

# Betong SV-Standard og SV-Lavvarme

Bestandighetsprøving; effekt av bindemiddeltipe og masseforhold

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1022



**Tittel**

Betong SV-Standard og SV-Lavvarme

**Undertittel**

Bestandighetsprøving; effekt av bindemiddeltype og masseforhold

**Forfatter**

Øyvind Bjøntegaard og Eva Rodum

**Avdeling**

Konstruksjoner

**Seksjon**

Konstruksjonsteknikk

**Prosjektnummer**

L10586

**Rapportnummer**

1022

**Prosjektleder**

Øyvind Bjøntegaard

**Godkjent av**

Bård M. Pedersen

**Emneord**

Betong, frostmotstand, kloridmotstand, spesifikk elektrisk motstand, luftporestruktur, hydrasjonsvarme

**Sammendrag**

Bestandighetsegenskaper er undersøkt for 11 betonger med ulike bindemiddel-sammensetning, hvor alle pr. i dag er godkjent og innenfor rammene for henholdsvis betongspesifikasjonen SV-Standard ( $v/b=0,39$ ) eller SV-Lavvarme ( $v/b=0,44$ ) i vegnormal N400 Bruprosjektering (2024). Hovedvariablene i studien er effekten av sementtype, flygeaskeinnhold og masseforhold. Prøving av frostmotstand og kloridmotstand er gitt stor oppmerksomhet og resultatene er relatert til andre egenskaper som også er målt (luftporestruktur, elektrisk motstand, o.a.). Fra forsøk med langtids klorideksponering i sjøvann i 8 år er betongenes aldringsegenskaper bestemt.

**Title**

Concrete SV-Standard and SV-Lowheat

**Subtitle**

Durability testing; effect of binder type and mass ratio

**Author**

Øyvind Bjøntegaard og Eva Rodum

**Department**

Structures

**Section**

Structural Engineering

**Project number**

L10586

**Report number**

1022

**Project manager**

Øyvind Bjøntegaard

**Approved by**

Bård M. Pedersen

**Key words**

Concrete, frost resistance, chloride resistance, specific electrical resistivity, air pore structure, hydration heat

**Summary**

Durability properties have been investigated for 11 concretes, all of which are currently approved and within the frameworks of the concrete specifications SV-Standard ( $w/c=0,39$ ) or SV-Lowheat ( $w/c=0,44$ ) in the Norwegian bridge design code N400:2024. The main variables in the study are the effects of cement type, fly ash content, and mass ratio. Testing of frost- and chloride resistance has been given special attention, and the results are related to other properties that have also been measured. From long-term chloride exposure experiments in seawater over 8 years, the aging properties of the concretes have been determined.

## Innhold

|       |                                                                             |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Bakgrunn/motivasjon .....                                                   | 3  |
| 2     | Materialer, bindemidler og prøvningsprogram .....                           | 4  |
| 2.1   | Innledning .....                                                            | 4  |
| 2.2   | Materialleveranser og kjemiske analyser.....                                | 4  |
| 2.3   | Betonger/bindemidler .....                                                  | 5  |
| 2.4   | Overordnet forsøksprogram .....                                             | 6  |
| 3     | Betongresepter, blanding og utstøping .....                                 | 7  |
| 4     | Prøvningsmetoder .....                                                      | 10 |
| 4.1   | Varmeutvikling i herdekasse.....                                            | 10 |
| 4.2   | Trykkfasthet og densitet.....                                               | 10 |
| 4.3   | Luftporestruktur .....                                                      | 10 |
| 4.4   | Porøsitet .....                                                             | 10 |
| 4.5   | Spesifikk elektrisk motstand.....                                           | 11 |
| 4.6   | Frostmotstand og karbonatisering.....                                       | 12 |
| 4.6.1 | 14 uker i 60% RF; karbonatisering, tynnslip og frostprøving (SINTEF).....   | 12 |
| 4.6.2 | 14 uker vannlagring; frostprøving ved S.lab på tilsendte prøvestykker ..... | 13 |
| 4.6.3 | Standard frostprøvning; blanding og prøving ved S.lab.....                  | 14 |
| 4.6.4 | Oppsummering; prosedyrer og oppstart frostprøving .....                     | 14 |
| 4.7   | Kloriddiffusjon.....                                                        | 15 |
| 4.7.1 | Ulike metoder, samlet oversikt.....                                         | 15 |
| 4.7.2 | Kloriddiffusjon ved SINTEF, 6 % NaCl (start ved 91 døgn).....               | 16 |
| 4.7.3 | Kloriddiffusjon ved SINTEF og S.lab, 16,5 % NaCl (start ved 91 døgn) .....  | 16 |
| 4.7.4 | Langtids sjøvanneksponering av betongplater ved S.lab (start 7 døgn) .....  | 16 |
| 4.8   | Naturlig karbonatisering.....                                               | 19 |
| 5     | Resultater og diskusjon.....                                                | 20 |
| 5.1   | TSS-behov og fersk betongegenskaper .....                                   | 20 |
| 5.2   | Herdevarme .....                                                            | 22 |
| 5.3   | Trykkfasthet .....                                                          | 25 |
| 5.3.1 | Trykkfastheter ved SINTEF, alle 11 betongene.....                           | 25 |
| 5.3.2 | Trykkfasthet ved S.lab, og sammenlikning med SINTEF.....                    | 27 |

|         |                                                                          |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4     | Elektrisk motstand.....                                                  | 30 |
| 5.4.1   | Spesifikk elektrisk motstand, SINTEF.....                                | 30 |
| 5.4.2   | Spesifikk elektrisk motstand og relasjon til kloriddiffusjon.....        | 32 |
| 5.4.3   | Spesifikk elektrisk motstand, Sentrallab.....                            | 33 |
| 5.4.4   | Spesifikk elektrisk motstand, sammenlikning mellom laboratoriene .....   | 34 |
| 5.5     | Luftporestruktur og porøsitet .....                                      | 36 |
| 5.5.1   | Luftporestrukturanalyse .....                                            | 36 |
| 5.5.2   | Porøsitet .....                                                          | 36 |
| 5.5.3   | Luftinnhold målt i fersk betong, ved PF og ved porestrukturanalyse ..... | 40 |
| 5.6     | Naturlig karbonatisering.....                                            | 41 |
| 5.7     | Frostmotstand .....                                                      | 45 |
| 5.8     | Kloridmotstand.....                                                      | 52 |
| 5.8.1   | NS-EN 206+NA (6 % NaCl) og NT Build 443 (16,5 % NaCl) .....              | 52 |
| 5.8.2   | Sjøvannseksponering i 8 år .....                                         | 55 |
| 5.8.2.1 | Innledning.....                                                          | 55 |
| 5.8.2.2 | Målte kloridprofiler .....                                               | 57 |
| 5.8.2.3 | Kloridinntrengning.....                                                  | 59 |
| 5.8.2.4 | Beregnete kloriddiffusjonskoeffisienter .....                            | 61 |
| 5.8.2.5 | Beregning av aldringseksponent og $D_{app}(50 \text{ år})$ .....         | 63 |
| 5.8.2.6 | Eksponering i sjøvann (ekstrapolert) vs. standardprøving (NaCl).....     | 66 |
| 5.8.2.7 | Minimumsoverdekning i henhold til SN-EN 1992-1-1:2023 .....              | 67 |
| 6       | Oppsummering .....                                                       | 68 |
| 7       | Videre behandling av resultatene .....                                   | 70 |
| 8       | Referanser.....                                                          | 70 |

Vedlegg:

|                                                                         |      |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| VEDLEGG 1 SINTEF-materialene: Kjemiske analyser (fra EMPA) og vurdering | V1   |
| VEDLEGG 2 S.lab-materialene: Kjemiske analyser og datablad              | V35  |
| VEDLEGG 3 Betongproporsjonering og datablad tilslag                     | V42  |
| VEDLEGG 4 Parametere benyttet i analysen av herdekasseforsøkene         | V70  |
| VEDLEGG 5 Naturlig karbonatisering                                      | V76  |
| VEDLEGG 6 Kloridprofiler NS-EN 206+NA                                   | V79  |
| VEDLEGG 7 Kloridprofiler NT Build 443                                   | V81  |
| VEDLEGG 8 Kloridprofiler langtids sjøeksponering                        | V83  |
| VEDLEGG 9 SINTEF sluttrapport                                           | V108 |

## 1 Bakgrunn/motivasjon

I vegnormal N400 Bruprosjektering ble det i 2015 innført tre nye betongspesifikasjoner: SV-Standard, SV-Lavvarme og SV-Kjemisk, hvor de to sistnevnte er spesialbetonger. Krav til disse betongenes delmaterialer og sammensetning var på den tiden gitt i retningslinje R762 Prosesskode 2 – Standard beskrivelse for bruer og kaier<sup>1</sup>. I 2022 ble disse kravene overført til vegnormal N400.

En hovedmålsetning med herværende laboratoriestudium var å dokumentere ulike bestandighetsegenskaper for betonger med ulike bindemiddelkombinasjoner. Resultatene dannet grunnlaget for utarbeidelsen av en godkjenningsordning for sementer og bindemidler som ble innført i 2018. I henhold til vegnormal N400 Bruprosjektering skal nå alle sementprodukter/bindemiddelkombinasjoner godkjennes av Vegdirektoratet i henhold til denne godkjenningsordningen ([Godkjenning av sementer | Statens vegvesen](#)).

Laboratorieprogrammet var beskrevet i detalj av Statens vegvesen i et konkurransegrunnlag som ble utlyst i DOFFIN/TED i juli 2015. SINTEF ble tildelt oppdraget og arbeidene ble igangsatt høsten 2015. Det er prøvd i alt 11 betonger med ulike bindemidler, hvorav 8 i kategorien «SV-Standard» og 3 i kategorien «SV-Lavvarme». «SV-Kjemisk» er ikke undersøkt. Laboratorieprogrammet omfatter: Luftinnhold, luftporestruktur, herdevarme, karbonatisering, frostmotstand, kapillærabsorpsjon, kloridmotstand, trykkfasthet og spesifikk elektrisk motstand. Når det gjelder kloridmotstand gjøres det både langtids eksponeringsforsøk i sjøvann og standard akselererte forsøk.

Mesteparten av prøvingen er utført ved SINTEF i Trondheim, mens Statens vegvesen sitt Sentrallaboratorium (S.lab) i Oslo har gjennomført relativt omfattende utfyllende prøvning, inklusive langtidseksponering i sjøvann.

Resultatene fra blanding og prøving av resept 1–11 er rapportert i 11 SINTEF prøvingsrapporter, samt en SINTEF sluttrapport hvor middelerverdiene for hver blanding og egenskap er presentert (Vedlegg 9).

Denne rapporten oppsummerer alle resultatene, også resultater fra prøving ved Statens vegvesen sitt Sentrallaboratorium (forkortet «S.lab.» i det videre). Effekten av betongsammensetning (bindemidler og masseforhold) på ulike bestandighetsegenskaper er diskutert.

<sup>1</sup> Merk at i desember 2024 så ble Prosesskode 1 (R761) og Prosesskode 2 (R762) slått sammen til en retningslinje og utgitt som: R761 Prosesskoden Standard beskrivelsestekster for veger, tunneler, bruer og kaier.

## 2 Materialer, bindemidler og prøvningsprogram

### 2.1 Innledning

Alle betongene som er undersøkt, totalt 11 stk., er med Årdal tilslag ( $D_{maks}=16$  mm), og alle har samme tilslagssammensetning og tilslagsvolum. Bindemiddelvolumet er dermed også det samme i alle betongene (325 liter/m<sup>3</sup>), mens bindemiddelsammensetningen varierer. Bindemiddelsammensetninger, masseforhold og støpedatoer for de ulike betongene er gitt i Tabell 1. Alle betongene har flygeaske (FA) i seg, unntatt den ene betongen med Miljøsement som består av 30% slagg. Det ble med bruk av luftinnførende tilsetningsstoff siktet mot et totalt luftinnhold på 4 % i fersk betong.

De samme betongene har vært blandet både ved SINTEF Byggforsk i Trondheim (alle 11 betongene) og ved Statens vegvesen sitt Sentrallaboratorium (S.lab) i Oslo (7 av betongene).

### 2.2 Materialleveranser og kjemiske analyser

De betongene som ble blandet både ved SINTEF og ved S.lab. hadde nominelt identiske resepter, men de benyttet ulike uttak/leveranser av materialene. For SINTEF-blandingene ble sementer og flygeaske sendt fra leverandørene (Norcem, Cemex og Aalborg/Unicon) høsten 2015. Silikastøv ble tatt fra SINTEFs lager. Fra disse materialene ble det gjort egne prøveuttak ved SINTEF som ble sendt til Empa i Sveits for kjemiske analyser. Det ble også foretatt en egen vurdering av analyseresultatene, se Vedlegg 1.

Materialene S.lab. benyttet var overskuddsmaterialer fra et eget felt/lab.-program som startet opp ved RISE (den gang CBI) i Borås høsten 2014 [1]. Materialene ble med andre ord sendt fra de respektive leverandørene til RISE i 2014, deretter senere sendt til S.lab. For disse materialene mottok vi fra Norcem kjemiske analyser for sement og flygeaske, men for Rapid Aalborg- og Miljøsementen har vi kun datablad fra nettsidene. Kjemiske analyser og datablad finnes i Vedlegg 2.

Samme type silikastøv (ukompaktet), Årdal tilslag (se Vedlegg 3) og tilsetningsstoff ble brukt i begge laboratoriene, men også dette er ulike leveranser.

Følgende delmaterialer er benyttet:

- AnlFA: Norcem Anleggsement FA, CEM II/A-V 42.5 N (17 % FA av sementvekt)
- StdFA: Norcem Standardsement FA, CEM II/B-M 42.5 R (18 % FA av sementvekt)
- Miljø: Cemex Miljøsement, CEM II/B-S 52.5 N (30 % slagg av sementvekt)
- Aal: Rapid Aalborgsement, CEM I 52.5 N (LA) (ren sement, uten tilsetningsmaterialer)
- Silikastøv, Elkem 940 U
- Flygeaske (FA) Klasse A (NS-EN 450-1), levert av Norcem
- Norstone tilslag fra Årdal i Ryfylke, fraksjon 0-8 mm og 8-16 mm
- SP-stoff: Mapei Dynamon SX-23
- L-stoff: Mapeair 25 (tynnet ut 1:9)

## 2.3 Betonger/bindemidler

Total 11 betonger er undersøkt, hvorav 8 betonger samsvarer med dagens betongspesifikasjon «SV-Standard» med proporsjonert masseforhold 0,39, og 3 betonger samsvarer med betongspesifikasjonen «SV-lavvarme» med masseforhold 0,44. Disse to gruppene betonger er i det videre også omtalt som henholdsvis «Standard-betong» og «LV-betong» (LV=lavvarme).

Alle betongene har 4% silikastøv av bindemiddelmengden. Navn på betongene, bindemiddelsammensetning, masseforhold og støpedatoer er gitt i Tabell 1. Se neste kapittel for detaljerte betongresepter.

Den benyttede AnlFA-sementen består av 17% flygeaske (FA), mens StdFA-sementen har 18% FA. For betonger med totalt FA-innhold over disse verdiene er det tilsatt ekstra FA i blandedprosessen. For FA tilsatt ved blanding er det brukt k-faktor 0,7 ved beregning av masseforholdet. For betongene med Aalborgsement (CEM I) betyr dette at all FA er tilsatt og dermed beregnet med faktor 0,7.

TABELL 1 OVERSIKT OVER BETONGENE SOM ER UNDERSØKT (KUN BINDEMIDLENE ER ANGITT)

| Betong nr. | Navn        | Sement-type | Totalt FA-innhold <sup>1)</sup> % | Silikastøv -innhold <sup>1)</sup> % | Masseforhold | Støpedato SINTEF | Støpedato S.lab |
|------------|-------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------|------------------|-----------------|
| 1          | SV-betonger | AnlFA       | 16,3 <sup>2)</sup>                | 4                                   | 0,39         | 15.12.2015       | –               |
| 2          |             | AnlFA30     | -- ‘ ‘ --                         |                                     |              | 14.12.2015       | 25.08.2016      |
| 3          |             | StdFA       | 17,3 <sup>2)</sup>                |                                     |              | 03.11.2015       | 25.08.2016      |
| 4          |             | StdFA30     | -- ‘ ‘ --                         |                                     |              | 04.11.2015       | 30.08.2016      |
| 5          |             | Aal14       | Aalborg                           |                                     |              | 11.11.2015       | –               |
| 6          |             | Aal20       | -- ‘ ‘ --                         |                                     |              | 17.11.2015       | –               |
| 7          |             | Aal30       | -- ‘ ‘ --                         |                                     |              | 18.11.2015       | 01.09.2016      |
| 8          |             | Miljø       | Miljø                             |                                     |              | 25.11.2015       | –               |
| 9          | LV-betonger | LV AnlFA40  | 40                                | 4                                   | 0,44         | 16.12.2016       | 01.09.2016      |
| 10         |             | LV StdFA40  |                                   |                                     |              | 10.11.2015       | 06.09.2016      |
| 11         |             | LV Aal40    |                                   |                                     |              | 24.11.2015       | 06.09.2016      |

1) Silikastøv-, flygeaske(FA)- og slagginnhold er gitt som vekt-% av total bindemiddelmengde (klinker+FA+silika).

2) Gjelder de betongene der det ikke er tilsatt FA under blanding: AnlFA- og StdFA-sementen består henholdsvis av 17 % og 18 % FA av sementvekt. Etter som 4 % silikastøv er tilsatt blir FA-mengden henholdsvis 16,3% og 17,3 vekt-% av total bindemiddelmengde. Det samme gjelder Miljø som består av 30 % slagg av sementvekt, og får tilsvarende 28,8 vekt-% slagg av total bindemiddelmengde.

## 2.4 Overordnet forsøksprogram

Fra betongene som ble produsert ved SINTEF ble noen prøver sendt til S.lab for utfyllende prøving (pkt. 1c nedenfor). I tillegg ble det også gjort egne betongblandinger ved S.lab (pkt. 2 nedenfor). En overordnet oversikt over laboratorieopplegget er vist i Tabell 2. I tillegg ble fersk betongegenskaper målt, men dette er ikke angitt i tabellen. De ulike prøvningsmetodene er beskrevet mer i detalj i etterfølgende kapittel. Indeksene i Tabell 2 angir antall betonger som er prøvd og hvor de er tildannet/prøvd:

1. Betongblandinger og tildanning av prøvestykker ved SINTEF
  - a. prøving ved SINTEF: Alle 11 betongene – symbol «X»
  - b. prøving ved SINTEF: Kun 5 av betongene – symbol «X<sub>5</sub>» (1 AnIFA, 4 StdFA30, 5 Aal20, 8 Miljø, 9 LV AnIFA40)
  - c. prøving ved S.lab: Kun 6 av betongene, utført på tilsendte prøver fra SINTEF – symbol «X<sub>6</sub>» (2 AnIFA30, 3 Std, 6 Aal20, 7 Aal30, 10 LV StdFA40, 11 LV Aal40)
  - d. prøving ved S.lab: Alle 11 betongene, utført på tilsendte plater fra SINTEF – symbol «X»
2. Betongblandinger, tildanning av prøvestykker og prøving ved S.lab: 7 av betongene – symbol «Y<sub>7</sub>» (Betong 2 AnIFA30, 3 StdFA, 4 StdFA30, 7 Aal30, 9 LV AnIFA40, 10 LV StdFA40, 11 LV Aal40)

TABELL 2 OVERSIKT OVER SAMLET LABORATORIEOPPLEGG VED SINTEF OG S.LAB

| Metode/egenskap, eksponering |                                                | Prøvningstermin / start eksponering      |                    |                                 |                |       |                    |                    | 5,5 år          | 8 år |
|------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|----------------|-------|--------------------|--------------------|-----------------|------|
|                              |                                                | 28 d                                     | 56 d               | 91 d                            | 122 d          | 180 d | 1 år               | 2 år               |                 |      |
| Trykkfasthet                 |                                                | X + Y <sub>7</sub>                       | X + Y <sub>7</sub> | X + Y <sub>7</sub>              |                | X     | X                  | X + Y <sub>7</sub> |                 |      |
| Spesifikk elektrisk motstand |                                                | X + Y <sub>7</sub>                       | X + Y <sub>7</sub> | X + Y <sub>7</sub>              |                | X     | X + Y <sub>7</sub> | X + Y <sub>7</sub> |                 |      |
| Naturlig karb.               | Lagret utendørs, beskyttet mot regn            |                                          |                    | X                               |                |       | X                  | X                  | X <sup>2)</sup> |      |
| Frostprøving                 | Lagret 14 uker i 65% RF (+ tynnslip/mikroskop) |                                          |                    |                                 | X (+X)         |       |                    |                    |                 |      |
|                              | Lagret 13 uker i vann og 1 uke i 65% RF        |                                          |                    |                                 | X <sub>6</sub> |       |                    |                    |                 |      |
|                              | Standard prosedyre                             | Y <sup>1)</sup> <sub>7</sub>             |                    |                                 |                |       |                    |                    |                 |      |
| Kloriddiffusjon              | 16,5% NaCl i 35 døgn                           |                                          |                    | X <sub>5</sub> + X <sub>6</sub> |                |       |                    |                    |                 |      |
|                              | 6% NaCl i 91 døgn                              |                                          |                    | X                               |                |       |                    |                    |                 |      |
|                              | Lagret i sjøvann fra 7 døgn                    |                                          |                    |                                 |                |       | X                  | X <sup>3)</sup>    | X               | X    |
| Porestruktur                 | Luftporestrukturanalyse                        |                                          |                    | X                               |                |       |                    |                    |                 |      |
|                              | Forenklet PF                                   |                                          |                    | X + Y <sub>7</sub>              |                |       |                    | X                  |                 |      |
| Herdekasse                   | Herdevarme                                     | X (kontinuerlig måling fra 0 til 7 døgn) |                    |                                 |                |       |                    |                    |                 |      |

<sup>1)</sup> Start eksponering er ved 31 døgn. <sup>2)</sup> Terminen er 5,75 år. <sup>3)</sup> Terminen er 2,5 år

### 3 Betongresepter, blanding og utstøping

De proporsjonerte/nominelle betongreseptene er gitt i Tabell 3. Betongnavnene angir sementtype, og total mengde flygeaske (FA) (med unntak for sementen «Miljø» som inneholder 30 % slagg). Utskrift fra proporsjoneringsregnearkene er gitt i Vedlegg 3.

Betong 1–8 er SV-Standard-varianter med proporsjonert masseforhold = 0,39. Betong 9–11 er SV-Lavvarme-varianter (LV) med proporsjonert masseforhold = 0,44. Merk at LV-betongene ikke er prøvd i en 1 m<sup>3</sup> herdekske og det er derfor ukjent om de tilfredsstiller kravet til herdetemperatur (gitt i vegnormal N400:2024). Ekstra tilsatt flygeaske har virkningsfaktor 0,7 i masseforhold-beregningen. Silikastøv har virkningsfaktor 2,0.

**TABELL 3 PROPORSJONERTE/NOMINELLE BETONGRESEPTER**

| Materialer                                    | Betong 1<br>AnlFA       | Betong 2<br>AnlFA30 | Betong 3<br>StdFA       | Betong 4<br>StdFA30 | Betong 5<br>Aal14 | Betong 6<br>Aal20 | Betong 7<br>Aal30 | Betong 8<br>Miljø          | Betong 9<br>LV AnlFA40 | Betong 10<br>LV StdFA40 | Betong 11<br>LV Aal40 |
|-----------------------------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Norcem Anleggsement FA                        | 418,3                   | 347,6               |                         |                     |                   |                   |                   |                            | 277,9                  |                         |                       |
| Norcem Standardsement FA                      |                         |                     | 418,3                   | 351,8               |                   |                   |                   |                            |                        | 281,2                   |                       |
| Aalborg Rapidsement                           |                         |                     |                         |                     | 365,5             | 338,7             | 294,1             |                            |                        |                         | 234,6                 |
| Cemex Miljøsement                             |                         |                     |                         |                     |                   |                   |                   | 422,5                      |                        |                         |                       |
| Elkem Microsilica                             | 17,6                    | 17,6                | 17,6                    | 17,6                | 18,0              | 18,0              | 18,0              | 17,8                       | 16,6                   | 16,6                    | 16,9                  |
| Tilsatt flyveaske (Norcem)                    |                         | 72,2                |                         | 67,9                | 62,4              | 89,2              | 133,7             |                            | 117,6                  | 114,2                   | 167,7                 |
| Fritt vann                                    | 176,8                   | 169,0               | 176,8                   | 169,5               | 173,6             | 170,5             | 165,2             | 178,6                      | 173,1                  | 173,5                   | 169,8                 |
| Absorbert vann                                | 5,9                     | 5,9                 | 5,9                     | 5,9                 | 5,9               | 5,9               | 5,9               | 5,9                        | 5,9                    | 5,9                     | 5,9                   |
| Årdal sand 0/8                                | 902,2                   | 902,2               | 902,2                   | 902,2               | 902,2             | 902,2             | 902,2             | 902,2                      | 902,2                  | 902,2                   | 902,2                 |
| Årdal stein 8/16                              | 802,5                   | 802,5               | 802,5                   | 802,5               | 802,5             | 802,5             | 802,5             | 802,5                      | 802,5                  | 802,5                   | 802,5                 |
| Mapei Dynamon SX-23                           | 1,7                     | 1,7                 | 1,7                     | 1,7                 | 2,2               | 2,2               | 2,2               | 1,3                        | 1,6                    | 1,6                     | 2,1                   |
| Mapeair 25 (1:9)                              | 4,4                     | 8,7                 | 4,4                     | 8,7                 | 3,6               | 3,6               | 7,6               | 2,6                        | 10,3                   | 10,3                    | 8,4                   |
| Tilsatt luftinnhold                           | 4,0 %                   |                     |                         |                     |                   |                   |                   |                            | 4,0 %                  |                         |                       |
| Proporsjonert densitet (kg/m <sup>3</sup> )   | 2324                    | 2317                | 2324                    | 2318                | 2331              | 2327              | 2322              | 2330                       | 2296                   | 2296                    | 2300                  |
| Total innhold av silikastøv <sup>1)</sup>     | 4,0 %                   |                     |                         |                     |                   |                   |                   |                            | 4,0 %                  |                         |                       |
| <b>Total innhold av FA/slagg<sup>1)</sup></b> | 16,3 % FA <sup>3)</sup> | 30 % FA             | 17,3 % FA <sup>3)</sup> | 30 % FA             | 14 % FA           | 20 % FA           | 30 % FA           | 28,8 % slagg <sup>3)</sup> | 40 % FA                | 40 % FA                 | 40 % FA               |
| Vann/bindemiddelforhold                       | 0,41                    | 0,39                | 0,41                    | 0,39                | 0,39              | 0,38              | 0,37              | 0,41                       | 0,42                   | 0,42                    | 0,40                  |
| <b>Masseforhold<sup>2)</sup></b>              | <b>0,39</b>             |                     |                         |                     |                   |                   |                   |                            | <b>0,44</b>            |                         |                       |
| Matriksvolum (l/m <sup>3</sup> )              | 352,5                   |                     |                         |                     |                   |                   |                   |                            | 352,5                  |                         |                       |
| Volum sementlim (l/m <sup>3</sup> )           | 325                     |                     |                         |                     |                   |                   |                   |                            | 325                    |                         |                       |
| Effektivt bindemiddel (kg/m <sup>3</sup> )    | 453                     | 433                 | 453                     | 435                 | 445               | 437               | 424               | 458                        | 393                    | 394                     | 386                   |

<sup>1)</sup> Flygeaske(FA)/silikastøv/slagg-innhold er gitt som vekt-% av total bindemiddelmengde (sement+FA+silika+slag)

<sup>2)</sup> Ved beregning av masseforholdet er virkningsfaktor  $k=1,0$  både for flygeaske (FA) og for slagg som er del av selve sementen. For ekstra tilsatt FA er  $k=0,7$ . For silikastøv er  $k_s=2,0$

<sup>3)</sup> FA-innholdet i AnlFA-sementen er 17 % og i StdFA-sementen 18 %. Slagginnholdet i Miljøsementen er 30%.

I begge laboratoriene ble alle prøvene for hver betong utstøpt fra en og samme betongblanding. Ved SINTEF var hver blanding på ca. 150 liter (250 liters Eirich tvangsblender), mens ved S.lab var hver blanding på 30 liter (50 liters Eirich tvangsblender). Proporsjonert/tilsatt luftinnhold var 4 %, akseptgrense for luftinnhold etter blanding var 3,5–6,0 %.

Blandeprosedyren var som følger:

- 1 min tørrblanding
- 1 min blanding ved tilsetning av vann
- ½ min blanding ved tilsetning av Dynamon SX-23 til ca 120 mm synkmål
- ½ min blanding ved tilsetning av Mapeair 25
- 1 min blanding ved evt etterdosering av Dynamon SX-23 til ca 200 mm synkmål
- 2 min henstillingstid
- 2 min blanding ved evt etterdosering av tilsetningsstoffer

Utstøping i henhold til NS-EN 12390-2. For hver betong (11 stk.) ble følgende prøver støpt ut ved SINTEF:

- 20 stk. 100 mm terninger
- 12 stk. ø100 mm x 200 mm sylindre
- 2 stk. ø150 mm x 300 mm sylinder
- 2 stk. 100 x 100 x 400 mm<sup>3</sup> prismer
- 2 stk. 250 x 400 x 100 mm<sup>3</sup> plater

For hver av 7 stk. betonger ble følgende prøver støpt ut ved S.lab:

- 10 stk. 100 mm terninger
- 6 stk. ø100 mm x 200 mm sylindre

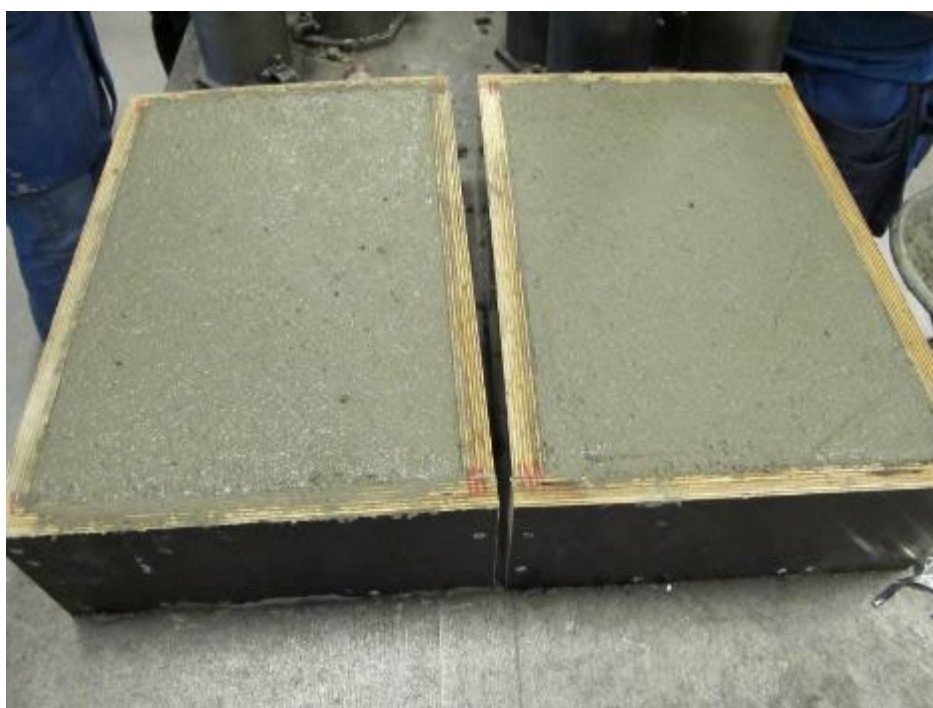
Følgende fersk betongegenskaper ble målt etter blanding:

- Luftinnhold, NS-EN 12350-7
- Densitet, NS-EN 12350-6
- Synkmål, NS-EN 12350-2
- Temperatur (termometer)

Det var grunn til å tro at enkelte av betongene ville ha langsom/lav fasthet i tidlig fase, og det ble derfor besluttet at alle prøvestykker skulle avformes etter 2 døgn for å unngå skade ved avforming. De utstøpte platene ble sendt fra SINTEF i sin støpeform og avformet etter ankomst i S.lab.



FIGUR 1 FØR STØPING AV PRØVER (SINTEF). FOTO: ØYVIND BJØNTEGAARD, STATENS VEGVESEN.



FIGUR 2 ETTER STØP AV BETONGPLATER (SINTEF). TO PLATER PR. BETONG BLE SENDT TIL S.LAB FOR LANGTIDS SJØVANNSEKSPONERING FRA 7 DØGNS ALDER. FOTO: ØYVIND BJØNTEGAARD, STATENS VEGVESEN.

## 4 Prøvningsmetoder

### 4.1 Varmeutvikling i herdekasse

Beskrevet utført i henhold til Statens vegvesens Håndbok R210:metode 444 (2015). Det ble benyttet en isolert kasse (100 mm polystyren) med betongvolum 50 liter (indre mål 37x37x37 cm<sup>3</sup>). Kontinuerlig logging hvert 15. min av lufttemperatur og betongtemperatur i 1 uke. Fra rådataene er det beregnet adiabatisk temperaturutvikling og isotherm varmeutvikling, i henhold til SINTEF Internprosedyre KS 14-05-04-525 (2014).

Betongene ble støpt ut i herdekassa i romtemperatur. Etter utstøping ble herdekassa flyttet inn i et klimarom som holdt 38 °C. Målt lufttemperatur er derfor rundt 38 °C rett etter innsetting i klimarommet. I analysene antas imidlertid herdekassens randtemperatur å stige lineært fra målt romtemperatur ved utstøping og opp til målt klimaromtemperatur (rundt 38 °C) i løpet av de første 6 timene. Dette gjøres fordi isolasjonen inni herdekassa ikke opplever 38 °C før etter en viss tid, og det fremgår av beregningen av adiabatisk temperaturutvikling at programmet overkompenserer for varmetilførsel til betongen hvis 38 °C brukes som omgivelsestemperatur idet herdekassa flyttes inn i klimarommet.

### 4.2 Trykkfasthet og densitet

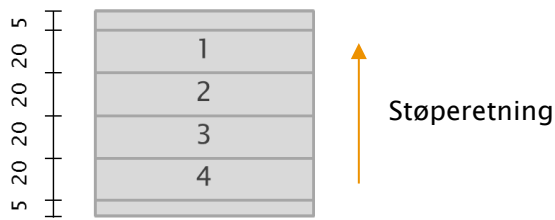
Beskrevet utført i henhold til NS-EN 12390 del 3 og 7, på 2 stk. 100 mm terninger pr prøvingstermin. Terningene ble vannlagret fra avforming og til prøving ved hhv. 28, 56, 91, 180 døgn, 1 og 2 år.

### 4.3 Luftporestruktur

Beskrevet utført i henhold til NS-EN 480-11. Prøvingen ble utført av VBM-laboratoriet i Danmark, på planslip tildannet fra 2 stk. ø150x300 sylindre.

### 4.4 Porøsitet

Beskrevet utført i henhold til Statens vegvesens Håndbok R210:metode 426 (2015) «begrenset prosedyre» (forenklet PF). Terninger ble vannlagret fra avforming til prøving. Ved hver prøvetermin, 91 døgn og 2 år, ble det fra hver av 2 stk. 100 mm terninger saget til fire 20 mm skiver vinkelrett på støperetning som vist i Figur 3. Dette gjelder prøving ved SINTEF. Ved tilsvarende prøving ved S.lab ble det tildannet 3 skiver á 20 mm fra hver av 2 stk. 100 mm terninger ved 91 døgns alder. For S.lab-prøvene er det ukjent sammenheng mellom støpe- og sageretning.



FIGUR 3 PRINSIPPSKISSE – SAGING AV 4 SKIVER FOR PORØSITETSBESTEMMELSE (SINTEF)

Hver skive ble veid i følgende fukttilstand:

- etter tørking i ventilert tørkeskap ved 105 °C i 7 døgn (vekt  $g_1$ )
- etter neddykking i vann i 7 døgn, i luft (vekt  $g_2$ ) og i vann (vekt  $g_3$ )
- etter 2 døgn neddykking i vann i trykktank ved 50 atm (vekt  $g_4$ )

og følgende verdier beregnet:

- Volum:  $V = (g_2 - g_1) / \rho_w$
- Sugmettet densitet:  $\rho_s = g_3 / V$
- Sugporøsitet:  $p_s = (g_3 - g_1) / (V \cdot \rho_w)$
- Makroporøsitet:  $p_m = (g_4 - g_2) / (V \cdot \rho_w)$
- Totalporøsitet:  $p_t = p_s + p_m$
- PF-verdi (PorebeskyttelsesFaktor):  $PF = p_m / p_t$

$\rho_w$  er vannets densitet satt til 1000 kg/m<sup>3</sup>.

## 4.5 Spesifikk elektrisk motstand

Utstyr som ble benyttet ved prøvingen:

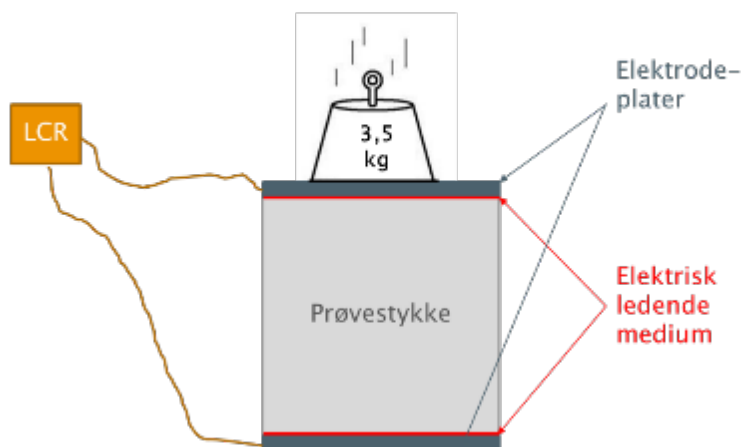
- LCR-meter med høy inngangsimpedans og målefrekvens 1 kHz
- 2 stk. elektrodeplater av stål, dimensjoner 120 x 120 x 10 mm<sup>3</sup>. Ved SINTEF benyttes elektrisk ledende gel mellom betong og elektrodeplater. Ved S.lab er stålplatene påmontert en filtermatte med samme areal som elektrodeplatene – tykkelse ca. 1 mm. Stålplater med filterduk lagres i lukkes beholder fylt med eddiksyre (6 ml 100% eddiksyre pr liter) før prøving.
- Ca. 3,5 kg lodd

4 stk. terninger pr betong ble benyttet ved alle prøveterminer. Terningenes to måleflater (forskalte sideflater, ikke avstrykningsflate) ble merket med «X». Prøvene lå vannlagret ved 20±2°C mellom hver prøving, og prøving ble utført ved 20±2°C, i henhold til følgende prosedyre:

- Temperatur i vannbad og i luft ble registrert
- Prøvestykket ble tatt opp fra vannbad. Alle flater unntatt de to merket med «X» ble tørket av
- Prøvestykket ble lagt med X-merket flate ned mot den ene elektrodeplaten, med elektrisk ledende medium mellom
- Den andre elektrodeplaten ble plassert på den motstående X-merkede flaten, med elektrisk ledende medium (gel eller filt) mellom

- Loddet ble lagt på den øverste elektrodeplaten i 1 min før avlesing
- LCR-meteret ble slått på og motstandsverdien,  $R$  ( $\Omega$ ), lest av etter 60 sekunder

Se prinsippsskisse i Figur 4.



FIGUR 4 PRINSIPPSKISSE – PRØVINGSOPPSETT FOR MÅLING AV ELEKTRISK MOTSTAND

Spesifikk elektrisk motstand,  $\rho$ , ble bestemt for hvert prøvestykke, som følger:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad (\Omega m)$$

hvor:

$R$  = målt motstand, ( $\Omega$ )

$A$  = arealet av prøvestykkets måleflater ( $m^2$ )

$l$  = avstanden mellom prøvestykkets måleflater (m)

## 4.6 Frostmotstand og karbonatisering

### 4.6.1 14 uker i 60% RF; karbonatisering, tynnslip og frostprøving (SINTEF)

Frostprøving var beskrevet utført i henhold til NS-CEN/TS 12390-9 pkt 5 (og Statens vegvesens Håndbok R210:metode 445 (2015), med følgende avvik knyttet til forkondisjonering av prøvestykkene: For alle betonger ble det beskrevet forlenget lagring av prøvestykkene i  $65 \pm 5\%$  RF klimakammer i 14 uker  $\pm 1$  uke, men i henhold til NA:2022 til NS-EN 206 gjelder dette bare for betonger med slagginnhold  $>35\%$ . SINTEF sitt klimakammer opplyses å holde 60% RF.

For hver betong ble ett prøvestykke tildannet fra hver av 6 stk.  $\emptyset 100 \times 200$  sylindrer. Saging til prøvestykker ble gjort ved 21 døgns alder og prøvestykkene deretter satt i klimakammeret (i  $14 \pm 1$  uker i 60% RF), hvor den endelige klargjøringen for frosteksposering (liming av gummimansjett) ble utført i løpet av den siste uka. Deretter ble prøvestykkene hensatt med deionisert vann på overflata i 3 døgn, før vannet med erstattet med frysemedium og

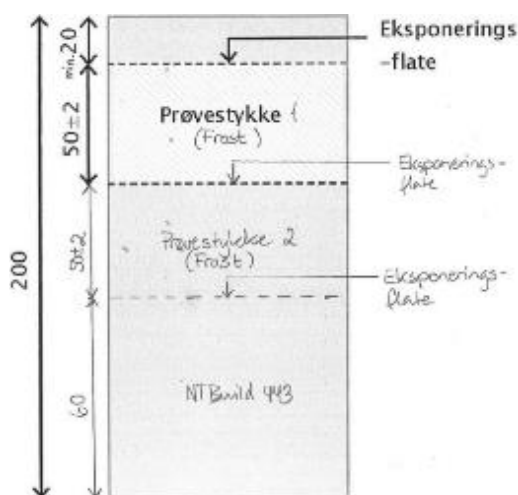
frosteksponeringen startet ved 114–123 døgns betongalder. Frysemedium var 3 % NaCl-løsning for alle 11 betongene.

For alle betongene ble det lagret ett ekstra prøvestykke sammen med de 6 som skulle frostprøves. Etter 14 uker i 60 % RF ble dette prøvestykket brukt til å bestemme karbonatiseringsdybden for å gi informasjon om initialtilstanden til betongenes eksponeringsflate rett før frosteksponeringen. Fra disse prøvestykkene ble det også tildannet tynnslip (ca. 20 x 40 mm) fra overflatesjiktet (mot karbonatisert sagflate). Tynnslipene ble studert i stereomikroskop med hensyn til karbonatiseringsdybde, mikroriss og porøsitet.

Detaljert tidslinje for lagring og tildanning av prøvestykker for frostforsøkene er gitt i kapittel 4.6.4.

#### 4.6.2 14 uker vannlagring; frostprøving ved S.lab på tilsendte prøvestykker

3 stk.  $\varnothing 100 \times 200$  mm sylindre fra 6 av de 11 betongene som ble blandet ved SINTEF ble sendt til S.lab for alternativ frostprøving. Sylindrene ble holdt vannlagret fram til de ble pakket inn i plast og sendt. Ved ankomst S.lab ble sylindrene pakket ut og vannlagret videre helt fram til saging av prøvestykker ved  $16 \pm 1$  ukers betongalder. Prøvestykkene ble deretter satt i klimakammeret i 1 uke i 60 % RF hvor den endelige klargjøringen for frosteksponering (liming av gummimansjett) ble utført. Deretter ble prøvestykkene hensatt med deionisert vann på overflata i 3 døgner, før vannet ble erstattet med 3 % NaCl-løsning og frosteksponeringen startet ved 114–123 døgns betongalder. Det ble tildannet 2 prøvestykker fra hver av de 3 sylindrene, total 6 prøvestykker pr. betong. Figur 5 beskriver sagingen til prøvestykker, hvor gjenværende del ble benyttet til kloriddiffusjon (se kap. 4.7.3).



FIGUR 5 TILDANNING AV PRØVESTYKKER FOR FROSTFORSØK I S.LAB – FRA TILSENDTE SYLINDRE

Detaljert tidslinje for lagring og tildanning av prøvestykker for frostforsøkene er gitt i kapittel 4.6.4.

#### 4.6.3 Standard frostprøving; blanding og prøving ved S.lab

Egne blandinger, utstøping og frostprøving ble også gjort ved S.lab. Disse frostforsøkene ble gjort i henhold til standard prosedyre (NS-CEN/TS 12390-9 pkt 5 og Statens vegvesen Håndbok R210:metode 445(2015)), dvs. med start saging av prøvestykker ved  $21 \pm 1$  døgns alder, forkondisjonering/preparering av prøvestykkene i løpet av  $7 \pm 1$  døgn og start frostekspnering ved 31 døgns betongalder. Det ble støpt 6 stk.  $\varnothing 100 \times 200$  sylindrer for hver betong, og fra hver av disse ble det tildannet ett prøvestykke.

Detaljert tidslinje for lagring og tildanning av prøvestykker for frostforsøkene er gitt i kapittel 4.6.4.

#### 4.6.4 Oppsummering; prosedyrer og oppstart frostprøving

Tabell 4 gir en samlet oversikt over frostprøvingen ved SINTEF og S.lab.

TABELL 4 DETALJERT TIDSLINJE FOR KONDISJONERING OG GJENNOMFØRING AV ALLE FROSTFORSØKENE

| Operasjon                                                               | SINTEF-blandinger                               |                                                                    | S.lab-blandinger                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                         | Prøvd ved SINTEF<br>(14 uker i 65 % RF)         | Sendt til S.lab<br>(16 uker vannlagret)                            | (standardprøving)                                                                |
| Gjelder                                                                 | Alle 11 betongene                               | Betong 2,3,6,7,<br>10 og 11                                        | Betong 2,3,4,7,9,<br>10 og 11                                                    |
| Avforming                                                               | ved 2 døgn                                      |                                                                    |                                                                                  |
| Lagring, hele sylindrer                                                 | vannlagring fra<br>2 – 21 døgn <sup>1)</sup>    | vannlagring fra 2<br>døgn til 16 uker<br>$\pm 1$ uke <sup>2)</sup> | vannlagring fra 2 – 7<br>døgn, deretter<br>lagring i 65% RF %<br>fra 7 – 21 døgn |
| Saging av prøvestykker                                                  | ved 21 døgn                                     | ved 16 uker $\pm 1$ uke                                            | ved 21 døgn                                                                      |
| Lagring av prøvestykker i<br>klimarom og montering<br>av gummimansjett  | i 14 uker $\pm 1$ uke i<br>60% RF <sup>3)</sup> | i 1 uke 65 % RF                                                    | i 1 uke i 65 % RF                                                                |
| 3 mm deionisert<br>vann på overflaten                                   | i 3 døgn                                        |                                                                    |                                                                                  |
| 3 mm med 3 % NaCl-<br>løsning på overflaten<br>og start frostekspnering | start ved 114–123 døgns betongalder             |                                                                    | start ved 31 døgns<br>betongalder                                                |

<sup>1)</sup> vannlagring fram til 21 døgn er et lite avvik i forhold til NS-CEN/TS 12390-9 pkt 5 som beskriver vannlagring fram til 7 døgn, deretter lagring ved 65 % RF fram til 21 døgn. Dette gjelder lagring av hele sylindrer, og bør ikke ha hatt særlig innvirkning på resultatet ettersom prøvestykkene (eksponeringsflatene) sages til/tildannes først ved 21 døgn.

<sup>2)</sup> I denne perioden ble prøvestykkene tatt opp av vannbad, pakket inn i plast og sendt fra SINTEF til S.lab, og deretter vannlagret videre ved S.lab.

<sup>3)</sup> Montering av gummimansjett ble utført i løpet av den siste uka

## 4.7 Kloriddiffusjon

### 4.7.1 Ulike metoder, samlet oversikt

De ulike betongenes kloridmotstand er undersøkt både ved akselerert prøving i NaCl-løsning (to ulike metoder) og ved langtidseksponering i naturlig sjøvann.

Akselerert prøving ble utført fra 91 døgns betongalder, i henhold til:

- NS-EN 206-NA (CEN/TS 12390-11): Neddykking i 6 % NaCl-løsning i 90 dogn (alle betonger støpt og prøvd ved SINTEF)
- Statens vegvesens håndbok R210:metode 441 (2015) (NT Build 443): Neddykking i 16,5 % NaCl-løsning i 35 dogn (alle betonger støpt ved SINTEF, betong 1, 4, 5, 8 og 9 prøvd ved SINTEF, de resterende ved S.lab)

Langtids klorideksponering i naturlig sjøvann er utført fra 7 døgns betongalder, på betongplater støpt ved SINTEF og eksponert/analysert ved S.lab.

Tabell 5 gir en oversikt over kloridforsøkene og betonger prøvd ved SINTEF og S.lab. Nærmere beskrivelser av de ulike metodene er gitt i de etterfølgende kapitlene.

TABELL 5 OVERSIKT OVER DE ULIKE KLORIDDIFFUSJONSFORSØKENE

| Operasjon                                                                                                                                                            | SINTEF-blandinger                                     |                                                   |                                                                     |                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                      | 6 % NaCl-løsning<br>NS-EN 206+NA<br>(CEN/TS 12390-11) | 16,5 % NaCl-løsning<br>HB R210:441 (NT Build 443) |                                                                     | Langtids<br>lagring i sjøvann<br>(3 % NaCl)                                            |
|                                                                                                                                                                      | Prøvd ved SINTEF                                      |                                                   | Sendt til og<br>prøvd ved S.lab                                     | Plater sendt til<br>S.lab                                                              |
| Gjelder                                                                                                                                                              | Alle 11 betongene                                     | Betong 1,<br>4, 5, 8, 9                           | Betong 2, 3, 6,<br>7, 10 og 11                                      | Alle 11 betongene                                                                      |
| Avforming                                                                                                                                                            | ved 2 døgn                                            |                                                   |                                                                     | avforming ved 2<br>døgn, deretter<br>pakket inn i plast<br>og sendt til S.lab<br><br>↓ |
| Vannlagring, hele<br>sylindrer                                                                                                                                       | fra døgn 2 til minst døgn 77                          |                                                   | (involverer<br>fersendelse,<br>innpakket i<br>plast)                |                                                                                        |
| Tildanning, preparering<br>og kondisjonering av<br>prøvestykker (saging,<br>metning <sup>1)</sup> , maling med<br>epoksy, metning i<br>Ca(OH) <sub>2</sub> -løsning) | fra 77-91 døgn                                        |                                                   |                                                                     |                                                                                        |
| Neddykking i<br>kloridløsning                                                                                                                                        | fra 91 døgn,<br>og med varighet<br>91 døgn            | fra 91 døgn,<br>og med varighet<br>35 døgn        | fra 7 døgn, og<br>med varighet 1,<br>2.5, 5.5 og 8 år <sup>2)</sup> |                                                                                        |

1) Formetning før maling med epoksy: Prøver eksponert iht. NS-EN 206+NA er vakuummettet i vann, øvrige prøver mettet ved neddykking i Ca(OH)<sub>2</sub>-løsning

2) Direkte nedlegging i kloridløsning av naturlig sjøvann, uten forbehandling

#### 4.7.2 Kloriddiffusjon ved SINTEF, 6 % NaCl (start ved 91 døgn)

En modifisert versjon av CEN/TS 12390-11 er i dag beskrevet i NS-EN 206+NA, med neddykking i 6 % NaCl-løsning fra 91 døgns alder, og med eksponeringstid 91 døgn. For hver av de 11 betongene ble det støpt 3 stk.  $\varnothing 100$  mm x 200 mm sylindre som etter avforming ble vannlagret fram til saging, preparering, og kondisjonering av prøvestykker, tidligst fra 77 døgns alder. Det ble tildannet 1 prøvestykke fra hver av de 3 sylindrene, totalt 3 prøvestykker pr. betong.

Eksponeringsflaten er en sagflate. Prøvestykkene ble frest samme dag som de ble tatt opp av eksponeringsvæsken. Fresing ble utført i følgende sjikt: 0-1, 1-2, 2-3, 3-5, 5-7, 7-9, 9-12, 12-15, 15-18 mm.

Alle sjikt ble analysert med hensyn på kloridinnhold ved potensiometrisk titrering. Resultatene angis i % av tørr betongvekt. Prøver fra alle 11 betongene ble støpt og prøvd ved SINTEF.

#### 4.7.3 Kloriddiffusjon ved SINTEF og S.lab, 16,5 % NaCl (start ved 91 døgn)

NT Build 443 (HB R210:441), med neddykking i 16,5 % NaCl-løsning, er den akselererte kloridtestmetoden vi har mest erfaring med fra tidligere. Metoden ble derfor inkludert i laboratorieprogrammet for å gi en kopling av resultatene fra den «nye» metoden (med neddykking i 6 % NaCl-løsning) mot eksisterende data. I korthet er prosedyren: Neddykking i 16,5% NaCl-løsning fra 91 døgns alder, og med eksponeringstid 35 døgn. Bortsett fra saltkonsentrasjonen og eksponeringstiden er prosedyren stort sett den samme som beskrevet i foregående avsnitt for 6 % NaCl-eksponeringen. Et lite unntak er at CEN/TS 12390-11 beskriver vakuummetning i vann før isolering av side-/bunnflater med epoksy, mens NT Build 443 beskriver metning i  $\text{Ca(OH)}_2$ -løsning.

Prøver fra alle de 11 betongene ble støpt ved SINTEF. 5 av betongene ble testet ved SINTEF og de resterende 6 betongene ble testet ved S.lab (hele sylindere ble sendt til S.lab for gjennomføring av prøvingen der).

Sylindrene som ble sendt til S.lab ble ved SINTEF holdt vannlagret fram til de ble pakket inn i plast og sendt. Ved ankomst S.lab ble sylindrene pakket ut og vannlagret videre fram til tildanning av prøvestykker. Det ble tildannet 1 prøvestykke fra hver av de 3 sylindrene (se Figur 5), totalt 3 prøvestykker pr. betong.

Lagring, tildanning og klorideksponering (og fresing) i S.lab skal derfor i praksis være lik den ved SINTEF og samlet gjør dette at alle 11 betongene har vært gjenstand for kloriddiffusjonsprøvning med begge metodene (6 % NaCl i 91 døgn, og 16,5 % NaCl i 35 døgn).

#### 4.7.4 Langtids sjøvanneksponering av betongplater ved S.lab (start 7 døgn)

To plater fra hver av de 11 betongene med størrelse  $250 \times 400 \times 100$  mm<sup>3</sup> ble støpt ved SINTEF. Platene ble støpt ut liggende slik at en side ( $250 \times 400$  mm<sup>2</sup>) er en støpeflate (avstrykningsflate) og den andre er forskalt flate. *(Merk at i nyere undersøkelser, startet opp i ettertid, så er platene støpt stående slik at alle eksponeringsflater da er forskalte flater)*

Platene ble avformet etter 2 dager, merket, pakket i tett plast og deretter sendt til S.lab med ekspress forsendelse. I S.lab ble alle platene lagt i store plastkar fylt med 360 liter sjøvann, fra 7 døgns alder, se Figur 6. Sjøvannet ble hentet fra 60 meters dyp i Oslofjorden, ved NIVAs stasjon utenfor Drøbak. Saltkonsentrasjon i karet ble målt rett etter at platene ble lagt i karet, samt flere ganger i ettertid, se Tabell 6. NaCl-konsentrasjonen har vært målt i området 3,0–3,3 %.

I lagerrommet hvor karene/platene er lagret antas det at lufttemperaturen de første 5 årene var rundt 18 °C om sommeren og ned mot 12 °C i perioder med kaldt vær om vinteren. Etter dette (etter skifte av lokasjon for S.lab) har lufttemperaturen vært jevnere, ca.  $21 \pm 2$  °C



FIGUR 6 LAGRING AV BETONGPLATER I S.LAB, I KAR MED SJØVANN. TO PLATER FRA HVER BETONG. FOTO: ØYVIND BJØNTEGAARD, STATENS VEGVESEN

TABELL 6 KONTROLL AV NaCl-KONSENTRASJON I KARETS SJØVANN

| Dato       | NaCl (%) | Merknad      |
|------------|----------|--------------|
| 06.11.2015 | 3,19     | Nytt sjøvann |
| 09.06.2016 | 3,02     |              |
| 10.10.2016 | 3,03     |              |
| 07.09.2017 | 3,12     |              |
| 03.01.2019 | 3,03     |              |
| 21.08.2019 | 3,00     |              |
| 21.01.2020 | 3,10     |              |
| 26.05.2021 | 3,15     |              |
| 19.05.2022 | -        | Nytt sjøvann |
| 28.06.2022 | 3,09     |              |
| 18.08.2023 | 3,33     |              |

Det er bestemt kloridprofiler etter 1 år, 2,5 år, 5,5 år og 8 år lagring i sjøvann. Det ble støpt to plater pr betong, og det var planlagt utboring av kjerner fra hver av platene (Plate nr. 1 og

Plate nr. 2) som vist i Figur 7. De midterste kjernene i Plate nr. 1, som er indikert i Figur 7, ble tatt ut etter 2 år, men disse ble lagret så lenge uten å bli frest i sjikt at de ble forkastet; derfor ble nytt uttak gjort etter 2,5 år. Plate nr. 2 er brukt til uttak etter 5,5 og 8 år og kan bli brukt til et siste uttak på et senere tidspunkt.

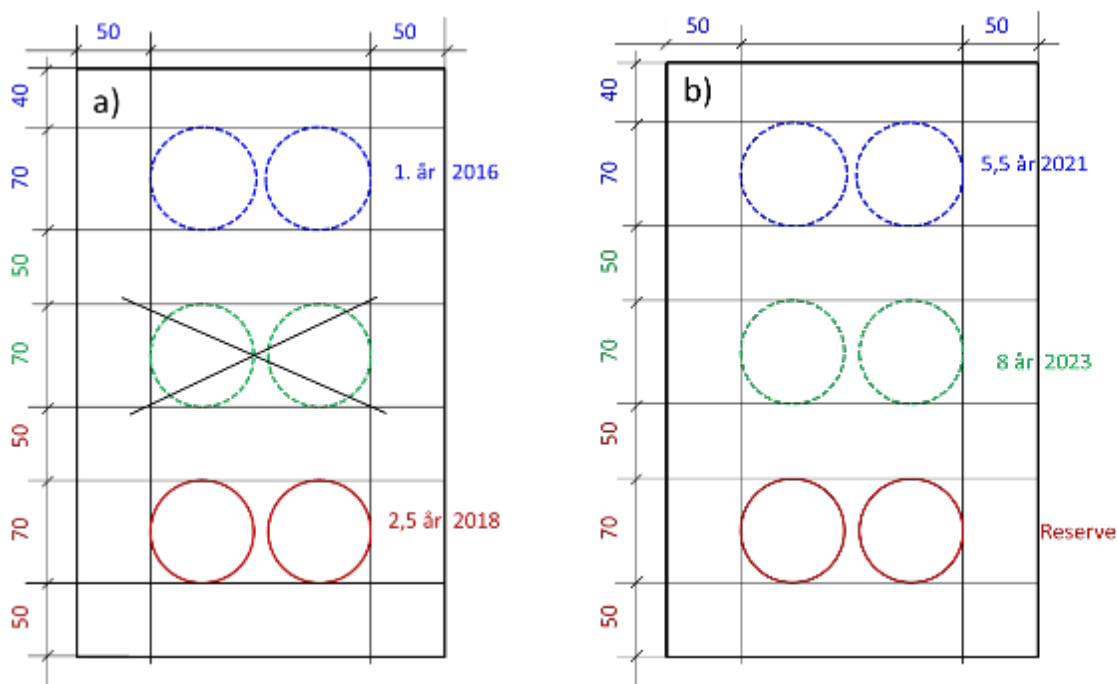
Ved alle terminer bores det ut 2 kjerner pr. betong, med diameter ca. 65 mm. Kjernene bores tvers igjennom hele platen. Ved de første tre terminene (1, 2,5 og 5,5 år) ble det frest sjikt fra begge sider, og dermed fremstilt totalt 4 kloridprofiler pr. betong pr. termin – hvor 2 profiler da er fra støpeflaten og 2 profiler fra den forskalte flaten. Disse to ulike flatene behandles både separat og samlet ved resultatbehandlingen.

Ved 8-årsterminen ble det på samme måte boret 2 kjerner pr. betong, men det ble frest sjikt kun fra den forskalte flaten – altså 2 profiler for hver betong.

Følgende sjikt er frest ved de ulike terminene:

- Etter 1 år og 2,5 år ble følgende sjikt frest: 0–2 mm, 2–4 mm, 4–6 mm, 6–8 mm, 8–12 mm, 12–16 mm, 16–20 mm, 20–24 mm, 24–28 mm.
- Etter 5,5 år ble det frest ett sjikt i tillegg: + 28–32 mm
- Etter 8 år ble ytterligere fire sjikt frest i tillegg: +32–36 mm, 36–40 mm, 40–44 mm, 44–48 mm

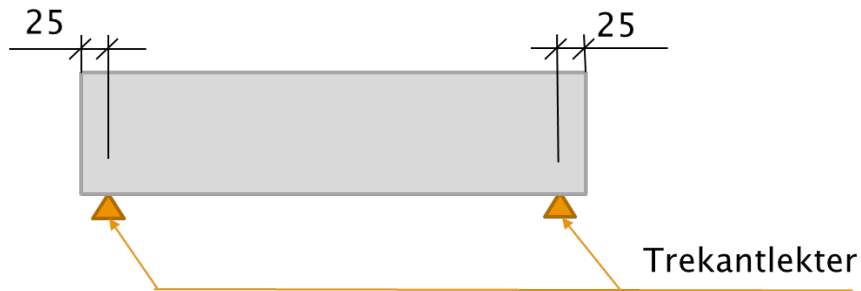
Alle sjikt analyseres så med hensyn på kloridinnhold, ved potensiometrisk titrering.



FIGUR 7 UTBORING AV KJERNER FRA TO PLATER FRA HVER BETONG, ULIKE TERMINER A) PLATE NR. 1 (DE MIDTERSTE KJERNENE BLE BORET UT ETTER 2 ÅR, MEN IKKE BENYTTET) OG B) PLATE NR. 2

## 4.8 Naturlig karbonatisering

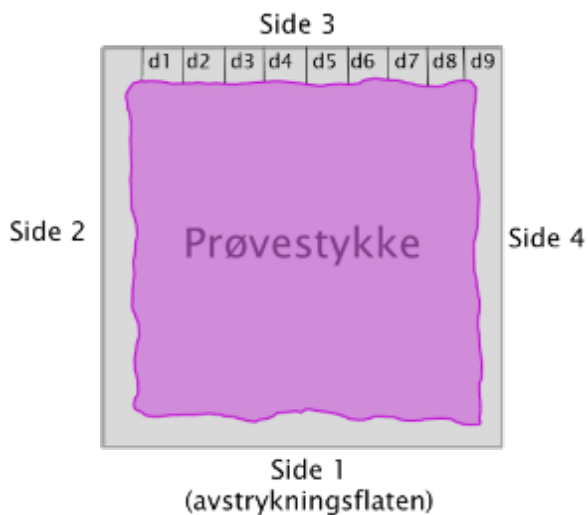
2 stk. 100x100x400 mm<sup>3</sup> prismer for hver av de 11 betongene ble plassert på Voll feltstasjon i Trondheim. Prismene ble utplassert umiddelbart etter avforming, og ble lagret i reoler i et luftet skur (dvs. utendørs beskyttet mot regn). Hvert prisme ble opplagt på 2 stk. trekantlister, med støpeflaten ned, se Figur 8.



FIGUR 8 PRINSIPPSKISSE – OPPSETT FOR LAGRING AV PRØVER UTSATT FOR NATURLIG KARBONATISERING

Ved hver prøvetermin ble det splittet av en skive med tykkelse ca 50 mm fra den ene enden av prismet. Umiddelbart etter avsplitting ble pH-indikatoren tymolpftalein påført på den avsplittede skivens ferske bruddflate. Karbonatiseringsdybder ble målt langs alle fire sideflater, i målepunkter med ca. 10 mm avstand (d1–d9), se Figur 9.

Naturlig karbonatisering er målt etter 1, 2 og 5,75 år.



FIGUR 9 PRINSIPPSKISSE – MÅLING AV KARBONATISERINGSDYBDE I 9 PUNKTER PR SIDE

## 5 Resultater og diskusjon

### 5.1 TSS-behov og fersk betongegenskaper

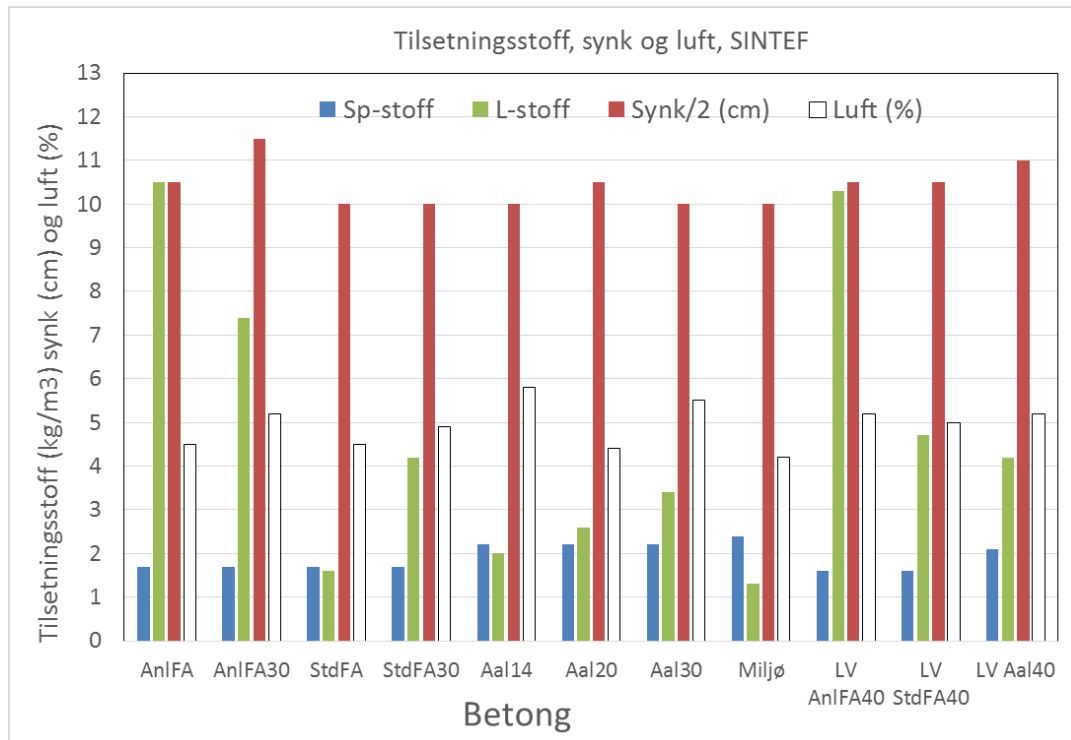
Både for SINTEF og Statens vegvesens Sentrallaboratorium (S.lab) er blandingenes behov for superplastiserende (SP) og luftinnførende (L) tilsetningsstoff (TSS), samt målte fersk betongegenskaper og luftinnhold, gitt i Tabell 7. Grafiske framstillinger er gitt i Figur 10 (SINTEF, alle 11 betongene) og i Figur 11 (SINTEF og S.lab., de 7 betongene som ble blandet ved begge laboratoriene).

Tendensen er at økende flygeaskemengde gir økt behov for L-stoff. Betongene med AnIFA-sement avviker noe fra dette bildet, samtidig som disse betongene hadde et veldig stort behov for L-stoff for å oppnå ønsket luftinnhold. Det høye L-stoffbehovet ble et diskusjonstema under støpearbeidene og SINTEF gjorde anstrengelser for å finne ut av det, uten å lykkes. Trenden ble også bekreftet i blandingene ved S.lab.

