matriks under fanen «*Flytmotstand*», blir lik eller forskjellig fra 1.
- *Flytmotstand, SKB (0,5-0,75)* beskriver om estimert flytmotstand i matriksen er mellom 0,5 og 0,75 eller ikke. Dette karakteriseres med henholdsvis grønt og rødt statusfelt.
- *Mengde SP* beskriver om total andel SP-stoff overskrider antatt mengde for SP-metning, eller ikke. Dette karakteriseres med henholdsvis gult og grønt statusfelt.
- *Proporsjonert resept* beskriver om totalt volum av proporsjonert resept er lik $1 \text{ m}^3/\text{m}^3$, eller ikke. Dette karakteriseres henholdsvis med grønt og rødt statusfelt.

Beregningskontroll	Status
Tilslagssammensetning	Grønt
Matriksproporsjonering	Grønt
Flytmotstand, SKB (0,5 - 0,75)	Rødt
Mengde SP	Grønt
Proporsjonert resept	Grønt

Figur 4-12 Kontrollpanel i proporsjoneringsverktøy

4.2.5 Versjoner

Det er utarbeidet to forskjellige versjoner av verktøyet, rettet mot forskjellige målgrupper. I tillegg til en helt «åpen versjon» der all data vises, er det fremstilt en «lukket versjon», der data som ikke er nødvendig for å bruke verktøyet er skjult. Beregningsdata og mellomregning er skjult i den lukkede versjonen, mens celler for input, nødvendig informasjon, grafer og resultat (proporsjonert resept) vises.

4.2.6 Kalibrering av revidert proporsjoneringsverktøy

Den nye versjonen proporsjoneringsverktøyet er kalibrert mot fullskalaforsøkene. Kalibrering er gjort med bakgrunn i prøve å gjenskape resultater i fullskalaforsøk.

Metode for kalibrering, er delt inn i tre deler, kalibrering av flytmotstand, kalibrering av hulrom og støpelighetsfunksjonen. Resultater fra fullskalaforsøk og laboratorieforsøk er benyttet som kalibreringsgrunnlag, åtte FlowCyl-forsøk og fire hulromsmålinger.

4.2.6.1 Kalibrering av flytmotstand

Under kalibreringen av flytmotstand-modulen, var målet å gjenskape flytmotstanden målt med FlowCyl. Måten dette ble gjort på var å tilpasse konstantene (j_x) i formel [4-1] ved bruk av *Solver* i Excel (regresjonsanalyse). I tillegg til dette ble det også forsøkt å legge til en ekstra konstant (j_4) for $\frac{SP}{b}$, da formelen ikke har en egen konstant som tar for seg effekten av type SP-stoff, kun en konstant (j_1) som beskriver hvordan sement-typen påvirkes av SP på generelt grunnlag. Tabell 4-5 viser til konstantene (j_1 og j_3) som er tatt utgangspunkt i før kalibreringen. Bidragsfaktorene j_3 , for fillerbidraget (f/b) i formel [4-1], er antatt å være *Feiring VSI* og *Velde Intermediate*, for henholdsvis filler i fullskala-reseptene fra Feiring Bruk og Velde.

Tabell 4-4 Opprinnelige j_1 - og j_3 -konstanter før kalibrering

	j_1	j_3
BØ /FB	0,07 (STD FA)	0,62 (Feiring VSI)
Velde		0,41 (Velde Intermediate)

Kalibreringen ble forsøkt på fire forskjellige måter, i den hensikt å tilstrebe gode konstanter som gjensker faktisk flytmotstand i alle reseptene:

1. Endre j_1 og j_3 samtidig
2. Endre j_3 og j_4 samtidig
3. Endre bare j_4
4. Benytte de opprinnelige konstantene i tabell 3 fra «Paper II» i Skares avhandling [1], se Tabell 2-1.

4.2.6.2 Kalibrering av hulrom

I kalibreringen av hulromsberegningen ble referanseverdiene for hulromskurven kalibrert, ved bruk av *Solver* i Excel. Verdiene for korreksjonsfaktorene ble ikke kalibrert, og er derfor kun basert på erfaringstall. Bakgrunnen for dette var at alle tilslagssammensetningene er klassifisert med samme korreksjonsfaktorer, noe som gjorde kalibreringen av disse vanskelig.

4.2.6.3 Kalibrering av støpelighetsfunksjonen (kurvetilpasning)

Støpelighetsfunksjonen er forsøkt kalibrert ved å sammenligne konsistenskurvene (SU vs. Mv) fra fullskalaforsøkene og støpelighetsfunksjon (*Kpu*). Input-data for støpelighetsfunksjonen (hulrom og flytmotstand) er satt til verdiene målt ved laboratorieforsøkene. Sammenligningen er gjort i den hensikt å se på hvordan endring i parametere, har på konsistensfunksjonen. Kalibreringen er gjort ved kurvetilpasning, der parameterne hulrom og uttrykk a er endret, henholdsvis for å «flytte» kurven horisontalt og endre stigningsforløpet i kurvens vendepunkt. Disse parameterne er valgt da hulrom har stor påvirkning på hvordan kurven plasseres på x-aksen, altså horisontal forskyvning. Mens leddet a i Mørtells konsistensfunksjon avhenger blant annet av flytmotstanden, og har påvirkning på stigningsforløpet i støpelighetsfunksjonen. Kurvetilpasningen er gjort ved manuell regresjon ved å endre på offset til hulrom (O) og konstanten $-\frac{4}{3}$ i a .

Sammenligning av konsistenskurvene blir presentert i avsnitt 5.2.4, der effekten av endring i parameterne blir illustrert grafisk.

4.3 Parameterstudie flytmotstand

I forbindelse med bruk av formel for estimering av flytmotstand [4-1], har det blitt gjort en parameterstudie for å visualisere effekten av delmaterialenes betydning for flytmotstanden (λ_Q). Et regneark for proporsjonering av matriks og beregning av flytmotstand er etablert for å fremstille plot av materialparametere (v/c , v/b , SP/b , f/b (høy/lav VSSA), VSSA for filler, s/c , FA/c) vs. flytmotstand. Regnearket er lagt ved som Vedlegg L. For å finne påvirkningen av hver parameter, endres kun parameteren som undersøkes. Variasjonsområdet for hver parameter er valgt til reelle verdier.

Matriksproporsjoneringen er gjort ved å velge materialer, VSSA, densitet, dosering/andeler og eventuelle effektivitetsfaktorer (k), for så å proporsjoneres resepten med hjelp makro i Excel, basert på «goalseek»-regresjon (Beregn-knapp). Dette er samme metode som proporsjoneringsverktøyet benytter. Materialparametere (andelene) for de proporsjonerte reseptene, legges inn i tabell «Matriksresepter», som igjen blir grunnlag for beregning av flytmotstand med formel [4-1], sammen med tilhørende bidragsfaktorene (k_x). Konstantene for bidragsfaktorene er de samme som er benyttet i proporsjoneringsverktøyet, se formel [4-1] og Tabell 4-3. For å kunne plassere plot av effekten hver materialparameter har på flytmotstanden, i samme modell, benyttes index-verdier for endringen av parameterne (x-aksen). Index fra 0 til 1, representerer hele variasjonsområdet for alle parameterne.

Form og plassering på modellerte kurver vil derfor kunne variere avhengig av størrelsen på variasjonsområdet for hver parameter.

Parameterstudien er basert på en vilkårlig valgt matrikssammensetningen, se Tabell 4-5, og bidragsfaktorer fra formel [4-1], Tabell 4-7. Hvorav j_x -faktorene er vilkårlig valgt. Tabell 4-6 viser variasjonsområdet for hver parameter, altså hvilke verdier index-tallene representerer.

Tabell 4-5 Utgangspunkt for materialparametere i matrikssammensetningen

v/b	f/b	SP/c	VSSA, filler	s/c	FA/c
0,4	0,2	0,01	141	0,04	0

Tabell 4-6 Parameternes variasjonsområde

Index	0	1
v/c	0,4	0,75
v/b	0,4	0,7
SP/b	0	0,02
f/b (lav VSSA)	0	0,8
f/b (høy VSSA)	0	0,8
VSSA, filler	50	950
s/c	0	0,1
FA/c	0	0,35

Tabell 4-7 Bidragsfaktorer

v/c	k_x	
	$\leq 0,5$	$> 0,5$
VSSA _{matriks} /100	0,38	
ϕ	-1,07	
v/p	-1,44	
SP/c	-0,07	
1/(v/c)	0,17	0,13
FA/b	-0,1	
s/b	1,6	
f/b	0,39	

For å kontrollere effekten av SP på flytmotstand, er det også valgt å lage et plot som sammenligner SP/b med et utvalg av data fra Skares avhandling [1], Figur 5-12. Kurvene er basert på data kun med variasjon i SP-dosering, hentet fra tabell 5 og 6 i avhandlingen (oppsummert i Tabell 4-8), samt bidragsfaktorene (k_x) for flytmotstand, fra Skares avhandling (Tabell 2-1).

Tabell 4-8 Utvalg av resepter fra Skares avhandling [1] med kun variasjon i SP-dosering

	Nr.	w/b	sp/c	fi/b	FA/c	s/c	Sement	Filler
Tabell 5	27	0,4	0,01	0,25	-	-	STD FA	Intermediate
	30	0,4	0,0125	0,25	-	-	STD FA	Intermediate
	33	0,4	0,015	0,25	-	-	STD FA	Intermediate
	36	0,4	0,0175	0,25	-	-	STD FA	Intermediate
Tabell 6	7	0,51	0,01	0,64	-	0,09	Industri	Intermediate
	8	0,51	0,0125	0,64	-	0,09	Industri	Intermediate
	9	0,51	0,015	0,64	-	0,09	Industri	Intermediate
	17	0,42	0,01	0,37	0,26	0,05	Industri	Intermediate
	18	0,42	0,0125	0,37	0,26	0,05	Industri	Intermediate
	19	0,42	0,015	0,37	0,26	0,05	Industri	Intermediate

5 RESULTAT OG ANALYSE

I denne delen av rapporten presenteres og analyseres resultatene fra laboratorieforsøk. I tillegg presenteres den reviderte versjonen av proporsjoneringsverktøyet og kalibreringen av dette. Resultatene og analyse fra parameterstudien for flytmotstand er også presentert her.

5.1 Laboratorieforsøk

Samlede resultater fra FlowCyl- og hulromsforsøk (NorBetong-metoden) er presentert i Tabell 5-1. Parentesen viser til hvilken resept hulrommet er målt for. Se Vedlegg F og Vedlegg G for resultater og utregning i egne regneverktøy.

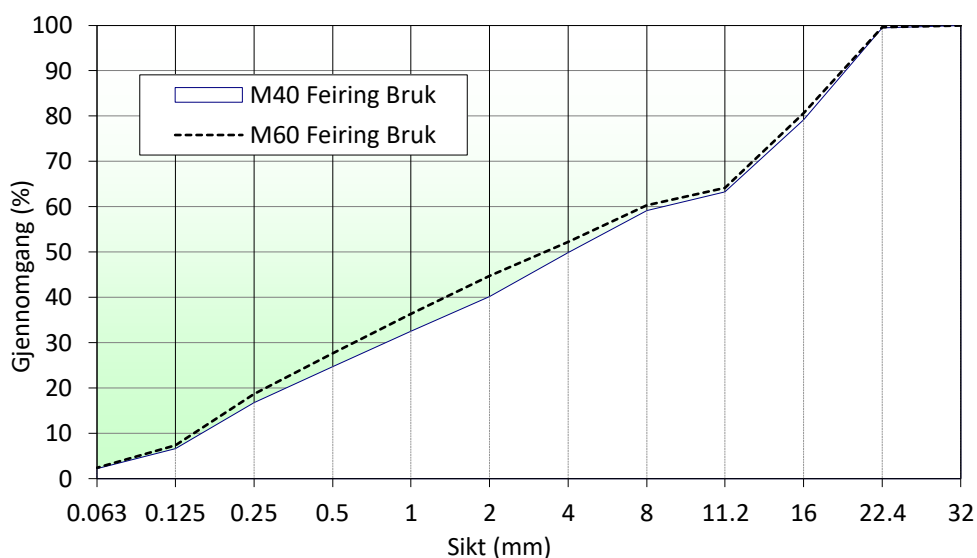
Tabell 5-1 Resultater fra laboratorieforsøk (FlowCyl og NorBetong-metode)

Resept	Proporsjonert Matriksvolum [l/m ³]	Flytmotstand, λ_Q	Hulrom
Betong Øst/Feiring Bruk			
M60	1.5 (3200K5)	335	0,32 (separert)
	1.1 (3200K1)	375	0,26 (separert)
M40	2.3 (4700K3REF)	375	0,46
	2.1 + 10l vann (4700K5)	405	0,44
Velde			
M60	1.6 (A17)	320	0,54
	1.1 (A12)	370	0,44
M40	2.6 (A27)	335	0,7
	2.1 (A22)	385	0,66

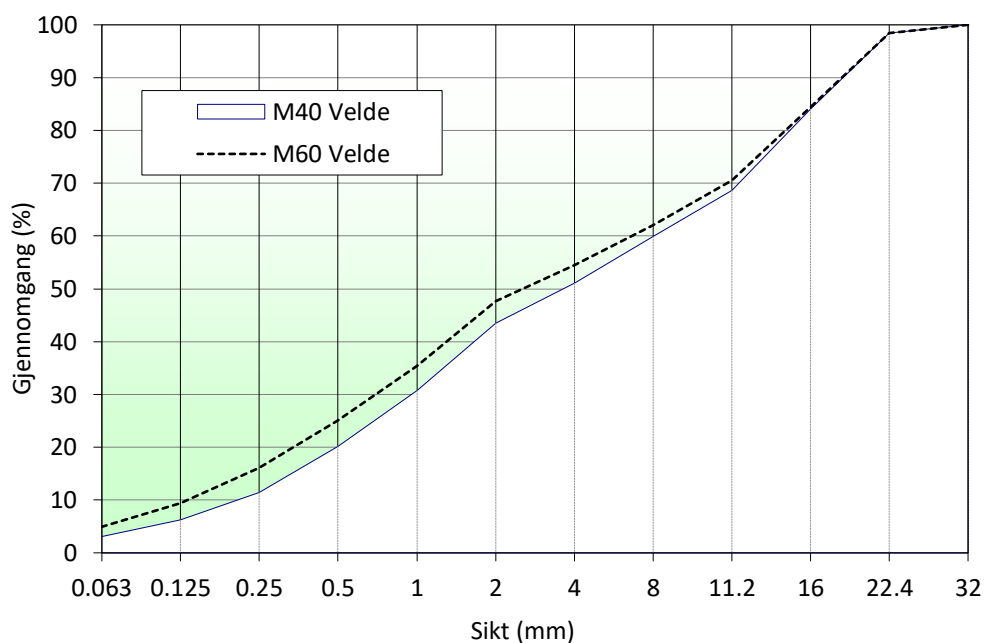
Merk at begge M60-matriksene fra Betong Øst/Feiring Bruk separerte ved FlowCyl-forsøkene, 1.5 (3200K5) og 1.1 (3200K1). Pulver la seg i bunn av beholderen slik at lite pulver ble med når væsken ble fylt over i FlowCyl. Også i skålen under FlowCyl ble det i etterkant av forsøket observert pulver som samlet seg i bunnen, som tyder på separasjon. Det er sannsynlig at dette har påvirket flytmotstanden, og resultatene vil trolig være noe høyere. Separasjonen kan trolig skyldes at begge betongkvalitetene for Feiring Bruk/Betong Øst (M60/M40) har lik fillerandel, men ulikt v/c-tall. I motsetning til Betong Øst, er fillerinnholdet høyere for Velde M60 sammenlignet Velde M40. Se avsnitt 3.1.2 for resepter og Figur 5-1 og Figur 5-2 for sammenligning av partikkelfordelinger.

Variasjonen i flytmotstand ved endret matriksvolum virker realistisk. I teorien er fillermengde eneste parameteren som endres ved endret matriksvolum, gitt konstant tilslag- og matrikssammensetning. I henhold til PMM, reduseres fillerandelen ved økt matriksvolum. Det samme gjenspeiles i alle resultatene i Tabell 5-1, hvorav redusert mengde filler gir lavere flytmotstand. Veldes matriks har sammenlignet med Betong Øst høyere flytmotstand, noe som kan gjenspeiles i reseptene, ved at Velde har noe mer filler, spesielt partikler < 63 µm, se sammensatte partikkelfordelinger i Vedlegg D.

Resultatene for hulrom virker også realistiske. Høyere hulrom i M40 sammenlignet med M60, skyldes trolig forskjell i tilslagssammensetning. M60 har en «rettere» gradering enn M40, på grunn av høyere sandinnhold, derav lavere hulrom, se Figur 5-1 Figur 5-2.



Figur 5-1 Sammenligning av pakningsgrad M40 og M60, Feiring Bruk/Betong Øst



Figur 5-2 Sammenligning av pakningsgrad M40 og M60, Velde

5.2 Revidert proporsjoneringsverktøy

Den reviderte versjonen av proporsjoneringsverktøyet utarbeidet i forbindelse med denne masteravhandlingen, er vedlagt i Vedlegg A, del I. Vedlegget viser til mappe med forskjellige Microsoft Excel-filer, både for en «åpen» og en «lukket» versjon. I den åpne versjonen vises alt av beregninger, data, grid og tall. Denne versjonen er tilrettelagt for videreutvikling av verktøyet, eller for brukere som ønsker innsikt i hvordan beregninger blir gjort på detaljnivå. I den lukkede versjon er alt av mellomregninger skjult, denne versjonen er rettet mot brukere som kun har i hensikt å proporsjonere betong.

En enkel brukermanual er utarbeidet i den hensikt å veilede hvordan verktøyet kan benyttes for å proporsjonere betongresepter, Vedlegg B.

5.2.1 Resultat før kalibrering

Vedlegg E viser til forskjellige Excel-filer av proporsjoneringsverktøyet der data fra fullskalaforsøk er lagt inn. Merk at disse filene består av en versjon med kalibrert hulromsmodul. Beregningsmodul for flytmotstand og støpelighetsfunksjon, er ikke kalibrert. For å se resultater av kalibrert hulrom, se avsnitt 5.2.2.

Tabell 5-2 inneholder resultatene fra laboratorieforsøk, samt modellerte resultater **før** kalibrering (også hulrom). Hensikten er sammenligne modellerte og målte resultater før eventuell kalibrering.

Variasjon i modellert hulrom for resepter med samme betongkvalitet og produsent, skyldes oppmålingsavvik i tilslag ved blandeverk. Ulikt avvik mellom reseptene, resulterer i noe variasjon i hulrom.

Tabell 5-2 Estimerte verdier beregnet med proporsjoneringsverktøyet før kalibrering (modell) vs. laboratorieforsøk/fullskalaforsøk

Resept		SU [mm]	Mv (fullskala) [l/m ³]	Mv (modell) [l/m ³]	λ_Q (FlowCyl)	λ_Q (modell)	Hulrom (NorBetong- metode)	Hulrom (modell)
Betong Øst/Feiring Bruk								
M60	1.5	350	335	357	0,32 (separert)	0,33	27,19 % (1.3)	32,17 %
	1.1	660	375	427	0,26 (separert)	0,32		32,22 %
M40	2.3	450	375	383	0,46	0,75	29,40 % (2.3)	32,04 %
	2.1 + 10l vann	685	405	425	0,44	0,75		32,04 %
Velde								
M60	1.6	270	320	350	0,54	0,32	27,38 % (1.1)	32,83 %
	1.1	730 (separert)	370	444	0,44	0,32		32,74 %
M40	2.6	470	335	390	0,7	0,75	28,90 % (2.1)	32,55 %
	2.1	640	385	417	0,66	0,75		32,53 %

Resultatene i Tabell 5-2 viser store avvik i både matriksvolum, flytmotstand og hulrom for samtlige resepter. Dette gir tyder på behov for kalibrering. Resept 1.5 fra Betong Øst viser grei korrelasjon med flytmotstand, med tanke på at både hulrom og matriksvolum er estimert for høyt, er ikke resultatet akseptabelt.

En annen observasjon er at modellen estimerer for høy flytmotstand for samtlige resepter, med unntak av Velde M60. I tillegg er flytmotstanden modellert til omtrent like verdier for betongkvalitetene, uavhengig av produsent. Hovedforskjellen mellom fullskalareseptene fra produsentene, er ulik tilslagssammensetning. Dette kan gi uttrykk for at modellen ikke klarer å ta hensyn til fillerbidraget. Altså effekten filler har på flytmotstand. Filler påvirker flytmotstanden i formel [4-1] på flere måter, ved at den tar del i flere ledd i formelen ($VSSA_{matrix}$, ϕ , w/p og f/b). Ellers er hulrommet noe høyt for samtlige resepter. Det kan tyde på at hulromskurven er «forskjøvet» litt opp i forhold til faktisk hulromskurve.

5.2.2 Kalibrering av hulrom

Tabell 5-3 viser til kalibrerte verdier for referanse-hulromskurven beregnet ved hjelp av *Solver*.

Tabell 5-3 Resultat ved bruk av *Solver* på referanseverdier for hulromskurver

		Hulrom i 0,125/8 mm [%]	Hulrom i 8/D _{max} mm [%]	Steinandel ved min. hulrom i 0,125/D _{max} [%]	Min. hulrom i 0,125/D _{max} [%]
Opprinnelig referanseverdier		39	41	50	29,5
M60	BØ/FB (1.3)	38,20	41	48,83	24,29
	Velde (1.1)	38,10	41	48,98	25,63
M40	BØ/FB (2.3)	38,70	41	49,44	26,75
	Velde (2.1)	38,10	41	48,98	25,63
Gjennomsnitt		38,28	41	49,06	25,57

Verdiene tilsier at de opprinnelige verdiene, er et brukbart utgangspunkt for en referansehulromskurve for de aktuelle tilslagssammensetningene. Der verdien for «Min. hulrom i 0,125/D_{max}» avviker i gjennomsnitt over 3 % fra de kalibrerte verdiene. Med bakgrunn i dette velges ny verdi på 25,5 %.

Videre velges også ny verdi for «Steinandel ved min. hulrom i 0,125/D_{max}», til 49 %, slik at de nye referanseverdiene for hulromskurven blir som i Tabell 5-4. «Hulrom i 0,125/8 mm» avviker også noe, men er valgt å se bort ifra her, med tanke på at kalibreringen er gjort for relativt få resepter, med relativt liten variasjon i tilslagssammensetning.

Tabell 5-4 Kalibrerte referanseverdier for hulromskurve

	Hulrom i 0,125/8 mm [%]	Hulrom i 8/D _{max} mm [%]	Steinandel ved min. hulrom i 0,125/D _{max} [%]	Min. hulrom i 0,125/D _{max} [%]
Kalibrerte referanseverdier	39	41	49	25,5

Tabell 5-5 viser resultatet av kalibrerte referanseverdier. Kalibrerte hulromberegninger sammenlignes med resultat fra laboratorieforsk. Det er fortsatt noe avvik, men innenfor akseptable rammer, da tilslagssammensetningene på grunn av oppveingsavvik, ikke er helt like.

Tabell 5-5 Estimert hulrom med kalibrert hulromskurve

Resept		Hulrom (NorBetong -metode)	Hulrom, (modell) (kalibrert)
Betong Øst/Feiring Bruk			
M60	1.1	27,19 %	27,80 %
	1.5		28,39 %
M40	2.3	29,40 %	28,20 %
	2.1 + 10l vann		28,20 %
Velde			
M60	1.1	27,38 %	27,97 %
	1.6		27,97 %
M40	2.1	28,90 %	28,89 %
	2.6		28,93 %

5.2.3 Kalibrering av flytmotstand

Faktisk flytmotstand er gjenskapt ved bruk av bidragsfaktorene i Tabell 5-6, Tabell 5-7 og Tabell 5-8, i de respektive reseptene. Tabellene representerer de tre forskjellige kalibreringene, der de opprinnelige verdiene for j_1 , j_3 , j_4 , er forsøkt endret for å oppnå riktig flytmotstand.

