

**SINTEF Building and Infrastructure**

Sverre Smeplass (Skanska), Oliver Skjølvik (Skanska) og  
Hernan Mujica (Velde)

# Mikroproporsjonering med fillere fra Velde: Effekt av fillersammensetning på matriksens flytmotstand

COIN Project report 63 – 2015



SINTEF Building and Infrastructure

Sverre Smeplass (Skanska), Oliver Skjølsvik (Skanska) og Hernan Mujica (Velde)

# **Mikroproporsjonering med fillere fra Velde: Effekt av fillersammensetning på matriksens flytmotstand**

FA: Competitive constructions

SP 2.3 Production of high quality manufactured aggregate for concrete

COIN Project report 63 – 2015

COIN Project report no 63

Sverre Smeplass (Skanska), Oliver Skjølsvik (Skanska) og Hernan Mujica (Velde)

## **Mikroproporsjonering med fillere fra Velde: Effekt av fillersammensetning på matriksens flytmotstand**

FA: Competitive constructions

SP 2.3 Production of high quality manufactured aggregate for concrete

Keywords:

Materialteknologi, betong, støpelighet, filler, mikroproporsjonering

Project no.: 102000442-5

Photo, cover: «Pipes», iStock

ISSN 1891-1978 (online)

ISBN 978-82-536-1462-5 (pdf)

© Copyright SINTEF Building and Infrastructure 2015

The material in this publication is covered by the provisions of the Norwegian Copyright Act. Without any special agreement with SINTEF Building and Infrastructure, any copying and making available of the material is only allowed to the extent that this is permitted by law or allowed through an agreement with Kopinor, the Reproduction Rights Organisation for Norway. Any use contrary to legislation or an agreement may lead to a liability for damages and confiscation, and may be punished by fines or imprisonment.

Address: Forskningsveien 3 B  
POBox 124 Blindern  
N-0314 OSLO

Tel: +47 73 59 30 00

Fax: +47 22 69 94 38

[www.sintef.no/byggforsk](http://www.sintef.no/byggforsk)

[www.coinweb.no](http://www.coinweb.no)

### **Cooperation partners / Consortium Concrete Innovation Centre (COIN)**

#### **Kværner Engineering**

Contact: Jan-Diederik Advocaat

Email: [Jan-Diederik.Advocaat@kvaerner.com](mailto:Jan-Diederik.Advocaat@kvaerner.com)

Tel: +47 67595050

#### **Mapei AS**

Contact: Trond Hagerud

Email: [trond.hagerud@mapei.no](mailto:trond.hagerud@mapei.no)

Tel: +47 69972000

#### **Norwegian Public Roads Administration**

Contact: Kjersti K. Dunham

Email: [kjersti.kvalheim.dunham@vegvesen.no](mailto:kjersti.kvalheim.dunham@vegvesen.no)

Tel: +47 22073940

#### **Saint Gobain Weber**

Contact: Geir Norden

Email: [geir.norden@saint-gobain.com](mailto:geir.norden@saint-gobain.com)

Tel: +47 22887700

#### **SINTEF Building and Infrastructure**

Contact: Tor Arne Hammer

Email: [tor.hammer@sintef.no](mailto:tor.hammer@sintef.no)

Tel: +47 73596856

#### **Unicon AS**

Contact: Stein Tosterud

Email: [stto@unicon.no](mailto:stto@unicon.no)

Tel: +47 22309035

#### **Norcem AS**

Contact: Terje Rønning

Email: [terje.ronning@norcem.no](mailto:terje.ronning@norcem.no)

Tel: +47 35572000

#### **Skanska Norge AS**

Contact: Sverre Smeplass

Email: [sverre.smeplass@skanska.no](mailto:sverre.smeplass@skanska.no)

Tel: +47 40013660

#### **Veidekke Entreprenør ASA**

Contact: Christine Hauck

Email: [christine.hauck@veidekke.no](mailto:christine.hauck@veidekke.no)

Tel: +47 21055000

#### **NTNU**

Contact: Terje Kanstad

Email: [terje.kanstad@ntnu.no](mailto:terje.kanstad@ntnu.no)

Tel: +47 73594700

SINTEF Building and Infrastructure

Sverre Smeplass (Skanska), Oliver Skjølsvik (Skanska) og Hernan Mujica (Velde)

# **Mikroproporsjonering med fillere fra Velde: Effekt av fillersammensetning på matriksens flytmotstand**

FA: Competitive constructions

SP 2.3 Production of high quality manufactured aggregate for concrete

COIN Project report 63 – 2015

## 1 Innledning

Nedknusing av berg til betongtilslag har tradisjonelt gitt et overskudd av fine partikler, uansett om produksjonen er rettet inn mot grovt tilslag alene, eller mot maskinsand. Dersom knuseprosessen også omfatter bruk av såkalt kubisering ved hjelp av Vertical Shaft Impact (VSI)-knuser /1/ øker normalt finstoffoverskuddet. Kubisering er ofte ønskelig fordi det gir mer gunstig kornform både hos grovt og fint tilslag.

Det er vanskelig å nyttiggjøre seg dette finstoffet i betongproduksjonen, fordi et høyt finstoffinnhold i betongen gir økt viskositet og dermed redusert støpelighet. Dette må kompenseres med økt sementinnhold, vanninnhold og utvidet bruk av plastiserende tilsetningsstoffer. Disse tiltakene gir økte kostnader og tekniske ulemper som økt svinnpotensiale, og økt herdetemperatur.

Tilslags-, betong og asfaltprodusenten Velde AS i Sandnes har i alt 8 tilslagsfraksjoner tilgjengelig for betongproduksjonen, alle knust fra samme bergforekomst. De 3 fineste fraksjonene er sortert/ siktet ved hjelp av vindsikt. Dette gir mulighet til å styre tilslagsgraderingen for hver enkelt betongresept helt ned på fillernivå.

## 2 Hensikt

Hensikten med det arbeidet som er rapportert her har vært å undersøke om det er mulig å styre betongens støpelighet ved detaljert tilpasning av finstoffgraderingen og finstoffmengden. Dette vil i så fall gi et stort potensiale for produkttilpasning og produktutvikling på betongstasjoner som har tilgang til et utvalg fraksjoner av knust tilslag, og med to eller flere fraksjoner i fillerområdet.

Undersøkelsen er gjort på betongens matriksfase, slik denne er definert i Partikkel-Matriksmodellen /2,3/. Matriksen flytmotstand er målt ved hjelp av FlowCyl. Flytmotstanden er i første rekke et uttrykk for matriksmaterialets viskositet, men er også til en viss grad påvirket av flyteskjærspenningen. Ernst Mørtsell viste i sin dr.ing. avhandling /2/ at betongens støpelighet kan modelleres entydig ved hjelp av den målte flytmotstand i matriksen, totalt matriksvolum, tilslagets siktekurve og hulromsvolum.

Forsøkene er gjort i laboratoriet ved Veldes betongfabrikk i Sandnes.

Parallellt med disse forsøkene har SINTEF Byggforsk gjort supplerende og sammenlignende forsøk med FlowCyl og et Physica MCR 300 parallell-plate reometer på et begrenset utvalg matrikser basert på de samme fillermaterialene som er prøvd hos Velde. Disse resultatene rapporteres separat.

### 3 Forsøksprogram og materialer

#### 3.1 Basisfillere

Det er tatt ut tre forskjellige fillerfraksjoner fra Veldes knuse- og sorteringsanlegg i Sandnes. Sorteringsanlegget er basert på vindsikting. Dette betyr at graderingene i utgangspunktet ikke har klare nedre og øvre korngrenser, og at det derfor er betydelig overlapp i kornstørrelser mellom fraksjonene. Velde oppnår ønsket totalgradering og optimal massebalanse ved å kombinere et utvalg på i alt 8 tilslagsfraksjoner i sin betongproduksjon. 3- 4 av disse fraksjonene bidrar vesentlig til fillerinnholdet i Veldes betonger. De tre fillerfraksjonene som er brukt her har følgende opphav:

- Fin filler – 0 / 0,063 mm. Den fineste fillerfraksjonen fra vindsikteanlegget, brukes normalt til asfaltproduksjon, og delvis til betongproduksjon. Fraksjonen er brukt umodifisert i dette forsøksprogrammet.
- Mellomfiller – 0,063 / 0,5 mm. Brukes i betongproduksjonen. I dette forsøksprogrammet er partikler større enn 0,125 mm tatt ut ved mekanisk sikting.
- Grov filler – 0 / 0,5 mm. Brukes i betongproduksjonen. I dette forsøksprogrammet er partikler større enn 0,125 mm tatt ut ved mekanisk sikting.

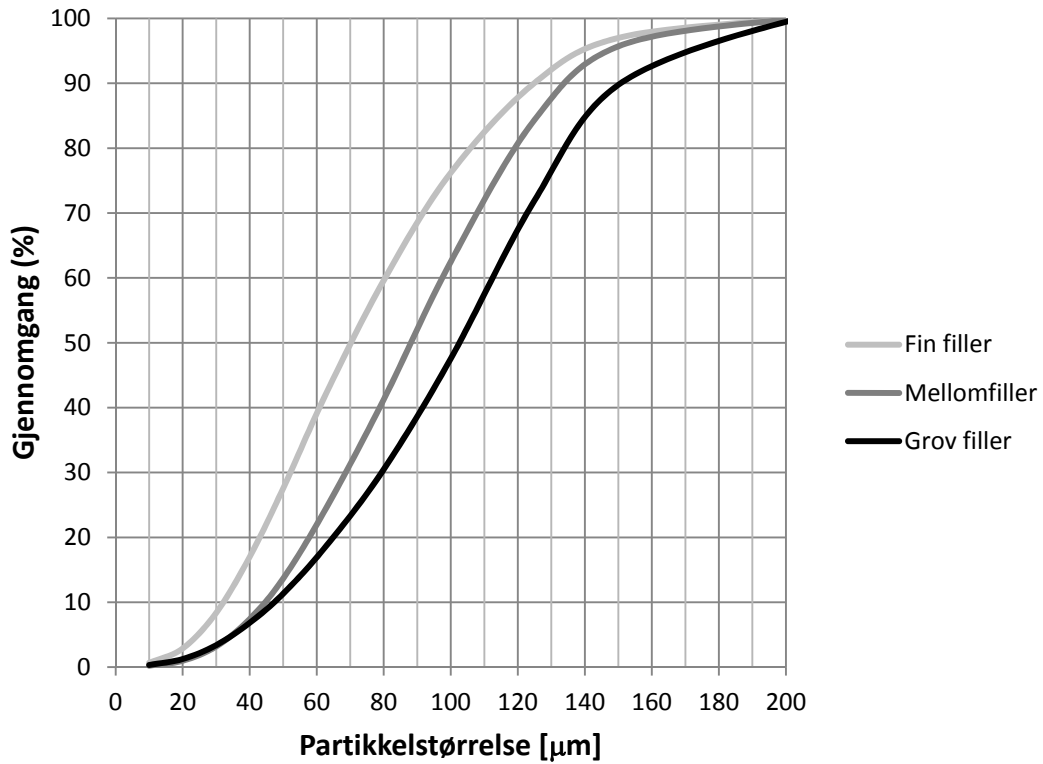
Fillergraderingene er målt ved bruk av Sedigraf ved SINTEF etter gjennomført sikting på 0,125 mm sikteduk. Graderingene er vist i figur 1.