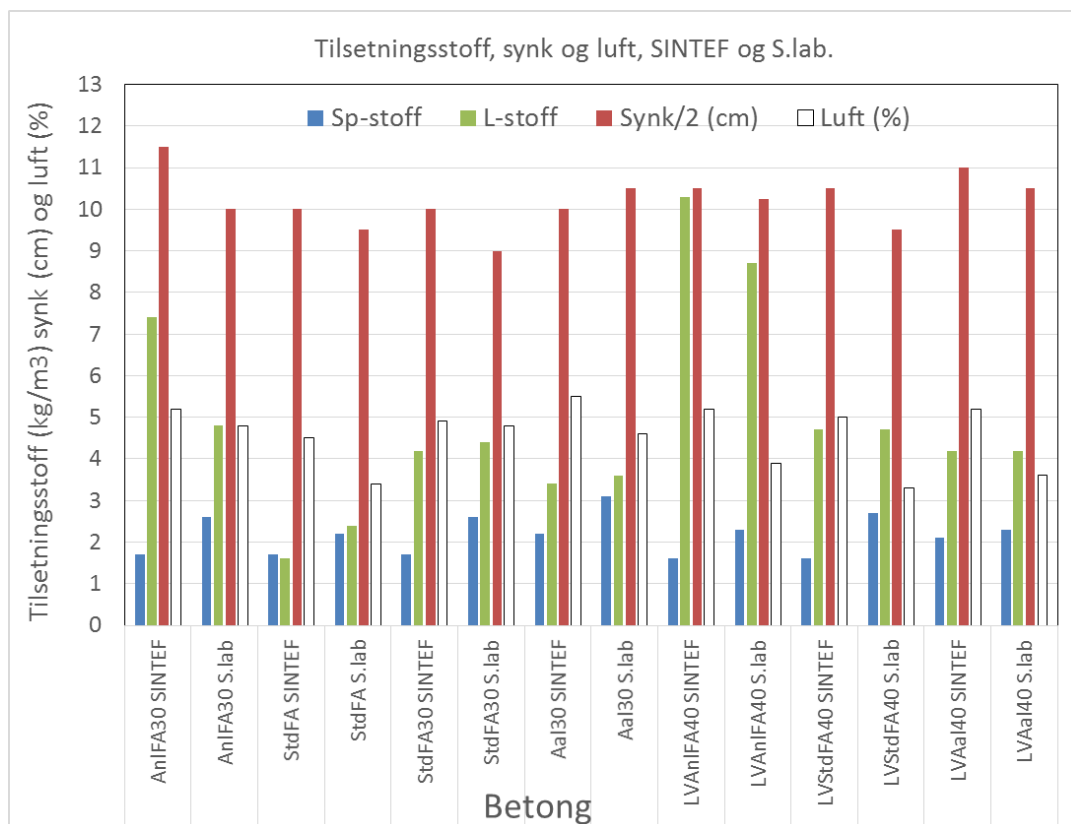
For S.lab var SP-doseringen generelt høyere, og synk (og luftinnhold) noe lavere enn ved SINTEF. Dette kan ha med blandemaskinenes effektivitet å gjøre.

**TABELL 7 DOSERING AV TILSETNINGSSTOFF OG FERSK BETONGMÅLINGER (SINTEF OG S.LAB)**

| Betong nr. | Betong     | Lab.   | Sp-stoff (kg/m <sup>3</sup> ) | L-stoff (kg/m <sup>3</sup> ) | Synk (mm) | Densitet (kg/m <sup>3</sup> ) | Luft (%) |
|------------|------------|--------|-------------------------------|------------------------------|-----------|-------------------------------|----------|
| 1          | AnIFA      | SINTEF | 1,7                           | 10,5                         | 210       | 2330                          | 4,5      |
| 2          | AnIFA30    | SINTEF | 1,7                           | 7,4                          | 230       | 2290                          | 5,2      |
|            |            | S.lab  | 2,6                           | 4,8                          | 200       | 2330                          | 4,8      |
| 3          | StdFA      | SINTEF | 1,7                           | 1,6                          | 200       | 2320                          | 4,5      |
|            |            | S.lab  | 2,2                           | 2,4                          | 190       | 2380                          | 3,4      |
| 4          | StdFA30    | SINTEF | 1,7                           | 4,2                          | 200       | 2300                          | 4,9      |
|            |            | S.lab  | 2,6                           | 4,4                          | 180       | 2280                          | 4,8      |
| 5          | Aal14      | SINTEF | 2,2                           | 2,0                          | 200       | 2300                          | 5,8      |
| 6          | Aal20      | SINTEF | 2,2                           | 2,6                          | 210       | 2330                          | 4,4      |
| 7          | Aal30      | SINTEF | 2,2                           | 3,4                          | 200       | 2290                          | 5,5      |
|            |            | S.lab  | 3,1                           | 3,6                          | 210       | 2340                          | 4,6      |
| 8          | Miljø      | SINTEF | 2,4                           | 1,3                          | 200       | 2340                          | 4,2      |
| 9          | LV AnIFA40 | SINTEF | 1,6                           | 10,3                         | 210       | 2290                          | 5,2      |
|            |            | S.lab  | 2,3                           | 8,7                          | 205       | 2340                          | 3,9      |
| 10         | LV StdFA40 | SINTEF | 1,6                           | 4,7                          | 210       | 2280                          | 5,0      |
|            |            | S.lab  | 2,7                           | 4,7                          | 190       | –                             | 3,3      |
| 11         | LV Aal40   | SINTEF | 2,1                           | 4,2                          | 220       | 2290                          | 5,2      |
|            |            | S.lab  | 2,3                           | 4,2                          | 210       | 2340                          | 3,6      |



FIGUR 10 DOSERING AV TILSETNINGSSTOFF (SP OG L), MÅLT SYNK (DIVIDERT PÅ 2!) OG FERSK BETONG LUFTINNHold I Blandingene ved SINTEF. ALLE 11 BETONGENE.



FIGUR 11 DOSERING AV TILSETNINGSSTOFF (SP OG L), MÅLT SYNK (DIVIDERT PÅ 2!) OG FERSK BETONG LUFTINNHold I Blandingene ved SINTEF OG S.LAB. 7 AV BETONGENE.

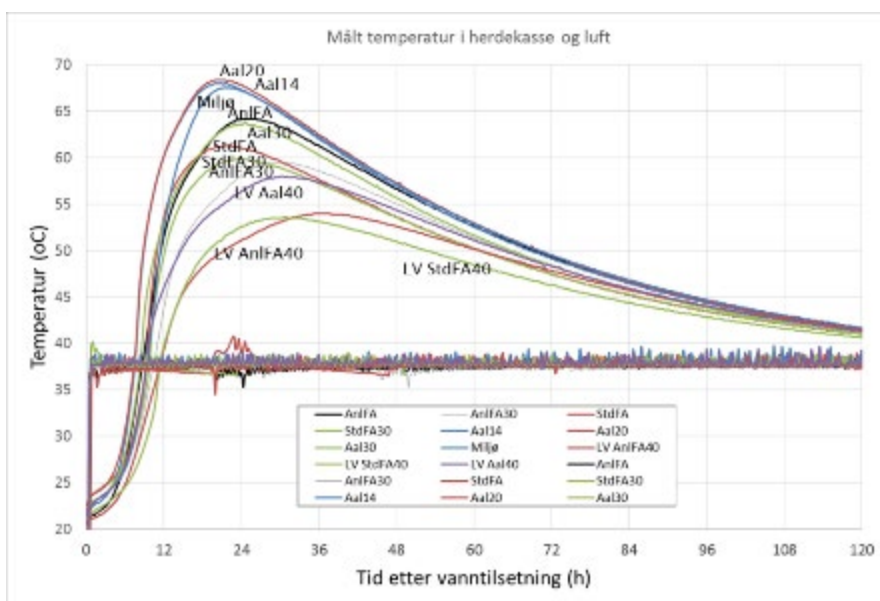
## 5.2 Herdevarme

Målt lufttemperatur og målt temperatur i herdekasseforsøkene er gitt i Figur 12. Parameterne som er benyttet til å beregne adiabatisk temperatur- og isotherm varmeutvikling er gitt i Vedlegg 4, inklusive modellparametere som kan brukes til evt. senere temperaturberegninger. Anvendte temperaturtapstall for herdekasseforsøkene ligger i området 0,023–0,027. Aktiveringsenergier er ikke målt for betongene; disse er antatt med basis i [2] hvor dette ble bestemt på betonger med liknende bindemidler.

Tabell 8 viser beregnet adiabatisk temperaturøkning etter 48 timer og isotherm varmeutvikling (ved 20 °C) etter 168 modenhetstimer. Adiabatisk temperaturøkning ved 48 timer er valgt fordi det vil være omtrentlig ved det tidspunktet at betongene vil ha sin maksimumstemperatur i «massive konstruksjoner» med tykkelser anslagsvis på  $1,0 \pm 0,3$  meter. Adiabatisk temperaturøkning ved 48 timer kan sånn sett være relevant å sammenlikne. Isotherm varmeutvikling ved 168 modenhetstimer er brukt fordi det er ganske vanlig å oppgi varmeutviklingen ved dette tidspunktet. For de undersøkte betongene oppnås 168 modenhetstimer noe før 48 timer ved adiabatiske forhold (varierer fra 30 til 40 timer ved adiabatiske forhold).

Beregnet adiabatisk temperaturutvikling over tid er vist i Figur 13, og Figur 14 viser adiabatisk temperaturstigning ved 48 timer. Resultatene viser at økt FA gir redusert herdetemperatur, som forventet. Aal-betongene (hvor det er benyttet  $k=0,7$  for all flygeaske) gir høyest herdevarme. Miljø og AnlFA gir noe høyere temperatur enn StdFA, men mellom AnlFA30 og StdFA30 er forskjellen liten. LV-betongene gir som forventet lavest herdetemperaturer, med LV Aal40 liggende høyest av disse.

Beregnet isotherm varmeutvikling over tid er vist i Figur 15, og Figur 16 viser isotherm varmeutvikling ved 168 modenhetstimer. Varmeutviklingen illustrerer de samme forskjellene mellom betongene som for adiabatisk temperaturstigning diskutert ovenfor.

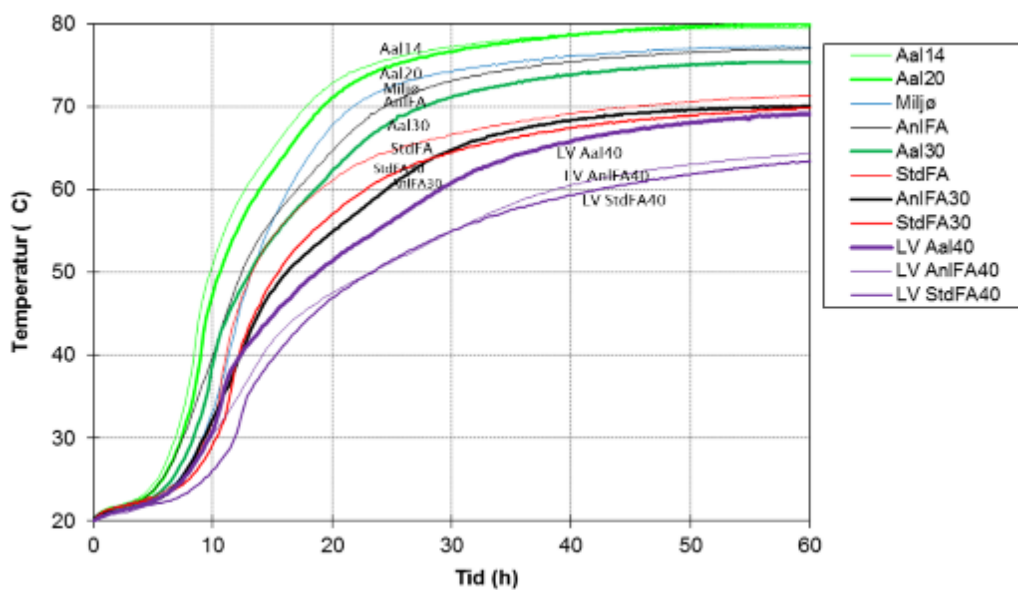


FIGUR 12 RÅDATA: MÅLT TEMPERATUR I HERDEKASSA OG I OMGIVENDE LUFT

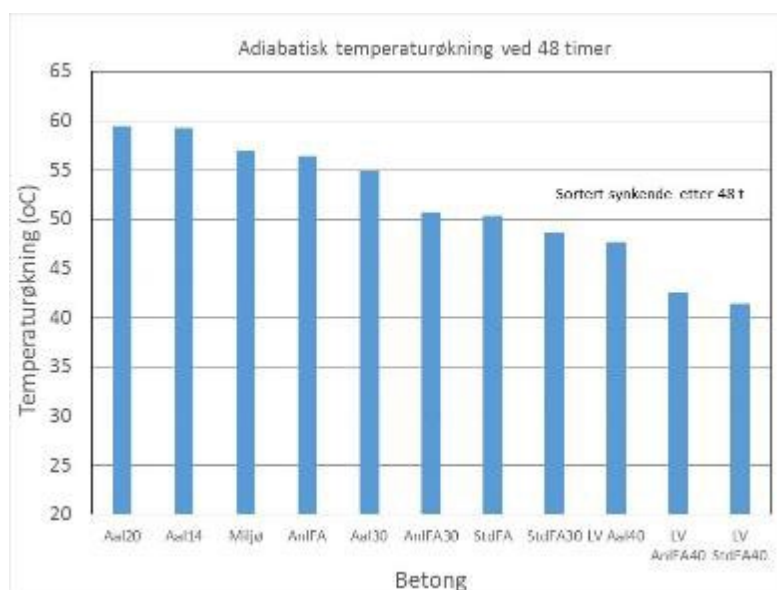
TABELL 8 BEREGNET ADIABATISK TEMPERATURØKNING ETTER 48 TIMER OG ISOTERM VARMEUTVIKLING ETTER 168 MODENHETSTIMER

| Betong        | Adiabatisk temperaturøkning ved 48 timer<br>[°C]<br>*) | Isoterm varmeutvikling ved 168 modenhetstimer<br>[kJ/kg]<br>*) |
|---------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1 AnlFA       | 56,4 (100%)                                            | 299 (100%)                                                     |
| 2 AnlFA30     | 50,7 (90%)                                             | 261 (87%)                                                      |
| 3 StdFA       | 50,4 (89%)                                             | 268 (90%)                                                      |
| 4 StdFA30     | 48,7 (86%)                                             | 252 (84%)                                                      |
| 5 Aal14       | 59,3 (105%)                                            | 307 (104%)                                                     |
| 6 Aal20       | 59,5 (105%)                                            | 306 (102%)                                                     |
| 7 Aal30       | 54,9 (97%)                                             | 276 (92%)                                                      |
| 8 Miljø       | 56,9 (101%)                                            | 294 (98%)                                                      |
| 9 LV AnlFA40  | 42,6 (76%)                                             | 230 (77%)                                                      |
| 10 LV StdFA40 | 41,4 (73%)                                             | 224 (75%)                                                      |
| 11 LV Aal40   | 47,7 (85%)                                             | 248 (83%)                                                      |

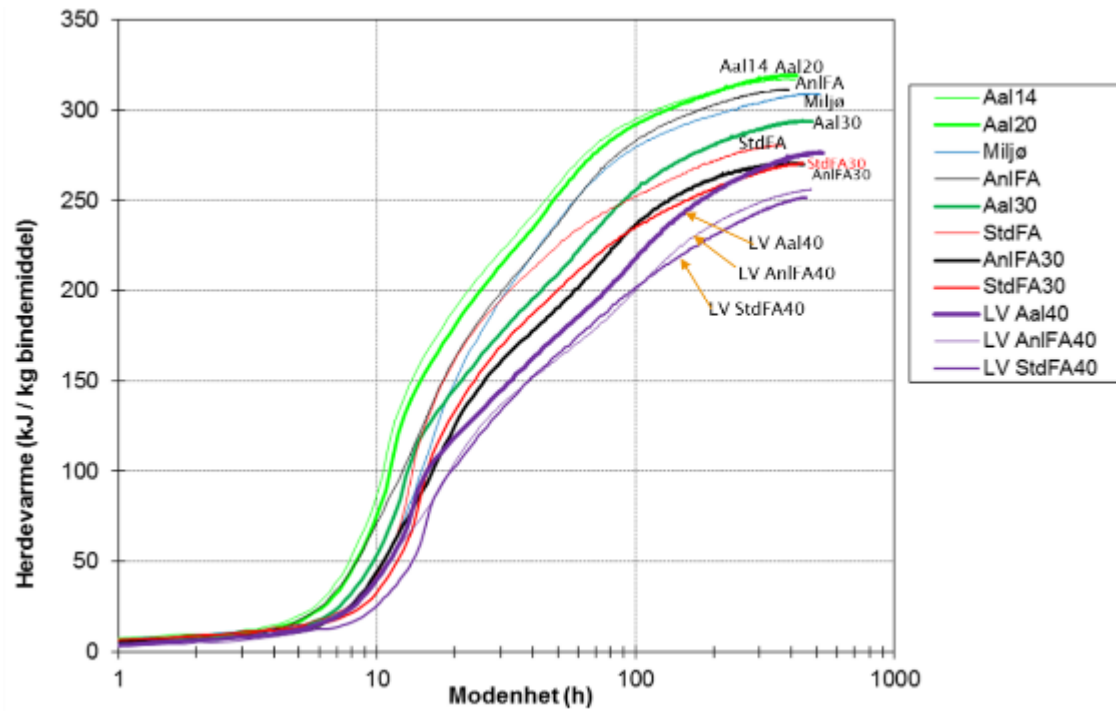
\*) Tallene i parentes er relativ til betong 1 AnlFA



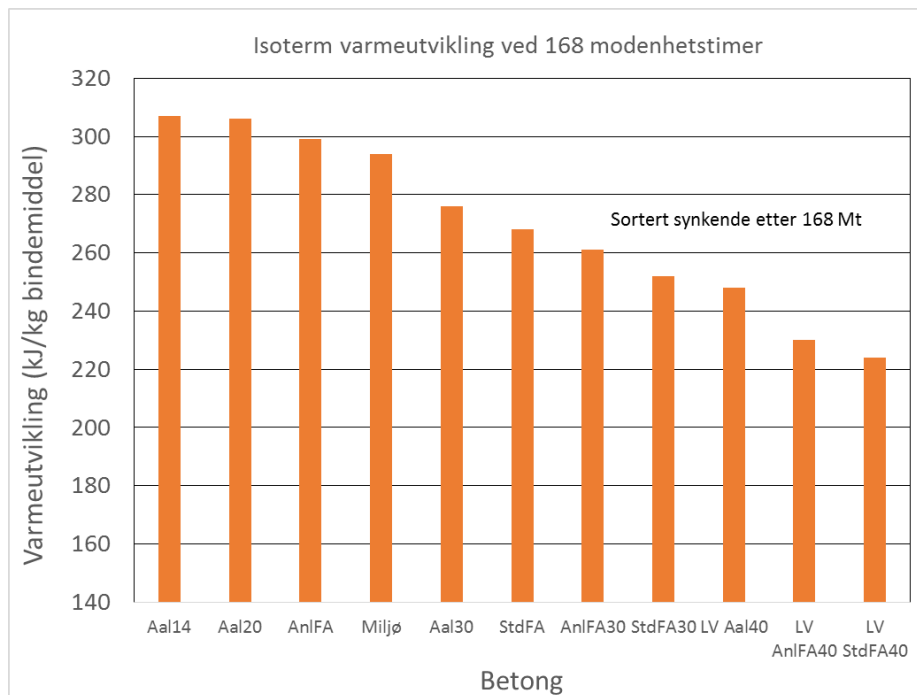
FIGUR 13 BEREGNET ADIABATISK TEMPERATURUTVIKLING



FIGUR 14 BEREGNET ADIABATISK TEMPERATURØKNING ETTER 48 TIMER, SORTERT ETTER SYNKENDE TEMPERATURØKNING



FIGUR 15 BEREGNET ISOTERM VARMEUTVIKLING



FIGUR 16 BEREGNET ISOTERM VARMEUTVIKLING ETTER 168 MODENHETSTIMER, SORTERT ETTER SYNKENDE VARMEUTVIKLING

## 5.3 Trykkfasthet

### 5.3.1 Trykkfastheter ved SINTEF, alle 11 betongene

Målte terningtrykkfastheter ved SINTEF er gitt i Tabell 9 og Figur 17. Hvert resultat er gjennomsnittet av to terninger. Spredningen mellom de to parallellene er generelt liten.

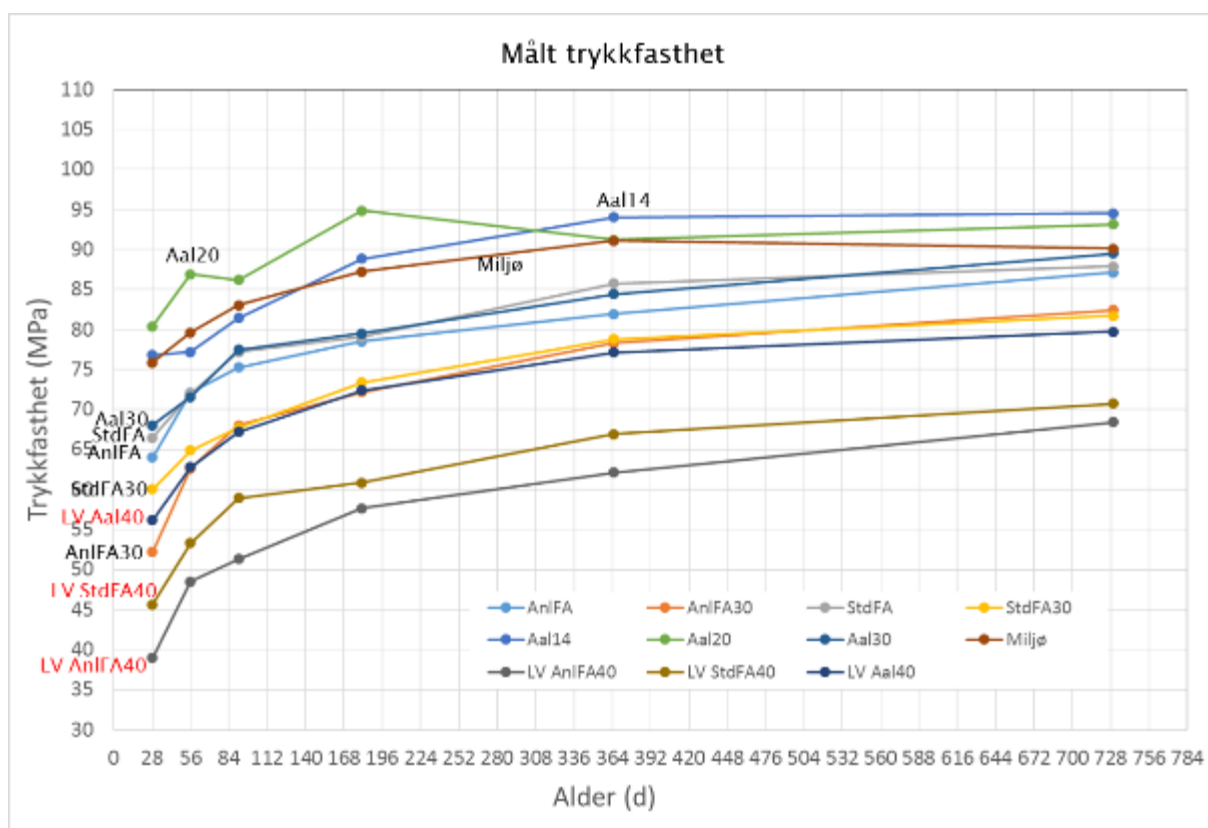
Som forventet er den generelle trenden at økende flygeaskeinnhold gir redusert fasthet. For LV-betongene bidrar også det økte masseforholdet til lavere fasthet, i tillegg til det høye flygeaskeinnholdet (40 %). Vi forventer monotont stigende fasthet over tid, noe som også oppnås for alle betongene unntatt betongen Aal20 som viser ujevn utvikling, se Figur 17. Grunnen til dette er ukjent. Det at Aal20 har høyere fasthet enn Aal14 i tidlig alder er også overraskende, men dette skyldes nok at Aal14 har høyere luftinnhold.

Økt luftinnhold i betongen reduserer fastheten. I Figur 18 er fasthetsresultatene justert for varierende luftinnhold målt i fersk betong ved å sammenlikne resultatene fra S.lab for de samme betongene (se etterfølgende kapittel). 5 % luft ble valgt som referanse (dvs. 5 % luft gir ingen justering). Alle resultatene for korresponderende betonger, ved 28, 56 og 91 døgn, fra de to laboratoriene ble justert mht luftinnhold, i en operasjon, med minste kvadratsums metode. Det som ga samlet minst forskjell var at fastheten korrigeres med 11 % for en endring i luftinnholdet på 1 %.

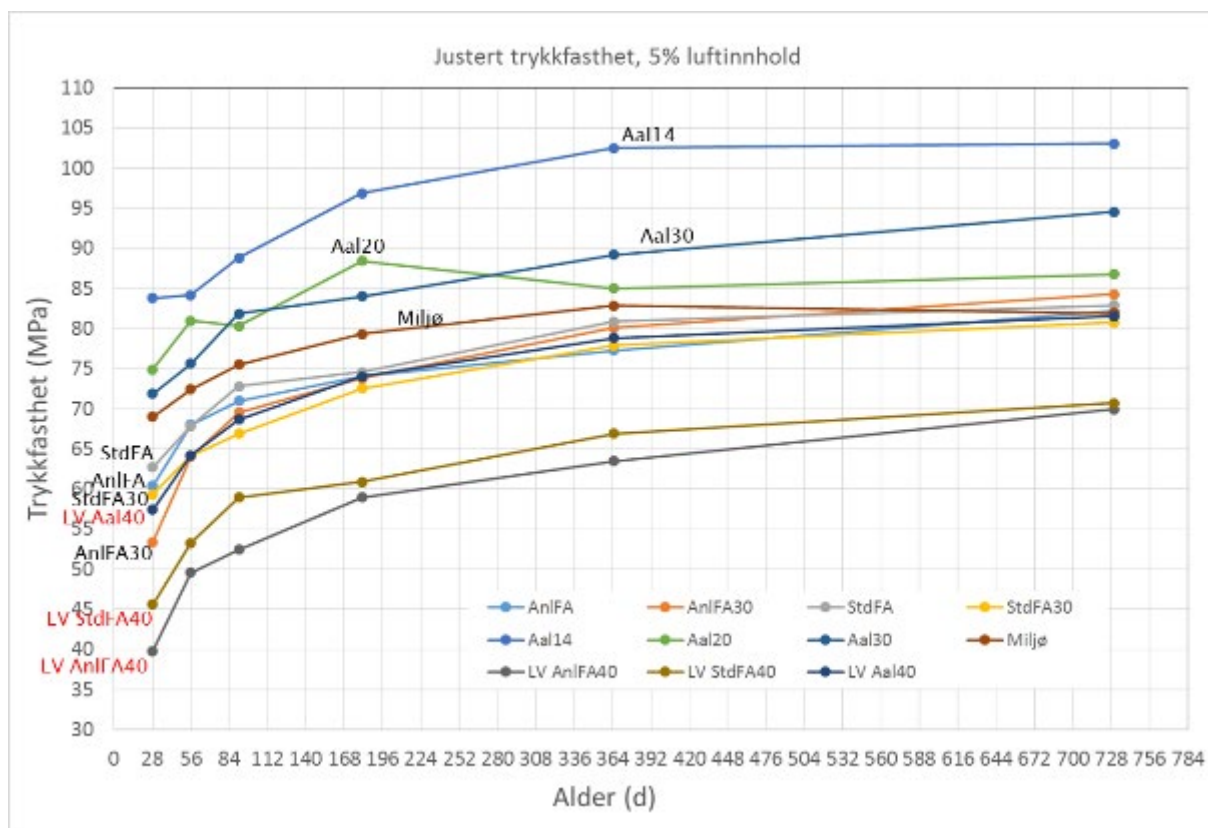
Økende flygeaskeinnhold gir erfaringsmessig økende relativ fasthetstilvekst ved lang herdetid. Resultatene viser også en slik trend, se Tabell 10 som angir relativ fasthet ved ulike aldre i forhold til hhv. 28- og 91-døgnsfastheten. En grafisk fremstilling av relativ fasthetstilvekst fra 28 døgn for, ulike sementer og flygeaskeinnhold, er vist i Figur 19.

**TABELL 9 MÅLT TERNINGTRYKKFASTHET [MPa] VED SINTEF**

| Betong        | Fersk betong<br>luftinnhold (%) | Alder [dager] |      |      |      |      |      |
|---------------|---------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|
|               |                                 | 28            | 56   | 91   | 181  | 365  | 730  |
| 1 AnlFA       | 4,5                             | 64,0          | 72,1 | 75,2 | 78,5 | 81,9 | 87,1 |
| 2 AnlFA30     | 5,2                             | 52,2          | 62,6 | 68,0 | 72,2 | 78,3 | 82,4 |
| 3 StdFA       | 4,5                             | 66,5          | 71,9 | 77,2 | 79,0 | 85,7 | 87,9 |
| 4 StdFA30     | 4,9                             | 60,0          | 64,9 | 67,7 | 73,4 | 78,8 | 81,7 |
| 5 Aal14       | 5,8                             | 76,8          | 77,2 | 81,4 | 88,8 | 94,0 | 94,5 |
| 6 Aal20       | 4,4                             | 80,4          | 86,9 | 86,2 | 94,9 | 91,2 | 93,1 |
| 7 Aal30       | 5,5                             | 68,0          | 71,6 | 77,5 | 79,5 | 84,4 | 89,5 |
| 8 Miljø       | 4,2                             | 75,9          | 79,6 | 83,0 | 87,2 | 91,1 | 90,1 |
| 9 LV AnlFA40  | 5,2                             | 38,9          | 48,5 | 51,3 | 57,6 | 62,1 | 68,4 |
| 10 LV StdFA40 | 5,0                             | 45,6          | 53,3 | 58,9 | 60,9 | 66,9 | 70,7 |
| 11 LV Aal40   | 5,2                             | 56,2          | 62,8 | 67,2 | 72,4 | 77,1 | 79,7 |



FIGUR 17 MÅLT TERNINGTRYKKFASTHET OVER TID (DAGER), SINTEF.

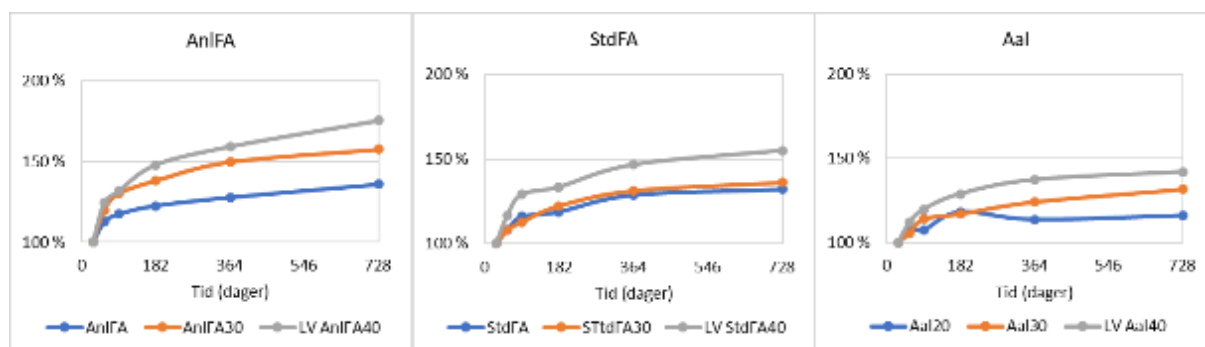


FIGUR 18 JUSTERT TERNINGTRYKKFASTHET TIL 5 % LUFTINNHold, SINTEF. SE TEKST.

TABELL 10 RELATIV TRYKKFASTHET TIL 28- (VENSTRE) OG TIL 91-DØGNSFASTHETEN (HØYRE), SINTEF

| Betong        | Alder [dager] |       |       |       |       |       |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 28            | 56    | 91    | 181   | 365   | 730   |
| 1 AnlFA       | 100 %         | 113 % | 118 % | 123 % | 128 % | 136 % |
| 2 AnlFA30     | 100 %         | 120 % | 130 % | 138 % | 150 % | 158 % |
| 3 StdFA       | 100 %         | 108 % | 116 % | 119 % | 129 % | 132 % |
| 4 StdFA30     | 100 %         | 108 % | 113 % | 122 % | 131 % | 136 % |
| 5 Aal14       | 100 %         | 100 % | 106 % | 116 % | 122 % | 123 % |
| 6 Aal20       | 100 %         | 108 % | 107 % | 118 % | 114 % | 116 % |
| 7 Aal30       | 100 %         | 105 % | 114 % | 117 % | 124 % | 132 % |
| 8 Miljø       | 100 %         | 105 % | 109 % | 115 % | 120 % | 119 % |
| 9 LV AnlFA40  | 100 %         | 125 % | 132 % | 148 % | 159 % | 176 % |
| 10 LV StdFA40 | 100 %         | 117 % | 129 % | 133 % | 147 % | 155 % |
| 11 LV Aal40   | 100 %         | 112 % | 120 % | 129 % | 137 % | 142 % |

| Betong        | Alder [dager] |       |       |       |       |       |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | 28            | 56    | 91    | 181   | 365   | 730   |
| 1 AnlFA       | 85 %          | 96 %  | 100 % | 104 % | 109 % | 116 % |
| 2 AnlFA30     | 77 %          | 92 %  | 100 % | 106 % | 115 % | 121 % |
| 3 StdFA       | 86 %          | 93 %  | 100 % | 102 % | 111 % | 114 % |
| 4 StdFA30     | 89 %          | 96 %  | 100 % | 108 % | 116 % | 121 % |
| 5 Aal14       | 94 %          | 95 %  | 100 % | 109 % | 115 % | 116 % |
| 6 Aal20       | 93 %          | 101 % | 100 % | 110 % | 106 % | 108 % |
| 7 Aal30       | 88 %          | 92 %  | 100 % | 103 % | 109 % | 116 % |
| 8 Miljø       | 91 %          | 96 %  | 100 % | 105 % | 110 % | 109 % |
| 9 LV AnlFA40  | 76 %          | 95 %  | 100 % | 112 % | 121 % | 133 % |
| 10 LV StdFA40 | 77 %          | 90 %  | 100 % | 103 % | 114 % | 120 % |
| 11 LV Aal40   | 84 %          | 93 %  | 100 % | 108 % | 115 % | 119 % |



FIGUR 19 RELATIV FASTHETSTILVEKST FRA 28 DØGN FOR ULIKE SEMENTER OG FLYGEASKEINNHOOLD

### 5.3.2 Trykkfasthet ved S.lab, og sammenlikning med SINTEF

Målte terningtrykkfastheter for de 7 betongene støpt/undersøkt ved S.lab. er gitt i Tabell 11, og relativ trykkfasthet til 28 døgn er gitt i Tabell 12. Hvert resultat er gjennomsnittet av to terninger. Spredningen mellom de to parallellene er generelt liten.

Figur 20 viser målt trykkfasthet ved S.lab. sammen med de samme 7 betongene støpt/undersøkt ved SINTEF. Fasthetene er gjennomgående høyere ved S.lab. Dette skyldes mest sannsynlig at målt luftinnhold i fersk betong i S.lab. var gjennomgående lavere enn ved SINTEF (fra 0,1–1,7 % lavere, gjennomsnitt 1,0 % lavere). Lavt luftinnhold bidrar til høyere fasthet.

Fastheter justert for varierende luftinnhold er vist i Figur 21. Referanse luftinnhold ble satt til 5% og korreksjonsfaktoren for fasthet ved luftinnhold forskjellig fra dette er 11 %. For flere detaljer, se foregående kapittel.

Fastheten til betongen StdFA30 har spesielt stort avvik mellom de to laboratoriene, og her gjør ikke justeringen for luftinnhold situasjonen bedre heller, ettersom betongene hadde omtrent samme luftinnhold begge steder (kun 0,1 % forskjell i luft).

Faktoren for luftkorreksjon på 11 % er muligens noe høyere enn vanlige antagelser, men er ikke nødvendigvis mye høyere enn det man kan forvente for høyst betonger. Vi gjentar

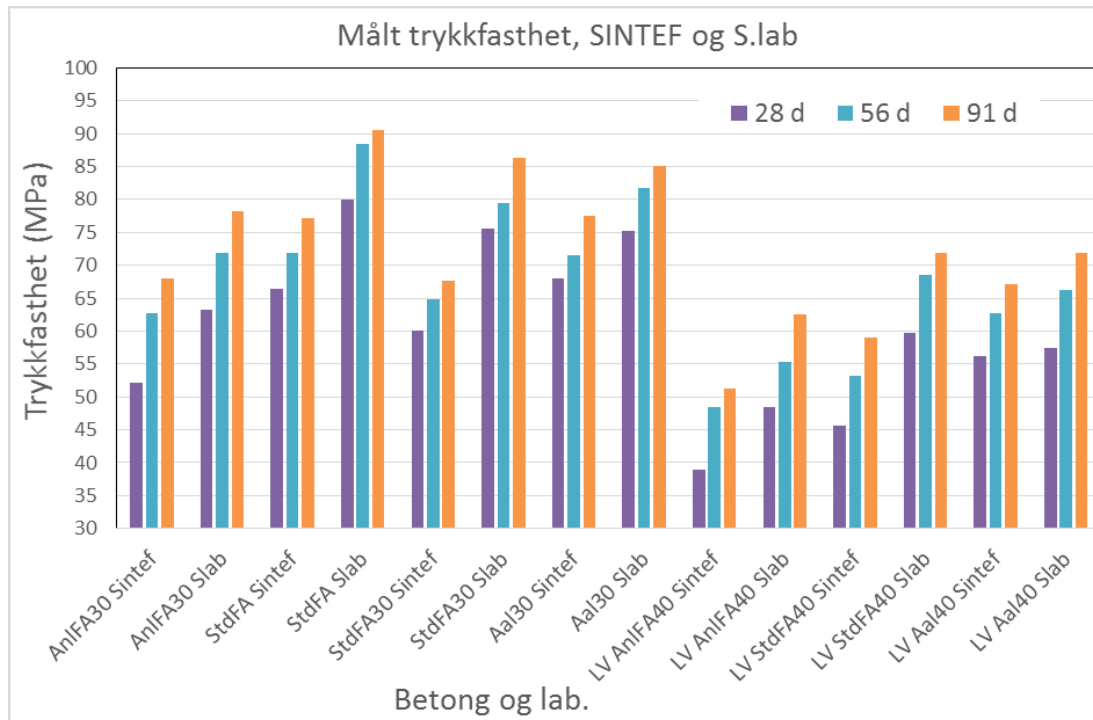
samtidig at bindemiddelmaterialene som ble levert til henholdsvis SINTEF og S.lab. ikke er fra samme leveranser, som diskutert tidligere i kap. 2.2.

TABELL 11 MÅLT TERNINGTRYKKFASTHET [MPa] VED S.LAB, 20 °C STANDARD PRØVNING.

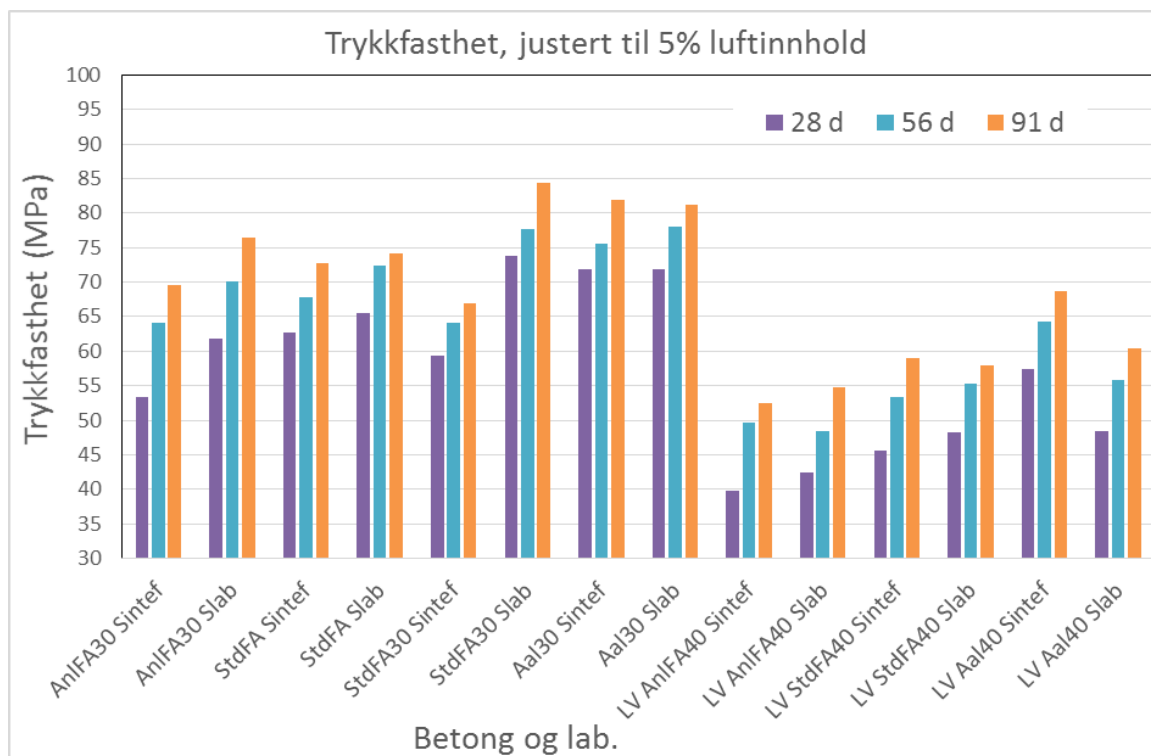
| Betong     | Fersk betong<br>luftinnhold (%) | Alder [dager] |      |      |
|------------|---------------------------------|---------------|------|------|
|            |                                 | 28            | 56   | 91   |
| AnlFA30    | 4,8                             | 63,3          | 71,8 | 78,3 |
| StdFA      | 3,4                             | 80,0          | 88,5 | 90,5 |
| StdFA30    | 4,8                             | 75,5          | 79,5 | 86,3 |
| Aal30      | 4,6                             | 75,3          | 81,8 | 85,0 |
| LV AnlFA40 | 3,9                             | 48,5          | 55,3 | 62,5 |
| LV StdFA40 | 3,3                             | 59,8          | 68,5 | 71,8 |
| LV Aal40   | 3,6                             | 57,5          | 66,3 | 71,8 |

TABELL 12 RELATIV TRYKKFASTHET TIL 28-DØGNSFASTHETEN, S.LAB.

| Betong        | Alder [dager] |       |       |
|---------------|---------------|-------|-------|
|               | 28            | 56    | 91    |
| 2 AnlFA30     | <u>100 %</u>  | 113 % | 124 % |
| 3 StdFA       | <u>100 %</u>  | 111 % | 113 % |
| 4 StdFA30     | <u>100 %</u>  | 105 % | 114 % |
| 7 Aal30       | <u>100 %</u>  | 109 % | 113 % |
| 9 LV AnlFA40  | <u>100 %</u>  | 114 % | 129 % |
| 10 LV StdFA40 | <u>100 %</u>  | 115 % | 120 % |
| 11 LV Aal40   | <u>100 %</u>  | 115 % | 125 % |



FIGUR 20 MÅLT TERNINGTRYKKFASTHET OVER TID (DAGER) VED 20 °C FOR DE 7 BETONGENE SOM ER STØPT/UNDERSØKT BÅDE VED SINTEF OG VED S.LAB.



FIGUR 21 JUSTERT TERNINGTRYKKFASTHET I FORHOLD TIL REFERANSE LUFTINNHold 5 %, SINTEF OG S.LAB

## 5.4 Elektrisk motstand

### 5.4.1 Spesifikk elektrisk motstand, SINTEF

Spesifikk elektrisk motstand er bestemt for alle 11 betonger fra 28 døgnetil 2 års alder. Prøvene (terningene) ble vannlagret, og de samme terningene ble brukt ved alle målinger. Resultatene er gitt i Tabell 13 og Figur 22. Utviklingen over tid gitt som relativ spesifikk elektrisk motstand i forhold til 28- og 91-døgnsverdien er gitt i Tabell 14.

Hvert resultat er gjennomsnittet av målinger utført på fire parallelle 100 mm terninger, og det er de samme terningene det er målt på over tid. Spredningen var liten; gjennomsnittlig COV blant alle målesettene var kun 2,0 %.

Resultatene viser stigende spesifikk elektrisk motstand over tid, som forventet. Etter 2 år (730 dager) varierer spesifikk elektrisk motstand fra 700 (Miljø) til 970  $\Omega$ m (Aal30), og økning i relativ elektrisk motstand fra 91 døgnetil 2 år er fra 142 % (Miljø) til 446 % (LV AnIFA40)

Etter 2 år er trenden at spesifikk elektrisk motstand styres av sementtypen i rekkefølgen: Aal > StdFA > AnIFA (>Miljø), og at økende FA-innhold gir økt elektrisk motstand. Et lite unntak gjelder for Aal14, som hele vegen har noe høyere verdier enn Aal20.

AnIFA-betongene viser relativt sett størst økning i spesifikk elektrisk motstand etter lang tid, og vil antagelig utvikles mye videre etter 2 år. Miljø skiller seg noe ut ved å ha høy spesifikk elektrisk motstand tidlig, men liten utvikling etter 91 døgnetil.

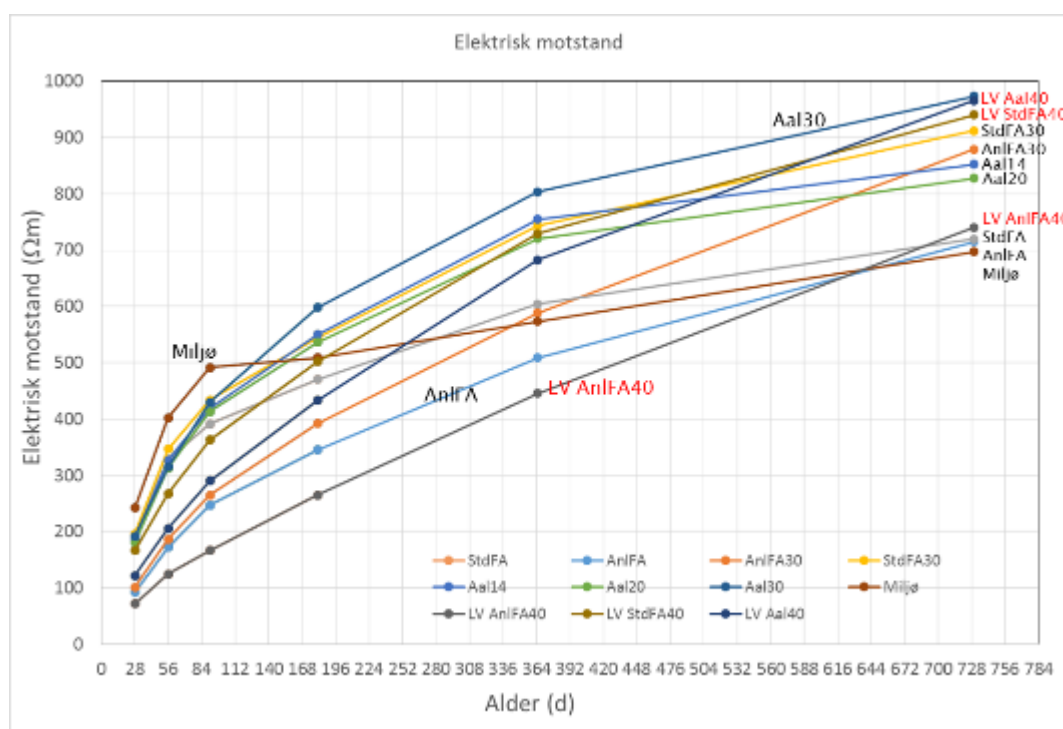
Spesifikk elektrisk motstand er en parameter som avhenger av betongens porøsitet, kontinuiteten av poresystemet og betongenes vanninnhold. I tillegg påvirkes den spesifikke elektriske motstanden av den kjemiske sammensetningen av poreløsningen (f.eks. alkaliinnholdet) og temperaturen. For å eliminere effekten av vanninnhold og temperatur bestemmes den spesifikke elektriske motstanden (som en materialparameter) på vannmettet betong og ved temperatur 20 °C. Pga. sammenhengen med betongens porestruktur betraktes spesifikk elektrisk motstand som en indikasjon på betongens tetthet og en indirekte bestandighetsparameter (spesielt når det gjelder kloridinntrenging og korrosjonshastighet).

Med økende herdetid øker betongens tetthet og betongens spesifikke elektriske motstand øker. Økende spesifikk elektrisk motstand over tid kan derfor tolkes som en indikasjon på økende kloridmotstand. Det er imidlertid kjent at alkalier lutes ut ved langvarig lagring i vann [3] og at dette igjen vil øke den spesifikke elektriske motstanden i betong [4]. For å unngå denne effekten (potensiell feilkilde) er det i senere FoU-prosjekter, f.eks. innenfor BIA/NFR-prosjektene NewsCem og ZeroCarbCon, tilstrebet å la prøver som skal benyttes til måling av elektrisk motstand være omsluttet av minst mulig vann, slik at det raskt innstiller seg en likevekt mellom betong og vann.

I etterfølgende kapittel er resultatene for spesifikk elektrisk motstand diskutert i relasjon til resultatene oppnådd fra kloriddiffusjonsprøvingen.

TABELL 13 MÅLT SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND [ $\Omega$ m] OVER TID, SINTEF

| Betong        | Alder [dager] |     |     |     |     |     |
|---------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|               | 28            | 56  | 91  | 181 | 365 | 730 |
| 1 AnlFA       | 92            | 172 | 247 | 345 | 509 | 715 |
| 2 AnlFA30     | 101           | 186 | 265 | 392 | 588 | 879 |
| 3 StdFA       | 195           | 328 | 390 | 471 | 604 | 720 |
| 4 StdFA30     | 196           | 347 | 434 | 543 | 743 | 912 |
| 5 Aal14       | 187           | 327 | 419 | 550 | 755 | 852 |
| 6 Aal20       | 181           | 313 | 413 | 536 | 721 | 828 |
| 7 Aal30       | 192           | 315 | 430 | 598 | 804 | 973 |
| 8 Miljø       | 242           | 402 | 492 | 509 | 573 | 697 |
| 9 LV AnlFA40  | 71            | 125 | 166 | 265 | 446 | 741 |
| 10 LV StdFA40 | 167           | 267 | 363 | 502 | 729 | 940 |
| 11 LV Aal40   | 122           | 205 | 290 | 433 | 683 | 966 |



FIGUR 22 MÅLT SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND OVER TID (DAGER); OPPTIL 2 ÅR, SINTEF

TABELL 14 RELATIV SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND TIL 28- (VENSTRE) OG 91-DØGNSVERDIEN (HØYRE), SINTEF

| Betong        | Alder [dager] |       |       |       |       |        |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|--------|
|               | 28            | 56    | 91    | 181   | 365   | 730    |
| 1 AnlFA       | 100 %         | 187 % | 268 % | 374 % | 552 % | 776 %  |
| 2 AnlFA30     | 100 %         | 184 % | 262 % | 388 % | 581 % | 869 %  |
| 3 StdFA       | 100 %         | 168 % | 200 % | 242 % | 310 % | 370 %  |
| 4 StdFA30     | 100 %         | 177 % | 221 % | 277 % | 379 % | 464 %  |
| 5 Aal14       | 100 %         | 175 % | 225 % | 295 % | 404 % | 456 %  |
| 6 Aal20       | 100 %         | 173 % | 229 % | 297 % | 399 % | 459 %  |
| 7 Aal30       | 100 %         | 164 % | 224 % | 312 % | 419 % | 508 %  |
| 8 Miljø       | 100 %         | 166 % | 203 % | 210 % | 236 % | 288 %  |
| 9 LV AnlFA40  | 100 %         | 174 % | 233 % | 370 % | 623 % | 1037 % |
| 10 LV StdFA40 | 100 %         | 161 % | 218 % | 301 % | 438 % | 565 %  |
| 11 LV Aal40   | 100 %         | 168 % | 238 % | 355 % | 560 % | 792 %  |

| Betong        | Alder [dager] |      |       |       |       |       |
|---------------|---------------|------|-------|-------|-------|-------|
|               | 28            | 56   | 91    | 181   | 365   | 730   |
| 1 AnlFA       | 37 %          | 70 % | 100 % | 140 % | 206 % | 290 % |
| 2 AnlFA30     | 38 %          | 70 % | 100 % | 148 % | 222 % | 332 % |
| 3 StdFA       | 50 %          | 84 % | 100 % | 121 % | 155 % | 184 % |
| 4 StdFA30     | 45 %          | 80 % | 100 % | 125 % | 171 % | 210 % |
| 5 Aal14       | 45 %          | 78 % | 100 % | 131 % | 180 % | 203 % |
| 6 Aal20       | 44 %          | 76 % | 100 % | 130 % | 174 % | 201 % |
| 7 Aal30       | 45 %          | 73 % | 100 % | 139 % | 187 % | 226 % |
| 8 Miljø       | 49 %          | 82 % | 100 % | 103 % | 117 % | 142 % |
| 9 LV AnlFA40  | 43 %          | 75 % | 100 % | 159 % | 268 % | 446 % |
| 10 LV StdFA40 | 46 %          | 74 % | 100 % | 138 % | 201 % | 259 % |
| 11 LV Aal40   | 42 %          | 71 % | 100 % | 149 % | 235 % | 333 % |

### 5.4.2 Spesifikk elektrisk motstand og relasjon til kloriddiffusjon

I Figur 23 er målt spesifikk elektrisk motstand plottet mot målte kloriddiffusjonskoeffisienter for så korresponderende tidspunkt som mulig (se dokumentasjon av kloridmotstand i kap. 5.8). De ulike datasettene i figuren er angitt som «Kloriddiffusjonsmetode og måletidspunkt for spesifikk elektrisk motstand», dvs:

- «NA EN 206 og 181 d» betyr klorideksponering i 6 % NaCl i perioden fra 90 døgns alder til 181 døgns alder (dvs. alder ved bestemmelse av kloriddiffusjonskoeffisient er 181 dager). Måling av spesifikk elektrisk motstand etter 181 dager, altså samtidig med avsluttet kloriddiffusjonsforsøk.
- «NT Build og 91 d» betyr klorideksponering i 16,5 % NaCl i perioden fra 90 døgns alder til 125 døgns alder. Måling av spesifikk elektrisk motstand etter 91 døgn, som da er den nærmeste terminen til 125 døgn.
- «Sjøbad 1 år og 1 år» betyr klorideksponering i naturlig sjøvann i perioden fra 7 døgn til 1 år. Måling av spesifikk elektrisk motstand ved samme tid, etter 1 år.
- «Sjøbad 2,5 år og 2 år» betyr sjøvannseksponering som ovenfor, i 2,5 år, og måling av spesifikk elektrisk motstand etter 2 år (som var siste termin)

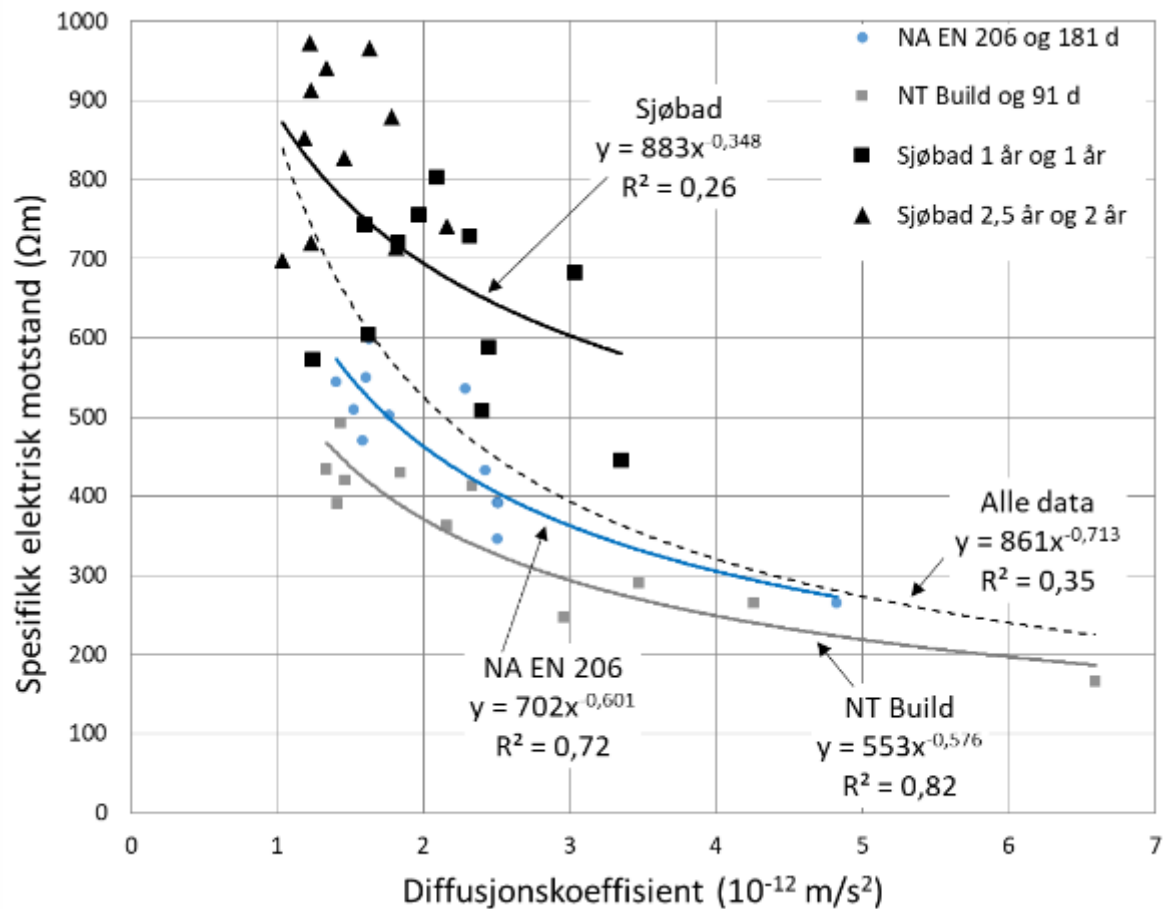
I Figur 23 er angitt trendlinjer for de ulike datasettene beskrevet ovenfor. Sammenstillingen er kanskje noe «hårete» ettersom bl.a. måletidspunktene ikke er helt samsvarende («Sjøbad») og kloriddiffusjonsmetodene varierer. Hovedtrenden er imidlertid at økende spesifikk elektrisk motstand indikerer avtagende kloriddiffusjonskoeffisient. Hvor god relasjonen er (i form av regresjonskonstanten  $R^2$ ) varierer mye mellom datasettene. For datasettene «NA EN 206» og «NT Build» er  $R^2$  henholdsvis 0,72 og 0,82. For «Sjøbad» er  $R^2$  kun 0,26 og hvis alle dataene ses samlet blir  $R^2$  0,35.

Innenfor FoU-programmet Bedre bruvedlikehold (2017–2021) ble det gjennomført ulike felt- og laboratorieforsøk med ulike mørtler for å se på hvordan mørtlenes spesifikke elektriske motstand påvirker ytelsen til katodiske beskyttelsesanlegg. Her ble det anbefalt, både av praktiske årsaker og av hensyn til mulige feilkilder (utlutning) ved langvarig vannlagring, at spesifikk elektrisk motstand, som en materialegenskap, bør bestemmes ved 90 døgns alder [8].

Langvarig vannlagring fører til utlutning av alkalier og derav økende spesifikk elektrisk motstand. Kloriddiffusjonskoeffisienten avtar over lang tids sjøvannseksponering, både som følge av kontinuerlig hydratasjon og som følge av kjemiske/fysiske endringer i overflatesjiktet ved saltvannseksponering. Prosessen er definert som «aldring», selv om det er antatt at et vesentlig bidrag kommer fra betongens interaksjon med sjøvannet [5][8].

Det kan dermed være å forvente at relasjonen mellom diffusjonskoeffisient og elektrisk motstand kan bli dårligere med økende betongalder/eksponeringstid. Datasettet «Sjøbad» er det med klart dårligst relasjon og er også det med lengst lagring, og i sjøvann er det i tillegg flere andre salter enn NaCl, som kan interagere i overflatesjiktet. Elektrisk motstand (vannlagrede prøvestykker) synes å kunne utvikle seg over veldig lang tid, mens

kloriddiffusjonskoeffisienten synes i større grad å gå mot en nedre grense. Samme trend er også funnet i en tidligere sammenlikning basert på målinger over lang tid og hhv. vannlagring for spesifikk elektrisk motstands-prøvene og NT Build 443-metoden for kloriddiffusjon [5].

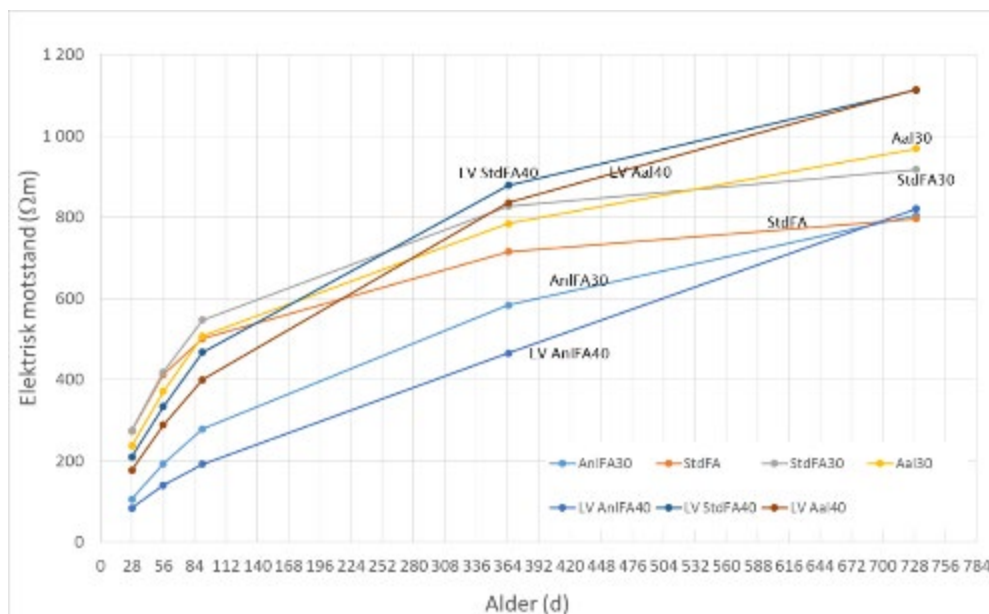


FIGUR 23 SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND VS. BEREGNEDE DIFFUSJONSKOEFFISIENTER. TRENDLINJE FOR DE SEPARATE DATASETTENE SAMT TRENDLINJE FOR ALLE DATAENE SAMLET ER ANGITT.

#### 5.4.3 Spesifikk elektrisk motstand, Sentrallab.

Spesifikk elektrisk motstand er bestemt for de 7 betongene støpt ved S.lab, fra 28 døgnet til 2 års alder. Resultatene er gitt i Figur 24 og i Tabell 15. Utviklingen over tid gitt som relativ spesifikk elektrisk motstand i forhold til 28- og 91-døgnsverdien er vist i Tabell 16.

Også ved S.lab er det målt på fire parallelle 100 mm terninger, med liten intern spredning. COV var i gjennomsnitt for alle settene kun 1,8 %.



FIGUR 24 MÅLT SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND OVER TID (DAGER); OPPTIL 2 ÅR, S.LAB

TABELL 15 MÅLT SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND [ $\Omega$ M] OVER TID, S.LAB

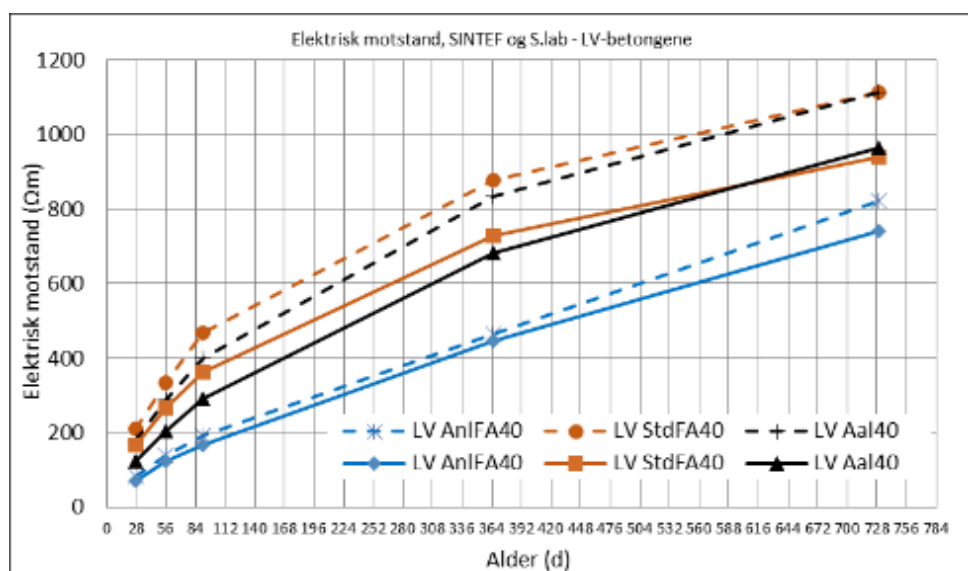
| Betong        | Alder [dager] |     |     |     |      |
|---------------|---------------|-----|-----|-----|------|
|               | 28            | 56  | 91  | 365 | 730  |
| 2 AnIFA30     | 106           | 193 | 278 | 584 | 804  |
| 3 StdFA       | 274           | 412 | 501 | 715 | 796  |
| 4 StdFA30     | 275           | 418 | 547 | 827 | 917  |
| 7 Aal30       | 237           | 371 | 507 | 784 | 968  |
| 9 LV AnIFA40  | 84            | 140 | 193 | 465 | 821  |
| 10 LV StdFA40 | 210           | 334 | 467 | 878 | 1113 |
| 11 LV Aal40   | 178           | 288 | 400 | 835 | 1114 |

TABELL 16 RELATIV SPESIFIKK EL. MOTSTAND TIL 28- (VENSTRE) OG 91-DØGNSVERDIEN (HØYRE), S.LAB.