Tabell 5-6 Endring av j_1 - og j_3 -konstanter for kalibrering av flytmotstand-modul

Resept		j_1	j_3
Betong Øst/Feiring Bruk			
M60	1.1	4,22	0,5
	1.5	0,07	0,54
M40	2.3	12,61	0
	2.1 + 10l vann	13,62	0
Velde			
M60	1.1	0,06	1,88
	1.6	0,056	3,11
M40	2.1	4,2	0
	2.6	1,7	0

Tabell 5-7 Endring av j_3 - og j_4 -konstanter for kalibrering av flytmotstand-modul

Resept		j_3	j_4
Betong Øst/Feiring Bruk			
M60	1.1	0	19,2
	1.5	0,54	1
M40	2.3	0	180
	2.1 + 10l vann	0	194,63
Velde			
M60	1.1	1,88	0,89
	1.6	3,11	0,81
M40	2.1	0	59,93
	2.6	0	24,22

Tabell 5-8 Endring av kun j_4 -konstant for kalibrering av flytmotstand-modul

Resept		j_4
Betong Øst/Feiring Bruk		
M60	1.1	70,17
	1.5	7,75
M40	2.3	209,06
	2.1 + 10l vann	223,71
Velde		
M60	1.1	-121,58
	1.6	-223,62
M40	2.1	79,61
	2.6	43,9

Resultatene i Tabell 5-6, Tabell 5-7 og Tabell 5-8, viser dårlig korrelasjon mellom konstantene i de ulike reseptene, uavhengig av hvordan konstantene endres. Ut ifra tabellene ses de ingen sammenheng som tilsier hvilke verdier konstantene (j_1 , j_3 , j_4) bør ha for å estimere «korrekt» flytmotstand for de forskjellige reseptene. Dette kan tyde på at feilkilden ikke ligger i bidragsfaktorene (j_1 , j_3 , j_4), men et annet sted i modulen/formelen.

Tabell 5-9 viser sammenligning mellom faktiske og estimerte verdier for matriksvolum og flytmotstand, med bruk av bidragsfaktorer fra Skares avhandling [1], se Tabell 2-1. Estimerte resultater i Tabell 5-9 er beregnet med kalibrerte hulromsverdier. Eventuelle avvik i matriksvolum skyldes derfor ikke feil estimert hulrom.

Tabell 5-9 Resultater med konstanter, (k_x) fra Skares avhandling [1]

Resept		SU [mm]	Mv (fullskala) [l/m ³]	Mv (estimert) [l/m ³]	λ_Q (FlowCyl)	λ_Q (estimert)
Betong Øst/Feiring Bruk						
M60	1.5	350	335	312	0,32 (separert)	0,10
	1.1	660	375	327	0,26 (separert)	0,10
M40	2.3	450	375	332	0,46	0,46
	2.1 + 10l vann	685	405	365	0,44	0,46
Velde						
M60	1.6	270	320	312	0,54	0,09
	1.1	730 (separert)	370	391	0,44	0,09
M40	2.6	470	335	342	0,7	0,47
	2.1	640	385	363	0,66	0,47

Resultatene i Tabell 5-9 viser også at konstantene fra Skares avhandling [1], heller ikke gir godt estimat av flytmotstand i de aktuelle reseptene. Konstantene fra Skares avhandling [1] gir lavere resultat for estimert flytmotstand i samtlige resepter, sammenlignet med de opprinnelige bidragsfaktorene, Tabell 5-2. Estimert flytmotstand for M60-kvalitene blir usannsynlig lav (0,09-0,10). Resultater også har sammenheng med resultatene før kalibrering (Tabell 5-2). Ved at estimert flytmotstanden blir omtrent lik for samme betongkvalitet, uavhengig av produsent. Dette gir uttrykk for at formel [4-1] ikke fungerer for å estimere flytmotstanden for de aktuelle reseptene. Alternativt, er det andre ukjente feilkilder i beregningsmodulen.

5.2.4 Kalibrering av støpelighetsfunksjon (K_{pu})

I de neste avsnittene presenteres resultater fra støpelighetsfunksjonen. Først resultater før kalibrering, deretter kurvetilpasning som kalibreringsprosess.

5.2.4.1 Resultat før kalibrering med utgangspunkt i faktiske verdier for flytmotstand og hulrom

Tabell 5-10 viser estimert nødvendig matriksvolum sammenlignet med faktisk matriksvolum, fra fullskalaforsøkene. Resultatene fra laboratorieforsøkene er benyttet som input-verdier i støpelighetsfunksjonen. Tabell 5-1 viser relativt store avvik for samtlige resepter, noe som tyder på at kalibrering av støpelighetsfunksjonen er nødvendig.

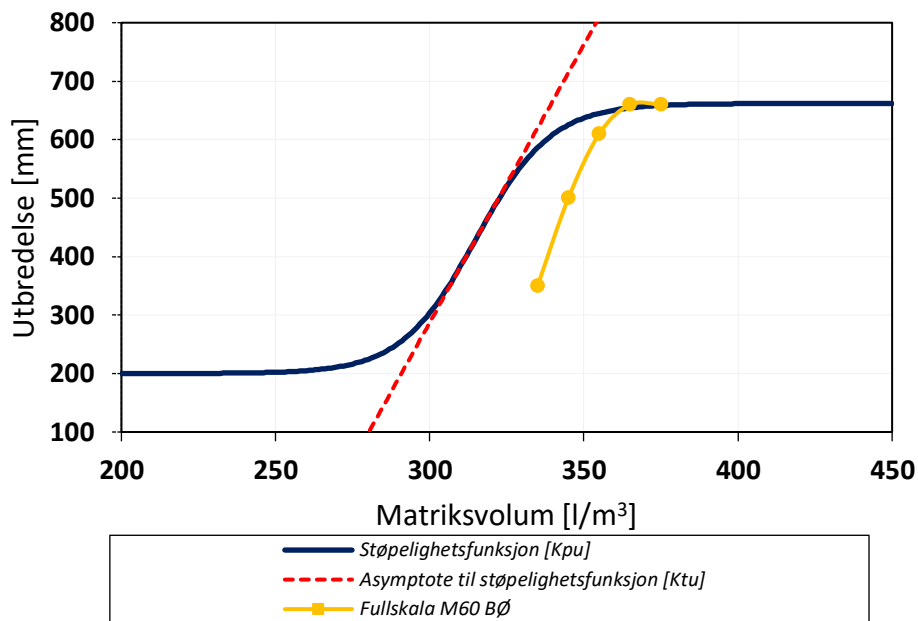
Tabell 5-10 Sammenligning mellom faktisk og estimert matriksvolum med korrekt hulrom og flytmotstand

Resept		SU [mm]	Mv (fullskala) [l/m ³]	Mv (estimert) [l/m ³]
Betong Øst/Feiring Bruk				
M60	1.1	660	375	383
	1.5	350	335	309
M40	2.3	450	375	343
	2.1 + 10l vann	685	405	373
Velde				
M60	1.1 (separert)	730	370	430
	1.6	270	320	300
M40	2.1	640	385	379
	2.6	470	335	355

5.2.4.2 Sammenligning av konsistenskurver før kalibrering

Figur 5-3, Figur 5-4, Figur 5-5 og Figur 5-6 viser sammenligning mellom estimerte kurver (støpeligheitsfunksjon) og kurver fra fullskalaforsøkene. Til venstre i figurene tabuleres data i tilknytning til støpeligheitsfunksjonene.

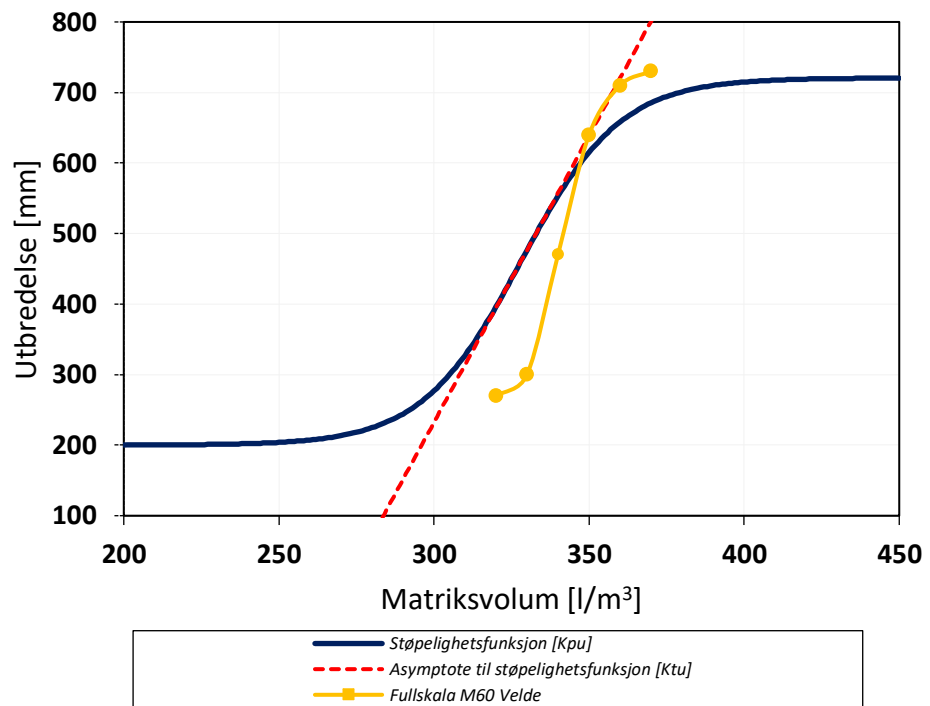
λ_Q	0,26
Hulrom i 0.125/D _{max} [%]	27,19
Offset til hulrom i 0.125/D _{max} [%]	1,89
Min utbredelse [K _{pu}] =	200
Max utbredelse [K _{pu}] =	662
α -K _p =	20,56
β -K _p =	-0,37



Figur 5-3 Sammenligning av konsistenskurver M60 Betong Øst (resept 1.1)

Sammenligning av kurvene i Figur 5-3, viser at formen er relativt lik, men at K_{pu} er «forskjøvet» horisontalt mot venstre i forhold til fullskala-resultatene. Dette kan forårsakes av for lite hulrom ($H+O$), enten som offset (O) eller målt hulrom (H) ved laboratorieforsøkene. Merk at FlowCyl-forsøkene på M60 fra Betong Øst resulterte i separasjon i væskene, noe som betyr at målt flytmotstand sannsynligvis ikke stemmer med faktisk flytmotstand. Dette gjør det vanskelig å fastslå hvordan stigningen på kurven faktisk korrelerer.

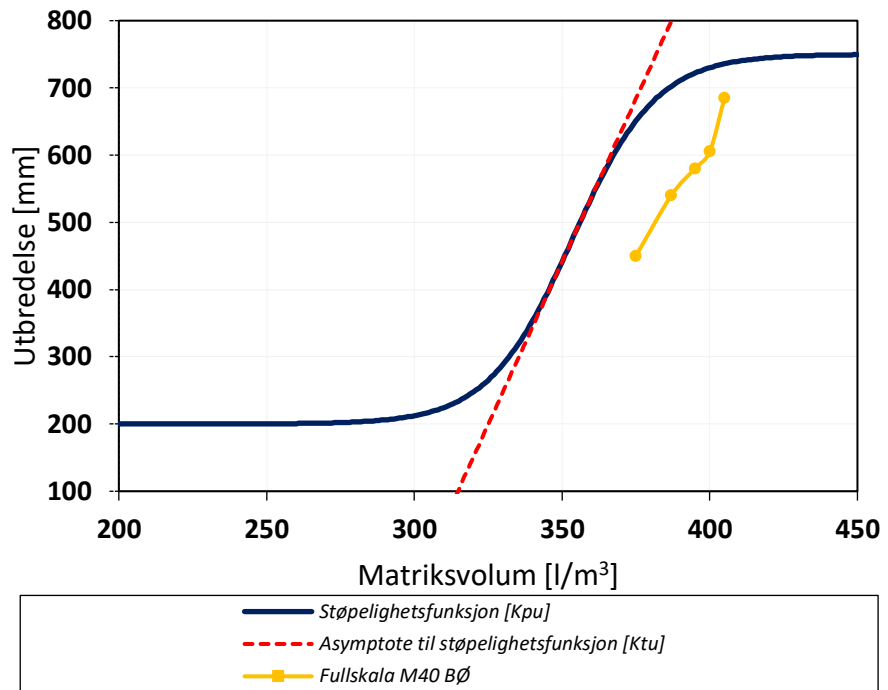
λ_Q	0,48
Hulrom i 0.125/D _{max} [%]	27,38
Offset til hulrom i 0.125/D _{max} [%]	2,22
Min utbredelse [Kpu] =	200
Max utbredelse [Kpu] =	721
$\alpha \cdot K\rho$ =	15,61
$\beta \cdot K\rho$ =	-0,34



Figur 5-4 Sammenligning av konsistenskurver M60 Velde (resept 1.3)

Kurvene i Figur 5-4 viser også at K_{pu} er noe «forskjøvet» horisontalt mot venstre, og at stigningen er noe lavere enn kurven for fullskalaresultatene. Dette kan forårsakes av feil i målt flytmotstand, eller i uttrykket for beregning av stigning i støpelighetsfunksjonen (α), formel [4-2], der en mulig feilkilde kan være konstanten $-4/3$.

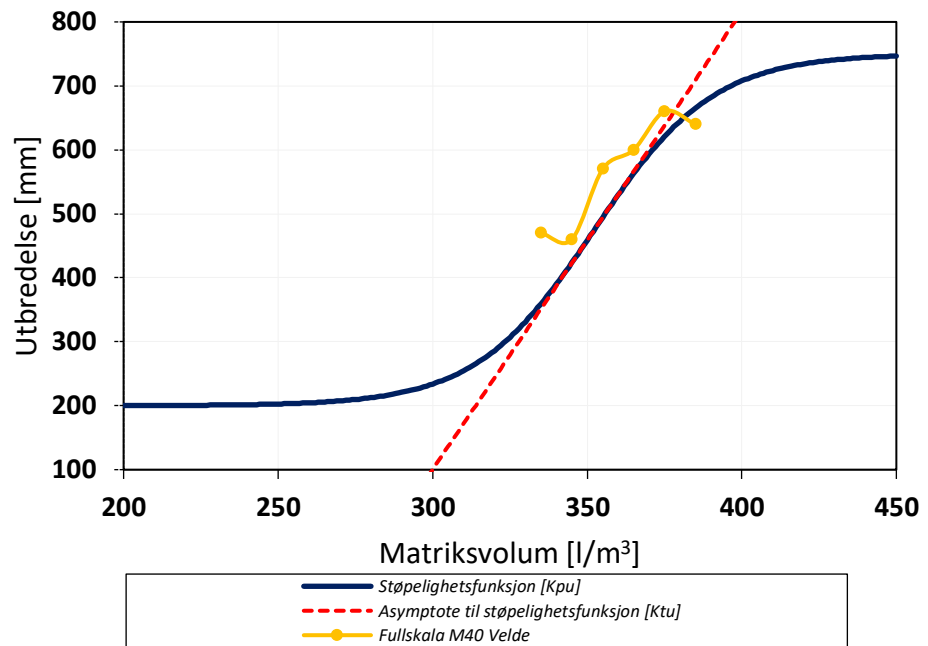
λ_q	0,46
Hulrom i 0.125/D _{max} [%]	29,40
Offset til hulrom i 0.125/D _{max} [%]	2,19
Min utbredelse [Kpu] =	200
Max utbredelse [Kpu] =	750
$\alpha \cdot Kp =$	17,11
$\beta \cdot Kp =$	-0,31



Figur 5-5 Sammenligning av konsistenskurvene M40 Betong Øst (resept 2.3)

Kurvene i Figur 5-5 viser den samme «forskyvningen» mot venstre, men kurvens stigning korrelerer relativt bra. Resultatene fra fullskala gir heller ikke noe grunnlag for å si noe om når den øvre asymptoten for Kpu avtar.

λ_Q	0,66
Hulrom i 0.125/D _{max} [%]	28,90
Offset til hulrom i 0.125/D _{max} [%]	2,49
Min utbredelse [K _{pu}] =	200
Max utbredelse [K _{pu}] =	750
α -K _p =	13,02
β -K _p =	-0,30



Figur 5-6 Sammenligning av konsistenskurver M40 Velde (resept 2.1)

Resultatene i Figur 5-6 viser at fullskalaforsøkene for M40 Velde har stor spredning, og danner dermed ikke grunnlag for en tydelig S-formet kurve. Variasjonen kan skyldes ulike omstendigheter ved fullskalaforsøkene, eksempelvis fukt på måleutstyr ved synkforsøk. Dette gjøre det noe vanskeligere å sammenligne kurvene, spesielt stigningsforløpet. Til forskjell fra de øvrige sammenligningene, er kurven her «forskjøvet» litt mot høyre. Dette kan være forårsaket av noe høy verdi for hulrom, enten estimert med offset eller målt ved laboratorieforsøkene.

5.2.4.3 Kurvetilpasning

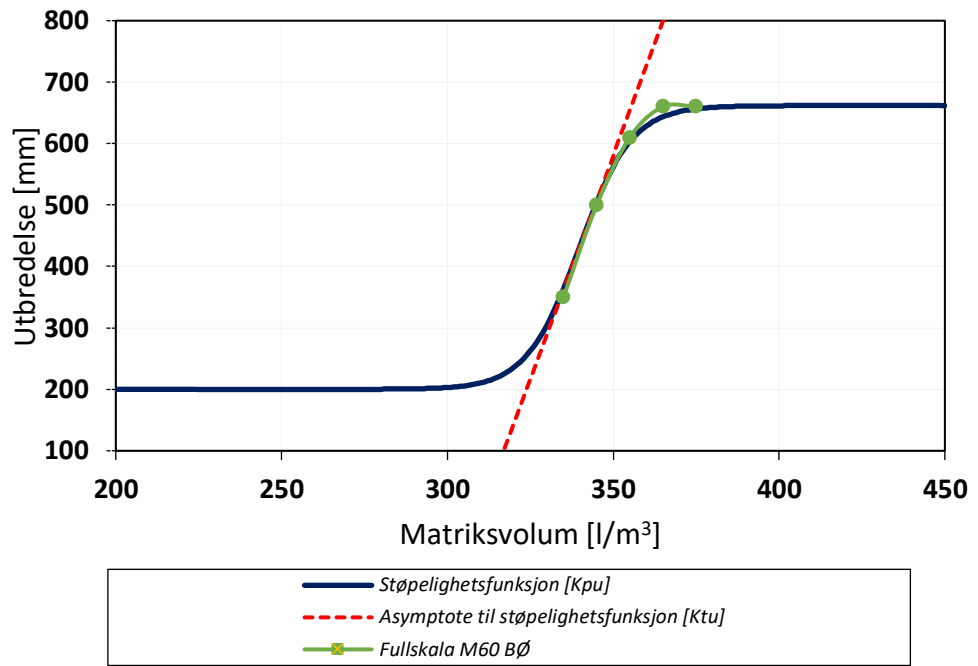
Endringen av offset (O) og konstanten ($-4/3$) i a , er gjort i den hensikt å tilpasse konsistenskurvene, K_{pu} , mot kurver fra fullskalaforsøk, Tabell 5-11. Offset er endret for å «flytte» K_{pu} horisontalt, mens konstanten i a , for å endre stigningen. Figur 5-7, Figur 5-8, Figur 5-9 og Figur 5-10 viser kurvetilpasningen grafisk.

Tabell 5-11 Kurvetilpasning ved endring av offset og konstant ($-4/3$) i a

Resepter		Opprinnelig verdi		Verdi etter kurvetilpasning	
		Offset til hulrom	Konstant i eksponent (a)	Offset til hulrom	Konstant i eksponent (a)
M60	Betong Øst/Feiring Bruk (1.1)	1,89	-4/3 (-1,333)	5,2	-0,1
	Velde (1.3)	2,22		5,0	0,1
M40	Betong Øst/Feiring Bruk (2.3)	2,19		6,1	-1,333
	Velde (2.1)	2,49		1,8	-1,3

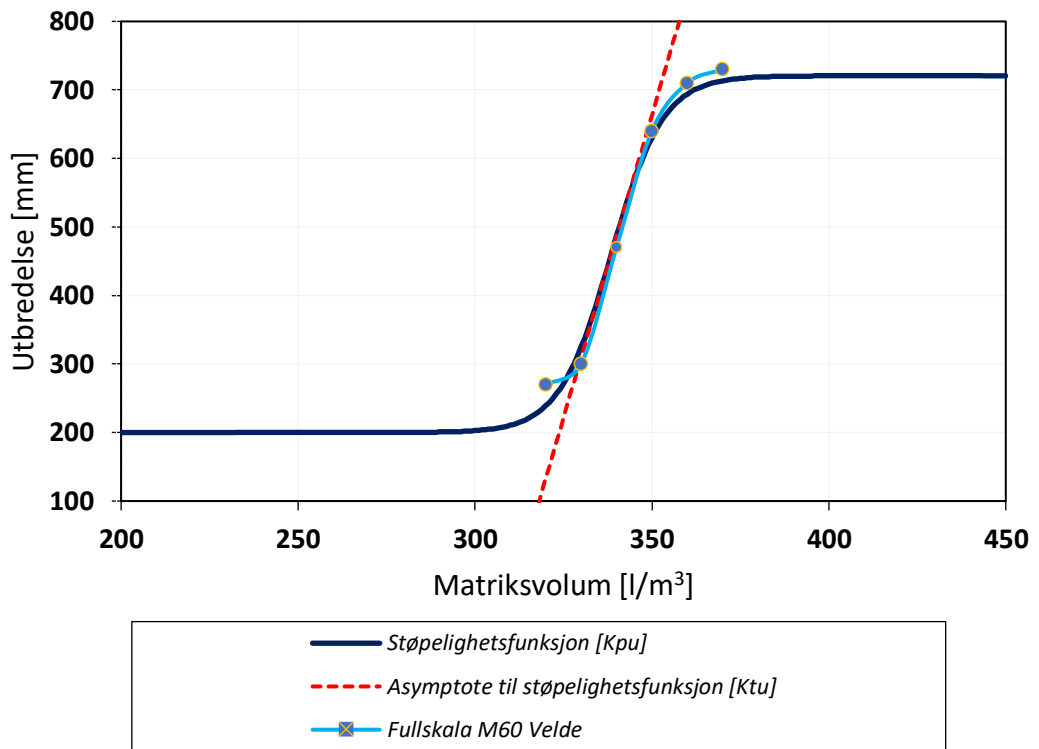
Merk at resept 1.1 fra Velde (M60) ble separert under fullskalaforsøkene. I henhold til PMM er det ikke mulig å gjenskape resultatet, på grunn av ustabilitet (for høy utbredelse). Resept 1.3 (M60) fra Velde er benyttet som erstatning. Flytmotstand på 0,46 er valgt ut ifra en antatt lineær fordeling mellom de målte reseptene (1.1 og 1.6). Resultatene i Tabell 5-11 viser at kurvetilpasningen førte til økning i nødvendig offset, bortsett fra Veldes M40 betong. Dette kan tyde på at hulrom + offset er større enn estimert. Med bakgrunn i at nødvendig overskuddsmatriks normalt ikke trenger å være høyere enn 30-40 l/m³, kan dette tyde på at målt hulrom er feil i forhold til faktisk hulrom i fullskalatestene. Årsaken kan være usikkerheten ved pakningsgrad. Konstanten i a endres noe for M60-reseptene, men er omtrent uendret i M40 reseptene. Dette kommer av at stigningsforholdet i M60-reseptene er lavere enn faktiske verdier, mens M40 treffer relativt bra. Dette kan delvis skyldes lavere offset for M60-veridene. På bakgrunn av et relativt tynt kalibreringsgrunnlag (fire målinger), er det valgt å ikke bestemme nye verdier for kalibrering av støpelighetsfunksjonen (offset eller a). Men resultatene kan tyde på at hulrom + offset, er høyere enn først estimert. Årsaken kan være at pakningsgraden i laboratorieforsøkene er ulik sammenlignet med betongblandningene (fullskala), noe som resulterer i mindre hulrom.