#### 3.2 Sammensatte fillergraderinger

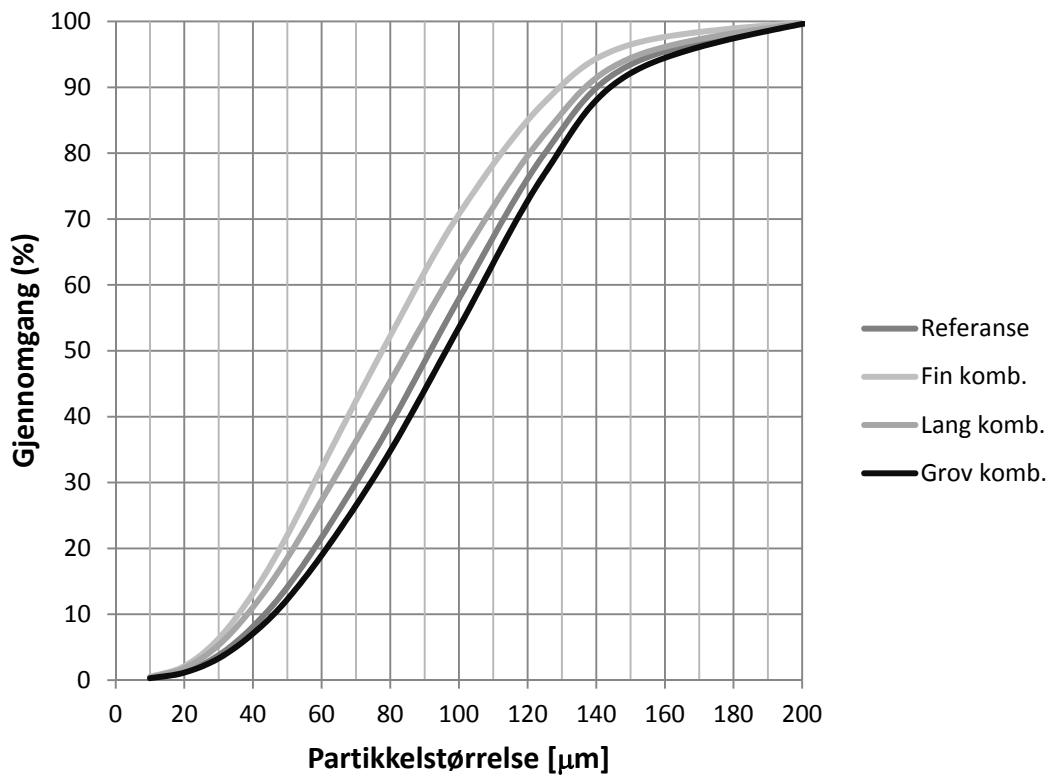
I forsøksprogrammet er de tre basisfillerne satt sammen til fire ulike fillerkombinasjoner slik det er vist i tabell 1. Kombinasjonene representerer graderinger som er, eller har vært i bruk hos Velde, og som gir varierende grad av massebalanse i produksjonen av tilslag og betong. Graderingene har også vist seg å gi ulike egenskaper i betong, både mht. konsistens og stabilitet. Den kombinasjonen som er kalt «Referanse» representerer den fillersammensetningen som Velde fram til nå har brukt til selvkomprimerende betong i bestandighetsklasse M60. De fire graderingene er vist i figur 2. Graderingene er beregnet ut fra graderingene til basisfillerne.

Tabell 1. Brukte kombinasjoner av basisfillerne.

| Bruksfiller      | Basisfiller (andel) |              |             |
|------------------|---------------------|--------------|-------------|
|                  | Fin filler          | Mellomfiller | Grov filler |
| Fin kombinasjon  | 60 %                | 40 %         | 0 %         |
| Lang kombinasjon | 40 %                | 30 %         | 30 %        |
| Grov kombinasjon | 0 %                 | 40 %         | 60 %        |
| Referanse        | 10 %                | 50 %         | 40 %        |



Figur 1. Gradering for basisfillerne, målt med SediGraf



Figur 2. Gradering for de 4 fillerkombinasjonene. Graderingene er beregnet ut fra målte graderinger for de tre basisfillerne, og den andelsfordelingen som er vist i tabell 2.

### 3.3 Sementtyper

Cemex Miljøsement er brukt som basissement i forsøkene. De alternative sementtypene Cemex Rapid, Norcem Standardsement FA og Norcem Anleggssement FA er brukt som sekundærparametre for å kunne sammenligne effekten av fillergradering og fillermengde på matriksens flytmotstand med effekten av sementtypen. Sementtypene er vist i tabell 2.

Tabell 2. Sementtyper

| Sement            | Type              | Type og andel tilsetningsmateriale | Finhet, Blaine (m <sup>2</sup> /kg) |
|-------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Cemex Miljøsement | CEM II/B-S 52,5 N | Slagg, 30 %                        | 460                                 |
| Cemex Rapid       | CEM I 52,5 R      | Ingen                              | 550                                 |
| Norcem Std. FA    | CEM II/A-V 42,5 R | FA, 20 %                           | 450                                 |
| Norcem Anlegg FA  | CEM II/A-V 42,5 N | FA, 17 %                           | 390                                 |

### 3.4 Tilsetningstoff

Basis tilsetningsstoff har vært Mapei Dynamon SX-N. Dette er et allround superplastiserende tilsetningsstoff basert på modifiserte akrylpolymerer.

Det alternative tilsetningsstoffet Mapei Dynamon SR-N er brukt som sekundærparameter for å kunne sammenligne effekten av fillergradering og fillermengde på matriksens flytmotstand med effekten av type tilsetningsstoff. Dynamon SR-N har normalt noe mindre plastiserende effekt, og samtidig sterkere stabiliserende effekt på betong, og forventes derfor å gi noe mindre reduksjon på matriksens flytmotstand enn Dynamon SX-N.

Tilsetningsstoffene har vært brukt i doseringer fra 0,3 % til 1,5 % av bindemiddelmengden. Basis doseringsmengde har vært 0,5 % ved masseforhold 0,59, og 1,0 % ved 0,39. Dette er normale doseringer i ordinær konstruksjonsbetong, men noe lavere enn det som benyttes i selvkomprimerende betong. Begge tilsetningsstoffene har et tørrstoffinnhold på 18 %.



### 3.5 Forsøksparametre i FlowCyl-forsøkene

Tabell 3, 4 og 5 gir en oversikt over forsøksprogram og -parametre i FlowCyl-forsøkene. Alle resepter er utviklet i med basis i disse tabellene ved hjelp av et eget regnearkverktøy. Det er vist et eksempel på utskrift fra dette verktøyet i vedlegg A.

Tabell 3 viser hvordan fillergradering og fillerdosering (fi/c) er variert i matrikser med samme sementtype, masseforhold, SP type og SP-dosering. Fillergraderingen er styrt ved å kombinere de tre basisfillere til 4 sammensatte graderinger («Referanse», «Fin», «Lang» og «Grov») slik det vist i tabell 4.

Tabell 3. Forsøksprogram og -parametre, FlowCyl- forsøk. Primærparametre

| Parameter      | Mix. no     | Sement      | w/c  | SP type | SP/c   | Fillers/ filler sources |           |        | fi/c         | Grading        |
|----------------|-------------|-------------|------|---------|--------|-------------------------|-----------|--------|--------------|----------------|
|                |             |             |      |         |        | Fine                    | Intermed. | Coarse |              |                |
| Model test     | 1           | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 100 %                   | 0 %       | 0 %    | 0,51         | Model test M60 |
|                | 2           | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 100 %     | 0 %    | 0,51         | Model test M60 |
|                | 3           | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 0 %       | 100 %  | 0,51         | Model test M60 |
| Basic          | 4           | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,51         | Referanse      |
|                | 5           | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,51         | Fine comb.     |
|                | 6           | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,51         | Long comb.     |
|                | 7           | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,51         | Coarse comb.   |
|                | 8           | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,32         | Referanse      |
|                | 9           | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,32         | Long comb.     |
| fi/c reduced   | 10          | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,32         | Coarse comb.   |
|                | 11          | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,46         | Referanse      |
|                | 12          | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,46         | Fine comb.     |
|                | 13          | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,46         | Long comb.     |
|                | 14          | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,46         | Coarse comb.   |
|                | 15          | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,27         | Referanse      |
|                | 16          | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,27         | Long comb.     |
| 17             | Cemex Miljø | 0,39        | SX-N | 1,00 %  | 0 %    | 40 %                    | 60 %      | 0,27   | Coarse comb. |                |
| fi/c increased | 18          | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,56         | Referanse      |
|                | 19          | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,56         | Fine comb.     |
|                | 20          | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,56         | Long comb.     |
|                | 21          | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,56         | Coarse comb.   |
|                | 22          | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,37         | Referanse      |
|                | 23          | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,37         | Long comb.     |
|                | 24          | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,37         | Coarse comb.   |

De fire sammensatte graderingene er brukt i matrikser med masseforhold 0,59 og 0,39. Basis-sementen er Cemex Miljøsement. Basis SP type er Mapei Dynamon SX-N i doseringer på 0,50 % av sementmengden ved masseforhold 0,59, og 1,00 % ved masseforhold 0,39.

Fillerdoseringene er 46 %, 51 % og 56 % av sementmengden ved masseforhold 0,59, og 27 %, 32 % og 37 % ved masseforhold 0,39. Fillermengdene i laboratorieforsøkene er omtrentlig tilpasset de fillermengdene Velde bruker i sin betongproduksjon.

Tabell 4 viser hvordan sekundærparametrene sementtype, SP-type og SP-dosering er variert for matriser for noen av kombinasjonene av fillergradering og fillerdosering fra Tabell 3. Hensikten har her delvis vært å kunne sammenligne effekten av fillersammensetningen og fillerdoseringen med tradisjonelle proporsjoneringsparametre, delvis å kontrollere at effekten av filler-parametrene er konsistente og entydige.

Tabell 4. Forsøksprogram og -parametre, FlowCyl- forsøk. Sekundærparametre.

| Parameter   | Mix no. | Cement         | w/c  | SP type | SP/c   | Fillers/ filler sources |           |        | fi/c | Grading      |
|-------------|---------|----------------|------|---------|--------|-------------------------|-----------|--------|------|--------------|
|             |         |                |      |         |        | Fine                    | Intermed. | Coarse |      |              |
| Cement type | 25      | Cemex Rapid    | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,51 | Reference    |
|             | 26      | Cemex Rapid    | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,32 | Reference    |
|             | 27      | Cemex Rapid    | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,51 | Fine comb.   |
|             | 28      | Cemex Rapid    | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,32 | Coarse comb. |
|             | 29      | Norcem Std. FA | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,51 | Reference    |
|             | 30      | Norcem Std. FA | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,32 | Reference    |
|             | 31      | Norcem Std. FA | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,51 | Fine comb.   |
|             | 32      | Norcem Std. FA | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,32 | Coarse comb. |
|             | 33      | Norcem Anl. FA | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,51 | Reference    |
|             | 34      | Norcem Anl. FA | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,32 | Reference    |
|             | 35      | Norcem Anl. FA | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,51 | Fine comb.   |
|             | 36      | Norcem Anl. FA | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,32 | Coarse comb. |
| SP type     | 37      | Cemex Miljø    | 0,59 | SR-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,51 | Reference    |
|             | 38      | Cemex Miljø    | 0,39 | SR-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,32 | Reference    |
|             | 39      | Cemex Miljø    | 0,59 | SR-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,51 | Fine comb.   |
|             | 40      | Cemex Miljø    | 0,39 | SR-N    | 1,00 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,32 | Coarse comb. |
| SP dosage   | 41      | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N    | 0,30 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,51 | Reference    |
|             | 42      | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N    | 0,70 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,32 | Reference    |
|             | 43      | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N    | 0,30 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,51 | Fine comb.   |
|             | 44      | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N    | 0,70 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,32 | Coarse comb. |
|             | 45      | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N    | 0,70 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,51 | Reference    |
|             | 46      | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N    | 1,30 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,32 | Reference    |
|             | 47      | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N    | 0,70 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,51 | Fine comb.   |
|             | 48      | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N    | 1,30 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,32 | Coarse comb. |

De sementtypene som er prøvd er Cemex Rapid, Norcem Standardsement FA og Norcem Anleggssement FA, se avsnitt 3.3. Hver av sekundærsementene er kombinert med to fillergraderinger, men bare en fillerdosering ved hvert av masseforholdene 0,39 og 0,59.