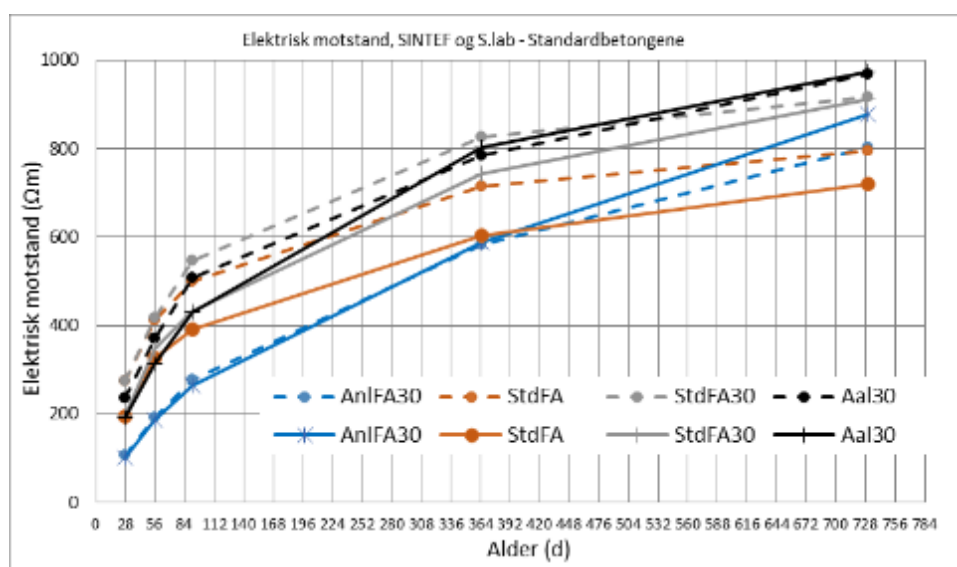
| Betong        | Alder [dager] |       |       |       |       |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
|               | 28            | 56    | 91    | 365   | 730   |
| 1 AnIFA30     | 100 %         | 182 % | 262 % | 549 % | 757 % |
| 2 StdFA       | 100 %         | 150 % | 183 % | 261 % | 290 % |
| 3 StdFA30     | 100 %         | 152 % | 199 % | 301 % | 333 % |
| 7 Aal30       | 100 %         | 157 % | 214 % | 331 % | 408 % |
| 9 LV AnIFA40  | 100 %         | 167 % | 229 % | 555 % | 979 % |
| 10 LV StdFA40 | 100 %         | 159 % | 223 % | 418 % | 530 % |
| 11 LV Aal40   | 100 %         | 162 % | 225 % | 470 % | 627 % |

#### 5.4.4 Spesifikk elektrisk motstand, sammenlikning mellom laboratoriene

Resultatene fra motstandsmålinger utført ved de to laboratoriene er sammenliknet i Figur 25 og Figur 26. Resultatene er i relativt god overensstemmelse selv om S.lab har jevnt over noe høyere verdier. Relativ forskjell mellom de to laboratoriene er gitt i Tabell 17. Det er undersøkt om temperaturforskjeller i betongen ved måling kan forklare forskjellene (det er tidligere funnet ca. 3 % reduksjon i den spesifikke elektriske motstanden pr 1°C økning ved 21°C [10]. Temperaturene målt i vannbadene ved SINTEF er imidlertid noe lavere enn ved S.lab (18–20 vs. 20,5–21,5°C), noe som altså vil påvirke resultatene i motsatt retning.



FIGUR 25 MÅLT SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND FOR LV-BETONGENE ( $w/b=0,44$ ), SAMMENLIKNING S.LAB (STIPLEDE) OG SINTEF (HELTRUKNE)



FIGUR 26 MÅLT SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND FOR STANDARDBETONGENE ( $v/b=0,39$ ), SAMMENLIKNING S.LAB (STIPLEDE) OG SINTEF (HELTRUKNE).

TABELL 1 7 SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND, S.LAB RELATIV TIL SINTEF

| Betong        | Alder [dager] |       |       |       |       |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
|               | 28            | 56    | 91    | 365   | 730   |
| 2 AnlFA30     | 105 %         | 104 % | 105 % | 99 %  | 91 %  |
| 3 StdFA       | 141 %         | 126 % | 128 % | 118 % | 111 % |
| 4 StdFA30     | 140 %         | 121 % | 126 % | 111 % | 101 % |
| 7 Aal30       | 124 %         | 118 % | 118 % | 98 %  | 100 % |
| 9 LV AnlFA40  | 117 %         | 112 % | 116 % | 104 % | 111 % |
| 10 LV StdFA40 | 126 %         | 125 % | 129 % | 120 % | 118 % |
| 11 LV Aal40   | 146 %         | 140 % | 138 % | 122 % | 115 % |

## 5.5 Luftporestruktur og porøsitet

### 5.5.1 Luftporestrukturanalyse

Luftporestrukturanalyse ble gjennomført for alle de 11 betongene som ble støpt ved SINTEF. Analysene ble utført på planslip tildannet ved 91 døgns alder, og resultatene (middelverdier av 2 stk. planslip) er gitt i Tabell 18. Tradisjonelt (for CEM I-baserte betonger) har en spesifikk overflate av luftporene  $> 25 \text{ mm}^{-1}$  og en avstandsfaktor  $< 0,25 \text{ mm}$  vært ansett å representere et velfordelt og godt luftporesystem som sikrer god frostmotstand. Våre resultater viser at alle betongenes luftporestruktur er velfordelt i henhold til disse tradisjonelle kriteriene (med unntak for Aal14 som har spesifikk overflate  $24 \text{ mm}^{-1}$ ). Frostforsøkene derimot viser ingen korrelasjon mellom avskallet materiale og spesifikk overflate og avstandsfaktor. Betonger med svært høy spesifikk overflate og svært lav avstandsfaktor (spesielt LV-betongene) var av de med mest frostavskalling, se resultatene i kap. 5.7, Figur 42. En slik mangel på sammenheng har vi også sett i andre nyere studier [1][6][11].

En mulig feilkilde ved porestrukturanalyser av betonger med høyt FA-innhold kan være at hule FA-partikler registreres som luftporer. Da kan disse betongene av den grunn komme ut med en gunstig luftporestruktur, men hvor en stor andel av «porene» ikke bidrar til frostmotstand fordi de er lukket.

TABELL 18 RESULTATER FRA LUFTPORESTRUKTURANALYSENE

| Betong nr. | Betong     | Luftinnhold (%) | Spesifikk overflate ( $\text{mm}^{-1}$ ) | Avstands-faktor (mm) |
|------------|------------|-----------------|------------------------------------------|----------------------|
| 1          | AnIFA      | 3,7             | 28                                       | 0,22                 |
| 2          | AnIFA30    | 4,4             | 37                                       | 0,15                 |
| 3          | StdFA      | 3,3             | 34                                       | 0,19                 |
| 4          | StdFA30    | 3,1             | 53                                       | 0,12                 |
| 5          | Aal14      | 4,7             | 24                                       | 0,22                 |
| 6          | Aal20      | 2,1             | 46                                       | 0,17                 |
| 7          | Aal30      | 4,5             | 37                                       | 0,15                 |
| 8          | Miljø      | 3,1             | 27                                       | 0,24                 |
| 9          | LV AnIFA40 | 5,8             | 50                                       | 0,10                 |
| 10         | LV StdFA40 | 5,2             | 40                                       | 0,13                 |
| 11         | LV Aal40   | 5,2             | 46                                       | 0,12                 |

### 5.5.2 Porøsitet

Alle de 11 betongene støpt ved SINTEF er undersøkt både ved 91 døgn og ved 2 års alder, mens de 7 betongene støpt ved S.lab. er undersøkt kun ved 91 døgns alder. Sug- og makroporøsitet samt PF-faktorer er framstilt grafisk i Figur 27 til Figur 29. Middelverdier av basert på hhv. åtte enkeltverdier (SINTEF) og seks enkeltverdier (S.lab).

Alle de 11 betongene ved SINTEF har etter 2 års herding i vann høyere sugporøsitet (gjennomsnittlig 0,3 %, maks 0,8 %) og lavere makroporøsitet (gjennomsnittlig 0,3 %, maks 0,6 %) enn ved 91 døgns alder. Endringene i porøsitet over tid er imidlertid ikke særlig større enn de absolutte forskjellene mellom to terninger undersøkt på samme tidspunkt (for sugporøsitet gjennomsnittlig 0,2 %, maks 0,4 % både ved 91 d og 2 år, for makroporøsitet

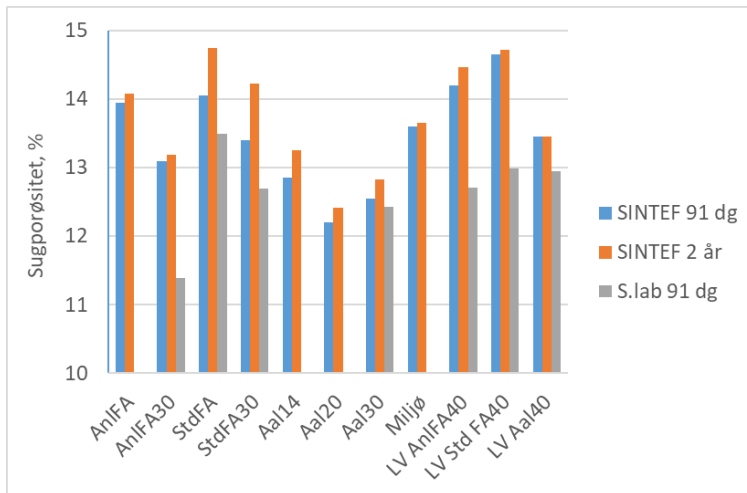
gjennomsnittlig 0,1 % både ved 91 d og 2 år og maks hhv. 0,2 % og 0,4 % ved 91 d og 2 år). Dette tyder på at en andel av de porene som ved 91 d alder ikke sugde vann selv, men måtte mettes ved trykk, etter 2 år fylles ved kapillærsug. Om dette skyldes endringer i porestrukturen eller naturlig spredning i resultatene er uklart, men forskjellene er uansett relativt små (dog systematiske).

PF-faktoren (porebeskyttelsesfaktoren) er forholdet mellom makroporøsitet (luftinnhold) og total porøsitet. Betong med PF-faktor  $> 0,25$  har tradisjonelt vært «klassifisert» som frostsikker, også i kloridutsatt miljø. For betong utsatt kun for rent vann har kriteriet for frostsikker betong vært  $PF > 0,20$ . Ovennevnte endringer i porøsitet fra 91 døgn til 2 års alder resulterer i en reduksjon i PF-faktor over perioden. Av Figur 29 kan en se at de fleste betongene støpt ved SINTEF har  $PF > 0,20$  (unntak gjelder StdFA og Miljø), mens det kun er tre betonger (AnIFA30, Aal30 og LV Aal40) som har  $PF > 0,25$  – ved begge betongaldre. Det bemerkes at det for betonger med lave masseforhold (rundt 0,4) ikke nødvendigvis er en sammenheng mellom PF-faktor og frostmotstand. Lave masseforhold gir tettere pasta og mindre frysbart vann, samtidig som høyere strekkfasthet gjør at betongen tåler frostbelastningen bedre.

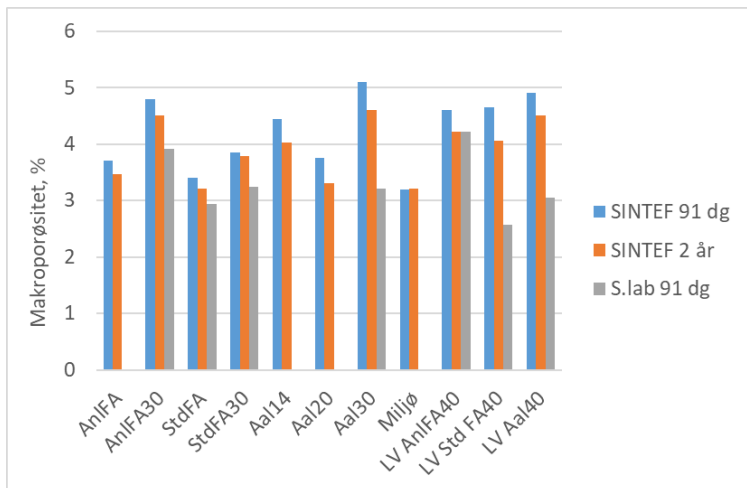
Resultatene viser at det er ingen relasjon mellom PF-faktor og sugporøsitet mot henholdsvis frostavskalling (se kap. 5.7) og beregnede kloriddiffusjonskoeffisienter (se kap. 5.8).

For de 7 betongene som er støpt/undersøkt både ved SINTEF og S.lab er alle målte porøsitetsverdier (sug-, makro- og totalporøsitet) lavere ved S.lab. Forskjellen varierer fra betong til betong og er i gjennomsnitt ca. 1 % lavere i S.lab. for både sug- og makroporøsitet og totalporøsiteten blir da naturlig nok i gjennomsnitt ca. 2 % lavere (total = sug + makro). Det at det er målt lavere makroporøsitet ved S.lab samsvarer med at det ble målt lavere luftinnhold i fersk betong støpt ved S.lab sammenlignet med betong støpt ved SINTEF, se kapittel 5.1. I tillegg til at betongene er støpt ved ulike laboratorier er det, som tidligere bemerket og diskutert (kapittel 2.2 og 5.3.2), benyttet bindemiddelmaterialer fra ulike leveranser ved henholdsvis SINTEF og S.lab.

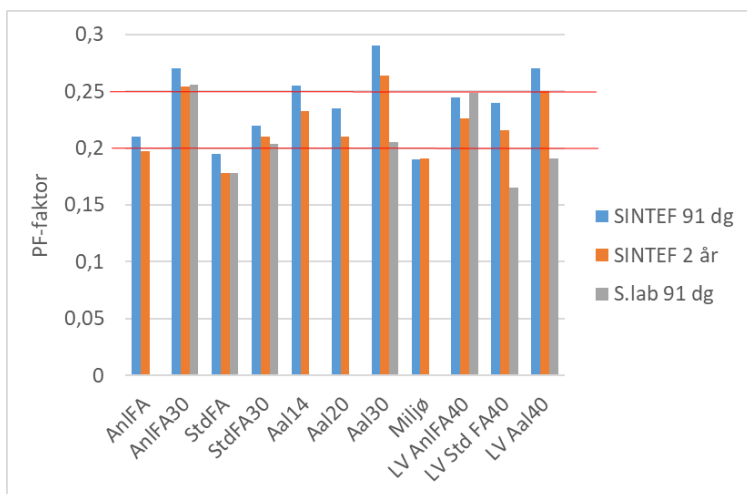
Alle resultatene fra porøsitetsmålingene er samlet i Tabell 19.



FIGUR 27 SUGPORØSITETER MÅLT VED ULIK BETONGALDER (91 DØGN OG 2 ÅR) OG VED ULIKE LABORATORIER (SINTEF OG S.LAB).

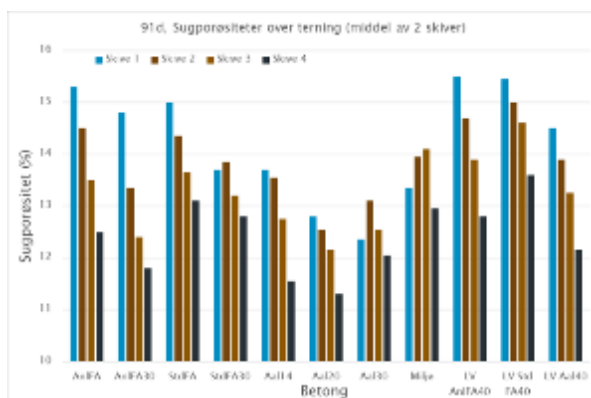


FIGUR 28 MAKROPORØSITETER MÅLT VED ULIK BETONGALDER (91 DØGN OG 2 ÅR) OG VED ULIKE LABORATORIER (SINTEF OG S.LAB).

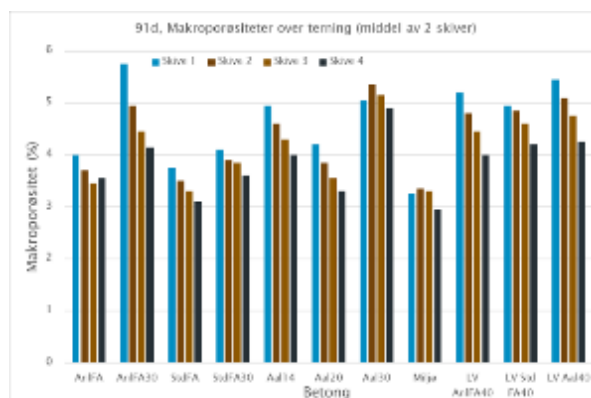


FIGUR 29 PF-FAKTORER BESTEMT VED ULIK BETONGALDER (91 D OG 2 ÅR) OG VED ULIKE LABORATORIER (SINTEF OG S.LAB). TIDLIGERE ANTATTE GRENSEVERDIER FOR FROSTSIKKER BETONG ER TEGNET INN, >0,25 FOR KLORIDUTSATT BETONG OG >0,20 FOR BETONG EKSPONERT FOR FERSKVANN.

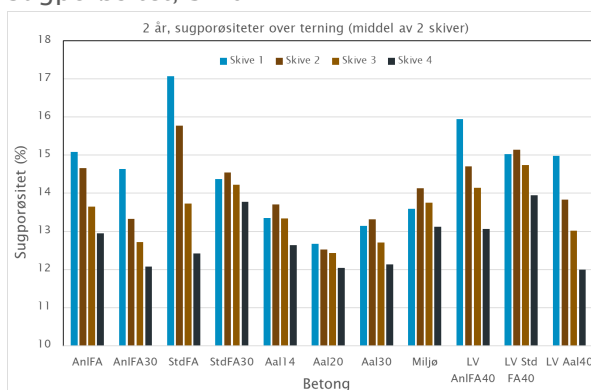
Det må bemerkes at for alle terninger støpt ved SINTEF er det en avtagende både sug- og makroporøsitet fra skive 1 (nærmest avstrykningsflata) til skive 4, dette gjelder både ved 91 d og 2 år (unntak for Miljø-betongen), se Figur 30. Det er ingen slik systematikk i prøvene testet ved S.lab., men her var tre skiver tatt fra midtdelen av sylindere og det er heller ikke klart hva som var opp og ned i forhold til støperetningen.



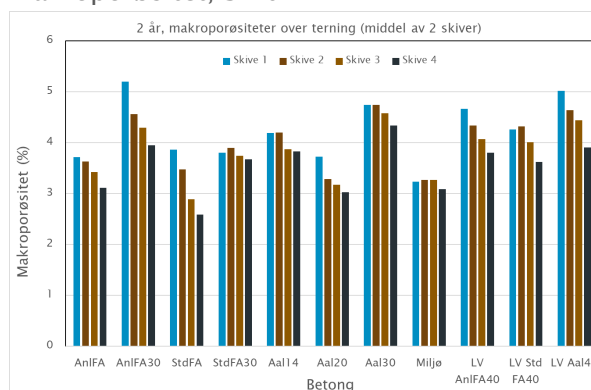
Sugporøsitet, 91 d



Makroporøsitet, 91 d



Sugporøsitet, 2 år



Makroporøsitet, 2 år

FIGUR 30 SUGPORØSITETER OG MAKROPORØSITETER SKIVE FOR SKIVE VED SINTEF ETTER 90 DØGN OG 2 ÅR (MIDDEL AV TO TILSVARENDE SKIVER)

**TABELL 19 BEREGNEDNE PORØSITETSVERDIER, SUGMETTET DENSITET OG PF-FAKTOR, MIDDELVERDIER AV HHV. ÅTTE 20 MM SKIVER (SINTEF) OG SEKS 20 MM SKIVER (S.LAB)**

| Betong nr. | Betong-navn | Lab. og alder <sup>1)</sup> | Sug-porøsitet % | Makro-porøsitet % | Total-porøsitet % | Sugmettet densitet kg/m <sup>3</sup> | PF-faktor |
|------------|-------------|-----------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|-----------|
| 1          | AnlFA       | SINTEF 91 d                 | 14,0            | 3,7               | 17,6              | 2350                                 | 0,21      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 14,1            | 3,5               | 17,6              | 2364                                 | 0,20      |
| 2          | AnlFA30     | SINTEF 91 d                 | 13,1            | 4,8               | 17,9              | 2328                                 | 0,27      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 13,2            | 4,5               | 17,7              | 2358                                 | 0,25      |
|            |             | S.lab 91d                   | 11,4            | 3,9               | 15,3              | 2384                                 | 0,26      |
| 3          | StdFA       | SINTEF 91 d                 | 14,1            | 3,4               | 17,4              | 2364                                 | 0,20      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 14,8            | 3,2               | 18,0              | 2365                                 | 0,18      |
|            |             | S.lab 91d                   | 13,5            | 2,9               | 16,4              | 2386                                 | 0,18      |
| 4          | StdFA30     | SINTEF 91 d                 | 13,4            | 3,9               | 17,3              | 2353                                 | 0,22      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 14,2            | 3,8               | 18,0              | 2341                                 | 0,21      |
|            |             | S.lab 91d                   | 12,7            | 3,2               | 15,9              | 2387                                 | 0,20      |
| 5          | Aal14       | SINTEF 91 d                 | 12,9            | 4,5               | 17,4              | 2332                                 | 0,26      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 13,3            | 4,0               | 17,3              | 2341                                 | 0,23      |
| 6          | Aal20       | SINTEF 91 d                 | 12,2            | 3,8               | 16,0              | 2365                                 | 0,24      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 12,4            | 3,3               | 15,7              | 2380                                 | 0,21      |
| 7          | Aal30       | SINTEF 91 d                 | 12,6            | 5,1               | 17,6              | 2319                                 | 0,29      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 12,8            | 4,6               | 17,4              | 2339                                 | 0,26      |
|            |             | S.lab 91d                   | 12,4            | 3,2               | 15,6              | 2377                                 | 0,21      |
| 8          | Miljø       | SINTEF 91 d                 | 13,6            | 3,2               | 16,8              | 2378                                 | 0,19      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 13,7            | 3,2               | 16,9              | 2370                                 | 0,19      |
| 9          | LV AnlFA40  | SINTEF 91 d                 | 14,2            | 4,6               | 18,8              | 2311                                 | 0,25      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 14,5            | 4,2               | 18,7              | 2338                                 | 0,23      |
|            |             | S.lab 91d                   | 12,7            | 4,2               | 16,9              | 2344                                 | 0,25      |
| 10         | LV StdFA40  | SINTEF 91 d                 | 14,7            | 4,7               | 19,3              | 2307                                 | 0,24      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 14,7            | 4,1               | 18,8              | 2326                                 | 0,22      |
|            |             | S.lab 91d                   | 13,0            | 2,6               | 15,6              | 2393                                 | 0,16      |
| 11         | LV Aal40    | SINTEF 91 d                 | 13,5            | 4,9               | 18,4              | 2313                                 | 0,27      |
|            |             | SINTEF 2år                  | 13,5            | 4,5               | 18,0              | 2328                                 | 0,25      |
|            |             | S.lab 91d                   | 12,9            | 3,1               | 16,0              | 2372                                 | 0,19      |

<sup>1)</sup> SINTEF-prøver er støpt og undersøkt ved SINTEF (alle prøver fra samme blanding), mens S.lab-prøver er støpt og undersøkt ved S.lab.

### 5.5.3 Luftinnhold målt i fersk betong, ved PF og ved porestrukturanalyse

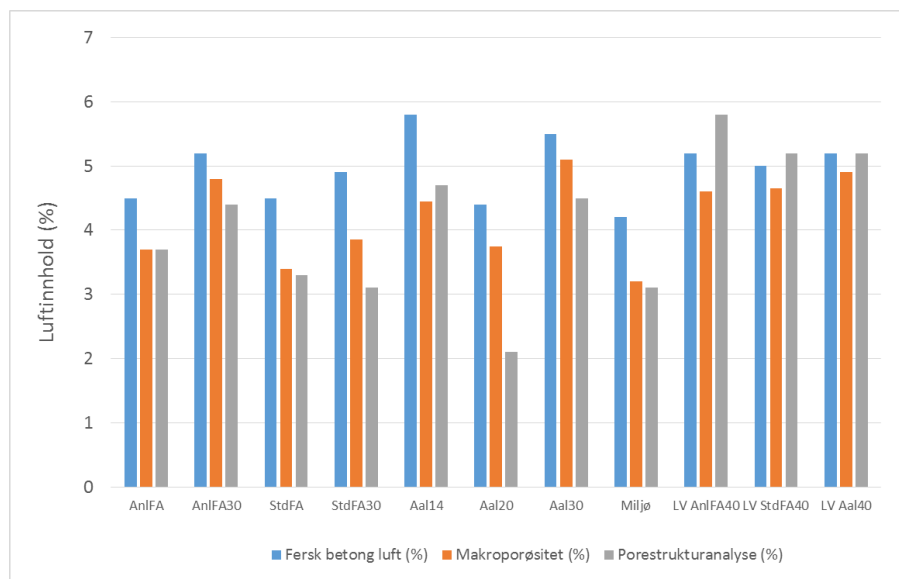
Luftinnhold/innhold av makroporer målt ved SINTEF i fersk betong, ved forenklet PF og ved porestrukturanalyse, er presentert i foregående kapitler (5.1, 5.5.1 og 5.5.2). Her er de ulike luftmålingene sammenliknet, se Tabell 20 og Figur 31.

For standardbetongene (betong 1–8) ligger målt luftinnhold i herdet betong (fra PF- og porestrukturanalyse) konsekvent lavere enn luft målt i fersk betong. Metodene er forskjellige, men resultatet kan også være et bilde på at man mister noe luft under utstøping og vibrering

av prøvestykker (at makroporøsiteten øker oppover mot støpeflaten i en 100 mm terning indikerer også dette, se foregående kapittel). For LV-betongene (betong 9–11) gir PF og porestrukturanalysen noe mer likhet med luftinnholdet målt i fersk betong.

**TABELL 20 LUFTINNHOOLD MÅLT VED ULIKE METODER (SINTEF). TALL I PARENTES ER % I FORHOLD TIL LUFT MÅLT I FERSK BETONG**

| Betong nr. | Navn       | Luft i fersk betong (%) | PF, makroporøsitet (%) | Porestruktur-analyse (%) |
|------------|------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| 1          | AnlFA      | 4,5                     | 3,7 (82 %)             | 3,7 (82 %)               |
| 2          | AnlFA30    | 5,2                     | 4,8 (92 %)             | 4,4 (85 %)               |
| 3          | StdFA      | 4,5                     | 3,4 (76 %)             | 3,3 (73 %)               |
| 4          | StdFA30    | 4,9                     | 3,9 (80 %)             | 3,1 (63 %)               |
| 5          | Aal14      | 5,8                     | 4,5 (78 %)             | 4,7 (81 %)               |
| 6          | Aal20      | 4,4                     | 3,8 (86 %)             | 2,1 (48 %)               |
| 7          | Aal30      | 5,5                     | 5,1 (93 %)             | 4,5 (82 %)               |
| 8          | Miljø      | 4,2                     | 3,2 (76 %)             | 3,1 (74 %)               |
| 9          | LV AnlFA40 | 5,2                     | 4,6 (88 %)             | 5,8 (112 %)              |
| 10         | LV StdFA40 | 5                       | 4,7 (94 %)             | 5,2 (104 %)              |
| 11         | LV Aal40   | 5,2                     | 4,9 (94 %)             | 5,2 (100 %)              |



**FIGUR 31 LUFTINNHOOLD MÅLT I FERSK BETONG, FRA PF-METODEN (MAKROPORØSITET) OG FRA PORESTRUKTURANALYSEN**

## 5.6 Naturlig karbonatisering

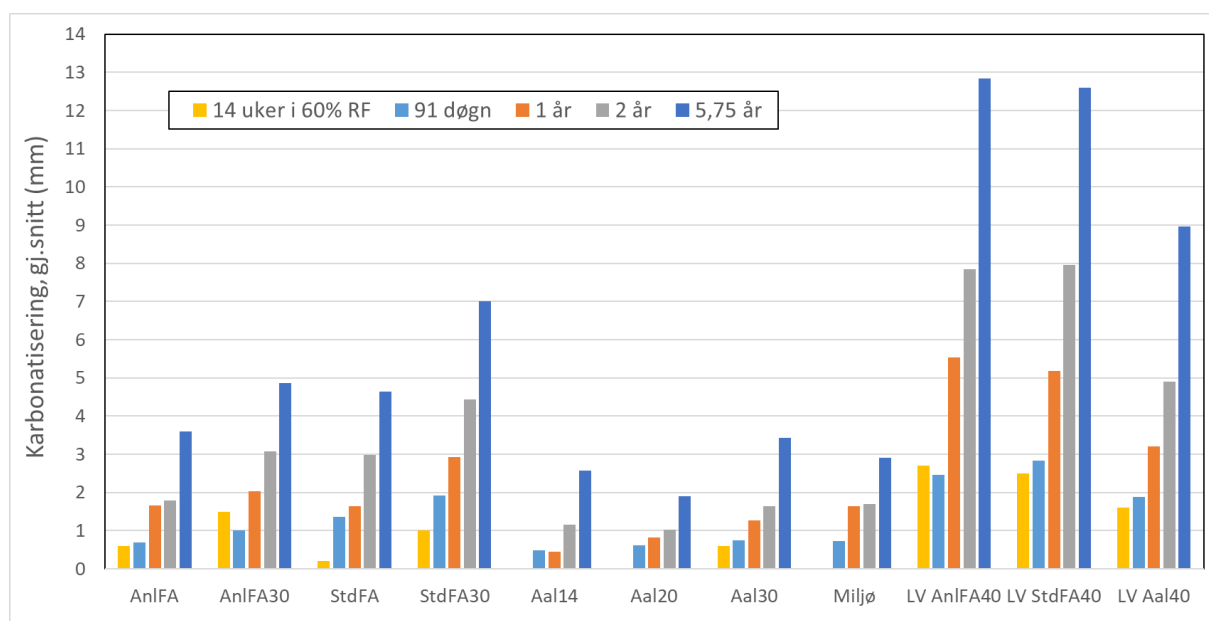
Når CO<sub>2</sub> fra lufta diffunderer inn i betongen reagerer den kjemisk med flere av bestanddelene i betongen, først og fremst Ca(OH)<sub>2</sub>. Mengden karbondioksid som kan bindes kjemisk i betongen avhenger av bindemiddelets sammensetning (sementtype) og betongens sementinnhold. Rene portlandssementer vil inneholde mer Ca(OH)<sub>2</sub> enn sementer med

flygeaske og flygeaske tilsetninger og har dermed større buffer mot videre karbonatisering. Betongens porøsitet (masseforhold), CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i lufta og fuktinnholdet i betongen har også stor betydning for karbonatiseringshastigheten. Måling av naturlig karbonatisering er utført på prøver utplassert på SINTEFs feltstasjon i Trondheim, i utendørs klima, beskyttet mot regn. Karbonatiseringsdybder ble målt etter 91 d, 1 år 2 år og 5,75 år. Det ble rapportert separate resultater for prøvestykkenes avstrykningsflate, sideflater og bunnflate. I Figur 32 er resultatene vist som gjennomsnittet for alle flatene, for alle prøvingsterminer. Det ble i forbindelse med frostprøving målt karbonatiseringsdybde (fra sagflater) i laboratoriet etter lagring 14 uker i klimakammer med 60 % RF og 20 °C. Laboratorieresultatene er også inkludert i Figur 32. Alle resultatene for naturlig karbonatisering er gitt i Vedlegg 5.

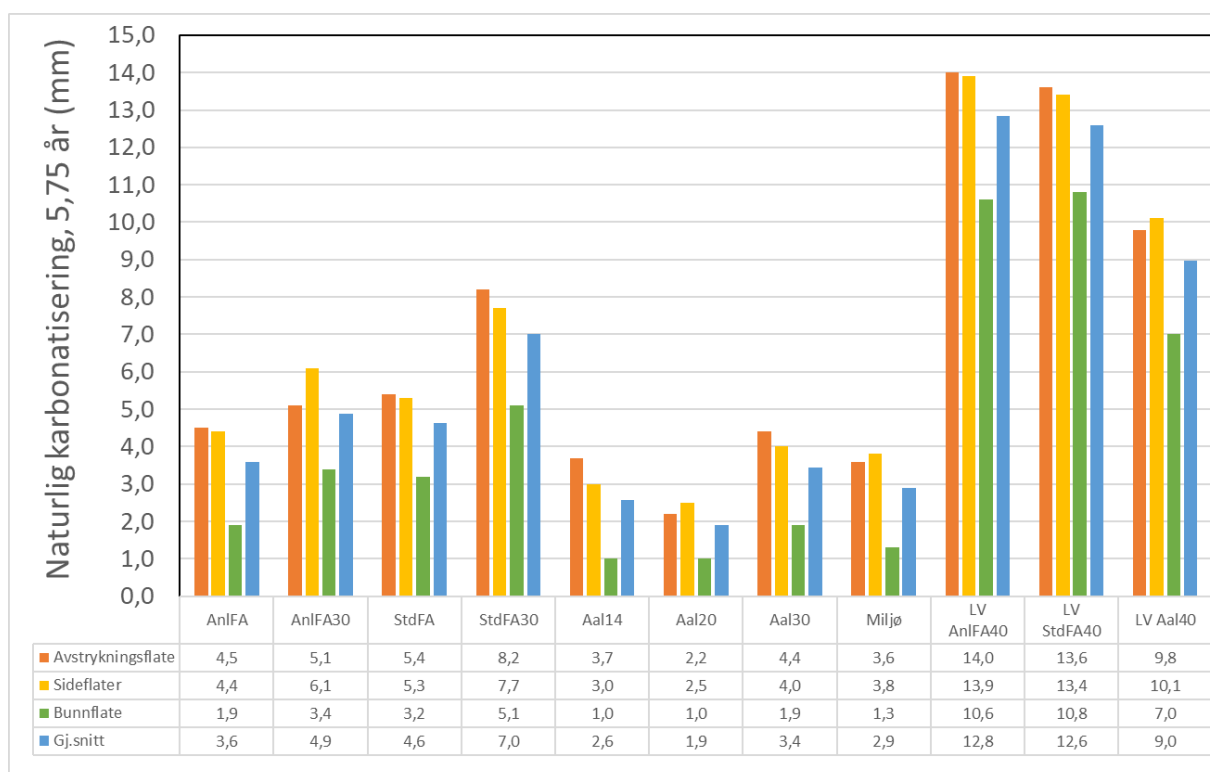
Karbonatiseringsdybden øker med tiden, som forventet. Økende flygeaskeinnhold gir økt karbonatisering, med ett unntak for Aal14 vs. Aal20. Det er videre forskjeller mellom sementtypene: Etter 5,75 år er gjennomsnittlig naturlig karbonatiseringdybde for Standard-betongene ca. 4–7 mm for AnI- og Std-variantene, og ca. 2–3 mm for Aal-variantene og Miljø. LV-betongene har høyest flygeaskeinnhold (40 %) og høyere masseforhold (0,44), og har mest karbonatisering; ca. 9–13 mm etter 5,75 år. Også for LV-betongene er karbonatiseringsdybdene lavere for Aal-varianten enn for AnIFA- og StdFA-variantene. Laboratorieprøvene (14 uker i 60 % RF) har mindre eller omtrent samme karbonatisering som 91-døgnresultatene (=13 uker) for feltprøvene.

Figur 33 viser resultatene etter 5,75 år, henholdsvis for feltprøvenes ulike flater samt gjennomsnittet. Bunnflaten har gjennomgående minst karbonatisering. Dette gjelder alle terminene. Sideflater og avstrykningsflaten har omtrent samme karbonatisering.

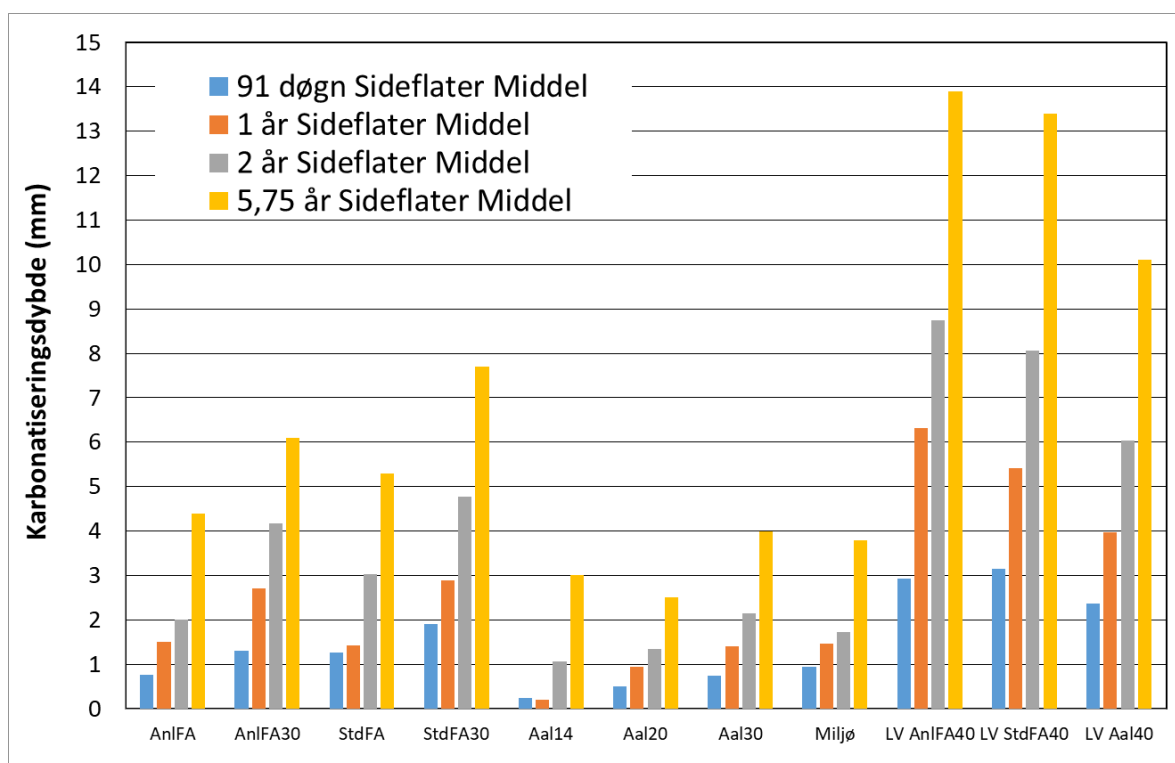
Figur 34 viser resultatene kun for sideflatene, alle terminer.



FIGUR 32 NATURLIG KARBONATISERING (GJ.SNITT ALLE FLATER) FOR ALLE TERMINER, SAMT KARBONATISERING FOR EKSPONERINGSFLATEN I LAB.PRØVENE RETT FØR FROSTPRØVNING ETTER LAGRING 14 UKER I 60 % RF



FIGUR 33 NATURLIG KARBONATISERING (UTE BESKYTTET MOT REGN) ETTER 5,75 ÅR (FLATE FOR FLATE, SAMT GJENNOMSNITT)

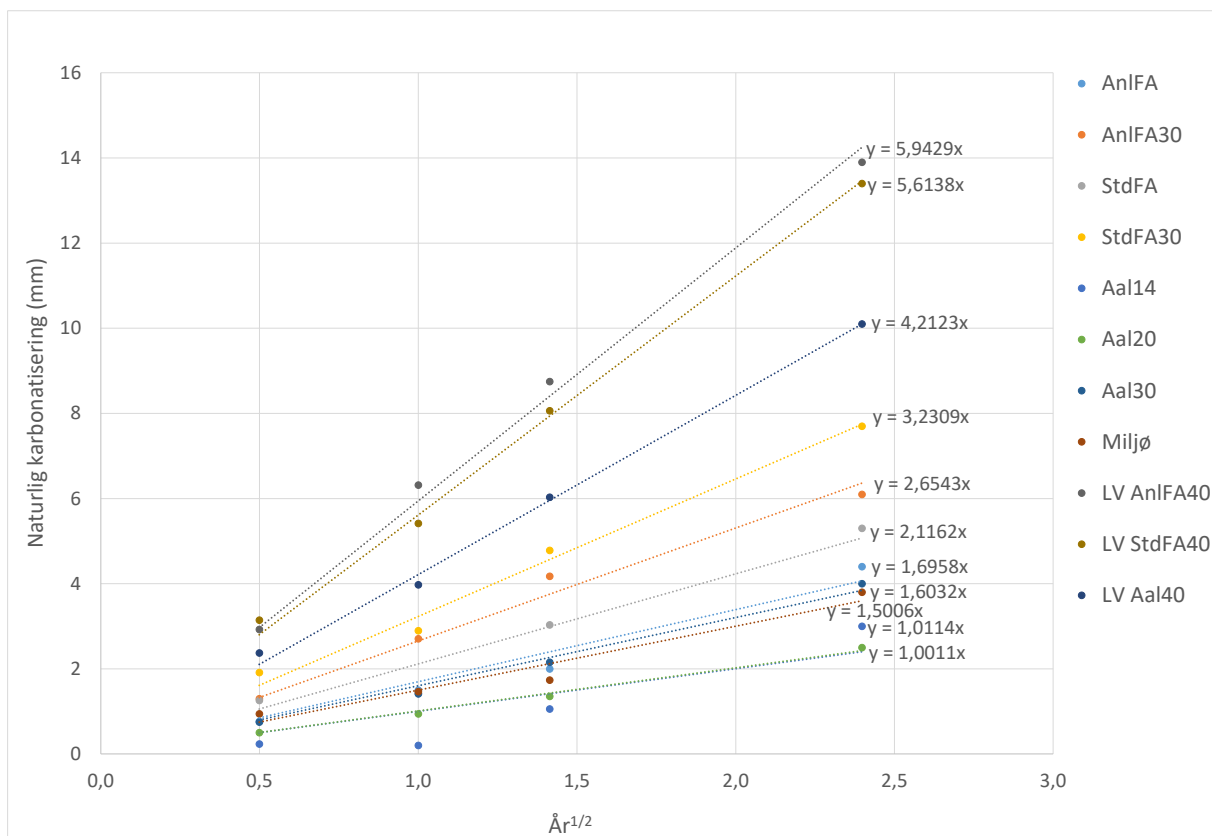


FIGUR 34 NATURLIG KARBONATISERING FOR SIDEFLATER (GJ.SNITT), ALLE TERMINER

En vanlig antagelse er at karbonatiseringsdybden ( $x$  [mm]) utvikles lineært med roten av tiden i henhold til modellen/likningen  $x = k \cdot t^{1/2}$ , hvor  $k$  [mm/år<sup>1/2</sup>] er en kurvetilpasnings-parameter

og  $t$  er tiden [år]. Figur 35 gir et plot av målt  $x$  (for sideflatene) mot  $\sqrt{t}$ , og stigningen på den lineære trendlinjen er da lik  $k$ .  $k$ -verdiene for de ulike betongene er gitt i Tabell 21.  $k$ -verdien er å betrakte som en materialparameter, hvor økende  $k$  betyr avtagende motstand mot karbonatisering. Av Figur 36 ser vi at økende flygeasketilsetning (og økt masseforhold) gir økende  $k$ -verdi. Dette er i tråd med teorien om at karbonatiseringshastigheten er avhengig av mengden karbonatiserbare materialer i betongen, samt tidligere erfaringer knyttet til flygeaske og slagg [12]. Det er imidlertid ingen generell sammenheng mellom  $k$ -verdi og sugporøsitet.

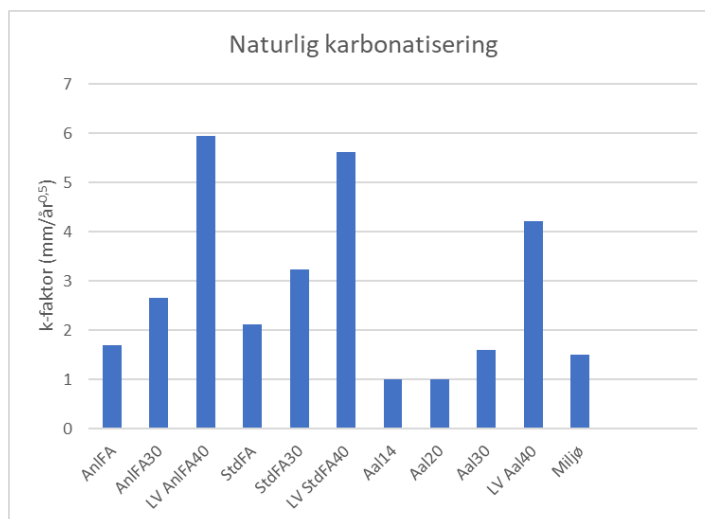
Ved å ekstrapolere slike kurver videre ut i tid kan man få et estimat på karbonatiseringsdybden ved gitte aldrer. Ved å sette inn for eksempel 100 år (dvs.  $\sqrt{100 \text{ år}} = 10 \text{ år}^{1/2}$ ) får standardbetongene en forventet karbonatiseringsdybde varierende fra 17 til 32 mm, mens LV-betongene får en forventet karbonatiseringsdybde fra 42 til 59 mm. For sistnevnte indikerer således akkurat disse resultatene at man ikke bør kombinere LV-betong med overdekning <60 mm når forholdene for karbonatisering er optimale.



FIGUR 35 NATURLIG KARBONATISERING FOR SIDEFLATER (GJ.SNITT) MOT ROTEN AV TID (ÅR). TALLVERDIENE ANGITT I FIGUREN TILSVARER FAKTOREN  $k$  I LIKNINGEN.

**TABELL 21 ESTIMERTE  $k$ -FAKTORER**  
[MM/ÅR<sup>1/2</sup>] I KARBONATISERINGS-  
LIKNINGEN  $x = k \cdot t^{1/2}$

| Betong     | $k$ -faktor |
|------------|-------------|
| AnlFA      | 1,696       |
| AnlFA30    | 2,653       |
| StdFA      | 2,116       |
| StdFA30    | 3,231       |
| Aal14      | 1,001       |
| Aal20      | 1,011       |
| Aal30      | 1,603       |
| Miljø      | 1,501       |
| LV AnlFA40 | 5,943       |
| LV StdFA40 | 5,614       |
| LV Aal40   | 4,212       |



**FIGUR 36 BEREKNED K-FAKTORER BASERT PÅ MÅLINGER AV KARBONATISERINGSDYBDER PÅ FELTEKSPONERTE PRØVER ETTER 91 D, 1 ÅR 2 ÅR OG 5,75 ÅR.**

## 5.7 Frostmotstand

Frostprøving er gjennomført med tre ulike varianter av forkondisjonering (se Tabell 4 for detaljer):

- 1) 3 uker i vann før saging og 14 uker forkondisjonering ved 60 % RF (*alle 11 betongene, SINTEF*), se Figur 37 og Figur 38. Denne forsøksprosedyren er i dag beskrevet i NS-EN 206+NA for bindemidler med mer enn 35 % slagg. Selv om bindemidlene undersøkt her enten ikke består av slagg eller har mindre enn 35 % slagg ble prosedyren likevel gjennomført for å se generelt på effekten av slik forkondisjonering, spesielt på betonger med flygeaske.
- 2) 2 + 14 uker i vann før saging og 1 uke forkondisjonering ved 65 % RF (*6 av betongene, sendt fra SINTEF til S.lab*), se Figur 39. Dette er en avart av prosedyren over som ikke er beskrevet noe sted, men ble gjennomført for å ha samme alder ved start frostbelastning som variant 1), for slik å kunne studere direkte effekten av forlenget forkondisjonering i 65±5 % RF.
- 3) Standard (Borås) frostprosedyre med 3 uker i vann/65±5 % RF før saging og 1 uke i 65% RF (*7 av betongene, S.lab*), se Figur 40. Dette er prosedyren som i dag er beskrevet i NS-EN 206+NA for bindemidler med mindre enn 35 % slagginnhold.

Grenseverdiene for akseptabel frostavskalling ved prøving i henhold til NS-EN 206+NA (ovennevnte prosedyre 1 og 3) er per dato 0,5 kg/m<sup>2</sup> etter 56 døgn.

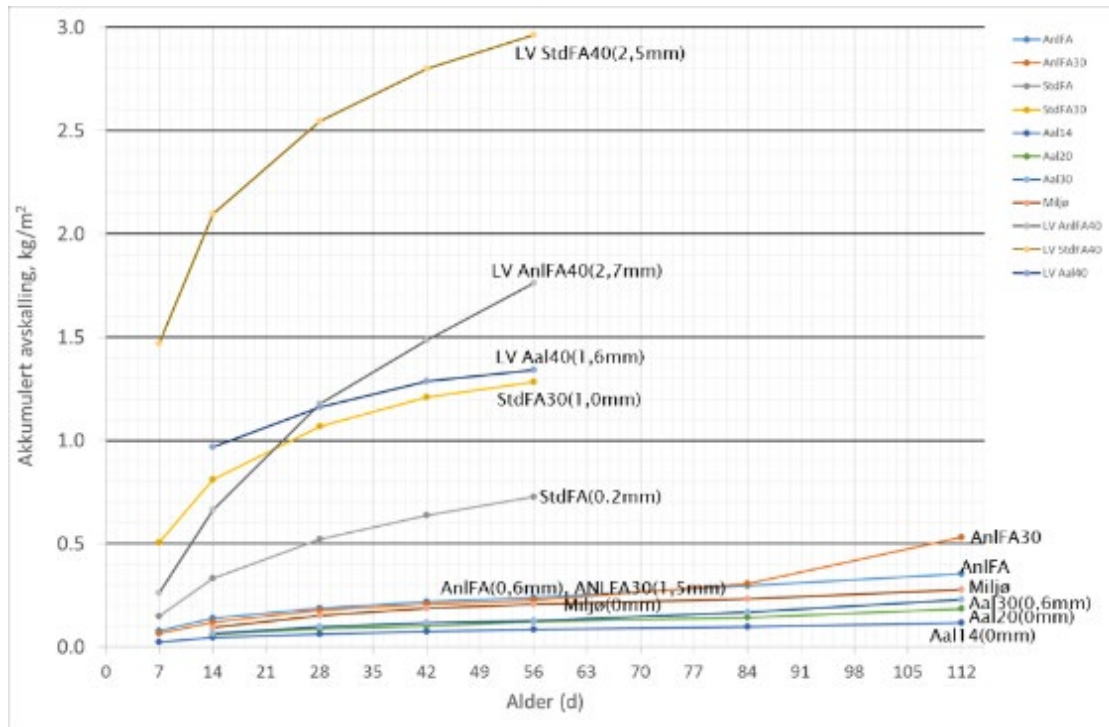
En samling av alle resultatene er vist i Figur 41, gitt som frostavskalling etter 56 frostsykler. I påfølgende diskusjon er det avskalling etter 56 sykler det fokuseres på.

Alle 11 betongene ble frostprøvd med 14 uker forkondisjonering med lagring i 60 % RF («14RF»). Resultatene fra denne prøvingen er vist i Figur 37 og Figur 38. Som figurene viser har alle LV-betongene høy avskalling, i følgende rekkefølge: StdFA40 (3,0 kg/m<sup>2</sup>), AnlFA40 (1,8 kg/m<sup>2</sup>) og Aalb40 (1,3 kg/m<sup>2</sup>). Av Standard-betongene skiller betongene med StdFA-sement seg ut med de høyeste avskallingene; StdFA30 (1,3 kg/m<sup>2</sup>) og StdFA (0,7 kg/m<sup>2</sup>), mens alle betongene med Aal-sement har avskalling på 0,1 kg/m<sup>2</sup> og betongene med Miljøsement og AnlFA-sement har avskallinger på 0,2 kg/m<sup>2</sup>. Alle verdier etter 56 frostsykler.

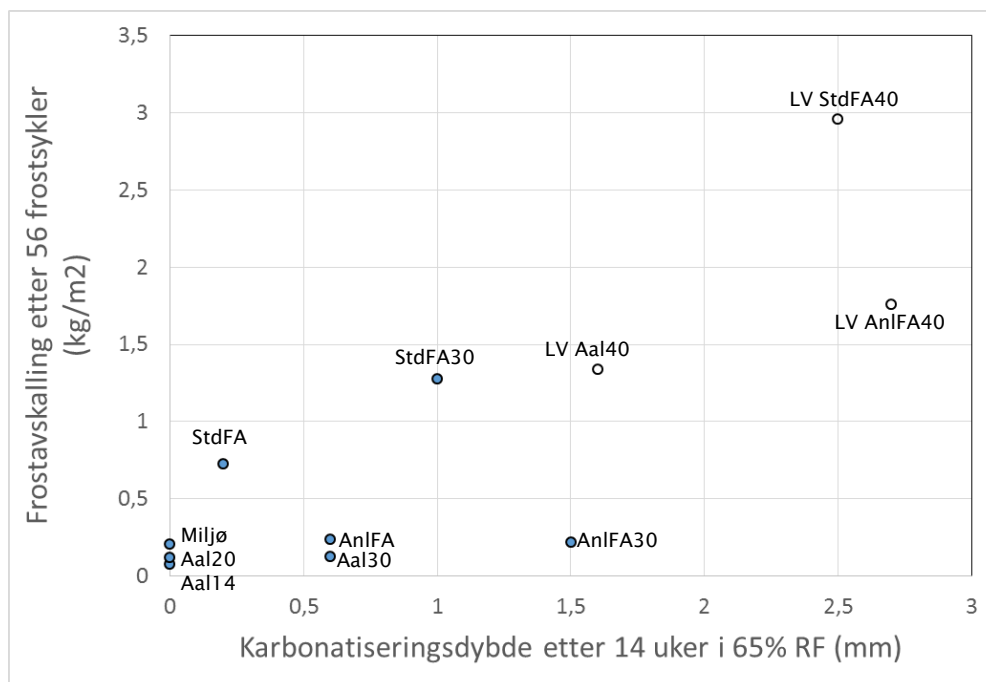
6 av betongene ble også kjørt med 14 uker lagring i vann etterfulgt av 1 uke i 60 % RF («14V»), se resultater i Figur 39. Denne «mildere» forkondisjoneringen medfører en sterk reduksjon i avskalling for de betongene som hadde høyest avskalling etter «14RF»-kondisjonering; LV StdFA40 (fra 3,0 til 0,5 kg/m<sup>2</sup>), LV Aal40 (fra 1,3 til 0,2 kg/m<sup>2</sup>) og StdFA (fra 0,7 til 0,1 kg/m<sup>2</sup>), mens det er liten/ingen innvirkning på de betongene som allerede lå lavt (0,1–0,2 kg/m<sup>2</sup>) etter «14RF»-kondisjonering; AnlFA30, Aal20 og Aal30.

Sementer med høyt slagginnhold er kjent for å ha redusert frostbestandighet i forhold til andre sementer, og teorien har vært at dette skyldes at betongens porestruktur blir grovere når betongen karbonatiserer (i motsetning til betong med CEM I som øker tetthet/fasthet ved karbonatisering). Bestemmelsen i NS-EN 206+NA om forlenget forkondisjonering i 14 uker for slaggsementer (>35 % slagg), ble derfor innført for å provosere fram en karbonatisering av eksponeringsflaten før frosteksponeering. For å se direkte på sammenhengen mellom karbonatisering og frostmotstand ble det etter forkondisjonering i 14 uker i 60 % RF målt karbonatiseringsdybde på egne parallelle prøvestykker. Målingene ble utført ved splitting av prøvestykkene, påsprøyting av pH-indikatoren tymolftalein på bruddflatene og måling av karbonatiseringsdybden – fra sagflate, dvs. tilsvarende eksponeringsflaten for de frosteksponteerte prøvestykkene. Samlet sett er det ingen entydig sammenheng mellom målt karbonatiseringsdybde ved start frosteksponeering og frostavskallingen, muligens med unntak for StdFA-betongene (hvor økende FA-tilsetning gir økende karbonatisering og økende frostavskalling), se Figur 38. LV-betongene (m=0,44) har imidlertid de største karbonatiseringsdybdene og også høyest frostavskalling. Når det gjelder *tynnslipene* som ble tildannet av de samme parallelle prøvestykkene viser mikroskoperingen noe av samme trend for karbonatiseringsdybde som for tradisjonell måling med pH-indikator. Mikroriss i toppsjiktet og porøsitetskiller i toppsjiktet ble også studert i mikroskopet, men observasjonene gir ingen systematikk til frostavskallingsresultatene. Det ble i det store og hele observert «lite mikroriss» og i liten grad observert porøsitetskiller (se Vedlegg 9).

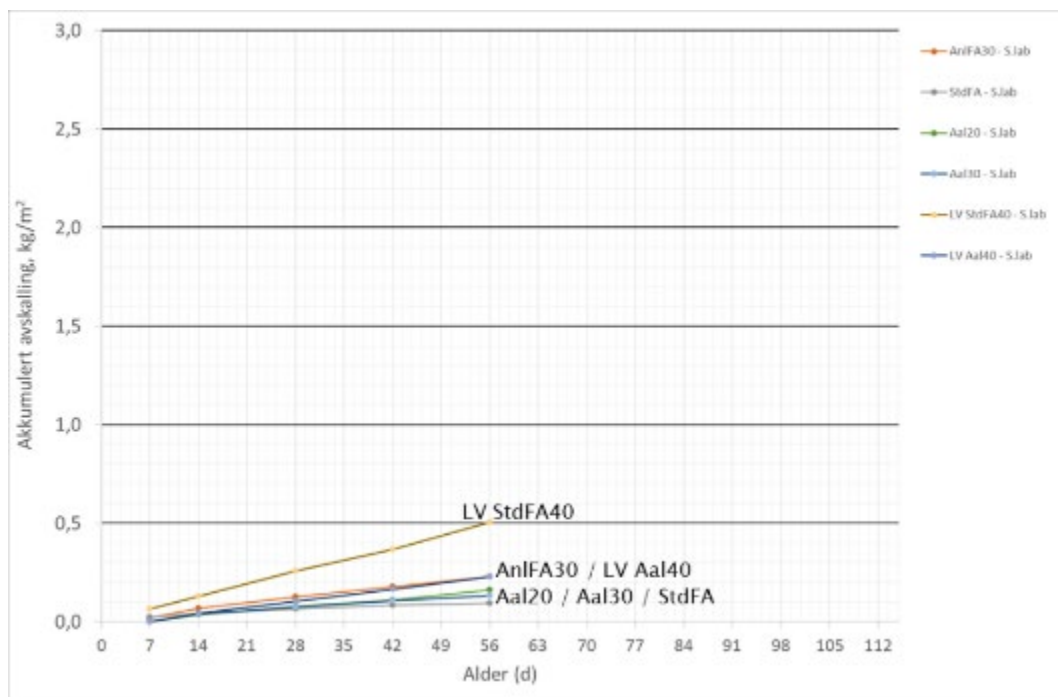
Tradisjonelt har man for betonger basert på CEM I sementer sett at høy spesifikk overflate og lav avstandsfaktor for luftporesystemet er indikatorer for god frostmotstand. Disse forsøkene på betonger med ulike doseringer av FA og slagg viser ingen slik korrelasjon, se Figur 42. Det er heller ingen korrelasjon mellom frostavskalling og PF-faktor. Dette er tidligere diskutert i kapittel 5.5.



FIGUR 37 FROSTAVSKALLING ETTER 14 UKER FORLENGET KONDISJONERING VED 60 % RF (SINTEF). I PARENTES: GJENNOMSNIITTLIG KARBONATISERINGSDYBDE RETT FØR START FROSTEKSPONERING.

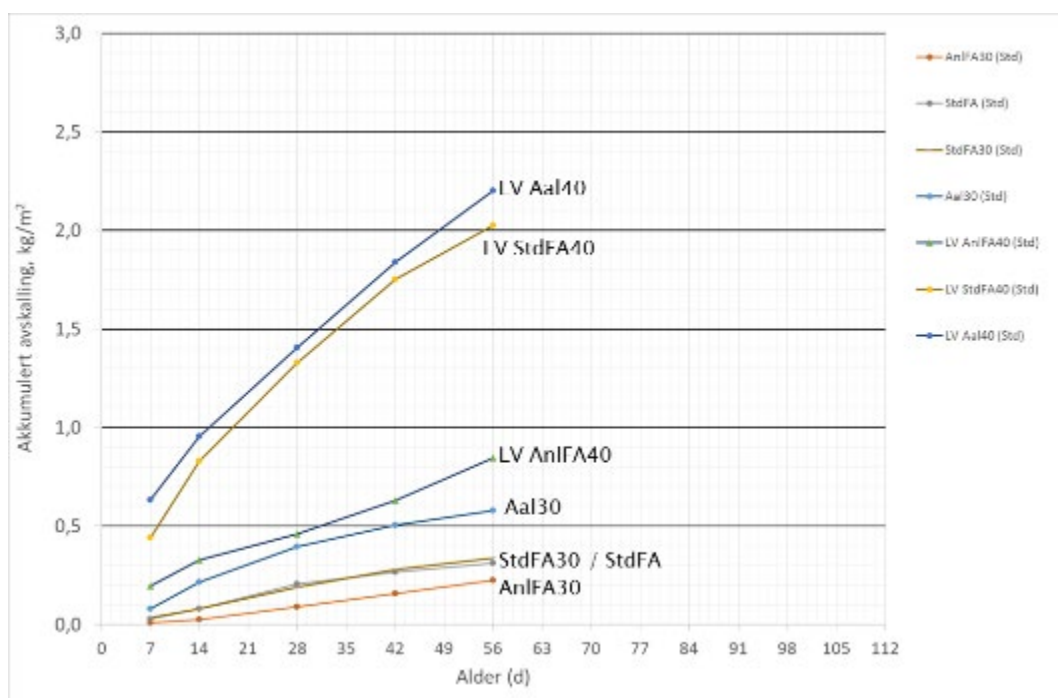


FIGUR 38 FROSTAVSKALLING ETTER 14 UKER FORLENGET KONDISJONERING VED 60 % RF, OG 56 FROST-SYKLER VS. KARBONATISERINGSDYBDE VED START FROSTEKSPONERING (SINTEF)

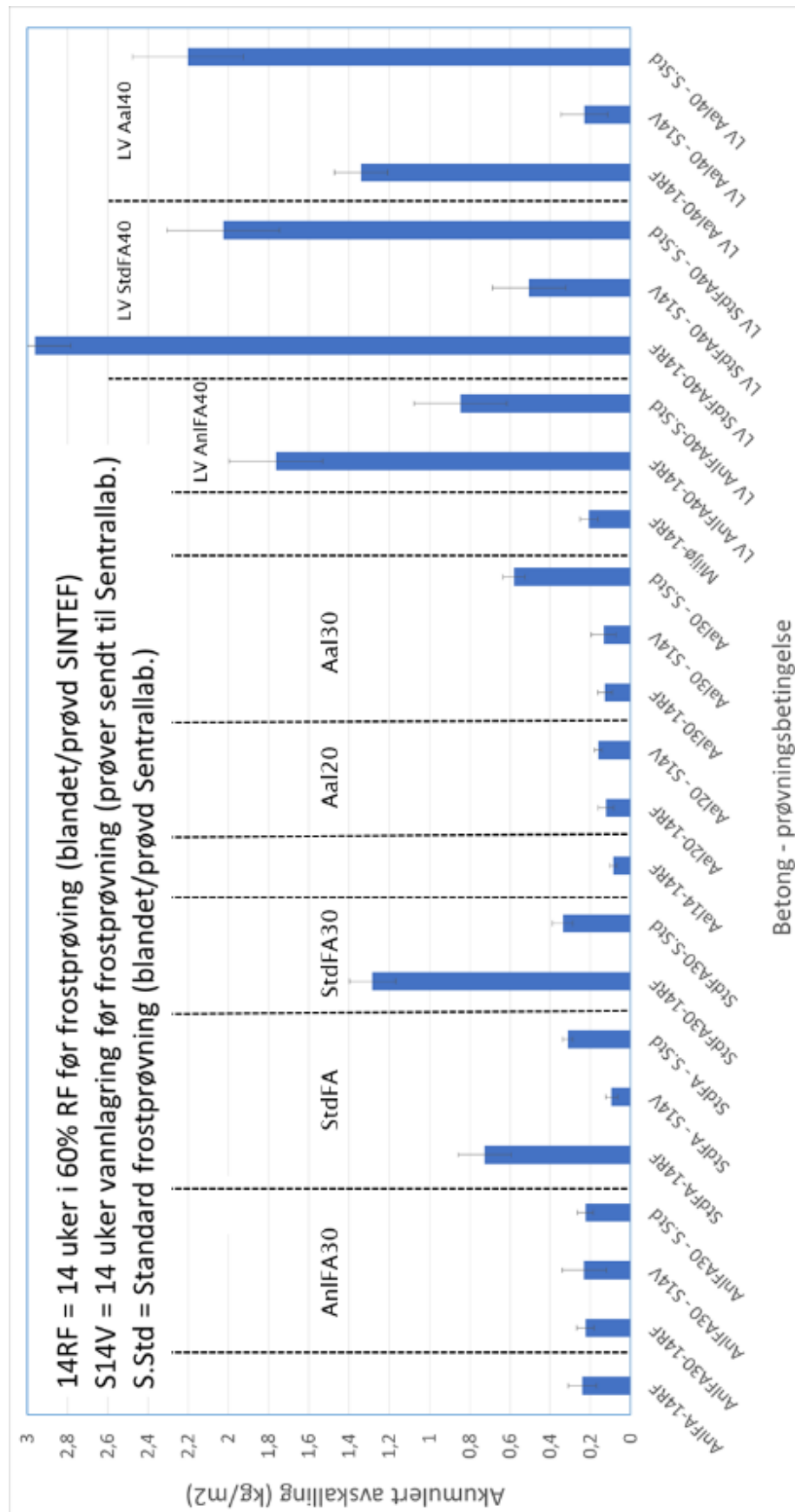


FIGUR 39 FROSTAVSKALLING ETTER 14 UKER FORLENGET KONDISJONERING I VANN (S.LAB)

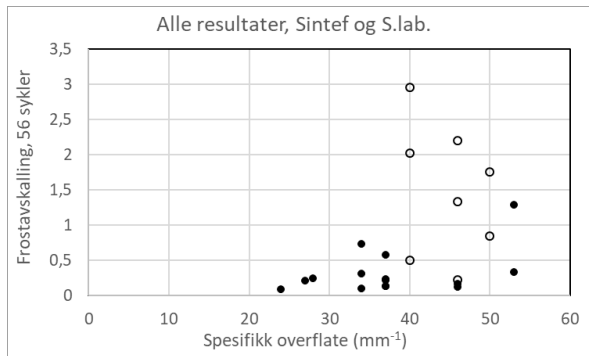
7 av betongene ble støpt og frostprøvd ved S.lab, iht. standard frostprøving (Borås), se resultater i Figur 40. Også denne prøvingsprosedyren gir høyest avskalling for LV-betongene; LV StdFA40 og LV Aal40 (begge  $> 2 \text{ kg/m}^2$ ) og LV AnlFA40 ( $0,85 \text{ kg/m}^2$ ). Av Standard-betongene har Aal30 høyest avskalling ( $0,58 \text{ kg/m}^2$ ), mens de øvrige (AnlFA30, StdFA, StdFA30) har frostavskalling i området  $0,2\text{--}0,3 \text{ kg/m}^2$ . Hvis vi sammenligner disse resultatene med «14V»-resultatene, ser vi at frostavskallingen reduseres markant for flere av betongene når alder ved start frosteksposering øker fra 4 uker (3+1 uke) til 17 uker (16+1 uker). Sammenligner vi de to prosedyrene som per i dag henvises til i NS-EN 206+NA («14RF» og «standard»), ser vi at frostavskallingen øker fra «standard»- til «14RF»-kondisjonering for flere av betongene med FA-innhold. Dette gjelder alle StdFA-betongene (med 18, 30 og 40 % FA) og LV AnlFA40-betongen. Aalb-betongene (med 30 og 40 % FA) får noe redusert avskalling, mens AnlFA30-betongen oppfører seg nokså likt. Det bemerkes at betongene frostprøvd ved SINTEF («14RF» og «14V») er støpt ved SINTEF og at betongene frostprøvd ved S.lab («standard») er støpt ved S.lab, og som tidligere nevnt; med samme resepter, men med bindemidler fra andre leveranser enn de benyttet ved SINTEF og med noe avvikende verdier for enkelte egenskaper (trykkfasthet, spesifikk elektrisk motstand og porositetsverdier), f.eks. lavere luftinnhold og PF-verdi (se Tabell 9). Forskjellene i resultater mellom metodene må derfor betraktes som trender.



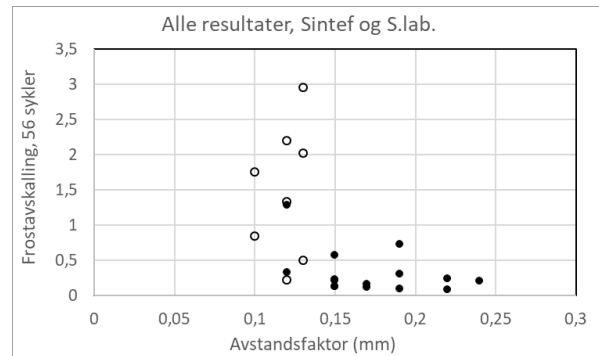
FIGUR 40 FROSTAVSKALLING ETTER STANDARD (BORÅS) PRØVING (S.LAB)



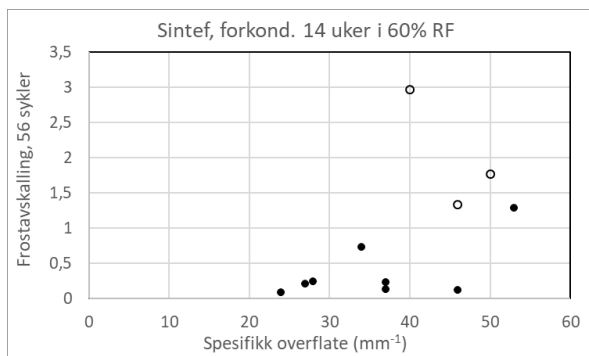
**FIGUR 41 FROSTAVSKALLING ETTER 56 FROSTSYKLER. ALLE RESULTATER / ULIKE KONDISJONERINGSBETINGELSER.**



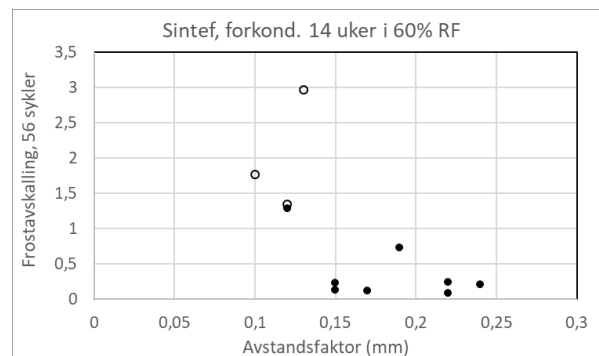
Frostavskalling vs. spesifikk overflate. Alle resultatene (Sintef og S.lab), varierende forkondisjonering.