λ_Q	0,26
Hulrom i 0.125/D _{max} [%]	27,19
Offset til hulrom i 0.125/D _{max} [%]	5,20
Min utbredelse [K _{pu}] =	200
Max utbredelse [K _{pu}] =	662
α -K _p =	31,56
β -K _p =	-0,32



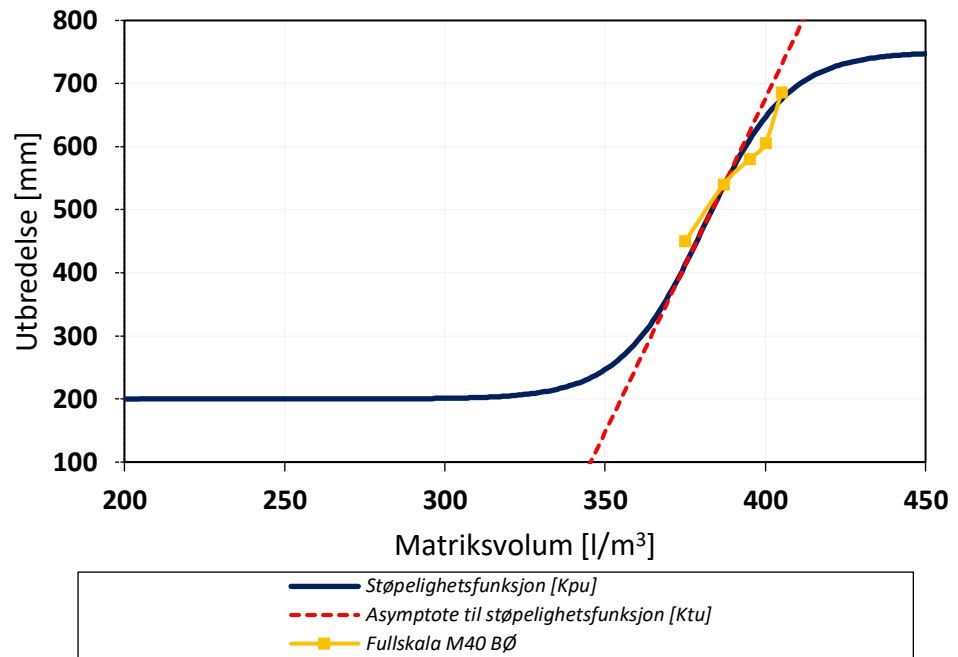
Figur 5-7 Resultat kurvetilpassning M60 Betong Øst (Resept 1.1)

λ_Q	0,48
Hulrom i 0.125/D _{max} [%]	27,38
Offset til hulrom i 0.125/D _{max} [%]	5,00
Min utbredelse [K _{pu}] =	200
Max utbredelse [K _{pu}] =	721
α -K _p =	33,97
β -K _p =	-0,32



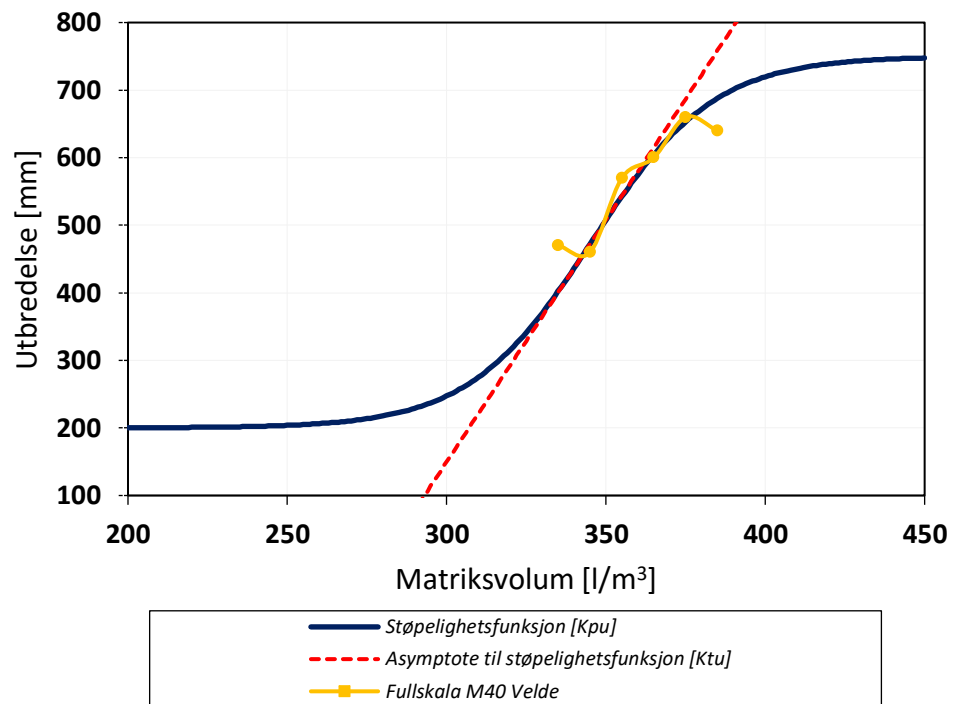
Figur 5-8 Resultat kurvetilpassning M60 Velde (resept 1.3)

λ_Q	0,46
Hulrom i 0.125/D _{max} [%]	29,40
Offset til hulrom i 0.125/D _{max} [%]	6,10
Min utbredelse [Kpu] =	200
Max utbredelse [Kpu] =	750
α -Kp =	19,22
β -Kp =	-0,24



Figur 5-9 Resultat kurvetilpasning M40 Betong Øst (resept 2.3)

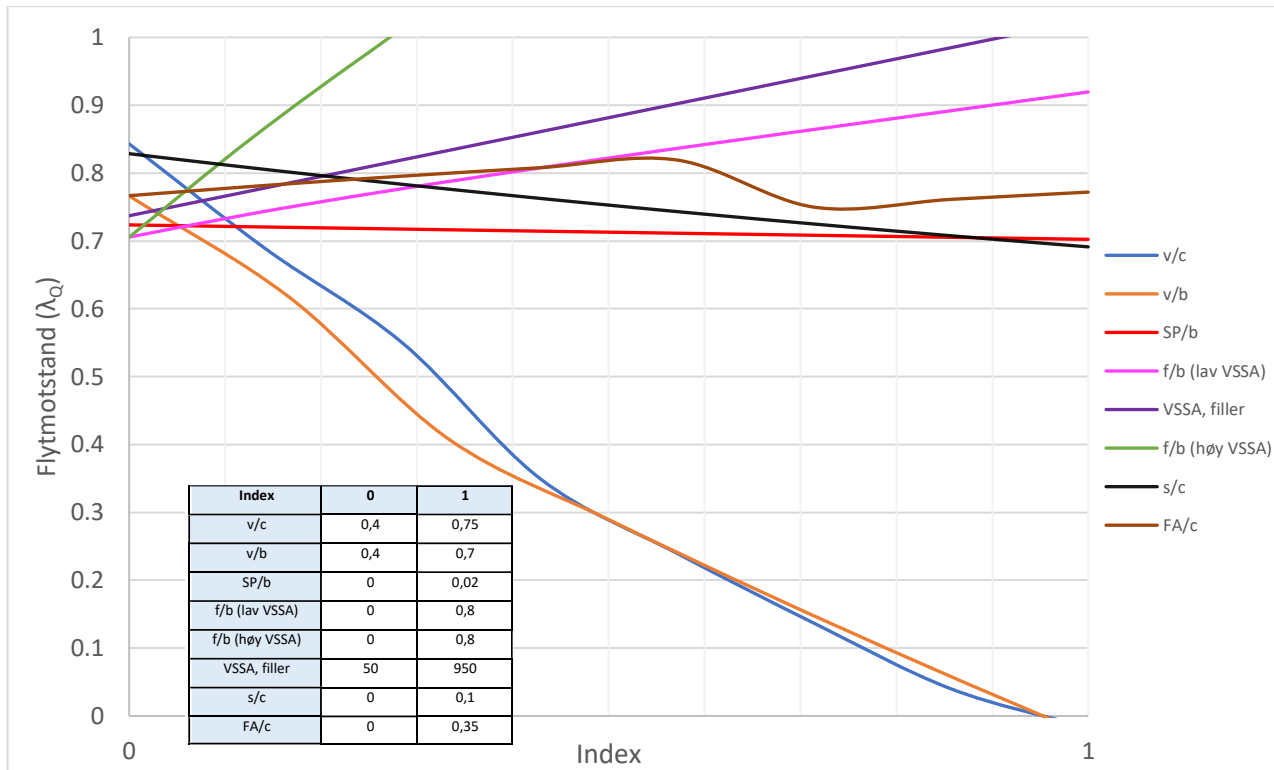
λ_Q	0,66
Hulrom i 0.125/D _{max} [%]	28,90
Offset til hulrom i 0.125/D _{max} [%]	1,80
Min utbredelse [Kpu] =	200
Max utbredelse [Kpu] =	750
α -Kp =	13,02
β -Kp =	-0,31



Figur 5-10 Resultat kurvetilpasning M40 Velde (resept 2.1)

5.3 Parameterstudie flytmotstand

Figur 5-11 viser hvilken effekt materialparametere i formel [4-1], har på flytmotstand. Kurvene samsvarer med innledende teori om delmaterialenes betydning for flytmotstand. Merk at stigningen på verdiene avhenger av variasjonsområde for index-tall og tilknyttede bidragsfaktorer. Materialparameterne som studien er basert på, er presentert i Tabell 4-5.



Figur 5-11 Parameterstudie, formel forflytmotstand

Kurven SP/b er relativt flat og har liten effekt på flytmotstanden, uavhengig av doseringsmengde. Bidragsfaktoren for SP/b avhenger av kun type sement, og tar ikke høyde effekten ved ulike SP-typer. Bidragsfaktoren sier heller ikke noe om eventuelle effekt på andre delmaterialer i matrisen (filler, pozzolan/tilsetningsstoff).

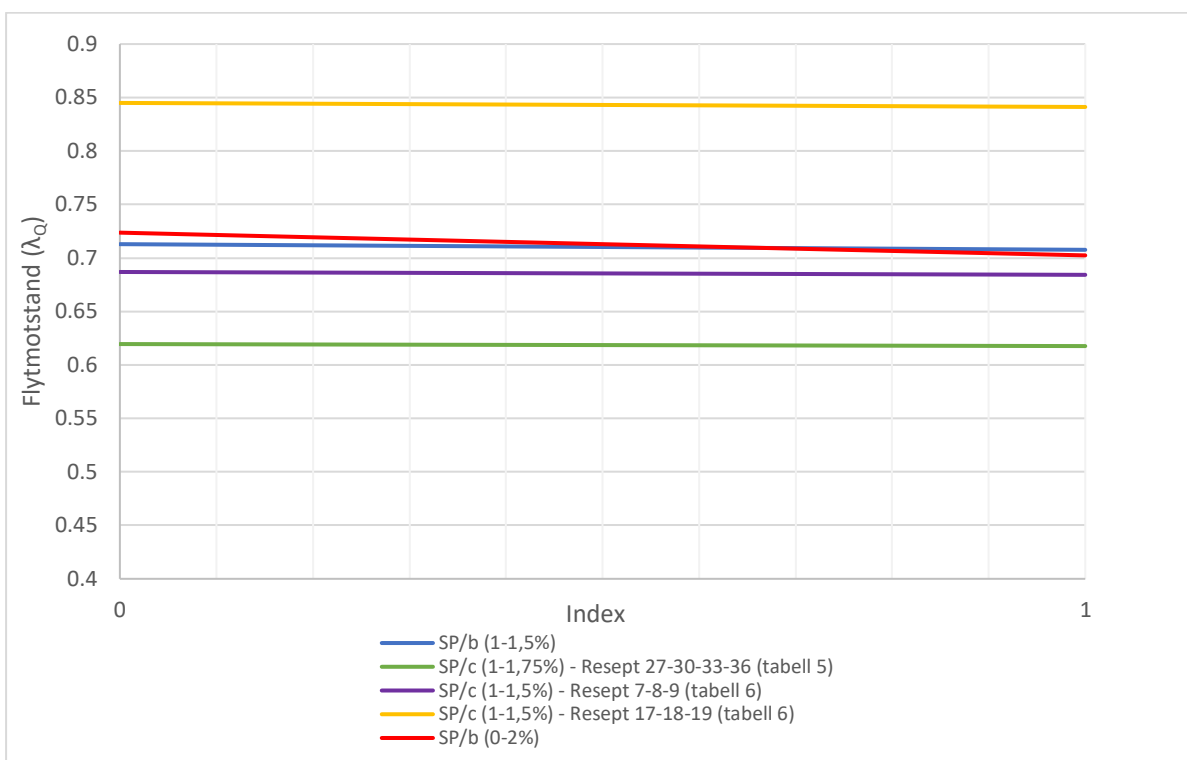
En annen viktig observasjon er effekten silika (s/b) har på flytmotstand. Økt dosering silika, reduserer flytmotstand. Formelen tar ikke høyde for terskelgrensen, hvor flytmotstand går fra å reduseres til å økes, som illustrert i Figur 2-6 a). I formelen er effekten av silika er antatt lineær, men ifølge Wallevik et al. [15], avhenger effekten av dosering.

Svingningen i kurve for flyveaske (FA) kommer av v/c -betingelsen. Altså endring i FA/c medfører at v/c passerer 0,5, og bidragsfaktoren for $1/(w/c)$ endres fra 0,17 til 0,13. Hvis man ser bort i fra dette, resulterer endring i FA/c i økning av flytmotstand. Dette kommer at av v/b holdes konstant, slik at sement erstattes med FA ved økt FA/c .

De øvrige parameterne i modellen har relativt stor effekt på flytmotstanden, spesielt filler med høy spesifikt overflate areal (VSSA) og masseforhold (v/c og v/b).

5.3.1 SP vs. flytmotstand (λ_Q)

Figur 5-12 viser plot av hvordan endring i SP-dosering påvirker flytmotstanden med data fra Skares avhandling [1] (Tabell 4-8) og Figur 5-11. Kurver med navn «SP/c ...» er data fra Skares avhandling. Det er presentert to plot med to variasjonsområder for kurve SP/b, fra Figur 5-11, der «SP/b (1-1,5%)» har samme variasjonsområde som reseptene fra Skares avhandling. Dette viser at kurvene har tilnærmet lik form og stigning. «SP/b (0-2%)» derimot har et mye større variasjonsområde, og har derfor brattere stigningstall på bakgrunn av at den representerer større totalt endring i flytmotstand.



Figur 5-12 Sammenligning plot av SP vs. λ_Q

Kurvene er tilnærmet flate, og har liten effekt på flytmotstanden, uavhengig av resepter og hvilke bidragsfaktorer som er benyttet. Dette samsvarer med teorien om at SP i hovedsak påvirker flytskjærspenning, og ikke plastisk viskositet (flytmotstand).

6 DISKUSJON

I denne delen av rapporten diskuteres resultater og modeller presenter i rapporten. Det ses nærmere på blant annet hvilken betydning feilkilder har på resultatene fra laboratorieforskene, samt problematikk knyttet til kalibreringen av revidert proporsjoneringsverktøy.

6.1 Feilkilder laboratorieforsøk

Under gjennomføringen av masteravhandlingen ble det avdekket mulige feilkilder knyttet til resultatene fra laboratorieforskene gjort underveis i prosjektet. I denne delen av rapporten diskuteres de viktigste feilkildene og mulige grunner til hvorfor de har oppstått. Det ses også nærmere på feilkildenes betydning for resultatet fra laboratorieforskene. Menneskelig feil i forhold til beregninger, oppveining og registrering, er gjeldene for alle laboratorieforskene. Disse er ikke i hovedfokus videre i diskusjonen.

6.1.1 FlowCyl

Feilkildene i forbindelse med FlowCyl-forsøk er hovedsakelig knyttet til matriksproporsjonering, materialdata og tilsendte materialer.

Proporsjonerte matriksresepter kan ha noe feil fillerandel. Alle input-parametere i proporsjoneringsverktøy for FlowCyl er hentet fra «Er-verdier» (faktisk oppveide verdier) på fullskalarapportene, utenom fillerandel i sammensatt tilslag. Denne er antatt lik som de proporsjonerte reseptene. Faktisk fillerandel kan derfor avvike forskjellig mellom de ulike reseptene. Dette vil ha betydning for f/c i matriksreseptene, hvorav flytmotstanden også blir påvirket.

Hvorvidt tilsendte fraksjoner inneholder tilsvarende fillerinnhold er en annen mulig feilkilde. Eksempelvis vil fillerinnholdet for gjeldende fraksjoner være avhengig av hvor de er hentet fra (silotopp eller bunn). Det heller er ikke sikkert at gjeldene siktekurvene er ajourholdt. Ideelt sett skulle det vært gjort målinger på fraksjoner før de ble tilsendt. Det hadde sikret bedre kvalitet i utførte målinger.

Resultater for flytmotstand (λ_Q) fra M60 betongresepter, Betong Øst/Feiring Bruk, 1.1 (3200K1) og 1.5 (3200K5) er ikke gyldige. Segregeringen observert under forsøk gir trolig noe lavere flytmotstand enn reelt. Ved sammenligning av tilslagssammensetning brukt for M60, Velde og Feiring ser man tydelig forskjeller i fillerinnhold. På bakgrunn av dette, ligger trolig årsaken i resepten og ikke i gjennomføringene av FlowCyl-forsøk. En interessant observasjon er at resultatene fra betongblandinger og FlowCyl. viser at det ikke er noen direkte sammenheng mellom segregering av matriks og betong. Det er ikke gitt at segregert matriks gir segregert betong, og omvendt.

Sett bort i fra segregering i M60 resept, har trolig de øvrige feilkildene liten betydning på resultatene for flytmotstand.

6.1.2 NorBetong-metoden

Det kan knyttes stor usikkerhet til metoden for hulromsmålinger (NorBetong-metoden). Ved gjennomføring av hulromsmålinger ble det registrert flere usikkerhetsparametere, spesielt med tanke på utførelse og pakningsgraden av tilslag. Det tas stilling til flere mulige feilkilder:

- Utførelsessensitiv metode:
Resultater er utførelsesavhengig og kan variere avhengig av person som utfører dem.
Vanskelig å gjennomføre uten mye søl, og ikke komprimere tilslag.
- Usikkerhetsparametere:
Pakningsgrad, lab vs. betongblanding.

Under hulromsforsøkene ble det observert flere mulige feilkilder, da metoden baseres på mye manuelt arbeid. Resultatet kan derfor påvirkes forskjellig ved ulike gjennomføringer, i tillegg hvem som utfører forsøket. Pakningsgraden er en følsom faktor som kan påvirkes ved de ulike delene av forsøket, hvorav blandingen av tilslaget og fylling av «luftbøtten» har stor påvirkning. Under forsøket er det opp til operatøren å bestemme «riktig» mengde tilslag slik at glassplata ikke presser ned og komprimerer tilslaget. Dette vil påvirke pakningsgraden. For lite tilslag vil også gi feil resultatet ved høyt hulrom. I praksis er dette vanskelig å finne «riktig» mengde tilslag, og det kan knyttes usikkerhet til dette. Fjerning av luftbobler og etterfylling av vann ble også oppfattet som problematisk, da det førte til mye søl. Dette kan ha påvirket vektmålingene noe.

Som beskrevet i avsnitt 4.1.2, ble det valgt å neglisjere fillerandeler under 3 % i fraksjoner ved hulromsmålingene. Tilslagsresepter presentert i Tabell 4-2, vil dermed inneholde noe filler. Prosessen med utsikting av filler var tidkrevende og vanskelig. Det kan ikke garanteres at absolutt all filler ble siktet ut. Det kan derfor tenkes at noe filler ble inkludert i de gjeldene fraksjonene. Filler i tilslag vil forårsake noe lavere hulrom. Filler andel i de øvrige er ikke kontrollert, og det kan ikke garanteres at fillerinnholdet faktisk er under 3 %. Ideelt burde det ha blitt bestilt tilslag hvor filler har vært vasket ut.

Innledende teori forteller at tilslagets hulrom stor grad avhenger av brukt målemetode [26]. Det kan derfor knyttes usikkerhet til resultatene for hulromsmålingene. Dersom en annen metode hadde vært brukt, ville trolig resultatet blitt annerledes. Størst usikkerhet knyttes til pakningsgraden av tilslag. Det vanskelig å forutsi hvordan pakningsgraden faktisk er i en betongblanding.

Det er vanskelig å si hvor mye hulrommet har påvirket av overnevnte feilkilder. Flere forsøk burde vært gjennomført for å kontrollere resultatene. Eventuelt kjørt flere metoder for hulromsforsøk.

6.2 Resultater og kalibrering av proporsjoneringsverktøy

I dette avsnittet diskuteres resultatene fra proporsjoneringsverktøyet, før og etter kalibrering. Forskjellen sammenlignet med laboratorieforsøkene diskuteres. Beregningsmodulene for flytmotstand, hulrom og konsistensfunksjon diskuteres også.

Med bakgrunn i at proporsjoneringsverktøyet som er utviklet gjøres i forbindelse med MiKS-prosjektet, er kalibreringsgrunnlaget i oppgaven basert på 22 resepter. Flytmotstanden er målt kun for åtte resepter, på grunn av tilgjengelig tid i forbindelse med denne avhandlingen. Kalibreringsgrunnlaget er kun basert på disse målingene. Derfor anses grunnlaget for å være noe tynt. Flere målinger hadde sikret bedre kvalitet i kalibreringen.

6.2.1 Flytmotstand

Resultatene i avsnitt 5.2.1 viser at beregnet flytmotstand (modell) korrelerer dårlig med målt flytmotstand. Årsaker for dette kan være feil i beregningsmodulen og/eller feil ved formel [4-1]. Resultater av laboratorieforsøk anses å være reelle, basert på tidligere analyse. Feilkildene for laboratorieforsøkene har en betydning på målingene, men er sannsynligvis ikke utslagsgivende for feil i estimert flytmotstand, med unntak av segregerte matrikser.

Avvik i resultater kommer trolig av feil inputverdier brukt i formel [4-1]. Det knyttes usikkerhet til bidragsfaktoren benyttet for fillerbidragene (f/b), da de er antatt like som i Tabell 4-3, se avsnitt 4.2.6.1. Faktiske bidragsfaktorer for de aktuelle fillere er ukjente.

Med bakgrunn i resultatene i Tabell 5-2, tyder det på at fillerbidraget i formelen har liten påvirkning for flytmotstanden. Grunnen til dette er at formelen estimerer omtrent samme flytmotstand, for like resepter (betongkvalitet) med varierende matriksvolum (varierende fillerinnhold). I tillegg estimeres flytmotstanden for de samme betongkvalitetene, til omtrent samme verdi uavhengig av produsent (BØ/Velde). Flytmotstanden er altså lik, uavhengig av type tilslag og sammensetning. FlowCyl-resultatene derimot viser stor forskjell i flytmotstand mellom produsentene. Forskjellen mellom produsentene er hovedsakelig tilslaget, hvorav type og mengde filler er viktig. Alternativt kan dette også gi uttrykk for at masseforhold (v/b , v/c) har stor innvirkning på hva flytmotstanden blir. Dette med bakgrunn i at flytmotstanden kun endres ved endret masseforhold (M40/M60).

Når det gjelder egenskapene fillere har på flytmotstand, så er disse som nevnt antatt. Dette gjelder også spesifikt overflateareal (VSSA). VSSA er en målbar parameter som derfor burde vært undersøkt og målt i SediGraph. Dette kan anses som spesielt viktig når resultatene gir uttrykk for lite effekt av fillerbidrag.

Som nevnt i avsnitt 5.2.3 gir ikke resultatene for kalibreringen av flytmotstandmodulen noe klart svar på hva bidragsfaktorene j_1 , j_3 , j_4 bør være. Altså hvilke verdier for konstantene som kan benyttes til å estimere flytmotstanden for ulike resepter. Dette gir uttrykk for at feilen ligger et annet sted i formelen/input-parameterne. Alternativ kunne kalibreringen vært gjort ved å kjøre regresjonsanalyse på

alle bidragsfaktorene (k_x). Dersom dette hadde gitt gode resultater, kunne det uansett vært stilt stor usikkerhet til de nye konstantene, da de hadde vært fremstilt på et kalibreringsgrunnlag på åtte resepter. Dette gjelder også kalibreringen av j_1, j_3, j_4 konstantene, men her er det færre konstanter som endres. Under kalibreringen ble også de opprinnelige bidragsfaktorene fra Skares avhandling, Tabell 2-1, forsøkt benyttet. Resultatet er relativt likt som for de øvrige konstantene (formell [4-1], Tabell 4-3). Flytmotstandene er totalt sett lavere, men sammenhengen er den samme. Dette styrker hypotesen om at feilen ikke ligger i bidragsfaktorene, men et annet sted i formelen/input-parameterne. Som nevnt i avsnitt 4.2.1.1, er kalibreringsgrunnlaget for de opprinnelige bidragsfaktorene i formel [4-1] (j_x) antatt å være likt som bidragsfaktorene fra Skares avhandling. På bakgrunn av at bidragsfaktorene gir forskjellig resultat, kan det stilles spørsmål til om kalibreringsgrunnlaget er det samme. Dette burde vært undersøkt.

Det er knyttet usikkerhet til om implementeringen av flytmotstand er gjort riktig. Når det gjelder beregningsmodulen for flytmotstand, er den opprinnelig utarbeidet av Sverre Smeplass. Modulen har i forbindelse med denne avhandlingen blitt tilpasset, slik at den «henter» data fra proporsjoneringsverktøyet. Beregningene i modulen har blitt kontrollert flere ganger av undertegnede, uten å avdekke åpenbare feil og mangler. Dersom det hadde forligget beregninger man kunne sammenligne mellomregninger med, kunne det vært enklere å avdekke eventuelle feil. Detaljert gjennomgang av beregninger fra tredjepart, kunne også avdekket feil.