Mapei Dynamon SR-N er brukt som alternativt SP-stoff. Begge SP-stoffene er brukt i doseringer på 0,30 % og 0,70 % (i tillegg til basisdoseringen på 0,50 %) ved masseforhold 0,59, og i doseringer på 0,70 % og 1,30 % (i tillegg til basisdoseringen på 1,00 %) ved masseforhold 0,39.

Tabell 5 viser de parametrene som er brukt i supplerende FlowCyl-forsøk med de matriksene som tilsvarer betongene som ble benyttet i betongforsøk hos Mapei.

Fillerne som er brukt i denne forsøksserien er tatt fra de tilslagsfraksjonene som ble benyttet i betongforsøkene, og er derfor ikke identisk lik de fillerne som inngår i seriene i tabell 3 og 4. Det er ikke gjennomført SediGraf-analyse av fillerne i betongmatriksene. Det kan derfor ikke forventes av resultatene fra denne serien skal være konsistente med resultatene fra de andre forsøksseriene. Resultatene er derfor ikke presentert i rapporten, men gjengitt summarisk i vedlegg B.

Tabell 5. Forsøksprogram og –parametre, FlowCyl- forsøk. Matrikser fra betongforsøk.

| Parameter         | Mix no | Cement      | w/c  | SP type | SP/c   | Fillers/ filler sources |           |        | fi/c | Grading    |
|-------------------|--------|-------------|------|---------|--------|-------------------------|-----------|--------|------|------------|
|                   |        |             |      |         |        | Fine                    | Intermed. | Coarse |      |            |
| Concrete matrices | 4R     | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,51 | Reference  |
|                   | 5R     | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 1,00 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,51 | Fine comb. |
| SCC matrices      | 49     | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 1,40 % | 30 %                    | 70 %      | 0 %    | 0,40 | Reference  |
|                   | 50     | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 1,40 % | 50 %                    | 50 %      | 0 %    | 0,51 | Fine comb. |
|                   | 51     | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,50 % | 30 %                    | 70 %      | 0 %    | 0,27 | Reference  |
|                   | 52     | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,50 % | 50 %                    | 50 %      | 0 %    | 0,34 | Fine comb. |

\* Fillerbidrag fra grovere tilslagsfraksjoner er ikke regnet med

\*\* Den grove filleren er siktet ut fra sandfraksjonene i betongen

## 4 Blandeprosedyre

Blandeprosedyren for matriksene er utviklet innenfor COIN FA 2.1, og er detaljert rapportert i en artikkel publisert i Nordic Concrete Research /4/. Blanding er gjennomført i to trinn, først forblanding ved lav hastighet i en standard Hobart-blander med flat stålvisp, deretter blanding ved to forskjellige hastigheter i en spesielt utviklet blander. Denne blanderen er basert på en standard batteridrill påsatt en stålvisp. Blandingen gjennomføres i en sylindrisk kunstgummi-beholder med lokk. Blandevolumet var 2,0 liter for alle matriksene.

I arbeidet med metodeutviklingen ble det dokumentert at den aktuelle blandeprosedyren gir høy grad av dispersjon, men ingen effekt på matriksens hydrasjonsvarme. Dette indikerer at den relativt høye skjærhastigheten ikke gir noen form for malingseffekt på sement- og tilslagspartiklene i matriksen.

Blandeprosedyren gir et meget lavt og i praksis neglisjerbart luftinnhold i matriksene. Et eventuelt luftinnhold, og spesielt variasjon i luftinnhold, vil ha en sterk effekt på matriksens reologi, og er derfor uønsket i et parameterstudium som dette.

Blandeprosedyren er gitt i tabell 6.

Tabell 6. Blandeprosedyre for matriksene.

| Trinn nr. | Tid (minutter) |            | Prosedyre   |
|-----------|----------------|------------|---|
|           | Per trinn      | Akkumulert |   |
| 1         | 2              | -2         | Sement, tilsetningsmaterialer og fillere blandes tørt på lav hastighet i Hobartblanderen (30 rpm) |
| 2         | 1              | 0          | Vann og tilsetningsstoffer blandes inn på lav hastighet i Hobartblanderen (30 rpm)                |
| 3         | 0,5            | 1          | Forblandet matriks fylles over på kunstgummibeholderen  |
| 4         | 2              | 1,5        | Blanding i drillmikser på høy hastighet (1850 rpm)  |
| 5         | 2              | 3,5        | Hvile   |
| 6         | 2              | 5,5        | Blanding i drillmikser på moderat hastighet (1000 rpm)  |
| 7         | 2,5            | 7,5        | Hvile   |
| 8         | -              | 10         | Oppstart FlowCyl-forsøk   |

Etter avsluttet FlowCyl- forsøk ble matriksen ført tilbake til kunstgummibeholderen, og lagret under lokk til ny prøving 30 minutter etter vanntilsetning. Beholderen ble ristet manuelt i ca. 30 sekunder før gjennomføring av ny prøving i FlowCyl.

## 5 Prøvmingsmetode

FlowCyl –forsøk gir grunnlag for å bestemme matriksen flytmotstand ( $\lambda_0$ ). Denne prøvmingsmetoden er detaljert beskrevet av Mørtzell /2/ og Smeplass /5/. Utstyret består av et sylindrisk stålrør med indre diameter 80 mm og total lengde 400 mm, der den ene enden er formet som en kon med lengde 100 mm, og et utløp på 8 mm.

Røret plasseres vertikalt i et stativ, og fylles med den væsken som skal prøves. Strømningshastigheten ut av FlowCyl-røret registreres kontinuerlig ved at væsken samles opp i en beholder plassert på en elektronisk vekt koblet til en PC. Oppsettet er vist i figur 3. Programvaren som brukes til registrering av væskestrømmen er av typen «Balance Link», levert av Mettler Toledo, som også har levert den elektroniske vekten.

Flytmotstanden kan forenklet sies å være forskjellen i gjennomsnittlig strømningshastighet mellom prøvevæsken og en ideell væske uten strømningsmotstand, dividert på den gjennomsnittlige strømningshastigheten til den ideelle væsken. Den ideelle væsken har per definisjon  $\lambda_Q = 0$ , mens en svært viskøs væske har  $\lambda_Q \approx 1,0$ . Rent vann har en  $\lambda_Q \approx 0,1$  ved 20 °C.

Analysen av resultatene gjennomføres i et regneark utviklet for formålet. Det er vist et eksempel på utskrift fra dette verktøyet i vedlegg C og D. Ved behandling av måledata utelates den delen av tømmeforløpet som tilsvarer at væskeoverflaten befinner seg i konen. Grenseverdiene for fyllingsnivået i beregningen betegnes  $h1$  (nedre grense) og  $h2$  (øvre grense).  $h2$  er normalt gitt av FlowCyls høyde, dvs 400 mm.  $h1$  settes gjerne lik 150 mm, dvs. et stykke opp i den sylindriske delen av utstyret.

I de forsøkene som er gjennomført her er loggefrequensen satt til 5 registreringer per sekund. Dette gir en viss fluktuasjon i det registrerte strømningsforløpet, fordi loggeutstyret ikke har hatt tilstrekkelig bufferkapasitet. Vi har gjennomført alternative analyser av måledataene ved å filtrere veiedata tilsvarende 1 registrering per sekund, uten at dette har påvirket beregnet flytmotstand. Det er derfor ingen grunn til å anta at den manglende kapasiteten i loggeutstyret har påvirket resultater eller konklusjoner.

Vi vil likevel anbefale at loggefrequensen i fremtidige forsøk settes til f.eks. 1 registrering per sekund, slik at data registreres uten at bufferkapasiteten i utstyret utfordres.



Figur 3. Forsøksoppsett, FlowCyl.

## 6 Resultater og diskusjon

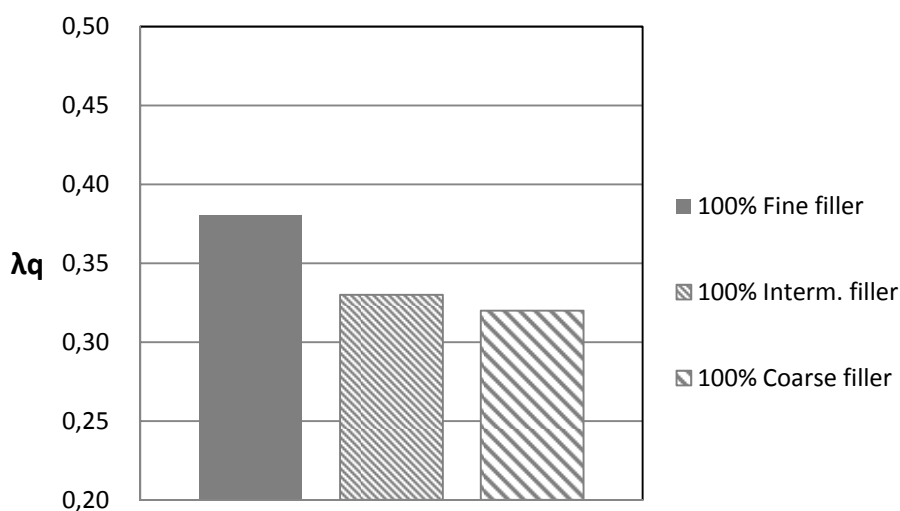
### 6.1 Generelt

Resultatene for alle FlowCylforsøkene er vist samlet i vedlegg A. Den følgende presentasjonen og diskusjonen av resultater er basert på måling av flytmotstand direkte etter avsluttet blandedprosedyre (10 minutter etter vanntilsetning). I vedlegg A er det også vist resultater fra måling 20 minutter avsluttet blandedprosedyre (30 minutter etter vanntilsetning). Disse resultatene er ikke diskutert i detalj i denne rapporten, men de viser i hovedsak de samme effektene og generelle trendene som resultater fra målingene utført direkte etter avsluttet blandedprosedyre.

### 6.2 Basisfillere

Figur 4 viser målt flytmotstand direkte etter blanding for matrikser basert på de tre basis fillervariantene (fin filler, mellomfiller og grov filler), se kapittel 3. Matriksene har alle Cemex Miljøsement, et masseforhold  $m=0,59$ , et  $f/c$ -forhold på  $0,51$ , og en dosering av Mapei Dynamon SX-N på  $0,50\%$  av sementmengden. Den fine filleren gir som forventet den høyeste flytmotstanden,  $\lambda_Q = 0,38$ . Den grove filleren gir den laveste flytmotstanden  $\lambda_Q = 0,32$ , men forskjellen mellom denne og mellomfilleren er liten. Forskjellen mellom fin og grov filler vil kunne gi en betydelig forskjell i betongkonsistens, og ikke minst stabilitet når betongene ellers har lik sammensetning.

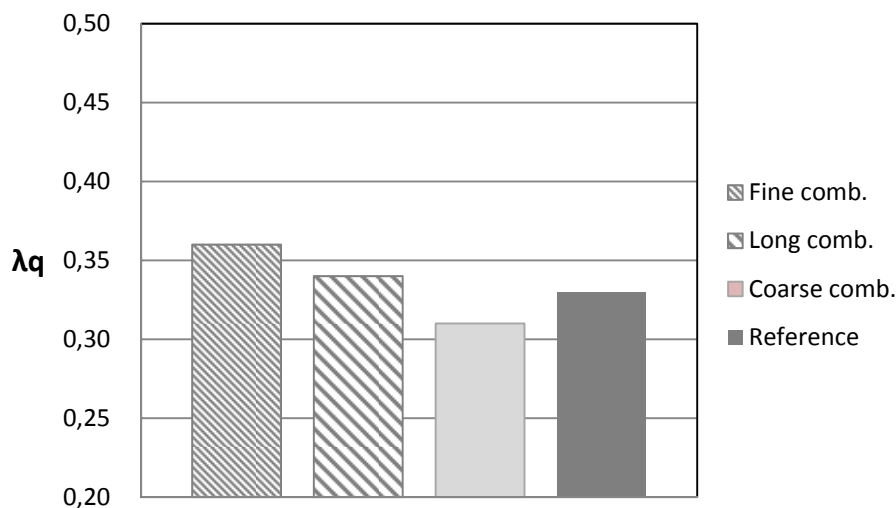
Det er i praksis ikke realistisk å bruke rene fillerfraksjoner slik de framstår her, både av hensyn til massebalansen i betongproduksjonen, og fordi bidragene til viskositet og stabilitet blir for ensidige. Kort fortalt vil den grove filleren gi for dårlig stabilitetsbidrag i M60-betong, og den fine filleren vil gi for høy viskositet i M40-betong.