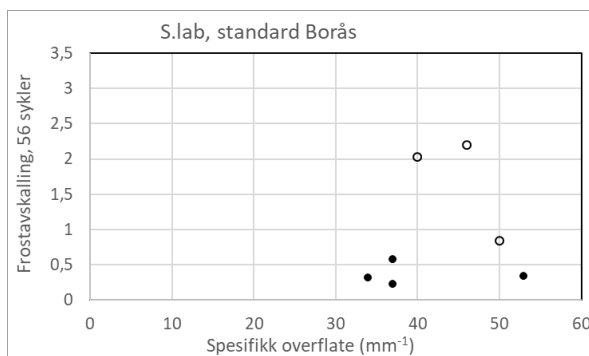
Frostavskalling vs. avstandsfaktor. Alle resultatene (Sintef og S.lab), varierende forkondisjonering.



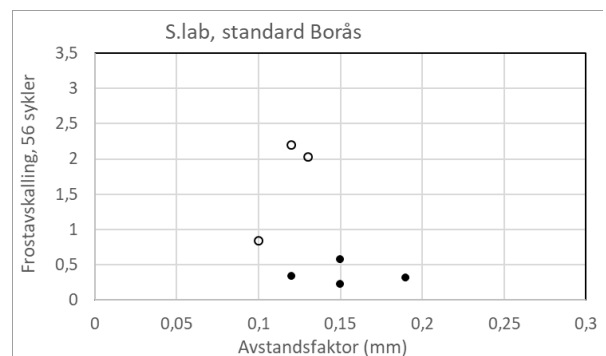
Frostavskalling vs. spesifikk overflate. 14 uker forkondisjonering ved 60 % RF. (Sintef).



Frostavskalling vs. avstandsfaktor. 14 uker forkondisjonering ved 60 % RF. (Sintef).



Frostavskalling vs. spesifikk overflate. Standardprøving (S.lab)



Frostavskalling vs. avstandsfaktor. Standardprøving (S.lab)

**FIGUR 42 FROSTAVSKALLING ETTER 56 FROSTSYKLER VS. HHV. SPESIFIKK OVERFLATE (VENSTRE KOLONNE) OG AVSTANDSFAKTOR (HØYRE KOLONNE). ÅPNE MARKØRER ER LV-BETONGENE, FYLTE MARKØRER ER STANDARD BETONGENE. FOR FROSTRESULTATENE I NEDERSTE RAD ER PRØVENE BÅDE PRODUSERT OG PRØVD VED S.LAB, MENS SPESIFIKK OVERFLATE OG AVSTANDSFAKTOR ER BESTEMT PÅ PRØVENE SOM BLE PRODUSERT VED SINTEF.**

## 5.8 Kloridmotstand

### 5.8.1 NS-EN 206+NA (6 % NaCl) og NT Build 443 (16,5 % NaCl)

Målte kloridprofiler etter akselerert eksponering iht. de to metodene er vist i Figur 43–Figur 46 (middelverdier for tre prøvestykker). Kloridprofiler for hver enkeltprøve er gitt i Vedlegg 6 og 7.

For hvert enkelt kloridprofil er det beregnet en kloriddiffusjonskoeffisient og en overflatekonsentrasjon basert på Fick's 2. lov for ren diffusjon:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{d}{dx} \left( D \frac{dC}{dx} \right)$$

Løsningen av ligningen kan uttrykkes på følgende måte:

$$C(x,t) = C_0 - (C_0 - C_i) \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right)$$

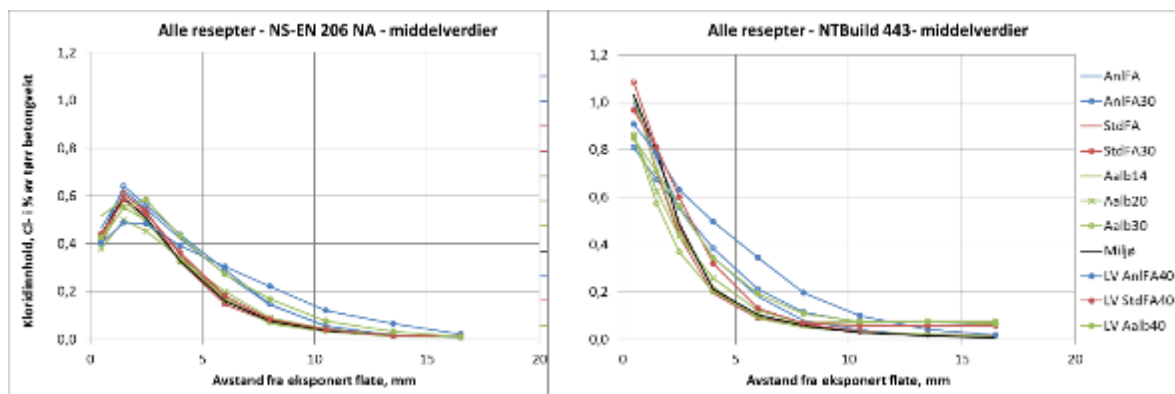
hvor:  $C_0$ : Kloridkonsentrasjonen på betongoverflata, % av betongvekt  
 $C_i$ : Initielt kloridinnhold (bakgrunnsverdi), % av betongvekt  
 $x$ : Avstand fra betongoverflata, m  
 $t$ : eksponeringstiden, s  
 $D$ : kloriddiffusjonskoeffisienten,  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $\operatorname{erf}$ : feilfunksjonen

Diffusjonskoeffisienten,  $D$ , og overflatekonsentrasjonen,  $C_0$ , bestemmes ved å tilpasse ligningen til de målte kloridprofiler ved ikke-lineær regresjonsanalyse ved minste kvadratots metode.

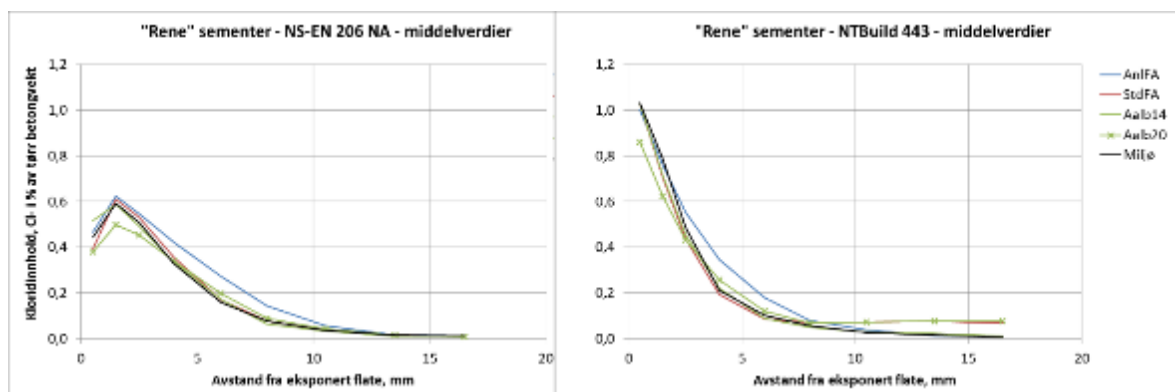
Figur 47–Figur 49 viser beregnede diffusjonskoeffisienter, for begge metodene (middelverdier av tre separat beregnede koeffisienter). For de 11 betongene er gjennomsnittlig intern spredning for  $D$  blant alle settene med tre paralleller 9 % for NS-EN 206+NA-metoden (stedvis forkortet NA 206) og 13 % for NT Build-metoden.

I Figur 48 er resultatene fra de to metodene plottet mot hverandre. De rene måleresultatene («Målt  $D$ ») viser at NT Build 443-metoden gir høyere  $D$  enn NS-EN 206+NA-metoden for noen av betongene, noe som kan være å forvente ettersom den involverer lavere alder ved bestemmelse av  $D$  ( $D_{\text{app}(35\text{d})}$ ) sammenliknet med NS-EN 206+NA-metoden ( $D_{\text{app}(90\text{d})}$ ). Det er altså både en aldersforskjell (aldring) og en salinitetsforskjell (ukjent innflytelse) for de to metodene. For det andre datasettet («NT Build aldringsjustert til 90 d») som også er angitt i figuren er det gjort en aldersjustering hvor måleresultatene fra NT Build-metoden er aldringsjustert fra 35 til 90 d. Dette er gjort med aldringsekspONENTENE (for forskalte flater) som er beskrevet og funnet i kap. 5.8.2.5 og ved bruk av likning 1 i samme kapittel. Aldersjustering av NT Build-resultatene reduserer diffusjonskoeffisientene og de to «metodene» gir da mer like resultater (kvadratsumsavviket reduseres 40 %).

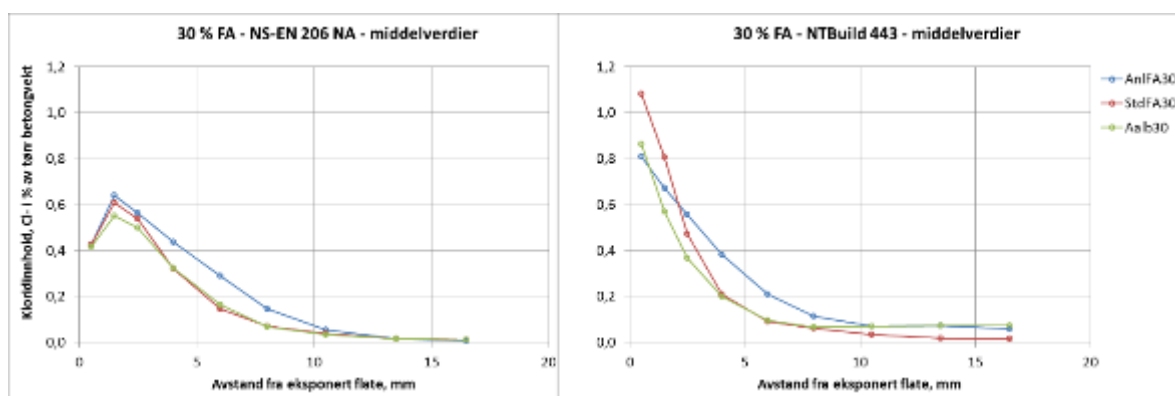
For NS-EN 206+NA-metoden har alle Standard-betongene en diffusjonskoeffisient som er  $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  eller lavere. AnIFA-variantene har generelt høyere diffusjonskoeffisienter enn de øvrige sementtypene og LV-betongene har de høyeste diffusjonskoeffisientene innenfor hver sementtype.



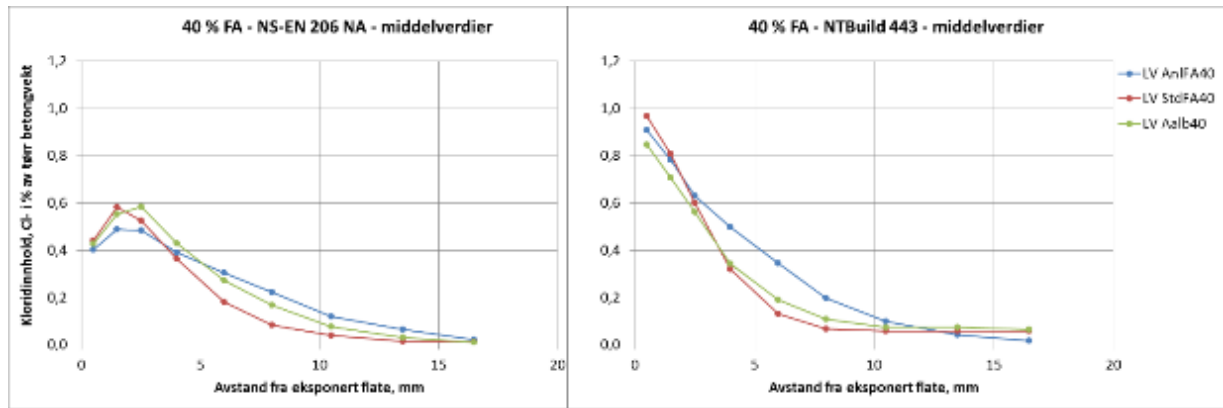
FIGUR 43 MÅLTE KLORIDPROFILER (MIDDEL) FOR ALLE 11 BETONGENE. METODE NS-EN 206+NA / CEN/TS 12390-11 (VENSTRE, KUN SINTEF), OG METODE NT BUILD 443 (HØYRE, SINTEF OG S.LAB)



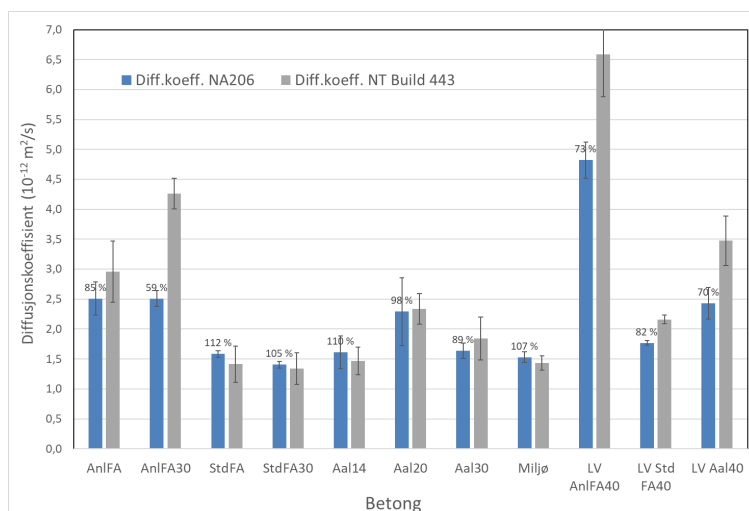
FIGUR 44 KLORIDPROFILER (MIDDEL) FOR STANDARD-BETONGENE MED RENE SEMENTER (+AAL14 OG AAL20)



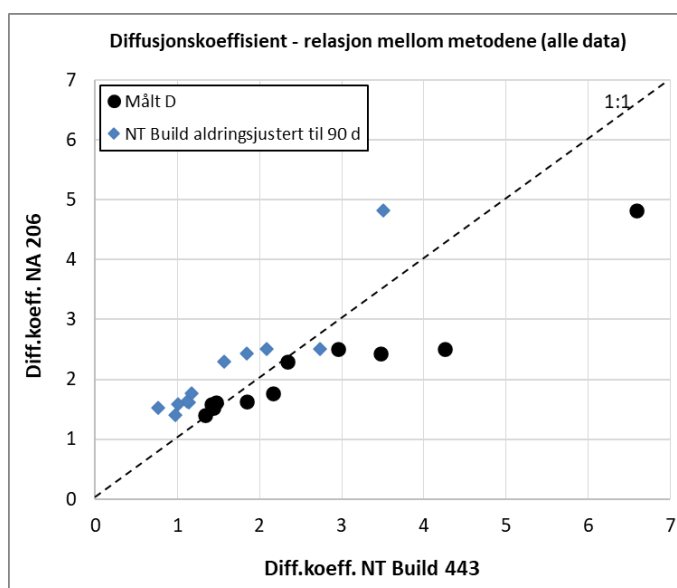
FIGUR 45 KLORIDPROFILER (MIDDEL) FOR STANDARD-BETONGENE MED 30 % FA



FIGUR 46 KLORIDPROFILER (MIDDEL) FOR LV-BETONGENE (MED 40 % FA)

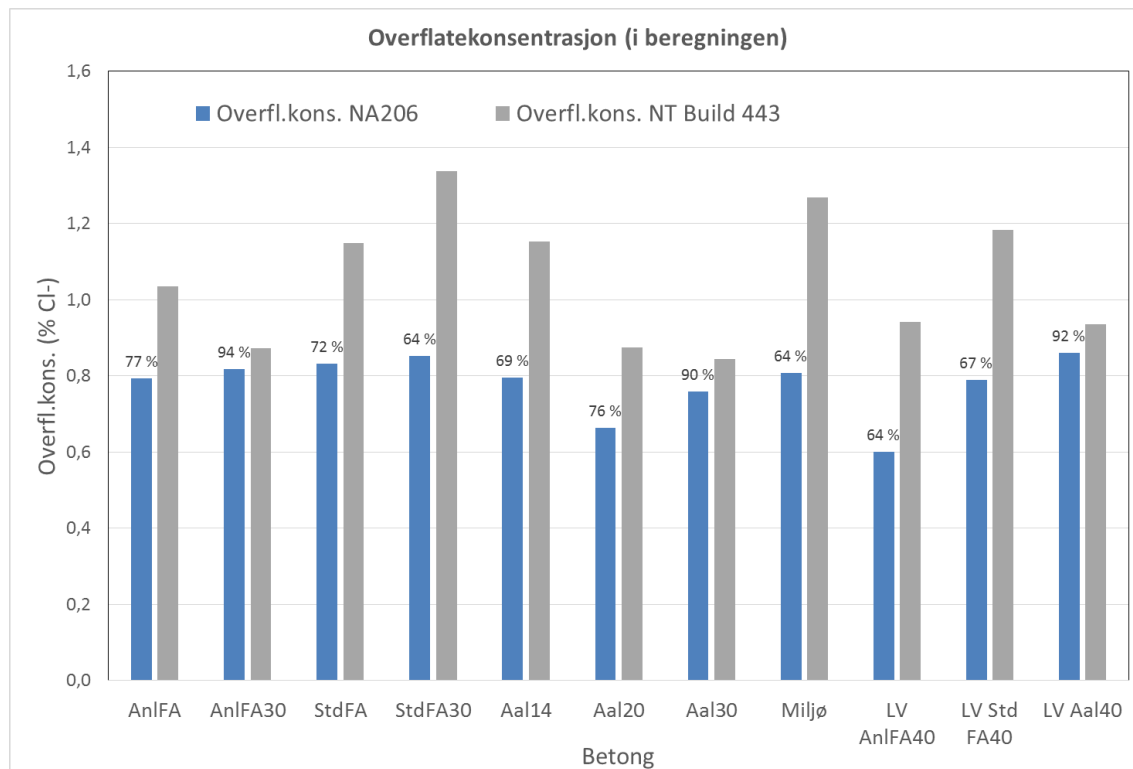


FIGUR 47 BEREGNEDE DIFFUSJONSKOEFFISIENTER (MED STANDARDAVVIK) – SAMMENLIGNING. VERDIEN BASERT PÅ NS-EN 206+NA (CEN/TS 12390-11) RELATIV TIL NT BUILD 443 ER ANGITT (%)



FIGUR 48 DIFFUSJONSKOEFFISIENTER, NS-EN 206+NA (CEN/TS 12390-11) vs. NT BUILD 443. MÅLTE DIFFUSJONSKOEFFISIENTER («MÅLT D») OG ALDRINGSJUSTERT NT BUILD, SE FORKLARING I TEKST.

Figur 49 er tatt med som informasjon for å vise at de to metodene også gir ulik overflatekonsentrasjon (i beregningene), noe som ikke er overraskende ettersom kloridkonsentrasjonen i eksponeringsvæskene er så forskjellig (6 % NaCl mot 16,5 % NaCl).



FIGUR 49 BEREGNET OVERFLATEKONSENTRASJON – SAMMENLIKNING. VERDIEN BASERT PÅ NS-EN 206+NA (CEN/TS 12390-11) RELATIV TIL NT BUILD 443 ER ANGITT (%)

## 5.8.2 Sjøvannseksponering i 8 år

### 5.8.2.1 Innledning

To betongplater for hver betong ble lagt ned i sjøvann, i store plastkar, ved 7 døgns alder. Kjerner er boret ut og kloridprofiler bestemt henholdsvis etter 1 år, 2,5 år, 5,5 år og 8 år med sjøvannseksponering. Platene lagres videre i sjøvann og det er mulig med en siste prøvningstermin ved et senere tidspunkt.

I 2022 ble det innført en prosedyre i nasjonalt tillegg til NS-EN 206 for dokumentasjon av kloridmotstanden til betonger med nye/ukjente bindemidler. Prosedyren innebærer bestemmelse av kloridmotstand over tid, og derigjennom bestemmelse av en aldringseksponent. Det bemerkes at det er en del forskjeller mellom denne prosedyren (prEN 12390-11:2023 og NS-EN 206+A2:2021/NA:2022) og hvordan prøvingen med eksponering i sjøvann er gjort på:

- Alder ved start eksponering er 7 døgn (mot hhv. 28 d i prEN, og 90 d i NS)
- Saltløsningen er ekte sjøvann (mot NaCl i prEN og NS)
- Kloridkonsentrasjonen i sjøvann er ca. 3 % NaCl (som i prEN, mot 6 % i NS)

- Eksponeringsflaten er støpehud (hhv. forskalte og støpte/avstrøkne flater) (mot sagflater i prEN og NS)
- Størrelsen på eksponerte prøver er 250x400x100 mm<sup>3</sup> plater (mot ø100 mm sylindre i prEN og NS)

For prøving som utføres for bestemmelse av aldringseksponent gjelder følgende avvik:

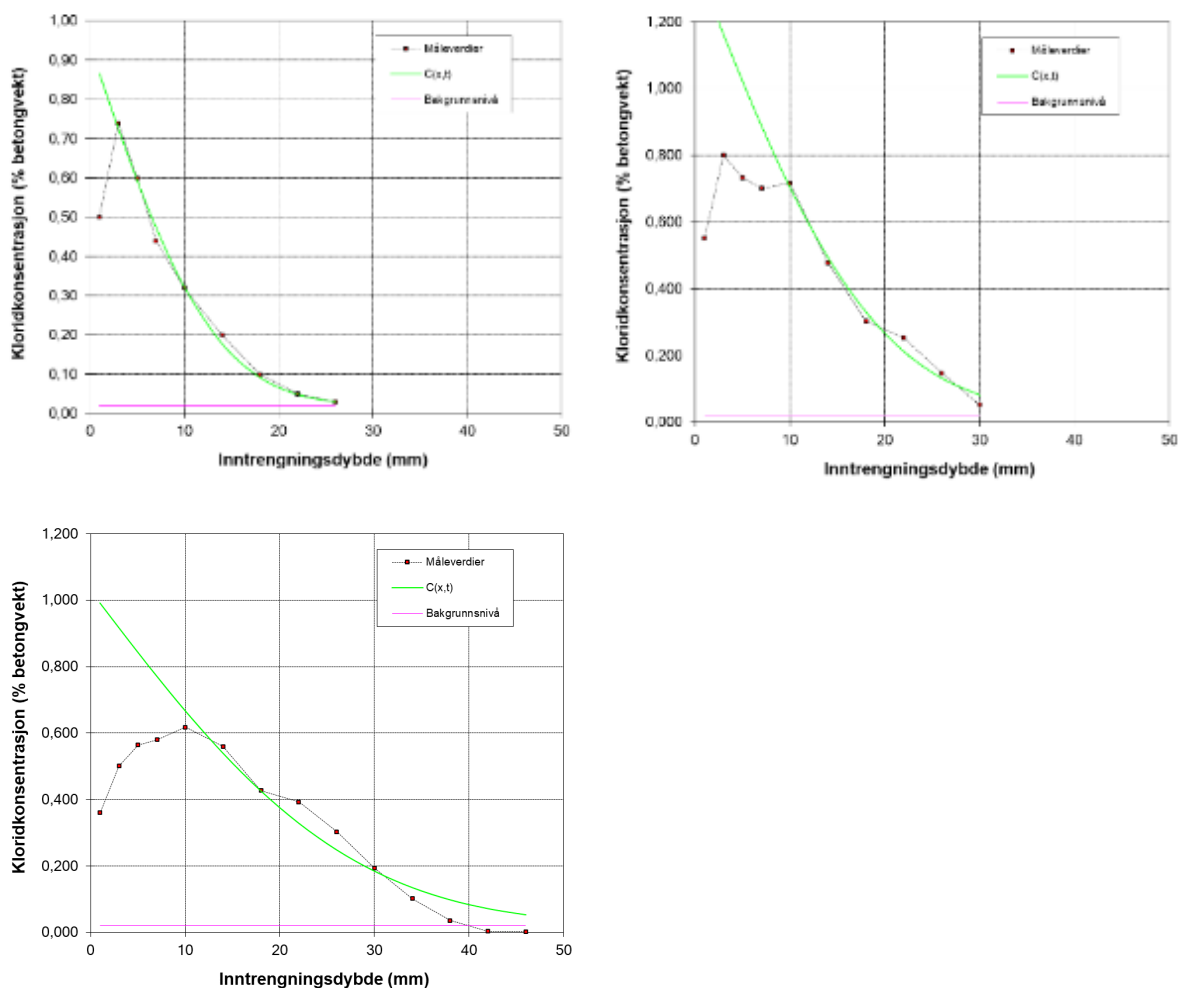
- Eksponeringsperioden/terminene er 1, 2.5, 5.5 og 8 år (mens prEN og NS sier 28 d, 90 d, 180 d, 1 år og 2 år)

For de tre første prøvningsterminene ble det for hver betong bestemt to kloridprofiler fra forskalte flater og to fra støpte flater (avstrykningsflater). For 8-årsterminen ble det ikke bestemt kloridprofiler for de støpte flatene, kun for de to forskalte flatene. I etterfølgende kapittel 5.8.2.5 er det først og fremst fokusert på resultatene for forskalte flater, men sluttresultatet (aldringseksponent og  $D_{app}(50\text{år})$ ) for støpte/avstrøkne flater er også oppgitt. For en konstruksjon vil det i det aller vesentligste være forskalte flater som blir eksponert for sjøsalt, og/eller evt. tinesalter.

Kloriddiffusjonskoeffisienter er beregnet for hvert individuelle kloridprofil. Gjennomsnittlig diffusjonskoeffisient (og standardavvik) og andre parametere for samhørende profiler er beregnet etterpå.

Alle individuelle kloridprofiler og beregnede diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjoner er gitt i Vedlegg 8. Vedlegget angir også hvilke sjikt som er utelatt ved beregningen av diffusjonskoeffisienten for hver enkelt profil, avhengig av kloridprofilets form. Valgt bakgrunnsnivå for kloridinnhold er 0,02 % av betongvekt. Den generelle trenden er at kun ytterste sjikt er utelatt for terminene 1 år og 2,5 år. Ved termin 5,5 år er kun ytterste sjikt utelatt for ca. halvparten av profilene, mens for den andre halvparten er det utelatt to til fire sjikt. Ved termin 8 år er i hovedsak to til fem sjikt utelatt. For noen få profiler med «avvikende» enkeltsprang lenger inn i kloridprofilet, er slike sjikt også utelatt. Valg av sjikt som skal utelates/inkluderes i beregningen av diffusjonskoeffisient er ingen eksakt vitenskap. Figur 50 viser noen eksempler på modelltilpasninger og utelatelse av en eller flere ytre sjikt.

For hver betong og termin er gjennomsnittlig diffusjonskoeffisient beregnet henholdsvis for forskalt- (to profiler) og støpt flate (to profiler), samt totalt gjennomsnitt for alle fire profilene. Det å beregne standardavvik (og variasjonskoeffisient, COV) på kun to verdier er betenkelig, men ved å gjøre nettopp dette så viser resultatene at COV varierer fra 0 % til 27 % blant de mange settene med to profiler – og med et gjennomsnitt på 7 % både for forskalte- og støpte flater. Hvis alle fire profiler (to støpte + to forskalte) per betong/termin behandles som en gruppe så varierer COV blant disse fire sjiktene fra 3 % til 35 %, og med 13 % som gjennomsnitt. Grunnen til dette er at det er systematisk forskjell på resultatene for støpte og forskalte flater, se påfølgende kapitler.

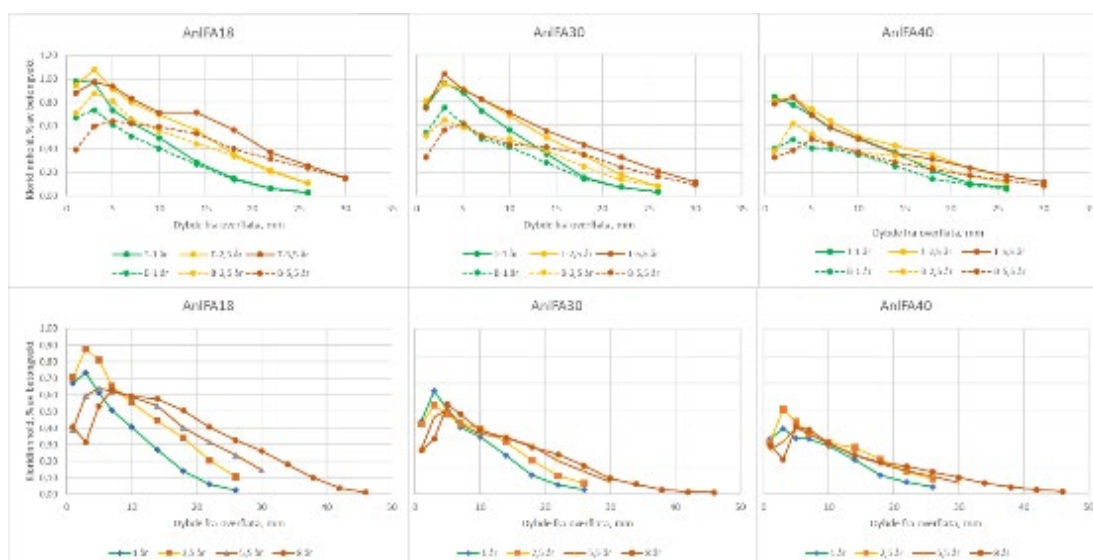


FIGUR 50 EKSEMPLER PÅ TILPASNING AV DIFFUSJONSMODELLEN HVOR HENHOLDSVIS 1 SJIKT (VENSTRE ØVERST), 4 SJIKT (HØYRE) OG 5 SJIKT (NEDERST) ER UTELATT I BEREKNINGEN. PROFILENE ER FOR BETONGEN AAL20 ETTER HENHOLDSVIS 1 ÅRS, 5,5 ÅRS OG 8 ÅRS EKSPONERING (FORSKALTE FLATER).

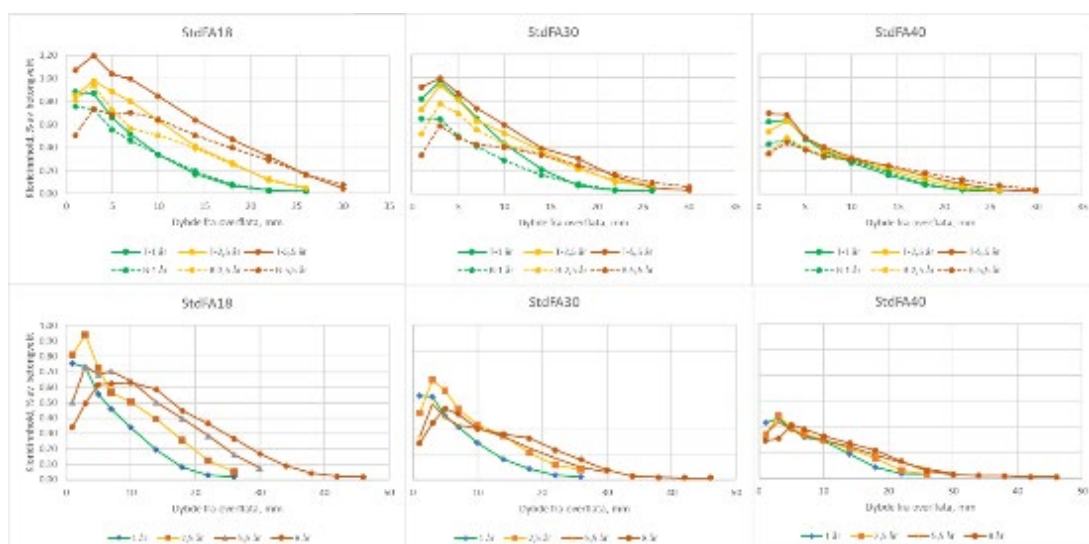
### 5.8.2.2 Målte kloridprofiler

I Figur 51 – Figur 54 presenteres kloridprofilene gruppert etter sementtype – seriene AnlFA, StdFA, Aal og Miljø. I hver figur inngår individuelle kloridprofiler for forskalte og støpte flater etter 1, 2,5 og 5,5 år, samt gjennomsnittet for forskalte flater for alle terminer opp til 8 år (det ble ikke målt på støpte flater etter 8 år). Figurene viser at kloridprofilene for forskalte flater ligger konsekvent på et lavere nivå fra overflaten og inn til en viss dybde hvoretter profilet blir mer sammenfallende med profilet fra støpte flater. Diffusjonskoeffisienten for forskalte flater blir dermed generelt noe høyere enn for støpt flate (se senere avsnitt, Figur 58).

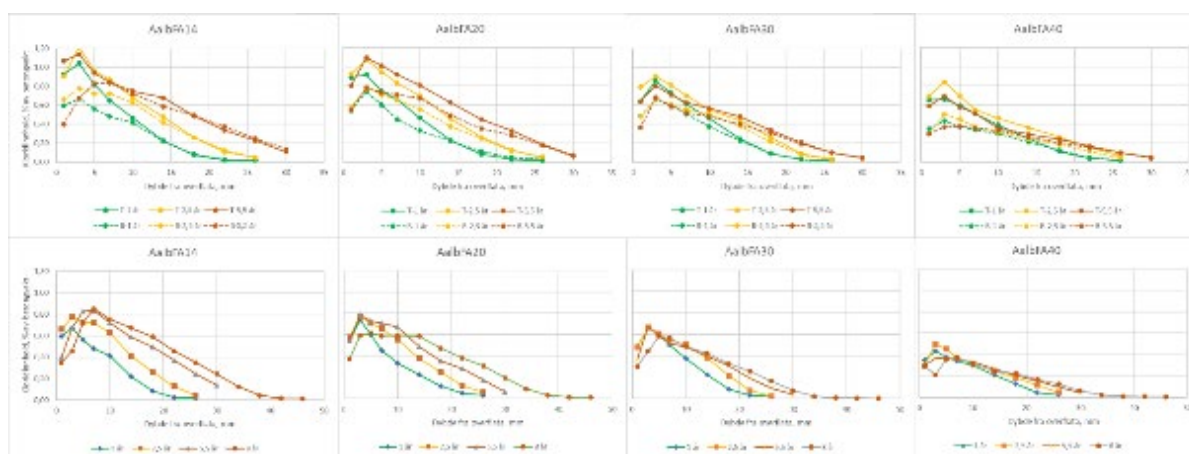
I Figur 55 er midlere kloridprofiler for forskalte flater for alle betongene samlet, presentert for hver termin opptil 8 år. Som en kan se av figurene er det en tendens til at kloridprofilenes maksimumsnivå flytter seg innover over tid, spesielt fra termin 5,5 til 8 år. Samme figur viser også at det er forskjell i overflatekonsentrasjonene (kloridinnholdet i de ytterste sjiktene) etter 1 år (avtagende for økende FA-dosering), men at forskjellen i det ytterste sjiktet blir mindre med tiden.



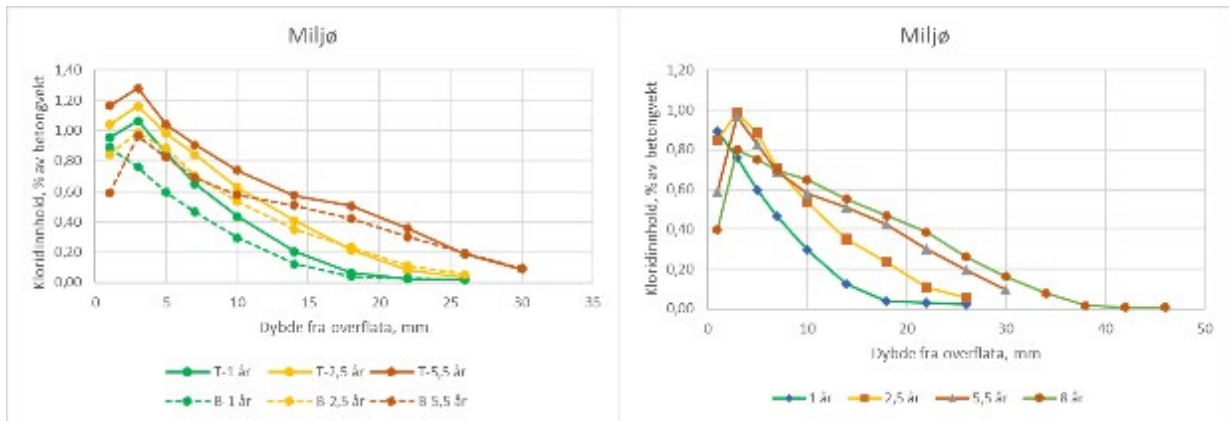
FIGUR 51 ANLFA-SERIEN; MÅLTE KLORIDPROFILER OVER TID. ØVERST: SAMMENLIKNING STØPTE (T) OG FORSKALTE (B) FLATER. NEDERST: GJENNOMSNIITT FOR FORSKALTE FLATER



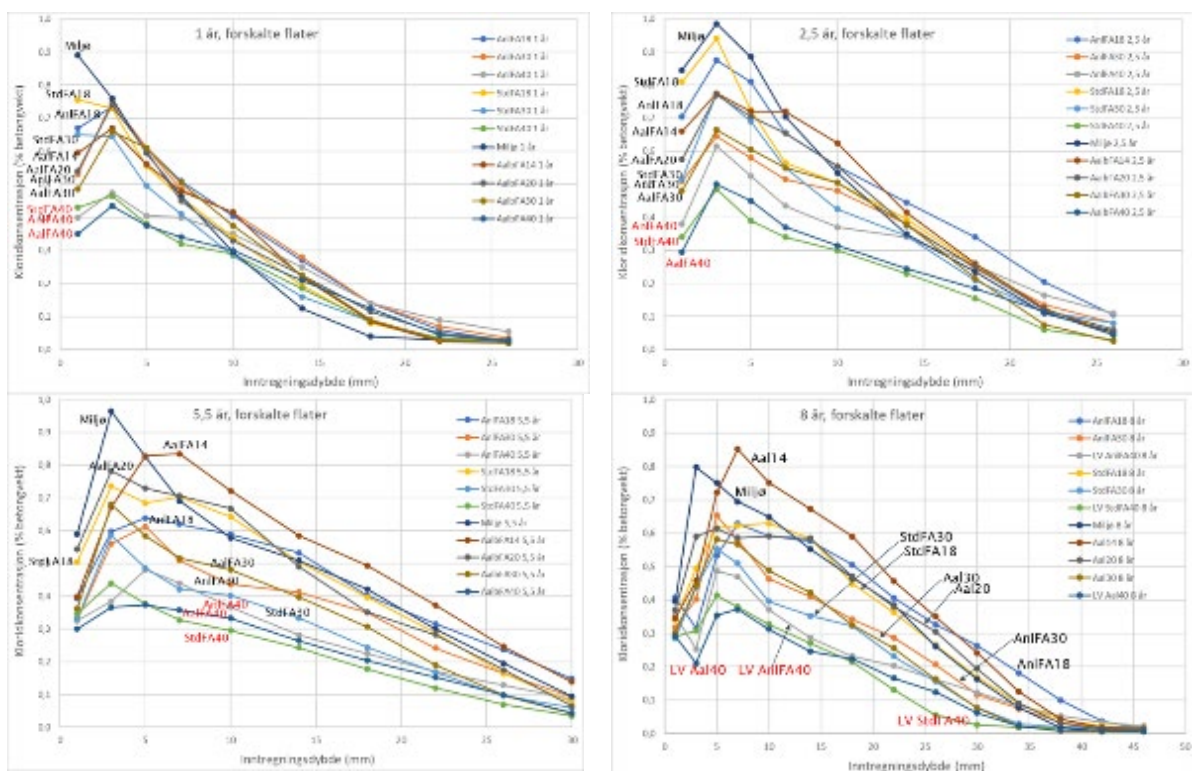
FIGUR 52 STDFA-SERIEN; MÅLTE KLORIDPROFILER OVER TID. ØVERST: SAMMENLIKNING STØPTE (T) OG FORSKALTE (B) FLATER. NEDERST: GJENNOMSNIITT FOR FORSKALTE FLATER



FIGUR 53 AAL-SERIEN; MÅLTE KLORIDPROFILER OVER TID. ØVERST: SAMMENLIKNING STØPTE (T) OG FORSKALTE (B) FLATER. NEDERST: GJENNOMSNIITT FOR FORSKALTE FLATER



FIGUR 54 MILJØ-SERIEN: MÅLTE KLORIDPROFILER OVER TID. VENSTRE: SAMMENLIGNING STØPTE (T) OG FORSKALTE (B) FLATER. HØYRE: GJENNOMSNIITT FOR FORSKALTE FLATER



FIGUR 55 KLORIDPROFILER ETTER SJØVANNSEKSPONERING I HHV. 1 ÅR, 2,5 ÅR, 5,5 ÅR OG 8 ÅR. ALLE KURVER ER GJENNOMSNIITT AV TO PROFILER, FORSKALTE FLATER.

### 5.8.2.3 Kloridinntrengning

Kloridinntrengning i betong vurderes som hovedregel basert på beregnede kloriddiffusjonskoeffisienter, se senere i kapittelet. Kloridinntrengningen kan også kvantifiseres etter total mengde inntrengte klorider eller etter hvor langt inn i betongen en antatt kritisk kloridmengde (med tanke på initiering av armeringskorrosjon), f.eks. 0,10 % av betongvekt, har trengt.

Kloridinnholdet i de ulike sjiktene av hvert kloridprofil er gitt i % av tørr betongvekt. For å bestemme total mengde inntrengte klorider, er kloridinnholdet i hvert sjikt omregnet fra % av

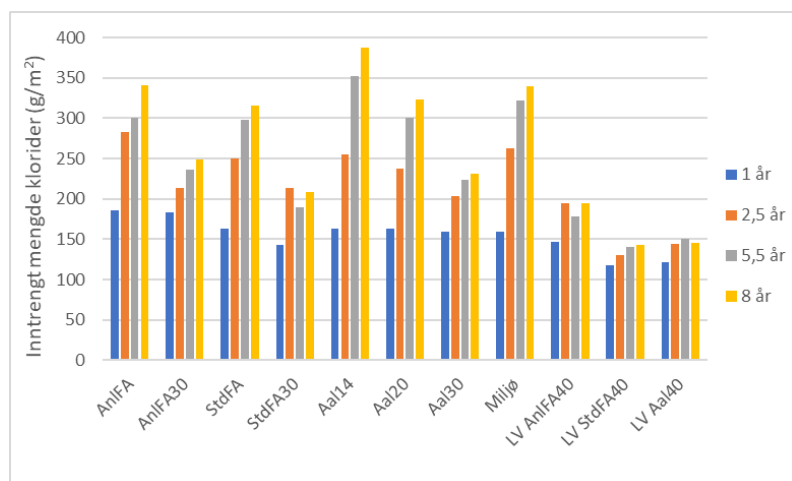
tørr betongvekt til  $\text{g/m}^2$  og summert. Ved omregning er det antatt en tørrdensitet på  $2300 \text{ kg/m}^3$  og en bakgrunnsverdi på 0,02 %.

På grunn av de systematiske forskjellene i kloridprofiler mellom forskalte og støpte (avstrøkne) flater, se Figur 51 til Figur 54, er totalt inntrengt mengde klorider systematisk lavere for de forskalte flatene.

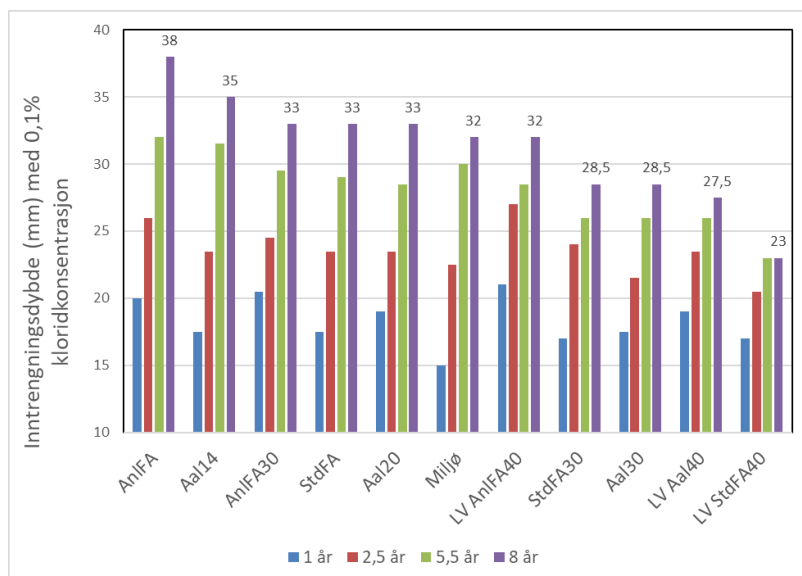
I Figur 56 er utviklingen i inntrengt mengde klorider (arealet under kloridprofilene) for forskalte flater vist. Her kan en se at mengden klorider øker over tid for alle betongene, unntatt for StdFA30, LV AnlFA40 og LV Aal40 hvor utviklingen er litt mer «rufsete». For LV-betongene synes totalt inntrengt mengde klorider å flate ut etter ca. 2,5 år. «Frigjøring» av klorider i overflatesjiktet (av ukjent kjemisk årsak) kan bidra i dette bildet.

Figur 57 viser inntrengningsdybden som tilsvarer 0,10 % klorider (sortert etter avtagende inntrengningsdybde etter 8 år). Dybden er lest direkte fra de målte kloridprofilene. I et par tilfeller, begge ved 5,5 år, var kloridprofilen på et nivå noe over 0,10 % ved innerste sjikt (30 mm). I de tilfellene er inntrengningsdybden funnet ved å forlenge (ekstrapolere) den rette linjen mellom de to innerste sjiktene i kloridprofilen og ned til 0,10 %. Inntrengningsdybden øker med økende eksponering for alle betonger, med unntak for LV StdFA40 mellom 5,5 og 8 år. Etter 8 år avtar inntrengningsdybden innenfor hver sementtype med økende flygeaskeinnhold. I denne sammenhengen er det verdt å merke seg at det er usikkerheter knyttet til den kritiske grenseverdien for initiering av armeringskorrosjon, spesielt når det gjelder bindemidler med tilsetning av flygeaske eller slagg.

Kritisk grenseverdi for initiering av kloridkorrosjon er omdiskutert, men er ofte forsiktig satt til 0,4 % av sementvekt (opprinnelig satt for betonger med CEM I), hvilket tilsvarer ca. 0,07 % av betongvekt for våre betonger. Ifølge [12] er det flere funn i litteraturen som tyder på at den kritiske grenseverdien går ned når det tilsettes flygeaske eller slagg. Det er derfor ikke mulig å vurdere de ulike betongenes «korrosjonsbeskyttende evne» ut fra verdiene i Figur 57 alene.



FIGUR 56 SJØVANNSEKSPONERING, FORSKALTE FLATER. INNTRENGT MENGDE KLORIDER OVER TID



FIGUR 57 SJØVANNSEKSPONERING, FORSKALTE FLATER. INNTRENGNINGSDYBDE AV 0,10 % KLORIDER (AV BETONGVEKT), SORTERT ETTER AVTAGENDE VERDI ETTER 8 ÅR. VERDIENE ER LEST DIREKTE FRA MÅLT GJENNOMSNIITTLIG KLORIDPROFIL.

#### 5.8.2.4 Beregnede kloriddiffusjonskoeffisienter

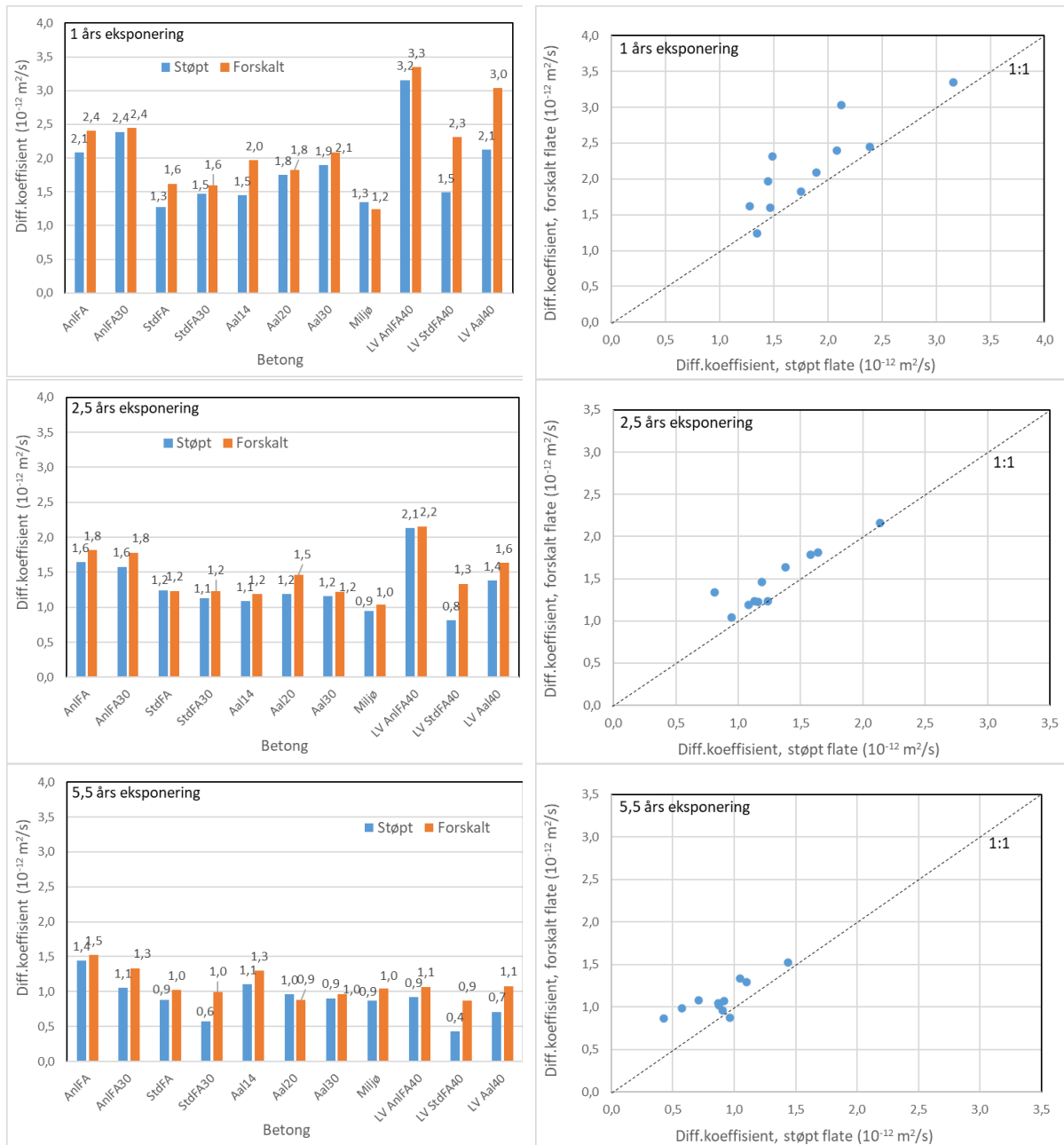
Basert på de målte kloridprofilene er det beregnet diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjoner basert på Ficks 2. lov for ren diffusjon, etter samme fremgangsmåte som ved akselerert prøving (kapittel 5.8.1). Bakgrunnsnivå for kloridinnhold er satt til 0,02 % i alle beregningene av diffusjonskoeffisienter.

Figur 58 viser de beregnede diffusjonskoeffisientene for både forskalte og støpte flater (middelverdier av to paralleller), etter 1, 2.5 og 5,5 år. Alle enkeltresultater finnes i VEDLEGG 9. Kloridprofilene for forskalte flater er generelt noe flatere enn for støpte/avstrøkne flater (se stiplede og heltrukne linjer i Figur 51 – Figur 54) og diffusjonskoeffisientene fra forskalte flater blir derfor generelt høyere (med ett unntak for Miljø ved 1 år). Korrelasjonen mellom de to variantene av diffusjonskoeffisienter er vist i Figur 58.

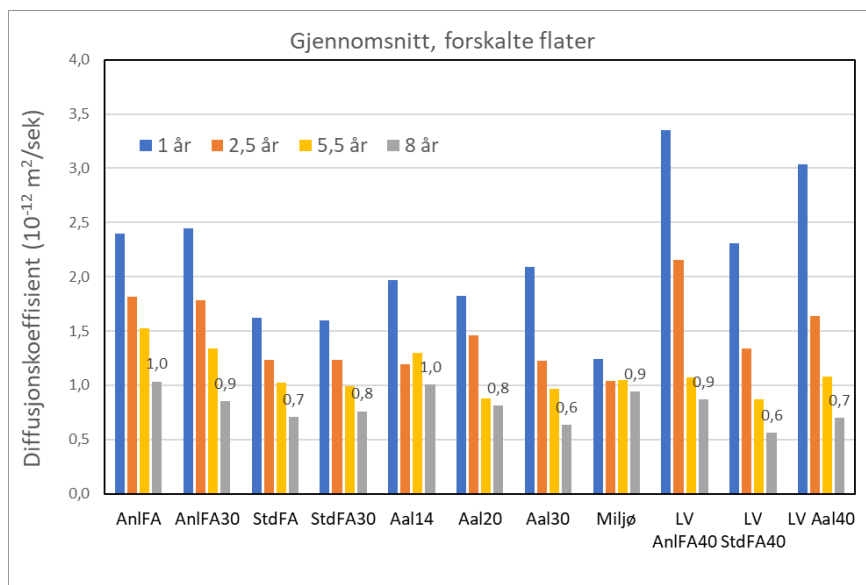
For alle betongene og terminene samlet (inklusive Miljø) har forskalte flater 20–30 % høyere diffusjonskoeffisient enn støpte flater. På samme tid har forskalte flater konsekvent lavere overflatekonsentrasjon; dette gjelder beregnet overflatekonsentrasjon, men trenden er også den samme for faktisk målt kloridinnhold i ytterste sjikt (se Figur 51 – Figur 54). Forskalte flater får dermed også lavere total mengde inntrengte klorider enn støpte flater.

Årsakene til forskjellene i kloridinntrenging i forskalt og støpt/avstrøken flate må ha med bearbeidingen av overflaten og/eller herdeforhold å gjøre, men dette er ikke undersøkt nærmere. Vi kan imidlertid merke oss at resultatene fra porøsitetmålingene og karbonatiseringsprøvingen indikerer en åpnere struktur nær avstrykningsflaten enn mot forskalt flate.

Figur 59 viser diffusjonskoeffisientene kun for forskalte flater, opptil 8 år (ved 8 år ble kun forskalte flater målt på). Det er disse resultatene som er grunnlaget for beregning av aldringseksponentene diskutert i etterfølgende kapittel.



FIGUR 58 SJØVANNSEKSPONERING. BEREGNEDE DIFFUSJONSKOEFFISIENTER FOR STØPT OG FORSKALT FLATE ETTER 1-, 2,5- OG 5,5 ÅR. HVERT RESULTAT ER GJENNOMSNIITTET AV TO KLORIDPROFILER/DIFFUSJONSKOEFFISIENTER.



FIGUR 59 SJØVANNSEKSPONERING, FORSKALTE FLATER. GJENNOMSNITTLIGE DIFFUSJONSKOEFFISIENTER (FRA TO PROFILER) ETTER 1, 2.5, 5.5 OG 8 ÅR.

#### 5.8.2.5 Beregning av aldringsekspONENT og $D_{app}(50 \text{ år})$

Kloriddiffusjonskoeffisienten reduseres over tid, i ulik grad avhengig av spesielt bindemiddelsammensetningen. For betonger med ren Portlandsement endres den relativt lite, og for betonger med flygeaske kan den reduseres mye. AldringsekspONENTEN ( $\alpha$ ) er et uttrykk for kloriddiffusjonskoeffisientens avtagende tendens over tid. Bestemmelse av aldringsekspONENT og deretter ekstrapolering av diffusjonskoeffisientens videre utvikling til 50 år,  $D_{app}(50 \text{ år})$ , er en del av bestandighetskonseptet i kommende Eurokode 2 (foreløpig utgitt som SN-EN 1992-1-1:2023).

Prinsippet, beskrevet bl.a. i foreløpig versjon av ny prøvningsstandard for kloriddiffusjon prEN 12390-11:2023, går ut på at man eksponerer betong for langtids klorideksponering og bestemmer kloriddiffusjonskoeffisienten ved ulike terminer. Deretter benyttes følgende likning som tilpasses måleresultatene:

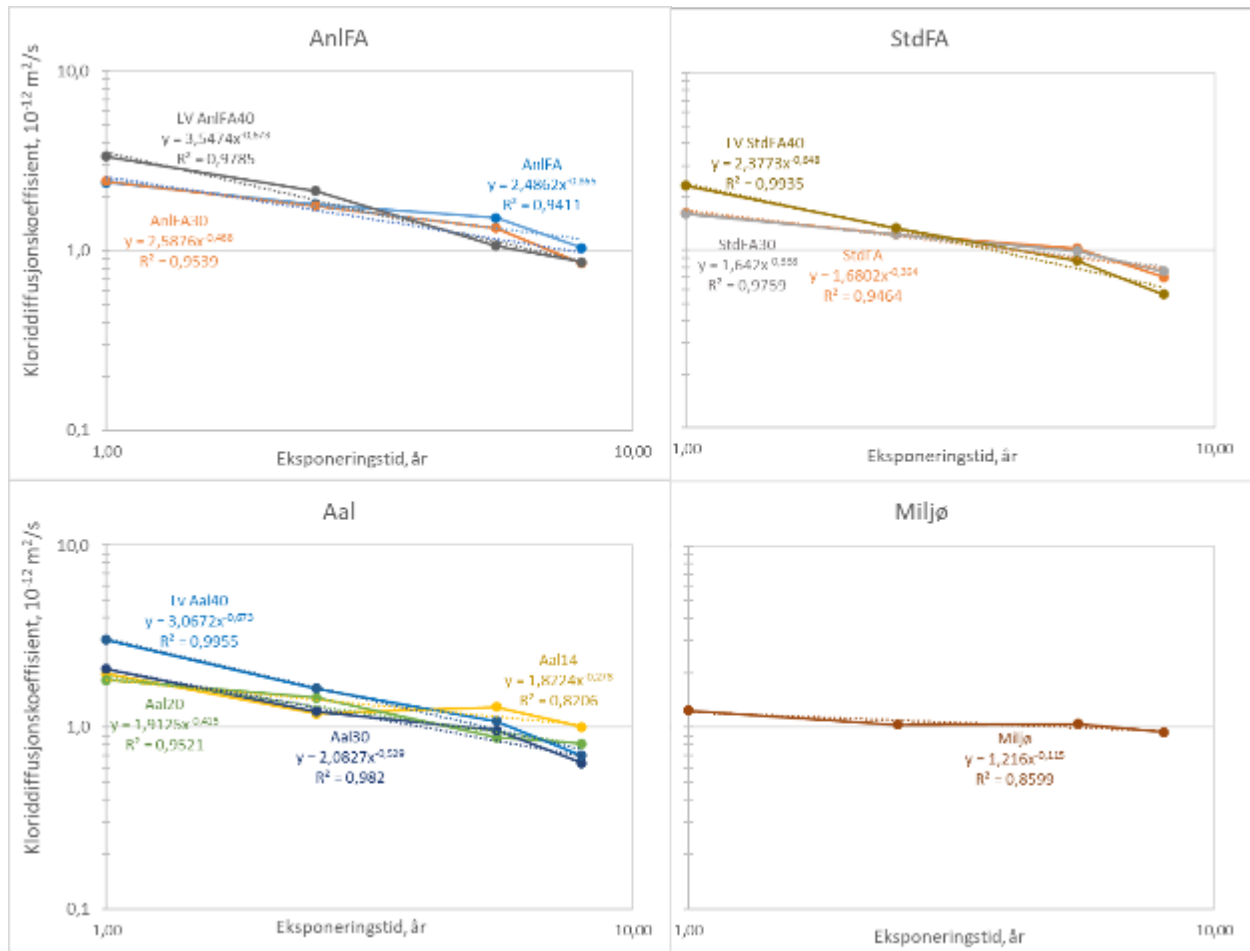
$$D_{app}(t) = D_{app}(t_0) \left( \frac{t_0}{t} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

Hvor:

- $t$  er eksponeringstiden
- $\alpha$  er aldringsekspONENTEN
- $D_{app}(t_0)$  er diffusjonskoeffisienten målt ved en referanse eksponeringstid  $t_0$ .
- $D_{app}(t)$  er diffusjonskoeffisienten ved eksponeringstiden  $t$
- (og  $t_0$  er i vårt tilfelle 1 år)

Når man har bestemt kloriddiffusjonskoeffisienten ved ulike aldre, tilpasses modellen gitt av likning (1) til resultatene ved regresjon, med  $D_{app}(t_0)$  og  $\alpha$  som tilpasningsparametere. Når man plottet resultatene i et log-log-diagram så vil  $\alpha$  uttrykke helningen på en trendlinje gitt av

potensuttrykket  $y=k \cdot t^{-\alpha}$ . I vårt tilfelle blir  $y=k$ =potensuttrykkets funksjonsverdi for kloriddiffusjonskoeffisienten ved 1 år. Denne prosedyren er benyttet på våre resultater fra forskalte flater, se Figur 60. Figuren angir også potensuttrykkets tilpasningsverdier, samt regresjonskonstanten  $R^2$ .

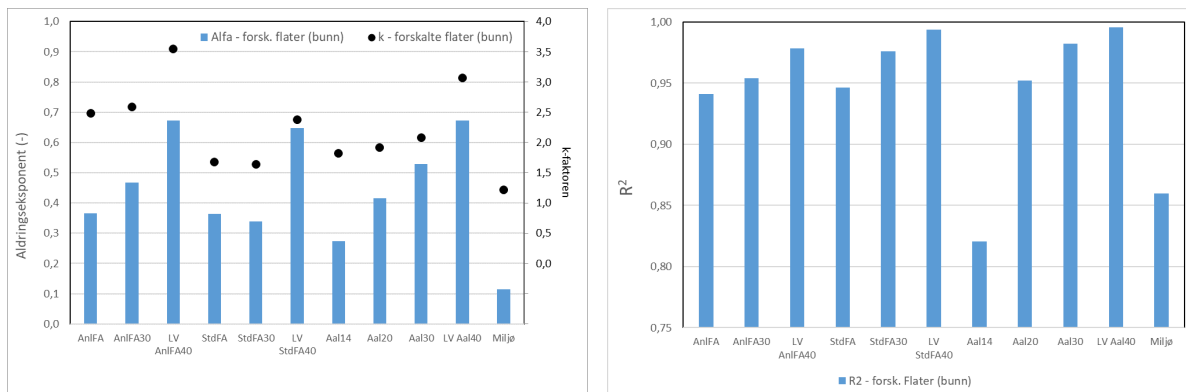


FIGUR 60 SJØVANNSEKSPONERING, FORSKALTE FLATER. MÅLTE DIFFUSJONSKOEFFISIENTER OVER TID (LOG-LOG) VERDIENE FOR TRENDLINJEN (LIKNING 1) FUNNET VED REGRESJON ER ANGITT, SAMT  $R^2$ .

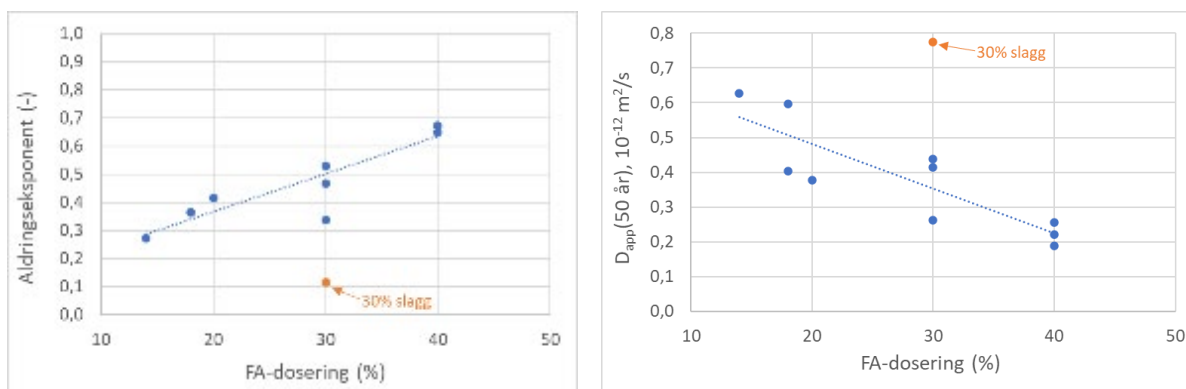
Figur 61 viser alle  $\alpha$ -,  $k$ - og  $R^2$ -verdiene samlet for alle betongene.  $R^2$ -verdien er et uttrykk for hvor godt potensuttrykket evner å uttrykke måleresultatene. Gjennomsnittlig  $R^2$  for alle betongene er 0,95. Både naturlig spredning ved bestemmelse av kloriddiffusjonskoeffisienter og mer fundamentale årsaker (virkeligheten er mer komplisert!) er faktorer som vil påvirke  $R^2$ -verdien.

Potensuttrykket er deretter brukt til å estimere hva kloriddiffusjonskoeffisienten blir etter 50 år, gitt at aldringen fortsetter på samme måte hele tiden. Denne estimerte diffusjonskoeffisienten kalles  $D_{app}(50 \text{ år})$ . Figur 62 viser  $\alpha$  og oppnådd  $D_{app}(50 \text{ år})$  som funksjon av FA-dosering (forskalt flater). Trenden er økt  $\alpha$  og avtagende  $D_{app}(50 \text{ år})$  ved økt FA-dosering. Slaggbetongen har lavest  $\alpha$  og høyest  $D_{app}(50 \text{ år})$  av alle betongene. I Tabell 22 er resultatene gitt numerisk betong for betong. Tabellen gir også resultatene for støpte flater og for gjennomsnittet for alle flatene samlet.

Figur 63 viser grafisk verdiene i Tabell 22, samt  $R^2$ -konstanten. Merk at for støpte flater og for gjennomsnitt alle flater inngår bare tre terminer (1, 2.5 og 5.5 år). For forskalte flater er det fire terminer, inklusive 8års-terminen. Det er ingen systematikk i relasjonen mellom støpte flater og forskalte flater.