6.2.1.1 Parameterstudie, formel for flytmotstand

På bakgrunn av problematikken rundt estimering av flytmotstand, er det gjort en parameterstudie for formel [4-1]. Studien viser flere interessante observasjoner for parameterne innvirkning på flytmotstand.

Viktige observasjoner:

- For fullskalareseptene benyttes tre ulike SP-stoff (SX-23, SR-N, SX-N). Effekten og påvirkningen disse har på flytmotstand vil sannsynligvis være ulike. Kalibreringsgrunnlaget er basert kun på en type SP-stoff (SR-N), og er noe som kan gi feil i resultatene. Videre viser studien at økt SP-dosering reduserer flytmotstanden, men påvirkningen er liten. Dette stemmer godt med teorien, der SP i hovedsak påvirker flytskjærspenning. Formelen tar ikke høyde for effekten ulike typer SP-stoff har. Den sier heller ikke noe om mulig effekt på andre delmaterialer i matriksen, som filler og eventuelt andre delmaterialer (pozzolaner). Figur **2-6** (a) viser til at SP-dosering faktisk øker plastisk viskositet ved høy dosering. Dette motsier effekten parameterstudien viser til.
- Effekten silika har på flytmotstand er i likhet med de øvrige parameterne, representert ved en konstant. Konstanten skaper en lineær effekt på flytmotstand, uavhengig av dosering. Dette stemmer ikke overens med teori, se Figur **2-6** (a). Reelt, skulle bidragsfaktoren vært avhengig av doseringsmengde, eksempelvis ved flere betingelser eller ved en variabel, avhengig av doseringsmengde.

- Studien viser at filler har betydelig innvirkning for flytmotstand, spesielt ved høy VSSA. Filler påvirker flytmotstand på forskjellige måter. Fillerandel (f/b), $VSSA_{\text{matriks}}$ og v/p , som sammen med sine bidragsfaktorer er positivt avhengig av flytmotstand (økt mengde filler, fører til økt flytmotstand). Dette gir uttrykk for at små variasjoner i fillermengde vil kunne være merkbart på flytmotstand. Dette bekrefter at det er noe feil ved beregningsmodulen i proporsjoneringsverktøyet. Merk også at filler bidrar i volumet av tørrstoff (Φ), som sammen med sin bidragsfaktor er negativt avhengig av flytmotstand. Effekten av dette er relativt sett mindre enn de øvrige materialparameterne filler bidrar i.
- Det er usikkert hvordan de vilkårlig valgte materialparameterne som er utgangspunkt for parameterstudien, påvirker utfallet av studien. Det er valgt en sammensetning med lavt v/b -tall og silika, noe som gjør at flytmotstanden har relativt høy initialverdi. For å undersøke om dette hadde har påvirkning, burde flere studier med ulike utgangspunkt vært gjort. Eksempelvis hadde vært interessant å sett på om filler og spesifikt overflateareal har annen effekt på en matriks med høyere v/b -tall, da en slik sammensetning i utgangspunktet har med vann som dominerer flytmotstanden.

På bakgrunn av observasjonene kan det være nødvendig å revidere formelen, eller utvide kalibreringsgrunnlaget ytterligere.

Basert på tidligere analyse og diskusjon stilles det en viss usikkerhet til flytmotstand som en enkelt parameterkarakterisering av matriks i PMM. Svakheten ligger i flyteskjærspenning. Flytmotstand domineres av plastisk viskositet, som gjør at flytmotstanden ikke kan benyttes til å si noe om utbredelsen på en væske. Dersom flytmotstand hadde beskrevet begge Bingham-parameterne, kunne parameteren vært benyttet til å beskrive maksimal utbredelse for en matriksdominert betong (øvre asymptote, støpelighetsfunksjon). I stedet benyttes «kun» SP-dosering for å beskrive dette.

6.2.2 Hulrom

Den kalibrerte beregningsmodulen for hulrom gir akseptable verdier sammenlignet med laboratorieforsøkene. Men på bakgrunn av usikkerheten ved NorBetong-metoden og pakningsgraden i målt tilslag, kan det stille usikkerhet til om estimert hulrom faktisk representerer hulrommet i betongblandingene. Denne hypotesen gjenspeiles i sammenligningen av konsistenskurvene for støpelighetsfunksjonen og fullskalaforsøkene.

Beregningsmodulen for hulrom er en erfaringsbasert modell, som kun gjør korreksjoner basert på erfaring. Dette gjør at det kan knyttes usikkerhet til resultatene moduler viser til. For å kvalitetssikre en slik erfaringsbasert modell bør det foreligge et bedre kalibreringsgrunnlag, da modellen ikke støtter seg på teori og detaljerte kalkulasjoner. Grunnlaget som har vært benyttet i forbindelse med denne avhandlingen er noe tynt, da det kun består av fire målinger. Videre består grunnlaget at tilslagssammensetninger som er relativt like, der alle sammensetningene karakteriseres med samme

korreksjonsfaktorer i beregningsmodulen. Dette gjør at korreksjonsfaktorene ikke kan kalibreres. Videre arbeid bør ta for seg videre kalibreringen av beregningsmodulen, med flere resepter og med større variasjon, slik at korreksjonsfaktorene også kan kvalitetssikres og kalibreres. Eventuelle feil i hulrom målt ved laboratorieforsøk på grunn av høyere pakningsgrad kan ha påvirkning for kalibreringen. Dette er en sannsynlig feilkilde når det kommer til forskjellene i konsistenskurvene for støpelighetsfunksjonen og fullskala. Dette diskuteres nærmere i avsnitt neste delkapittel.

For å skape en grundigere estimat av hulrom bør korreksjonsfaktorene utvides med flere faktorer og mindre intervall. For eksempel burde klassifiseringen av kornform være på et mer detaljert grunnlag enn måten tilslaget er fremstilt på. Et mer detaljert korreksjonsgrunnlag vil ta høyde for små endringer/forskjeller i tilslag. Godt estimat av hulrom viser seg å være svært nødvendig, da støpelighetsfunksjonen i stor grad påvirkes av hulrom.

6.2.3 Støpelighetsfunksjonen

Resultatene før kalibrering viser til avvik i konsistenskurvene estimert ved støpelighetsfunksjonen og resultatene fra fullskalaforsøkene. Mye tyder på at avvikene kan komme som følgefeil av usikkerheten ved resultatene fra hulromsmålingene (NorBetong-metoden). Bakgrunnen for dette er at verdien for Offset, som endres i kalibreringen, blir veldig høy i flere av resultatene. Dette med utgangspunkt i teorien om at nødvendig overskuddsmatriks ikke trenger å være høyere enn 30-40 l/m³. Når det er sagt så er offset og filosofien om at nødvendig overskuddsmatriks avhenger av flytmotstanden, et godt utgangspunkt, basert på teori. En svakhet er at offset ikke tar høyde for teorien om at egenskapene i tilslaget også påvirker nødvendig overskuddsmatriks, nærmere bestemt flisighet og kornform, se Figur 2-6 (b). I den gamle parameteren Hm , hulromsmodul, er egenskapene i tilslaget inkludert ved finhetsmodulen, fm . Men finhetsmodulen forteller ingenting om kornform, bare fordelingen av partikler. Parameteren er derfor ikke nødvendigvis riktig for å beskrive tilslaget i forbindelse med overskuddsmatriks. En revidert parameter som beskriver kornform, eksempelvis flisighetsindeks, kunne vært et godt utgangspunkt for å forbedre offset. Kvaliteten ved offset, og evnen den har til å gi uttrykk for nødvendig overskuddsmatriks bør undersøkes nærmere. Dette for å bestemme nødvendigheten av en tilleggsparameter for kornform i tilslag. Som nevnt tidligere er kalibreringsgrunnlaget for hulromsberegningene noe tynt, som gjør det vanskelig å si noe om offset fungerer godt som uttrykk for nødvendig overskuddsmatriks. I sammenheng med dette, er det også vanskelig å si noe om grenseverdiene for offset (15-30 l/m³). Uansett, med bakgrunn i teori om at nødvendig overskuddsmatriks normalt sett ikke overstiger 30-40 l/m³, virker grenseverdiene realistiske.

I forbindelse med bruk av Mørtsells konsistensfunksjon, er formelen for stigningsforløpet (a) endret. Endringen innebærer at stigningsforholdet i funksjonen nå også avhenger av hulrom, nærmere bestemt hulrom + offset ($H+O$). Tidligere var det kun flytmotstanden som på virket dette. Under kalibreringen av støpelighetsfunksjonen ble det observert at endring i $H+O$, har liten effekt på stigningsforløpet sammenlignet med flytmotstanden. Når det gjelder konstanten ($-4/3$) i uttrykket for a , er denne forsøkt kalibrert i den hensikt å endre på stigningsforløpet under kurvetilpasningen. Nå som a avhenger av $H+O$,

kan feilen i stigningsforløpet være forårsaket av feil i $H+O$. Kalibreringsgrunnlaget er for dårlig til å foreslå ny verdi for konstanten.

Som nevnt tidligere domineres flytmotstanden i matriks av plastisk viskositet, og ikke av flytskjærspenning. Med bakgrunn i at SP i hovedsak påvirker flytskjærspenning, er det i forbindelse med støpelighetsfunksjonen valgt å benytte SP-dosering for å bestemme flytskjærspenningen i matriksen. I teorien, se Figur **2-6** (a), påvirker flere delmaterialer flytskjærspenningen. Denne effekten blir ikke tatt hensyn til da bare SP-dosering benyttes til å bestemme øvre asymptote (maksimal utbredelse) i konsistensfunksjonen. Videre så er grenseverdiene for SP-dosering basert på erfaringstall, og bør også kvalitetssikres i videre undersøkelser. Dette gjelder også antatt metningsgrad for SP. Resultatene fra fullskalaforsøkene gir ikke godt nok grunnlag til å si beregningene for øvre asymptote. Dette fordi resultatene ikke inneholder nok data til at kurven konvergerer mot den faktisk øvre asymptoten.

En svakhet med beregningsmodulen for flytmotstand er at fillermengden i matriksen beregnes basert antatt matriksvolum (340 l/m^3). Dette må gjøres fordi matriksvolumet er ukjent på dette tidspunktet. Et alternativ er å endre inputparameteren (synkutbredelse) som brukeren bestemmer innledningsvis i proporsjoneringsverktøyet. Dersom brukeren velger ønsket matriksvolum fremfor ønsket synkutbredelse, kan fillermengden i matriksproporsjoneringen beregnes på samme matriksvolum som resepten proporsjoneres med. Støpelighetsfunksjonen bruker ønsket matriksvolum til å beregne forventet synkutbredelse, altså motsatt fra opprinnelig oppsett. Da kan brukeren undersøke forskjellige matriksvolum, til støpelighetsfunksjonen viser til ønsket synkutbredelse. Denne prosessen er mer tungvint, men mer nøyaktig da fillermengden i matriksen blir korrekt.

6.3 Revidert proporsjoneringsverktøy

Basert på problematikken ved beregningsmodulen for flytmotstand, fungerer ikke proporsjoneringsverktøyet som det er tiltenkt. Verktøyet fungerer i den forstand at det proporsjonerer en betongresept med utgangspunkt i ønsket synkutbredelse. Men feilen i estimert flytmotstand gjør at resultatene ikke er brukbare, og at proporsjonert resept ikke gir riktig synkutbredelse. Forutsatt at ytterligere kalibreringer gjøres, vil verktøyet være velfungerende dersom feilen i beregningsmodulen for flytmotstand kartlegges og revideres. Verktøyet er et godt utgangspunkt for hvordan teorien bak et fremtidig velfungerende verktøy kan bygges opp.

Under arbeidet med kalibreringen ble det vurdert å utvide kalibreringsgrunnlaget ved å ta i bruk målinger fra SINTEF [26], [34]. Reseptene tilsvarer betongreseptene brukt i fullskalaforsøkene. Begrenset med tid gjorde at disse ble nedprioritert.

7 KONKLUSJON

Følgende konklusjoner kan trekkes ut ifra arbeidet med denne masteravhandlingen:

- Det knyttet usikkerhet til hulromsmålinger gjort med NorBetong-metoden, da metoden baseres på manuelt arbeid. Det er vanskelig å kontrollere pakningsgraden som gjør det vanskelig å fastslå om målt hulrom er korrekt i forhold til faktisk hulrom.
- Skares formel for flytmotstand tar ikke høyde for variable egenskaper avhengig av doseringsmengde. Dette gjelder hovedsakelig silikastøv og delvis SP.
- Bidragsfaktoren for SP ($k_{,4}$) tar kun høyde for hvordan sement påvirkes, og ikke hvordan andre delmaterialer (f.eks. filler) eventuelt påvirkes.
- SP har minimal påvirkning av flytmotstand i Skares formel. Flytmotstand reduseres med rundt 0,02 ved økt SP-dosering fra 0 til 2 %.
- Det reviderte proporsjoneringsverktøyet utviklet i avhandlingen er ikke ferdigstilt da det estimerer feil flytmotstand for matriks. Sett bort i fra dette er verktøyet potensielt velfungerende, dersom feilen avdekkes og verktøyet kalibreres på et større grunnlag.

8 VIDERE FORSKNING SARBEID

For å fullføre proporsjoneringsverktøyet og se nærmere på ubesvarte spørsmål, er følgende videre arbeid foreslått:

- Kontrollere beregningsmodulen for flytmotstand mot Skare beregninger, i den hensikt å prøve å lokalisere hvilke ledd i formelen som kan gi uttrykk for feil.
- Kontrollere fillerens bidrag på flytmotstand, i beregningsmodulen, nærmere.
- Gjøre en studie på bidragsfaktorer. Kontroller om faktorene for filler (f/b) er riktig, og gjennomføre målinger på spesifikt overflateareal (SediGraph).
- Gjennomføre en ytterligere parameterstudie på Skares formel med andre sammensetninger for å avdekke om dette vil påvirke effekten delmaterialene har.
- Utvide kalibreringsgrunlaget ytterligere, både med flere, og andre sammensetninger enn i MiKS-prosjektet. Målinger av flytmotstand og hulrom bør kontrolleres med flere gjennomføringer på samme resept, for å kvalitetssikre resultatene.
- Gjøre undersøkelser på offset, for å kartlegge om parameteren er et godt utgangspunkt for å bestemme nødvendig overskuddsmatriks.
- Gjennomføre forsøk på bestemmelsen av øvre asymptote i støpelighetsfunksjonen. Undersøke om SP-dosering alene kan bestemme dette.

9 REFERANSER

- [1] E. L. Skare, R. Cepuritis, E. Mørtsell, S. Smeplass, J. Spangenberg, S. Jacobsen. *Application of an Improved Empirical Model for Rheology Prediction of Cement Pastes Modified with Filler from Manufactured Sand*. Nordic Concrete Research, Vol. 65, 2021. <https://doi.org/10.2478/ncr-2021-0005>
- [2] E. Mørtsell. *Modellering av delmaterialenes betydning for betongens konsistens*. Ph.d, Department of Structural Engineering, NTNU, Trondheim, 1996.
- [3] A. Adamski, A. E. Grefstad. *Partikkel-matriks modellering av betongflyt ved bruk av konsistensfunksjon*. Prosjektoppgave, NTNU, 2021. (link vedlagt på dropbox, se avsnitt Informasjon om vedlegg)
- [4] A. K. Kvellheim, K. Bramslev. *Betong er en del av klimaløsningen*, SINTEF, 2020. [hentet 22. februar 2022]. <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/-betong-er-en-del-av-klimalosningen>
- [5] R. Cepuritis. *Development of Crushed Sand for Concrete Production with Microproportioning*. Ph.d, Department of Structural Engineering, NTNU, Trondheim, 2016. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2378870>.
- [6] S. Jacobsen, R. Cepuritis, E. L. Skare. *MiKS - Microproportioning with Crushed Sand*, NTNU, 2016 <https://www.ntnu.edu/kt/research/concrete/projects/miks>
- [7] S. Jacobsen, M. Maage, S. Smeplass, K. O. Kjellsen, E. J. Sellevold, J. Lindgård, R. Cepuritis, R. Myrdal, Ø. Bjørntegaard, M. Geiker m.fl. *Concrete Technology*. NTNU, Trondheim, 2016.
- [8] O. H Wallevik. *Den ferske betongens reologi og anvendelse på betong med og uten silikastøv*. Norges Tekniske Høgskole, NTH, Trondheim 1990.
- [9] G. H. Tattersall, P. F. G. Banfill, *The Rheology of Fresh concrete*. London: Pitman books, 1983.
- [10] M. Sihaklang. *Microproportioning modelling, with measurements of the maximum particle packing in filler-modified cement paste and the viscosity of paste fluid*. Master thesis, Department of Structural Engineering, NTNU, Trondheim, 2019. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2614925>.
- [11] R. Cepuritis, S. Jacobsen, J. Spangenberg. *The Particle-Matrix model: limitations and further improvements needed*. NTNU. <https://core.ac.uk/download/pdf/144130988.pdf>.
- [12] S. Smeplass, BE96-3942/R12 *Applicability of the particle-matrix model to LWCA*, Eurolight Conference, Brussel, 2000. <https://www.danskbetonforening.dk/media/ncr/publication-no-26-06.pdf>.
- [13] P. Bartos, M. Sonebi, A. Tamimi, *Workability and rheology of fresh concrete: compendium of tests*, Report of RILEM Technical Committee TC145 WSM, Workability of special Concrete Mixes.
- [14] NS-EN 206 – *Betong – Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar*, 2013.

- [15] O. H Wallevik, J. Wallevik. *Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes*. Cement and Concrete Research. Vol.41. 2011
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.009>.
- [16] H. J Yim, J. H Kim, S. P. Shah. *Cement particle flocculation and breakage monitoring under Couette flow*. Cement and Concrete Research Vol.53, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.018>.
- [17] NS-EN 934-2 Tilsetningsstoffer for betong, mørtel og injiseringsmasse - Del 2: Tilsetningsstoffer for betong - Definisjoner, krav, samsvar, merking og etikettering, 2013
- [18] J. H Mork. *Effekt av sementens forhold mellom gips og hemihydrate på den ferske betongens reologi*. P.hd. Norges Tekniske Høgskole, 1982.
- [19] R. Cepuritis, S. Jacobsen, S. Smepllass, E. Mørtzell, BJ. Wigum, and S. Ng. *Influence of Crushed Aggregate Fines with Micro-Proportioned Particle Size Distributions on Rheology of Cement Paste*. Cement and Concrete Composites, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.012>
- [20] Q. Meng, J. He, C. Cheng, and X. Zhu. *Effect of polycarboxylate superplasticizer on fluidity and rheology of cement slurry containing silica fume*. Web of Conferences 237, 2021
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123703008>
- [21] V. S. Adethya, D. S Ruban, R. Anuradha, S. Vinoth. *Effect of silica fume on rheology and mechanical property of self compacting concrete*, JCEIT, 2021.
<https://archive.org/details/jciet-07-01-001>
- [22] J. He, C. Cheng, X. Zhu and X. Li. *Effect of Silica Fume on the Rheological Properties of Cement Paste with Ultra-Low Water Binder Ratio*, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15020554>.
- [23] M. Mapa. H. Thiyagarajan, R. Kushwaha. *Investigation on the Rheological Behavior of Fly Ash Cement Composites at Paste and Concrete Level*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2018. <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0284-9>
- [24] NS-EN 933-1 - *Prøvningsmetoder for geometriske egenskaper for tilslag Del 1: Bestemmelse av kornstørrelsesfordeling Sikteanalyse*, april 2012.
- [25] J. Hu. *A study of effects of aggregate on concrete rheology*. Iowa State University, ISU, 2005.
<https://doi.org/10.31274/rtd-180813-15380>
- [26] T. A. M. Hammer, O. Skjølvold, R. cepuritis. *Rheology of mortars with manufactured sand*. SINTEF, 2020. [00967-Begrenset tilgang].
- [27] S. Smepllass. *Lecture, Proportioning*. TKT4215 Betongteknologi 1, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU (2021). [Hentet 04. juni 2022, Blackboard]
- [28] E. L. Skare, R. Cepuritis, J. Spangenberg, E. Ramenskiy, E. Mørtzell, S. Smepllass, S. Jacobsen. *Microproportioning paste with crushed aggregate filler by use of specific surface area*. NTNU, Trondheim, 2019. <https://doi.org/10.2478/ncr-2021-0005>.
- [29] L. Uthus, L. *Deformation Properties of Unbound Granular Aggregates*, Ph.d, Department of Civil and Transport Engineering, NTNU, 2007.

- [30] A. Yahia, S. Mantellato, R.J. Flatt. Concrete Rheology: *A basis for understanding chemical admixtures*. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. 2016.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00007-2>.
- [31] T. C. Powers. *The Properties of Fresh Concrete*. John Wiley & Sons, New York, 1968.
- [32] NS-EN 12620 – *Tilslag for betong*, 2002.
- [33] S. Smeplass, H. Mujica, S. Ng. *Design of a simple and cost-efficient mixer for matrix rheology testing*, Nordic Concrete Research - Publication No.51, Vodskov, 2014.
<https://app.cristin.no/results/show.jsf?id=1193062>.
- [34] T. A. M. Hammer, O. Skjølsvold, R. Cepuritis. Rheology of concrete with crushed aggregate. SINTEF, 2020.

Informasjon om vedlegg

Flere av vedleggene består av Microsoft Excel-filer. Sky-lagring via Dropbox er benyttet for enkelt legge disse ved rapporten. Alle filer er åpne for nedlastning.

De aktuelle vedleggene er samlet i mappen *TKT4950 Konstruksjonsteknikk, Masteroppgave - Adrian og Andreas*:

<https://www.dropbox.com/scl/fo/qxcw8s2ljuxw2zuset1rk/h?dl=0&rlkey=nn2f50an5t41qz9vat6jm6t0a>

Vedlegg A Proporsjoneringsverktøy

Filene for revidert proporsjoneringsverktøy ligger vedlagt som del I. Mappen inneholder «åpen» og «lukket» versjon av verktøyet. Tidligere versjon av verktøyet (av Sverre Smeplass) ligger vedlagt som del II. Merk at tilslag og data fra fullskalaforsøkene ikke er lagt inn i Del I. Filene må nedlastet ned for visning og redigering. Forhåndsvisning i Dropbox fungerer ikke.

Del I:

https://www.dropbox.com/sh/vcbstsomzn2yqcy/AAAim_F9Mnu97pw8FI6xa8Gaa?dl=0

Del II:

<https://www.dropbox.com/sh/ss6d2qtr2vxwk0i/AAC3xtZSMANMGB6XeQKLryCqa?dl=0>

Vedlegg B Brukermanual for revidert prop.verktøy

Dette er en brukermanual for revidert proporsjoneringsverktøy, og har i hensikt å være en prosedyre for hvordan verktøyet kan brukes, og hvordan eventuelle feil som kan oppstå. Verktøyet er satt sammen for å kunne proporsjonere betongresepter ut ifra de materialene som er valgt og ønsket konsistens i fersk tilstand.

I regneverktøyet finner man celler ulike farger. De gule cellene kan brukeren endre på ved å skrive inn ønsket verdi, mens noen av de hvite cellene kan endres ved hjelp av nedtrekksmenyer. De grønne cellene er celler som viser beregninger og skal ikke endres. Det kan også være celler utenfor tabellene (i det hvite område) som kan inneholde mellomregninger eller andre data. Det er derfor viktig at det ikke endres på celler i disse områdene. Med andre ord, det skal kun endres på de gule cellene.

Forberedelse

Det første man begynner med er å sjekke om alle de nødvendige materialene som skal brukes er lagt inn i verktøyet. Dersom de ikke ligger inne så må de legges inn. Det har ikke noe å si om det ligger inne flere materialer enn de som skal brukes, da vi kan velge hvilke av disse som skal brukes videre i proporsjoneringen.

Sjekk «Datatabell matriks».

Gå til «Datatabell matriks» og sjekk om ønsket sement, tilsetningsmaterialer, fillere eller tilsetningsstoff ligger inne. Dersom noe mangler må dette legges inn.

For å oppnå et mest mulig fullstendig resultat er det viktig at det legges inn verdier i alle kolonnene.

Merk: Filler som er inngår i tilslag/andre fraksjoner skal ikke legges inn her.

Sjekk tilslag.