Figur 4. Målt flytmotstand,  $\lambda_Q$ , for matrikser med de tre basisfillerne. Matriksene er basert på Cemex Miljøsement,  $m=0,59$ , filler / sementforhold  $f_i/c = 0,51$ , og doseringen av Mapei Dynamon SX-N er på  $0,50\%$  av sementmengden.

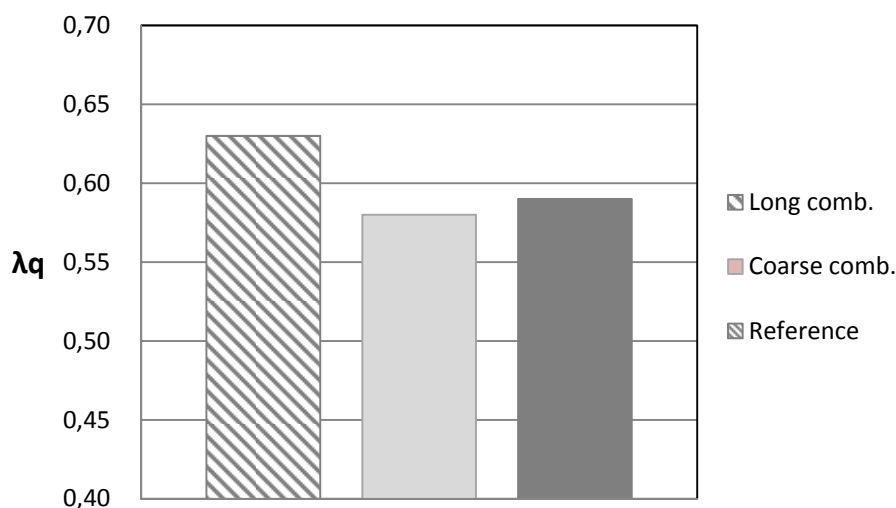
### 6.3 Sammensatte fillere

Figur 5 viser målt flytmotstand direkte etter blanding for matrikser basert på de fire sammensatte fillerne (fin, lang og grov kombinasjon, samt referansegraderingen) Matriksene har ellers samme sammensetning som matriksene med basisfiller. Resultatene korrelerer godt med resultatene for basisfillerne, dvs. flytmotstanden er tydelig påvirket av fillergraderingen, fin filler gir konsekvent økt flytmotstand.



Figur 5. Målt flytmotstand,  $\lambda_q$  for matrikser med de fire fillerkombinasjonene. Matriksene er basert på Cemex Miljøsement,  $m = 0,59$ , filler / sementforhold  $f/c = 0,51$ , og en dosering av Mapei Dynamon SX-N på 0,50 % av sementmengden.

Figur 6 viser tilsvarende resultater for matrikser med masseforhold  $m=0,39$ , også her basert på Cemex Miljøsement. Disse forsøkene omfatter tre av de sammensatte fillerne, dvs. fin kombinasjon er utelatt.  $f/c$ -forholdet er redusert til 0,32, og doseringen Mapei Dynamon SX-N er økt til 1,00 % av sementmengden. Resultatene viser at redusert masseforhold som forventet gir en markert økning i flytmotstanden. I tillegg øker følsomheten for fillergraderingen betydelig ved det lave masseforholdet, selv om  $f/c$ -forholdet samtidig er redusert. Dette indikerer at potensialet for optimalisering av fillersammensetningen sannsynligvis er større i M40- betong enn i M60 – betong.



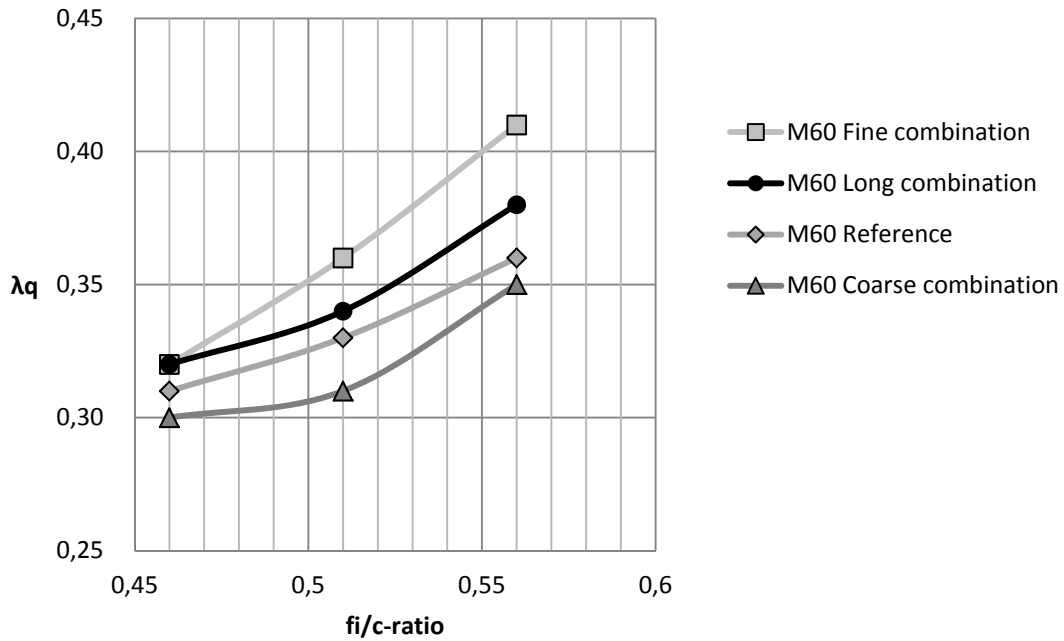
Figur 6. Målt flytmotstand,  $\lambda_q$ , for matriks med tre av de fire fillerkombinasjonene. Matriksene er basert på Cemex Miljøsement,  $m= 0,39$ , filler / sementforhold  $f/c = 0,32$ , og en dosering av Mapei Dynamon SX-N på 1,00 % av sementmengden.

## 6.4 Effekt av fillerdosering

Figur 7 viser effekten på flytmotstanden av fillerdoseringen, uttrykt ved filler/ sement- forholdet ( $f_i/c$ ). Resultatene gjelder alle de 4 fillerkombinasjonene i matrikser med masseforhold  $m = 0,59$ , basert på Cemex Miljøsement, og en dosering av Mapei Dynamon SX-N på 0,50 % av sementmengden.

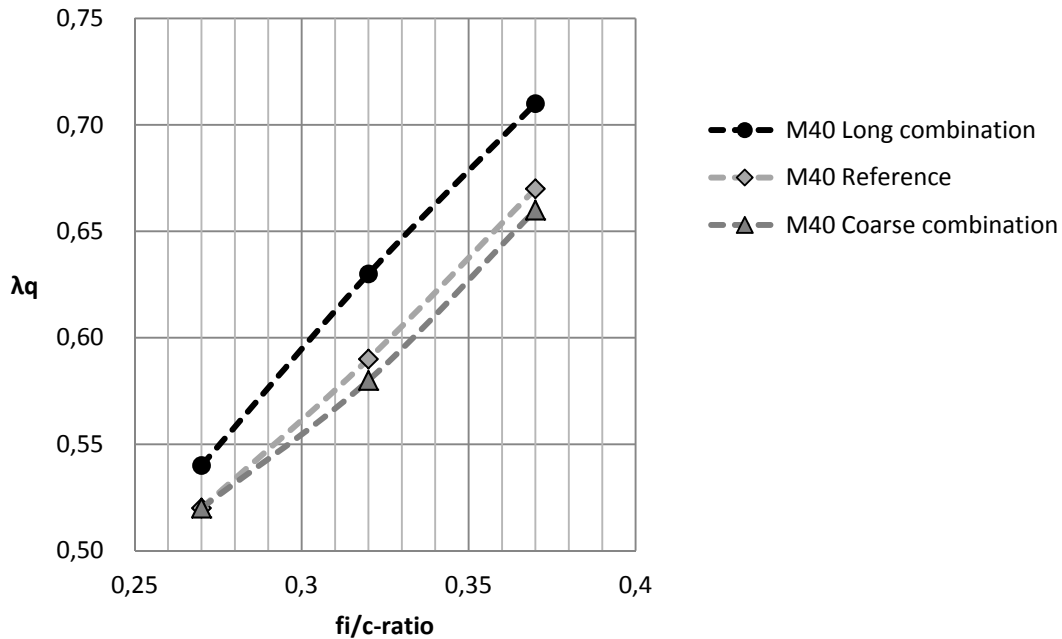
Resultatene viser en meget konsistent og entydig økning av flytmotstanden med økende  $f_i/c$  – forhold, selv om effekten ikke er spesielt sterk for  $f_i/c$ -forhold lavere enn 0,50. Effekten av  $f_i/c$ -forholdet øker med økende finhet av filleren. De entydige resultatene indikerer at det til en viss grad vil være mulig å styre M60-betongens støpelighet ved riktig tilpasning av fillergradering og fillermengde, uavhengig av betongens matriksvolum og bruk av tilsetningsstoffer.





Figur 7. Effekt av fillerdoseringen, dvs. filler / sementforholdet  $f_i/c$ , på målt flytmotstand,  $\lambda_q$ , for matriser med de fire fillerkombinasjonene. Matrisene er basert på Cemex Miljøsement,  $m = 0,59$ , og en dosering av Mapei Dynamon SX-N på 0,50 % av sementmengden.

Figur 8 viser tilsvarende resultater for 3 av fillerkombinasjonene (fin kombinasjon er utelatt) i matriser med masseforhold  $m = 0,39$ , også disse basert på Cemex Miljøsement. Doseringen Mapei Dynamon SX-N er på 1,00 % av sementmengden. Effekten av fillerdoseringen er generelt vesentlig sterkere ved  $m = 0,39$  enn ved  $m = 0,59$ . Resultatene er meget konsistente, og indikerer at tilpasning av fillersammensetning og fillerdosering vil kunne være en viktig styringsparameter ved proporsjonering av M40 - betong utelukkende basert på knuste tilslag.

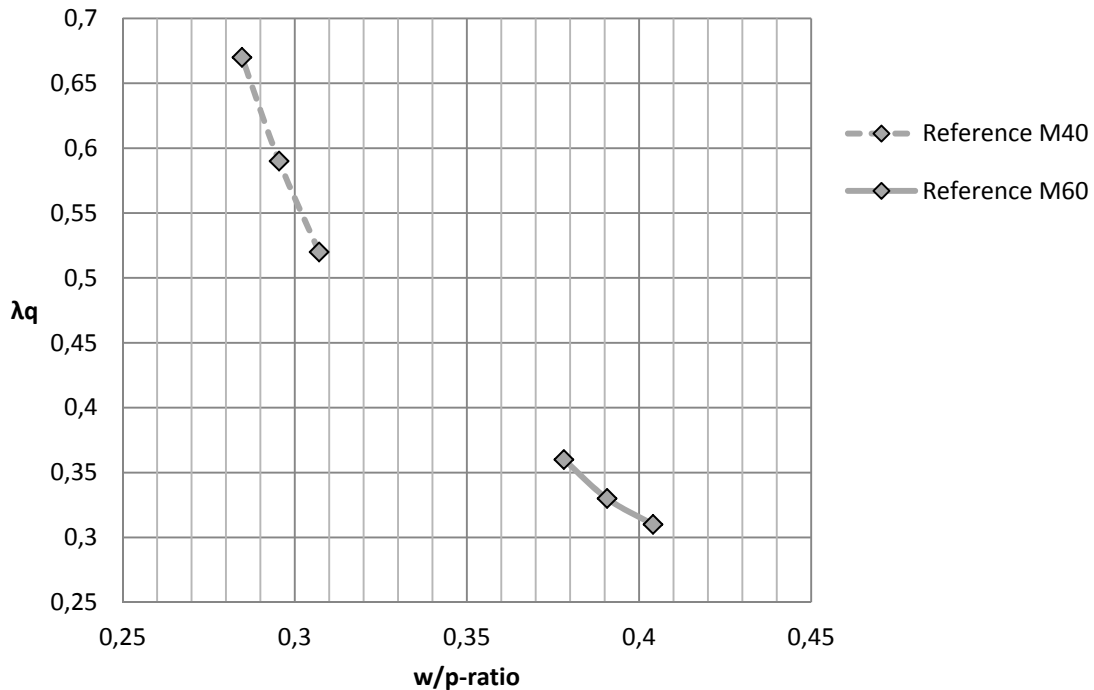


Figur 8. Effekt av fillerdoseringen, dvs. filler / sementforholdet  $f_i/c$ , på målt flytmodstand,  $\lambda_q$ , for matriks med tre av de fire fillerkombinasjonene. Matriksene er basert på Cemex Miljøsement,  $m=0,39$ , og en dosering av Mapei Dynamon SX-N på 1,00 % av sementmengden.