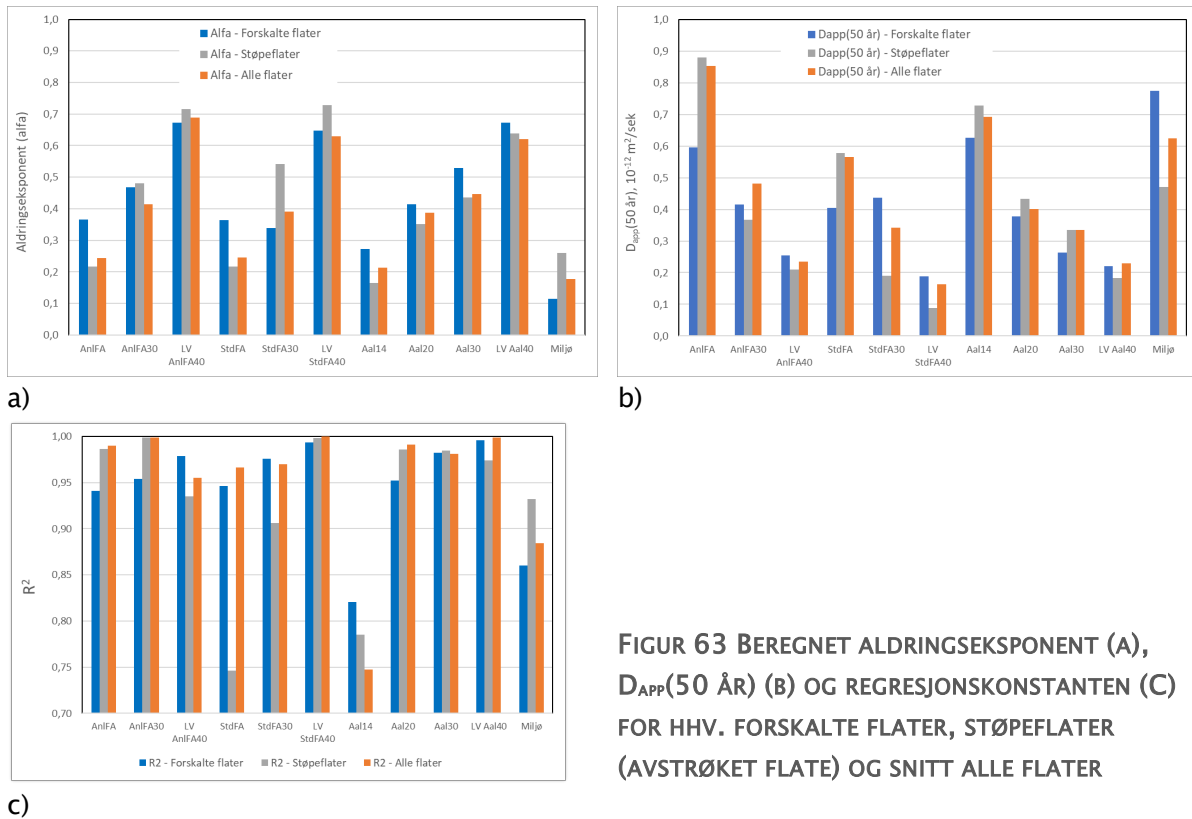
FIGUR 61 SAMLING AV DE BEREGNEDE FAKTORENE  $\alpha$  OG  $k$  (VENSTRE) SAMT REGRESJONSKONSTANTEN  $R^2$  (VENSTRE) – FORSKALTE FLATER.



FIGUR 62 BEREGNET ALDRINGSEKSPONENT ( $\alpha$ ) (VENSTRE) OG  $D_{app}(50\text{ÅR})$  (HØYRE) VS. FLYGEASKEDOSERING (EN BETONG MED SLAGG), FORSKALTE FLATER. MERK AT BETONGENE MED 40 % FA HAR MASSEFORHOLD 0,44, MENS ALLE ANDRE HAR MASSEFORSHOLD 0,39.

TABELL 22 BEREGNET ALDRINGSEKSPONENT ( $\alpha$ ) OG  $D_{app}(50\text{ÅR})$  FOR HVER BETONG BASERT PÅ HHV. FORSKALTE FLATER, STØPEFLATER OG GJENNOMSNIITT AV ALLE FLATER

| Betong       | FA-dosering | Forskalt flater<br>(fire terminer) |                         | Støpeflater<br>(tre terminer) |                         | Alle flater<br>(tre terminer) |                         |
|--------------|-------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
|              |             | $\alpha$                           | $D_{app}(50\text{ år})$ | $\alpha$                      | $D_{app}(50\text{ år})$ | $\alpha$                      | $D_{app}(50\text{ år})$ |
| AnlFA        | 18          | 0,37                               | 0,60                    | 0,22                          | 0,88                    | 0,24                          | 0,85                    |
| AnlFA30      | 30          | 0,47                               | 0,41                    | 0,48                          | 0,37                    | 0,41                          | 0,48                    |
| LV AnlFA40   | 40          | 0,67                               | 0,25                    | 0,72                          | 0,21                    | 0,69                          | 0,24                    |
| StdFA        | 18          | 0,36                               | 0,40                    | 0,22                          | 0,58                    | 0,25                          | 0,57                    |
| StdFA30      | 30          | 0,34                               | 0,44                    | 0,54                          | 0,19                    | 0,39                          | 0,34                    |
| LV StdFA40   | 40          | 0,65                               | 0,19                    | 0,73                          | 0,09                    | 0,63                          | 0,16                    |
| AalbFA14     | 14          | 0,27                               | 0,63                    | 0,17                          | 0,73                    | 0,21                          | 0,69                    |
| AalbFA20     | 20          | 0,42                               | 0,38                    | 0,35                          | 0,43                    | 0,39                          | 0,40                    |
| AalbFA30     | 30          | 0,53                               | 0,26                    | 0,44                          | 0,33                    | 0,45                          | 0,34                    |
| LV AalbFA40  | 40          | 0,67                               | 0,22                    | 0,64                          | 0,18                    | 0,62                          | 0,23                    |
| Miljø (slag) | 30          | 0,12                               | 0,78                    | 0,26                          | 0,47                    | 0,18                          | 0,62                    |

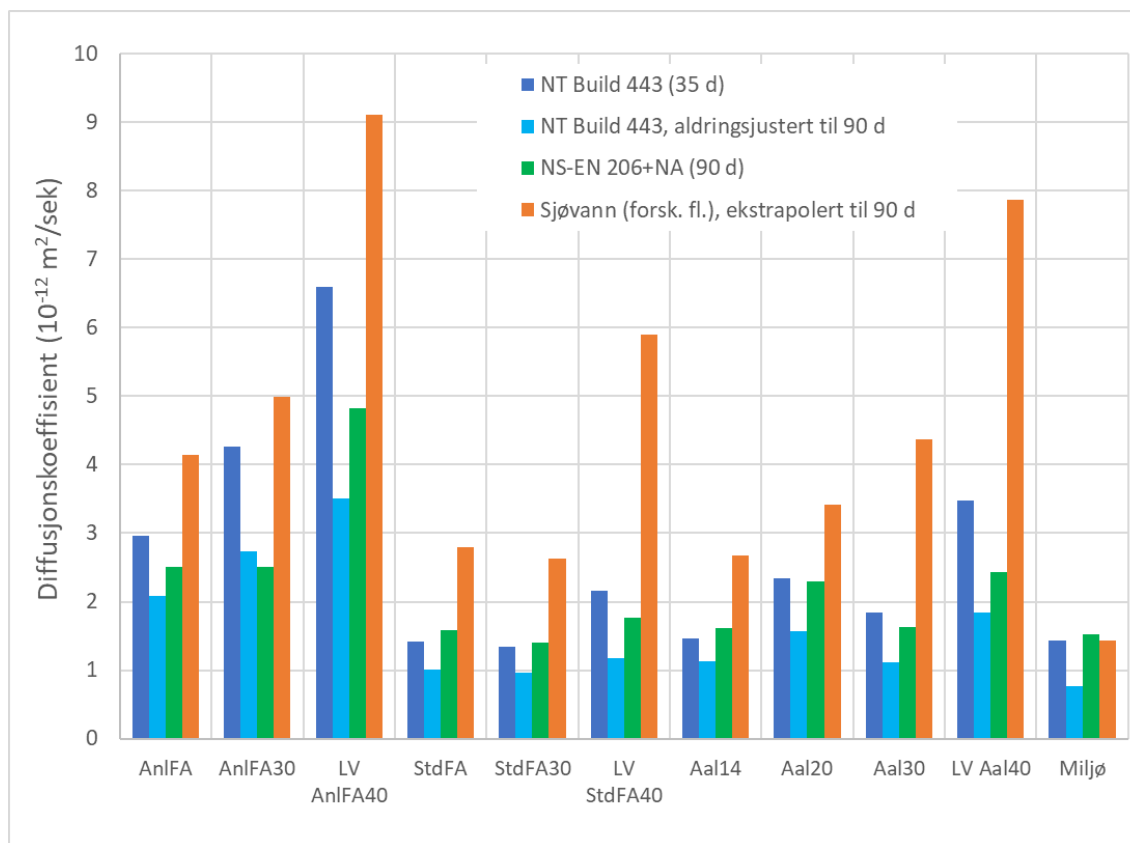


FIGUR 63 BEREGNET ALDRINGSEKSPONENT (A),  $D_{APP}(50 \text{ ÅR})$  (B) OG REGRESJONSKONSTANTEN (C) FOR HHV. FORSKALTE FLATER, STØPEFLATER (AVSTRØKET FLATE) OG SNITT ALLE FLATER

### 5.8.2.6 Eksponering i sjøvann (ekstrapolert) vs. standardprøving (NaCl)

Langtids kloriddiffusjon, bestemmelse av aldringsekspONENT for kloriddiffusjonskoeffisienten, samt ekstrapolering videre ut i tid til 50 år er det som har oppmerksomheten i dag, jamfør foregående kapittel. I dette kapitlet er resultatene fra sjøvannseksponeringen ekstrapolert andre veien, fra 1 års eksponeringstid og tilbake til 90 døgn. Denne oppnådde verdien er vist i Figur 64 sammen med diffusjonskoeffisientene bestemt fra laboriemetodene diskutert tidligere (kap. 5.8.1). For NT Build 443 er resultatet i tillegg aldringsjustert (fra 35 d) til 90 d ved å bruke aldringsekspONENTene for forskalte flater samt likning 1 fra foregående kapittel («NT Build 443, aldringsjustert til 90 d»).

På grunn av en god del ulike variable (kloridkonsentrasjon, alder ved eksponering, eksponeringstid, eksponeringsflate, ekstrapolering/ikke ekstrapolering) er det ikke forventet sammenfallende verdier, men det interessante er imidlertid at det avtegnes noe av den samme rangeringen av betongene.



FIGUR 64 DIFFUSJONSKOEFFISIENTER MÅLT ETTER STANDARD LABORATORIEPRØVING OG FRA SJØVANNSEKSPONERING (FORSKALTE FLATER) EKSTRAPOLERT TIL 90 DØGN, SE FOR ØVRIG FORKLARING I TEKST.

#### 5.8.2.7 Minimumsoverdekning i henhold til SN-EN 1992-1-1:2023

De undersøkte SV-Standardbetongene oppnådde  $D_{app}(50\text{år})$ -verdier som spenner fra 0,26 til 0,78 (enhet  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), mens LV-betongene oppnådde  $D_{app}(50\text{år})$ -verdier fra 0,19 til 0,25. For kloridutsatt betong blir det motstandsklassen XRDS (exposure resistance class, deicing salt and sea salt) som er relevant å bruke i henhold til det nye bestandighetskonseptet i Eurokode 2 (SN-EN 1992-1-1:2023). Den angitte sammenhengen mellom  $D_{app}(50 \text{ år})$  og nødvendig overdekning i henhold til Tabell 6.4 i SN-EN 1992-1-1:2023 (anbefalte verdier) indikerer at det vil være behov for svært ulik armeringsoverdekning for de ulike betongene som er undersøkt her.

Norske bestemmelser for XRDS-klasser og krav til overdekning blir etter hvert å finne i en kommende Norsk Standard som pr. i dag er under utarbeidelse. En arbeidsgruppe nedsatt av Standard Norge (SN K/7) er i gang med dette arbeidet. Resultatene fra herværende rapport antas å bidra inn mot erfaringsdataene som nå samles inn som del av standardarbeidet.

## 6 Oppsummering

Bestandighetsegenskaper er undersøkt for 11 betonger med ulik bindemiddel-sammensetning (alle har samme bindemiddelvolum). Alle bindemiddelvariantene er pr. i dag innenfor rammene for henholdsvis betongspesifikasjonen SV-Standard ( $v/b=0,39$ ) eller SV-Lavvarme ( $v/b=0,44$ ) i vegnormal N400 Bruprosjektering (2024). Med unntak av én betong med Cemex Miljøsement (Miljø), som består av 30 % slagg, inneholder alle betongene flygeaske, i varierende mengder. Bindemidlene i betongene med flygeaske er basert på sementene Norcem Anleggsement FA (AnIFA), Norcem Standardsement FA (StdFA) og Aalborg Rapidsement (Aal). Alle sementene er per dato godkjent i henhold til Statens vegvesens godkjenningsordning for sementer og bindemidler, en ordning som ble etablert etter at forsøkene i denne rapporten ble igangsatt. All flygeaske (FA) som er tilsatt ved blanding er fra samme leveranse (fra Norcem, i dag Heidelberg Materials Sement Norge) og for tilsatt FA er det brukt  $k$ -faktor 0,7 ved beregning av masseforholdet. Alle betongene inneholder i tillegg 4 % silika av total bindemiddelmengde.

Resultatene har gitt bakgrunn for dagens regler i ovennevnte vegnormal og danner også nyttige referansedata for nye sementer og bindemidler som vil komme i framtiden. Her forventes det en sterk utvikling i årene som kommer i retning mer klimavennlige sementer (nye tilsetningsmaterialer og lavere andel sementklinker). Resultatene vil også kunne inngå som erfaringsgrunnlag for det pågående arbeidet med utvikling av nasjonalt regelverk relatert til bestandighetskonseptet.

Resultatene utgjør en stor datamengde, med mange materialvariabler og mange bestandighetsparametere. Rapporten er i hovedsak en resultatrapport og resultatene er i begrenset grad evaluert med tanke på å finne sammenhenger mellom ulike egenskaper, sammenligne med resultater fra andre studier og forklare funnene. Dette er planlagt gjort mer utførlig i etterfølgende rapporter eller publikasjoner.

Resultatene fra undersøkelsene kan oppsummeres som følger:

- Herdevarme: Økt FA-dosering gir redusert herdevarme, som forventet. Standard-betongene (SV-Standard) med  $< 20$  % FA avgir en varmeutvikling på 270 – 300 kJ/kg etter 168 modenhets timer, og tilsvarende 250 – 280 kJ/kg for de med 30 % totalt FA-innhold. LV-betongene (SV-Lavvarme) med 40 % FA totalt avgir tilsvarende 220 – 250 kJ/kg.
- Fasthet: Økt FA-dosering ga i hovedtrekk redusert fasthet i hele forsøksperioden (2 år), men økende relativ fasthetstilvekst ved lang herdetid.
- Spesifikk elektrisk motstand: Økende FA-innhold gir større økning i målt motstand over lang tid. Etter 2 år ligger spesifikk elektrisk motstand for de undersøkte betongene fra ca. 600 til ca. 950  $\Omega m$ . Relasjonen mellom spesifikk elektrisk motstand og kloriddiffusjonskoeffisient er dårlig, spesielt etter lang tid. Samme trend er også funnet i en tidligere studie [5].
- Luftporestrukturanalyse: Økt FA-dosering gir konsekvent økt spesifikk overflate og redusert avstandsfaktor, noe som ut ifra tradisjonelle kriterier (med rene sementer) skulle

antydde gunstig luftporestruktur og økt frostbestandighet. Målt luftporestruktur viser imidlertid ingen relasjon til betongenes frostavskalling i de akselererte salt/frost-forsøkene. Denne manglende relasjonen er påvist også i andre relativt nylige studier for betonger med høyt FA-innhold ([1][6][11]).

- Sugporøsitet og PF-faktor: Trenden er at økt FA-dosering gir redusert sugporøsitet og økt PF-faktor. Sugporøsitet viser ingen tydelig relasjon mot hverken beregnede diffusjonskoeffisienter (alle metodene) eller målt elektrisk motstand. PF-faktorene viser ingen relasjon til frostavskallingen som ble oppnådd i de akselererte salt/frost-forsøkene.
- Naturlig karbonatisering, ute beskyttet mot regn: Standard-betongene hadde 1 – 8 mm karbonatiseringsdybde ved siste måletermin etter knappe 6 år, mens LV-betongene hadde tilsvarende 10 – 12 mm. Når trendkurven for karbonatiseringsutviklingen ekstrapoleres til 100 år indikeres at LV-betongene ikke bør kombineres med overdekning < 60 mm i konstruksjoner eksponert i miljø hvor karbonatiseringsforholdene er optimale (XC3).
- Frostmotstand, akselerert frostprøving med 3 % NaCl-løsning:
  - Standardbetongene har alle lav frostavskalling ved standard frostprøving og det er også i svært liten grad noen negativ effekt av 14 ukers forlenget forkondisjonering i 60 % RF, med unntak av StdFA-betongene. LV-betongene viser alle generelt høy frostavskalling for både standard og forlenget kondisjonering.
  - Etter forlenget kondisjonering er det samlet sett ingen entydig sammenheng mellom målt karbonatiseringsdybde (med pH-indikator) ved start frosteksposering og avskallingen etter avsluttet frosteksposering, med unntak for StdFA-betongene som har mest karbonatisering og høyest avskalling (blant sementene). Alle LV-betongene har imidlertid mest karbonatisering etter den forlengede kondisjoneringen og også høyest frostavskalling. Det økte masseforholdet har nok også bidratt til dette. I tynnslip ble det observert tilsvarende trend for karbonatisering som for pH-indikator, men på tross av forlenget kondisjonering (i tørt miljø (60 % RF) fra ung alder (21 døgn)) ble det observert generelt lite mikroriss i toppsjiktet.
  - En spesialvariant av frostprosedyren med 14 uker vannlagring før prøving ga lav frostavskalling for alle betongene, også for LV-betongene. Dette skyldes antagelig god herding (vannlagring) og lite/ingen karbonatisering før frostprøvingen.
- Kloriddiffusjon, akselerert prøving: Alle betongene, unntatt LV AnlFA40, oppnådde med dagens metode i NS-EN 206+NA (6 % NaCl) kloriddiffusjonskoeffisienter på  $2,5 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s eller lavere. Metoden NT Build 442 (16,5 % NaCl) ga tilsvarende eller høyere diffusjonskoeffisienter enn ovennevnte metode.
- Kloriddiffusjon, aldringsegenskaper (langtids sjøvannseksponering): Basert på sjøvannseksponering i 8 år og måling av diffusjonskoeffisienter over tid er det en klar trend at økt FA-dosering gir økt aldringseksponent ( $\alpha$ ) og redusert  $D_{app}(50 \text{ år})$ . De tre LV-betongene har høyest aldring og lavest  $D_{app}(50 \text{ år})$ . Blant de 11 betongene (forskalt flater, to profiler pr. termin) varierer  $\alpha$  fra 0,1 til 0,7, og  $D_{app}(50 \text{ år})$  varierer fra 0,2 til  $0,8 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s. Den angitte sammenhengen mellom  $D_{app}(50 \text{ år})$  og nødvendig overdekning i SN-EN 1992-1-1:2023 (anbefalte verdier) indikerer at det vil være behov for svært ulik armeringsoverdekning for betongene som er undersøkt her.

## 7 Videre behandling av resultatene

Statens vegvesen har flere pågående prosjekter med langtidseksponering av betong i sjøvann, enten i felt (marine feltstasjoner) eller i laboratorium (kar med sjøvann). Resultater fra disse prosjektene er foreløpig kun rapportert i separate rapporter, men det er planlagt å gjøre en samlet vurdering av alle foreliggende resultater for betonger innenfor Statens vegvesens kategorier SV-Standard og SV-Lavvarme i løpet av 2025. Resultatene vil være viktig input til det pågående arbeidet med utvikling av nasjonalt regelverk for anvendelse av bestandighetskonseptet i Eurokode 2.

## 8 Referanser

- [1] Bjøntegaard Ø. (2023) Motstand mot tinesalter og frostskaider i betong (8 år); Effekt av høyt innhold av flygeaske og slagg. Statens vegvesen rapport nr. 706, p 54.
- [2] Klausen A.B.E. (2016) Early age crack assessment of concrete structures; experimental investigation of decisive parameters. PhD-thesis, Norwegian University of Science and Technology. ISBN 978-82-326-1851-4
- [3] Lindgård J. (2013): Alkali-silica reaction (ASR) – Performance testing, Doctoral theses at NTNU, 2013:269
- [4] Bu Y. and Weiss J. (2014): The influence of alkali content on the electrical resistivity and transport properties of cementitious materials, Cement and concrete composites, volume 51, pages 48–58. [THE INFLUENCE OF ALKALI CONTENT ON THE ELECTRICAL RESISTIVITY AND TRANSPORT PROPERTIES OF CEMENTITIOUS MATERIALS - SCIENCE DIRECT](#)
- [5] Bjøntegaard Ø. og Rodum E. (2014) Effekt av flygeaske på betongegenskaper. Etatsprosjektet Varige konstruksjoner 2012–2015. Statens vegvesen rapport nr. 275, p60
- [6] Bjøntegaard Ø. (2015) Møllenberg betongtunnel – FoU-samarbeid bestandighet. Statens vegvesen rapport nr. 415, p 17.
- [7] Helland S.: «Procedure for determination of the aging agent”, Memo 2021-11-24
- [8] ISO 16204:2012 Durability – Service life design of concrete structures
- [9] Hornbostel K., Rodum E., Antonsen R.E., og Helgestad S.H. (2024): Feltforsøk – mørtel egnet for katodisk beskyttelse. Resultater etter 3 års feltprøving. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021. Statens vegvesen rapport nr. 850
- [10] Elkey M., Sellevold E.J., Schølberg E. og Østlid H. (1995): Electrical resistivity of concrete, Statens vegvesen publikasjon nr. 80.
- [11] Myren S.A. and Bjøntegaard Ø. (2014) Fibre reinforced sprayed concrete (FRSC): Mechanical properties and pore structure characteristics. Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Symp. on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Sandefjord, Norway, 16. – 19. June 2014, pp.305–313
- [12] Pedersen, B (2015): Sementer med flygeaske og slagg. Lab- og felterfaringer. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012–2015. Statens vegvesen rapport nr. 517

**Notat:**

**Kjemisk Analyse av Portlandsementer, blandingssementer og tilsetningsmaterialer**

-

Tobias Danner, Desember 2016

**Innhold**

|          |                                                                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Innledning .....</b>                                                                                | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>Generelt om kjemisk og mineralogisk sammensetning Portlandsement og tilsetningsmaterialer .....</b> | <b>2</b>  |
| <b>3</b> | <b>Analyse av rene Portlandsementer .....</b>                                                          | <b>5</b>  |
| <b>4</b> | <b>Analyse av tilsetningsmaterialer .....</b>                                                          | <b>9</b>  |
| <b>5</b> | <b>Analyse av blandingssementer.....</b>                                                               | <b>10</b> |
| <b>6</b> | <b>Referanser .....</b>                                                                                | <b>12</b> |

# 1 Innledning

Dette notatet gir et sammendrag av egenskaper, kjemi og mineralogi for sementer og tilsetningsmaterialer som ble undersøkt ved EMPA i 2016. Analyseresultatene til rene Portlandsementer som ble gjennomført ved NTNU og École des Mines d'Alès i 2014 blir også presentert.

I kapittel 2 blir det gitt litt ekstra informasjon som generelt omtaler kjemisk og mineralogisk sammensetning av sementer og tilsetningsmaterialer.

Kapittel 3-5 omhandler kjemisk og mineralogisk sammensetning av spesifikke Portlandsementer, tilsetningsmaterialer og blandingssementer. Målet er å gi en mulighet til å enkelt skille mellom de forskjellige materialer ut ifra kjemien og mineralogien.

I vedlegg blir informasjon fra datablader til de forskjellige produsentene sammenliknet med resultater fra analysene ved EMPA i 2016.

Tabell 1 viser en liste over materialer som er beskrevet samt informasjon om hvor og når dem ble undersøkt.

*Tabell 1: Oversikt over materialer og tidspunkt og sted for undersøkelse*

| Material                               | Institutt              |
|----------------------------------------|------------------------|
| Norcem Standard (CEM I 42,5 R)         | NTNU/Alès; 2014        |
| Norcem Anlegg (CEM I 52,5 N)           | NTNU/Alès 2014         |
| Cemex Rapid (CEM I 52,5 R)             | NTNU/Alès 2014         |
| Aalborg Rapid (CEM I 52,5 N-LA)        | EMPA 2016              |
| Norcem Standard FA (CEM II/B-M 42,5 R) | EMPA 2016              |
| Norcem Anlegg FA (CEM II/A-V 42,5 N)   | EMPA 2016              |
| Cemex Miljøsement (CEM II/B-S 52,5N)   | EMPA 2016 og Alès 2014 |
| Norcem Flygeaske                       | EMPA 2016 og Alès 2014 |
| Cemex Slagg                            | EMPA 2016              |
| Elkem Silikastøv                       | EMPA 2016              |

## 2 Generelt om kjemisk og mineralogisk sammensetning av Portlandsement og tilsetningsmaterialer

Dette kapittelet er basert på referanse [1], [2], [3].

Vanlig Portland sement blir produsert av en blanding av kalkstein og leire/leirskifer. Disse materialene inneholder de viktigste hovedbestanddelene i Portlandsement som er CaO fra kalkstein og SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> og Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fra leiremineraler. Spesielt leiremineraler inneholder også betydelig mengder andre oksider som alkalioksider eller MgO. I kalkstein kan det også forekomme en delvis substitusjon av Mg for Ca. Mergel eller mergelkalkstein forekomster (naturlige blandinger av leire og kalkstein) kan også bli brukt som råmaterialer da disse jordartene inneholder alle viktige oksider. Jernmalm, bauxitt og sand kan bli tilsatt

råmaterialene for å korrigere  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - og  $\text{SiO}_2$ -innhold. Råmaterialene blir så brent på høy temperatur (cirka 1450 °C) til produksjon av sementklinker som da består hovedsakelig av kalsiumsilikat- og kalsiumaluminat(-jern)-mineraler. I brenneprosessen blir det brukt en del alternative brennstoffer ved siden av vanlig brensel (for eksempel kull). Alternative brennstoffer (avfall fra husholdninger og industriavfall) kan introdusere mange sporelementer som delvis kan gå inn i strukturen av sementmineralene.

Sementklinkeren blir så nedmalt sammen med kalsiumsulfatmineraler (f.eks. gips) for å styre størkningen til sementen. Uten kalsiumsulfat vil sementen stivne umiddelbart ved vanntilsetning gjennom en veldig raskt reaksjon av kalsiumaluminat ( $\text{C}_3\text{A}$ ).

En typisk kjemisk og mineralogisk sammensetning av Portlandsement er gitt i Tabell 2.

*Tabell 2: Typisk kjemisk og mineralogisk sammensetning av ren Portlandsement [1] [2]*

| Oksid                                     | (%)     | Hovedmineral                                      | (%)   |
|-------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------|-------|
| <b>CaO</b>                                | 60-67   | <b><math>\text{C}_3\text{S}</math> (Alit)</b>     | 50-70 |
| <b><math>\text{SiO}_2</math></b>          | 17-24   | <b><math>\text{C}_2\text{S}</math> (Belit)</b>    | 15-30 |
| <b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b> | 4-7     | <b><math>\text{C}_3\text{A}</math> (Aluminat)</b> | 5-10  |
| <b><math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></b> | 2-5     | <b><math>\text{C}_4\text{AF}</math> (Ferrit)</b>  | 5-15  |
| <b>MgO</b>                                | 1-5     | <b>Sulfates</b>                                   | 3-5   |
| <b><math>\text{Na}_2\text{O}</math></b>   | 0,1-0,6 |                                                   |       |
| <b><math>\text{K}_2\text{O}</math></b>    | 0,4-1   |                                                   |       |
| <b><math>\text{SO}_3</math></b>           | 1,5-3,5 |                                                   |       |

$\text{C}_3\text{S}$  bidrar mest til fasthetsutviklingen i starten og har en moderat varmeutvikling.  $\text{C}_2\text{S}$  bidrar lite i starten og har en lav varmeutvikling, men gir høy langtidsfasthet.  $\text{C}_3\text{A}$  er veldig reaktiv med rask og høy varmeutvikling og bidrar til fasthetsutvikling helt i starten.  $\text{C}_4\text{AF}$  derimot reagerer langsomt og har en sen og lav varmeutvikling.

Urenheter i råmaterialene og brenning i roterovn gjør at sementmineraler aldri er helt rene faser, men inneholder ofte betydelige mengder urenheter i krystallstrukturen.  $\text{C}_3\text{S}$  kan inneholde 2-4 % urenheter som  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , eller  $\text{Fe}^{2+}$  som kan erstatte silisium i krystallstrukturen.  $\text{C}_2\text{S}$  kan inneholde 4-6 % urenheter, hovedsakelig  $\text{Al}^{3+}$  og  $\text{Fe}^{2+}$ . Silisium og jern kan også erstatte aluminium i  $\text{C}_3\text{A}$  strukturen med mellom 13-20 %. I tillegg kan  $\text{C}_3\text{A}$  ta opp 2-4% alkali-ioner i strukturen. Dette kan føre til en strukturendring fra kubisk til monoklin og ortorombisk. I Portland sement er det helt vanlig at  $\text{C}_3\text{A}$  foreligger i kubisk og ortorombisk modifikasjon. Opp til 10 % urenheter som  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$  og  $\text{Ti}^{2+}$  kan forekomme i  $\text{C}_4\text{AF}$ -fasen.

MgO-innholdet er i de fleste land begrenset til maksimum 4-5 % i sementklinker. Hvis MgO ikke er bundet i andre sementmineraler men foreligger som Periklas (> 2 %) kan det gjennom en langsom reaksjon føre til ekspansjon i herdnet betong (mulig dannelse av  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  [4]).

Det samme gjelder for fri kalk (CaO innhold) i sementklinker. Der er her satt en begrensning til 2,5-4 %.

For alkalioksider ( $\text{Na}_2\text{O}$  og  $\text{K}_2\text{O}$ ) er det ofte satt en grense på 0,6 %  $\text{Na}_2\text{O}$ -ekvivalentet. ( $\text{Na}_2\text{O}$ -ekvivalent =  $0,658 \cdot \text{K}_2\text{O} \% + \text{Na}_2\text{O} \%$ ). For høy andel alkalioksider kan medføre en sen ekspansiv reaksjon med alkalireaktivt tilslag i betong.

Er det tilstrekkelige mengder sulfat i sementklinker, foreligger alkalioksider vanligvis i form av alkalisulfatmineraler som  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , apthitalite  $(\text{K},\text{Na})_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$  og/eller langbeinite  $(\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3)$ . Alkalisulfater kan gi økt tidligfasthet, men fører til redusert 28-døgns fasthet.  $\text{Na}_2\text{O}$  kan gå inn i  $\text{C}_3\text{A}$  strukturen og føre til strukturendringer. Dette kan øke reaktiviteten av  $\text{C}_3\text{A}$  og medføre avbindingsproblemer i fersk betong.  $\text{K}_2\text{O}$  derimot går vanligvis inn i  $\text{C}_2\text{S}$  strukturen. Dette kan også medføre økt reaktivitet av  $\text{C}_2\text{S}$  men også destabilisere  $\text{C}_3\text{S}$  dannelsen i sementklinker. Høy konsentrasjon av  $\text{K}_2\text{O}$  og en mulig dehydrering av gips i sementmølla kan i tillegg føre til syngenittdannelse  $(\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$  i klinkeren. Syngenittdannelse og pre-hydrering kan gjøre sementklinkeren klumpete ved lagring.

Sementklinker inneholder også veldig ofte små mengder av fosfatoksid ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Fosfat i sement kommer ofte fra dyremel og slam fra vannrenseanlegg for vann, som er brukt som alternativ brensel. For høy  $\text{P}_2\text{O}_5$ -konsentrasjon kan medføre redusert dannelsen av  $\text{C}_3\text{S}$  i brennprosessen.

Kromat i sement kan komme fra råmaterialene (leire), brensel eller ildfaste materialer i sementovnen. Det ble rapportert at sement med krom kan gi økt tidlig fasthet. Seksverdig krom (Cr VI) er lettloselig og giftig og kan medføre sterke allergiske reaksjoner hos mennesker som jobber med sement. I dag skal det derfor brukes sement som er dekromatisert. Dette blir gjort ved å tilsette jernsulfat til sementen. Den vannløselige kromaten blir redusert til en nesten uløselig og dermed ufarlig kromhydroxid forbindelse (treverdig krom, Cr III) [5].

Flygeaske er aske som fanges opp fra røykgasser fra kullfyrte varmekraftverk og fra forbrenningsanlegg av avfall ved hjelp av filtre. Flygeaskens sammensetning og egenskaper vil variere avhengig av hva som forbrennes og av brenneprosesen. Det skilles mellom kalsiumholdig og silikatholdig flygeaske med høyt og lavt CaO innhold når det forbrennes henholdsvis antrasitt og bituminøs kull (svartkull) eller lignitt (brunkull). I Norge er kun den silikatholdige flygeasken i bruk (dvs. CaO innhold  $<10 \%$ ).

Kull er et veldig komplekst materiale av organiske og uorganiske bestanddeler som inneholder mange elementer. Vanlige mineraler som finnes i kull er leiremineraler som kaolinitt og illitt, og muskovitt/biotitt. Kull kan også inneholde kvarts, pyritt, kalsitt, sinkblende, karbonatmineraler, barytt, apatitt, feltspatmineraler, osv. Alle flygeasker inneholder store mengder  $\text{SiO}_2$  og  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Når kull blir brent blir elementene i organiske og uorganiske mineraler omfordelt på grunn av den høye temperaturen og nye mineraler oppstår. Typisk er mullitt,

hematitt, magnetitt og kvarts. Flygeaske er et delvis amorft, materiale og den amorfe andelen varierer mellom 30-75 %. I tillegg inneholder flygeaske vanligvis en del restkarbon [6].

Typiske kjemiske sammensetninger av silikat- og kalsiumholdig flygeaske er gitt i Tabell 3.

*Tabell 3: Typisk kjemisk sammensetning av flygeaske [1] [2]*

| Oksid                          | Kull- og flygeasketype        |                                        |
|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|
|                                | Svartkull<br>Silikatholdig FA | Lignitt (Brunkull)<br>Kalsiumholdig FA |
| SiO <sub>2</sub>               | 47-54                         | 18-25                                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 28-35                         | 12-15                                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4-12                          | 6-8                                    |
| CaO                            | 1-4                           | 43-49                                  |
| MgO                            | 1-2,5                         | 2-3                                    |
| SO <sub>3</sub>                | 0-1                           | 5-9                                    |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,2-2                         |                                        |
| K <sub>2</sub> O               | 1-6                           | 5                                      |

Slagg er et avfallsprodukt fra produksjon av råjern. Jernmalm blir smeltet i en masovn og kalsitt (CaCO<sub>3</sub>) og dolomitt (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) blir tilsatt som flussmiddel. Slagg består derfor hovedsakelig av SiO<sub>2</sub> og Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fra jernmalm og kalsium og magnesium fra flussmiddelmaterialer. Slagg blir kjølt ned veldig raskt med vann så det ikke krystalliserer, men heller danner en amorf glassfase. Slagg er ofte 100 % amorf og inneholder cirka 30-40 % SiO<sub>2</sub>, 30-50 % CaO, 5-20 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,2-1 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> og 2-15 % MgO [7].

Silikastøv er et restprodukt fra produksjon av silisium- og ferrosilisiummetall. Støvet blir rensset fra røykgassen i spesielle filtre. Kjemisk sammensetning av silikastøv er veldig enkel og består av 85-98 % SiO<sub>2</sub>. Silikastøv er ofte nesten 100 % amorf.

### 3 Analyse av rene Portlandsementer

For å forstå kjemien og mineralogien av sementer med tilsetningsmaterialer er det viktig å se først på rene sementer og tilsetningsmaterialer hver for seg. Tabell 4 og Tabell 5 viser kjemisk og mineralogisk sammensetning av 4 Portlandsementer fra Norcem, Cemex og Aalborg.

Resultater for kjemisk og mineralogisk sammensetning av Norcem sine to sementer og Cemex Rapid som er vist i Tabell 3 og 4 er tatt fra egne undersøkelser gjennomført på NTNU og École des Mines d'Alès i 2014 og er delvis publisert i et artikkel [8]. Disse resultater er også i godt samsvar med undersøkelser som samtidig ble gjennomført ved Norcem sine egne laboratorier.

**Tabell 4: Kjemisk sammensetning (XRF) av Norcem Standard, Norcem Anlegg, Cemex Rapid og Aalborg Rapid sement**

| Oksid (%)                                 | Norcem Standard <sup>a</sup> | Norcem Anlegg <sup>a</sup> | CEMEX Rapid <sup>a</sup> | Aalborg Rapid <sup>b</sup> |
|-------------------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| CaO                                       | 64,50                        | 65,57                      | 65,97                    | 63,67                      |
| SiO <sub>2</sub>                          | 21,43                        | 21,48                      | 21,13                    | 19,29                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | 5,12                         | 5,02                       | 4,67                     | 4,93                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | 3,67                         | 3,85                       | 2,44                     | 3,39                       |
| MgO                                       | 2,83                         | 1,93                       | 2,29                     | 0,92                       |
| Na <sub>2</sub> O                         | 0,51                         | 0,28                       | 0,24                     | 0,29                       |
| K <sub>2</sub> O                          | 0,77                         | 0,26                       | 0,83                     | 0,44                       |
| Na <sub>2</sub> O ekvivalent <sup>c</sup> | 1,02                         | 0,45                       | 0,79                     | 0,58                       |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>             | 0,15                         | 0,14                       | 0,22                     | 0,27                       |
| TiO <sub>2</sub>                          | 0,37                         | 0,22                       | 0,25                     | 0,26                       |
| MnO                                       | 0,06                         | 0,06                       | 0,04                     | 0,03                       |
| SO <sub>3</sub>                           | 1,98                         | 2,88                       | 3,05                     | 3,6                        |
| <b>Blaine (m<sup>2</sup>/kg)</b>          | <b>388</b>                   | <b>360</b>                 | <b>540</b>               | <b>453</b>                 |

<sup>a</sup> Gjennomført av NTNU/Ecole des Mines D'Alès; 2014

<sup>b</sup> Gjennomført av EMPA; 2016

<sup>c</sup> (0,658 \* K<sub>2</sub>O) + Na<sub>2</sub>O

Den kjemiske sammensetningen av de 4 sementene viser bare små forskjeller, spesielt når man ser på hovedoksidene CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> og Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. En Bogue beregning som tidligere ofte ble gjennomført, og som fortsatt er mye i bruk, gir en veldig lik sammensetning av hovedsementmineralene C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A og C<sub>4</sub>AF. En mer nøyaktig Rietveld-analyse basert på Røntgenundersøkelser viser imidlertid betydelige forskjeller mellom de 4 sementene (Tabell 5).

#### Bogue-Beregning:

Beregningene av innhold av de fire hovedsementmineralene baserer seg på flere antagelser, for eksempel:

- Hele Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-innholdet er bundet i Ferrittfasen (C<sub>4</sub>AF)  
(C<sub>4</sub>AF = 3,043\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Hele Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-innholdet blir bundet i Aluminatfasen (C<sub>3</sub>A)  
(C<sub>3</sub>A = (2,650\*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) - (1,692\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>))
- Resten av CaO blir bundet i C<sub>3</sub>S o C<sub>2</sub>S  
(C<sub>3</sub>S = (4,071\*CaO) – (7,602\*SiO<sub>2</sub>) – (6,719\*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – (1,430\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>))
- Hele SiO<sub>2</sub>-innholdet blir sammen med restlige CaO bundet i C<sub>2</sub>S  
(C<sub>2</sub>S = (2,867\*SiO<sub>2</sub>) – (0,754\*C<sub>3</sub>S))

I tillegg baserer Bogue-beregninger på at det er likevekt mellom smeltefasen og faststoffer når klinkeren blir nedkjølt. Men i teknisk klinkerproduksjon blir klinkeren nedkjølt så rask at det er umulig å oppnå likevekt. Den største feilkilden i Bogue beregninger er likevel at den ikke tar

hensyn til urenheter (fremmedoksider) i hovedsementmineralene [9]. Som nevnt i kapittel 2 gjør urenheter i råmaterialene og brenning i roterovn med alternative brennstoffer at sementmineraler aldri er helt rene faser, men inneholder ofte betydelige mengder urenheter i krystallstrukturen.

Bogue-beregningene avviker ofte markant fra den reelle sammensetningen. Ofte viser Bogue-beregningene for lave verdier for  $C_3S$  og  $C_4AF$  og for høye verdier for  $C_2S$  og  $C_3A$  [10].

**Tabell 5: Mineralogisk sammensetning (Rietveld-metode) av Norcem Standard, Norcem Anlegg, Cemex Rapid og Aalborg Rapid sement**

| (vekt %)                                            | Norcem<br>Standard <sup>a</sup> | Norcem<br>Anlegg <sup>a</sup> | CEMEX<br>Rapid <sup>a</sup> | Aalborg<br>Rapid <sup>b</sup> |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| $C_3S$                                              | 53,6                            | 59,6                          | 54,6                        | 64,3                          |
| $C_2S$                                              | 20,6                            | 14,1                          | 18,3                        | 10,7                          |
| $C_3A$ (kubisk)                                     | 2,4                             | 1,1                           | 3,2                         | 4,2                           |
| $C_3A$ (ortorombisk)                                | 3,2                             | 0,8                           | 3,3                         | 1,8                           |
| $C_3A$ (total)                                      | 5,6                             | 1,9                           | 6,5                         | 6,0                           |
| $C_4AF$                                             | 11,8                            | 14,7                          | 8,5                         | 10,1                          |
| Kalsitt ( $CaCO_3$ )                                | 2,8                             | 4,0                           | 2,9                         | 3,5                           |
| Periklas ( $MgO$ )                                  | 1,7                             | 0,9                           | 1,7                         | -----                         |
| Portlanditt ( $Ca(OH)_2$ )                          | 0,2                             | 0,2                           | 0,5                         | 0,3                           |
| Kvarts ( $SiO_2$ )                                  | -----                           | 0,2                           | -----                       | 0,2                           |
| Anhydritt ( $CaSO_4$ )                              | -----                           | -----                         | 2,6                         | 0,2                           |
| Gips ( $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ )                      | 0,9                             | 0,9                           | -----                       | 0,4                           |
| Hemihydrat ( $CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$ ) <sup>c</sup> | 2,1                             | 3,3                           | 2,4                         | 3,5                           |
| Alkali sulfater                                     | 0,8                             | 0,3                           | 1,9                         | 0,4                           |
| Dolomitt ( $CaMg(CO_3)_2$ )                         | -----                           | -----                         | -----                       | 0,2                           |

<sup>a</sup> Gjennomført av NTNU/Ecole des Mines D'Alès; 2014

<sup>b</sup> Gjennomført av EMPA; 2016

<sup>c</sup> Fra dehydrering av gips i Norcem Standard og Norcem Anlegg

Cemex Rapid har et noe lavere innhold av  $Fe_2O_3$  og dette vises også i en lavere  $C_4AF$ -andel sammenliknet med de andre sementene.

Verdier for alkaliekvivalent viser at Norcem Anlegg og Aalborg Rapid er lavalkalisementer ( $Na_2O$  ekv.  $< 0,6$  %).

Cemex og Aalborg er nedmalt til finere partikkelstørrelser og har en betydelig høyere Blaineoverflate sammenliknet med Norcem Standard og Norcem Anlegg. Dette er en hovedgrunn til den raske avbindingstiden av Cemex og Aalborg Rapid. Det finnes i hovedsak to måter til å redusere avbindingstiden av sement; høy finhet og økt andel  $C_3S$ .

Det er et par merknader i kjemien og mineralogien som entydig skiller Norcem Standard og Norcem Anlegg sement fra hverandre.

Norcem Anlegg er en lavalkali ( $Na_2O$  ekv.  $< 0,6$  %) og lav- $C_3A$ -sement. I databladet er det ikke oppgitt noen forskjell i  $C_3A$ -innhold mellom Norcem Standard og Norcem Anlegg. Egne erfaringer og undersøkelser viser imidlertid at  $C_3A$ -innholdet i Norcem Anlegg ofte bare er

rundt 2-3 % i motsetning til Norcem Standard som vanligvis inneholder 5-6 %  $C_3A$ . Dermed er også  $C_4AF$ -andelen i Norcem Anlegg høyere enn i Norcem Standard.  $C_4AF$  reagerer mye langsommere med kalsiumsulfater enn  $C_3A$ . Dette sammen med at Norcem Anlegg er litt grovere forklarer den litt lavere varmeutviklingen og dermed lavere tidligfastheten hos Norcem Anlegg sammenliknet med Norcem Standard.

Samtidig har Norcem Anlegg en høyere  $C_3S$ -andel eller et høyere  $C_3S/C_2S$ -forhold.  $C_3S$  er den sementfasen som er hovedansvarlig for styrken/fasthetsutviklingen av sement. Den høyere  $C_3S$  andelen er en forklaring for det høyere fasthetspotensialet i Norcem Anlegg sammenliknet med Norcem Standard.

Cemex Rapid likner veldig på Norcem Standardsement. Den viktigste og mest typiske forskjellen (med hensyn til mineralogien) mellom Norcem og Cemex sin Portlandsement er forskjeller i de tilsatte kalsiumsulfatmineralene.

Norcem tilsetter i hovedsak gips som dehydrer delvis til hemihydrat (bassanit) i sementmølla. Cemex derimot bruker en blanding av Anhydritt og Gips/hemihydrat til å kontrollere avbindingen (reaksjon med  $C_3A$ ). Aalborg bruker også mest gips/hemihydrat som kalsiumsulfatkilde. De tre kalsiumsulfatmineralene har forskjellig løselighet og det er veldig viktig og nøye tilpasse den riktige mengden  $SO_3$  og kalsiumsulfatblanding til reaktivitet av  $C_3A$ . Cemex Rapid inneholder i tillegg en høyere andel av alkalisulfater sammenliknet med de andre sementene. Dette kan også bidra til en høyere tidligfasthet i Cemex Rapid. Likevel bidrar kanskje den høye overflaten av Cemex Rapid mest til høy tidlig- og slutfasthet.

Aalborg Rapidsement har det høyeste  $C_3S$ -innholdet (eller  $C_3S/C_2S$  forholdet) av alle sementene. Den har cirka 10 % mer  $C_3S$  og 10 % mindre  $C_2S$  enn Norcem Standard. Ellers er sementen ganske lik Norcem Standard i kjemisk og mineralogisk sammensetning. Den høye  $C_3S$  andelen i tillegg til den høye overflaten er ansvarlig for den potensielt høyeste slutfastheten av disse sementene. Aalborg Rapid har også den eneste sementen som ikke inneholder Periklas ( $MgO$ ).

Alle sementene har lavt Portlandtinnhold ( $Ca(OH)_2$ ). Dette tyder på lite pre-hydrering ved lagring og/eller transport.

## 4 Analyse av tilsetningsmaterialene

Tabell 6 og Tabell 7 viser resultater fra kjemisk og mineralogisk analyse av tilsetningsmaterialer som ble benyttet i Sintef-forsøkene (Norcem Flygeaske, Cemex slagg og silikastøv fra ELKEM). Undersøkelsene ble gjennomført av EMPA i 2016.

**Tabell 6: Kjemisk sammensetning (XRF) av Norcem Flygeaske, Cemex slagg og Elkem silikastøv (Analyse fra EMPA, 2016)**

| Oksid (%)                      | Flygeaske | Slagg | Silikastøv |
|--------------------------------|-----------|-------|------------|
| CaO                            | 4,30      | 42,79 | 0,29       |
| SiO <sub>2</sub>               | 56,08     | 36,15 | 95,52      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25,19     | 11,04 | 0,41       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,21      | 0,48  | 0,13       |
| MgO                            | 1,16      | 7,37  | 0,48       |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,71      | 0,09  | 0,25       |
| K <sub>2</sub> O               | 1,41      | 0,41  | 0,84       |
| Na <sub>2</sub> O equivalent   | -----     | ----- | -----      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,338     | 0,01  | 0,087      |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,238     | 0,76  | <0,01      |
| MnO                            | -----     | ----- | -----      |
| Carbon                         | 0,54      | ----- | 0,38       |
| Blaine (m <sup>2</sup> /kg)    | 268       |       |            |

**Tabell 7: Mineralogisk sammensetning (Rietveld-metode) av Norcem Flygeaske, Cemex slagg og Elkem silikastøv (Analyse fra EMPA, 2016)**

| (vekt %)                                                   | Flygeaske | Slagg | Silikastøv |
|------------------------------------------------------------|-----------|-------|------------|
| Kvarts (SiO <sub>2</sub> )                                 | 14,6      | ----- | 0,2        |
| Mullitt (Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub> ) | 20,6      | ----- | -----      |
| Hematitt (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                 | 0,9       | ----- | -----      |
| Magnetitt (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )                | 2,0       | ----- | -----      |
| Fri kalk (CaO)                                             | 0,1       | ----- | -----      |
| Periklas (MgO)                                             | -----     | ----- | -----      |
| C <sub>3</sub> S                                           | 0,2       | ----- | -----      |
| Anhydritt (CaSO <sub>4</sub> )                             | 0,2       | ----- | -----      |
| Kalsitt (CaCO <sub>3</sub> )                               | 0,1       | ----- | -----      |
| Moissanitt (SiC)                                           | -----     | ----- | 0,4        |
| Amorf Andel                                                | 61,2      | 100   | 99,5       |

Det finnes klare forskjeller i kjemisk og mineralogisk sammensetning mellom flygeaske, slagg og silikastøv. Silikastøv er entydig siden den har den enkleste kjemien og består av >95 % av SiO<sub>2</sub> og er omtrent 100 % amorf. Små mengder av krystallinsk kvarts og moissanitt (silisiumkarbid) er typisk.

Slagg er også 100 % amorf men har en litt mer variert kjemi. Slagg gjenkjenner man vanligvis ganske raskt gjennom det relativt høye MgO-innholdet i kjemisk sammensetning (ikke MgO

som Periklas i mineralogisk sammensetning). Magnesium i slagg kommer fra dolomitt som er brukt som flussmiddel i smelteprosessen av jernmalm. Alle andre tilsetningsmaterialer inneholder vanligvis veldig lite MgO. Slagg består i hovedsak av CaO (kalsitt er også brukt som flussmiddel) og SiO<sub>2</sub> og Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> som er urenheter i jernmalm. I tillegg inneholder slagg ikke (eller veldig lite) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Flygeaske har derimot et relativt høyt innhold av Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Flygeasken i Tabell 6 inneholder bare 4,3 % CaO og er dermed en silikatholdig flygeaske (Type A). Den kjemiske sammensetningen av flygeaske likner naturlig leire når man ser på SiO<sub>2</sub>- og Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-innholdet (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-forhold mellom 2/1 til 3/1) [11].

I motsetning til silikastøv og slagg er flygeaske ikke 100 % amorf. Tabell 6 viser at den undersøkte flygeasken som Norcem bruker er bare 61 % amorf og inneholder krystallinske faser som kvarts og mullitt. Mullitt (Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub>) er veldig vanlig å finne i flygeaske. Denne mineralfasen kan dannes for eksempel når man brenner kaolinit, eller andre leirmineraler som ofte finnes i kull, ved høy temperatur (1000-1200 °C). Små mengder krystallinsk hematitt og magnetitt kan også være typisk, avhengig av mineralogien til det kullmaterialet som blir forbrent.

## 5 Analyse av blandingssementer

Tabell 8 og Tabell 9 viser resultater fra kjemisk og mineralogisk analyse av blandingssementer som ble benyttet i Sintef-forsøkene (Norcem Standard FA, Anlegg FA og Cemex miljøsement). Undersøkelsene ble gjennomført av EMPA i 2016.

**Tabell 8: Kjemisk sammensetning (XRF) av Norcem Standard FA, Norcem Anlegg FA og Cemex Miljøsement (Analyse fra EMPA, 2016)**

| Oksid (%)                          | Norcem<br>Standard FA | Norcem<br>Anlegg FA | Cemex<br>Miljøsement |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| CaO (%)                            | 52,13                 | 53,30               | 56,55                |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 24,36                 | 26,17               | 24,23                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 7,65                  | 7,50                | 6,14                 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 3,76                  | 4,51                | 1,75                 |
| MgO (%)                            | 2,27                  | 1,63                | 3,25                 |
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 0,54                  | 0,38                | 0,28                 |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 1,17                  | 0,56                | 0,69                 |
| Na <sub>2</sub> O equivalent       | 1,31                  | 0,74                | 0,73                 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)  | 0,272                 | 0,251               | 0,155                |
| TiO <sub>2</sub> (%)               | 0,419                 | 0,410               | 0,400                |
| MnO (%)                            | -----                 | -----               | 0,092                |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 3,5                   | 3,24                | 3,95                 |
| <b>Blaine (m<sup>2</sup>/kg)</b>   | <b>421</b>            | <b>380</b>          | <b>447</b>           |

**Tabell 9: Mineralogisk sammensetning (Rietveld-metode) av Norcem Standard FA, Norcem Anlegg FA og Cemex Miljøsement (Analyse fra EMPA, 2016)**

| (vekt %)                                             | Norcem<br>Standard FA | Norcem<br>Anlegg FA | Cemex<br>Miljøsement |
|------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| C <sub>3</sub> S                                     | 47,2                  | 52,9                | 42,7                 |
| C <sub>2</sub> S                                     | 6,8                   | 6,9                 | 5,6                  |
| C <sub>3</sub> A                                     | 1,7                   | 0,7                 | 2,1                  |
| C <sub>3</sub> A                                     | 2,6                   | 1,2                 | 0,8                  |
| C <sub>4</sub> AF                                    | 6,1                   | 8,4                 | 3,0                  |
| Periklas (MgO)                                       | 0,8                   | ----                | 0,1                  |
| Portlanditt (Ca(OH) <sub>2</sub> )                   | 0,7                   | 0,8                 | 0,9                  |
| Anhydritt (CaSO <sub>4</sub> )                       | ----                  | ----                | 1,7                  |
| Bassanitt (CaSO <sub>4</sub> * 1/2 H <sub>2</sub> O) | 2,5                   | 1,7                 | 0,4                  |
| Gips (CaSO <sub>4</sub> * 2 H <sub>2</sub> O)        | 0,6                   | 1,4                 | 3,3                  |
| Kalsitt (CaCO <sub>3</sub> )                         | 3,6                   | ----                | 1,1                  |
| Kvarts (SiO <sub>2</sub> )                           | 1,4                   | 1,7                 | ----                 |
| Alkalisulfater                                       | ----                  | ----                | ----                 |
| Mullitt                                              | 0,2                   | 0,7                 | ----                 |
| Amorf Andel <sup>a</sup>                             | 25,9                  | 23,7                | 38,2                 |

<sup>a</sup> Den amorfe andelen representerer her flygeaske i Norcem Standard og Anlegg FA og slagg i Cemex miljøsement. Rene Portlandsementer inneholder ingen eller veldig lite amorfe faser [12].

Det er vanskelig å se klare forskjeller i kjemien mellom de tre blandingssementene, men det finnes et par små forskjeller som skiller slaggsement fra FA-sement. Ren flygeaske inneholder omtrent 7 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mens ren slagg inneholder nesten ikke noe Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Det betyr at det opprinnelige Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-innholdet i Cemex Rapid blir bare uttynnet. Dette vises som et lavere Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-innhold i Cemex Miljøsementen sammenliknet med Norcem sine FA-sementer. Samtidig inneholder slagg en betydelig mengde MgO mens MgO-innholdet i flygeaske er veldig lavt. Cemex Miljøsement har også høyere MgO-innhold enn FA-sementene fra Norcem. I tillegg har slagg omtrent ti ganger høyere CaO-innhold enn flygeaske. Det betyr at til tross for at den opprinnelige Cemex Rapidsementen er uttynnet med cirka 33 % slagg (i motsetning til cirka 20 % FA i Norcem sementer), har Cemex Miljøsement et høyere CaO-innhold enn begge Norcem FA-sementene.

Resultatene fra den mineralogiske analysen i Tabell 9 viser at Norcem Anlegg FA og Cemex Miljøsement overstiger den lovlige grensen for tilsetningsmaterialer etter EN 197-1 (maks. 20 % for CEM II/A and maks. 35 % for CEM II/B). Det ble imidlertid bare gjort én analyse ved EMPA og usikkerheten knyttet til Rietveldanalyse av delvis amorfe materialer er på minst ± 5 % i henhold til EMPA-rapporten fra 2016.

Bortsett fra at nesten alle sementmineralene viser lavere prosentverdier på grunn av uttynning med flygeaske er det fremdeles stort sett de samme merknadene som skiller Portlandsementene Norcem Standard fra Norcem Anlegg som gjelder for Standard FA- og Anlegg FA-sement. Det er at Norcem Anlegg FA har et lavere C<sub>3</sub>A-innhold og dermed høyere C<sub>4</sub>AF-innhold. Norcem Anlegg FA har også fortsatt et høyere C<sub>3</sub>S-innhold enn Norcem Standard FA. Men

den mest entydige måten å skille de to sementene fra hverandre er kalsittinnholdet. I Norcem Standard FA-sement blir det brukt en blanding av cirka 18 % flygeaske og 4 % kalsitt (Norcem Datablad) Dette vises som 3,6 % i Rietveld Analysen av Norcem Standard FA i Tabell 9. Det er imidlertid bare tilsatt 17 % flygeaske i Norcem Anlegg FA-sement.

Forskjeller i kalsiumsulfatmineraler mellom Norcem- og Cemex-sement er også fortsatt synlig i blandingssementene. Mens Cemex bruker en blanding av anhydritt og gips benytter Norcem gips/hemihydrat.

Anlegg FA-sement har litt lavere tidligfasthet og langsommere avbinding enn Standard FA-sement. Dette er mest på grunn av at Norcem Anlegg FA er grovere malt.

Normalt har Anlegg FA høyere sluttfasthet enn Standard FA-sement pga. klinkersammensetningen. Men tilsetning av kalsitt i Standard FA-sement gir synergieffekt ved reaksjon med flygeaske og gir dermed et fasthetsbidrag. Kalsitt vil reagere med aluminat til kalsiumkarboaluminatfaser. Dette fører indirekte til økt ettringitdannelse framfor monosulfat i sementer som kombinerer FA med kalsitt sammenliknet med sementer som kun inneholder FA. Mer ettringitt betyr mer bundet vann, et høyere volum av hydratfaser og dermed redusert porøsitet og økt fasthet [13].

## 6 Referanser

- [1] H. Taylor, Cement Chemistry, 2nd Edition, London: Academic Press, 1990.
- [2] Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition, Elsevier, 2006.
- [3] Betong-Regelverk, teknologi, og utførelse, Byggenæringensforlag, 2015.
- [4] S. Chatterji, «Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnt CaO and MgO,» *Cement and Concrete Research*, Vol. 25 (1), pp. 51-56, 1995.
- [5] *Kronos Echem; Chromate reduction in cement using ferrous sulfates*, 2011.
- [6] USGS, *Characterisation and Modes of Occurrence of Elements in Feed Coal and Fly Ash - An integrated approach*, Fact sheet-038-02, 2002.
- [7] *National Slag Association; General information about NSA*, PI 207-1.
- [8] T. Danner, H. Justnes, M. Geiker og R. Lauten, «Phase Changes during the early hydration of Portland cement with Ca-lignosulfonate,» *Cement and Concrete Research*, Vol. 69, pp. 50-60, 2015.
- [9] J. Stark og B. Wicht, *Zement und Kalk - Der BAustoff als Werkstoff*, Basel: Birkhäuser Verlag, 2000.

- [10] A. G. De La Torre, S. Bruque, J. Campo og M. A. G. Aranda, «The superstructure of C3S from synchrotron and neutron powder diffraction and its role in quantitative phase analysis,» *Cement and Concrete Research*, pp. 1347-1356, 2002 Vol. 32.
- [11] T. Danner, PhD-Avhandling; Reactivity of Calcined Clays, Trondheim: NTNU, 2013.
- [12] D. Jansen, C. Stabler, F. Götz-Neunhoeffler, S. Ditrach og J. Neubauer, «Does ordinary Portland cement contain amorphous phase? A quantitative study using an external standard method,» *Powder Diffraction*, Vol. 26, pp. 31-38, 2011.
- [13] K. De Weerd, H. Justnes, K. Kjellsen og E. Sellevold, « Fly ash-limestone ternary composite cements: synergetic effect at 28 days,» *Nordic Concrete Research*, Vol. 42 (2), 2010.

## Vedlegg:

Her blir informasjon fra databladene til de forskjellige produsentene sammenliknet med resultater fra analysene ved EMPA i 2016 (og delvis med tidligere undersøkelser ved NTNU/Alès fra 2014).

### Aalborg Rapidsement (CEM I 52.5 N (LA)):

Informasjon fra databladet er her sammenstilt med informasjon fra nettsiden (31.06.2016) ([http://www.aalborgportland.dk/media/pdf\\_filer/rapid\\_-\\_dk.pdf](http://www.aalborgportland.dk/media/pdf_filer/rapid_-_dk.pdf)) og datablad som er i vedlegg til Sintef-rapporten (mars 2016).

**Tabell 10: Egenskaper til Aalborg Rapidsement, informasjon fra Datablad (2016) sammenliknet med resultater fra EMPA (Analyse 2016)**

| Egenskap                                        | Datablad fra Aalborg                            | EMPA 2016                                            |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Fasthet 1 d (MPa)</b>                        | 21-27 (26) <sup>a</sup>                         | -----                                                |
| <b>2 d (MPa)</b>                                | 34-42 (38) <sup>a</sup>                         | -----                                                |
| <b>7 d (MPa)</b>                                | 51-59 (57) <sup>a</sup>                         | -----                                                |
| <b>28 d (MPa)</b>                               | 63-71 (66) <sup>a</sup>                         | -----                                                |
| <b>Begynnende Avbinding (min)</b>               | 110-170 (144) <sup>a</sup>                      | -----                                                |
| <b>SO<sub>3</sub> (%)</b>                       | 2,9-3,5 (3,2) <sup>a</sup>                      | 3,6                                                  |
| <b>Vannløselig Cr <sup>(VI)</sup></b>           | <2 (mg/kg)                                      | 0,008 (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sup>b</sup> |
| <b>Cl<sup>-</sup> (%)</b>                       | 0,03                                            | -----                                                |
| <b>MgO (%)</b>                                  | 1,0                                             | 0,9                                                  |
| <b>C<sub>3</sub>A (%)</b>                       | <8 %                                            | 6,0 <sup>c</sup>                                     |
| <b>Alkaliinnhold (ekv. Na<sub>2</sub>O i %)</b> | 0,6                                             | 0,58                                                 |
| <b>Densitet (kg/m<sup>3</sup>)</b>              | 3090-3190 kg/m <sup>3</sup> (3120) <sup>a</sup> | 3150                                                 |
| <b>Finhet (Blaine m<sup>2</sup>/kg)</b>         | 444                                             | 453                                                  |
| <b>LOI (%)</b>                                  | 2,3                                             | 2,61                                                 |

<sup>a</sup> Tall uten parentes er fra august 2016, tall med parentes er fra mars 2016

<sup>b</sup> Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> er analysert med XRF og oppgir hele krominnholdet som ikke-vannløselig kromat

<sup>c</sup> C<sub>3</sub>A fra EMPA er analysert med XRD (Rietveld) og er sammensatt av kubisk og ortorombisk C<sub>3</sub>A

**Tabell 11: Mineralogisk sammensetning av Aalborg Rapidsement**

| Klinkermineral         | Datablad fra Aalborg <sup>d</sup> | EMPA <sup>e</sup> |
|------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| <b>C<sub>3</sub>S</b>  | 67                                | 64,3              |
| <b>C<sub>2</sub>S</b>  | 9                                 | 10,7              |
| <b>C<sub>3</sub>A</b>  | 8                                 | 6                 |
| <b>C<sub>4</sub>AF</b> | 12                                | 10,1              |

<sup>d</sup> Informasjon fra datablad som er i vedlegg til Sintef-rapporten og gjengir Bogue-sammensetning

<sup>e</sup> Rietveld-analyse

Det var ikke mulig å finne en mer detaljert kjemisk og mineralogisk analyse for Aalborg Rapidsement på nettsida. For detaljert kjemisk analyse (XRF) refereres det til Tabell 4.

## Cemex Miljøsement (CEM II B-S 52,5 N):

Cemex Miljøsement skal inneholde cirka 33 % slagg.

Teknisk datablad for Miljøsement er tatt fra nettsida og er fra desember 2015.

**Tabell 12: Egenskaper av Cemex Miljøsement, informasjon fra Datablad (2015) sammenliknet med resultater fra EMPA (Analyse 2016)**

| Egenskap                                   | Datablad fra Cemex | EMPA 2016                                            |
|--------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------|
| Fasthet 1 d (MPa)                          | 16 MPa             | -----                                                |
| 2 d (MPa)                                  | 28 MPa             | -----                                                |
| 28 d (MPa)                                 | 59 Mpa             | -----                                                |
| Begynnende Avbinding (min)                 | 170 min            | -----                                                |
| SO <sub>3</sub> (%)                        | 3,1                | 3,95                                                 |
| Vannløslig Cr <sup>(VI)</sup>              | <2 (mg/kg)         | 0,006 (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sup>a</sup> |
| Vannløslig Cl <sup>-</sup>                 | 0,07               | -----                                                |
| C <sub>3</sub> A (%)                       | 5,3                | 2,9                                                  |
| Densitet (kg/m <sup>3</sup> )              | 3060               | 3050                                                 |
| Alkaliinnhold (ekv. Na <sub>2</sub> O i %) | 0,8                | 0,73                                                 |
| Finhet (Blaine m <sup>2</sup> /kg)         | 460                | 447                                                  |
| LOI (%)                                    | 2,3                | 2,15                                                 |

<sup>a</sup> Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> er analysert med XRF og oppgir hele krominnholdet som ikke-vannløselig kromat

På nettsida (<http://www.cemex.no/tekniske-dokumenter-og-informasjon.aspx>) var det ikke mulig å finne informasjon om mineralogisk sammensetning av Cemex Miljøsement bortsett fra C<sub>3</sub>A-innhold. Resultater fra EMPA blir her sammenliknet med resultater fra en analyse av samme sementtype som ble gjennomført ved École des Mines d'Alès i 2014 (Tabell 13). Begge undersøkelser er basert på Rietveld-analyse. Det er delvis store forskjeller (for eksempel C<sub>2</sub>S-innhold). Samtidig er det to år mellom begge undersøkelser, dvs. at det er to forskjellige "batches" som blir undersøkt. Det refereres også igjen til usikkerheten (± 5 %) av Rietveld-metoden for amorf/delvis amorfe materialer.

**Tabell 13: Mineralogisk sammensetning av Cemex Miljøsement**

| Sementmineraler (Vekt%)                            | Datablad | EMPA 2016 | Alès 2014 |
|----------------------------------------------------|----------|-----------|-----------|
| C <sub>3</sub> S                                   | -----    | 42,7      | 37,1      |
| C <sub>2</sub> S                                   | -----    | 5,6       | 12,9      |
| C <sub>3</sub> A (kub. + orto.)                    | -----    | 2,1 + 0,8 | 3,4 + 0,4 |
| C <sub>4</sub> AF                                  | -----    | 3,0       | 3,9       |
| Periklas (MgO)                                     | -----    | 0,1       | 0,8       |
| Portlanditt (Ca(OH) <sub>2</sub> )                 | -----    | 0,9       | 1,1       |
| Anhydritt (CaSO <sub>4</sub> )                     | -----    | 1,7       | 1,2       |
| Bassanitt (CaSO <sub>4</sub> * ½ H <sub>2</sub> O) | -----    | 0,4       | 1,8       |
| Gips (CaSO <sub>4</sub> * 2 H <sub>2</sub> O)      | -----    | 3,3       | 1,6       |
| Kalsitt (CaCO <sub>3</sub> )                       | -----    | 1,1       | 1,7       |
| Amorf Andel (slag)                                 | -----    | 38,2      | 33,0      |

Tabell 14: Kjemisk sammensetning av Cemex Miljøsement

| Oksid (%)                      | Datablad 2015 | EMPA 2016 | Alès 2014 |
|--------------------------------|---------------|-----------|-----------|
| CaO                            | 56            | 56,55     | 58,62     |
| SiO <sub>2</sub>               | 25            | 24,23     | 25,87     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6,3           | 6,14      | 6,54      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,1           | 1,75      | 1,86      |
| MgO                            | 4,0           | 3,25      | 3,75      |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,31          | 0,28      | 0,00      |
| K <sub>2</sub> O               | 0,82          | 0,69      | 0,47      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | -----         | 0,155     | 0,16      |
| TiO <sub>2</sub>               | -----         | 0,400     | 0,39      |
| MnO                            | -----         | 0,092     | 0,09      |
| SO <sub>3</sub>                | 3,1 %         | 3,95      | 3,37      |

## Flygeaske fra Norcem (Klasse A):

Teknisk datablad for Flygeaske er tatt fra nettsida (oktober 2015) og fra vedlegg i Sintef-rapport.