Gå til «Sammensatt tilslag» og sjekk om ønsket tilslag ligger inne. Se kolonne «Navn» i tabellen under.

Fraksjon	Navn	Densitet [kg/m ³]	J ₃ [-]	VSSA [m ² /kg]	Abs. fukt [%]	Alk. reakt. Sv[%]	Klorider [%]	Andel		Bruk
								volum	vekt	
I	Årdal 0/8 mm nat. vask	2650	0,41	367	0,5			0,555	0,550	ok
II	Årdal 0/2 mm nat. vask	2650	0,41	367	0,5			0,000		
III	Årdal 8/16mm	2700	0,41	367	0,5			0,218	0,220	ok
IV	Årdal 16/22 mm	2700	0,41	367	0,5			0,228	0,230	ok
V								0,000		
VI								0,000		
VII								0,000		
VIII								0,000		
IX								0,000		
X								0,000		
Sammensatt		2672	0,41	367		0,0	0,00	1,000	1,000	

Legg til/endre tilslagsfraksjoner.

Dersom ønsket tilslag ikke ligger i tabellen, må dette legges inn. Regnearket aksepterer totalt 10 forskjellige fraksjoner. Dersom man ønsker å legge til eller endre på en fraksjon kan dette gjøres ved å gå til den aktuelle fraksjonen ved å velge fane «Fraksjon I – X». Her legges informasjon som navn og data for siktekurver inn (se bilde under).

Type:	Årdal 0/8 mm nat. vask.			
Dato:	21.11.2008			
FM =	3,26			

Åpning	Sikterest (g)		Sikterest (%)	Gjennomgang (%)
	1	2		
32	0	0	0,0	100,0
22,4	0	0	0,0	100,0
16	0	0	0,0	100,0
11,2	0	0	0,0	100,0
8	8,5	12,3	2,1	97,9
4	69	91,7	16,1	83,9
2	155,2	183,9	33,9	66,1
1	261,3	292,8	55,4	44,6
0,5	379,5	400,5	78,0	22,0
0,25	453,4	463,9	91,7	8,3
0,125	485,5	489,4	97,5	2,5
0,063	492,6	494,5	98,7	1,3
Bunn	500	500		

Merk: Kolonne 1 og 2 under «Sikterest (g)» representerer to forskjellige sikteanalyser. Verktøyet krever ikke at det gjøres to sikteanalyser, det fungerer også dersom kolonne 2 står tom.

Videre må det legges inn verdier for densitet, J₃, VSSA, fuktabsorpsjon, alkalie- og kloridinnhold i tabellen øverst på «Sammensatt tilslag» (merket i tabellen under).

Fraksjon	Navn	Densitet [kg/m ³]	J ₃ [-]	VSSA [m ² /kg]	Abs. fukt [%]	Alk. reakt. Sv[%]	Klorider [%]	Andel		Bruk
								volum	vekt	
I	Årdal 0/8 mm nat. vask	2650	0,41	367	0,5			0,555	0,550	ok
II	Årdal 0/2 mm nat. vask	2650	0,41	367	0,5			0,000		
III	Årdal 8/16mm	2700	0,41	367	0,5			0,218	0,220	ok
IV	Årdal 16/22 mm	2700	0,41	367	0,5			0,228	0,230	ok
V								0,000		
VI								0,000		
VII								0,000		
VIII								0,000		
IX								0,000		
X								0,000		
Sammensatt		2672	0,41	367		0,0	0,00	1,000	1,000	

Beregning

Når datagrunnlaget for materialene er klart, kan man begynne å bestemme hvordan sammensetningen av betongresepten.

Tilslagssammensetning

Gå til «Sammensatt tilslag» og bestem andelen av hver fraksjon. Her bestemmes vektandelen av hver fraksjon (se merking i tabellen under). Illustrasjonene under tabellen viser siktekurvene for hver fraksjon og den sammensatte siktekurven basert på tilslagssammensetningen som er valgt.

Eksempel: 0,55 tilsvarer 55 % andel av sammensatt tilslag.

Fraksjon	Navn	Densitet [kg/m ³]	J ₃ [-]	VSSA [m ² /kg]	Abs. fukt [%]	Alk. reakt. Sv[%]	Klorider [%]	Andel		Bruk
								volum	vekt	
I	Årdal 0/8 mm nat. vask	2650	0,41	367	0,5			0,555	0,550	ok
II	Årdal 0/2 mm nat. vask	2650	0,41	367	0,5			0,000		
III	Årdal 8/16mm	2700	0,41	367	0,5			0,218	0,220	ok
IV	Årdal 16/22 mm	2700	0,41	367	0,5			0,228	0,230	ok
V								0,000		
VI								0,000		
VII								0,000		
VIII								0,000		
IX								0,000		
X								0,000		
Sammensatt		2672	0,41	367		0,0	0,00	1,000	1,000	

Merk: Viktig at den summen blir 1. Dersom summen av andelene blir forskjellig fra 1 vil verdien bli rød og det blir feil i videre beregninger.

Huk av fraksjoner som skal brukes

I kolonne «Bruk» kan man velge hvilke fraksjoner som skal benyttes i den aktuelle tilslagssammensetningen. Dette gjøres ved å skrive «ok» eller velge «ok» fra nedtrekksmenyen i raden for de fraksjonene som er ønsket å bruke.

Merk: Husk å fjerne «ok» fra de fraksjonene som IKKE skal brukes.

Hulrom

Når tilslagssammensetning er valgt må beregningen av hulrom tilpasses.

Gå til «*Sammensatt tilslag*» og scroll ned til «*Hulrom*». Sjekk at verdiene i de gule cellene stemmer overens med tilslagssammensetningen som er valgt (se bilde under).

Hulrom	
Hulrom i Partikkelfase	Verdi
D_{max}	32 mm
Kornform av tilslag $8/D_{max}$ mm	Konknust (kantet)
Kornform av tilslag 0.125/8 mm	Naturlig (avrundet)
Gradering av 0.125/8 mm	Rett
Hulrom i 0.125/8 mm [%]	39,0
Hulrom i $8/D_{max}$ mm [%]	41,0
Steinandel ved min. hulrom i	50,0
Minimum hulrom i 0.125/ D_{max} [%]	29,5
0.125/8 mm andel [%]	65,8
$8/D_{max}$ mm andel [%]	34,2
Hulrom i 0.125/ D_{max} [%]	30,5

Matriks

Gå til fanen «*Matriks*». Her bestemmes sammensetningen av matriksen.

Start med initialparameterne. Her bestemmes masseforhold, ønsket synkutbredelse og antatt luftinnhold (se bilde under).

Initialparametre	Verdi
$m = v/(c+\Sigma kp)$	0,54
Ønsket synkutbredelse [mm]	355
Luftinnhold [%]	2,0 %

Videre bestemmes sementtype, eventuelle tilsetningsmaterialer, tilsetningsstoff og tilsatte fillere. Dette gjøres ved å velge ønsket materiale fra nedtrekksmenyene (se bilde under). Andelen av materialene bestemmes ved å skrive inn ønsket mengde i prosent i kolonnen ved siden av. Husk å legge inn riktig k-verdi dersom tilsetningsmaterialer benyttes.

Sementtype	Andel (% av C)
Norcem Standard FA	100,0 %
	0,0 %
Norcem Standard FA	0,0 %
Norcem Industrisement	
	Andel (vekt % av B)
	5,0 %
	0,0 %
	0,0 %
	0,0 %
	0,0 %
	0,0 %
Tilsatte fillere	Mengde (vekt % av B)
Velde Coarse	0,0 %
	0,0 %
	0,0 %
Fillere fra tilslag	Mengde (vol % av B)
Filler fra sammensatt tilslag	2,5 %
Tilsetningsstoff	Mengde (% av b)
Mapei Dynamon SR-N	0,7 %
	0,0 %
	0,0 %
	0,0 %

Merk: Dersom ønsket materiale ikke finnes i nedtrekksmenyene, er de ikke lagt inn i tabellene under fanen «Datatabell matriks». Se punkt 1.

Beregn

Trykk på «Beregn». Verktøyet proporsjonerer en resept basert på alle inputverdiene.

Cellen som viser «Oppnådd matriksvolum» skal bli grønn dersom programmet har klart å proporsjonere en betong med nødvendig matriksvolum.

Resept

Gå til fanen «Resept» for å se proporsjonert resept. Her bestemmes også mengden betong man ønsker.

Blandeskjema

Gå til fanen «Blandeskjema». Her legges eventuelt fuktinnhold i materialene inn (se bilde under).

Kolonne «Oppveid» viser nødvendig mengde (kg) av hvert materiale som er nødvendig for å blande betong etter proporsjonert resept, med ønsket volum, korrigert for fuktinnhold og absorpsjon i tilslaget.

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg	
Norcem Standard FA	346,5	346,522			346,522	
Norcem Industrisement	0,0	0,000			0,000	
	0,0	0,000			0,000	
Elkem microsilica	18,2	18,238	0,0	0,000	18,238	
Norcem FA	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Fritt vann	206,8	206,819		-39,396	167,423	176,095
Absorbert vann	8,7	8,672			8,672	
Årdal 0/8 mm nat. vask.	953,9	953,918	3,5	33,387	987,305	
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Årdal 8/16mm	381,6	381,567	0,5	1,908	383,475	
Årdal 16/22 mm	398,9	398,911	0,5	1,995	400,906	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Velde Coarse	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	

Analyse

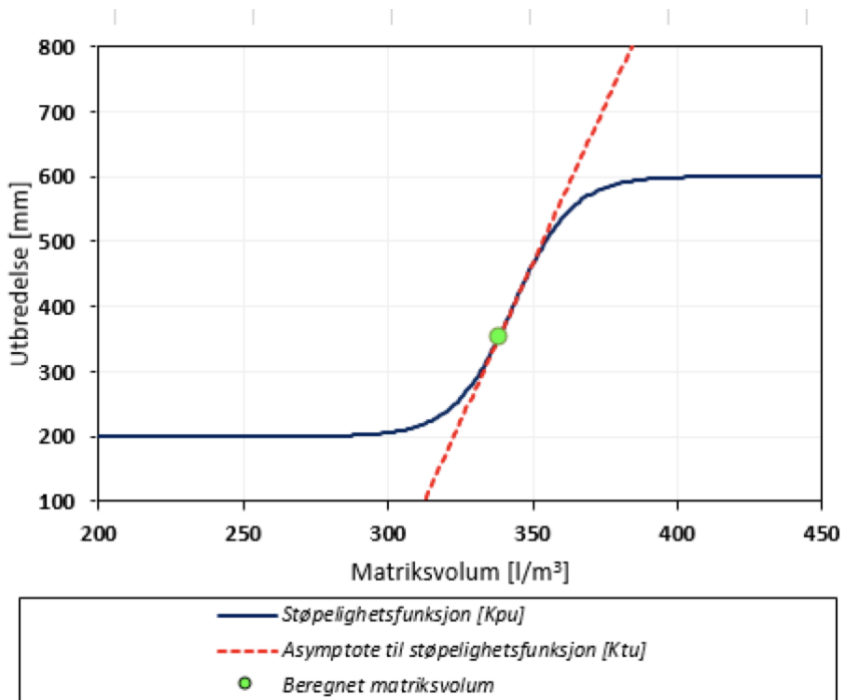
Flytmotstand

Under fanen «*Flytmotstand*» beregnes flytmotstanden i matriksen. Fanen inneholder mellomregninger for å beregne flytmotstanden av matriksen. Her kan man blant annet lese av hvilken λQ -verdi som flytmotstanden estimeres til. Husk å trykke på «*Beregn*»-knappen i «*Matrisk*»-fanen før eventuelle verdier leses av.

Når beregningen gjøres, er verktøyet satt til å proporsjonere en matrikssammensetning på nøyaktig 1 m^3 øverst i fanen «*Flytmotstand*». Dersom dette mislykkes, vil verdien vises med rød skrift.

Støpelighetsfunksjon

Under fanen «*Støpelighetsfunksjon*» skjer beregningen av nødvendig matriksvolum basert på ønsket synkutbredelse og betongsammensetning. Dette gjøres ved hjelp av en støpelighetsfunksjon, som viser teoretisk hvilke synkutbredelser som er mulig å oppnå med den betongsammensetningen som er valgt. Figuren viser også det punktet på kurven som gir nødvendig matriksvolum (beregnet matriksvolum). På den måten kan man se hvordan endring i ønsket synkutbredelse ender nødvendig matriksvolum for den bestemte betongsammensetningen.



Vedlegg C Brukermanual for gammelt prop.verktøy

SKANSKA

Notat

Utarbeidet av: Sverre Smeplass	Dato: 1. oktober 2018
Til: Brukere av regnearket "Proporsjonering"	Kopit til:

Bruk av regnearket "Proporsjonering, versjon 2018"

1 Bruksområde

Regnearket "Proporsjonering" er et regneverktøy til bruk ved proporsjonering av betong, blanding og korrigerende av betongresepter. Regnearket gir ingen retningslinjer for proporsjoneringen, og forutsetter at brukeren har betongteknologisk kompetanse.

Regnearket er volumorientert, og kan brukes sammen med partikkel-matriksmodellen eller andre modeller som karakteriserer betong som et to-fase materiale. Terminologi, notasjoner og definisjoner er ellers tilpasset reglene i NS-EN 206:2013+NA:2014.

2 Bruk av regnearket

Inndatacellene i regnearket har gul bakgrunnsfarge. Utdatacellene har grønn bakgrunnsfarge. Det er lagt skrivesperre på alle celler unntatt inndatacellene. Dette hindrer at beregningsceller overskrives utilsiktet. I delarket "Sammensatt tilslag" er det ikke benyttet skrivesperre på utdata- eller beregningsceller. Dette skyldes at tilleggsfunksjonen "Solver" ikke kan brukes i et delark med skrivesperre. "Solver" benyttes ved tilpasning av totalgraderingen til en referansekurve. I Office365 aktiveres Solver ved å søke «Add-ins» under «Tell me what you want to do» på hovedmenyen, og hake av for «Solver Add-in». Hak gjerne av de to rubrikkene for «Analysis ToolPak» også.

Overskriving av ikke sperrede beregningsceller vil føre til feil i beregningene. Dette markeres ved en feilmelding i cellen under resepttabellen i delarket "Resept". Feil i kolonnene for angivelse av volum- og vektandeler av hver tilslagsfraksjon i delarket «Sammensatt tilslag» angis også med rød skrift-farge i cellene som angir summen av andelene.

Skrivesperren kan oppheves for hvert enkelt delark ved å velge menypunktene <verktøy><beskyttelse><opphev arkbeskyttelse> og oppgi passordet <Sverre>. Den følgende beskrivelsen følger normal arbeidsgang ved proporsjonering.

3 Bindemiddelsammensetning

Bindemiddelsammensetningen spesifiseres i delarket "Matriks". Tilsetningsmaterialer type II, dvs. pozzolaner og hydrauliske tilsetningsmaterialer, angis i prosent av total bindemiddelmengde. Virkningsfaktor må spesifiseres.

Eventuelle fillere kan prinsipielt spesifiseres som tilsetningsmaterialer med virkningsfaktor 0. Det vil likevel normalt være mer rasjonelt å spesifisere fillere som tilslag. Fillervolumet regnes uansett med i matriksvolumet. Dersom silikastøv skal tilsettes i form av slurry, skal ønsket mengde likevel spesifiseres som tørrstoff. I resepten oppgis tørr vekt for silikastøv, våt vekt oppgis først etter fuktkorleksjoner i delarket "Blandeskjema".

Mengde og type tilsetningsstoffer spesifiseres i prosent av total bindemiddelmengde. I beregnet resept oppgis mengden tilsetningsstoff i våt vekt. Ved beregning av volum, densiteter og masseforhold regnes vanninnholdet i tilsetningsstoffet med i den fri vannmengden, bare tørrstoffet i tilsetningsstoffet bidrar spesifikt til masse og volum. Dette har også som konsekvens at summen av delmaterialenes masser ikke direkte tilsvare beregnet (proporsjonert) densitet. Densiteten til tilsetningsstoffer spesifiseres som våt densitet. Tørr densitet beregnes av regnearket med utgangspunkt i spesifisert våt densitet og tørrstoffinnhold.

Kloridinnhold og alkalieinnhold spesifiseres for alle komponenter i bindemidlet.

Betongens planlagte luftinnhold spesifiseres også i inndatatabelen for bindemiddelsammensetningen. Luft regnes ikke med i matriksvolumet. Fiber spesifiseres i prosent av betongvolumet.

4 Sammensetning av tilslag

Tilslagsfraksjonenes siktekurver legges inn i delarkene "Fraksjon I" til "Fraksjon X". Fraksjonenes densiteter spesifiseres i første kolonne i delarket "Sammensatt tilslag". Tilslagets vannabsorpsjon, kloridinnhold og andel reaktive bergarter spesifiseres for hver fraksjon i samme tabell.

Tilslaget settes sammen ved å velge vektandeler av de aktuelle fraksjonene i delarket "Sammensatt tilslag". Volumandelen av fraksjonene regnes ut automatisk fra vektandeler og fraksjonens densitet. Summen av vektandelene for alle fraksjoner skal være eksakt 1, og alle benyttede fraksjoner skal markeres med et <ok> i inndatakolonnen "Bruk". Dersom summen av vekt- eller volumandeler avviker fra 1 får disse celleverdiene rød skrift-farge. Tilslagssammensetningen vil da også gi volumfeil i ferdig resept. Summen av volumandelene kan avvike fra 1 selv om summen av vektandelene er lik 1 dersom det spesifiseres vektandel for en tilslagsfraksjon som ikke samtidig er markert med <ok>.

Sammensatt tilslagsgradering er plottet både på volum- og vektbasis. Gradering på volumbasis er regnet ut fra vektbasis ved hjelp av delfraksjonenes densiteter. De to graderingene er bare like dersom alle tilslagsfraksjoner har samme densitet. Ved sammenligning av ulike totalgraderinger bør generelt volumgraderingen benyttes. Graderingen til de fire første tilslagsfraksjonene er plottet sammen med sammensatt gradering på vektbasis.

Det er mulig å la regnearket tilpasse sammensetningen av tilslaget til en referansegradering som spesifiseres i inndatakolonnen "Ref. grad". Referansegraderingen er plottet sammen med den volumbaserte sammensatte graderingen. De fraksjonene som skal benyttes i tilpasningen markeres med et <ok> i inndatakolonnen "Bruk". Deretter aktiveres tilpasning makroen ved å trykke <Ctrl T>.

Tilpasningen er basert på minste kvadratsums prinsipp. Partikkelstørrelsene kan gis ulik vekt ved tilpasningen. Tilpasningen vil likevel ikke alltid gi den sammensatte graderingen som er best tilpasset referansegraderingen med hensyn til betongens støpelighetsegenskaper.

5 Valg av matriksvolum

Ønsket matriksvolum spesifiseres nederst i delarket "Matriks". I matriksvolumet inngår volumet sementlim og all filler (tilslagspartikler mindre enn 0,125 mm). Merk at betongens luftinnhold ikke inngår i matriksvolumet. Når ønsket matriksvolum er spesifisert tilpasses betongsammensetningen ved bruk av makroknappen <Beregn>.

Merk at «ønsket matriksvolum» er en inndatacelle (gul bakgrunn), mens «oppnådd matriksvolum» er en utdatacelle (grønn bakgrunn) i samme tabell. Når «ønsket matriksvolum» avviker fra «oppnådd matriksvolum», dvs. før makroen <Beregn> er kjørt, vil bakgrunnsfargen i <oppnådd matriksvolum> være rød. Dette vil også føre til at resepttabellene i delarket «Resept» blir blanke.

Når makroen «Beregn» er kjørt gir tabellen «Matriks» tallverdier for de mest aktuelle styringsparametrene for bindemiddelsammensetningen. Fillerens bidrag til matriksvolumet kan leses av som differansen mellom volum sementlim og volum matriks).

Ferdig resept kan leses i tabellen "Proporsjonert betong" i delarket "Resept". Kloridinnhold, alkalieinnhold og andel reaktive bergarter i betongen kan leses av i egen tabell.

6 Blandesats, fuktkorreksjoner

Volumet på den aktuelle blandesatsen spesifiseres i tabellen "Fersk betong" i delarket "Resept". Nominell resept og blandesats kan leses i kolonnene "Resept" og "Sats" i delarket "Blandeskjema". Alle materialer unntatt vann og tilsetningsstoffer er oppgitt med sine tørre mengder.

Fuktkorreksjoner gjøres ved å spesifisere målt fukt i tilslaget i kolonnen "Fukt" i delarket "Blandeskjema". Fuktbidraget fra tilslag og tilsetningsstoffer i blandesatsen kan leses i kolonnen "Korr." Merk at for tilsetningsmaterialer, fillere og

tilsetningsstoffer oppgis tørrstoffinnhold og fukt på våt basis, for tilslag oppgis fukt på tørr basis.

Fukt i tilslaget bestemmes normalt ved uttørring til ovnstørr tilstand. Tilslagets absorpsjonsverdi må da også spesifiseres. Tilhørende tilslagsdensitet skal være basert på ovnstørr tilstand. Dersom fukt i tilslaget er gitt på SSD-basis (mettet, overflatetørr) settes absorbert fukt lik 0. I så fall skal tilslagsdensitetene også angis som SSD-densitet.

Ferdig fuktkorrigert blandesats leses av i kolonnen "Oppveid" i delarket "Blandeskjema". Mengden fritt vann og absorbert vann i tilslaget skal summeres slik det er gjort i cellen til høyre for kolonnen "Oppveid". Dersom tilslagets fukt er spesifisert på SSD-basis, og absorpsjonen dermed er spesifisert lik 0, skal mengden absorbert vann i kolonnen "Oppveid" også være lik 0.

7 Endelig korrigert resept

Etter prøveblanding legges data for målt luftinnhold og densitet inn i tabellen for fersk betong i delarket "Resept". Reelt innveide mengder i blandesatsen legges inn i kolonnen "Oppnådd".

Nominell resept blir korrigert for avvik mellom planlagt og oppnådd materialsammensetning, luftinnhold og densitet. Korrigert resept kan leses av i kolonnen "Korrigert" i tabellen "Volumkorleksjon". Dersom innveid mengde tilsetningsstoff avviker fra proporsjonert mengde korrigeres masseforhold og mengde fritt vann automatisk. Korrigert effektivt vann/ bindemiddel- forhold leses av i tabellen "Fersk betong".

Korreksjonene er bare gyldige dersom det ikke gjøres endringer i inndata for tilslag eller bindemiddel etter at målt luftinnhold, målt densitet eller innveide mengder er spesifisert. Merk at det er ikke lagt inn sperrer for slike endringer.

Ved proporsjonering er det aktuelt å nullstille korleksjonstabellen, dvs. å anta fullt samsvar mellom proporsjonert og oppnådd resept. Dette gjøres ved å trykke <Ctrl+K>.

8 Kalkulasjon

Enhetsprisen for den proporsjonerte betongen kan kalkuleres i delarket "Kostnader". Kalkulasjonen er basert på dekningsbidragsmetoden. Enhetskostnader for alle delmaterialer må spesifiseres. Dekningsbidraget angis i prosent av råvarekostnad inkludert eventuelt svinn, pluss lønnskostnader.

Vedlegg D Forhåndsproporsjonerte betongresepter (fullskala)

Mappen inneholder alle forhåndsproporsjonerte betongresepter brukt som utgangspunkt i fullskalaforsøkene. Merk at ikke alle reseptene ble brukt under fullskalaforsøkene.

<https://www.dropbox.com/sh/finkb35pfq4pe9r/AAANrKOqlsNJE7YimEwwzdSda?dl=0>

Vedlegg E Revidert prop.verktøy, inkl. data fra fullskala

Linken under viser til mapper med resepter for Feiring Bruk/Betong Øst og Velde. Filene består av revidert proporsjoneringsverktøy (med kalibrert hulromsmodul) med data fra fullskalaforsøkene.

https://www.dropbox.com/sh/e8nyaznt2p5gtog/AADJbcH6Tx_ICrQVzqAj89FMa?dl=0

Vedlegg F Beregningsverktøy for FlowCyl-forsøk

Matriksresepter og flytmotstand-beregninger er vedlagt i følgende link:

https://www.dropbox.com/sh/0x50yfimcm8lcxa/AACDwW_e1JXFeYV78nLyDGBUa?dl=0

Vedlegg G Beregningsverktøy for hulromsforsøk

Tilslagsresepter og hulromsberegninger er vedlagt på følgende link:

<https://www.dropbox.com/sh/19n0vwy3p0ju8ie/AADbF1BTU3ZzggRnachWQ4WJa?dl=0>

Merk at oransje felt er inputverdier. Beregningsverktøyet er en revidert versjon av «skjema pakningsgrad tilslag, (SINTEF) som også er vedlagt i mappen.