I figur 9 er resultatene for referansegraderingen fra figur 7 og figur 8 sammenstilt ved at fillerdosering og masseforhold er regnet sammen til et vann/pulverforhold,  $w/p$ , der pulver er definert som summen av sement og filler. Denne framstillingen gjør det mulig grovt å sammenligne effekten av endringer i fillerdosering med endringer i masseforhold. I utgangspunktet er spennet i masseforhold i dette tilfellet vesentlig større enn spennet i fillerdosering. Ved masseforhold  $m=0,59$  spenner filler/sementforholdet fra 0,46 til 0,56 (tilsvarende et spenn i  $w/p$ -forholdet fra 0,415 til 0,377 i figur 9). Ved masseforhold  $m=0,39$  spenner filler/sementforholdet fra 0,27 til 0,37 (tilsvarende et spenn i  $w/p$ -forholdet fra 0,275 til 0,317 i figur 9).

Dette reduserer muligheten for en direkte sammenligning. Videre er det brukt en høyere dosering av plastiserende tilsetningsstoff ved masseforhold  $m=0,39$  enn ved  $m=0,59$ , mens doseringen ikke er gjort avhengig av fillerdoseringen, dvs.  $f_i/c$  – forholdet. I figuren fører dette til at endring i  $f_i/c$  – forholdet får en relativt sterkere effekt på flytmodstanden  $\lambda_q$  enn en endring i masseforholdet.

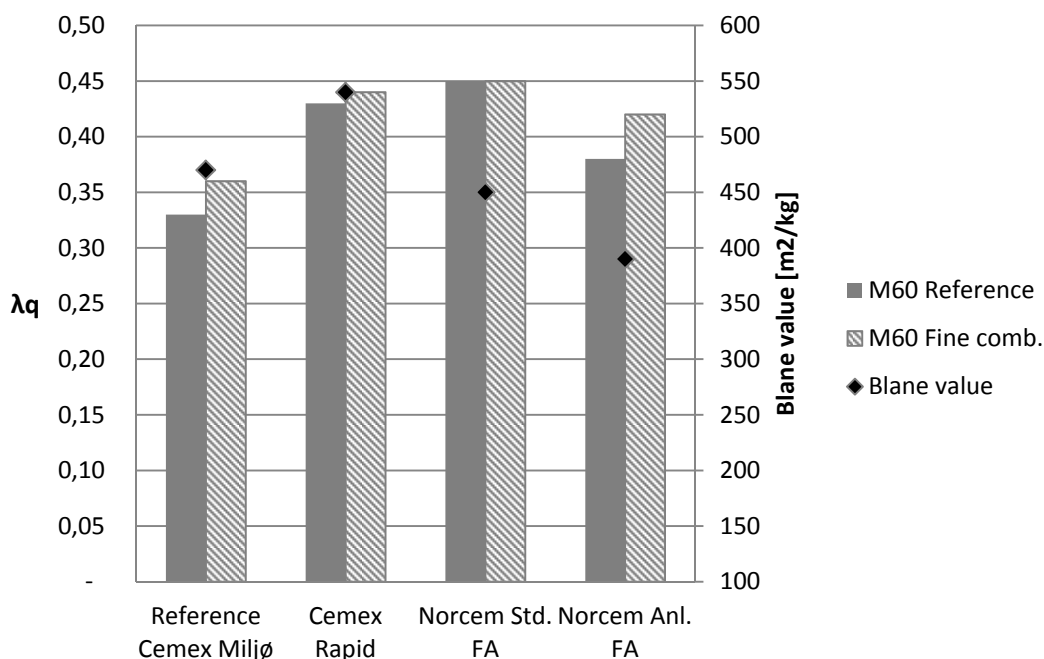
Figuren indikerer likevel at endringer i doseringen av referansefilleren har en effekt på matriksens flytmodstand som kan sammenlignes med effekten av endret sementdosering, dvs. endret masseforhold. Tilsvarende sammenhenger kan settes opp for de andre fillergraderingene, dette blir ikke gjort her.



Figur 9. Sammenstilling av effekten av masseforhold og fillerdosering på målt flytmotstand,  $\lambda_q$ , ved hjelp av det totale vann/ pulverforholdet w/p. Resultatene gjelder filleren med referansegraderingen. Matriksene er basert på Cemex Miljøsement,  $m = 0,59$  og  $0,39$ , med tilhørende dosering av Mapei Dynamon SX-N på  $0,50\%$  og  $1,00\%$  av sementmengden.

## 6.5 Effekt av sementtype

Figur 10 og 11 viser en sammenligning av effekten av fillergradering og sementtype på matriksens flytmotstand. Sementene som er prøvd er Cemex Miljø (referansesementen), Cemex Rapid, Norcem Anleggssement FA og Norcem Standardsement FA. Sementenes finhet forventes å ha stor betydning for matriksens flytmotstand. Blaine-verdiene er derfor vist i figurene. Figur 10 viser resultatene for matrikser med masseforhold  $m = 0,59$ , mens figur 11 viser resultatene for matrikser med masseforhold  $m = 0,39$ . Ved masseforhold  $m = 0,59$  er sementene kombinert med referansefilleren og fin fillerkombinasjon, ved masseforhold  $m = 0,39$  er sementene kombinert med referansefilleren og grov fillerkombinasjon.

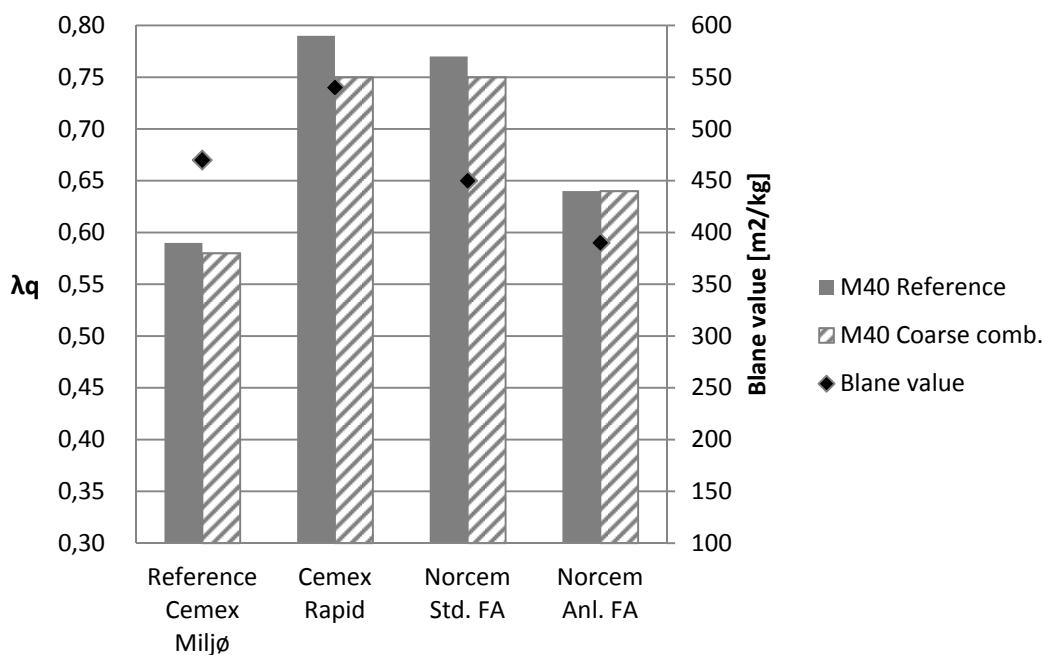


Figur 10. Sammenstilling av effekten av sementtype og fillergradering på målt flytmotstand,  $\lambda_q$ . Resultatene gjelder filler med referansegradering og fin gradering. Matriksene har masseforhold  $m=0,59$ . Filler / sementforholdet  $f_i/c = 0,51$ , og doseringen Mapei Dynamon SX-N er på 0,50 % av sementmengden.

Resultatene viser at effekten av sementtypen her er større enn effekten av forskjellen i fillergradering. Forskjellen mellom sementene ser ut til å kunne relateres relativt entydig til finmalingsgrad, men slaggsementen Cemex Miljø gir lavere flytmotstand enn flyveaske-sementen Norcem Standardsement FA, som har omtrent samme Blaine-verdi. Blaine-verdien gir ikke nødvendigvis presis informasjon om forskjeller i finhet ved sammenligning av sementer med vesentlig forskjellig sammensetning mht. tilsetningsmaterialer som slagg og flyveaske.

Effekten av forskjell i fillergradering ser ut til å være påvirket av sementtypen, dvs. sementenes finhet. Ved masseforhold 0,59 (figur 10) gir skifte fra referansefiller til fin fillerkombinasjon den største økningen i flytmotstand i matrikser basert på de sementene som i utgangspunktet gir laveste flytmotstanden.

Ved masseforhold 0,39 (figur 11) gir tilsvarende skifte fra referansefiller til grov fillerkombinasjon den største reduksjonen i flytmotstand i matrikser basert på de sementene som i utgangspunktet gir den høyeste flytmotstanden.



Figur 11. Sammenstilling av effekten av sementtype og fillergradering på målt flytmotstand,  $\lambda_q$ . Resultatene gjelder filler med referansegradering og grov gradering. Matriksene har masseforhold  $m = 0,39$ . Filler / sementforholdet  $f_i/c = 0,32$ , og doseringen Mapei Dynamon SX-N er på 1,00 % av sementmengden.