Tabell 15: Egenskaper til Norcem Flygeaske, informasjon fra Datablad (2015) sammenliknet med resultater fra EMPA (Analyse 2016)

| Egenskap                                   | Datablad 2015 | EMPA 2016 |
|--------------------------------------------|---------------|-----------|
| SO <sub>3</sub> (%)                        | 0,67          | 1,04      |
| Klorid Cl <sup>-</sup> (%)                 | 0,005         | -----     |
| Fritt CaO (%)                              | <1,5          | -----     |
| Reaktivt CaO (%)                           | <10           | -----     |
| Alkaliinnhold (ekv. Na <sub>2</sub> O i %) | 1,62          | 1,63      |
| Densitet (kg/m <sup>3</sup> )              | 2300          | 2270      |
| Finhet (Blaine m <sup>2</sup> /kg)         | 294           | 268       |
| LOI (%)                                    | 5,0           | 0,88      |

Tabell 16: Mineralogisk sammensetning av Norcem Flygeaske

| Fase                                                       | Datablad 2015 | EMPA 2016 | Alès 2014 |
|------------------------------------------------------------|---------------|-----------|-----------|
| Kvarts (SiO <sub>2</sub> )                                 | -----         | 14,6      | 16,5      |
| Mullitt (Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub> ) | -----         | 20,6      | 8,7       |
| Hematitt (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                 | -----         | 0,9       | -----     |
| Magnetitt (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )                | -----         | 2,0       | 1,2       |
| Fri Kalk (CaO)                                             | -----         | 0,1       | 0,3       |
| Periklas (MgO)                                             | -----         | -----     | 0,2       |
| C <sub>3</sub> S                                           | -----         | 0,2       | 0,4       |
| Anhydritt (CaSO <sub>4</sub> )                             | -----         | 0,2       | 0,2       |
| Kalsitt (CaCO <sub>3</sub> )                               | -----         | 0,1       | 0,2       |
| Amorf Andel (glass)                                        | -----         | 61,2      | 72,3      |

På nettsida (<http://www.norcem.no/no/flygeaske>) var det ikke mulig å finne informasjon om mineralogisk sammensetning av Norcem Flygeaske. Resultater fra EMPA blir her

sammenliknet med resultater fra en analyse av samme flygeaske som ble gjennomført ved École des Mines d'Alès i 2014 (Tabell 16). Begge undersøkelser er basert på Rietveld-analyse. Det gjelder den samme usikkerheten som omtalt over for Cemex Miljøsement.

**Tabell 17: Kjemisk sammensetning av Norcem Flygeaske**

| Oksid (%)                      | Datablad 2015 | EMPA 2016 | Alès 2014 |
|--------------------------------|---------------|-----------|-----------|
| CaO                            | 3,67          | 4,30      | 4,10      |
| SiO <sub>2</sub>               | 56,84         | 56,08     | 59,37     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25,16         | 25,19     | 21,82     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,17          | 7,21      | 7,54      |
| MgO                            | 1,20          | 1,16      | 2,02      |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,68          | 0,71      | 0,93      |
| K <sub>2</sub> O               | 1,43          | 1,41      | 2,20      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,33          | 0,338     | 0,38      |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,28          | 1,238     | 0,98      |
| Carbon                         | 0,59          | 0,54      | 1,35      |

## Norcem Standard FA-sement (CEM II/B-M 42,5 R):

Norcem Standard FA-sement skal inneholde cirka 18 % Flygeaske og 4 % kalkmel. Informasjon er tatt fra datablad på nettsida ([http://www.norcem.no/no/standardsement\\_FA](http://www.norcem.no/no/standardsement_FA)) og datablad som er i vedlegg til Sintef rapporten. Begge datablad er fra 2015.

**Tabell 18: Egenskaper til Norcem Standard FA-sement, informasjon fra datablad (2015) sammenliknet med resultater fra EMPA (Analyse 2016)**

| Egenskap                                   | Norcem 2015 | EMPA 2016                                            |
|--------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------|
| Fasthet 1 d (MPa)                          | 21          | -----                                                |
| 2 d (MPa)                                  | 32,3        | -----                                                |
| 7 d (MPa)                                  | 42,9        | -----                                                |
| 28 d (MPa)                                 | 53,4        | -----                                                |
| Begynnende Avbinding (min)                 | 160         | -----                                                |
| SO <sub>3</sub> (%)                        | 3,21        | 3,50                                                 |
| Vannløselig Cr <sup>(VI)</sup> (%)         | <2 (mg/kg)  | 0,019 (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sup>a</sup> |
| Fri Kalk (CaO i %)                         | 1,59        | -----                                                |
| Densitet (kg/m <sup>3</sup> )              | 3000        | 2980                                                 |
| Alkaliinnhold (ekv. Na <sub>2</sub> O i %) | 1,35        | 1,31                                                 |
| Finhet (Blaine m <sup>2</sup> /kg)         | 446         | 421                                                  |
| LOI (%)                                    | 2,76        | 3,55                                                 |

<sup>a</sup> Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> er analysert med XRF og oppgir hele krominnholdet som ikke-vannløselig kromat

Bortsett fra flygeaske- og kalkmelinnhold finnes det ikke noe mer detaljert mineralogisk sammensetning av Norcem Standard FA-sement på nettsida til Norcem. For mineralogisk sammensetning analysert ved EMPA i 2016 refereres det til Tabell 9. Kjemisk sammensetning av Norcem Standard FA-sement er gitt i Tabell 19.

**Tabell 19: Kjemisk sammensetning av Norcem Standard FA-sement**

| Oksid (%)                      | Datablad 2015 | EMPA 2016 |
|--------------------------------|---------------|-----------|
| CaO                            | 52,50         | 52,13     |
| SiO <sub>2</sub>               | 25,30         | 24,36     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,83          | 7,65      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,82          | 3,76      |
| MgO                            | 2,29          | 2,27      |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,57          | 0,54      |
| K <sub>2</sub> O               | 1,19          | 1,17      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,270         | 0,272     |
| TiO <sub>2</sub>               | -----         | 0,419     |

### Norcem Anlegg FA-sement (CEM II/A-V 42,5 N):

Norcem Anlegg FA-sement skal inneholde cirka 17 % Flygeaske. Informasjon er tatt fra Datablad på nettsida ([http://www.norcem.no/no/anleggsement\\_FA](http://www.norcem.no/no/anleggsement_FA)) og datablad som er i vedlegg til Sintef rapporten. Begge datablad er fra 2015.

**Tabell 20: Egenskaper til Norcem Anlegg FA-sement, informasjon fra datablad (2015) sammenliknet med resultater fra EMPA (Analyse 2016)**

| Egenskap                                   | Norcem 2015  | EMPA 2016                                            |
|--------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------|
| Fasthet 1 d (MPa)                          | 15           | -----                                                |
| 2 d (MPa)                                  | 24           | -----                                                |
| 7 d (MPa)                                  | 37           | -----                                                |
| 28 d (MPa)                                 | 55           | -----                                                |
| Begynnende Avbinding (min)                 | 165          | -----                                                |
| SO <sub>3</sub> (%)                        | 2,78         | 3,24                                                 |
| Vannløselig Cr <sup>(VI)</sup> (%)         | 0,36 (mg/kg) | 0,022 (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sup>a</sup> |
| Fri Kalk (CaO i %)                         | 1,4          | -----                                                |
| Densitet (kg/m <sup>3</sup> )              | 3020         | 3040                                                 |
| Alkaliinnhold (ekv. Na <sub>2</sub> O i %) | 0,82         | 0,75                                                 |
| Finhet (Blaine m <sup>2</sup> /kg)         | 390          | 381                                                  |
| LOI (%)                                    | 1,42         | 1,6                                                  |

<sup>a</sup> Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> er analysert med XRF og oppgir hele krominnholdet som ikke-vannløselig kromat

Bortsett fra flygeaske-innholdet finnes det ikke noe mer detaljert mineralogisk sammensetning av Norcem Anlegg FA-sement på nettsida til Norcem. For mineralogisk sammensetning analysert ved EMPA i 2016 refereres det til Tabell 9. Kjemisk sammensetning av Norcem Standard FA-sement er gitt i Tabell 21.

**Tabell 21: Kjemisk analyse av Norcem Anlegg FA-sement**

|                                    | <b>Datablad</b> | <b>EMPA</b> |
|------------------------------------|-----------------|-------------|
| <b>CaO</b>                         | 53,59           | 53,30       |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 26,69           | 26,17       |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 7,63            | 7,50        |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 4,55            | 4,51        |
| <b>MgO</b>                         | 1,64            | 1,63        |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0,44            | 0,38        |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0,57            | 0,56        |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0,247           | 0,251       |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0,396           | 0,410       |

## Silikastøv fra Elkem:

For undersøkelser ved Sintef ble det benyttet silikastøv 940 U (U for undensified). Datablad informasjon er fra 2015

**Tabell 22: Egenskaper av Elkem silikastøv 940 U, informasjon fra Datablad (2015) sammenliknet med resultater fra EMPA (Analyse 2016)**

| <b>Egenskap</b>                                 | <b>Datablad 2015</b> | <b>EMPA 2016</b> |
|-------------------------------------------------|----------------------|------------------|
| <b>SO<sub>3</sub> (%)</b>                       | 0,09                 | 0,12             |
| <b>Alkaliinnhold (ekv. Na<sub>2</sub>O i %)</b> | -----                | -----            |
| <b>Densitet (kg/m<sup>3</sup>)</b>              | 200-350              | -----            |
| <b>Finhet (BET m<sup>2</sup>/kg)</b>            | -----                | 16800            |
| <b>LOI (%)</b>                                  | 0,90                 | 1,77             |

Det finnes ingen detaljert mineralogisk sammensetning av Elkem silikastøv på nettsida (<https://www.elkem.com/silicon-materials/high-performance-concrete/>). For mineralogisk sammensetning analysert ved EMPA i 2016 refereres det til Tabell 7. Kjemisk sammensetning av silikastøv er gitt i Tabell 23.

**Tabell 23: Kjemisk sammensetning av Elkem silikastøv 940 U**

| <b>Oksid (%)</b>                   | <b>Datablad 2015</b> | <b>EMPA 2016</b> |
|------------------------------------|----------------------|------------------|
| <b>CaO</b>                         | 0,26                 | 0,29             |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 96,45                | 95,52            |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,35                 | 0,41             |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,11                 | 0,13             |
| <b>MgO</b>                         | 0,33                 | 0,48             |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0,16                 | 0,25             |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0,76                 | 0,84             |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0,09                 | 0,087            |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0,002                | <0,01            |
| <b>Carbon</b>                      | -----                | 0,38             |

Statens Vegvesen  
Vegdirektoratet  
Ms. Eva Rodum  
Postboks 8142 Dep  
0033 Oslo  
NORWAY

## Test Report No. 5214011626

|                          |                                              |
|--------------------------|----------------------------------------------|
| Test assignment:         | Analysis of cementitious materials           |
| Test object(s):          | 4 Portland cements, 1 fly ash, 1 silica fume |
| Building / component:    |                                              |
| Empa sample No.:         | 9941-9946                                    |
| Order dated of:          | 05.11.2015                                   |
| Test object(s) received: | 16.12.2015                                   |
| Sampling by:             | Client                                       |
| Number of pages:         | 15                                           |
| Attachments:             | -                                            |

### Table of content

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1. Test assignment.....    | 2  |
| 2. Sample description..... | 2  |
| 3. Test methods.....       | 2  |
| 4. Results.....            | 3  |
| 5. Conclusions.....        | 8  |
| 6. References.....         | 8  |
| 7. Appendix.....           | 10 |

G:\Berichte word\2016\02\5214011626\_Analyse\_Baustoff.docx

Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology  
Dübendorf, 08. February 2016

Expert:  
Dr. Frank Winnefeld

Head of Laboratory:  
Dr. Pietro Lura

*F. Winnefeld*

*i.v. A. Humann*

## 1. Test assignment

Six cementitious materials (1 ordinary Portland cement, 3 blended Portland cements, 1 fly ash, 1 silica fume) should be analysed for their specific surface and their chemical-mineralogical composition.

## 2. Sample description

The client delivered the following six samples of about 120 g each to Empa:

- Aalborg Rapid, ordinary Portland cement CEM I, Empa No. 9942
- Cemex Miljø, slag blended Portland cement CEM II/B-S, Empa No. 9941
- Norcem Anlegg FA, fly ash blended Portland cement CEM II/A-V, Empa No. 9944
- Norcem Standard FA, blended Portland cement CEM II/B-M, Empa No. 9945
- Flygeaske, fly ash, Empa No. 9946
- Silikastøv, silica fume, Empa No. 9943

## 3. Test methods

Density (pycnometric method) and specific surface area (Blaine method) were determined according to EN 196-6 except for silica fume where the BET method according to EN 13263-1 / ISO 9277 was used.

Loss on ignition (L.O.I.) and X-ray fluorescence analysis (XRF) using fused beads were performed according to EN 196-2. Total carbon was determined according to ISO 10694. Thermogravimetric analysis (TGA) was done under nitrogen atmosphere using a Mettler-Toledo TGA/SDTA 851 instrument at 20 K/min between 30 and 980°C for all samples except the silica fume.

The crystalline phase contents were determined by quantitative X-ray diffraction analysis (QXRD) using Rietveld refinement. Prior to analysis about 4 g of each sample were ground for 20 minutes in isopropanol applying a McCrone micronizing mill with the exception of the silica fume which was used as it is.

X-ray diffraction (XRD) was performed using a PANalytical X'Pert Pro MPD diffractometer in a  $\Theta$ - $2\Theta$  configuration using Cobalt  $K_\alpha$  radiation with a fixed divergence slit size of  $0.5^\circ$  and a rotating sample stage. The samples were scanned between  $5^\circ$  and  $90^\circ$   $2\Theta$  with the X'Celerator detector. The Rietveld refinement was performed with the X'Pert High Score Plus software (version 4.1).

For the three blended cements, the fly ash and the silica fume an additional measurement with 20%  $\text{CaF}_2$  as internal standard was done in order to quantify the total amount of X-ray amorphous phases.

A reverse Bogue calculation using the clinker phase compositions given by Taylor [1] was performed to check the accuracy of the Rietveld evaluation for the Portland cement sample Aalborg Rapid (9942). For the blended cements this procedure is not possible.

More details on QXRD including accuracy are given e.g. in [2-4], however this only refers to Portland cements without mineral additions. The error might be higher in case of blended cements. The quantitative determination of mineral additions in blended Portland cement is usually done by wet chemistry according to CEN/TR 196-4. In order to set up a procedure based on QXRD for a particular blended cement, samples of the clinker and the mineral addition(s) would be needed.

## 4. Results

### 4.1 Density and specific surface area

Density and specific surface of the investigated powders are given in table 1.

Table 1: Density and specific surface

| Parameter                                          | Aalborg<br>Rapid<br>CEM I<br>9942 | Cemex<br>Miljø<br>CEM II/B-S<br>9941 | Norcem<br>Anlegg FA<br>CEM II/A-V<br>9944 | Norcem<br>Standard FA<br>CEM II/B-M<br>9945 | Flygeaske<br>Fly ash<br>9946 | Silikastøv<br>Silica fume<br>9943 |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Density<br>g/cm <sup>3</sup>                       | 3.15                              | 3.05                                 | 3.04                                      | 2.98                                        | 2.27                         | -                                 |
| Spec. surface<br>area Blaine<br>cm <sup>2</sup> /g | 4530                              | 4470                                 | 3810                                      | 4210                                        | 2680                         | -                                 |
| Spec. surface<br>area Blaine<br>m <sup>2</sup> /g  | 0.453                             | 0.447                                | 0.381                                     | 0.421                                       | 0.268                        | -                                 |
| Spec. surface<br>area BET<br>m <sup>2</sup> /g     | -                                 | -                                    | -                                         | -                                           | -                            | 16.8                              |

### 4.2 Chemical composition

Table 2 gives the results for the X-ray fluorescence analysis including loss on ignition and total carbon determination.

Table 2: Chemical analysis

| Parameter                      | Aalborg<br>Rapid<br>CEM I<br>9942 | Cemex<br>Miljø<br>CEM II/B-S<br>9941 | Norcem<br>Anlegg FA<br>CEM II/A-V<br>9944 | Norcem<br>Standard FA<br>CEM II/B-M<br>9945 | Flygeaske<br>Fly ash<br>9946 | Silikastøv<br>Silica fume<br>9943 |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| mass-%                         |                                   |                                      |                                           |                                             |                              |                                   |
| CaO                            | 63.67                             | 56.55                                | 53.30                                     | 52.13                                       | 4.30                         | 0.29                              |
| SiO <sub>2</sub>               | 19.29                             | 24.23                                | 26.17                                     | 24.36                                       | 56.08                        | 95.52                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.93                              | 6.14                                 | 7.50                                      | 7.65                                        | 25.19                        | 0.41                              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.39                              | 1.75                                 | 4.51                                      | 3.76                                        | 7.21                         | 0.13                              |
| MgO                            | 0.92                              | 3.25                                 | 1.63                                      | 2.27                                        | 1.16                         | 0.48                              |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.29                              | 0.28                                 | 0.38                                      | 0.54                                        | 0.71                         | 0.25                              |
| K <sub>2</sub> O               | 0.44                              | 0.69                                 | 0.56                                      | 1.17                                        | 1.41                         | 0.84                              |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.270                             | 0.155                                | 0.251                                     | 0.272                                       | 0.338                        | 0.087                             |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.255                             | 0.400                                | 0.410                                     | 0.419                                       | 1.283                        | <0.01                             |
| MnO                            | 0.030                             | 0.092                                | 0.057                                     | 0.054                                       | 0.055                        | 0.019                             |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.008                             | 0.006                                | 0.022                                     | 0.019                                       | 0.022                        | 0.002                             |
| SO <sub>3</sub>                | 3.60                              | 3.95                                 | 3.24                                      | 3.50                                        | 1.04                         | 0.12                              |
| L.O.I. <sup>1)</sup>           | 2.61                              | 2.15                                 | 1.60                                      | 3.55                                        | 0.88                         | 1.77                              |
| total                          | 99.69                             | 99.65                                | 99.62                                     | 99.68                                       | 99.67                        | 99.94                             |
| total carbon                   | 0.41                              | 0.29                                 | 0.46                                      | 0.74                                        | 0.54                         | 0.38                              |
| organic carbon                 | n.d. <sup>2)</sup>                | n.d. <sup>2)</sup>                   | 0.39                                      | 0.31                                        | 0.54                         | n.d. <sup>2)</sup>                |
| inorganic carbon               | ≤0.41                             | ≤0.29                                | 0.07                                      | 0.43                                        | 0.00                         | ≤0.38                             |
| as CO <sub>2</sub>             | ≤1.50                             | ≤1.06                                | 0.26                                      | 1.58                                        | 0.00                         | n.c. <sup>3)</sup>                |

<sup>1)</sup> Loss on ignition

<sup>2)</sup> n.d. = not determined. Some organic carbon might be present e.g. from grinding aids or from added set regulator and/or limestone.

<sup>3)</sup> n.c. = not calculated as inorganic carbon is generally present in silica fume as SiC or elemental carbon.

## 4.3 Phase composition

### 4.3.1 Ordinary Portland cement

The comparison between experimental and simulated X-ray diffractograms and the TGA data are shown in Figures 1 and 2 in the appendix.

Table 3 gives the results of the quantitative phase analyses of Aalborg Rapid (CEM I, 9942) and the comparison between reverse Bogue calculation using the QXRD data [1] and XRF analysis.

The cement shows a typical distribution of the four clinker phases. As set regulator mainly bassanite is used. Limestone is present within the limits for a CEM I according to EN 197-1. The reverse calculation is in good agreement with the XRF composition with the exception of the SO<sub>3</sub> content which is underestimated in the Rietveld data compared to the XRF data. The reason for this might be the

presence of other sulfate-containing minor phases, which could not be identified, a higher incorporation of  $\text{SO}_3$  in the clinker phases than given by Taylor [1] or a prehydration of the cement. In the latter case hydrate phases such as ettringite or monosulfate, which contain  $\text{SO}_3$ , are formed when the cement powder interacts with humidity [7-9]. Some indication of prehydration can be seen in TGA (Figure 2, water loss in the range of 50-150°C).

Table 3: Quantitative X-ray diffraction of the investigated Aalborg Rapid (CEM I, 9942)

| Phase <sup>1)</sup>               | Aalborg Rapid<br>CEM I<br>9942 | Oxide<br>mass-%                                 | Aalborg Rapid<br>CEM I<br>9942 |      |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|------|
| mass-%                            |                                |                                                 |                                |      |
| $\text{C}_3\text{S}$              | 64.3                           |                                                 | QXRD                           | XRF  |
| $\text{C}_2\text{S}$              | 10.7                           | CaO                                             | 65.1                           | 63.7 |
| $\text{C}_3\text{A}$ cubic        | 4.2                            | $\text{SiO}_2$                                  | 20.4                           | 19.3 |
| $\text{C}_3\text{A}$ orthorhombic | 1.8                            | $\text{Al}_2\text{O}_3$                         | 5.0                            | 4.9  |
| $\text{C}_4\text{AF}$             | 10.1                           | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                         | 3.1                            | 3.4  |
| Lime                              | 0.1                            | $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 8.0                            | 8.3  |
| Portlandite <sup>2)</sup>         | 0.3                            | MgO                                             | 1.4                            | 0.9  |
| Anhydrite                         | 0.2                            | $\text{K}_2\text{O}$                            | 0.3                            | 0.4  |
| Bassanite                         | 3.5                            | $\text{Na}_2\text{O}$                           | 0.1                            | 0.3  |
| Gypsum                            | 0.4                            | $\text{SO}_3$                                   | 2.4                            | 3.6  |
| Syngenite                         | 0.4                            | $\text{CO}_2$                                   | 1.7                            | 1.5  |
| Calcite <sup>2)</sup>             | 3.5                            |                                                 |                                |      |
| Dolomite <sup>2)</sup>            | 0.2                            |                                                 |                                |      |
| Quartz                            | 0.2                            |                                                 |                                |      |

<sup>1)</sup> Standard deviations in interlaboratory testing on CEM I cements were found to be in the order of 2.5 mass-% for alite, 1.5 mass-% for belite, 1 mass-% for aluminate and ferrate and 0.5 mass-% for the minor phases [2-4].

<sup>2)</sup> Thermogravimetric analysis:

0.7 mass-% portlandite and 1.6 mass-%  $\text{CO}_2$  (refers to 3.7 mass-%  $\text{CaCO}_3$ )

#### 4.3.2 Blended Portland cements

The comparison between experimental and simulated X-ray diffractograms and the TGA data are shown in Figures 3 and 4 for Cemex Miljø (CEM II/B-S, 9941), in figures 5 and 6 for Norcem Anlegg FA (CEM II/A-V, 9944) and in figures 7 and 8 for Norcem Standard FA (CEM II/B-M, 9945) in the appendix.

Table 4 gives the results of the quantitative phase analyses. A comparison between reverse Bogue calculation using the QXRD data [1] and XRF analysis is not possible for blended cements without knowing the exact compositions and quantities of the mineral additions.

Usually Portland cement clinker does not contain a significant amorphous content [9], thus the amorphous can be assigned to mineral additions such as slag (sample 9941) or fly ash (9944, 9945) and to unassigned minor phases including hydrates formed due to prehydration. Prehydration is an issue in all samples, see figures 4, 6 and 8. In case of Cemex Miljø and Norcem Anlegg FA the amorphous content slightly increases the amount of mineral addition allowed by the EN 197-1 standard (max. 20 mass-% for a CEM II/A and max. 35 mass-% for a CEM II/B), however the uncertainty in the determination of the amorphous content (at least  $\pm 5$  mass-%) and the presence of non-quantified minor phases including hydrates formed during prehydration needs to be taken into account.

While the clinker phases are in the range typical for Portland cements, the calcium sulfate set regulators are different among the samples. Cemex Miljø contains mainly gypsum besides anhydrite, Norcem Anlegg FA mainly bassanite and gypsum, and Norcem Standard FA mainly bassanite. The occurrence of mullite in the latter two samples refers to the fly ash present in the cements.

Table 4: Quantitative X-ray diffraction of the investigated blended cements. As in the samples significant contents of amorphous phases are present, the results are rounded to whole numbers.

| Phase <sup>1)</sup>                                  | Cemex<br>Miljø<br>CEM II/B-S<br>9941 | Norcem<br>Anlegg FA<br>CEM II/A-V<br>9944 | Norcem<br>Standard FA<br>CEM II/B-M<br>9945 |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| C <sub>3</sub> S                                     | 42.7                                 | 52.9                                      | 47.2                                        |
| C <sub>2</sub> S                                     | 5.6                                  | 6.9                                       | 6.8                                         |
| C <sub>3</sub> A cubic                               | 2.1                                  | 0.7                                       | 1.7                                         |
| C <sub>3</sub> A orthorhombic                        | 0.8                                  | 1.2                                       | 2.6                                         |
| C <sub>4</sub> AF                                    | 3.0                                  | 8.4                                       | 6.1                                         |
| Portlandite <sup>2)</sup>                            | 0.9                                  | 0.8                                       | 0.7                                         |
| Periclase                                            | 0.1                                  |                                           | 0.8                                         |
| Anhydrite                                            | 1.7                                  |                                           |                                             |
| Bassanite                                            | 0.4                                  | 1.7                                       | 2.5                                         |
| Gypsum                                               | 3.3                                  | 1.4                                       | 0.6                                         |
| Calcite <sup>2)</sup>                                | 1.1                                  |                                           | 3.6                                         |
| Quartz                                               |                                      | 1.7                                       | 1.4                                         |
| Mullite                                              |                                      | 0.7                                       | 0.2                                         |
| Amorphous / unassigned<br>minor phases <sup>3)</sup> | 38.2                                 | 23.7                                      | 25.9                                        |

<sup>1)</sup> Standard deviations in interlaboratory testing on CEM I cements were found to be in the order of 2.5 mass-% for alite, 1.5 mass-% for belite, 1 mass-% for aluminate and ferrate and 0.5 mass-% for the minor phases [2-4]. There is no such information available for blended cements. It can be assumed that the error is somewhat higher in the case of blended cements.

<sup>2)</sup> Thermogravimetric analysis:

sample 9941: 1.3 mass-% portlandite and 1.2 mass-% CO<sub>2</sub> (referring to 2.7 mass-% CaCO<sub>3</sub>)

sample 9944: 1.2 mass-% portlandite and 0.4 mass-% CO<sub>2</sub> (referring to 0.9 mass-% CaCO<sub>3</sub>)

sample 9945: 1.5 mass-% portlandite and 2.1 mass-% CO<sub>2</sub> (referring to 4.7 mass-% CaCO<sub>3</sub>)

<sup>3)</sup> The accuracy of the amount of amorphous and unassigned minor crystalline phases depends on the quality of the refinement and also especially on the background setting. It can be estimated to be at least  $\pm 5$  mass-%.

#### 4.3.3 Fly ash and silica fume

For the fly ash, figures 9 and 10 in the appendix show the comparison between experimental and simulated X-ray diffractograms and the TGA data, respectively. Figure 11 in the appendix shows the comparison between experimental and simulated X-ray diffractograms for the silica fume. TGA was not performed on this sample.

Table 5 shows the results of the phase quantification.

The fly ash shows the typical phase composition for a silicon-rich hard coal fly ash. In order to refine properly the peak shape of the quartz, two different quartz structures were used as fly ashes often contain two slightly different quartz populations (see [8] for details). The content of amorphous (including minor unidentified crystalline phases) is approximately 62 mass-%.

The silica fume is almost entirely X-ray amorphous. Traces of silicon carbide and quartz are present.

Table 5: Quantitative X-ray diffraction of fly ash and silica fume

| Phase<br>mass-%                        | Flygeaske<br>Fly ash<br>9946 | Silikastøv<br>Silica fume<br>9943 |
|----------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Quartz                                 | 14.6                         | 0.2                               |
| Mullite                                | 20.6                         |                                   |
| Hematite                               | 0.9                          |                                   |
| Magnetite                              | 2.0                          |                                   |
| Lime                                   | 0.1                          |                                   |
| Anhydrite                              | 0.2                          |                                   |
| Calcite                                | 0.1                          |                                   |
| C <sub>3</sub> S                       | 0.2                          |                                   |
| Moissanite 3C (SiC)                    |                              | 0.4                               |
| Amorphous / unassigned<br>minor phases | 61.2                         | 99.5                              |

## 5. Conclusions

Four different cements and two mineral additions (fly ash and silica fume) were investigated. The CEM I cement and the three CEM II cements show typical phase compositions. The accuracy of the refinement and the identification and quantification of minor phases could be improved by selective extraction procedures [4]. The quantitative determination of mineral additions in blended Portland cement could be improved if samples of the clinker and the mineral addition(s) would be available. The fly ash contains an amorphous content of approximately 61 mass-%. Quartz and mullite are the main crystalline phases. The silica fume is more than 99% amorphous and contains traces of quartz and silicon carbide.

## 6. References

- [1] Taylor H.F.W.: Modification of the Bogue calculation, *Advances in Cement Research* 2 (1989), 73–77.
- [2] Stutzman P., Leigh S.: Phase analysis of hydraulic cements by X-ray powder diffraction: precision, bias, and qualification, *Journal of ASTM International* 4 (2007), 1–11.

- [3] León-Reina L., de la Torre A.G., Porras-Vásquez J.M., Cruz M., Ordonez L.M., Alcobé X., Gispert-Guirado F., Larrañaga-Varga A., Paul M., Fuellmann T., Schmidt R., Aranda M.A.G.: Round robin on Rietveld quantitative phase analysis of Portland cements, *Journal Applied Crystallography* 42 (2009), 1–11.
- [4] Le Saoût G., Kocaba V., Scrivener K.: Application of the Rietveld method to the analysis of anhydrous cement, *Cement and Concrete Research* 41 (2011), 133–148.
- [5] Theisen K., Johansen V.: Prehydration and strength development of Portland cement, *American Ceramic Society Bulletin* 54 (1975), 787-791.
- [6] Sprung, S.: Effect of storage conditions on the properties of cement, *Zement-Kalk-Gips* 31 (1978), No. 6, 305–309.
- [7] Winnefeld F.: Influence of cement ageing and addition time on the performance of superplasticizers, *ZKG International* 61 (2008), No. 11, 68-77.
- [8] Williams R.P., van Riessen A.: Determination of the reactive component of fly ashes for geopolymer production using XRF and XRD, *Fuel* (89), 3683-3692.
- [9] Jansen D., Stabler C., Götz-Neunhoeffler F., Dittrich S., Neubauer J.: Does ordinary Portland cement contain amorphous phase? A quantitative study using an external standard method, *Powder Diffraction* 26 (2011), 31-38.

## 7. Appendix

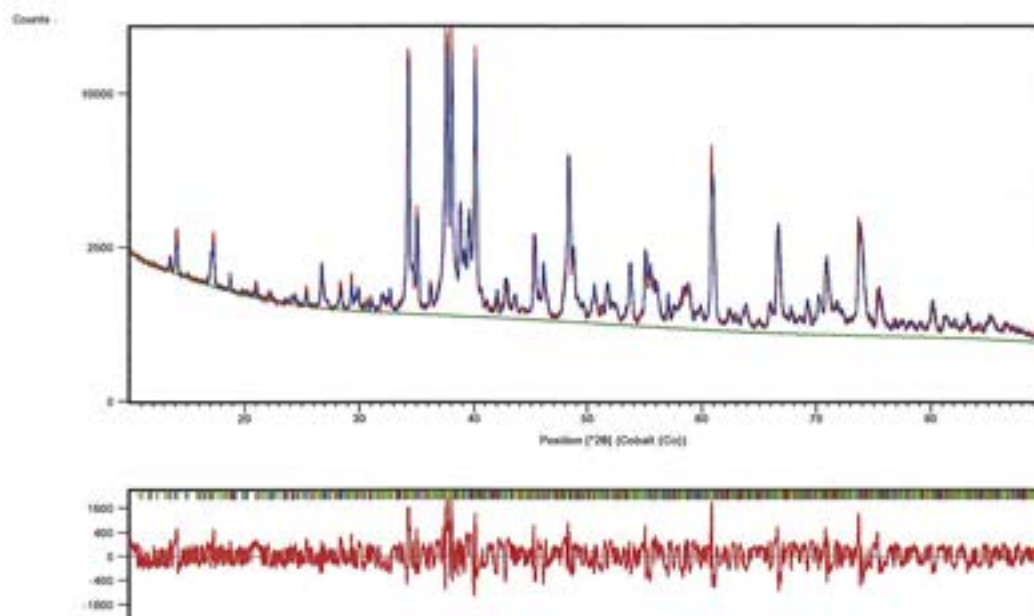


Figure 1: Comparison between measured (red) and simulated (blue) X-ray diffractogram and difference between measured and experimental data (below) of Aalborg Rapid CEM I (9942).

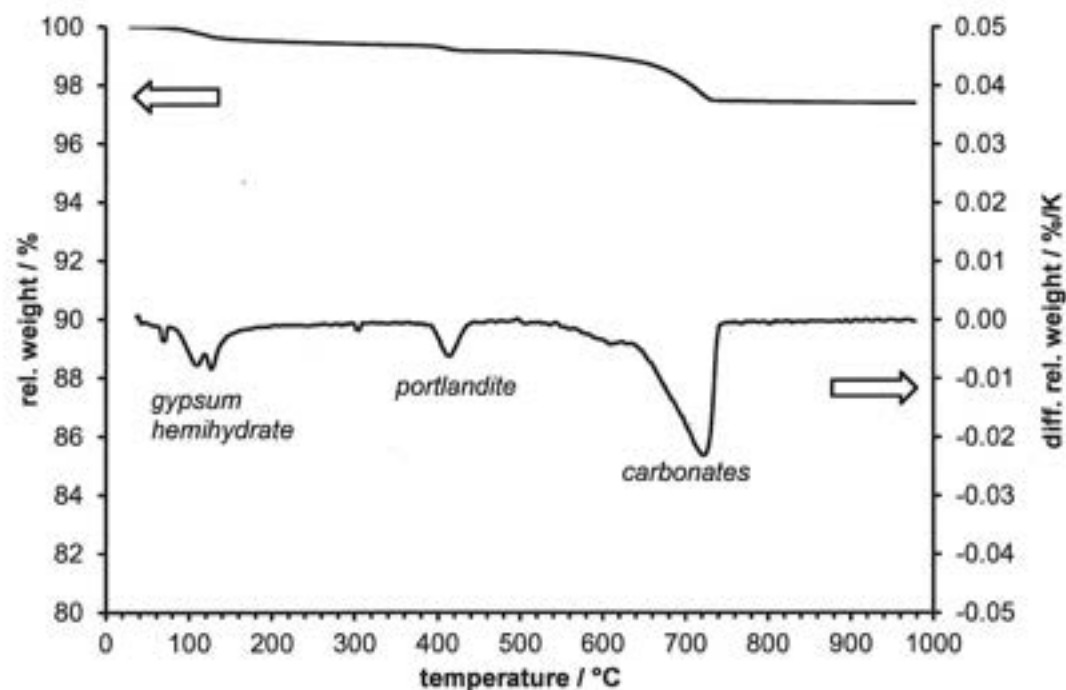


Figure 2: Thermogravimetric analysis of Aalborg Rapid CEM I (9942). The two small peaks at 60°C and at 300°C could not be assigned.

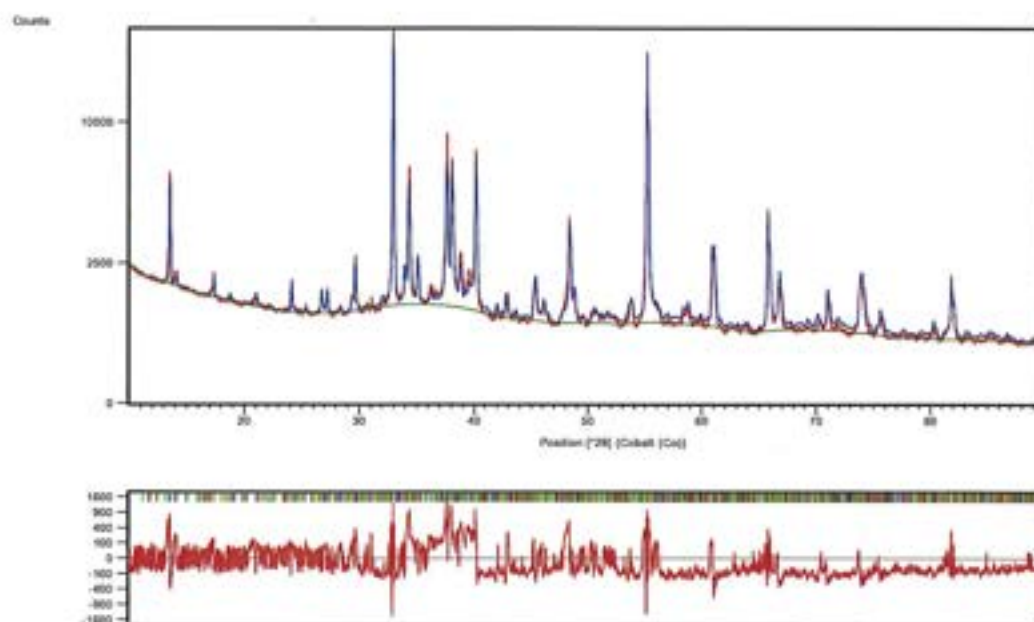


Figure 3: Comparison between measured (red) and simulated (blue) X-ray diffractogram and difference between measured and experimental data (below) of Cemex Miljø CEM II/B-S (9941) with 20% added  $\text{CaF}_2$ .

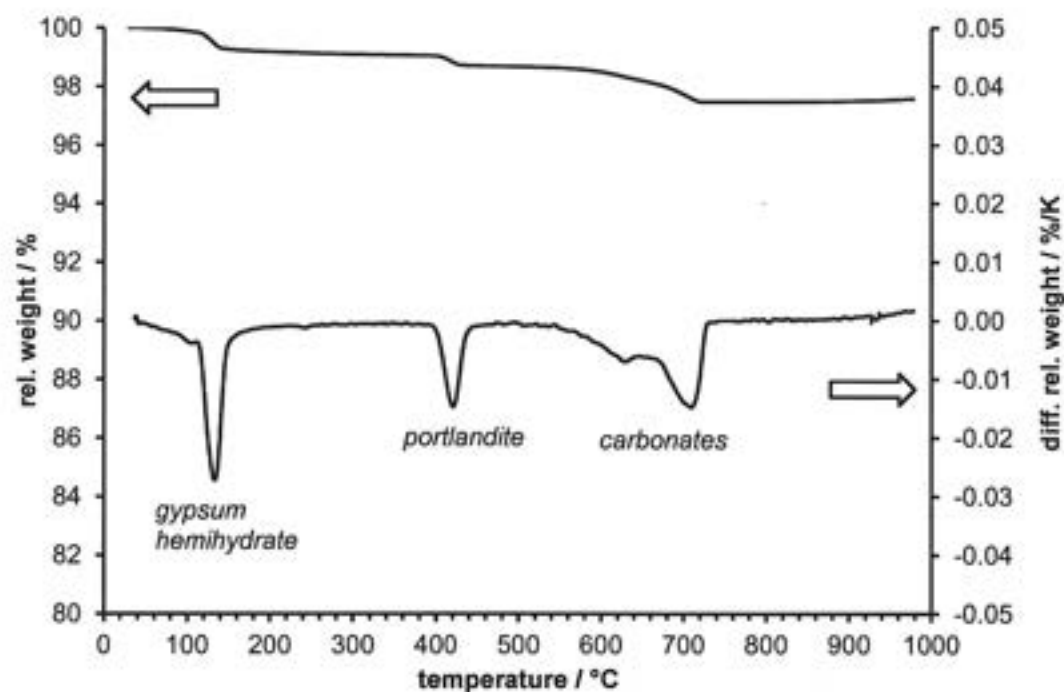


Figure 4: Thermogravimetric analysis of Cemex Miljø CEM II/B-S (9941).

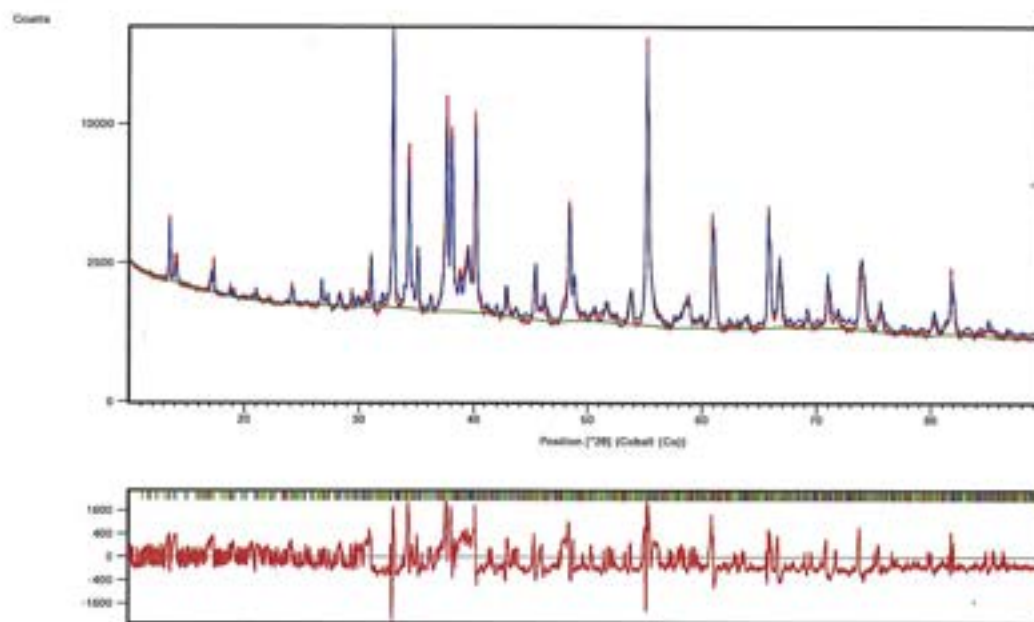


Figure 5: Comparison between measured (red) and simulated (blue) X-ray diffractogram and difference between measured and experimental data (below) of Norcem Anlegg FA CEM II/A-V (9944) with 20% added  $\text{CaF}_2$ .

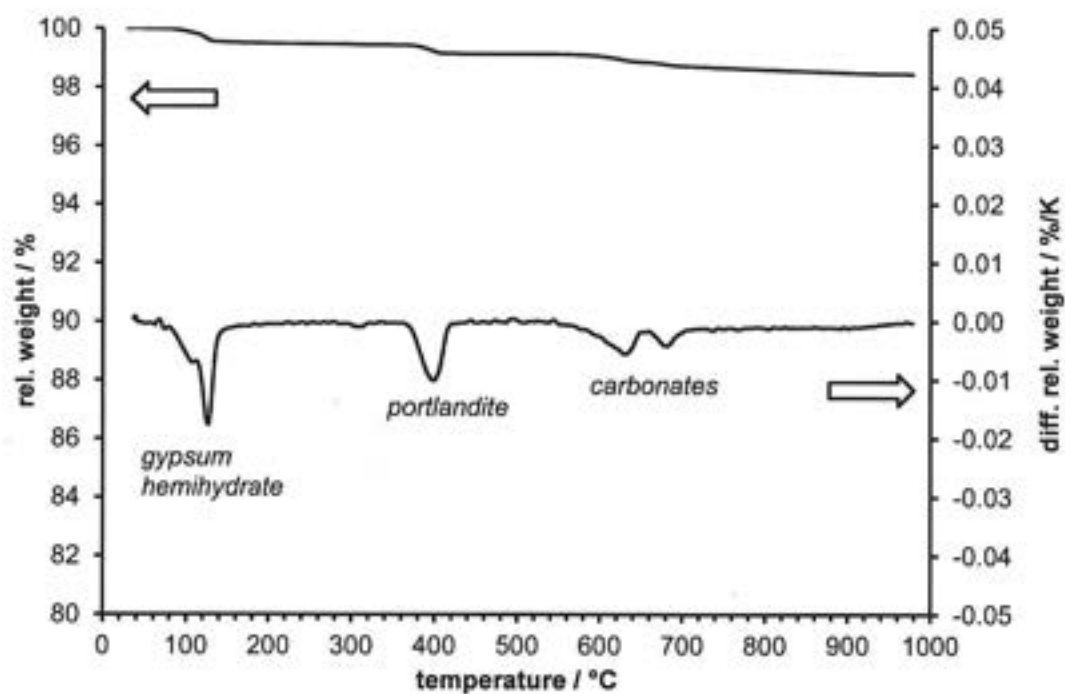


Figure 6: Thermogravimetric analysis of Norcem Anlegg FA CEM II/A-V (9944).

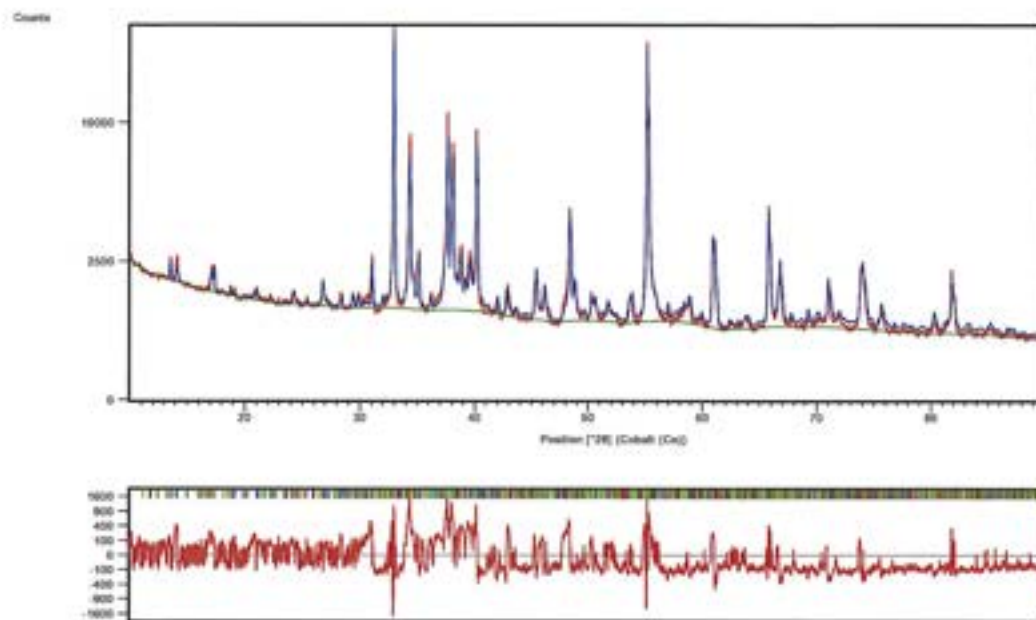


Figure 7: Comparison between measured (red) and simulated (blue) X-ray diffractogram and difference between measured and experimental data (below) of Norcem Standard FA CEM II/B-M (9945) with 20% added  $\text{CaF}_2$ .

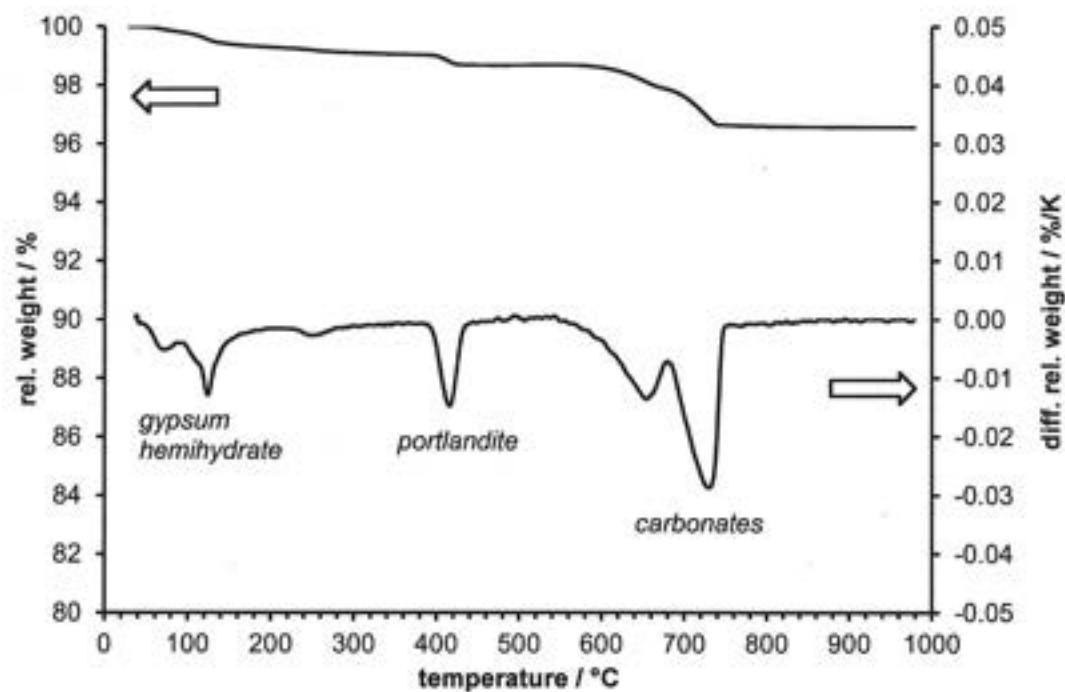


Figure 8: Thermogravimetric analysis of Norcem Standard FA CEM II/B-M (9945).

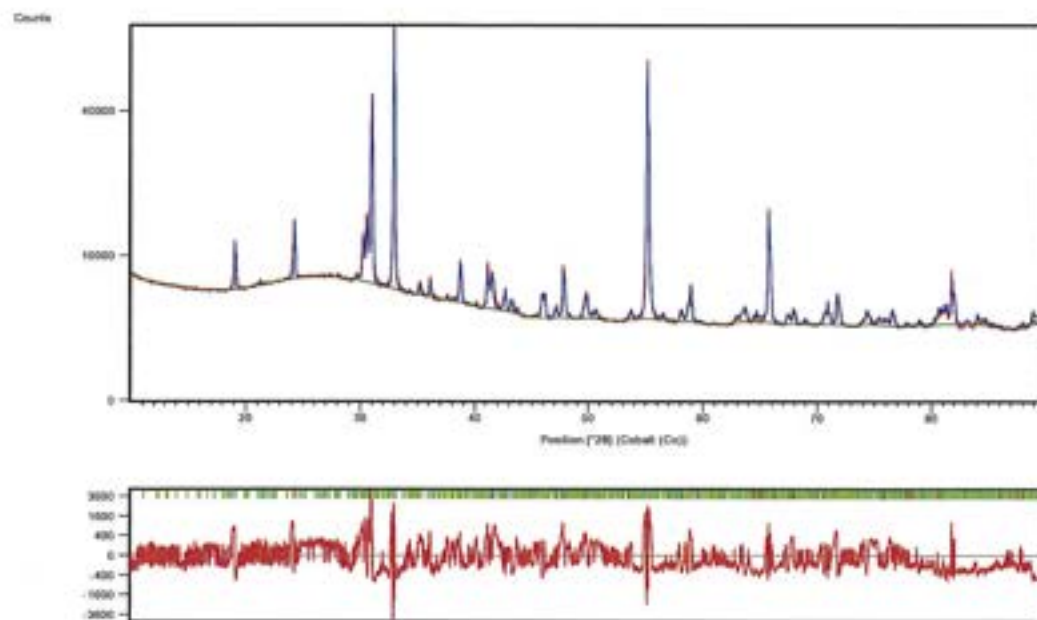


Figure 9: Comparison between measured (red) and simulated (blue) X-ray diffractogram and difference between measured and experimental data (below) of fly ash (9946) with 20% added  $\text{CaF}_2$ .

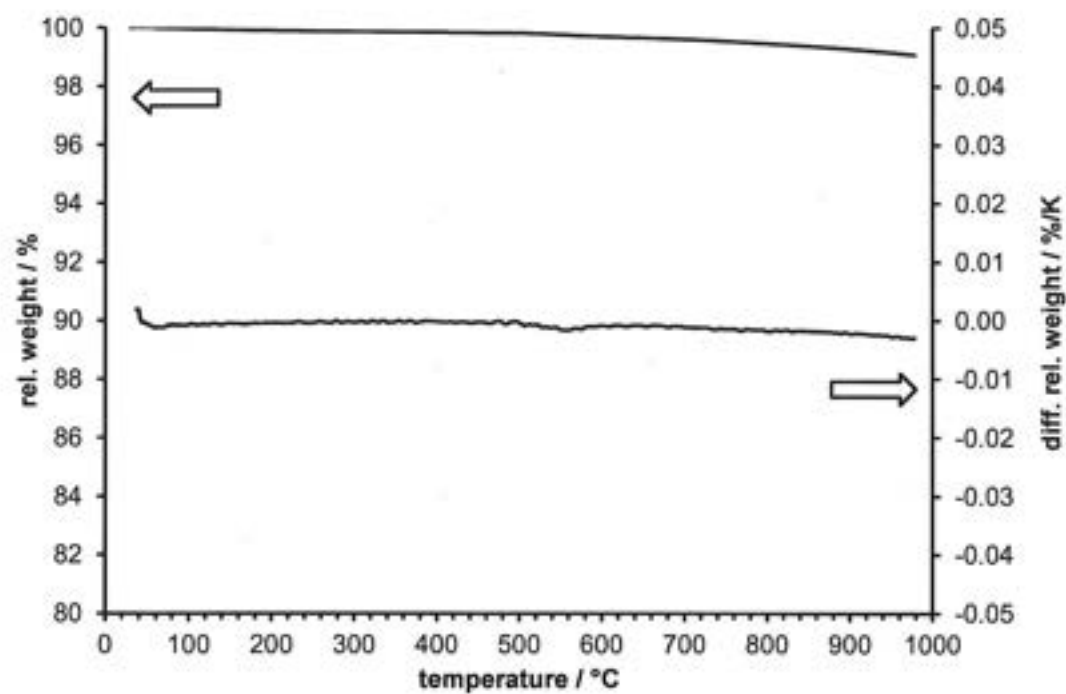


Figure 10: Thermogravimetric analysis of fly ash (9946).

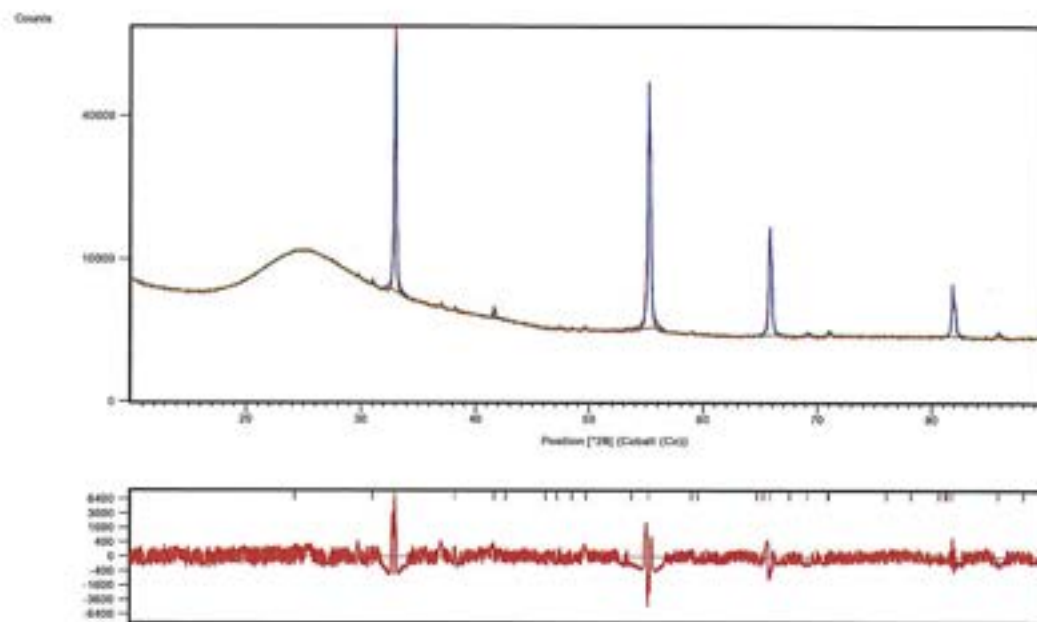


Figure 11: Comparison between measured (red) and simulated (blue) X-ray diffractogram and difference between measured and experimental data (below) of silica fume (9943) with 20% added  $\text{CaF}_2$ .

## Vedlegg 2 Sentrallab.-materialene: Kjemiske analyser og datablad

### PRØVNINGSRAPPORT

Oppdragsgiver: Dalen Fabrikker

Prøven merket: Anlegg FA sement til forsøksement, uttatt 23.01.14, Big Bag 1

Prøve kode: TF1-14

Ref:

#### KJEMISK ANALYSE EN 196-2

#### FYSIKALSK PRØVNING EN 196

|                                                   |  |         |
|---------------------------------------------------|--|---------|
| Glødetap                                          |  | 1.17 %  |
| Fri kalk                                          |  | 1.04 %  |
| Kalkmel                                           |  | - %     |
| Flyveaske                                         |  | 16.60 % |
| Klor total                                        |  | 0.03 %  |
| Krom vannløselig (Cr <sup>6+</sup> )              |  | 0.00 %  |
| Uoppløselig rest                                  |  | - %     |
| Farge                                             |  | - %     |
| Svovel trioksyd (SO <sub>3</sub> )                |  | 2.64 %  |
| Silika (SiO <sub>2</sub> )                        |  | 26.60 % |
| Aluminiumoksyd (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )  |  | 7.76 %  |
| Jernoksyd (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )       |  | 4.52 %  |
| Kalsiumoksyd (CaO)                                |  | 53.62 % |
| Magnesiumoksyd (MgO)                              |  | 1.76 %  |
| Fosfor pentoksyd (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) |  | 0.16 %  |
| Kaliumoksyd (K <sub>2</sub> O)                    |  | 0.72 %  |
| Natriumoksyd (Na <sub>2</sub> O)                  |  | 0.42 %  |
| Alkali                                            |  | 0.89 %  |

#### FINHET

|                             |        |                        |
|-----------------------------|--------|------------------------|
| Partikkelanalyse            | +90my  | 0 %                    |
| " "                         | +64my  | 1 %                    |
| " "                         | -24my  | 77.4 %                 |
| " "                         | -30 my | 85.2 %                 |
| Spesifikk overflate; Blaine |        | 387 m <sup>2</sup> /kg |
| Spesifikk vekt              |        | - g/cm <sub>3</sub>    |

#### NORMAL KONSISTENS

|           |        |
|-----------|--------|
| Vannbehov | 27.9 % |
|-----------|--------|

#### VOLUMBESTANDIGHET

|              |        |
|--------------|--------|
| Le Chatelier | 0.5 mm |
|--------------|--------|

#### BINDETIDER

|                  |          |
|------------------|----------|
| Størkning begynt | 175 min. |
|------------------|----------|

#### TRYKKFASTHET

|         |          |
|---------|----------|
| 1 døgn  | 16.5 MPa |
| 2 døgn  | 27.0 MPa |
| 7 døgn  | 41.4 MPa |
| 28 døgn | 58.3 MPa |

|              |       |
|--------------|-------|
| Falskbinding | INGEN |
|--------------|-------|

Norcem A.S Brevik, Sement- og betonglaboratoriet, 25. februar 2014

hq.

\_\_\_\_\_  
Laboratoriesjef

# PRØVNINGSRAPPORT

Oppdragsgiver: MB  
Prøven merket: Standard FA Norcem AS Brevik, CEM II /A-V 42.5 R  
Prøve kode: AZ9-14 Ref: 48/14

## KJEMISK ANALYSE EN 196-2

## FYSIKALSK PRØVNING EN 196

|                  |                                   |         |
|------------------|-----------------------------------|---------|
| Glødetap         |                                   | 2.44 %  |
| Flyveaske        |                                   | 17.90 % |
| Svovel trioksyd  | (SO <sub>3</sub> )                | 3.33 %  |
| Silika           | (SiO <sub>2</sub> )               | 25.97 % |
| Aluminiumoksyd   | (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 8.01 %  |
| Jernoksyd        | (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 3.99 %  |
| Kalsiumoksyd     | (CaO)                             | 51.77 % |
| Magnesiumoksyd   | (MgO)                             | 2.22 %  |
| Fosfor pentoksyd | (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )  | 0.22 %  |
| Kaliumoksyd      | (K <sub>2</sub> O)                | 1.14 %  |
| Natriumoksyd     | (Na <sub>2</sub> O)               | 0.49 %  |
| Alkali           |                                   | 1.24 %  |

### FINHET

|                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| Spesifikk overflate; Blaine | 501 m <sup>2</sup> /kg |
| Spesifikk vekt              | 3.04 g/cm <sup>3</sup> |

### NORMAL KONSISTENS

|           |        |
|-----------|--------|
| Vannbehov | 30.0 % |
|-----------|--------|

### VOLUMBESTANDIGHET

|              |        |
|--------------|--------|
| Le Chatelier | 1.0 mm |
|--------------|--------|

### BINDETIDER

|                  |          |
|------------------|----------|
| Størkning begynt | 127 min. |
|------------------|----------|

### TRYKKFASTHET

|         |          |
|---------|----------|
| 1 døgn  | 24.5 MPa |
| 2 døgn  | 33.8 MPa |
| 7 døgn  | 42.8 MPa |
| 28 døgn | 58.0 MPa |

Norcem A.S Brevik, Sement- og betonglaboratoriet, 29. januar 2015

kcs.

  
Laboratoriesjef

## NORCEM A.S

Address:  
Setreveien 2  
P.O.Box 38  
N-3991 Brevik

Phone: +47 35 57 20 00  
Telefax: +47 35 57 04 00

Ent.no:  
NO 934 949 145 VAT  
Bank account:  
6003 06 12488

Head Office:  
Lilleakerveien 2b  
P.O.Box 143 Lilleaker  
0216 Oslo V36

## PRØVNINGSRAPPORT

Oppdragsgiver: Knut Kjellsen  
Prøven merket: Flyveaske tatt ut fra silo 04.09.14

Prøve kode: LN6-14

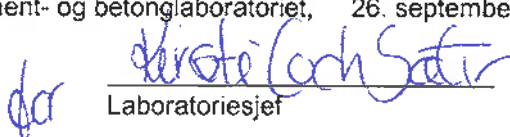
Ref: 79-14

### KJEMISK ANALYSE EN 196-2

|                      |                                   |                         |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Glødetap             |                                   | 2.41 %                  |
| Karbon               |                                   | 1.91 %                  |
| Svovel trioksyd      | (SO <sub>3</sub> )                | 0.42 %                  |
| Silika               | (SiO <sub>2</sub> )               | 53.27 %                 |
| Aluminiumoksyd       | (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 22.61 %                 |
| Jernoksyd            | (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 6.80 %                  |
| Kalsiumoksyd         | (CaO)                             | 5.72 %                  |
| Magnesiumoksyd       | (MgO)                             | 2.53 %                  |
| Fosfor pentoksyd     | (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )  | 0.576 %                 |
| Kaliumoksyd          | (K <sub>2</sub> O)                | 1.73 %                  |
| Natriumoksyd         | (Na <sub>2</sub> O)               | 0.91 %                  |
| Alkali               |                                   | 2.05 %                  |
| Partikkelanalyse     | +90my                             | 11.4 %                  |
| " "                  | +64my                             | 19.4 %                  |
| " "                  | -24my                             | 54.1 %                  |
| " "                  | -30 my                            | 59.9 %                  |
| Spesifikk overflate; | Blaine                            | 3351 m <sup>2</sup> /kg |
| Spesifikk vekt       |                                   | 2.38 g/cm <sub>3</sub>  |
| Litervekt løs        |                                   | 1.05 g/ml               |
| Litervekt stampet    |                                   | 1.11 g/ml               |

Norcem A.S Brevik, Sement- og betonglaboratoriet, 26. september 2014

kcs.

  
Laboratoriesjef

#### NORCEM A.S

Address:  
Setreuveien 2  
P.O.Box 38  
N-3991 Brevik

Phone: +47 35 57 20 00  
Telefax: +47 35 57 04 00

Ent.no:  
NO 934 949 145 VAT  
Bank account:  
6003 06 12488

Head Office:  
Lilleakerveien 2b  
P.O.Box 143 Lilleaker  
0216 Oslo V37

## PRØVNINGSRAPPORT

Oppdragsgiver: SKB  
Prøven merket: Flyveaske fra Brevik

Prøve kode: LN-2015-0004

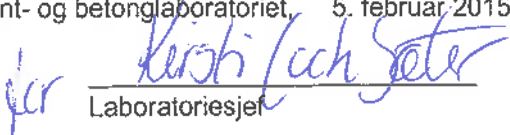
Ref: 106-14

### KJEMISK ANALYSE EN 196-2

|                  |                                   |                        |
|------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Glødetap         |                                   | 2.26 %                 |
| Karbon           |                                   | 1.98 %                 |
| Svovel trioksyd  | (SO <sub>3</sub> )                | 0.63 %                 |
| Silika           | (SiO <sub>2</sub> )               | 52.49 %                |
| Aluminiumoksyd   | (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 24.44 %                |
| Jernoksyd        | (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 7.64 %                 |
| Kalsiumoksyd     | (CaO)                             | 4.97 %                 |
| Magnesiumoksyd   | (MgO)                             | 1.66 %                 |
| Fosfor pentoksyd | (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )  | 0.93 %                 |
| Kaliumoksyd      | (K <sub>2</sub> O)                | 1.43 %                 |
| Natriumoksyd     | (Na <sub>2</sub> O)               | 0.62 %                 |
| Alkali           |                                   | 1.56 %                 |
| Partikkelanalyse | +90my                             | 2.3 %                  |
| " "              | +64my                             | 6.2 %                  |
| " "              | -24my                             | 65.9 %                 |
| " "              | -30 my                            | 72.8 %                 |
| Blaine           |                                   | 301 m <sup>2</sup> /kg |
| Sp.vekt          |                                   | 2.33 g/cm <sup>3</sup> |

kcs.

Norcem A.S Brevik, Sement- og betonglaboratoriet, 5. februar 2015

for   
Laboratoriesjef

#### NORCEM A.S

Address:  
Setrevelen 2  
P.O.Box 38  
N-3991 Brevik

Phone: +47 35 57 20 00  
Telefax: +47 35 57 04 00

Ent.no:  
NO 934 949 145 VAT  
Bank account:  
6003 06 12488

Head Office:  
Lilleakerveien 2b  
P.O.Box 143 Lilleaker  
0216 Oslo V38

## YDEEVNEDEKLARATION

Nr. 02 / Juli 2013

1. Byggevaretype:

**Portlandcement EN 197-1**

2. Byggevareidentifikation:

**RAPID<sup>®</sup> cement / RAPID<sup>®</sup> AALBORG CEMENT<sup>®</sup>**

**Portlandcement CEM I 52,5 N (LA)**

3. Byggevarens tilsigtede anvendelse(r):

Anvendes til fremstilling af beton, mørtel mv.

4. Fabrikantens navn og adresse:

Aalborg Portland A/S, Rørdalsvej 44, 9100 Aalborg

5. Navn og adresse på den bemyndigede repræsentant:

Ikke relevant

6. Systemerne for vurdering og kontrol af konstansen af byggevarens ydeevne (AVCP):

System 1+

7. Notificeret Organ's opgave:

Notificeret produktcertificeringsorgan Bureau Veritas Certification,  
Identifikationsnummer 0615 - har udført

bestemmelse af produkttyperne på grundlag af prøvning, prøveudtagning og den indledende inspektion af fabriksanlæggets produktionskontrol, den løbende overvågning, overensstemmelse og evaluering af fabrikkens produktionskontrol, og har udstedt overensstemmelsescertifikat/ydeevneerklæring.