Vedlegg H Prosedyre for FlowCyl-forsøk

Prosedyre for laboratorieforsøk på reologi i MiKS-prosjektet

1. Start datamaskinen som er koblet til FlowCyl: Trykk F1 ved feilmelding som dukker opp. Passord: Lab1min. Start opp Mettler og Excel-malen som finnes på skrivebordet.
2. Finn nødvendig utstyr til forsøkene på det lille rommet bak kontoret på K-lab (gul beholder med blått lokk, 3L-mål, blande-«visp», slikkepott, trakt), samt **oppladet** drill fra verksted.
3. Vei opp tørrstoff med en vekt med 0.1 grams nøyaktighet. Vei opp vann i den gule beholderen, og SP-stoff i en sprøyte.
4. Start miksing i henhold til tabellen under:

Miksing steg nr	Tidslinje		Action
	Totalt (Starttid)	Lengde	
	[min]	[min]	
Pre-mixing			
1	-3	2	Alt tørrstoff blandes i en standard Hobart mikser med “flat blade” ved fart nr 1 (Lav fart, 140 rpm)
2	-1	1	Vann og tilsetningsstoff blandes sammen i gul beholder ved en roterende bevegelse.
Wet mixing			
3	0	0.5	Tørrstoffet fylles over i den gule beholderen. Bruk trakt og slikkepott for å redusere søl.
4	2.5	2	Start miksing med “drill mixer” ved fart nr 2 (høy fart = 1850 rpm)
5	4.5	2	Hvile
6	6.5	2	Miks ved fart nr 1 (lav = 400 rpm).
7	8.5	1.5	Fyll pastaen over i en 3-liters plastikkbeholder.
8	12-15	-	Rheometer- og FlowCyl-testene utføres, etterfulgt av mini-slump testen.

5. Fyll pastaen i litermålet. **To personer må hjelpe til ved oppstart av FlowCyl:** En må holde for åpningen av FlowCyl mens den andre fyller FlowCyl-beholderen opp til streken rett under toppåpningen. → Nå kan den ene fortsette flowcyl-forsøket, mens den andre gjør reometerforsøket.

Før mini slump og flow cyl: Noter ned starttidspunkt for hver av forsøkene.

6. FlowCyl: Husk å tarere vekten før forsøket starter. Start målingen ved å trykke F3 når du er inne i Excel-arket. Vent med å ta vekk fingeren fra åpningen til du ser at forsøket har startet. Når det slutter å dryppe pasta fra FlowCyl-beholderen, stopper du forsøket ved å trykke F3 igjen. → «Lagre som» → Gi excel-dokumentet nytt navn (Ikke lagre endringene i malen). Rett etter FlowCyl-forsøket er ferdig gjenbrukes pastaen i mini slump-forsøket. Plasser mini slump-kjeglen midt på den hvite plastplaten. Fyll kjeglen opp til toppen, og løft kjeglen loddrett opp. Når pastaen har sluttet å bevege seg, måles diameteren i to retninger. Etter forsøkene vaskes alt utstyr grundig. Husk også å sjekke at det ikke har kommet betongsøl på boremaskinen.

Vedlegg I Prosedyre for testing av pakningsgrad – tilslag



Dokumentnavn	Prosedyre for testing av pakningsgrad tilslag	Utgave	2
Forfatter	Skjeggerud, Magnus Gade (Laksevåg) NOR	Gjelder f.o.m.	06.06.2018
Godkjenner	Skjeggerud, Magnus Gade (Laksevåg) NOR	Identitet	PD4694

Formål:

Pakningsgraden av tilslag vil direkte påvirke betongens behov for matriks. Matriksinnholdet i en betong skal være tilstrekkelig til å fylle hulrommet i tilslagssammensetningen samt gi et lite overskudd for å dytte tilslagskomene fra hverandre slik at massen som en helhet flyter.

Utstørliste:

- Luftbøtte, uten topp med manometer
- Stor bøtte, 10-20liter
- Tønne 50liter, med lokk
- Vekt, kapasitet opp til 25kg
- Gjennomsiktig plate, av glass/plast

Gjennomføring:

1. Luftbøttens tomvekt med glassplate og volum sjekkes og registreres.
2. Fukt i tilslagsfraksjonene måles.
3. Tilslagskombinasjonen veies opp og blandes i tønne.
 - a. Tønne fylles med oppveid tilslag (totalt typisk 15kg)
 - b. Sett på lokk
 - c. Rull/vend tønne til tilslaget er tilstrekkelig blandet
4. Fyll luftbøtten med tilslag og stryk lett av toppen slik at luftbøtten er helt full av ukompaktert tilslag

Kontrollera att utgåvan är giltig. Makulera dokumentet efter användandet.

Dokumentnamn	Utgave	Side
Prosedyre for testing av pakningsgrad tilslag	2	2 (2)

5. Luftbøtten med glassplate og tilslag veies og registreres
 6. Tøm ut tilslaget i den «store bøtten»
 7. Fyll litt vann (~0,5liter) i bunn av luftbøtten
 8. Fyll deretter noe av tilslaget fra den store bøtten forsiktig tilbake i luftbøtten
 9. Vann og tilslag fylles om hverandre frem til alt tilslaget er fyllt i bøtten og vannspeilet er på likt nivå med «tilslagsspeilet»
 10. Luftbøtten med glassplate, tilslag og vann veies og registreres
 11. Vann fylles videre til luftbøtten er helt full
 12. Stryk av toppen med glassplaten
 13. Luftbøtten med glassplaten, tilslag, vann og ekstra vann veies og registreres
- Registrering foregår i eget excel ark, Pakningsgrad tilslag.xlsx.

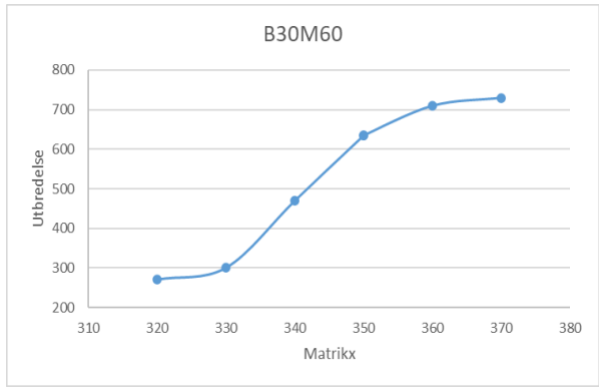
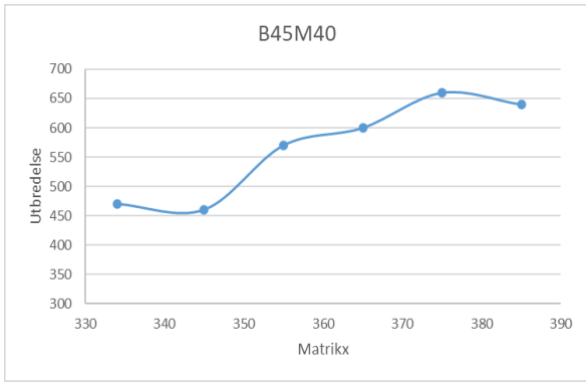
Kontrollera att utgåvan är giltig. Makulera dokumentet efter användandet.

Vedlegg J Rapport fullskalaforsøk Velde

Resultat, Miks, WP5, fullskalaforsøk hos velde 06-07.10.2021



Resept	Blanding	Betongtype	Matriks	Synk	Utbredelse	Temperatur	Blandet	Densitet	Fastheter	Dato	Notat
A22	2.1	B45M40	385	260	640	20.2	12:39	2375.0	3 x 100x100	06.10.2021	
A23	2.2	B45M40	375	260	660	19.5	10:27	2357.2	3 x 100x100	06.10.2021	
A24	2.3	B45M40	365	260	600	19.5	10:30	2361.1	3 x 100x100	06.10.2021	
A25	2.4	B45M40	355	245	570	20.5	11:07	2358.2	3 x 100x100	06.10.2021	
A26	2.5	B45M40	345	240	460	20.0	11:20	2355.8	3 x 100x100	06.10.2021	
A27	2.6	B45M40	335	230	470	20.5	11:33	2430.8	3 x 100x100	06.10.2021	
A12	1.1	B30M60	370	270	730	19.0	12:43	2350.3	3 x 100x100	06.10.2021	Separert
A13	1.2	B30M60	360	270	710	19.2	13:12	2348.5	3 x 100x100	06.10.2021	Nesten separert
A14	1.3	B30M60	350	265	635	19.7	13:26	2368.2	3 x 100x100	06.10.2021	
A14	1.3	B30M60	350	255	640	19.1	10:16	2364.3	3x 100x100	07.10.2021	Repetert fra dagen før
A15	1.4	B30M60	340	235	470	19.4	09:39	2327.0	3x 100x100	07.10.2021	
A16	1.5	B30M60	330	195	300	20.1	09:23	2395.6	3x 100x100	07.10.2021	
A17	1.6	B30M60	320	156	270	19.7	10:10	2379.6	3x 100x100	07.10.2021	







Laboratorieprotokoll

Produktjons-ID: 2021100620029
 Blandemester: bla
 Blandetidspunkt: 06.10.2021 11:21:45
 Tømmetid: 11:24:42
 Resept: A26
 Blander: B1
 Les nummer: 1,00
 Antall satse: 1
 Bestandighetsklasse: M40
 Satstørrelse: 1,00 m³
 Lastørrelse: 1,00 m³
 Ordrenummer:
 Følgeseddelnummer:
 Kunde: 1
 Pluss:
 Bil: best
 Bilregistreringsnummer:
 Er:
 VOT:
 Vann:
 Dens VOT:

Material	Enhet	Fukt	Resept	Bar	Er Alarm	Avvik		VOT		Vann		Dens VOT	
						%	%	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³
Norsm STD-FA	kg					1	0,3	394,8	394,8			0,0	3000
Silica 1	kg	17	17	17		0	0,0	16,9	16,9			0,0	2200
Aggregate 16-22	kg	(0,4)	-0,2	267	263	-4	-1,5	260,9	261,4	(1,0)	-0,5	2640	99,0
Aggregate 11-16	kg	(0,4)	-0,2	249	248	-1	-0,4	246,0	246,5	(1,0)	-0,5	2640	93,4
Aggregate 8-11	kg	(0,4)	-0,1	214	214	0	0,0	214,0	214,0	(0,9)	-0,2	2640	88,8
Aggregate 5-8	kg	(0,4)	-0,1	107	107	0	0,0	107,0	107,0	(0,4)	-0,1	2640	39,1
Aggregate 2-5	kg	(0,4)	-0,1	107	107	0	0,0	107,0	107,0	(0,4)	-0,1	2640	39,1
Aggregate 0,25-2	kg	(1,2)	0,0	837	837	0	0,0	837,0	837,0	(10,0)	0,0	2640	317,9
Dynamon sx-n	kg	81,5	6,50	6,50	6,48	-0,02	-0,3	6,4	1,2			5,2	1441
Cold water	kg	164	166	164		-2	-1,2	162,7	0,0			162,7	1000
Ekstra vann	ltr	0	0	0		0	0,0	0,0	0,0			0,0	1000
Total	kg		2365,4	2367,5	2388,5			2369,5	2203,0	13,7	166,5		818,2

Material	Enhet	Fukt	Resept	Bar	Er Enhet	Avvik		l/m³
						%	%	
VOT			816,1	824,7	ltr	8,7	1,1	818,2
Luft (1,5 %)		15,0	15,0	15,1	ltr	0,1	0,7	15,0
Tilsett vann		166,0	164,0	164,0	ltr	-2,0	-1,2	162,7
Total fukt		3,8	3,8	3,8	ltr	0,0	-0,6	3,8
Total		1001,0	1008,0	1008,0	ltr	7,0	0,7	999,7
Absorbert fukt		13,7	13,7	13,9	ltr	0,2	1,2	13,7
V/C		0,395	0,395	0,388		-0,007	-1,8	
Total vann/pulver tall		0,410	0,400	0,400		-0,010	-2,4	
Maks. vann		172	172	172	kg	0	0	
Vann/betong		7,2	7,0	7,0	%	-0,1	-2,1	
Total blandetid		45	45	100	sek	55	122,2	
Sluttblandetid		15	15	90	sek	75	500,0	
Temperatur		0,0	0,0	0,0	°C	0,0	0,0	
Wattmeter tomgang og sluttverdi		0	129					
Morfolinhold		666,00	667,00	668,00	ltr	1,00	0,1	
Fillerinhold		448,86	449,77	451,16	kg	1,40	0,3	

Alarm
 Objekt: Veiesystem : Tilslag 3
 Alarmsystem: Overvåking
 Alarm tekst: Alarmgrense overskredet [%]. Aktuell = 10,3 Krav grense = 3,0. Aggregate 8-11. T3
 Objekt: Blander : B1
 Alarmsystem: Overvåking
 Alarm tekst: Maks tid blanding klar

Utskrevet 06.10.2021 11:25:19 Veldre Betong AS 1/1

Produktjons-ID: 2021100620031
 Blandemester: bla
 Blandetidspunkt: 06.10.2021 11:33:52
 Tømmetid: 11:39:32
 Resept: A27
 Blander: B1
 Les nummer: 1,00
 Antall satse: 1
 Bestandighetsklasse: M40
 Satstørrelse: 1,00 m³
 Lastørrelse: 1,00 m³
 Ordrenummer:
 Følgeseddelnummer:
 Kunde: 1
 Pluss:
 Bil: best
 Bilregistreringsnummer:
 Er:
 VOT:
 Vann:
 Dens VOT:

Material	Enhet	Fukt	Resept	Bar	Er Alarm	Avvik		VOT		Vann		Dens VOT	
						%	%	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³
Norsm STD-FA	kg					1	0,3	394,8	394,8			0,0	3000
Silica 1	kg	16	16	16		0	0,0	15,9	15,9			0,0	2200
Aggregate 16-22	kg	(0,4)	-0,2	272	271	-1	-0,4	267,6	268,1	(1,1)	-0,5	2640	101,6
Aggregate 11-16	kg	(0,4)	-0,2	253	253	0	0,0	253,0	253,0	(1,0)	-0,5	2640	94,4
Aggregate 8-11	kg	(0,4)	-0,1	217	217	0	0,0	217,0	217,0	(0,9)	-0,2	2640	90,9
Aggregate 5-8	kg	(0,4)	-0,1	109	109	0	0,0	109,0	109,0	(0,4)	-0,1	2640	40,6
Aggregate 2-5	kg	(0,4)	-0,1	109	109	0	0,0	109,0	109,0	(0,4)	-0,1	2640	40,6
Aggregate 0,25-2	kg	(1,2)	0,0	851	851	0	0,0	851,0	851,0	(10,1)	0,0	2640	321,4
Dynamon sx-n	kg	81,5	6,28	6,28	6,26	-0,02	-0,3	6,2	1,1			5,1	1441
Cold water	kg	159	160	159		-1	-0,6	157,6	0,0			157,6	1000
Ekstra vann	ltr	0	0	0		0	0,0	0,0	0,0			0,0	1000
Total	kg		2373,7	2375,3	2398,3			2376,9	2215,7	13,9	161,2		823,6

Material	Enhet	Fukt	Resept	Bar	Er Enhet	Avvik		l/m³
						%	%	
VOT			821,9	831,1	ltr	9,1	1,1	823,6
Luft (1,5 %)		15,0	15,0	15,1	ltr	0,1	0,8	15,0
Tilsett vann		160,0	159,0	159,0	ltr	-1,0	-0,6	157,6
Total fukt		3,6	3,6	3,6	ltr	0,0	-0,9	3,6
Total		1001,0	1009,0	1009,0	ltr	8,0	0,8	999,8
Absorbert fukt		13,9	13,9	14,1	ltr	0,1	1,0	13,9
V/C		0,395	0,395	0,393		-0,002	-0,5	
Total vann/pulver tall		0,410	0,410	0,410		0,000	0,0	
Maks. vann		166	166	166	kg	0	0	
Vann/betong		6,9	6,8	6,8	%	-0,1	-1,6	
Total blandetid		45	45	254	sek	209	464,4	
Sluttblandetid		15	15	244	sek	229	444,4	
Temperatur		0,0	0,0	0,0	°C	0,0	0,0	
Wattmeter tomgang og sluttverdi		3	107					
Morfolinhold		661,00	661,00	662,00	ltr	1,00	0,2	
Fillerinhold		434,88	435,30	434,64	kg	-0,65	-0,2	

Alarm
 Objekt: Veiesystem : Tilslag 3
 Alarmsystem: Overvåking
 Alarm tilstand: Nullstill
 Alarm tekst: Alarmgrense overskredet [%]. Aktuell = 11,5 Krav grense = 3,0. Aggregate 8-11. T3
 Objekt: Blander : B1
 Alarmsystem: Overvåking
 Alarm tilstand: Nullstill
 Alarm tekst: Maks tid blanding klar

Utskrevet 06.10.2021 11:38:59 Veldre Betong AS 1/1

Laboratorieprotokoll

Produksjons-ID: 2021100720029

Blandetidspunkt: 07.10.2021 09:39:45

Resept: A15

Blander: B1

Les nummer: 1,00 Antall satse: 1

Bestandighetsklasse: M60

Ordrenummer: _____

Kunde: _____

Plass: _____

Bil: _____

Blandemester: bla

Tømmetid: 09:42:19

Sattstørrelse: 1,00 m³

Laststørrelse: 1,00 m³

Følgeseddelenummer: _____

Bilregistreringsnummer: _____

Material	Enhet	Fukt	Resept %	Bor	Er Alarm	Avvik	Er					
							VOT	Vann	Dens VOT			
						%	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³			
Norssem STD-FA	kg		315	315	316	1	0,2	315,7	315,7	0,0		
Aggregate 16-22	kg	(0,4)	-0,2	281	281	283	2	0,7	282,7	283,3	(1,1)	
Aggregate 11-16	kg	(0,4)	-0,2	225	225	223	-2	-0,9	222,8	223,2	(0,9)	
Aggregate 8-11	kg	(0,4)	-0,1	225	225	223	-2	-0,9	222,8	223,0	(0,9)	
Aggregate 5-8	kg	(0,4)	-0,1	94	94	95	1	1,1	94,9	95,0	(0,4)	
Aggregate 2-5	kg	(0,4)	-0,1	94	94	94	0	0,0	93,9	94,0	(0,4)	
Aggregate 0,25-2	kg	(2,0)	0,3	844	847	851	4	0,5	850,1	847,6	(10,1)	
Aggregate 0,063-0,25	kg	(2,0)	0,7	113	113	114	1	0,9	113,9	113,1	(2,2)	
Dynamon ss-n	kg		81,5	4,25	4,25	4,30	0,05	1,2	4,3	0,8	3,5	
Cold water	kg		166	164	162		-2	-1,2	161,8	0,0	161,8	
Ekstra vann	lتر		0	0	0		0	0,0	0,0	0,0	1000	
Total	kg		2460,4	2362,3	2365,3			2462,9	2195,7	15,9	167,2	
												817,6

	Resept	Bor	Er	Enhet	Avvik	%	Um³
VOT (1,5 %)				lتر	1,8	0,2	817,6
Luft (1,5 %)	15,0	15,0	15,0	lتر	0,0	0,0	15,0
Tilsett vann	164,0	162,0		lتر	-2,0	-1,2	161,8
Total fukt	5,3	5,4		lتر	0,1	1,1	5,4
Total	1001,0	1001,0		lتر	0,0	0,0	999,8

	Resept	Bor	Er	Enhet	Avvik	
Absorbent fukt	15,9	15,9	15,9	lتر	0,0	0,4
V/C	0,537	0,537	0,530		-0,007	-1,3
Total vann/pulver tall		0,540	0,530		-0,010	-1,9
Vann/betong	170	170		kg	0,0	0,0
Maks. vann		7,2	7,1	%	-0,1	-1,3
Total blandetid	45	45	57	sek.	12	26,7
Sluttblandetid	15	15	47	sek.	32	213,3
Temperatur	0,0	0,0	0,0	°C	0,0	0,0
Wattmeter tomgang og sluttverdi	0	143				
Martellinhold	673,00	674,00	674,00	lتر	0,00	0,0
Fillerinhold	374,76	375,02	376,35	kg	1,34	0,4

Objekt: Veisystem - Tilslag 3 Alarmtype: Overvåking Alarmtilstand: Nullstill

Alarm tekst: Alarngrense overskredet [%]. Aktuell = 7,0 Krav grense = 3,0. Aggregate 8-11. T3

Utskrevet: 07.10.2021 09:24:26 Velde Betong AS 1/1

Laboratorieprotokoll

Produksjons-ID: 2021100720028

Blandetidspunkt: 07.10.2021 09:23:31

Resept: A16

Blander: B1

Les nummer: 1,00 Antall satse: 1

Bestandighetsklasse: M60

Ordrenummer: _____

Kunde: _____

Plass: _____

Bil: _____

Blandemester: bla

Tømmetid: 09:25:36

Sattstørrelse: 1,00 m³

Laststørrelse: 1,00 m³

Følgeseddelenummer: _____

Bilregistreringsnummer: _____

Material	Enhet	Fukt	Resept %	Bor	Er Alarm	Avvik	Er					
							VOT	Vann	Dens VOT			
						%	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³			
Norssem STD-FA	kg		302	302	302	0	0,0	302,3	300,5	0,0		
Aggregate 16-22	kg	(0,4)	-0,2	286	285	282	-3	-1,1	280,6	281,2	(1,1)	
Aggregate 11-16	kg	(0,4)	-0,2	229	228	226	-2	-0,9	224,9	225,3	(0,9)	
Aggregate 8-11	kg	(0,4)	-0,1	229	228	244	16	7,0	242,8	243,0	(1,0)	
Aggregate 5-8	kg	(0,4)	-0,1	95	95	96	1	1,1	95,5	95,6	(0,4)	
Aggregate 2-5	kg	(0,4)	-0,1	95	95	95	0	0,0	94,5	94,6	(0,4)	
Aggregate 0,25-2	kg	(2,0)	0,3	837	860	863	3	0,3	858,7	856,2	(10,2)	
Aggregate 0,063-0,25	kg	(2,0)	0,7	114	115	116	1	0,9	115,4	114,6	(2,2)	
Dynamon ss-n	kg		81,5	4,08	4,08	4,09	0,01	0,2	4,1	0,8	3,3	
Cold water	kg		159	157	156		-1	-0,6	155,2	0,0	155,2	
Ekstra vann	lتر		0	0	0		0	0,0	0,0	0,0	1000	
Total	kg		2370,0	2369,1	2384,1			2372,2	2211,8	16,1	160,4	
												824,4

	Resept	Bor	Er	Enhet	Avvik	%	Um³
VOT (1,5 %)				lتر	6,1	0,7	824,4
Luft (1,5 %)	15,0	15,0	15,1	lتر	0,1	0,5	15,0
Tilsett vann	157,0	156,0		lتر	-1,0	-0,6	155,2
Total fukt	5,2	5,2		lتر	0,0	0,3	5,2
Total	1000,0	1005,0		lتر	5,0	0,5	999,8

	Resept	Bor	Er	Enhet	Avvik	
Absorbent fukt	16,1	16,1	16,2	lتر	0,1	0,6
V/C	0,537	0,537	0,534		-0,003	-0,6
Total vann/pulver tall		0,540	0,530		-0,010	-1,9
Maks. vann	163	163		kg	0,0	0,0
Vann/betong	6,8	6,8	6,8	%	-0,1	-1,2
Total blandetid	45	45	55	sek.	10	22,2
Sluttblandetid	15	15	45	sek.	30	200,0
Temperatur	0,0	0,0	0,0	°C	0,0	0,0
Wattmeter tomgang og sluttverdi	1	194				
Martellinhold	668,00	668,00	669,00	lتر	1,00	0,1
Fillerinhold	362,96	362,93	363,36	kg	0,43	0,1

Objekt: Veisystem - Tilslag 3 Alarmtype: Overvåking Alarmtilstand: Nullstill

Alarm tekst: Alarngrense overskredet [%]. Aktuell = 7,0 Krav grense = 3,0. Aggregate 8-11. T3