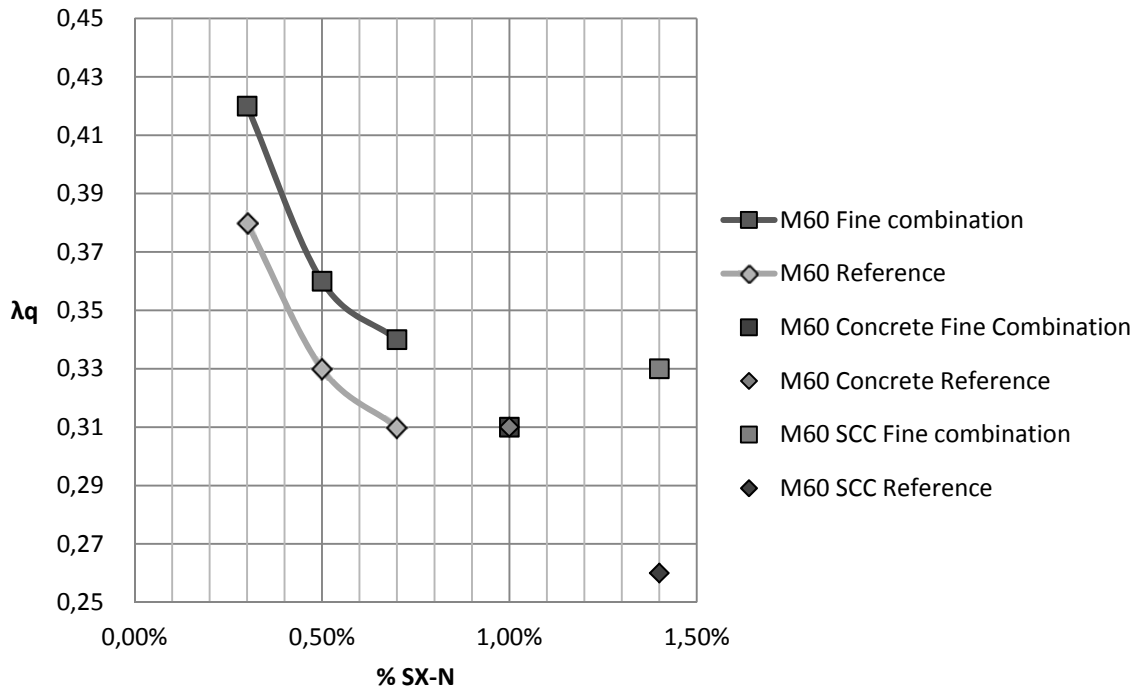
## 6.6 Effekt av type og dosering plastiserende tilsetningsstoff

Figur 12 og 13 viser effekten av doseringen tilsetningsstoff på matriksens flytmotstand. Figur 12 viser resultatene for matrikser med masseforhold  $m = 0,59$ , mens figur 13 viser resultatene for matrikser med masseforhold  $m = 0,39$ . Ved masseforhold  $m = 0,59$  er effekten av doseringen tilsetningsstoff prøvd i matrikser med referansefiller og fin fillerkombinasjon,  $f_i/c = 0,51$ . Ved masseforhold  $m = 0,39$  er effekten av doseringen tilsetningsstoff prøvd i matrikser med referansefiller og grov fillerkombinasjon,  $f_i/c = 0,32$ . Tilsetningsstoffet er i begge tilfeller Mapei Dynamon SX-N, som har et tørrstoffinnhold på 18 %.

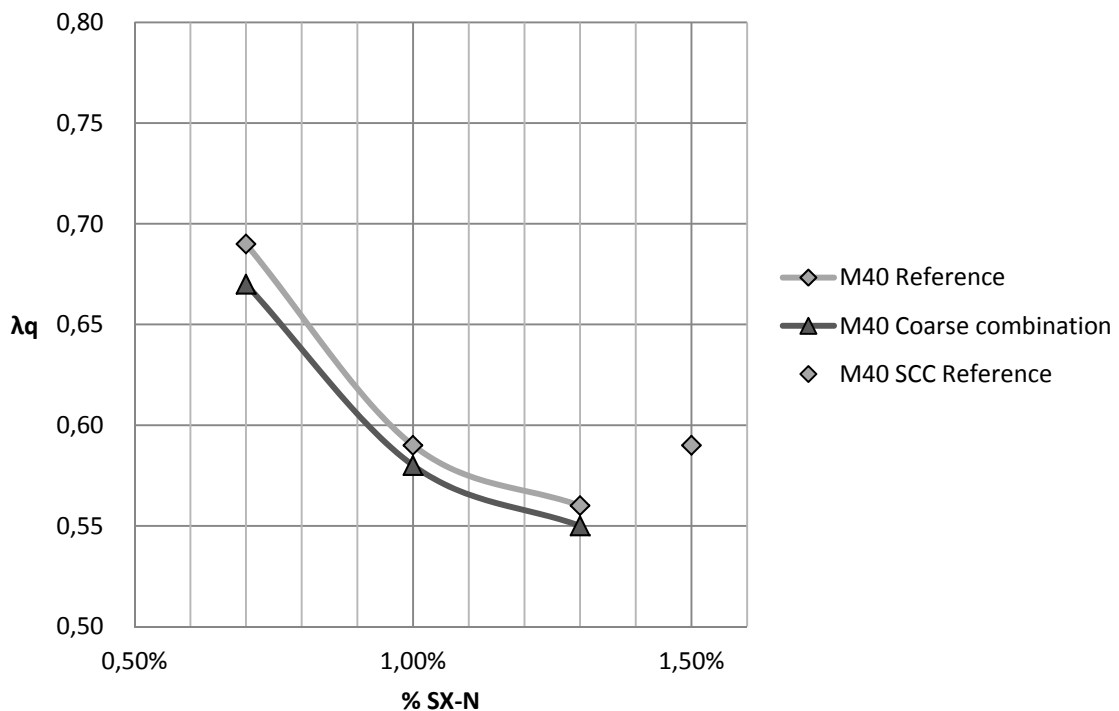
Ved doseringsnivå 1,0 % og 1,4 % av sementvekten er det brukt fillere som avviker litt fra de graderingene som er gitt i figur 2. Dette forstyrrer de generelle trendene noe.

Effekten av doseringen tilsetningsstoff på matriksens flytmotstand er generelt sterk, men avtagende med økende doseringsnivå. Ved proporsjonering av SKB gir dette tilsetningsstoffet en normaldosering på 1,3 - 1,6 %, som antas omtrent å tilsvare et metningsnivå mht. reduksjon av betongens viskositet. Resultatene i figur 12 og 13 ser i en viss grad ut til å reflektere dette.

Legg merke til at for matriksene med masseforhold 0,59 og filler/ sement-forhold 0,51 (figur 12) gir forskjellen i fillergradering mellom referansegraderingen den fine fillergraderingen en forskjell i målt flytmotstand som tilsvarer en forskjell i dosering tilsetningsstoff i området 0,2 %. Ved masseforhold 0,39 er denne effekten mindre markert, hovedsakelig fordi filler/sementforholdet er vesentlig lavere (0,32).



Figur 12. Effekten av dosering tilsetningsstoff av typen Mapei Dynamon SX-N på målt flytmotstand,  $\lambda_q$ . Resultatene gjelder matriser med referansefiller og fin gradering. Matrisene har masseforhold  $m=0,59$ . Filler / sementforholdet  $f_i/c = 0,51$ . Matrisene fra betongforsøkene har noe avvikende fillersammensetning.

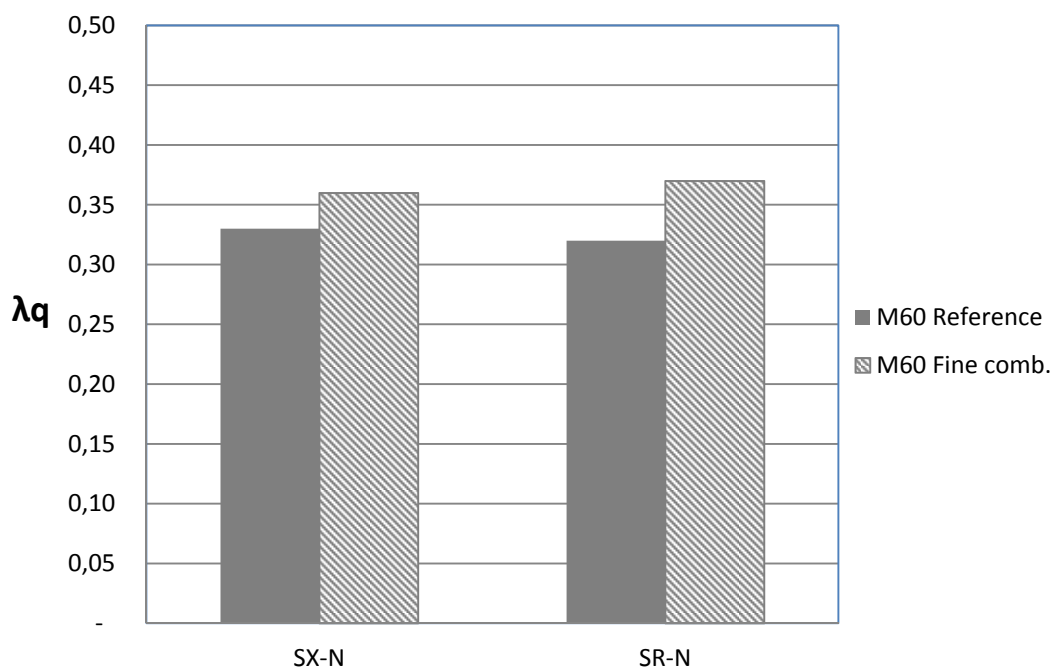


Figur 13. Effekten av dosering tilsetningsstoff av typen Mapei Dynamon SX-N på målt flytmotstand,  $\lambda_q$ . Resultatene gjelder matriser med referansefiller og grov gradering. Matrisene har masseforhold  $m=0,39$ . Filler / sementforholdet  $f_i/c = 0,32$ .

Figur 14 og 15 viser effekten av type tilsetningsstoff på målt flytmotstand. De prøvde typene tilsetningsstoff er Mapei Dynamon SX-N og Mapei Dynamon SR-N. Begge

tilsetningsstoffene har et tørrstoffinnhold på 18 %. Figur 14 viser resultatene for matrikser med masseforhold  $m = 0,59$ , mens figur 15 viser resultatene for matrikser med masseforhold  $m = 0,39$ .

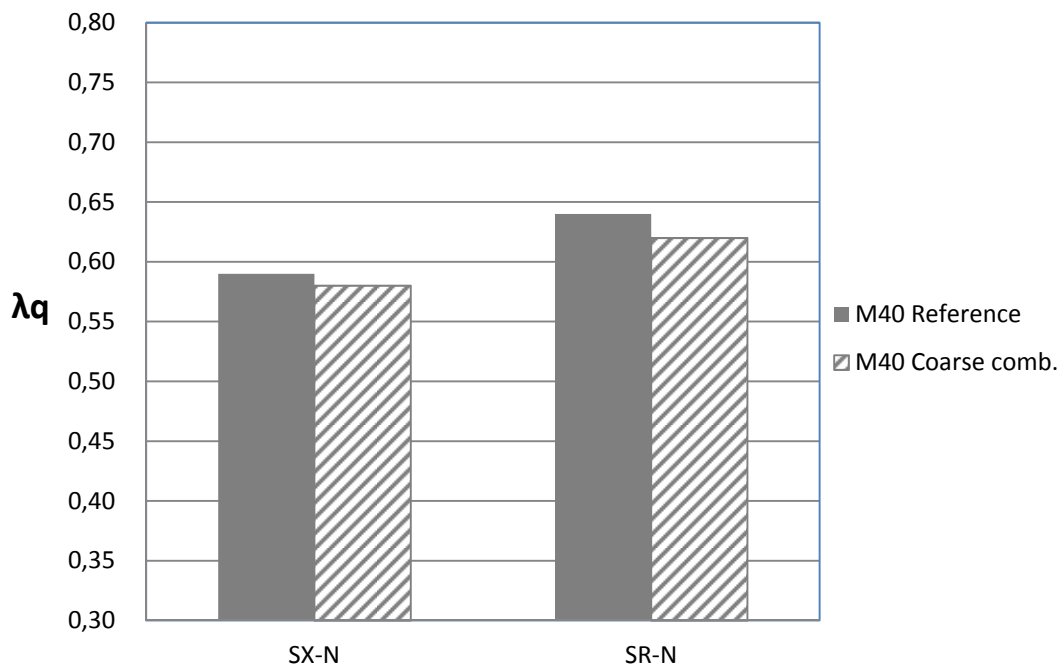
Ved masseforhold  $m = 0,59$  (figur 14) er effekten av type tilsetningsstoff prøvd i matrikser med referansefiller og fin fillerkombinasjon,  $f_i/c = 0,51$ . Doseringen tilsetningsstoff er 0,50 % av sementmengden. Ved masseforhold  $m = 0,39$  (figur 13) er effekten av doseringen tilsetningsstoff prøvd i matrikser med referansefiller og grov fillerkombinasjon,  $f_i/c = 0,32$ . Doseringen tilsetningsstoff er 1,00 % av sementmengden.



Figur 14. Effekten av type tilsetningsstoff på målt flytmotstand,  $\lambda_q$ . Tilsetningsstoffene er Mapei Dynamon SX-N og Mapei Dynamon SR-N, begge med en dosering på 0,5 % av sementmengden. Resultatene gjelder matrikser med referansefiller og fin gradering. Matriksene har masseforhold  $m = 0,59$  og filler / sementforholdet  $f_i/c = 0,51$ .

Ved masseforhold 0,59 er det ingen vesentlig forskjell på tilsetningsstoffene. Begge gir noe høyere flytmotstand i kombinasjon med fin fillergradering enn med referansegraderingen. Ved masseforhold 0,39 er det mer markert forskjell, Dynamon SX-N gir her lavere flytmotstand enn Dynamon SR-N for begge fillergraderingene, og forskjellen i effekt mellom tilsetningsstoffene er vesentlig større enn effekten av forskjell i fillergradering.

Samtidig er effekten av fillergraderingen mindre markert enn ved masseforhold 0,59. Dette har sannsynligvis sammenheng med en økt dosering tilsetningsstoff, og lavere filler/sement-forhold.



Figur 15. Effekten av type tilsetningsstoff på målt flytmotstand,  $\lambda_q$ . Tilsetningsstoffene er Mapei Dynamon SX-N og Mapei Dynamon SR-N. Resultatene gjelder matrikser med referansefiller og grov gradering. Matriksene har masseforhold  $m=0,39$  og filler / sementforholdet  $f_i/c = 0,32$ .

## 6.7 Fillerens overflateareal

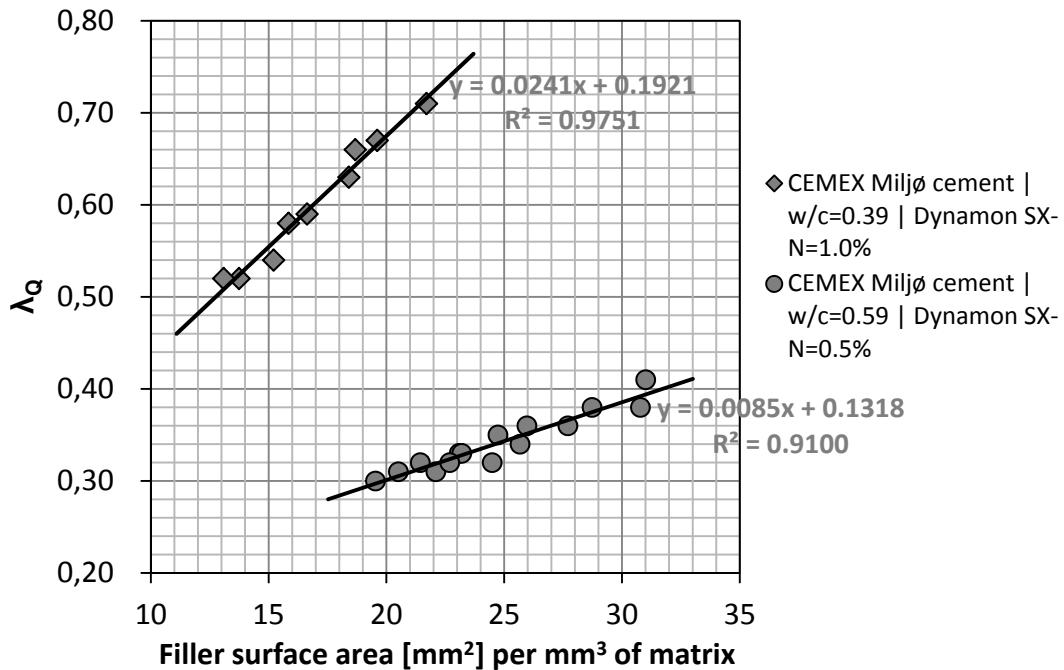
Figur 16 viser målt flytmotstand  $\lambda_q$  mot beregnet samlet overflateareal for fillerens. Resultatene gjelder matrikser med samme bindmiddelsammensetning, men forskjellig fillergradering og filler/ sementforhold. De to bindemiddelsammensetningene er basert på Cemex Miljøsement, med masseforhold  $m = 0,59$  og  $m = 0,39$ , med dosering Mapei Dynamon SX-N på hhv. 0,50 % og 1,00 %.

Fillerens overflateareal er beregnet ut fra graderingene som er vist i figur 2, med forutsetningen om at fillerpartiklene er sfæriske. Dette gir sannsynligvis et litt lavere overflateareal enn det som er realistisk. Dersom fillerne har tilnærmet samme kubisitet i hele graderingsområdet (0 - 125 $\mu$ m) vil ikke denne feilen ha betydning for den generelle tendensen som kan hentes ut av sammenstillingen.

Sammenstillingen viser at fillerens effekt på matriksens flytmotstand tilnærmet entydig kan beskrives ved hjelp av overflatearealet, uavhengig av om endringer i overflateareal skyldes endret doseringsnivå ( $f_i/c$ ) eller endret fillergradering. Hvis effekten av endringer i fillermengde og gradering viser seg å være så forutsigbar som dette resultatet indikerer, vil dette kunne vise seg å være svært nyttig ved proporsjonering og produksjon av betong basert på knust sand.



Et tilsvarende resultat ble funnet av Cepuritis /6/ i hans Ph.D –avhandling. Dette arbeidet omfattet knuste fillere fra flere typer bergarter, men et noe mindre antall prøveresultater per fillertype.



Figur 16. Målt flytmotstand  $\lambda_Q$  mot beregnet samlet overflateareal for fillerene. Resultatene gjelder matrikser med samme bindmiddelsammensetning, men forskjellig fillergradering og filler/ sementforhold. De to bindemiddelsammensetningene er basert på Cemex Miljøsement, med masseforhold  $m = 0,59$  og  $0,39$ , med dosering Mapei Dynamon SX-N på hhv.  $0,50\%$  og  $1,00\%$ .

## 7 Oppsummering og konklusjon

Forsøksprogrammet har gitt meget konsistente resultater. Hovedresultatet er som forventet at:

- Finere filler gir høyere flytmotstand
- Mer filler gir høyere flytmotstand

Ingen av sekundærparametrene masseforhold, sementtype, type og dosering tilsetningsstoff har gitt effekter som forstyrrer dette resultatet. Effekten av økt overflateareal på matriksens flytmotstand ved bruk av mer filler eller finere filler, er som forventet vesentlig sterkere ved lave masseforhold enn ved høye.

For en gitt tilslagstype / bergart i kombinasjon med et bestemt bindemiddel (sementtype og masseforhold) ser fillerens effekt på matriksens reologi ut til å kunne beskrives som en entydig funksjon av overflatearealet.

Dette viser at fillerdosering og fillergradering sannsynligvis kan brukes aktivt for å styre og tilpasse betongens støpelighetsegenskaper, forutsatt at det finnes et utvalg av fillerilder, og at fillernes gradering er kjent og tilstrekkelig stabil over tid. Dette er i praksis bare mulig ved industriell produksjon av tilslag i mange fraksjoner, for eksempel slik Velde gjennomfører det.

Velde-fillerne har totalt sett en effekt på matriksens flytmotstand som er sammenlignbar med effekten av masseforholdet i matrikser med Cemex miljøsement.

## 8 Referanser

1. *Cepuritis, R.*, "Manufactured sand crushing process parameters: short review and evaluation for sand performance in fresh concrete," Nordic Concrete Research, Publication no. 48, 1/2013
2. *Mørtzell, E.*, "Modellering av delmaterialenes betydning for betongens konsistens" Dr. ing. avhandling, Institutt for konstruksjonsteknikk, Norges Tekniske Høgskole, Trondheim 1996
3. *Mørtzell, E. Maage, M., Smeplass, S.*, "A Particle Matrix Model for Prediction of Workability of Concrete", Proceedings of the International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete. Glasgow, Scotland 1995.
4. *Ng, S., Mujica, H., Smeplass, S.*, "Design of a simple and cost-efficient mixer for matrix rheology testing", Nordic Concrete Research, Publication no. 51, 3/2014
5. *Smeplass, S.*, "Applicability of the particle-matrix model to LWAC", EuroLightCon, Report BE96-3942/R12, Brussels, 2000.
6. *Cepuritis, R., Jacobsen, S., Smeplass, S., Mørtzell, E., Wigum, B., Ng, S.*, "Influence of crushed aggregate fines with micro-proportioned particle size distributions on rheology of cement paste, Construction and Building Materials, submitted 2015.

## Vedlegg A.

Eksempel på utskrift fra regnearkverktøy for generering av resepter til FlowCyl-forsøkene.

| Matriks |                    | ©ss 97-08-19 |
|---------|--------------------|--------------|
| Id:     | COIN FA 2.1 og 2.3 |              |
| Mix no: | 4                  |              |

|  |
|--|
| - Masseforhold anGIS i forhold til valgte virkningsfaktorer          |
| - Silikastøv, flyveaske og filler anGIS i prosent av sementmengde    |
| - Tilsetningsstoffer anGIS som våt vektprosent av sement             |
| - Densitet av tilsetningsstoffer, densitet av tørrstoff              |
| - I resepten anGIS silikastøv i tørr vekt                            |
| - I resepten anGIS tilsetningsstoffer i våt vekt.                    |
| - I resepten er vannmengden redusert mhp vann i tilsetningsstoffene. |

| Parameter    | Value | Unity | k   |
|--------------|-------|-------|-----|
| V/(c+Lkp)    | 0.59  |       |     |
| s/c          | 0     | %     | 1   |
| fa/c         | 0     | %     | 0.7 |
| fl/c         | 51    | %     | -   |
| Fine         | 10    | %     |     |
| Intermed.    | 50    | %     |     |
| Coarse       | 40    | %     |     |
| SX-N         | 0.5   | %     |     |
|              | 0     | %     |     |
| Ønsket volum | 2     | l     |     |

| Consistent                            | Density | Moist. | Mengde |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|
| Cemex Miljø                           | 3,150   | -      | 1,823  |
| Silikastøv                            | 2,200   | -      | 0,000  |
| Flyveaske                             | 2,200   | -      | 0,000  |
| Fine                                  | 2,700   | -      | 0,093  |
| Intermed.                             | 2,700   | -      | 0,465  |
| Coarse                                | 2,700   | -      | 0,372  |
| Vann                                  | 1,000   | -      | 1,068  |
| SX-N                                  | 1,200   | 84     | 0,009  |
|                                       | 0,000   | 0      | 0,000  |
| Matriksdensitet (kg/dm <sup>3</sup> ) | 1,915   |        | 3,830  |

volum ok

## Vedlegg B.

Resultater fra FlowCyl-forsøk. Primærparametre.

| Parameter           | Combination no | Cement      | w/c  | SP type | SP/c   | Fillers/ filler sources |           |        | fi/c | Grading        | $\lambda_q$ | $\lambda_{q20}$ |
|---------------------|----------------|-------------|------|---------|--------|-------------------------|-----------|--------|------|----------------|-------------|-----------------|
|                     |                |             |      |         |        | Fine                    | Intermed. | Coarse |      |                |             |                 |
| Model test          | 1              | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 100 %                   | 0 %       | 0 %    | 0,51 | Model test M60 | 0,38        | 0,38            |
|                     | 2              | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 100 %     | 0 %    | 0,51 | Model test M60 | 0,33        | 0,36            |
|                     | 3              | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 0 %       | 100 %  | 0,51 | Model test M60 | 0,32        | 0,34            |
| Ref. filler grading | 4              | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,51 | Reference      | 0,33        | 0,36            |
|                     | 5              | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,51 | Fine comb.     | 0,36        | 0,39            |
|                     | 6              | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,51 | Long comb.     | 0,34        | 0,36            |
|                     | 7              | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,51 | Coarse comb.   | 0,31        | 0,36            |
|                     | 8              | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,32 | Reference      | 0,59        | 0,65            |
|                     | 9              | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,32 | Long comb.     | 0,63        | 0,70            |
|                     | 10             | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,32 | Coarse comb.   | 0,58        | 0,62            |
|                     | 11             | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,46 | Reference      | 0,31        | 0,31            |
|                     | 12             | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,46 | Fine comb.     | 0,32        | 0,35            |
|                     | 13             | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,46 | Long comb.     | 0,32        | 0,34            |
| fi/c reduced        | 14             | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,46 | Coarse comb.   | 0,30        | 0,32            |
|                     | 15             | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,27 | Reference      | 0,52        | 0,57            |
|                     | 16             | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,27 | Long comb.     | 0,54        | 0,59            |
|                     | 17             | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,27 | Coarse comb.   | 0,52        | 0,57            |
|                     | 18             | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,56 | Reference      | 0,36        | 0,39            |
| fi/c increased      | 19             | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 60 %                    | 40 %      | 0 %    | 0,56 | Fine comb.     | 0,41        | 0,44            |
|                     | 20             | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,56 | Long comb.     | 0,38        | 0,41            |
|                     | 21             | Cemex Miljø | 0,59 | SX-N    | 0,50 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,56 | Coarse comb.   | 0,35        | 0,36            |
|                     | 22             | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 10 %                    | 50 %      | 40 %   | 0,37 | Reference      | 0,67        | 0,71            |
|                     | 23             | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 40 %                    | 30 %      | 30 %   | 0,37 | Long comb.     | 0,71        | 0,78            |
|                     | 24             | Cemex Miljø | 0,39 | SX-N    | 1,00 % | 0 %                     | 40 %      | 60 %   | 0,37 | Coarse comb.   | 0,66        | 0,71            |

Resultater fra FlowCyl-forsøk. Sekundærparametre.