Utskrevet: 07.10.2021 09:24:26 Velde Betong AS 1/1

Laboratorieprotokoll

Produksjons-ID: 2021100720031

Blandetidspunkt: 07.10.2021 10:10:36

Resept: A17

Blander: B1

Les nummer: 1,00 Antall satse: 1

Bestandighetsklasse: M60

Ordrenummer: _____

Kunde: _____

Plass: _____

Bil: _____

Blandemester: bla

Tømmetid: 10:10:36

Sattstørrelse: 1,00 m³

Laststørrelse: 1,00 m³

Følgeseddelenummer: _____

Bilregistreringsnummer: _____

Material	Enhet	Fukt	Resept %	Bor	Er Alarm	Avvik	Er					
							VOT	Vann	Dens VOT			
						%	Kg/m³	Kg/m³	Kg/m³			
Norssem STD-FA	kg		289	289	295	6	2,1	0,0	0,0	0,0	3000	
Aggregate 16-22	kg	(0,4)	-0,2	290	290	288	-2	-0,7	0,0	(1,1)	0,0	
Aggregate 11-16	kg	(0,4)	-0,2	232	232	230	-2	-0,9	0,0	(0,9)	0,0	
Aggregate 8-11	kg	(0,4)	-0,1	232	232	246	14	6,0	0,0	(1,0)	0,0	
Aggregate 5-8	kg	(0,4)	-0,1	97	97	96	-1	-1,0	0,0	(0,4)	0,0	
Aggregate 2-5	kg	(0,4)	-0,1	97	97	96	-1	-1,0	0,0	(0,4)	0,0	
Aggregate 0,25-2	kg	(2,0)	0,3	870	873	873	0	0,0	0,0	(10,3)	0,0	
Aggregate 0,063-0,25	kg	(2,0)	0,7	116	117	119	2	1,7	0,0	(2,3)	0,0	
Dynamon ss-n	kg		81,5	3,91	3,91	3,93	0,02	0,5	0,0	0,0	1441	
Cold water	kg		152	150	148		-2	-1,3	0,0	0,0	1000	
Ekstra vann	lتر		0	0	0		0	0,0	0,0	0,0	1000	
Total	kg		2379,7	2380,9	2394,9			2394,9	2241,8	16,5	153,1	
												836,0

	Resept	Bor	Er	Enhet	Avvik	%	Um³
VOT (1,5 %)				lتر	5,8	0,7	836,0
Luft (1,5 %)	15,0	15,0	0,0	lتر	-15,0	-100,0	0,0
Tilsett vann	150,0	150,0		lتر	0,0	0,0	0,0
Total fukt	5,1	5,1		lتر	-5,1	-100,0	0,0
Total	1000,0	1000,0		lتر	-1000,0	-100,0	836,0

	Resept	Bor	Er	Enhet	Avvik	
Absorbent fukt	16,4	16,4	0,0	lتر	-16,4	-100,0
V/C	0,537	0,537	0,000		-0,537	-100,0
Total vann/pulver tall		0,540	0,000		-0,540	-100,0
Maks. vann	156	156		kg	0,0	0,0
Vann/betong	6,5	6,5	0,0	%	-6,5	-100,0
Total blandetid	45	45	0	sek.	-45	#####
Sluttblandetid	15	15	0	sek.	-15	#####
Wattmeter tomgang og sluttverdi	0	0				
Martellinhold	663,00	663,00	0,00	lتر	-663,00	-100,0
Fillerinhold	351,24	350,90	0,00	kg	-350,90	-100,0

Objekt: Veisystem - Tilslag 3 Alarmtype: Overvåking Alarmtilstand: Nullstill

Alarm tekst: Alarngrense overskredet [%]. Aktuell = 6,0 Krav grense = 3,0. Aggregate 8-11. T3

Utskrevet: 07.10.2021 10:07:18 Velde Betong AS 1/1

Vedlegg K Rapport fullskalaforsøk Feiring/Betong Øst

Prosjekt:	Test av 100% knust tilslag	Dato:	23.10.2021
Oppdragsgiver:	MIKS-prosjektet	Skrevet av:	Stefan Skjæret (etter innspill av deltakerne for prøveblandingene)
Sak:	100% knust tilslag i B30 M60 SKB og B45 M40 SKB		
Deltakere:	Ulf Rinden (BØ), Finn Dag Johnsen (BØ), Arne Hovden (Feiring) og Espen Rudberg (Feiring)		

Bakgrunn

Blandet 5 batcher med B30 M60 D22 SKB med ulikt matriksvolum, og 5 batcher med B45 M40 D22 SKB med varierende matriksvolum. Reseptene fremkommer nedenfor. Det var referanseresepsten som ble produsert først, og deretter løpende de med justert matriksvolum. Blandingsrekkefølgen var slik:

• 3200K3REF	(blanding 1.3 med 355l/m ³ matriks)
• 3200K2	(blanding 1.2 med 365l/m ³ matriks)
• 3200K1	(blanding 1.1 med 375l/m ³ matriks)
• 3200K4	(blanding 1.4 med 345l/m ³ matriks)
• 3200K5	(blanding 1.5 med 335l/m ³ matriks)
• 4700K3REF	(blanding 2.3 med 375l/m ³ matriks)
• 4700K2	(blanding 2.2 med 385l/m ³ matriks)
• 4700K1	(blanding 2.1 med 395l/m ³ matriks)
• 4700K6	(blanding 2.1 + 5 liter vann)
• 4700K5	(blanding 2.1 + 10 liter vann)

Det er tatt 2 terninger av alle blandningene, Alle prøver er registrert i Synergi og mange av fuktprøvene er lagret elektronisk i dagbok i Synergi. Alle blandningene hadde 180-182 sekunders blandetid, bortsett fra 3200K4 som fikk 19 sek ekstra. Ingen hard remiksing på bil, og det ble benyttet samme prosedyre for alle blandinger og uttak prøver.

Fuktinnholdet i tilslaget ble målt utallige ganger. Det ble sikkert tørket tilslag 45-50 ganger i løpet av dagen.

Har en del film på løft av synkkjegle, men store så har ikke lastet dem inn på arkiv.

B30 M60 D22 SKB

Blanding 3200K3REF (tilsvarende som 3200K):

Blandet 3 satser (lass) før vi fikk justert resepten ift synkutbredelse. Tok utgangspunkt i samme referanseresept som tidligere, men vi måtte redusere SP-dosering. Gikk ned fra 1% til 0,8%, og reduserte ytterligere til 0,7% SX-23 etter blanding av 3200K3REF. 0,7% SX-23 og 0,5% SR-N ble da gjeldene for resten av 3200K-blandingene. Hadde god kontroll på fuktinnhold tilslag.

Blanding av 3200K3REF

BETONG ØST		Navn 3200K3REF	
Beskrivelse B30 M60 D22 SKB		Reseptnummer	3200K3REF
		Versjon	5
		Fabrikk	Lorenskog
<hr/>			
Bindemiddel	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
STDFA	1	100	351,95
Totalt		100	351,95
Sement			352
Effektivt bindemiddel			352
<hr/>			
Tilsetningsstoff		Andel %	Mengde kg/m³
SR-N		0,5	1,76
SX-23		0,7	2,46
Totalt			4,22
<hr/>			
Tilslag		Andel %	Mengde kg/m³
0-2N		45	860,06
2-4		7	133,79
4-8		7	133,79
11-16L		19	366,97
16-22		22	398,27
Totalt		100	1892,87
<hr/>			
Effektivt vann	189 kg/m ³	Absorbert vann	8 kg/m ³
<hr/>			
Fasthetsklasse	B30	Luftandel	2.0 %
D_{max}	22 mm	Spesifisert luftinnhold	Ingen
Konsistens	650 mm		
Masseforhold	0,537	Klorider	0,086659 %
Densitet	2 443 kg/m ³	Alkalier	5 kg/m ³
<hr/>			
Eksponeringsklasser	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		

Bilde 1: Betongsammensetningen til 3200K3REF

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010660**
 Fabrikk **Lorenskog**
 Blander **BL1**

Ordrenr. 4213 Lass 2,0 m³ Produsert 23.10.2021, 11:42
 Lassnr. 4 Antall satser 1 Startet 11:36

Grunnresept **3200K3REF** **B30 M60 D22 SKB**
 Tilleggsresept

Kunde **112992** **FEIRING BRUK AS**
 Leveringssted 6 Prøveserie MIKS
 Bil 9002 / 9002

Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³			
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr	
4	0-2N	1 815	1 821	0,3	5,5	5,1	5,5	0,4	20,0	906,9	43,8	863,0
7	2-4	274	281	2,5	2,5	2,5	0,4	15,0	139,9	2,9	137,1	
6	4-8	271	263	-3,0	1,3	1,3	0,4	13,0	131,0	1,2	129,8	
1	11-16L	740	756	2,2	0,8	0,8	0,3	10,0	376,5	1,9	374,6	
2	16-22	802	801	-0,1	0,7	0,7	0,6	17,0	398,9	0,4	398,5	
1	STDFA	704	703	-0,1				10,0	350,1	0,0	350,1	
2	SR-N	3,52	3,53	0,3				20,0	1,8	1,4	0,3	
2	SX-23	4,93	5,00	1,5				20,0	2,5	1,9	0,6	
1	KV	141,1	143,0	1,4				4,0	71,2	71,2	0,0	
2	VV	128,1	129,0	0,7				71,0	64,2	64,2	0,0	
	Spedvann	-2,0	0,0	-100,0					0,0	0,0		
Totalt kg									4 883	4 906	0,4	
Totalt liter									1 960	1 968	0,4	
Totalt inkl luft									2 000	2 008	0,4	
Totalt									2 443	189	2 254	

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,537	100	180	20
Er	0,540	147	185	15

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkubred...	650	610	1	28			20/11	
Luftinnhold	2	0,9	2	28			20/11	
Temp	20	19,5						
Densitet	2443	2,481						
Masseforhold	0,537							
Sign								

1. ORNLIGE PRØVE KJØRT 0,510⁶
 ← OVER PA FUKT 0-2
 STABIL NOK MEN INGEN HØYDARE

Bilde 2: Lassrapport 3200K3REF



Bilde 3: SU 610mm for resept 3200K3REF

Resultat: Betongen kunne vært noe mer stabil. Litt dårlig med pastalim rundt grovt tilslag. SU var litt i overkant ift stabilitet, og vi justerte da alle 3200K-reseptene til 0,5% SR-N og 0,7% SX-23 slik at øvrige versjoner av resepten med høyere matriksvolum skulle gi ønsket effekt på SU uten å bli for ustabil. Følgeseddel: 136010660. God fuktkontroll, selv om det står en kommentar på lassrapport. Ø610 Luft 0,9% Temp 19,5.

Blanding 3200K2

BETONG ØST		Navn 3200K2	
Beskrivelse B30 M60 D22 SKB		Reseptnummer	3200K2
		Versjon	1
		Fabrikk	Lorenskog
Bindemiddel	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
STDFA	1	100	364,99
Totalt		100	364,99
Sement			365
Effektivt bindemiddel			365
Tilsetningsstoff		Andel %	Mengde kg/m³
SR-N		0,5	1,83
SX-23		0,7	2,56
Totalt			4,38
Tilslag		Andel %	Mengde kg/m³
0-2N		45	845,53
2-4		7	131,53
4-8		7	131,53
11-16L		19	360,77
16-22		22	391,54
Totalt		100	1860,88
Effektivt vann	196 kg/m ³	Absorbert vann	8 kg/m ³
Fasthetsklasse	B30	Luftandel	2.0 %
D_{max}	22 mm	Spesifisert luftinnhold	Ingen
Konsistens	650 mm		
Masseforhold	0,537	Klorider	0,086577 %
Densitet	2 431 kg/m ³	Alkalier	5,2 kg/m ³
Eksponeringsklasser	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		

Bilde 4: Betongsammensetningen til 3200K2

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010661**
 Fabrikk **Lorenskog**
 Blander **BL1**

Ordrenr. 4213 Lass 2,0 m³ Produsert 23.10.2021, 12:05
 Lassnr. 5 Antall satser 1 Startet 11:59

Grunnresept **3200K2** B30 M60 D22 SKB
 Tilleggsresept

Kunde **112992** FEIRING BRUK AS
 Leveringssted 6 Prøveserie MIKS
 Bil 9002 / 9002

Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³					
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr			
4	0-2N	1 784	1 799	0,8	5,5	5,5	0,4	20,0	899,1	43,5	855,6			
7	2-4	270	264	-2,1	2,5	2,5	0,4	15,0	131,9	2,7	129,2			
6	4-8	266	237	-11,1	1,3	1,3	0,4	13,0	118,4	1,1	117,4			
1	11-16L	727	735	1,1	0,8	0,8	0,3	10,0	367,3	1,8	365,5			
2	16-22	789	801	1,6	0,7	0,7	0,6	17,0	400,3	0,4	399,9			
1	STDFA	730	731	0,1				10,0	365,3	0,0	365,3			
2	SR-N	3,65	3,65	0,0				20,0	1,8	1,5	0,4			
2	SX-23	5,11	5,16	1,0				20,0	2,6	2,0	0,6			
1	KV	154,6	156,0	0,9				4,0	78,0	78,0	0,0			
2	VV	130,0	130,0	-0,0				70,0	65,0	65,0	0,0			
	Spedvann	0,0	1,0	0,0					0,5	0,5				
Totalt kg									4 859	4 863	0,1	2 430	196	2 234
Totalt liter									1 960	1 961	0,1	980		
Totalt inkl luft									2 000	2 001	0,1			

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,537	100	180	20
Er	0,537	106	182	16

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkutbred...	650	660	1	28			20/11	
Luftinnhold	2	0	2	28			20/11	
Temp	20	20,1						
Densitet	2430	2485						
Masseforhold	0,537							
Sign								

~~SKB~~ LITT LITE 4-8
 HELT GREI SKB

Bilde 5: Lassrapport 3200K2



Bilde 6: SU 660mm for resept 3200K2

Resultat:

Følgeseddel: 136010661 Full kontroll på fukt. Doserte ca 15kg for lite 4-8 i forhold til resept. SU 660mm. Luftinnhold 0,8%. Temperatur 20,1. Stabil og en OK SKB Betong

Blanding 3200K1

BETONG ØST		Navn 3200K1	
		Reseptnummer	3200K1
		Versjon	1
		Fabrikk	Lorenskog
Beskrivelse	B30 M60 D22 SKB		
Bindemiddel	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
STDFA	1	100	376,16
Totalt Sement		100	376,16
Effektivt bindemiddel			376
Tilsetningsstoff		Andel %	Mengde kg/m³
SR-N		0,5	1,88
SX-23		0,7	2,63
Totalt			4,51
Tilslag		Andel %	Mengde kg/m³
0-2N		45	833,07
2-4		7	129,59
4-8		7	129,59
11-16L		19	355,45
16-22		22	385,77
Totalt		100	1833,47
Effektivt vann	202 kg/m ³	Absorbent vann	8 kg/m ³
Fasthetsklasse	B30	Luftandel	2.0 %
D_{max}	22 mm	Spesifisert luftinnhold	Ingen
Konsistens	650 mm	Klorider	0,086664 %
Masseforhold	0,537	Alkalier	5,4 kg/m ³
Densitet	2 420 kg/m ³		
Eksponeringsklasser	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		

Bilde 7: Betongsammensetningen til 3200K1

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010662**
 Fabrikk **Lorenskog**
 Blander **BL1**

Ordrenr. 4213 Lass 2,0 m³ Produsert 23.10.2021, 12:27
 Lassnr. 6 Antall satser 1 Startet 12:21

Grunnresept **3200K1** B30 M60 D22 SKB

Tilleggsresept

Kunde **112992** FEIRING BRUK AS

Leveringssted 6 Prøveserie MIKS

Bil 9002 / 9002

Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³			
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr	
4	0-2N	1 758	1 773	0,9	5,5	5,1	5,5	0,4	20,0	885,2	42,8	842,4
7	2-4	266	263	-1,0	2,5	2,5	0,4	15,0	15,0	131,3	2,7	128,6
6	4-8	263	274	4,4	1,3	1,3	0,4	13,0	13,0	136,8	1,2	135,6
1	11-16L	717	721	0,6	0,8	0,8	0,3	10,0	10,0	360,0	1,8	358,2
2	16-22	777	761	-2,0	0,7	0,7	0,6	17,0	17,0	379,9	0,4	379,6
1	STDFA	752	751	-0,2				10,0	10,0	374,9	0,0	374,9
2	SR-N	3,76	3,71	-1,4				20,0	20,0	1,9	1,5	0,4
2	SX-23	5,27	5,34	1,4				20,0	20,0	2,7	2,1	0,6
1	KV	162,4	162,0	-0,3				4,0	4,0	80,9	80,9	0,0
2	VV	135,4	136,0	0,4				69,0	69,0	67,9	67,9	0,0
	Spedvann	0,0	1,0	0,0						0,5	0,5	
Totalt kg		4 839	4 851	0,3						2 421	202	2 219
Totalt liter		1 960	1 963	0,2						980		
Totalt inkl luft		2 000	2 003	0,2								

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,537	100	180	20
Er	0,538	94	182	16

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkutbred...	650	660	1	28			20/11	
Luftinnhold	2	5,94% v...	2	28			20/11	
Temp	20	20,3						
Densitet	2421	2436						
Masseforhold	0,537							
Sign								

LIT: TORRERE BYKK PLATE
 ELLERS GANSLVE LUK KJ
 Ø 660

Bilde 8: Lassrapport 3200K1



Bilde 9: SU 660mm for resept 3200K1

Resultat:

Følgeseddel: 136010662. Mulig vi manglet 2-3 liter vann på hele lasset. Mulig utbredelsesplata var litt tørrere enn ved prøving av K2. Gikk lettere i blanderen enn K2.

SU 660mm. Luft ble ikke målt. Temperatur 20,3. Ganske lik K2, men virker feitere. Fikk lite eller ingen økning i utbredelse enn K2.

Blanding 3200K4

BETONG ØST		Navn 3200K4	
Beskrivelse B30 M60 D22 SKB		Reseptnummer	3200K4
		Versjon	1
		Fabrikk	Lorenskog
Bindemiddel	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
STDFA	1	100	338,92
Totalt		100	338,92
Sement			339
Effektivt bindemiddel			339
Tilsetningsstoff		Andel %	Mengde kg/m³
SR-N		0,5	1,7
SX-23		0,7	2,37
Totalt			4,07
Tilslag		Andel %	Mengde kg/m³
0-2N		45	874,59
2-4		7	136,05
4-8		7	136,05
11-16L		19	373,17
16-22		22	405
Totalt		100	1924,85
Effektivt vann	182 kg/m ³	Absorbent vann	8 kg/m ³
Fasthetsklasse	B30	Luftandel	2.0 %
D_{max}	22 mm	Spesifisert luftinnhold	Ingen
Konsistens	650 mm		
Masseforhold	0,537	Klorider	0,086746 %
Densitet	2 455 kg/m ³	Alkalier	4,8 kg/m ³
Eksponeringsklasser	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		

Bilde 10: Betongsammensetningen til 3200K4

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010663**Fabrikk **Lorenskog**Blander **BL1**Ordrenr. 4213 Lass 2,0 m³ Produsert 23.10.2021, 12:53
Lassnr. 7 Antall satser 1 Startet 12:46Grunnresept **3200K4** B30 M60 D22 SKB

Tilleggsresept

Kunde **112992** FEIRING BRUK AS

Leveringssted 6 Prøveserie MIKS

Bil 9002 / 9002

Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³		
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr
4	0-2N	1 844	1 853	0,5	5,4	5,4	0,4	20,0	923,7	43,8	879,9
7	2-4	279	283	1,5	2,5	2,5	0,4	15,0	141,1	2,9	138,2
6	4-8	276	273	-0,9	1,3	1,3	0,4	13,0	136,1	1,2	134,9
1	11-16L	752	753	0,1	0,8	0,8	0,3	10,0	375,4	1,9	373,5
2	16-22	816	819	0,4	0,7	0,7	0,6	17,0	408,3	0,4	407,9
1	STDFA	678	676	-0,3				10,0	337,0	0,0	337,0
2	SX-23	4,74	4,76	0,3				20,0	2,4	1,8	0,5
2	SR-N	3,39	3,40	0,3				20,0	1,7	1,4	0,3
1	KV	126,9	128,0	0,9				4,0	63,8	63,8	0,0
2	VV	128,5	129,0	0,3				70,0	64,3	64,3	0,0
	Spedvann	-2,0	1,0	-150,0					0,5	0,5	
Totalt kg		4 908	4 923	0,3					2 455	182	2 273
Totalt liter		1 960	1 966	0,3					980		
Totalt inkl luft		2 000	2 006	0,3							

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,537	100	180	20
Er	0,540	177	199	16

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkutbred...	650	500	1	28			20/11	
Luftinnhold	2	1,5	2	28			20/11	
Temp	20	19,5						
Densitet	2455	2511						
Masseforhold	0,537							
Sign								

SYNK 240

LITT SEIG/TRÅ
Ø 500

Bilde 11: Lassrapport 3200K4



Bilde 12: SU 500mm for resept 3200K4

Resultat:

Følgeseddel: 136010663 viser at fukt og v/c er OK. Ingen feildoseringer. +19 sek over på blandetid. SU 500mm. Synk 240mm. Temperatur 19,5. Luftinnhold 1,5%. Betongen var seig og litt trå.

Blanding 3200K5

BETONG ØST		Navn 3200K5	
		Reseptnummer	3200K5
		Versjon	1
		Fabrikk	Lorenskog
Beskrivelse	B30 M60 D22 SKB		
Bindemiddel	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
STDFA	1	100	327,75
Totalt		100	327,75
Sement			328
Effektivt bindemiddel			328
Tilsetningsstoff		Andel %	Mengde kg/m³
SR-N		0,5	1,64
SX-23		0,7	2,29
Totalt			3,93
Tilslag		Andel %	Mengde kg/m³
0-2N		45	887,05
2-4		7	137,98
4-8		7	137,98
11-16L		19	378,49
16-22		22	410,76
Totalt		100	1952,27
Effektivt vann	176 kg/m ³	Absorbert vann	8 kg/m ³
Fasthetsklasse	B30	Luftandel	2.0 %
D_{max}	22 mm	Spesifisert luftinnhold	Ingen
Konsistens	650 mm		
Masseforhold	0,537	Klorider	0,086957 %
Densitet	2 465 kg/m ³	Alkalier	4,7 kg/m ³
Eksponeringsklasser	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		

Bilde 13: Betongsammensetningen til 3200K5

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010664**
 Fabrikk **Lorenskog**
 Blander **BL1**

Ordrenr. 4213 Lass 2,0 m³ Produsert 23.10.2021, 14:00
 Lassnr. 8 Antall satser 1 Startet 13:54

Grunnresept **3200K5** B30 M60 D22 SKB
 Tilleggsresept

Kunde **112992** FEIRING BRUK AS
 Leveringssted 6 Prøveserie MIKS

Bil 9002 / 9002

Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³					
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr			
4	0-2N	1 870	1 877	0,4	5,4	5,4	0,4	20,0	940,4	44,6	895,8			
7	2-4	283	280	-1,0	2,5	2,5	0,4	15,0	140,3	2,9	137,4			
6	4-8	280	284	1,6	1,3	1,3	0,4	13,0	142,3	1,3	141,0			
1	11-16L	763	758	-0,7	0,8	0,8	0,3	10,0	379,8	1,9	377,9			
2	16-22	827	825	-0,3	0,7	0,7	0,6	17,0	413,3	0,4	412,9			
1	STDFA	655	652	-0,5				10,0	326,7	0,0	326,7			
2	SR-N	3,28	3,23	-1,5				20,0	1,6	1,3	0,3			
2	SX-23	4,59	4,58	-0,2				20,0	2,3	1,8	0,5			
1	KV	121,0	120,0	-0,8				4,0	60,1	60,1	0,0			
2	VV	121,2	120,0	-1,0				69,0	60,1	60,1	0,0			
	Spedvann	2,0	1,0	-50,0					0,5	0,5				
Totalt kg									4 928	4 925	-0,1	2 467	175	2 292
Totalt liter									1 960	1 956	-0,2	980		
Totalt inkl luft									2 000	1 996	-0,2			

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,537	100	180	20
Er	0,535	328	182	16

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkutbred...	650	8350	1	28			20/11	
Luftinnhold	2	1,9	2	28			20/11	
Temp	20	20,4						
Densitet	2467	2,455						
Masseforhold	0,537							
Sign								

SYKK 210

TRÅ TRAPPE BETONG

Bilde 14: Lassrapport 3200K5



Bilde 15: SU 350mm for resept 3200K5

Resultat:

Følgeseddel 136010664 viser kontroll på fukt, v/c og doseringsnøyaktighet.

SU 350mm. Synk 210mm. Luftinnhold 1,9%. Temperatur 20,4. Seig som juling. Trappebetong.