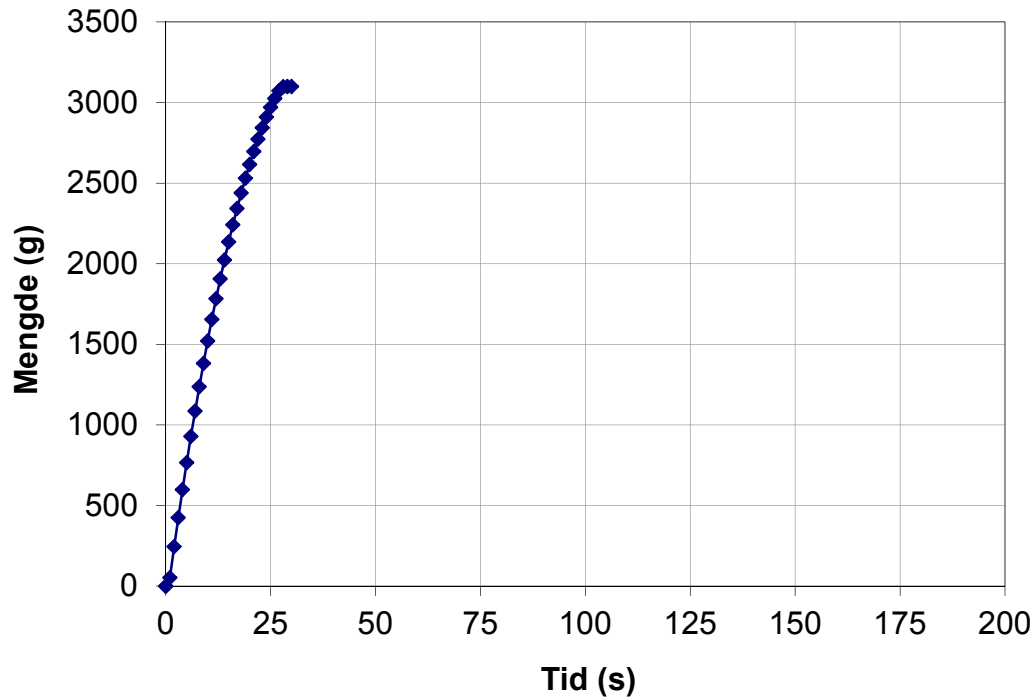
|  |    |                |      |      |        |      |      |      |      |              |      |
|--|----|----------------|------|------|--------|------|------|------|------|--------------|------|
| Cement                                 | 25 | Cemex Rapid    | 0,59 | SX-N | 0,50 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,51 | Reference    | 0,43 |
|  | 26 | Cemex Rapid    | 0,39 | SX-N | 1,00 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,32 | Reference    | 0,79 |
|  | 27 | Cemex Rapid    | 0,59 | SX-N | 0,50 % | 60 % | 40 % | 0 %  | 0,51 | Fine comb.   | 0,44 |
|  | 28 | Cemex Rapid    | 0,39 | SX-N | 1,00 % | 0 %  | 40 % | 60 % | 0,32 | Coarse comb. | 0,75 |
|  | 29 | Norcem Std. FA | 0,59 | SX-N | 0,50 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,51 | Reference    | 0,45 |
|  | 30 | Norcem Std. FA | 0,39 | SX-N | 1,00 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,32 | Reference    | 0,77 |
|  | 31 | Norcem Std. FA | 0,59 | SX-N | 0,50 % | 60 % | 40 % | 0 %  | 0,51 | Fine comb.   | 0,45 |
|  | 32 | Norcem Std. FA | 0,39 | SX-N | 1,00 % | 0 %  | 40 % | 60 % | 0,32 | Coarse comb. | 0,75 |
|  | 33 | Norcem Ant. FA | 0,59 | SX-N | 0,50 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,51 | Reference    | 0,38 |
|  | 34 | Norcem Ant. FA | 0,39 | SX-N | 1,00 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,32 | Reference    | 0,64 |
|  | 35 | Norcem Ant. FA | 0,59 | SX-N | 0,50 % | 60 % | 40 % | 0 %  | 0,51 | Fine comb.   | 0,42 |
|  | 36 | Norcem Ant. FA | 0,39 | SX-N | 1,00 % | 0 %  | 40 % | 60 % | 0,32 | Coarse comb. | 0,64 |
| SP                                     | 37 | Cemex Miljø    | 0,59 | SR-N | 0,50 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,51 | Reference    | 0,32 |
|  | 38 | Cemex Miljø    | 0,39 | SR-N | 1,00 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,32 | Reference    | 0,64 |
|  | 39 | Cemex Miljø    | 0,59 | SR-N | 0,50 % | 60 % | 40 % | 0 %  | 0,51 | Fine comb.   | 0,37 |
|  | 40 | Cemex Miljø    | 0,39 | SR-N | 1,00 % | 0 %  | 40 % | 60 % | 0,32 | Coarse comb. | 0,62 |
|  | 41 | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N | 0,30 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,51 | Reference    | 0,38 |
|  | 42 | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N | 0,70 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,32 | Reference    | 0,69 |
| SP dosage                              | 43 | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N | 0,30 % | 60 % | 40 % | 0 %  | 0,51 | Fine comb.   | 0,42 |
|  | 44 | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N | 0,70 % | 0 %  | 40 % | 60 % | 0,32 | Coarse comb. | 0,67 |
|  | 45 | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N | 0,70 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,51 | Reference    | 0,31 |
|  | 46 | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N | 1,30 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,32 | Reference    | 0,56 |
|  | 47 | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N | 0,70 % | 60 % | 40 % | 0 %  | 0,51 | Fine comb.   | 0,34 |
|  | 48 | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N | 1,30 % | 0 %  | 40 % | 60 % | 0,32 | Coarse comb. | 0,55 |
| Concrete trials *                      | 4R | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N | 1,00 % | 10 % | 50 % | 40 % | 0,51 | Reference    | 0,31 |
|  | 5R | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N | 1,00 % | 60 % | 40 % | 0 %  | 0,51 | Fine comb.   | 0,31 |
| Tests for Veides concrete production** | 49 | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N | 1,40 % | 30 % | 70 % | 0 %  | 0,4  | Reference    | 0,26 |
|  | 50 | Cemex Miljø    | 0,59 | SX-N | 1,40 % | 50 % | 50 % | 0 %  | 0,51 | Fine comb.   | 0,33 |
|  | 51 | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N | 1,50 % | 30 % | 70 % | 0 %  | 0,27 | Reference    | 0,59 |
|  | 52 | Cemex Miljø    | 0,39 | SX-N | 1,50 % | 50 % | 50 % | 0 %  | 0,34 | Fine comb.   | 0,77 |

\*Also includes the filler from the aggregates

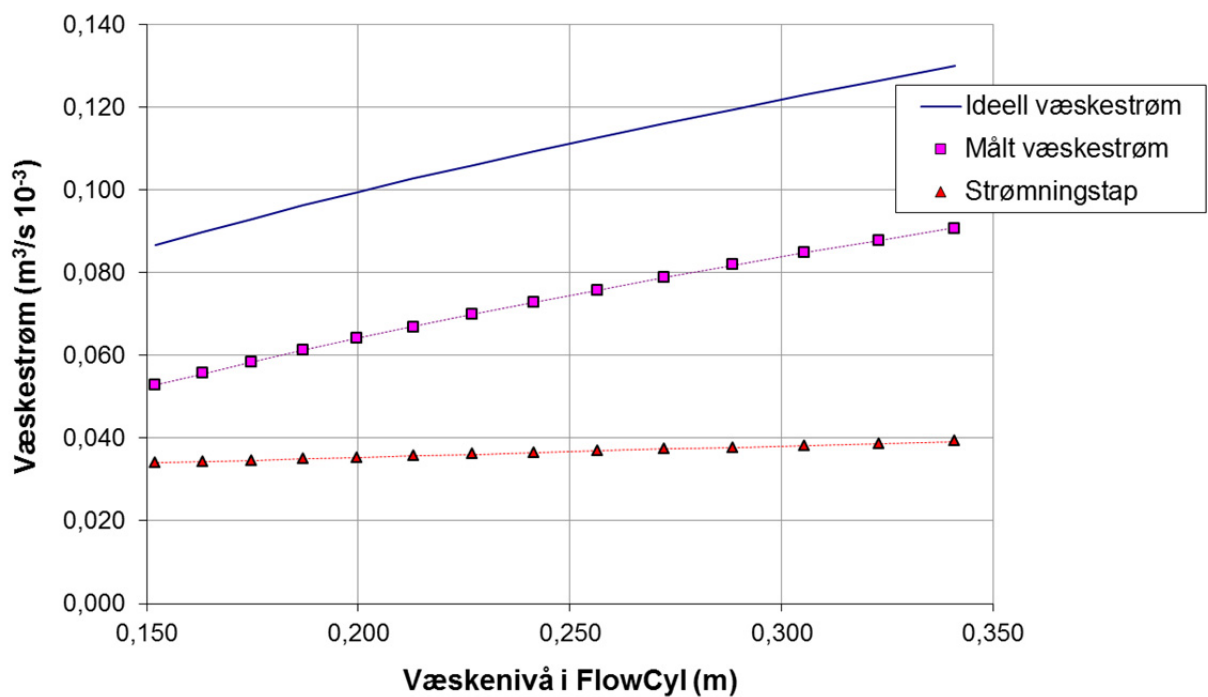
\*\*Intermediate filler from sand

## Vedlegg C.

Eksempel på måledata fra FlowCyl-forsøk. Data filtrert til loggefrequens 1/sek. Resultatene gjelder blanding 4.



Eksempel på ideell væskestrøm, registrert væskestrøm og strømningstap i FlowCyl, beregnet ut fra måledata. Resultatene gjelder blanding 4.







**SINTEF Building and Infrastructure** is the third largest building research institute in Europe. Our objective is to promote environmentally friendly, cost-effective products and solutions within the built environment. SINTEF Building and Infrastructure is Norway's leading provider of research-based knowledge to the construction sector. Through our activity in research and development, we have established a unique platform for disseminating knowledge throughout a large part of the construction industry.

**COIN – Concrete Innovation Center** is a Center for Research based Innovation (CRI) initiated by the Research Council of Norway. The vision of COIN is creation of more attractive concrete buildings and constructions. The primary goal is to fulfill this vision by bringing the development a major leap forward by long-term research in close alliances with the industry regarding advanced materials, efficient construction techniques and new design concepts combined with more environmentally friendly material production.