B45 M40 D22 SKB

Resept 4700K4 ble ikke produsert da vi gjorde justering på vannbehovet etter blanding 4700K1 og 4700K2. Dette pga at disse blandingene som har mer matriksvolum enn de øvrige variantene 4700K4 og K5 ble stive, og ergo ønsket vi varianter med ytterligere forhøyet matriksvolum som kunne treffe bedre på SU og robusthet. Derfor avviker planen etter blanding av 4700K1. Etter blanding av 4700K1 justerte vi versjon 4700K6 med utgangspunkt i 4700K1 som vi da økte vanninnholdet med 5 liter. Deretter blandet vi 4700K5 som vi økte med 10 liter vann ift 4700K1.

Blanding av 4700K3REF

BETONG ØST		Navn 4700K3REF	
		Reseptnummer	4700K3REF
		Versjon	3
		Fabrikk	Lorenskog
Beskrivelse	B45 M40 D22 SKB		
Bindemiddel	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
SILIKA	1	4	18,02
STDFA	1	96	432,61
Totalt		100	450,63
Sement			433
Effektivt bindemiddel			451
Tilsetningsstoff		Andel %	Mengde kg/m³
SX-23		1	4,33
SR-N		0,95	4,11
Totalt			8,44
Tilslag		Andel %	Mengde kg/m³
0-2N		40	736,37
2-4		10	184,09
4-8		8	147,27
11-16L		18	334,87
16-22		24	418,48
Totalt		100	1821,08
Effektivt vann	178 kg/m ³	Absorbert vann	8 kg/m ³
Fasthetsklasse	B45	Luftandel	2.0 %
D_{max}	22 mm	Spesifisert luftinnhold	common.Some(2000 ...
Konsistens	650 mm		
Masseforhold	0,395	Klorider	0,087433 %
Densitet	2 459 kg/m ³	Alkalier	6,2 kg/m ³
Eksponeringsklasser	X0, XA1, XA2, XA3, XA4, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XF1, XS1, XS2, XS3		

Bilde 16: Betongsammensetningen til 4700K3REF

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010665**
 Fabrikk **Lorenskog**
 Blander **BL1**

Ordrenr. 4213 Lass 2,0 m³ Produsert 23.10.2021, 14:28
 Lassnr. 9 Antall satser 1 Startet 14:22

Grunnresept **4700K3REF** **B45 M40 D22 SKB**

Tilleggsresept

Kunde **112992** **FEIRING BRUK AS**

Leveringssted 6 Prøveserie MIKS

Bil 6333 / 6333

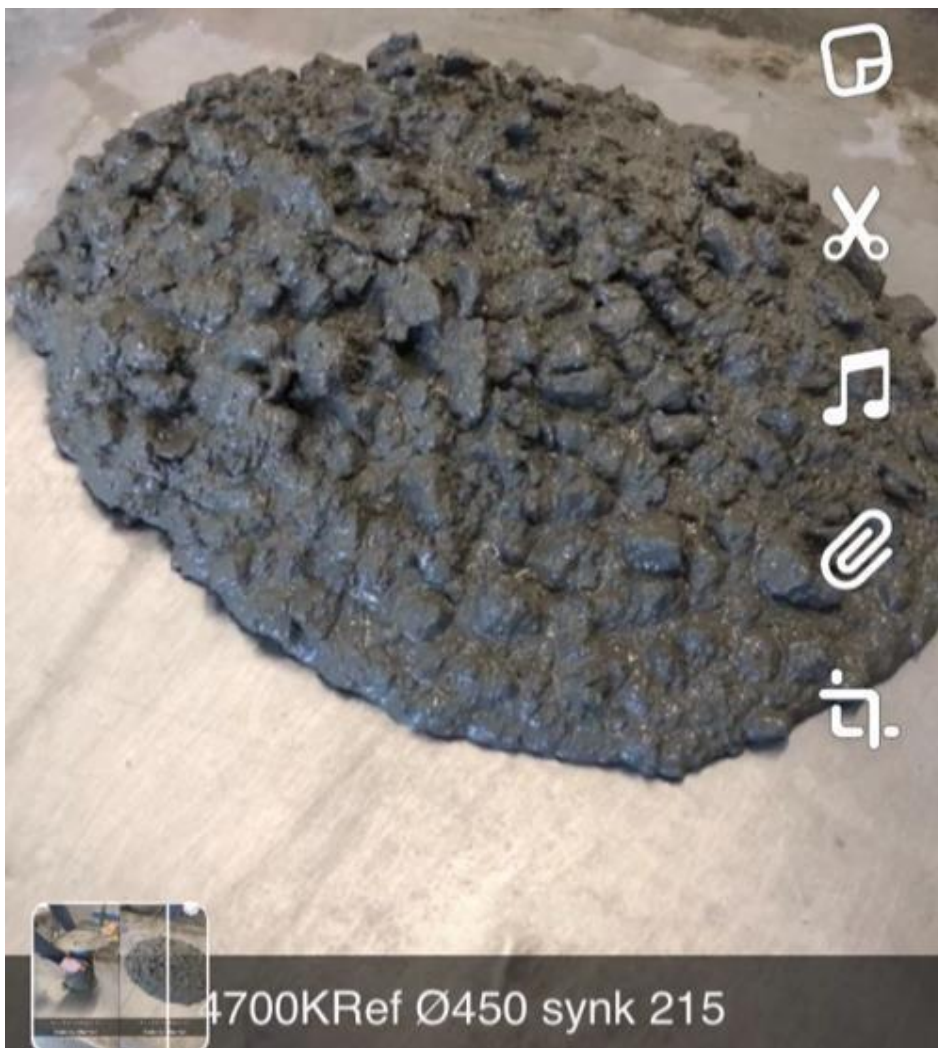
Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³		
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr
4	0-2N	1 552	1 526	-1,7	5,4	5,4	0,4	20,0	764,5	36,3	728,3
7	2-4	377	384	1,8	2,5	2,5	0,4	15,0	192,4	3,9	188,4
6	4-8	298	294	-1,5	1,3	1,3	0,4	13,0	147,3	1,3	146,0
1	11-16L	675	671	-0,6	0,8	0,8	0,3	10,0	336,2	1,7	334,5
2	16-22	843	860	2,0	0,7	0,7	0,6	17,0	430,9	0,4	430,4
2	SILIKA	36	36	-0,1				10,0	18,0	0,0	18,0
1	STDFA	865	863	-0,3				10,0	432,4	0,0	432,4
2	SR-N	8,22	8,22	0,0				20,0	4,1	3,3	0,8
2	SX-23	8,65	8,64	-0,1				20,0	4,3	3,3	1,0
1	KV	117,6	120,0	2,0				4,0	60,1	60,1	0,0
2	VV	134,9	135,0	0,1				69,0	67,6	67,6	0,0
	Spedvann	-1,0	1,0	-200,0						0,5	0,5
Totalt kg		4 917	4 907	-0,2					2 458	178	2 280
Totalt liter		1 960	1 956	-0,2					980		
Totalt inkl luft		2 000	1 996	-0,2							

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,395	100	180	20
Er	0,396	136	181	17

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkutbred...	650	450	1	28		28	20/11	
Luftinnhold	2	1,4	2	28			20/11	
Temp	20	21,2						
Densitet	2458	2511						
Masseforhold	0,395	0,397						
Sign								

⊕ SYNK 215 MANGLER LITT VANN
 UCFVLRD.

Bilde 17: Lassrapport 4700K3REF



Bilde 18: SU 450mm for resept 4700K3REF

Resultat:

Følgeseddel 136010665 har påskriften at vi trodde den manglet vann i betongen. Dette stemte imidlertid ikke da vi regnet ut v/c-forholdet. V/c bør: 0,395, v/c er: 0,39. Dosering OK. Burde nok muligens justert SP og kjørt denne en gang til, men det gjorde vi ikke. SU 450mm. Synk 215mm. Luftinnhold 1,4%. Temperatur 21,2.

Blanding av 4700K2

BETONG ØST		Navn 4700K2	
Beskrivelse B45 M40 D22 SKB		Reseptnummer 4700K2	Versjon 1
		Fabrikk Lorenskog	
Bindemiddel			
	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
SILIKA	1	4	18,63
STDFA	1	96	447,19
Totalt		100	465,82
Sement			447
Effektivt bindemiddel			466
Tilsetningsstoff			
	Andel %	Mengde kg/m³	
SX-23	1	4,47	
SR-N	0,95	4,25	
Totalt		8,72	
Tilslag			
	Andel %	Mengde kg/m³	
0-2N	40	723,66	
2-4	10	180,92	
4-8	8	144,73	
11-16L	18	329,09	
16-22	24	411,26	
Totalt		1789,66	
Effektivt vann		184 kg/m ³	Absorbert vann 8 kg/m ³
Fasthetsklasse B45		Luftandel 2.0 %	
D_{max} 22 mm		Spesifisert luftinnhold common.Some(2000 ...	
Konsistens 650 mm			
Masseforhold 0,395		Klorider 0,087372 %	
Densitet 2 449 kg/m ³		Alkalier 6,4 kg/m ³	
Eksponeringsklasser X0, XA1, XA2, XA3, XA4, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XF1, XS1, XS2, XS3			

Bilde 22: Betongsammensetningen til 4700K2

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010666**
 Fabrikk **Lorenskog**
 Blander **BL1**

Ordrenr. 4213 **Lass** 2,0 m³ **Produsert 23.10.2021, 14:58**
 Lassnr. 10 **Antall satser** 1 **Startet 14:52**

Grunnresept **4700K2** **B45 M40 D22 SKB**

Tilleggsresept

Kunde 112992 FEIRING BRUK AS

Leveringssted 6 **Prøveserie MIKS**

Bil 9002 / 9002

Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³		
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr
4	0-2N	1 521	1 491	-2,0	5,1	5,1	0,4	20,0	748,5	33,5	715,0
7	2-4	372	375	0,9	2,7	2,7	0,4	15,0	188,3	4,2	184,0
6	4-8	293	297	1,3	1,3	1,3	0,4	13,0	149,1	1,3	147,8
1	11-16L	663	664	0,1	0,8	0,8	0,3	10,0	333,3	1,7	331,7
2	16-22	828	811	-2,1	0,7	0,7	0,6	17,0	407,1	0,4	406,7
2	SILKA	37	40	7,3				10,0	20,1	0,0	20,1
1	STDFA	894	898	0,4				10,0	450,8	0,0	450,8
2	SR-N	8,50	8,40	-1,1				20,0	4,2	3,4	0,8
2	SX-23	8,94	8,93	-0,2				20,0	4,5	3,5	1,0
99	(Tillsatsmi...)		1,09 M						0,5	0,0	0,5
1	KV	138,1	139,0	0,7				4,0	69,8	69,8	0,0
2	VV	131,1	132,0	0,7				71,0	66,3	66,3	0,0
	Spedvann	4,0	4,0	0,0					2,0	2,0	

Overvektig for Tilsetningsstoff er akseptert av operatøren

Totalt kg	4 896	4 869	-0,5	2 445	186	2 259
Totalt liter	1 960	1 952	-0,4	980		
Totalt inkl luft	2 000	1 992	-0,4			

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,395	100	180	20
Er	0,395	108	180	18

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkutbred...	650	540						
Luftinnhold	2	1,6						
Temp	20	21,0						
Densitet	2445	2486						
Masseforhold	0,395							
Sign								

*FIN BETONG IKKE FOR
 → STENRIK*

Bilde 23: Lassrapport 4700K2



Bilde 24: SU 540mm for resept 4700K2

Resultat:

Følgeseddel 136010666 viser at v/c ok. Overdoserte 3 kg silika. Fin betong, ikke for steinrik. SU 540mm. Synk 245mm. Luftinnhold 1,6%. Temperatur 21,0.

Blanding av 4700K1

BETONG ØST		Navn 4700K1	
Beskrivelse B45 M40 D22 SKB		Reseptnummer 4700K1	
		Versjon 1	
		Fabrikk Lorenskog	
Bindemiddel			
	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
SILIKA	1	4	19,24
STDFA	1	96	461,77
Totalt		100	481,01
Sement			462
Effektivt bindemiddel			481
Tilsetningsstoff			
		Andel %	Mengde kg/m³
SX-23			1
SR-N			0,95
Totalt			9,01
Tilslag			
		Andel %	Mengde kg/m³
0-2N			40
2-4			10
4-8			8
11-16L			18
16-22			24
Totalt		100	1758,24
Effektivt vann		190 kg/m ³	Absorbert vann 8 kg/m ³
Fasthetsklasse		B45	Luftandel 2.0 %
D_{max}		22 mm	Spesifisert luftinnhold common.Some(2000 ...
Konsistens		650 mm	
Masseforhold		0,395	Klorider 0,087316 %
Densitet		2 439 kg/m ³	Alkalier 6,6 kg/m ³
Eksponeringsklasser		X0, XA1, XA2, XA3, XA4, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XF1, XS1, XS2, XS3	

Bilde 19: Betongsammensetningen til 4700K1

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010667**
 Fabrikk **Lorenskog**
 Blander **BL1**

Ordrenr. 4213 Lass 2,0 m³ Produsert 23.10.2021, 15:21
 Lassnr. 11 Antall satser 1 Startet 15:14

Grunnresept **4700K1** **B45 M40 D22 SKB**
 Tilleggsresept

Kunde **112992** **FEIRING BRUK AS**

Leveringssted 6 Prøveserie MIKS

Bill 9002 / 9002

Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³		
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr
4	0-2N	1 494	1 461	-2,2	5,1	5,1	0,4	20,0	731,2	32,7	698,5
7	2-4	365	369	1,1	2,7	2,7	0,4	15,0	184,7	4,1	180,5
6	4-8	288	301	4,5	1,3	1,3	0,4	13,0	150,7	1,3	149,3
1	11-16L	652	650	-0,3	0,8	0,8	0,3	10,0	325,3	1,6	323,7
2	16-22	814	814	0,0	0,7	0,7	0,6	17,0	407,4	0,4	407,0
2	SILIKA	38	41	6,5				10,0	20,5	0,0	20,5
1	STDFA	924	923	-0,1				10,0	462,0	0,0	462,0
2	SR-N	8,77	8,77	-0,1				20,0	4,4	3,5	0,9
2	SX-23	9,24	9,24	0,0				20,0	4,6	3,6	1,1
1	KV	145,7	146,0	0,2				4,0	73,1	73,1	0,0
2	VV	136,5	137,0	0,4				70,0	68,6	68,6	0,0
	Spedvann	3,0	5,0	66,7					2,5	2,5	

Overvektlig for Tilsetningsstoff er akseptert av operatøren

Totalt kg	4 875	4 865	-0,2						2 436	191	2 245
Totalt liter	1 960	1 958	-0,1						980		
Totalt inkl luft	2 000	1 998	-0,1								

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,395	100	180	20
Er	0,397	85	180	19

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkutbred...	650	580	1				20/11	
Luftinnhold	2	16	2				20/11	
Temp	20	21,2						
Densitet	2436	2489						
Masseforhold	0,395							
Sign								

MULIG PAR LITER FOR
 MYE VANN
 HELTOK, men SKYTER LITT FA??
 HELT O

Bilde 20: Lassrapport 4700K1



Bilde 21: SU 580mm for resept 4700K1

Resultat:

Følgeseddel 136010667 viser at v/c er OK. Doserte også 3 kg for mye silika. Helt ok betong, men begynner alt og skyte litt FA i trillbebår (blir noen svarte striper....).

SU 580mm. Luftinnhold 1,6%. Temperatur 21,2. Bra ift steinfordeling, men har for liten mobilitet.

Her ble valget tatt om å justere resten av reseptene. K6 og K5 kommer i uordnet rekkefølge. Brukte ikke regneark for denne omgjøringen. La bare på + 5 liter vann om gangen ift blanding 2.1, dvs ift resept 4700K1. Kunne nok sikkert lagt inn litt mer tenketid og/eller økt litt mer på matriksvolumet.

Blanding av 4700K6

BETONG ØST		Navn 4700K6	
Beskrivelse B45 M40 D22 SKB		Reseptnummer	4700K6
		Versjon	1
		Fabrikk	Lorenskog
Bindemiddel	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
SILIKA	1	4	19,75
STDFA	1	96	473,92
Totalt		100	493,67
Sement			474
Effektivt bindemiddel			494
Tilsetningsstoff		Andel %	Mengde kg/m³
SX-23		1	4,74
SR-N		0,95	4,5
Totalt			9,24
Tilslag		Andel %	Mengde kg/m³
0-2N		40	700,37
2-4		10	175,09
4-8		8	140,07
11-16L		18	318,49
16-22		24	398,03
Totalt		100	1732,05
Effektivt vann	195 kg/m ³	Absorbert vann	7 kg/m ³
Fasthetsklasse	B45	Luftandel	2,0 %
D_{max}	22 mm	Spesifisert luftinnhold	common.Some(2000 ...
Konsistens	650 mm	Klorider	0,087305 %
Masseforhold	0,395	Alkalier	6,8 kg/m ³
Densitet	2 430 kg/m ³		
Eksponeringsklasser	X0, XA1, XA2, XA3, XA4, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XF1, XS1, XS2, XS3		

Bilde 25: Betongsammensetningen til 4700K6

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010668**

Fabrikk **Lorenskog**

Blander **BL1**

Ordrenr. 4213 Lass 2,0 m³

Produsert 23.10.2021, 15:43

Lassnr. 12 Antall satser 1

Startet 15:37

Grunnresept **4700K6** **B45 M40 D22 SKB**

Tilleggsresept

Kunde **112992** **FEIRING BRUK AS**

Leveringssted 6 Prøveserie MIKS

Bil 9002 / 9002

Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³		
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr
4	0-2N	1 472	1 445	-1,9	5,1	5,1	0,4	20,0	722,9	32,3	690,5
7	2-4	360	394	9,6	2,7	2,7	0,4	15,0	197,1	4,4	192,7
6	4-8	284	284	0,1	1,3	1,3	0,4	13,0	142,1	1,3	140,8
1	11-16L	642	639	-0,5	0,8	0,8	0,3	10,0	319,7	1,6	318,1
2	16-22	802	796	-0,7	0,7	0,7	0,6	17,0	398,2	0,4	397,8
2	SILIKA	39	36	-8,9				10,0	18,0	0,0	18,0
1	STDFA	948	953	0,5				10,0	476,7	0,0	476,7
2	SR-N	9,00	9,00	-0,0				20,0	4,5	3,6	0,9
2	SX-23	9,48	9,49	0,1				20,0	4,7	3,7	1,1
1	KV	151,6	152,0	0,3				4,0	76,0	76,0	0,0
2	VV	141,5	142,0	0,4				69,0	71,0	71,0	0,0
	Spedvann	2,0	1,0	-50,0					0,5	0,5	

Overvektig for Tilsetningsstoff er akseptert av operatøren

Totalt kg	4 858	4 860	0,1	2 431	195	2 236
Totalt liter	1 960	1 959	-0,0	980		
Totalt inkl luft	2 000	1 999	-0,0			

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,395	100	180	20
Er	0,394	83	180	19

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkutbred...	650	605	1	28			20/11	
Luftinnhold	2	0,8	2	28			20/11	
Temp	20	23,2						
Densitet	2431	2494						
Masseforhold	0,395							
Sign								

LAGT OPP MED 195 L VANN
JUST RES MED VANN

FIL BETONG

Bilde 26: Lassrapport 4700K6




Bilde 27: SU 600mm for resept 4700K6

Resultat:

4700K6 (+5 liter ift resept 4700K1). Justert ift tenkt resept. Dette pga at 4700K1 og 4700K2 gav for lav SU, og da så vi ikke noe poeng i å blande varianter med enda lavere matriksvolum, men heller tenke «nye» varianter for 4700K6 og 4700K5 med økt matriksvolum.)

Følgeseddel 136010668 viser at v/c er OK, men doserte 17 kg for mye 2-4mm og 3 kg for lite silika. SU 605mm. Luftinnhold 0,8%. Temperatur 23,2. Fin betong, passe feit og mobil til å være B45.

Blanding 4700K5

		Navn 4700K5	
Beskrivelse B45 M40 D22 SKB		Reseptnummer 4700K5 Versjon 1 Fabrikk Lorenskog	
Bindemiddel	k_A	Andel %	Mengde kg/m³
SILIKA	1	4	20,25
STDFA	1	96	486,08
Totalt		100	506,33
Sement			486
Effektivt bindemiddel			506
Tilsetningsstoff		Andel %	Mengde kg/m³
SX-23		1	4,86
SR-N		0,95	4,62
Totalt			9,48
Tilslag		Andel %	Mengde kg/m³
0-2N		40	689,78
2-4		10	172,45
4-8		8	137,96
11-16L		18	313,68
16-22		24	392,01
Totalt		100	1705,87
Effektivt vann	200 kg/m ³	Absorbert vann	7 kg/m ³
Fasthetsklasse	B45	Luftandel	2.0 %
D_{max}	22 mm	Spesifisert luftinnhold	common.Some(2000 ...
Konsistens	650 mm	Klorider	0,087098 %
Masseforhold	0,395	Alkalier	7 kg/m ³
Densitet	2 422 kg/m ³		
Eksponeringsklasser	X0, XA1, XA2, XA3, XA4, XC1, XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XF1, XS1, XS2, XS3		

Bilde 28: Betongsammensetningen til 4700K5

BETONG ØST

Lassrapport

Følgeseddel **136010669**
 Fabrikk **Lorenskog**
 Blander **BL1**

Ordrenr. 4213 Lass 2,0 m³ Produsert 23.10.2021, 16:08
 Lassnr. 13 Antall satser 1 Startet 16:02

Grunnresept **4700K5** B45 M40 D22 SKB

Tilleggsresept

Kunde **112992** FEIRING BRUK AS

Leveringssted 6 Prøveserie MIKS

Bil 9002 / 9002

Silo	Material	Bør kg	Er kg	Diff %	Fukt bør %	Fukt er %	Abs %	Temp °C	kg/m ³		
									Totalt	Effektivt vann	Mengde flatetørr
4	0-2N	1 450	1 433	-1,2	5,1	5,1	0,4	22,0	717,2	32,1	685,1
7	2-4	354	347	-2,0	2,7	2,7	0,4	15,0	173,7	3,9	169,8
6	4-8	279	279	-0,2	1,3	1,3	0,4	13,0	139,6	1,2	138,4
1	11-16L	632	626	-1,0	0,8	0,8	0,3	10,0	313,3	1,6	311,8
2	16-22	790	808	2,3	0,7	0,7	0,6	17,0	404,4	0,4	404,0
2	SILIKA	41	38	-6,2				10,0	19,0	0,0	19,0
1	STDFA	972	976	0,4				10,0	488,5	0,0	488,5
2	SR-N	9,24	9,24	0,0				20,0	4,6	3,7	0,9
2	SX-23	9,72	9,71	-0,1				20,0	4,9	3,7	1,1
1	KV	167,6	166,0	-1,0				4,0	83,1	83,1	0,0
2	VV	136,3	136,0	-0,2				68,0	68,1	68,1	0,0
	Spedvann	5,0	6,0	20,0					3,0	3,0	

Overvektig for Tilsetningsstoff er akseptert av operatøren

Totalt kg	4 841	4 834	-0,2		2 420	201	2 219
Totalt liter	1 960	1 958	-0,1		980		
Totalt inkl luft	2 000	1 998	-0,1				

	Masseforhold	Konsistens	Blandingstid	Betongtemp
Bør	0,395	100	180	20
Er	0,396	93	180	19

	Bør	Er	Terning nr	Antall døgn	Densitet	Fasthet	Dato	Sign
Synkutbred...	650	685	1	28			20/11	
Luftinnhold	2	0,5	2	28			20/11	
Temp	20	21,5						
Densitet	2420	2507						
Masseforhold	0,395							
Sign								

ESSENTIelig FIN
 TÅLER IKKE MYE MER, SER
 FØLDES FIN OG GÅSKE LETT



Bilde 29: Lassrapport 4700K5



Bilde 30: SU 685mm for resept 4700K5

Resultat:

4700K5 (+10 liter vann ift resept 4700K1)

Følgeseddel 136010669 viser at v/c er OK, men det ble dosert 3kg silika for lite. Egentlig ganske fin SKB, ser og føles fin og lett ut. Tåler imidlertid ikke mye mer av SP mtp utbredelse. SU 685mm.

Luftinnhold 0,5%. Temperatur 21,5.

Vedlegg L Beregningsverktøy parameterstudie, flytmotstand

Linken under viser til fil med beregninger i forbindelse med parameterstudien i oppgaven:

<https://www.dropbox.com/sh/8fb01qydh5vcwuc/AABa3-78uGBX2y2AutNqrZdSa?dl=0>