Senest opdateret: 2013-06-30



## 8. Deklareret ydeevne

Alle egenskaber for Portlandcement CEM I 52,5 N (LA) iht. standarden er opfyldt.

| Egenskaber                 | Deklarerede værdier           | Krav i DS/EN 197-1                             |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
| 1-døgnsstyrke              | 19 - 25 MPa                   | Ingen                                          |
| 2-døgnsstyrke              | 30 - 38 MPa                   | $\geq 20$ MPa                                  |
| 7-døgnsstyrke              | 47 - 55 MPa                   | Ingen                                          |
| 28-døgnsstyrke             | 63 - 71 MPa                   | $\geq 52,5$ MPa                                |
| Begyndende afbinding       | 110 - 170 min                 | $\geq 45$ min                                  |
| Sulfat som SO <sub>3</sub> | 2,9 - 3,5 %                   | $\leq 4,0$ %                                   |
| Chlorid                    | $\leq 0,04$ %                 | $\leq 0,10$ %                                  |
| C <sub>3</sub> A           | $\leq 8$ %                    | Ingen                                          |
| Vandopløseligt chromat     | $\leq 2$ mg/kg                | $\leq 2$ mg/kg (Krav i EU Direktiv 2003/53/EC) |
| Absolut densitet           | 3090 - 3190 kg/m <sup>3</sup> | Ingen                                          |

For hver egenskab er angivet et variationsområde, som er fastlagt således, at sandsynligheden for, at en værdi falder udenfor, er mindre end 5 %.

9. Ydeevnen for den byggevare, der er anført i punkt 1 og 2, er i overensstemmelse med den deklarerede ydeevne i punkt 8.

Denne ydeevnedeklaration udstedes på eneansvar af den fabrikant, der er anført i punkt 4.

**Aalborg, den 30. juni 2013**

Underskrevet for og på vegne af producenten af:



Birgit Jensen, Kvalitets- og Arbejdsmiljøchef, Aalborg Portland A/S

| Væsentlig egenskab iht. DS/INF 135 | Deklareret værdi | Krav         |
|------------------------------------|------------------|--------------|
| Alkaliindhold                      | $\leq 0,6$ %     | $\leq 0,6$ % |

Senest opdateret: 2013-06-30



# Teknisk datablad

Januar, 2018

## MILJØSEMENT CEM II/B-S 52,5 N

Tilfredsstiller kravene ihht. EN 197-1: CEM II/B-S 52,5 N  
Produktet er sertifisert (CE-merket) ihht. EN 197-1 av VDZ, Tyskland.

### Typiske data:

| Kjemiske data      |                                   | vekt %   |
|--------------------|-----------------------------------|----------|
| Kalk               | (CaO)                             | 56       |
| Silisium           | (SiO <sub>2</sub> )               | 25       |
| Aluminium          | (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 6,3      |
| Jern               | (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 2,1      |
| Magnesium          | (MgO)                             | 4,0      |
| Sulfat             | (SO <sub>3</sub> )                | 3,1      |
| Kalium             | (K <sub>2</sub> O)                | 0,82     |
| Natrium            | (Na <sub>2</sub> O)               | 0,31     |
| Alkali ekv.        | (Na <sub>2</sub> Oekv)            | 0,85     |
| (C <sub>3</sub> A) |                                   | 5,3      |
| Glødetap           |                                   | 1,7      |
| Uløselig rest      |                                   | 0,6      |
| Vannnløslig klorid | (Cl <sup>-</sup> )                | 0,07     |
| Vannnløslig krom   | Cr <sup>(VI)</sup>                | <2 mg/kg |

| Fysiske data    |      |                        |
|-----------------|------|------------------------|
| Finhet (blaine) |      | 460 m <sup>2</sup> /kg |
| Densitet        |      | 3,06 g/cm <sup>3</sup> |
| Bulkdensitet    |      | 1,1g/cm <sup>3</sup>   |
| Andel slagg     |      | Ca 33%                 |
| Bindetid        |      | 170 min                |
| Ekspansjon      |      | 1,0 mm                 |
| Trykkfasthet    | 1 d  | 16 MPa                 |
|                 | 2 d  | 28 MPa                 |
|                 | 28 d | 59 MPa                 |



0840

CEMEX Zement GmbH  
Werk Rüdersdorf  
Frankfurter Chaussee  
15562 Rüdersdorf

0840-CPD-5510-221200-05  
EN 197-1  
CEM II/B-S 52,5 N



## Vedlegg 3 Betongproporsjonering og datablad tilslag

|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 1 (m=0.39, ANL-FA, 17% FA)                       |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Standard                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre                | Verdi   |                   |           |             |          |          |          |
|---------------------------------|---------|-------------------|-----------|-------------|----------|----------|----------|
| m = v/(c+Σkp)                   | 0,39    |                   |           |             |          |          |          |
| Luftinnhold                     | 4,0 %   |                   |           |             |          |          |          |
| Sementtype                      | Andel   | Andel klinker     | Andel FA  | Andel slagg | [kg/m³]  | Alkalier | Klorider |
| Norcem Anlegg FA                | 100,0 % | 83,0 %            | 17,0 %    | 0,0 %       | 2990     | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                                 | 0,0 %   | 100,0 %           | 0,0 %     | 0,0 %       | 1000     | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                                 | 0,0 %   | 100,0 %           | 0,0 %     | 0,0 %       | 1000     | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Tilsetningsmaterialer           | Type    | Andel (av b)      | k         | [kg/m³]     | Alkalier | Klorider |          |
| Elkem Microsilica               | Silika  | 4,0 %             | 2,0       | 2200        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
| Flyveaske (Norcem)              | FA      | 0,0 %             | 0,7       | 2300        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
|                                 | Slagg   | 0,0 %             | 0,6       | 1000        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
| Tilsetningsstoff                | % av b  | [kg/m³]           | Tørrstoff | [kg/m³] TS  | Alkalier | Klorider |          |
| Mapei Dynamon SX-23             | 0,4 %   | 1050              | 23,0 %    | 1261        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
| Mapeair 25 (1:9)                | 1,0 %   | 1000              | 0,4 %     | 1000        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
|                                 | 0,0 %   | 1000              | 100,0 %   | 1000        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
|                                 | 0,0 %   | 1000              | 100,0 %   | 1000        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
| Fiber                           | Vol %   | [kg/m3]           |           |             |          |          |          |
|                                 | 0,0 %   | 7800              |           |             |          |          |          |
|                                 | 0,0 %   | 1050              |           |             |          |          |          |
| Matriks                         | Verdi   | <div>Beregn</div> |           |             |          |          |          |
| Ønsket matriksvolum [l/m³]      | 353     |                   |           |             |          |          |          |
| Oppnådd matriksvolum [l/m³]     | 353     |                   |           |             |          |          |          |
| Klinkerandel i bindemiddel      | 79,7 %  |                   |           |             |          |          |          |
| Total FA- andel av bindemiddel  | 16,3 %  |                   |           |             |          |          |          |
| Total slaggandel av bindemiddel | 0,0 %   |                   |           |             |          |          |          |
| Volum sementlim [l/m³]          | 325,0   |                   |           |             |          |          |          |
| Effektivt vanninnhold [l/m³]    | 176,8   |                   |           |             |          |          |          |
| v/p                             | 0,35    |                   |           |             |          |          |          |
| Effektivt bindemiddel [kg/m³]   | 453     |                   |           |             |          |          |          |
| Totalt bindemiddel [kg/m³]      | 436     |                   |           |             |          |          |          |

Beregn



|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 2 (m=0.39, ANL-FA, 30% FA)                       |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Standard                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre                           | Verdi   |                      |            |                         |                      |          |          |
|--------------------------------------------|---------|----------------------|------------|-------------------------|----------------------|----------|----------|
| $m = v/(c+\Sigma kp)$                      | 0,39    |                      |            |                         |                      |          |          |
| Luftinnhold                                | 4,0 %   |                      |            |                         |                      |          |          |
| Sementtype                                 | Andel   | Andel klinker        | Andel FA   | Andel slagg             | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
| Norcem Anlegg FA                           | 100,0 % | 83,0 %               | 17,0 %     | 0,0 %                   | 2990                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                                            | 0,0 %   | 100,0 %              | 0,0 %      | 0,0 %                   | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                                            | 0,0 %   | 100,0 %              | 0,0 %      | 0,0 %                   | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Tilsetningsmaterialer                      | Type    | Andel (av b)         | k          | [kg/m <sup>3</sup> ]    | Alkalier             | Klorider |          |
| Elkem Microsilica                          | Silika  | 4,0 %                | 2,0        | 2200                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
| Flyveaske (Norcem)                         | FA      | 16,5 %               | 0,7        | 2300                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
|                                            | Slagg   | 0,0 %                | 0,6        | 1000                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
| Tilsetningsstoff                           | % av b  | [kg/m <sup>3</sup> ] | Tørrestoff | [kg/m <sup>3</sup> ] TS | Alkalier             | Klorider |          |
| Mapei Dynamon SX-23                        | 0,4 %   | 1050                 | 23,0 %     | 1261                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
| Mapeair 25 (1:9)                           | 2,0 %   | 1000                 | 0,4 %      | 1000                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
|                                            | 0,0 %   | 1000                 | 100,0 %    | 1000                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
|                                            | 0,0 %   | 1000                 | 100,0 %    | 1000                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
| Fiber                                      | Vol %   | [kg/m3]              |            |                         |                      |          |          |
|                                            | 0,0 %   | 7800                 |            |                         |                      |          |          |
|                                            | 0,0 %   | 1050                 |            |                         |                      |          |          |
| Matriks                                    | Verdi   |                      |            |                         |                      |          |          |
| Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]    | 353     |                      |            |                         |                      |          |          |
| Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]   | 353     |                      |            |                         |                      |          |          |
| Klinkerandel i bindemiddel                 | 66,0 %  |                      |            |                         |                      |          |          |
| Total FA- andel av bindemiddel             | 30,0 %  |                      |            |                         |                      |          |          |
| Total slaggandel av bindemiddel            | 0,0 %   |                      |            |                         |                      |          |          |
| Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]        | 325,0   |                      |            |                         |                      |          |          |
| Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]  | 169,0   |                      |            |                         |                      |          |          |
| v/p                                        | 0,33    |                      |            |                         |                      |          |          |
| Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ] | 433     |                      |            |                         |                      |          |          |
| Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]    | 437     |                      |            |                         |                      |          |          |

Beregn

Beregn



|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 3 (m=0.39, STD-FA, 18% FA)                       |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Standard                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre                           | Verdi   |                      |           |                         |                      |          |          |
|--------------------------------------------|---------|----------------------|-----------|-------------------------|----------------------|----------|----------|
| m = v/(c+Σkp)                              | 0,39    |                      |           |                         |                      |          |          |
| Luftinnhold                                | 4,0 %   |                      |           |                         |                      |          |          |
| Sementtype                                 | Andel   | Andel klinker        | Andel FA  | Andel slagg             | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
| Norcem Standard FA                         | 100,0 % | 82,0 %               | 18,0 %    | 0,0 %                   | 2990                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                                            | 0,0 %   | 100,0 %              | 0,0 %     | 0,0 %                   | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                                            | 0,0 %   | 100,0 %              | 0,0 %     | 0,0 %                   | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Tilsetningsmaterialer                      | Type    | Andel (av b)         | k         | [kg/m <sup>3</sup> ]    | Alkalier             | Klorider |          |
| Elkem Microsilica                          | Silika  | 4,0 %                | 2,0       | 2200                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
| Flyveaske (Norcem)                         | FA      | 0,0 %                | 0,7       | 2300                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
|                                            | Slagg   | 0,0 %                | 0,6       | 1000                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
| Tilsetningsstoff                           | % av b  | [kg/m <sup>3</sup> ] | Tørrstoff | [kg/m <sup>3</sup> ] TS | Alkalier             | Klorider |          |
| Mapei Dynamon SX-23                        | 0,4 %   | 1050                 | 23,0 %    | 1261                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
| Mapeair 25 (1:9)                           | 1,0 %   | 1000                 | 0,4 %     | 1000                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
|                                            | 0,0 %   | 1000                 | 100,0 %   | 1000                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
|                                            | 0,0 %   | 1000                 | 100,0 %   | 1000                    | 0,0 %                | 0,0 %    |          |
| Fiber                                      | Vol %   | [kg/m3]              |           |                         |                      |          |          |
|                                            | 0,0 %   | 7800                 |           |                         |                      |          |          |
|                                            | 0,0 %   | 1050                 |           |                         |                      |          |          |
| Matriks                                    | Verdi   | <div>Beregn</div>    |           |                         |                      |          |          |
| Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]    | 353     |                      |           |                         |                      |          |          |
| Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]   | 353     |                      |           |                         |                      |          |          |
| Klinkerandel i bindemiddel                 | 78,7 %  |                      |           |                         |                      |          |          |
| Total FA- andel av bindemiddel             | 17,3 %  |                      |           |                         |                      |          |          |
| Total slaggeandel av bindemiddel           | 0,0 %   |                      |           |                         |                      |          |          |
| Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]        | 325,0   |                      |           |                         |                      |          |          |
| Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]  | 176,8   |                      |           |                         |                      |          |          |
| v/p                                        | 0,35    |                      |           |                         |                      |          |          |
| Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ] | 453     |                      |           |                         |                      |          |          |
| Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]    | 436     |                      |           |                         |                      |          |          |

Beregn



|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 4 (m=0.39, STD-FA, 30% FA)                       |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Standard                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre      | Verdi |
|-----------------------|-------|
| $m = v/(c+\Sigma kp)$ | 0,39  |
| Luftinnhold           | 4,0 % |

| Sementtype         | Andel   | Andel klinker | Andel FA | Andel slagg | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|--------------------|---------|---------------|----------|-------------|----------------------|----------|----------|
| Norcem Standard FA | 100,0 % | 82,0 %        | 18,0 %   | 0,0 %       | 2990                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                    | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                    | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsmaterialer | Type   | Andel (av b) | k   | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|-----------------------|--------|--------------|-----|----------------------|----------|----------|
| Elkem Microsilica     | Silika | 4,0 %        | 2,0 | 2200                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Flyveaske (Norcem)    | FA     | 15,5 %       | 0,7 | 2300                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                       | Slagg  | 0,0 %        | 0,6 | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsstoff    | % av b | [kg/m <sup>3</sup> ] | Tørrstoff | [kg/m <sup>3</sup> ] TS | Alkalier | Klorider |
|---------------------|--------|----------------------|-----------|-------------------------|----------|----------|
| Mapei Dynamon SX-23 | 0,4 %  | 1050                 | 23,0 %    | 1261                    | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Mapeair 25 (1:9)    | 2,0 %  | 1000                 | 0,4 %     | 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 <sup>3</sup> ] |
|-------|-------|----------------------|
|       | 0,0 % | 7800                 |
|       | 0,0 % | 1050                 |

| Matriks                                    | Verdi  |
|--------------------------------------------|--------|
| Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]    | 353    |
| Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]   | 353    |
| Klinkerandel i bindemiddel                 | 66,0 % |
| Total FA- andel av bindemiddel             | 30,0 % |
| Total slaggandel av bindemiddel            | 0,0 %  |
| Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]        | 325,0  |
| Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]  | 169,5  |
| v/p                                        | 0,33   |
| Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ] | 435    |
| Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]    | 437    |

Beregn



|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 5 (m=0.39, Aalb., 14% FA)                        |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Standard                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre      | Verdi |
|-----------------------|-------|
| $m = v/(c+\Sigma kp)$ | 0,39  |
| Luftinnhold           | 4,0 % |

| Sementtype    | Andel   | Andel klinker | Andel FA | Andel slagg | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|---------------|---------|---------------|----------|-------------|----------------------|----------|----------|
| Aalborg Rapid | 100,0 % | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 3160                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|               | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|               | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsmaterialer | Type   | Andel (av b) | k   | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|-----------------------|--------|--------------|-----|----------------------|----------|----------|
| Elkem Microsilica     | Silika | 4,0 %        | 2,0 | 2200                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Flyveaske (Norcem)    | FA     | 14,0 %       | 0,7 | 2300                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                       | Slagg  | 0,0 %        | 0,6 | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsstoff    | % av b | [kg/m <sup>3</sup> ] | Tørrstoff | [kg/m <sup>3</sup> ] TS | Alkalier | Klorider |
|---------------------|--------|----------------------|-----------|-------------------------|----------|----------|
| Mapei Dynamon SX-23 | 0,5 %  | 1050                 | 23,0 %    | 1261                    | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Mapeair 25 (1:9)    | 0,8 %  | 1000                 | 0,4 %     | 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 <sup>3</sup> ] |
|-------|-------|----------------------|
|       | 0,0 % | 7800                 |
|       | 0,0 % | 1050                 |

| Matriks                                    | Verdi  |
|--------------------------------------------|--------|
| Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]    | 353    |
| Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]   | 353    |
| Klinkerandel i bindemiddel                 | 82,0 % |
| Total FA- andel av bindemiddel             | 14,0 % |
| Total slaggandel av bindemiddel            | 0,0 %  |
| Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]        | 325,0  |
| Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]  | 173,6  |
| v/p                                        | 0,33   |
| Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ] | 445    |
| Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]    | 446    |

Beregn



|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 6 (m=0.39, Aalb., 20% FA)                        |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Standard                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre      | Verdi |
|-----------------------|-------|
| $m = v/(c+\Sigma kp)$ | 0,39  |
| Luftinnhold           | 4,0 % |

| Sementtype    | Andel   | Andel klinker | Andel FA | Andel slagg | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|---------------|---------|---------------|----------|-------------|----------------------|----------|----------|
| Aalborg Rapid | 100,0 % | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 3160                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|               | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|               | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsmaterialer | Type   | Andel (av b) | k   | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|-----------------------|--------|--------------|-----|----------------------|----------|----------|
| Elkem Microsilica     | Silika | 4,0 %        | 2,0 | 2200                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Flyveaske (Norcem)    | FA     | 20,0 %       | 0,7 | 2300                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                       | Slagg  | 0,0 %        | 0,6 | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsstoff    | % av b | [kg/m <sup>3</sup> ] | Tørrstoff | [kg/m <sup>3</sup> ] TS | Alkalier | Klorider |
|---------------------|--------|----------------------|-----------|-------------------------|----------|----------|
| Mapei Dynamon SX-23 | 0,5 %  | 1050                 | 23,0 %    | 1261                    | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Mapeair 25 (1:9)    | 0,8 %  | 1000                 | 0,4 %     | 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 <sup>3</sup> ] |
|-------|-------|----------------------|
|       | 0,0 % | 7800                 |
|       | 0,0 % | 1050                 |

| Matriks                                    | Verdi  |
|--------------------------------------------|--------|
| Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]    | 353    |
| Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]   | 353    |
| Klinkerandel i bindemiddel                 | 76,0 % |
| Total FA- andel av bindemiddel             | 20,0 % |
| Total slaggandel av bindemiddel            | 0,0 %  |
| Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]        | 325,0  |
| Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]  | 170,5  |
| v/p                                        | 0,33   |
| Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ] | 437    |
| Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]    | 446    |

Beregn



|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 7 (m=0.39, Aalb., 30% FA)                        |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Standard                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre      | Verdi |
|-----------------------|-------|
| $m = v/(c+\Sigma kp)$ | 0,39  |
| Luftinnhold           | 4,0 % |

| Sementtype    | Andel   | Andel klinker | Andel FA | Andel slagg | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|---------------|---------|---------------|----------|-------------|----------------------|----------|----------|
| Aalborg Rapid | 100,0 % | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 3160                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|               | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|               | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsmaterialer | Type   | Andel (av b) | k   | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|-----------------------|--------|--------------|-----|----------------------|----------|----------|
| Elkem Microsilica     | Silika | 4,0 %        | 2,0 | 2200                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Flyveaske (Norcem)    | FA     | 30,0 %       | 0,7 | 2300                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                       | Slagg  | 0,0 %        | 0,6 | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsstoff    | % av b | [kg/m <sup>3</sup> ] | Tørrstoff | [kg/m <sup>3</sup> TS] | Alkalier | Klorider |
|---------------------|--------|----------------------|-----------|------------------------|----------|----------|
| Mapei Dynamon SX-23 | 0,5 %  | 1050                 | 23,0 %    | 1261                   | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Mapeair 25 (1:9)    | 1,7 %  | 1000                 | 0,4 %     | 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 <sup>3</sup> ] |
|-------|-------|----------------------|
|       | 0,0 % | 7800                 |
|       | 0,0 % | 1050                 |

| Matriks                                    | Verdi  |
|--------------------------------------------|--------|
| Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]    | 353    |
| Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]   | 353    |
| Klinkerandel i bindemiddel                 | 66,0 % |
| Total FA- andel av bindemiddel             | 30,0 % |
| Total slaggandel av bindemiddel            | 0,0 %  |
| Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]        | 325,0  |
| Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]  | 165,2  |
| v/p                                        | 0,32   |
| Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ] | 424    |
| Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]    | 446    |

Beregn



|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 8 (m=0.39, Cemex Miljø)                          |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Standard                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre                | Verdi   |                   |           |             |          |          |          |
|---------------------------------|---------|-------------------|-----------|-------------|----------|----------|----------|
| $m = v/(c+\Sigma kp)$           | 0,39    |                   |           |             |          |          |          |
| Luftinnhold                     | 4,0 %   |                   |           |             |          |          |          |
| Sementtype                      | Andel   | Andel klinker     | Andel FA  | Andel slagg | [kg/m³]  | Alkalier | Klorider |
| Cemex Miljøsement               | 100,0 % | 67,0 %            | 0,0 %     | 33,0 %      | 3060     | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                                 | 0,0 %   | 100,0 %           | 0,0 %     | 0,0 %       | 1000     | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                                 | 0,0 %   | 100,0 %           | 0,0 %     | 0,0 %       | 1000     | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Tilsetningsmaterialer           | Type    | Andel (av b)      | k         | [kg/m³]     | Alkalier | Klorider |          |
| Elkem Microsilica               | Silika  | 4,0 %             | 2,0       | 2200        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
| Flyveaske (Norcem)              | FA      | 0,0 %             | 0,7       | 2300        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
|                                 | Slagg   | 0,0 %             | 0,6       | 1000        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
| Tilsetningsstoff                | % av b  | [kg/m³]           | Tørrstoff | [kg/m³] TS  | Alkalier | Klorider |          |
| Mapei Dynamon SX-23             | 0,3 %   | 1050              | 23,0 %    | 1261        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
| Mapeair 25 (1:9)                | 0,6 %   | 1000              | 0,4 %     | 1000        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
|                                 | 0,0 %   | 1000              | 100,0 %   | 1000        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
|                                 | 0,0 %   | 1000              | 100,0 %   | 1000        | 0,0 %    | 0,0 %    |          |
| Fiber                           | Vol %   | [kg/m3]           |           |             |          |          |          |
|                                 | 0,0 %   | 7800              |           |             |          |          |          |
|                                 | 0,0 %   | 1050              |           |             |          |          |          |
| Matriks                         | Verdi   | <div>Beregn</div> |           |             |          |          |          |
| Ønsket matriksvolum [l/m³]      | 353     |                   |           |             |          |          |          |
| Oppnådd matriksvolum [l/m³]     | 353     |                   |           |             |          |          |          |
| Klinkerandel i bindemiddel      | 64,3 %  |                   |           |             |          |          |          |
| Total FA- andel av bindemiddel  | 0,0 %   |                   |           |             |          |          |          |
| Total slaggandel av bindemiddel | 31,7 %  |                   |           |             |          |          |          |
| Volum sementlim [l/m³]          | 325,0   |                   |           |             |          |          |          |
| Effektivt vanninnhold [l/m³]    | 178,6   |                   |           |             |          |          |          |
| v/p                             | 0,35    |                   |           |             |          |          |          |
| Effektivt bindemiddel [kg/m³]   | 458     |                   |           |             |          |          |          |
| Totalt bindemiddel [kg/m³]      | 440     |                   |           |             |          |          |          |

Beregn



|                           |                                                         |
|---------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Prosjekt</b>           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| <b>Reseptnummer</b>       | Resept 9 (m=0.44, ANL-FA, 40% FA)                       |
| <b>Tilsiktet kvalitet</b> | SV-Lavvarme                                             |
| <b>Utført av</b>          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| <b>Dato</b>               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre    | Verdi |
|---------------------|-------|
| $m = v/(c+\sum kp)$ | 0,44  |
| Luftinnhold         | 4,0 % |

| Sementtype       | Andel   | Andel klinker | Andel FA | Andel slagg | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|------------------|---------|---------------|----------|-------------|----------------------|----------|----------|
| Norcem Anlegg FA | 100,0 % | 83,0 %        | 17,0 %   | 0,0 %       | 2990                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                  | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                  | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsmaterialer | Type   | Andel (av b) | k   | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|-----------------------|--------|--------------|-----|----------------------|----------|----------|
| Elkem Microsilica     | Silika | 4,0 %        | 2,0 | 2200                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Flyveaske (Norcem)    | FA     | 28,5 %       | 0,7 | 2300                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                       | Slagg  | 0,0 %        | 0,6 | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsstoff    | % av b | [kg/m <sup>3</sup> ] | Tørrstoff | [kg/m <sup>3</sup> ] TS | Alkalier | Klorider |
|---------------------|--------|----------------------|-----------|-------------------------|----------|----------|
| Mapei Dynamon SX-23 | 0,4 %  | 1050                 | 23,0 %    | 1261                    | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Mapeair 25 (1:9)    | 2,5 %  | 1000                 | 0,4 %     | 1000                    | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                     | 0,0 %  | 1000                 | 100,0 %   | 1000                    | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                     | 0,0 %  | 1000                 | 100,0 %   | 1000                    | 0,0 %    | 0,0 %    |

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

| Matriks                                    | Verdi  |
|--------------------------------------------|--------|
| Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]    | 353    |
| Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]   | 353    |
| Klinkerandel i bindemiddel                 | 56,0 % |
| Total FA- andel av bindemiddel             | 40,0 % |
| Total slaggandel av bindemiddel            | 0,0 %  |
| Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]        | 325,0  |
| Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]  | 173,1  |
| v/p                                        | 0,36   |
| Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ] | 393    |
| Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]    | 412    |

Beregn

|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 9 (m=0.44, ANL-FA, 40% FA)                       |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Lavvarme                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

|                                            |      |
|--------------------------------------------|------|
| Masseforhold                               | 0,44 |
| Matriksvolum (l/m <sup>3</sup> )           | 353  |
| Volum sementlim (l/m <sup>3</sup> )        | 325  |
| Tilsiktet luftinnhold (%)                  | 4,0  |
| Effektivt bindemiddel (kg/m <sup>3</sup> ) | 393  |

"Oppnådd" lik "Ønsket"; Ctrl+N

Nullstill volumkorleksjon; Ctrl+K

### Proporsjonert betong

| Materialer                             | kg/m <sup>3</sup> | Ønsket<br>kg | Oppnådd<br>kg |
|----------------------------------------|-------------------|--------------|---------------|
| Norcem Anlegg FA                       | 277,9             | 277,9        | 277,9         |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Elkem Microsilica                      | 16,6              | 16,6         | 16,6          |
| Flyveaske (Norcem)                     | 117,6             | 117,6        | 117,6         |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Fritt vann                             | 173,1             | 173,1        | 173,1         |
| Absorbert vann                         | 5,9               | 5,9          | 5,9           |
| Årdal sand 0/8                         | 902,2             | 902,2        | 902,2         |
| Årdal 0/2 mm nat. vask                 | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Årdal stein 8/16                       | 802,5             | 802,5        | 802,5         |
| Årdal 16/22 mm                         | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Mapei Dynamon SX-23                    | 1,65              | 1,65         | 1,60          |
| Mapeair 25 (1:9)                       | 10,30             | 10,30        | 10,30         |
|                                        | 0,00              | 0,00         | 0,00          |
|                                        | 0,00              | 0,00         | 0,00          |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> ) | 2296              |              |               |

### Fersk betong

| Egenskap                                 |        |
|------------------------------------------|--------|
| Ønsket volum (l)                         | 1000,0 |
| Innveid volum (l)                        | 1000,0 |
| Målt luftinnhold (%)                     | 5,2    |
| Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> ) | 2285   |
| Effektivt v/(c+Σkp)                      | 0,440  |

### Aggressiver

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| Kloridinnhold [% av b]        | 0,00 % |
| Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ] | 0,00   |
| Andel reakt. bergarter [%]    | 0,0    |



### Volumkorleksjon

| korr.luft | korr.dens | Korrigert |
|-----------|-----------|-----------|
| -3,4      | 2,0       | 276,5     |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| -0,2      | 0,1       | 16,5      |
| -1,4      | 0,9       | 117,0     |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| -2,1      | 1,3       | 172,2     |
| -0,1      | 0,0       | 5,9       |
| -11,0     | 6,6       | 897,9     |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| -9,7      | 5,9       | 798,6     |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 1,59      |
| -0,1      | 0,1       | 10,25     |
| 0,0       | 0,0       | 0,00      |
| 0,0       | 0,0       | 0,00      |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| -28,0     | 16,9      | 2285      |

|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 10 (m=0.44, STD-FA, 40% FA)                      |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Lavvarme                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre      | Verdi |
|-----------------------|-------|
| $m = v/(c+\Sigma kp)$ | 0,44  |
| Luftinnhold           | 4,0 % |

| Sementtype         | Andel   | Andel klinker | Andel FA | Andel slagg | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|--------------------|---------|---------------|----------|-------------|----------------------|----------|----------|
| Norcem Standard FA | 100,0 % | 82,0 %        | 18,0 %   | 0,0 %       | 2990                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                    | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                    | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsmaterialer | Type   | Andel (av b) | k   | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|-----------------------|--------|--------------|-----|----------------------|----------|----------|
| Elkem Microsilica     | Silika | 4,0 %        | 2,0 | 2200                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Flyveaske (Norcem)    | FA     | 27,7 %       | 0,7 | 2300                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                       | Slagg  | 0,0 %        | 0,6 | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsstoff    | % av b | [kg/m <sup>3</sup> ] | Tørrstoff | [kg/m <sup>3</sup> ] TS | Alkalier | Klorider |
|---------------------|--------|----------------------|-----------|-------------------------|----------|----------|
| Mapei Dynamon SX-23 | 0,4 %  | 1050                 | 23,0 %    | 1261                    | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Mapeair 25 (1:9)    | 2,5 %  | 1000                 | 0,4 %     | 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 <sup>3</sup> ] |
|-------|-------|----------------------|
|       | 0,0 % | 7800                 |
|       | 0,0 % | 1050                 |

| Matriks                                    | Verdi  |
|--------------------------------------------|--------|
| Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]    | 353    |
| Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]   | 353    |
| Klinkerandel i bindemiddel                 | 56,0 % |
| Total FA- andel av bindemiddel             | 40,0 % |
| Total slaggandel av bindemiddel            | 0,0 %  |
| Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]        | 325,0  |
| Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]  | 173,5  |
| v/p                                        | 0,36   |
| Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ] | 394    |
| Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]    | 412    |

Beregn

|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 10 (m=0.44, STD-FA, 40% FA)                      |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Lavvarme                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

|                                            |      |
|--------------------------------------------|------|
| Masseforhold                               | 0,44 |
| Matriksvolum (l/m <sup>3</sup> )           | 353  |
| Volum sementlim (l/m <sup>3</sup> )        | 325  |
| Tilsiktet luftinnhold (%)                  | 4,0  |
| Effektivt bindemiddel (kg/m <sup>3</sup> ) | 394  |

"Oppnådd" lik "Ønsket"; Ctrl+N

Nullstill volumkorleksjon; Ctrl+K

### Proporsjonert betong

| Materialer                             | kg/m <sup>3</sup> | Ønsket<br>kg | Oppnådd<br>kg |
|----------------------------------------|-------------------|--------------|---------------|
| Norcem Standard FA                     | 281,2             | 281,2        | 281,2         |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Elkem Microsilica                      | 16,6              | 16,6         | 16,6          |
| Flyveaske (Norcem)                     | 114,2             | 114,2        | 114,2         |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Fritt vann                             | 173,5             | 173,5        | 173,5         |
| Absorbert vann                         | 5,9               | 5,9          | 5,9           |
| Årdal sand 0/8                         | 902,2             | 902,2        | 902,2         |
| Årdal 0/2 mm nat. vask                 | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Årdal stein 8/16                       | 802,5             | 802,5        | 802,5         |
| Årdal 16/22 mm                         | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Mapei Dynamon SX-23                    | 1,65              | 1,65         | 1,60          |
| Mapeair 25 (1:9)                       | 10,30             | 10,30        | 4,70          |
|                                        | 0,00              | 0,00         | 0,00          |
|                                        | 0,00              | 0,00         | 0,00          |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
|                                        | 0,0               | 0,0          | 0,0           |
| Prop. betongdens. (kg/m <sup>3</sup> ) | 2296              |              |               |

### Fersk betong

| Egenskap                                 |        |
|------------------------------------------|--------|
| Ønsket volum (l)                         | 1000,0 |
| Innveid volum (l)                        | 994,1  |
| Målt luftinnhold (%)                     | 5,0    |
| Målt betongdensitet (kg/m <sup>3</sup> ) | 2284   |
| Effektivt v/(c+Σkp)                      | 0,426  |

### Aggressiver

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| Kloridinnhold [% av b]        | 0,00 % |
| Alkalier [kg/m <sup>3</sup> ] | 0,00   |
| Andel reakt. bergarter [%]    | 0,0    |



### Volumkorleksjon

| korr.luft | korr.dens | Korrigert |
|-----------|-----------|-----------|
| -2,9      | 0,4       | 280,3     |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| -0,2      | 0,0       | 16,6      |
| -1,2      | 0,2       | 113,8     |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| -1,8      | 0,2       | 167,4     |
| -0,1      | 0,0       | 5,9       |
| -9,2      | 1,2       | 899,6     |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| -8,2      | 1,1       | 800,1     |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 1,60      |
| 0,0       | 0,0       | 4,69      |
| 0,0       | 0,0       | 0,00      |
| 0,0       | 0,0       | 0,00      |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| -23,4     | 3,1       | 2284      |

|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| Prosjekt           | SVV - Dokumentasjon av ulike betongresepter             |
| Reseptnummer       | Resept 11 (m=0.44, Aalb., 40% FA)                       |
| Tilsiktet kvalitet | SV-Lavvarme                                             |
| Utført av          | Øyvind Bjøntegaard, Tunnel- og betongseksjonen, Vegdir. |
| Dato               | 27.10.2015                                              |

| Initialparametre      | Verdi |
|-----------------------|-------|
| $m = v/(c+\Sigma kp)$ | 0,44  |
| Luftinnhold           | 4,0 % |

| Sementtype    | Andel   | Andel klinker | Andel FA | Andel slagg | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|---------------|---------|---------------|----------|-------------|----------------------|----------|----------|
| Aalborg Rapid | 100,0 % | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 3160                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|               | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|               | 0,0 %   | 100,0 %       | 0,0 %    | 0,0 %       | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsmaterialer | Type   | Andel (av b) | k   | [kg/m <sup>3</sup> ] | Alkalier | Klorider |
|-----------------------|--------|--------------|-----|----------------------|----------|----------|
| Elkem Microsilica     | Silika | 4,0 %        | 2,0 | 2200                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Flyveaske (Norcem)    | FA     | 40,0 %       | 0,7 | 2300                 | 0,0 %    | 0,0 %    |
|                       | Slagg  | 0,0 %        | 0,6 | 1000                 | 0,0 %    | 0,0 %    |

| Tilsetningsstoff    | % av b | [kg/m <sup>3</sup> ] | Tørrstoff | [kg/m <sup>3</sup> ] TS | Alkalier | Klorider |
|---------------------|--------|----------------------|-----------|-------------------------|----------|----------|
| Mapei Dynamon SX-23 | 0,5 %  | 1050                 | 23,0 %    | 1261                    | 0,0 %    | 0,0 %    |
| Mapeair 25 (1:9)    | 2,0 %  | 1000                 | 0,4 %     | 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 <sup>3</sup> ] |
|-------|-------|----------------------|
|       | 0,0 % | 7800                 |
|       | 0,0 % | 1050                 |

| Matriks                                    | Verdi  |
|--------------------------------------------|--------|
| Ønsket matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]    | 353    |
| Oppnådd matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]   | 353    |
| Klinkerandel i bindemiddel                 | 56,0 % |
| Total FA- andel av bindemiddel             | 40,0 % |
| Total slaggandel av bindemiddel            | 0,0 %  |
| Volum sementlim [l/m <sup>3</sup> ]        | 325,0  |
| Effektivt vanninnhold [l/m <sup>3</sup> ]  | 169,8  |
| v/p                                        | 0,34   |
| Effektivt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ] | 386    |
| Totalt bindemiddel [kg/m <sup>3</sup> ]    | 419    |

Beregn



# Ytelseserklæring

"Declaration of Performance"

AL 1.3

**Ytelseserklæring nummer:**

**164102 007**

1. Entydig identifikasjonskode for produkttypen:

**164102 007**

2. Produsenten tilsktede bruksområde for byggevaren, i samsvar med den relevante harmoniserte tekniske spesifikasjon:

**Tilslag for betong**

3a. Navn, registrert varemerke og kontaktadresse til produsenten i henhold til artikkel 11 nr.5:

**Heidelberg Materials Tilslag Norge AS**

**Vassbotnen 1**

**N-4313 Sandnes Norge**

3b. Produksjonsanlegg:

**Heidelberg Materials Tilslag Årdal**

**Svadbergvegen 27**

**4137 Årdal i Ryfylke Norge**

4. System or systemer for vurdering og kontroll av byggevarens konstante ytelse, som fastsatt i vedlegg V:

**System 2+**

5. Dersom ytelseserklæringen gjelder en byggevare som omfattes av en harmonisert standard: **EN 12620:2002+A1:2008**

Det tekniske kontrollorgan **Kontrollrådet / NB 1111** har utstedt FPC sertifikat under system 2+

6. Erklært ytelse:

**Se andre side**

7. Utførelsen av det ovennevnte produkt er i overensstemmelse med den angitte ytelse. Denne ytelseserklæringen er utstedt, i samsvar med forordning (EU) nr. 305/2011, på eget ansvar av produsenten som er identifisert ovenfor.

Signert for og på vegne av produsenten av:

**Svein Johan Mæland / Site Manager**

(navn og funksjon)

**Årdal i Ryfylke 01.11.2023**

(Sted og dato for utstedelse)



(signatur)

# Ytelseserklæring

AL 2.3

## 6. Erklært Ytelse

| Grunnleggende Egenskaper |                                                                             | Ytelse                              | Harmoniserte tekniske spesifikasjoner |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| EN 933-1                 | <b>Kornstørrelse</b><br>Kategori<br>Toleransekategori                       | 0/8 mm<br>G <sub>NG</sub> 90<br>npd | <b>EN 12620:2002+A1:2008</b>          |
| EN 933-3                 | <b>Kornform</b><br>Flisighetsindeks                                         | FI <sub>15</sub>                    |                                       |
| EN 933-4                 | Formindeks                                                                  | npd                                 |                                       |
| EN 1097-6                | <b>Korndensitet</b>                                                         | 2,69 ± 0.05 Mg/m <sup>3</sup>       |                                       |
| EN 1097-6 § 7            | <b>Vannabsorpsjon</b>                                                       | 0,3 ± 0.2 %                         |                                       |
| EN 933-1                 | <b>Innhold / Renhet</b><br>Finstoffinnhold                                  | f <sub>10</sub>                     |                                       |
| EN 933-9                 | Kvaliteten på finstoff                                                      | MB <sub>F</sub> 10                  |                                       |
| EN 933-7                 | Skjellinnhold                                                               | npd                                 |                                       |
| EN 1367-1                | <b>Bestandighet</b><br>Motstand mot frysing og tining                       | F <sub>1</sub>                      |                                       |
| EN 1367-2                | Magnesiumsulfatverdi                                                        | npd                                 |                                       |
| EN 1367-6                | Motstand mot frysing og tining / NaCl                                       | npd                                 |                                       |
| EN 1097-2 § 5            | <b>Motstand mot knusing</b><br>Los Angeles-verdi                            | LA <sub>30</sub>                    |                                       |
| EN 1097-2 § 6            | Slagverdi                                                                   | npd                                 |                                       |
| EN 1367-4                | <b>Volumstabilitet</b><br>Uttørringssvinn                                   | npd                                 |                                       |
| EN 1744-1 § 19.1/2       | Bestanddeler som påvirker volumstabiliteten av luftavkjølt masovnsagg       | npd                                 |                                       |
| EN 1097-1                | <b>Motstand mot polering / slitasje</b><br>Micro deval koeffisient          | npd                                 |                                       |
| EN 1097-8                | Poleringsverdi                                                              | npd                                 |                                       |
| EN 1097-8A               | Abrasjonsverdi                                                              | npd                                 |                                       |
| EN 1097-9                | Nordisk abrasjonsverdi                                                      | npd                                 |                                       |
| prEN 933-11              | <b>Kjemiske krav / Innhold</b><br>Bestanddeler av grove resirkulert tilslag | npd                                 |                                       |
| EN 1744-1                | Vannløselig sulfat av resirkulert tilslag                                   | npd                                 |                                       |
| EN 1744-1 § 7            | Klorider                                                                    | 0,000 M.-%                          |                                       |
| EN 1744-1 § 11           | Totalt innhold av svovel                                                    | < 1,0 M.-%                          |                                       |
| EN 1744-1 § 12           | Syreløselig sulfat                                                          | AS <sub>0,2</sub>                   |                                       |
| EN 1744-1 § 14.2         | Lette organiske forurensninger                                              | npd                                 |                                       |
| EN 1744-1 § 15.1         | Innhold av Humus                                                            | Lysere                              |                                       |
| EN 1744-1 § 15.3         | Bestanddeler som endrer størknings- og herdningtiden for betong             | npd                                 |                                       |
| EN 1744-6                | Innflytelse på første innstilling tiden av sement                           | npd                                 |                                       |
| EN 196-2 § 5             | Innhold av kalsiumkarbonat                                                  | npd                                 |                                       |
| ASTM C1260               | <b>Alkali-silika reaktivitet</b>                                            | ≤ 0,10 % (14d)                      |                                       |
|                          | <b>Farlige stoffer</b>                                                      | Se tredje side                      |                                       |



1111

Heidelberg Materials Tilslag Norge AS / Produksjonsanlegg: Heidelberg Materials Tilslag Årdal

23

164102 007

EN 12620:2002+A1:2008 (Tilslag for betong)

164102 007

De relevante / viktigste funksjonene i denne DoP se 6. Erklært Ytelse

V65

DoP nummer:

164102 007

Vers: 007

Nasjonale krav: NS-EN 12620:2002+A1:2008+NA:2016 & NB21



Heidelberg Materials Tilslag Norge AS

Produksjonsanlegg:

Heidelberg Materials Tilslag Årdal

EN 933-1  
EN 932-3  
NS-EN 206:2013+A2:2021+NA:2021  
  
NS-EN 206:2013+A2:2021+NA:2021  
NS-EN12620 NA.12 (SFT)  
NB-21  
SSV håndbok R210 metode 118

**Tilpasset Gradering og Krav\***

\*Kornstørrelse & finstoffinnhold

**Kjemisk sammensetning**

**Totalt innhold av svovel**

Indikasjon på Magnetkis

**Innhold av kalkstein i grovt tilslag**

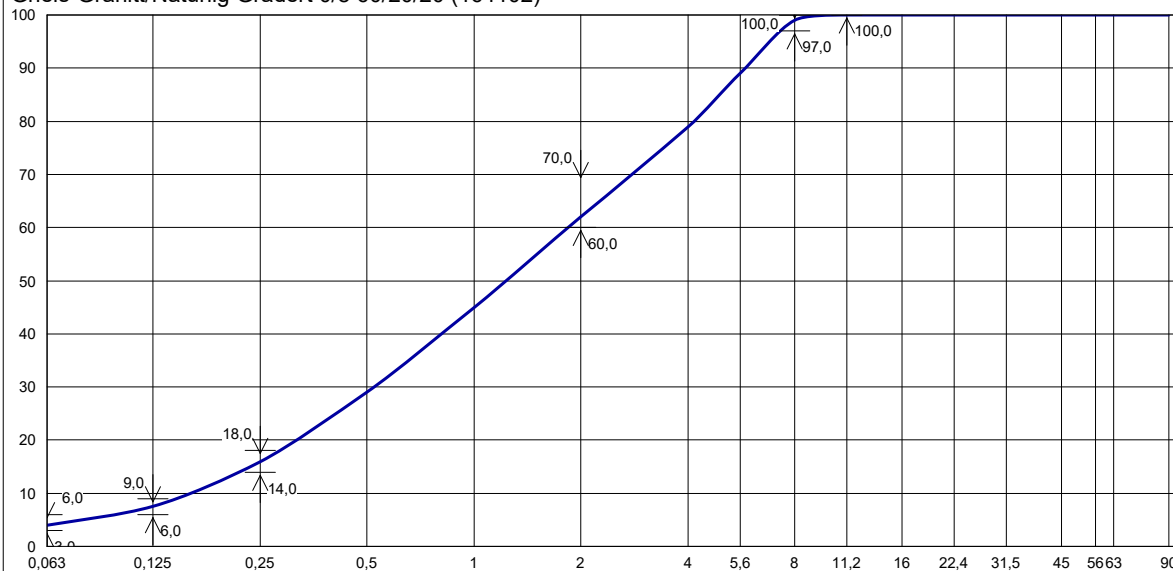
**Farlige stoffer**

**Alkalireaktivitet (sammeligningsverdi)**

**Slaminhold**

0/8 / f6  
Granitt / Gneis  
0,0178 M.-%  
npd  
npd  
"Klasse 1"  
3,9 %  
0,0 %

Gneis-Granitt/Naturlig Gradert 0/8 60/20/20 (164102)



| Sikt (mm)           | 0,063 | 0,125 | 0,25 | 0,5 | 1  | 2  | 4  | 5,6 | 8   | 11,2 | 16 | 22,4 | 31,5 | 45 | 56 | 63 | 90 |
|---------------------|-------|-------|------|-----|----|----|----|-----|-----|------|----|------|------|----|----|----|----|
| Deklarert Kurve (%) | 4     | 7,5   | 16   | 29  | 45 | 62 | 79 | 89  | 99  | 100  |    |      |      |    |    |    |    |
| *Min                | 3     | 6     | 14   |     |    | 60 |    |     | 97  | 100  |    |      |      |    |    |    |    |
| *Max                | 6     | 9     | 18   |     |    | 70 |    |     | 100 | 100  |    |      |      |    |    |    |    |

ID nummer:

164102 007

Vers: 007

# Ytelseserklæring

"Declaration of Performance"

AL 1.3

**Ytelseserklæring nummer:**

**101711-160 011**

1. Entydig identifikasjonskode for produkttypen:

**101711-160 011**

2. Produsenten tilsiktede bruksområde for byggevaren, i samsvar med den relevante harmoniserte tekniske spesifikasjonen:

**Tilslag for betong**

3a. Navn, registrert varemerke og kontaktadresse til produsenten i henhold til artikkel 11 nr.5:

**Heidelberg Materials Tilslag Norge AS**

**Vassbotnen 1**

**N-4313 Sandnes Norge**

3b. Produksjonsanlegg:

**Heidelberg Materials Tilslag Årdal**

**Svadbergvegen 27**

**4137 Årdal i Ryfylke Norge**

4. System or systemer for vurdering og kontroll av byggevarens konstante ytelse, som fastsatt i vedlegg V:

**System 2+**

5. Dersom ytelseserklæringen gjelder en byggevare som omfattes av en harmonisert standard: **EN 12620:2002+A1:2008**

Det tekniske kontrollorgan **Kontrollrådet / NB 1111** har utstedt FPC sertifikat under system 2+

6. Erklært ytelse:

**Se andre side**

7. Utførelsen av det ovennevnte produkt er i overensstemmelse med den angitte ytelse.

Denne ytelseserklæringen er utstedt, i samsvar med forordning (EU) nr. 305/2011, på eget ansvar av produsenten som er identifisert ovenfor.

Signert for og på vegne av produsenten av:

**Svein Johan Mæland / Site Manager**

(navn og funksjon)

**Årdal i Ryfylke 01.11.2023**

(Sted og dato for utstedelse)



(signatur)

# Ytelseserklæring

AL 2.3

## 6. Erklært Ytelse

| Grunnleggende Egenskaper |                                                                                                        | Ytelse                                 | Harmoniserte tekniske spesifikasjoner |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| EN 933-1                 | <b>Kornstørrelse</b><br>Kategori<br>Toleransekategori                                                  | 8/16 mm<br>G <sub>C</sub> 85/15<br>npd | <b>EN 12620:2002+A1:2008</b>          |
| EN 933-3                 | <b>Kornform</b><br>Flisighetsindeks                                                                    | Fl <sub>15</sub>                       |                                       |
| EN 933-4                 | Formindeks                                                                                             | npd                                    |                                       |
| EN 933-5                 | <b>Prosentdel av knuste korn</b>                                                                       | C <sub>50/30</sub>                     |                                       |
| EN 1097-6                | <b>Korndensitet</b>                                                                                    | 2,69 ± 0.05 Mg/m <sup>3</sup>          |                                       |
| EN 1097-6 § 7            | <b>Vannabsorpsjon</b>                                                                                  | 0,3 ± 0.2 %                            |                                       |
|                          | <b>Innhold / Renhet</b>                                                                                |                                        |                                       |
| EN 933-1                 | Finstoffinnhold                                                                                        | f <sub>1,5</sub>                       |                                       |
| EN 933-9                 | Kvaliteten på finstoff                                                                                 | npd                                    |                                       |
|                          | <b>Bestandighet</b>                                                                                    |                                        |                                       |
| EN 1367-1                | Motstand mot frysing og tining                                                                         | F <sub>1</sub>                         |                                       |
| EN 1367-2                | Magnesiumsulfatverdi                                                                                   | npd                                    |                                       |
| EN 1367-6                | Motstand mot frysing og tining / NaCl                                                                  | npd                                    |                                       |
| EN 1367-3 / EN 1097-2    | "Sonnenbrand" ved basalt                                                                               | npd                                    |                                       |
|                          | <b>Motstand mot knusing</b>                                                                            |                                        |                                       |
| EN 1097-2 § 5            | Los Angeles-verdi                                                                                      | LA <sub>30</sub>                       |                                       |
| EN 1097-2 § 6            | Slagverdi                                                                                              | npd                                    |                                       |
|                          | <b>Volumestabilitet</b>                                                                                |                                        |                                       |
| EN 1744-1 / EN 196-2     | Bestanddelene som påvirker volumstabiliteten av masovn- og stålsagg i mekanisk stabiliserte materialer | npd                                    |                                       |
|                          | <b>Motstand mot slitasje</b>                                                                           |                                        |                                       |
| EN 1097-1                | Micro deval koeffisient                                                                                | npd                                    |                                       |
|                          | <b>Kjemiske krav / Innhold</b>                                                                         |                                        |                                       |
| prEN 933-11              | Klassifisering av grovt resirkulert tilslag                                                            | npd                                    |                                       |
| EN 1744-1                | Vannløselig sulfat resirkulert tilslag                                                                 | npd                                    |                                       |
| EN 1744-1 § 11           | Totalt innhold av svovel                                                                               | npd                                    |                                       |
| EN 1744-1 § 12           | Syreløselig sulfat                                                                                     | AS <sub>0,2</sub>                      |                                       |
| EN 1744-1 § 14.2         | Lette organiske forurensninger                                                                         | npd                                    |                                       |
| EN 1744-1 § 15.1         | Innhold av Humus                                                                                       | npd                                    |                                       |
| EN 1744-1 § 15.2         | Bestanddelene som endrer størkings- og herdningstiden for hydraulisk stabiliserte materialer           | npd                                    |                                       |
|                          | <b>Farlige stoffer</b>                                                                                 | Se tredje side                         |                                       |



1111

Heidelberg Materials Tilslag Norge AS / Produksjonsanlegg: Heidelberg Materials Tilslag Årdal

23

101711-160 011

EN 12620:2002+A1:2008 (Tilslag for betong)

101711-160 011

De relevante / viktigste funksjonene i denne DoP se 6. Erklært Ytelse

DoP nummer:

101711-160 011

Vers: 011

Nasjonale krav:

NS-EN 12620:2002+A1:2008+NA:2016 &amp; NB21



Heidelberg Materials Tilslag Norge AS

Produksjonsanlegg:

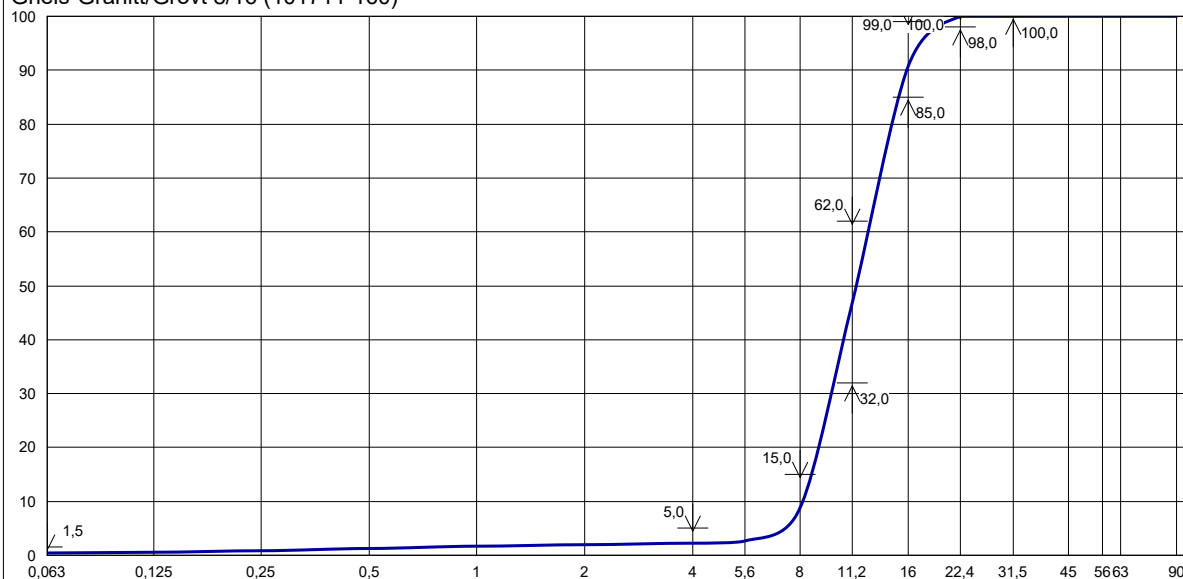
Heidelberg Materials Tilslag Årdal

EN 933-1  
EN 932-3  
NS-EN13242 NA.6 (SFT)

**Tilpasset Gradering og Krav\***  
\*Kornstørrelse & finstoffinnhold  
**Kjemisk sammensetning**  
**Farlige stoffer**

8/16 / f1,5  
Granitt / Gneis  
"Klasse 1"

Gneis-Granitt/Grovt 8/16 (101711-160)



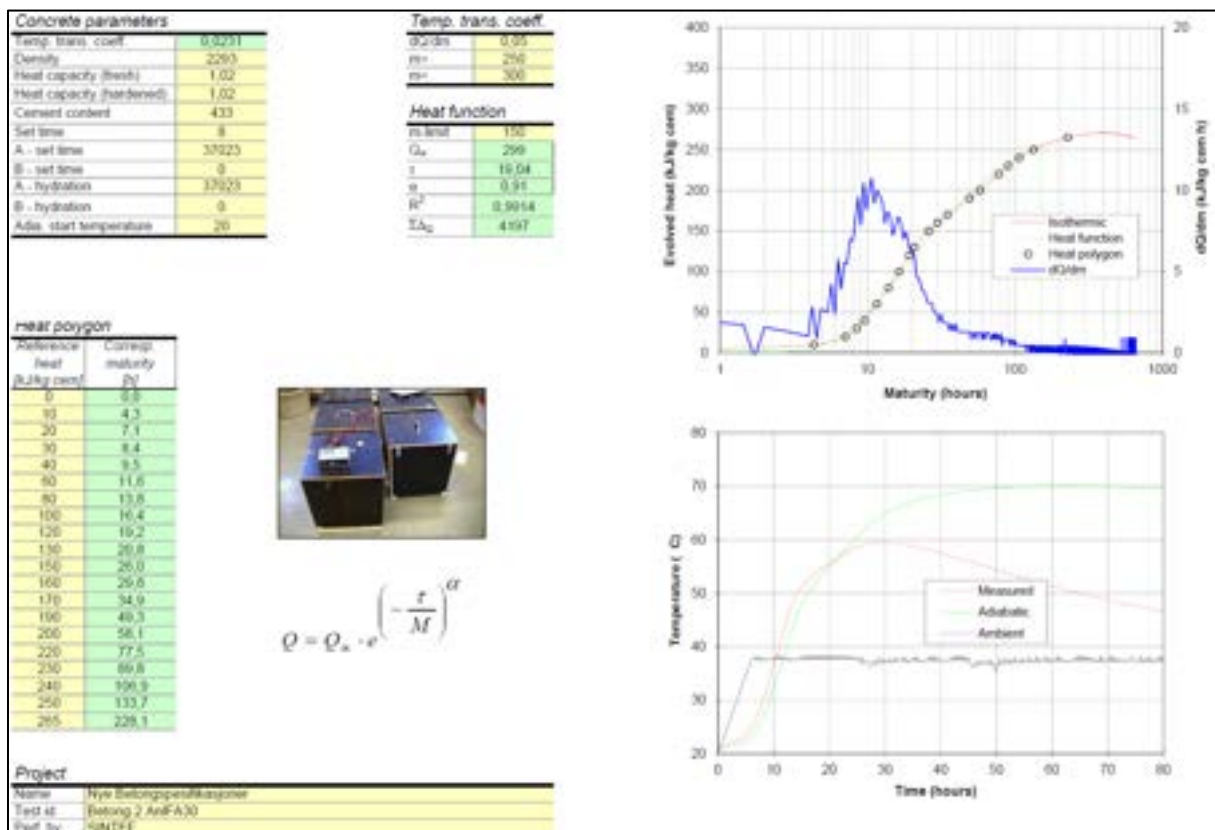
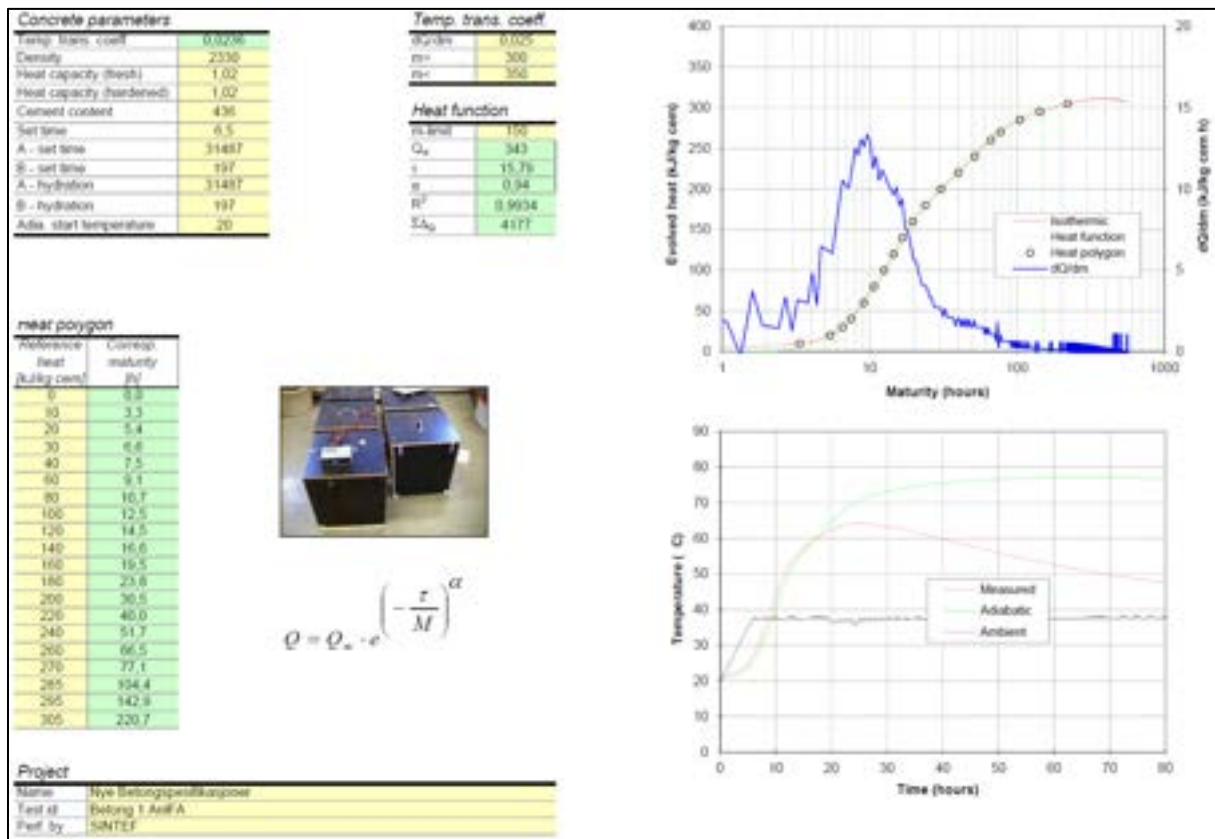
| Sikt (mm)           | 0,063 | 0,125 | 0,25 | 0,5 | 1   | 2 | 4   | 5,6 | 8   | 11,2 | 16   | 22,4 | 31,5 | 45 | 56 | 63 | 90 |
|---------------------|-------|-------|------|-----|-----|---|-----|-----|-----|------|------|------|------|----|----|----|----|
| Deklarert Kurve (%) | 0,4   | 0,6   | 0,9  | 1,3 | 1,7 | 2 | 2,3 | 2,7 | 8,9 | 46,9 | 90,8 | 100  |      |    |    |    |    |
| *Min                | 0     |       |      |     |     |   | 0   |     | 0   | 32   | 85   | 98   | 100  |    |    |    |    |
| *Max                | 1,5   |       |      |     |     |   | 5   |     | 15  | 62   | 99   | 100  | 100  |    |    |    |    |

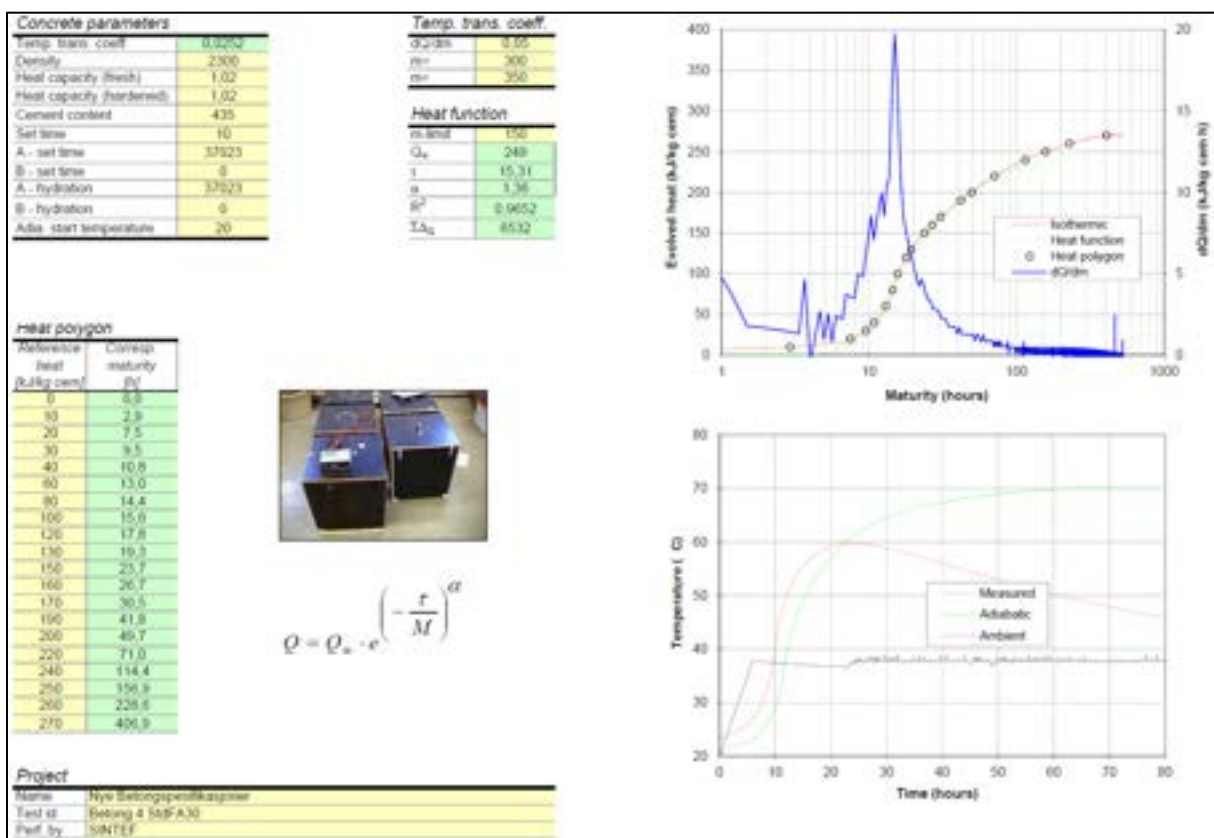
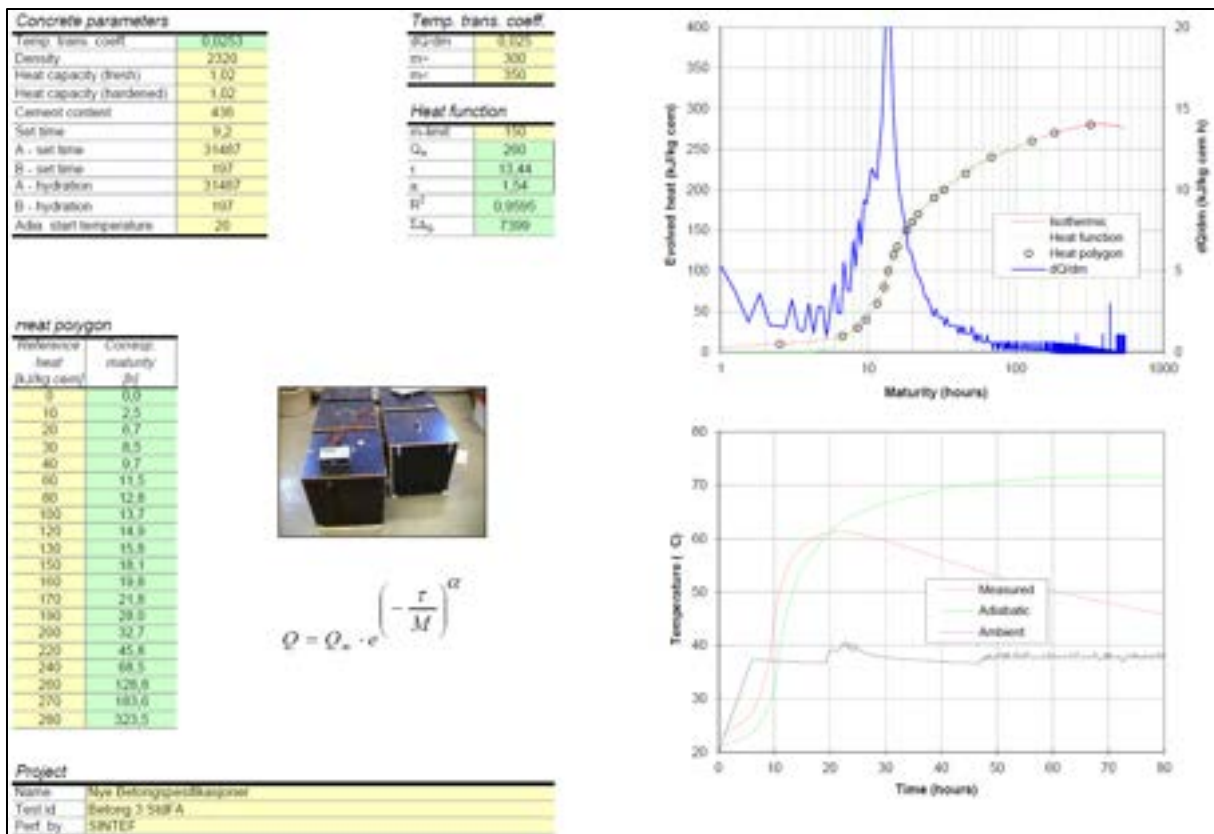
ID nummer:

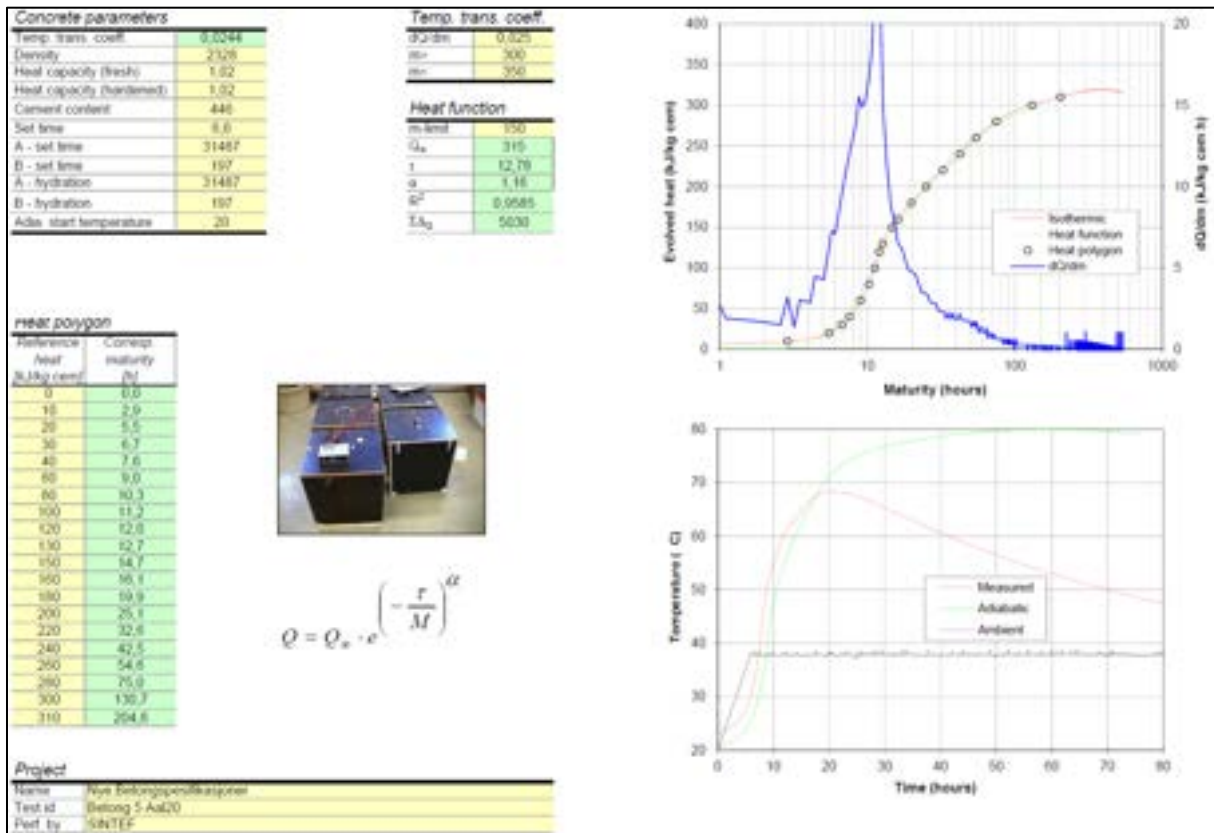
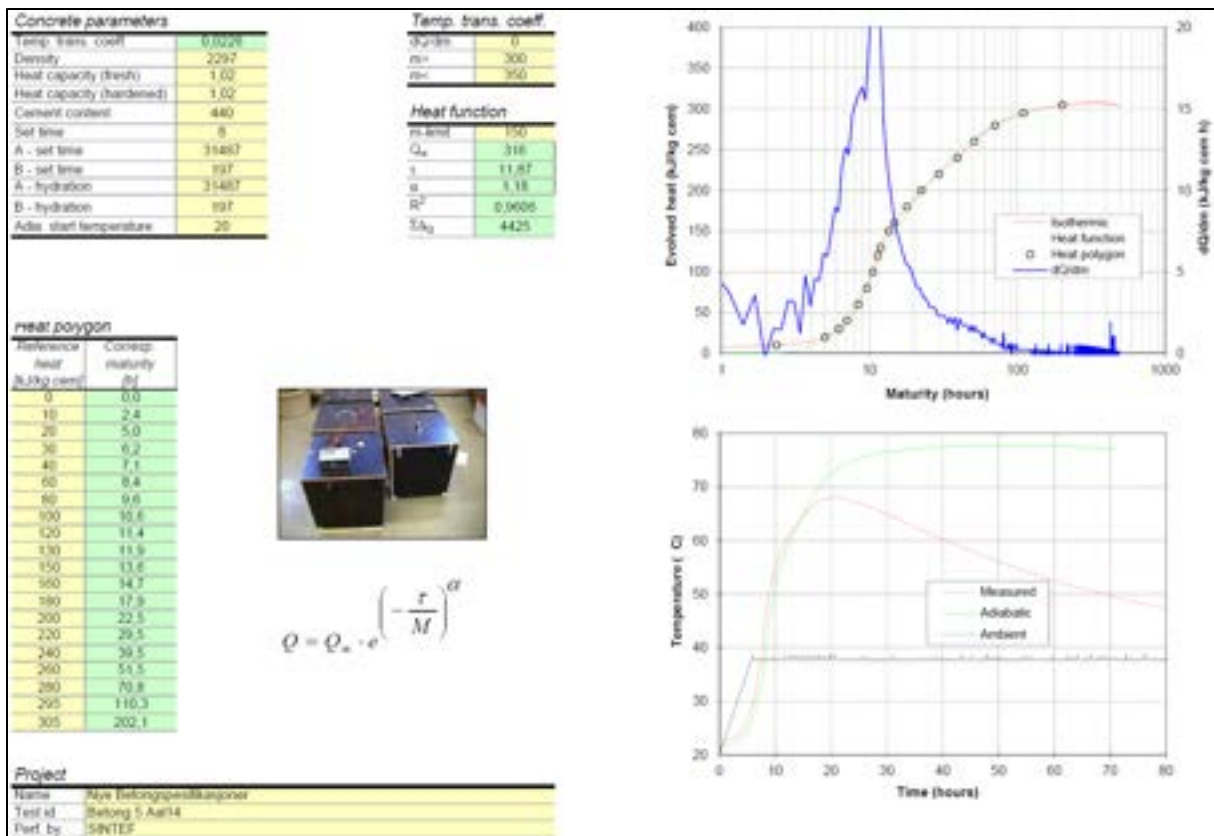
101711-160 011

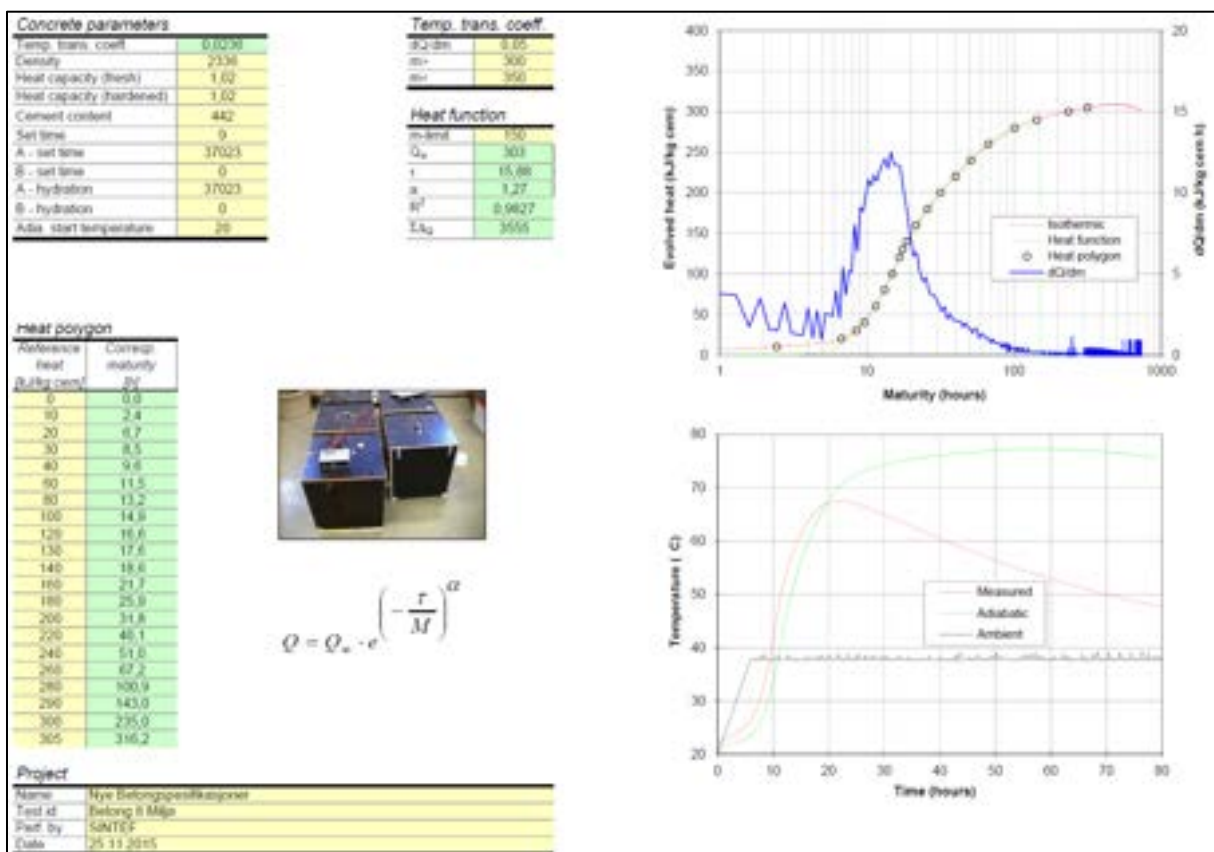
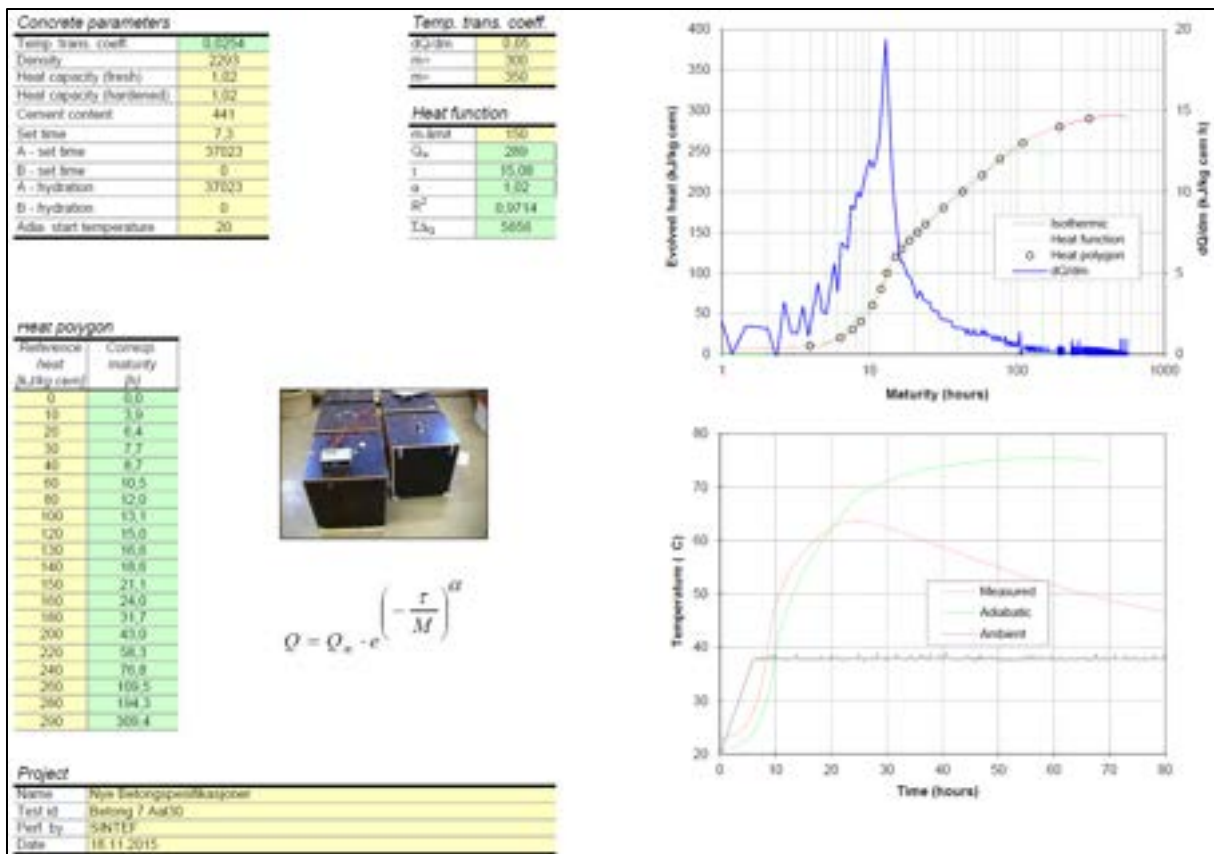
Vers: 011

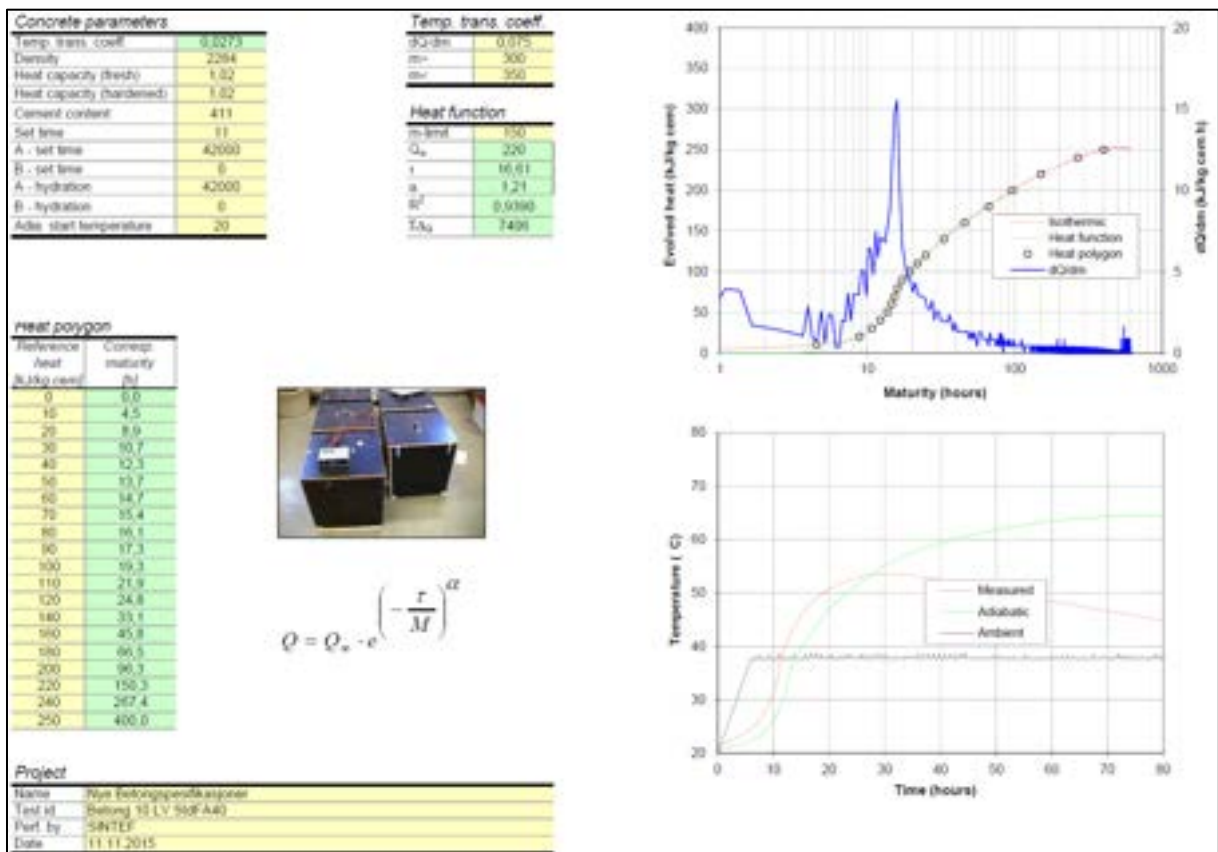
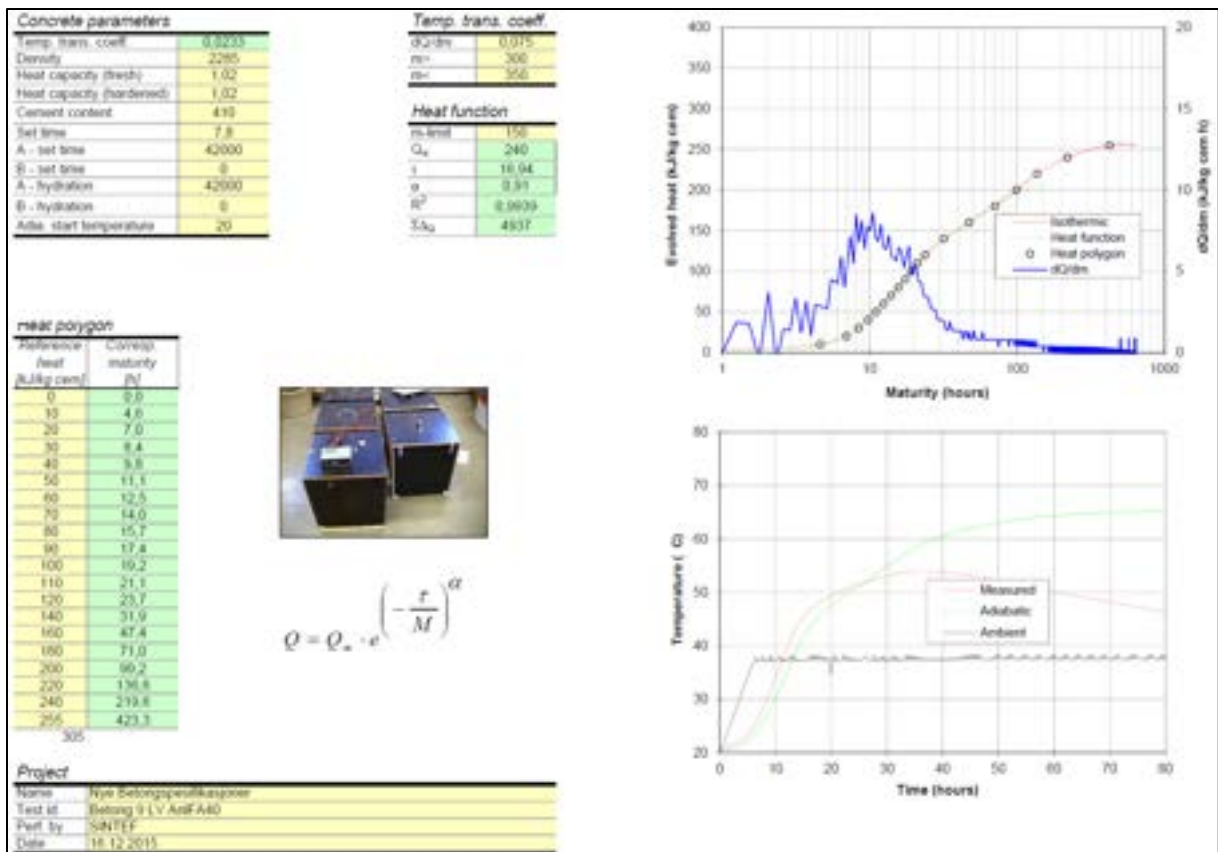
## VEDLEGG 4 Parametere benyttet i analysen av herdekasseforsøkene











| Concrete parameters      |        |
|--------------------------|--------|
| Temp. trans. coeff.      | 0.0245 |
| Density                  | 2290   |
| Heat capacity (fresh)    | 1.02   |
| Heat capacity (hardened) | 1.02   |
| Cement content           | 417    |
| Set time                 | 0      |
| A - set time             | 42000  |
| B - set time             | 0      |
| A - hydration            | 42000  |
| B - hydration            | 0      |
| Adm. start temperature   | 20     |

| Temp. trans. coeff. |       |
|---------------------|-------|
| Q <sub>28m</sub>    | 0.975 |
| m <sub>1</sub>      | 300   |
| m <sub>2</sub>      | 350   |

| Heat function        |        |
|----------------------|--------|
| m <sub>1</sub> limit | 150    |
| Q <sub>h</sub>       | 256    |
| 1                    | 0.79   |
| g                    | 0.94   |
| g <sup>2</sup>       | 0.9625 |
| T <sub>Ad</sub>      | 7343   |

#### Heat polygon

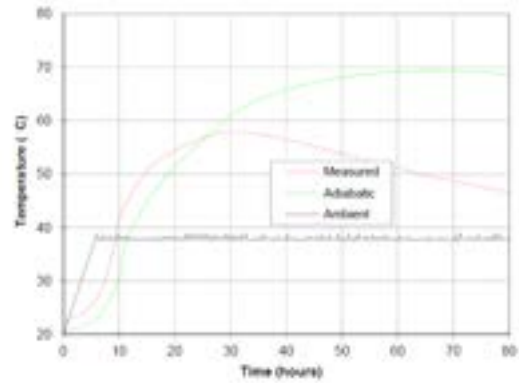
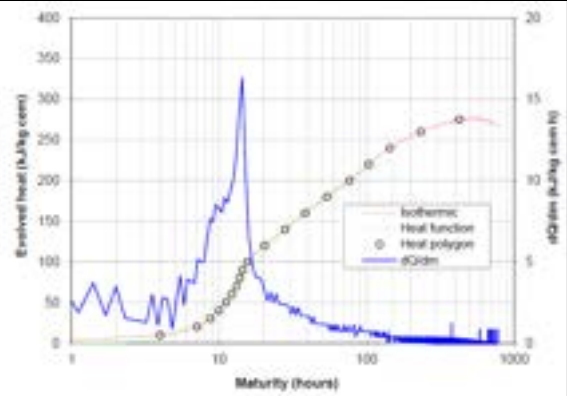
| Reference heat<br>(kJ/kg cement) | Corresp. maturity<br>(h) |
|----------------------------------|--------------------------|
| 0                                | 0.0                      |
| 10                               | 4.0                      |
| 20                               | 7.1                      |
| 30                               | 8.8                      |
| 40                               | 10.0                     |
| 50                               | 11.2                     |
| 60                               | 12.2                     |
| 70                               | 13.1                     |
| 80                               | 13.8                     |
| 90                               | 14.4                     |
| 100                              | 15.0                     |
| 120                              | 20.3                     |
| 140                              | 28.0                     |
| 160                              | 38.1                     |
| 180                              | 53.9                     |
| 200                              | 76.6                     |
| 220                              | 103.1                    |
| 240                              | 143.8                    |
| 260                              | 232.6                    |
| 275                              | 425.7                    |



$$Q = Q_{\infty} \cdot e^{\left(-\frac{r}{M}\right)^{\alpha}}$$

#### Project

|          |                        |
|----------|------------------------|
| Name     | Nya Betongpewilakaspon |
| Test id  | Betong 11 LV Aa45      |
| Perf. by | SINTEF                 |
| Date     | 24.11.2015             |



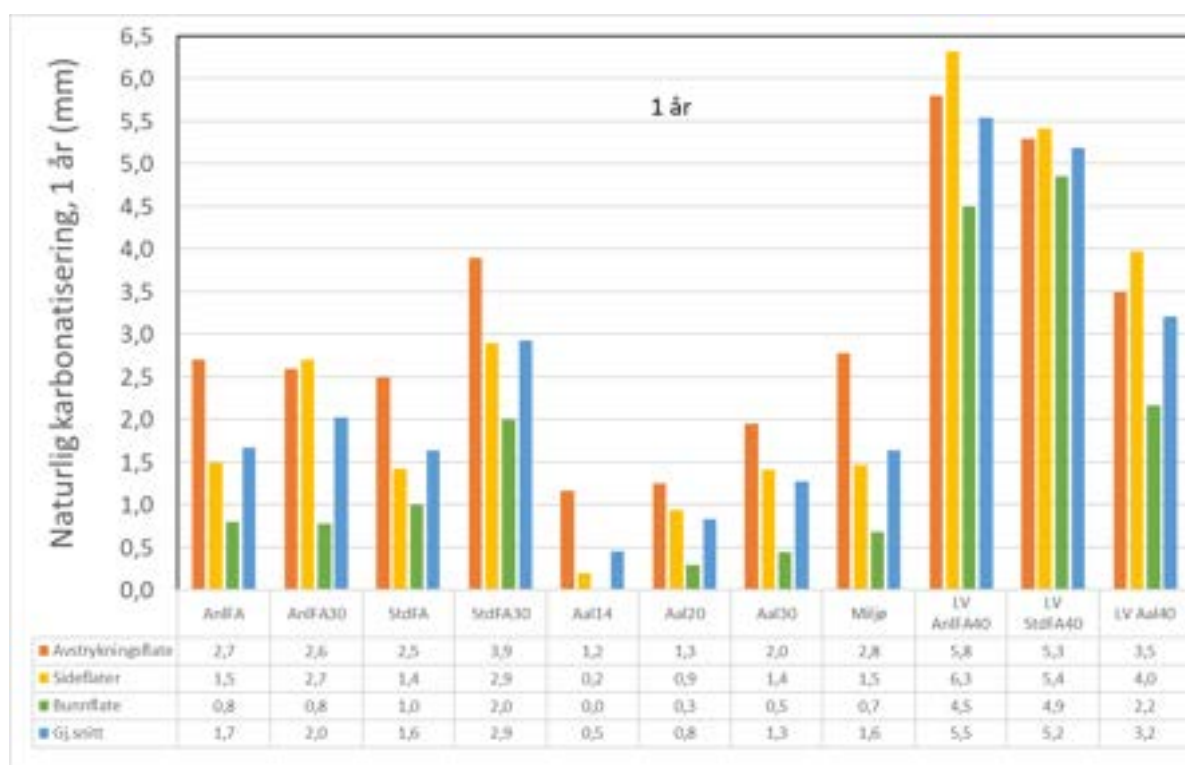
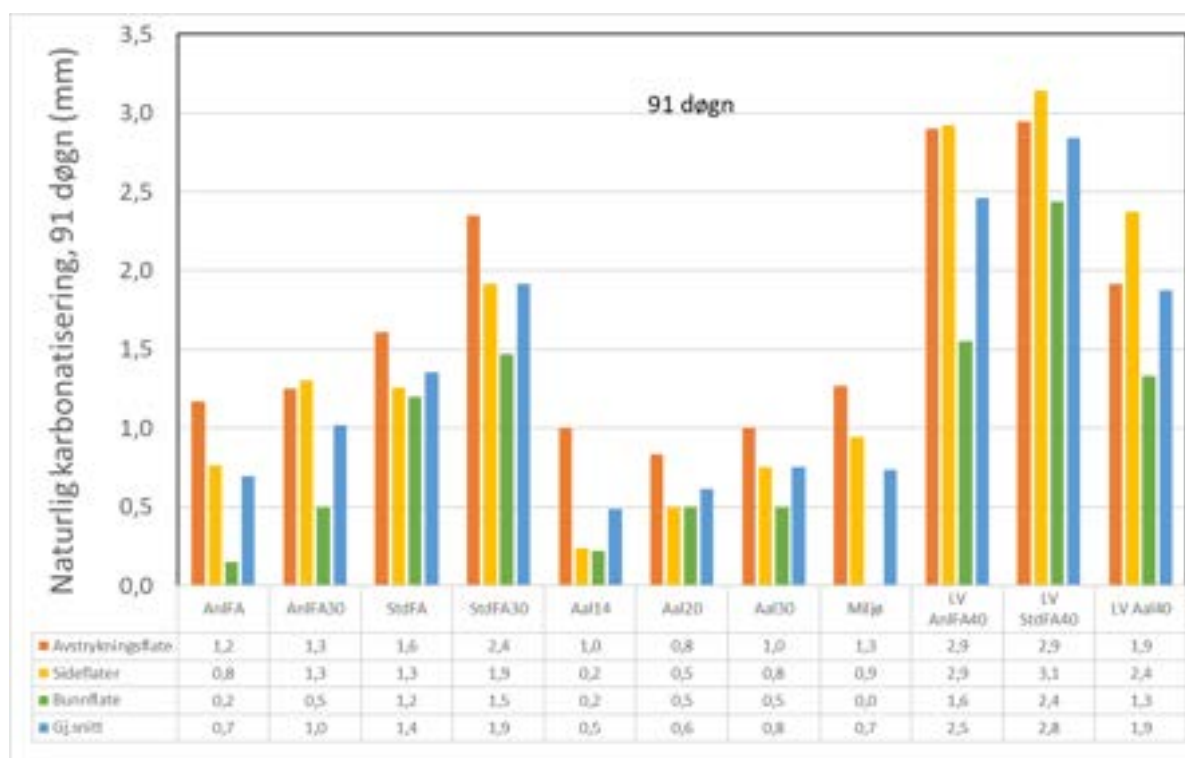
## VEDLEGG 5 Naturlig karbonatisering, middel for 2 prismer

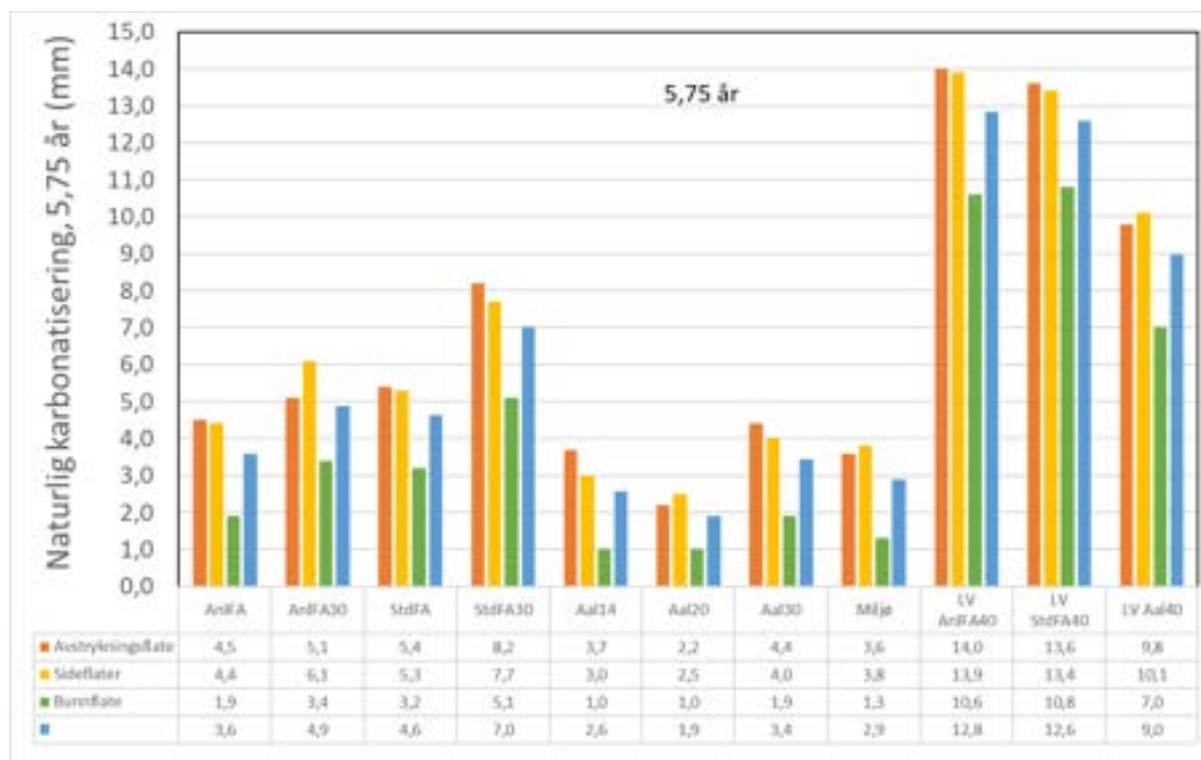
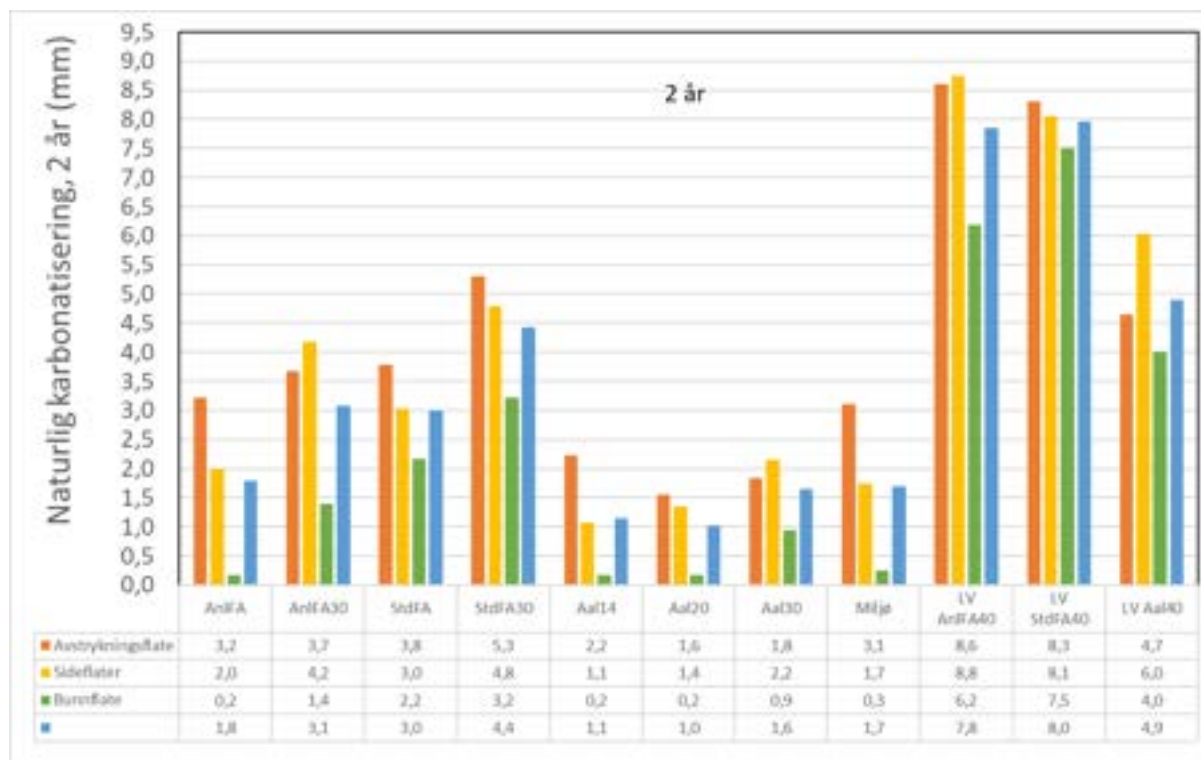
| No.       | Betong     | Alder | Avstrykningsflate |           | Sideflater |           | Bunnflate |           | Gj.snitt |
|-----------|------------|-------|-------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|           |            |       | Middel            | Std avvik | Middel     | Std avvik | Middel    | Std avvik |          |
| Resept 1  | AnlFA      | 91 d  | 1,2               | 0,4       | 0,8        | 0,4       | 0,2       | 0,2       | 0,7      |
| Resept 2  | AnlFA30    | 91 d  | 1,3               | 0,3       | 1,3        | 0,3       | 0,5       | 0,0       | 1,0      |
| Resept 3  | StdFA      | 91 d  | 1,6               | 0,2       | 1,3        | 0,3       | 1,2       | 0,3       | 1,4      |
| Resept 4  | StdFA30    | 91 d  | 2,4               | 0,3       | 1,9        | 0,4       | 1,5       | 0,3       | 1,9      |
| Resept 5  | Aal14      | 91 d  | 1,0               | 0,0       | 0,2        | 0,3       | 0,2       | 0,3       | 0,5      |
| Resept 6  | Aal20      | 91 d  | 0,8               | 0,3       | 0,5        | 0,0       | 0,5       | 0,0       | 0,6      |
| Resept 7  | Aal30      | 91 d  | 1,0               | 0,0       | 0,8        | 0,3       | 0,5       | 0,0       | 0,8      |
| Resept 8  | Miljø      | 91 d  | 1,3               | 0,3       | 0,9        | 0,3       | 0,0       | 0,0       | 0,7      |
| Resept 9  | LV AnlFA40 | 91 d  | 2,9               | 0,3       | 2,9        | 0,3       | 1,6       | 0,3       | 2,5      |
| Resept 10 | LV StdFA40 | 91 d  | 2,9               | 0,3       | 3,1        | 0,4       | 2,4       | 0,4       | 2,8      |
| Resept 11 | LV Aal40   | 91 d  | 1,9               | 0,3       | 2,4        | 0,5       | 1,3       | 0,3       | 1,9      |

| No.       | Betong     | Alder | Avstrykningsflate |           | Sideflater |           | Bunnflate |           | Gj.snitt |
|-----------|------------|-------|-------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|           |            |       | Middel            | Std avvik | Middel     | Std avvik | Middel    | Std avvik |          |
| Resept 1  | AnlFA      | 1 år  | 2,7               | 0,5       | 1,5        | 0,3       | 0,8       | 0,2       | 1,7      |
| Resept 2  | AnlFA30    | 1 år  | 2,6               | 0,4       | 2,7        | 0,6       | 0,8       | 0,7       | 2,0      |
| Resept 3  | StdFA      | 1 år  | 2,5               | 0,5       | 1,4        | 0,5       | 1,0       | 0,6       | 1,6      |
| Resept 4  | StdFA30    | 1 år  | 3,9               | 0,9       | 2,9        | 0,5       | 2,0       | 1,1       | 2,9      |
| Resept 5  | Aal14      | 1 år  | 1,2               | 0,4       | 0,2        | 0,3       | 0,0       | 0,0       | 0,5      |
| Resept 6  | Aal20      | 1 år  | 1,3               | 0,6       | 0,9        | 0,5       | 0,3       | 0,3       | 0,8      |
| Resept 7  | Aal30      | 1 år  | 2,0               | 0,6       | 1,4        | 0,5       | 0,5       | 0,4       | 1,3      |
| Resept 8  | Miljø      | 1 år  | 2,8               | 0,6       | 1,5        | 0,6       | 0,7       | 0,3       | 1,6      |
| Resept 9  | LV AnlFA40 | 1 år  | 5,8               | 0,6       | 6,3        | 0,8       | 4,5       | 0,4       | 5,5      |
| Resept 10 | LV StdFA40 | 1 år  | 5,3               | 1,1       | 5,4        | 0,7       | 4,9       | 0,7       | 5,2      |
| Resept 11 | LV Aal40   | 1 år  | 3,5               | 0,5       | 4,0        | 0,6       | 2,2       | 0,4       | 3,2      |

| No.       | Betong     | Alder | Avstrykningsflate |           | Sideflater |           | Bunnflate |           | Gj.snitt |
|-----------|------------|-------|-------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|           |            |       | Middel            | Std avvik | Middel     | Std avvik | Middel    | Std avvik |          |
| Resept 1  | AnlFA      | 2 år  | 3,2               | 0,5       | 2,0        | 0,8       | 0,2       | 0,3       | 1,8      |
| Resept 2  | AnlFA30    | 2 år  | 3,7               | 0,8       | 4,2        | 1,1       | 1,4       | 1,1       | 3,1      |
| Resept 3  | StdFA      | 2 år  | 3,8               | 0,7       | 3,0        | 0,7       | 2,2       | 0,8       | 3,0      |
| Resept 4  | StdFA30    | 2 år  | 5,3               | 0,7       | 4,8        | 0,7       | 3,2       | 0,8       | 4,4      |
| Resept 5  | Aal14      | 2 år  | 2,2               | 0,7       | 1,1        | 0,4       | 0,2       | 0,3       | 1,1      |
| Resept 6  | Aal20      | 2 år  | 1,6               | 0,9       | 1,4        | 0,8       | 0,2       | 0,3       | 1,0      |
| Resept 7  | Aal30      | 2 år  | 1,8               | 0,7       | 2,2        | 0,6       | 0,9       | 1,0       | 1,6      |
| Resept 8  | Miljø      | 2 år  | 3,1               | 0,7       | 1,7        | 0,6       | 0,3       | 0,3       | 1,7      |
| Resept 9  | LV AnlFA40 | 2 år  | 8,6               | 0,3       | 8,8        | 1,1       | 6,2       | 1,0       | 7,8      |
| Resept 10 | LV StdFA40 | 2 år  | 8,3               | 1,2       | 8,1        | 0,8       | 7,5       | 1,5       | 8,0      |
| Resept 11 | LV Aal40   | 2 år  | 4,7               | 0,8       | 6,0        | 0,8       | 4,0       | 1,3       | 4,9      |

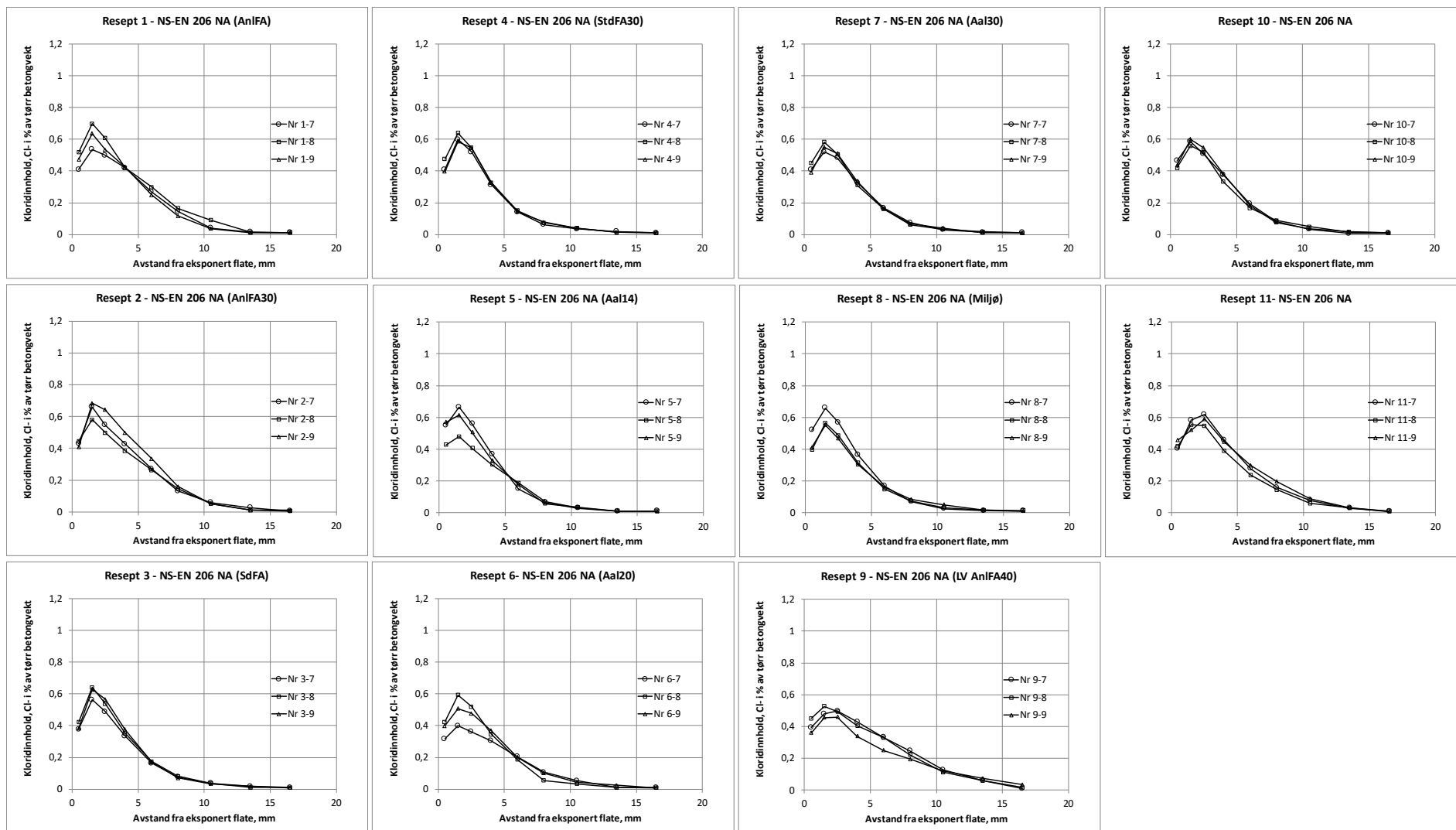
| No.       | Betong     | Alder   | Avstrykningsflate |           | Sideflater |           | Bunnflate |           | Gj.snitt |
|-----------|------------|---------|-------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|
|           |            |         | Middel            | Std avvik | Middel     | Std avvik | Middel    | Std avvik |          |
| Resept 1  | AnlFA      | 5,75 år | 4,5               | 0,5       | 4,4        | 1,1       | 1,9       | 0,9       | 3,6      |
| Resept 2  | AnlFA30    | 5,75 år | 5,1               | 0,8       | 6,1        | 0,7       | 3,4       | 0,4       | 4,9      |
| Resept 3  | StdFA      | 5,75 år | 5,4               | 1,9       | 5,3        | 1,4       | 3,2       | 0,8       | 4,6      |
| Resept 4  | StdFA30    | 5,75 år | 8,2               | 1,8       | 7,7        | 1,0       | 5,1       | 1,0       | 7,0      |
| Resept 5  | Aal14      | 5,75 år | 3,7               | 0,9       | 3,0        | 1,1       | 1,0       | 0,0       | 2,6      |
| Resept 6  | Aal20      | 5,75 år | 2,2               | 1,3       | 2,5        | 1,3       | 1,0       | 0,0       | 1,9      |
| Resept 7  | Aal30      | 5,75 år | 4,4               | 0,6       | 4,0        | 1,1       | 1,9       | 0,5       | 3,4      |
| Resept 8  | Miljø      | 5,75 år | 3,6               | 0,8       | 3,8        | 0,9       | 1,3       | 0,3       | 2,9      |
| Resept 9  | LV AnlFA40 | 5,75 år | 14,0              | 1,1       | 13,9       | 1,4       | 10,6      | 0,8       | 12,8     |
| Resept 10 | LV StdFA40 | 5,75 år | 13,6              | 0,8       | 13,4       | 1,0       | 10,8      | 1,1       | 12,6     |
| Resept 11 | LV Aal40   | 5,75 år | 9,8               | 0,6       | 10,1       | 0,8       | 7,0       | 0,8       | 9,0      |





## Vedlegg 6 Resultater kloriddiff. NS-EN 206 (SINTEF, 6% NaCl)

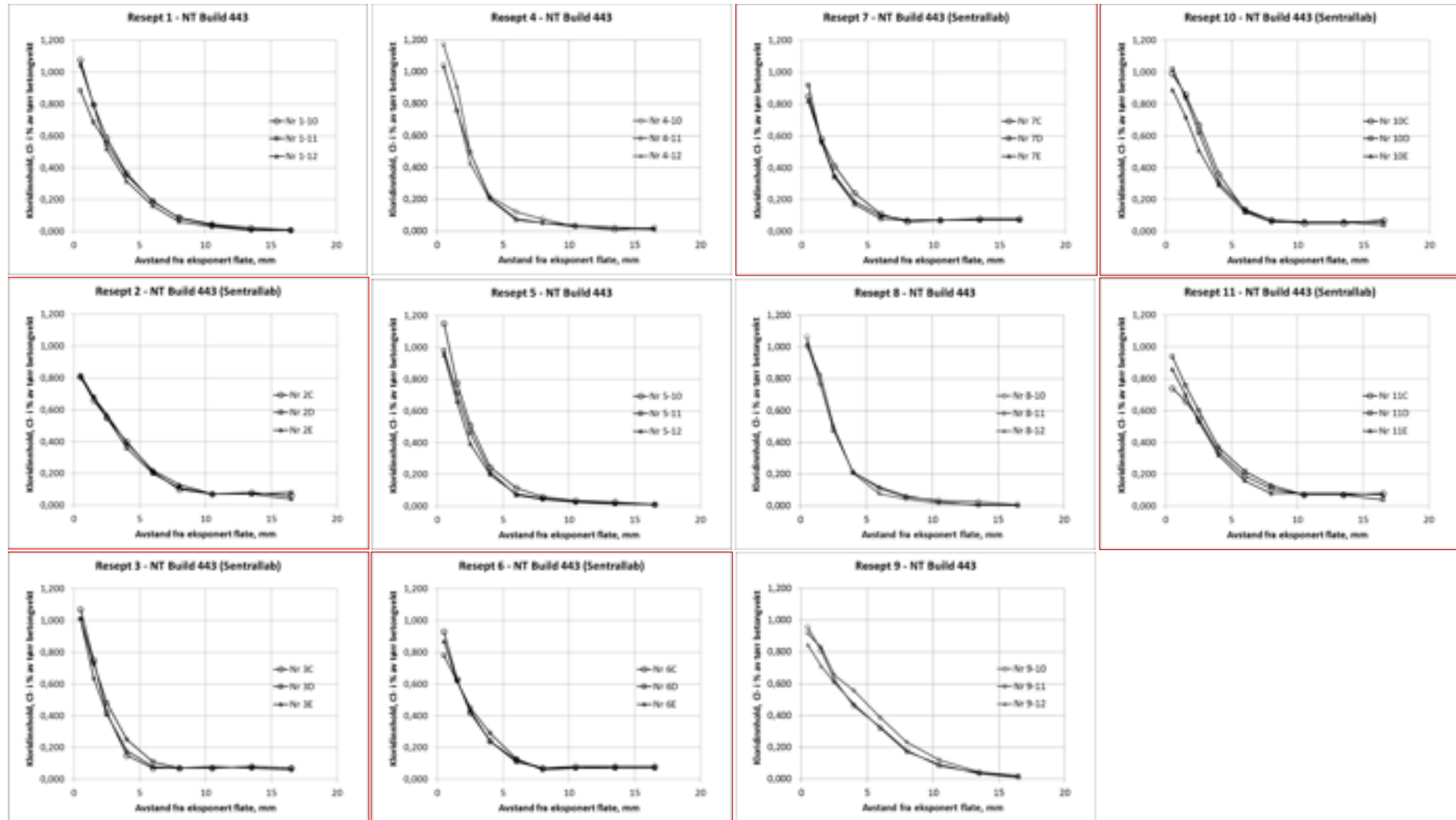
|                                                   |           |       |       |        |           |
|---------------------------------------------------|-----------|-------|-------|--------|-----------|
| Resept 1 - NS-EN 206 NA                           | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,696     | 0,868 | 0,817 | 0,79   | 0,07      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 2,86      | 2,50  | 2,17  | 2,51   | 0,28      |
| Resept 2 - NS-EN 206 NA                           | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,829     | 0,727 | 0,896 | 0,82   | 0,07      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 2,33      | 2,57  | 2,63  | 2,51   | 0,13      |
| Resept 3 - NS-EN 206 NA                           | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,760     | 0,867 | 0,872 | 0,83   | 0,05      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 1,66      | 1,53  | 1,57  | 1,58   | 0,05      |
| Resept 4 - NS-EN 206 NA                           | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,839     | 0,889 | 0,828 | 0,85   | 0,03      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 1,37      | 1,36  | 1,49  | 1,40   | 0,06      |
| Resept 5 - NS-EN 206 NA                           | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,929     | 0,624 | 0,833 | 0,80   | 0,13      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 1,36      | 1,99  | 1,48  | 1,61   | 0,27      |
| Resept 6 - NS-EN 206 NA                           | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,506     | 0,812 | 0,676 | 0,66   | 0,13      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 2,99      | 1,60  | 2,29  | 2,29   | 0,57      |
| Resept 7 - NS-EN 206 NA                           | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,712     | 0,802 | 0,763 | 0,76   | 0,04      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 1,78      | 1,47  | 1,66  | 1,64   | 0,13      |
| Resept 8 - NS-EN 206 NA                           | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,915     | 0,775 | 0,734 | 0,81   | 0,08      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 1,44      | 1,50  | 1,65  | 1,53   | 0,09      |
| Resept 9 - NS-EN 206 NA                           | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,613     | 0,639 | 0,553 | 0,60   | 0,04      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 5,24      | 4,54  | 4,69  | 4,82   | 0,30      |
| Resept 10 - NS-EN 206 NA                          | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,783     | 0,762 | 0,824 | 0,79   | 0,03      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 1,82      | 1,75  | 1,73  | 1,77   | 0,04      |
| Resept 11 - NS-EN 206 NA                          | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl-                     | 0,925     | 0,817 | 0,842 | 0,86   | 0,05      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10-12 m <sup>2</sup> /s | 2,28      | 2,20  | 2,80  | 2,43   | 0,26      |



## VEDLEGG 7 Resultater kloriddiff. NT Build 443 (SINTEF og S.lab)

|                                                               |           |       |       |        |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|-------|-------|--------|-----------|
| Resept 1 - NT Build 443                                       | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 1,074     | 0,918 | 1,111 | 1,03   | 0,08      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 3,01      | 3,56  | 2,31  | 2,96   | 0,51      |
| Resept 2 - NT Build 443 (Sentrallab)                          | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 0,858     | 0,885 | 0,874 | 0,872  | 0,011     |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 4,37      | 3,91  | 4,50  | 4,26   | 0,26      |
| Resept 3 - NT Build 443 (Sentrallab)                          | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 1,325     | 1,093 | 1,030 | 1,149  | 0,127     |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 1,04      | 1,79  | 1,41  | 1,41   | 0,30      |
| Resept 4- NT Build 443                                        | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 1,150     | 1,584 | 1,277 | 1,34   | 0,18      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 1,71      | 1,09  | 1,22  | 1,34   | 0,27      |
| Resept 5- NT Build 443                                        | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 1,177     | 1,245 | 1,039 | 1,15   | 0,09      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 1,75      | 1,19  | 1,47  | 1,47   | 0,23      |
| Resept 6 - NT Build 443 (Sentrallab)                          | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 0,890     | 0,850 | 0,887 | 0,876  | 0,018     |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 2,16      | 2,70  | 2,15  | 2,34   | 0,26      |
| Resept 7 - NT Build 443 (Sentrallab)                          | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 0,818     | 0,875 | 0,841 | 0,845  | 0,024     |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 2,32      | 1,47  | 1,74  | 1,84   | 0,35      |
| Resept 8 - NT Build 443                                       | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 1,220     | 1,383 | 1,201 | 1,27   | 0,08      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 1,49      | 1,27  | 1,54  | 1,43   | 0,12      |
| Resept 9 - NT Build 443                                       | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 0,969     | 0,978 | 0,879 | 0,94   | 0,04      |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 5,72      | 7,47  | 6,59  | 6,59   | 0,71      |
| Resept 10 - NT Build 443 (Sentrallab)                         | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 1,269     | 1,243 | 1,042 | 1,184  | 0,101     |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 2,25      | 2,07  | 2,16  | 2,16   | 0,07      |
| Resept 11 - NT Build 443 (Sentrallab)                         | Enkeltres |       |       | Middel | Std avvik |
| Overflatekonsentrasjon, % Cl <sup>-</sup>                     | 0,870     | 0,986 | 0,953 | 0,936  | 0,049     |
| Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 3,81      | 3,72  | 2,89  | 3,47   | 0,42      |

## Enkeltprofiler NT Build 443

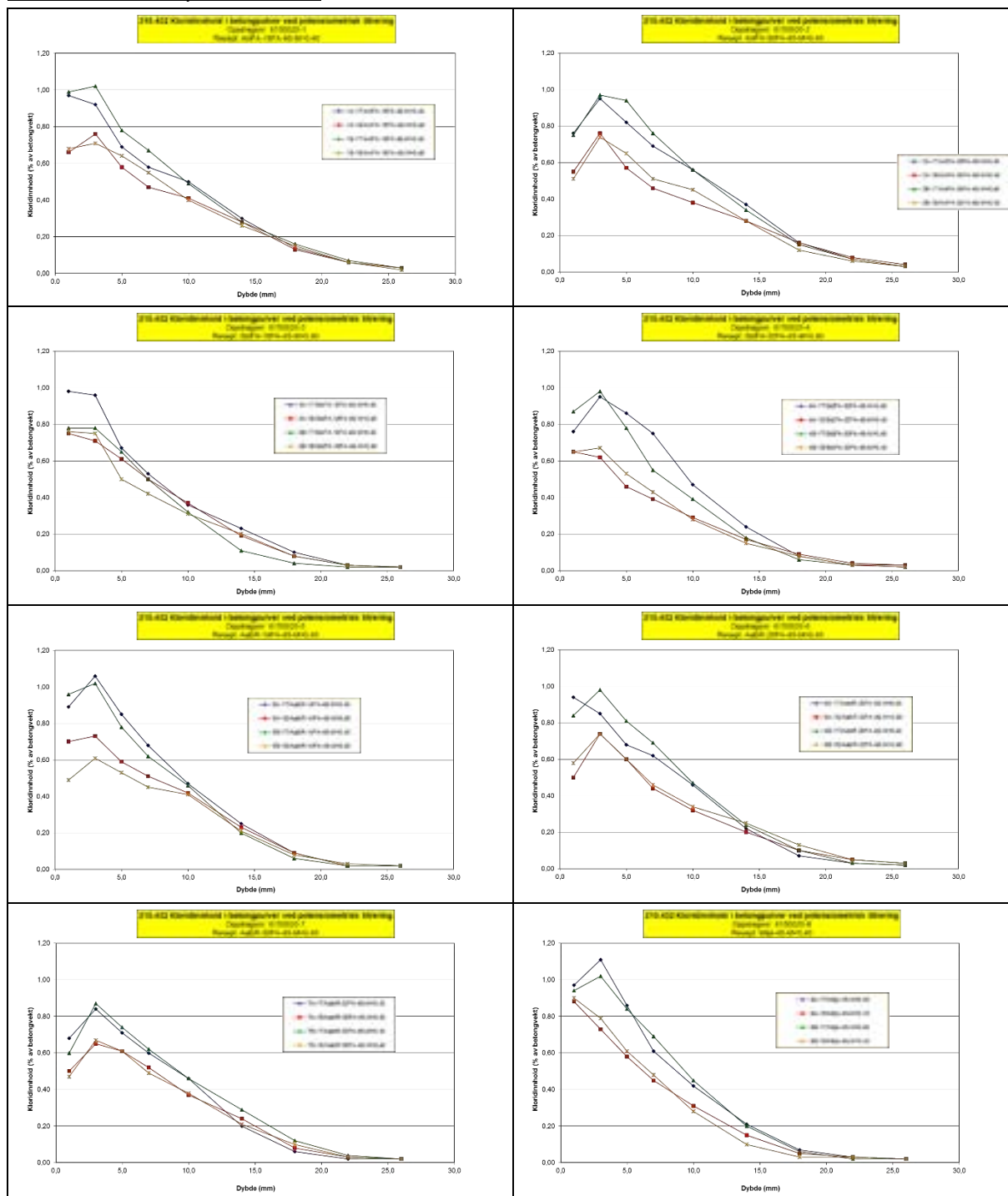


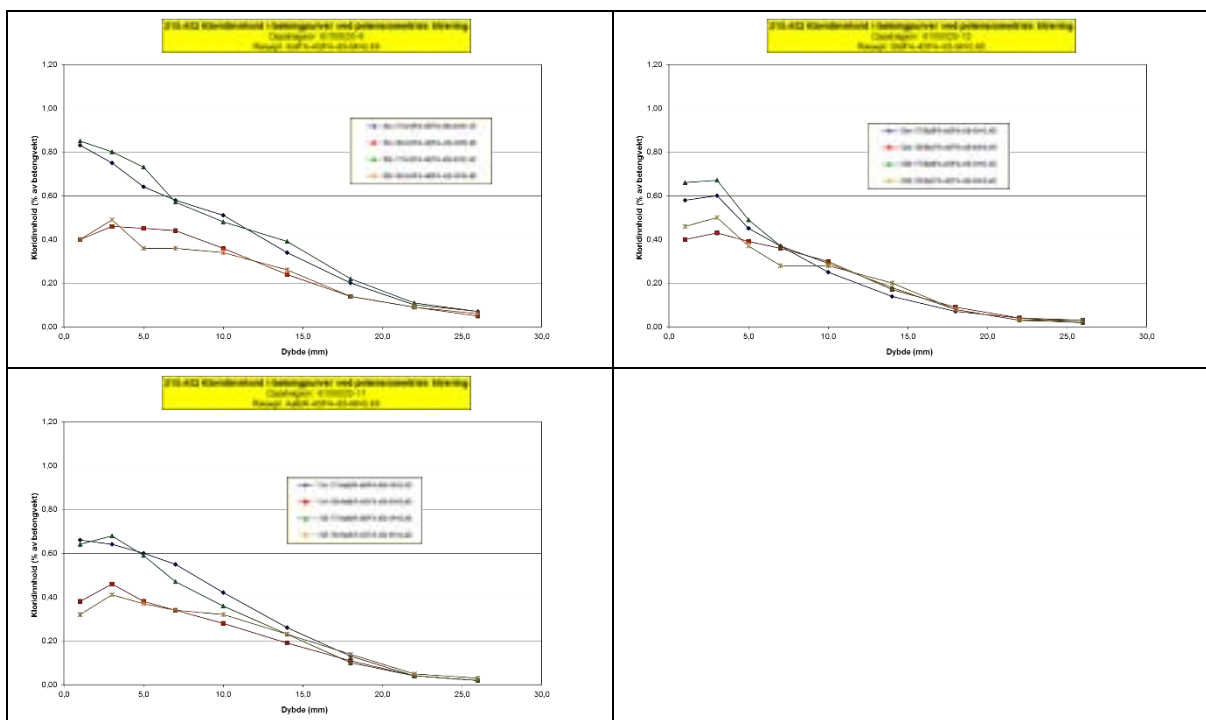
# VEDLEGG 8 Sjøvannseksponering

## 1 års eksponering

(A=prøve A, B=prøve B, T=støpt flate, B=forskalt flate)

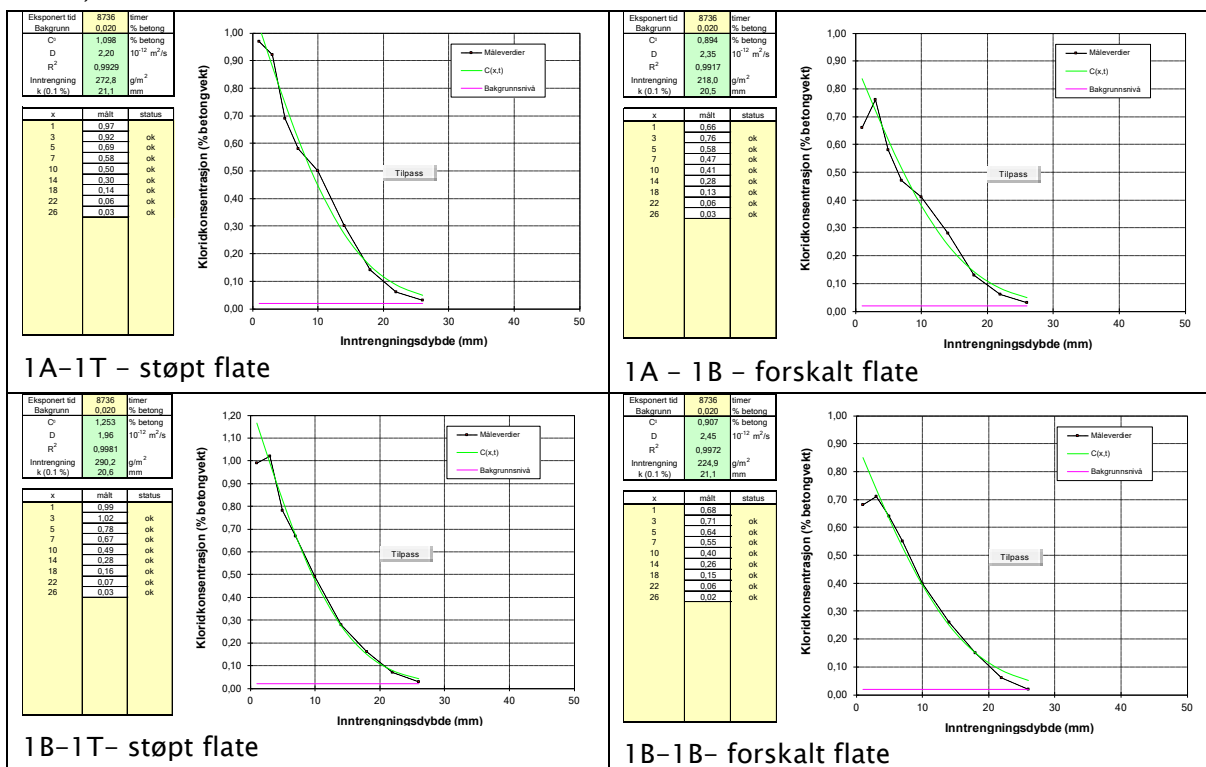
## Alle målte kloridprofiler, 1 år





Enkeltprofiler, målt og beregnet, 1 år:

AnIFA, 1 år

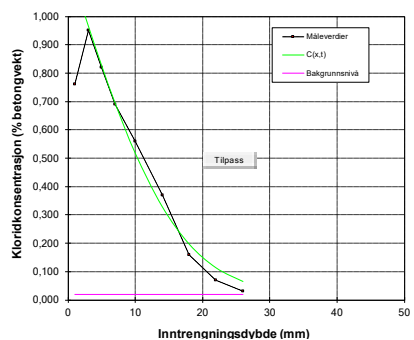


## AnIFA30, 1 år

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Eksponent tid  | 8760   | limer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C'             | 1.188  | % betong                        |
| D              | 2.49   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9959 |                                 |
| Inntrengning   | 288.8  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 22.8   | mm                              |

| x  | målt  | status |
|----|-------|--------|
| 1  | 0.760 |        |
| 3  | 0.950 | ok     |
| 5  | 0.820 | ok     |
| 7  | 0.650 | ok     |
| 10 | 0.560 | ok     |
| 14 | 0.370 | ok     |
| 18 | 0.160 | ok     |
| 22 | 0.070 | ok     |
| 26 | 0.030 | ok     |

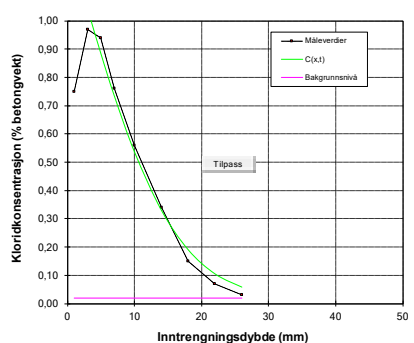


2A-1T – støpt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Eksponent tid  | 8760   | limer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C'             | 1.293  | % betong                        |
| D              | 2.29   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9940 |                                 |
| Inntrengning   | 256.8  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 22.3   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.75 |        |
| 3  | 0.97 | ok     |
| 5  | 0.94 | ok     |
| 7  | 0.76 | ok     |
| 10 | 0.56 | ok     |
| 14 | 0.34 | ok     |
| 18 | 0.15 | ok     |
| 22 | 0.07 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |

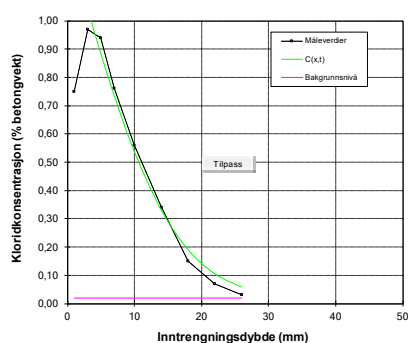


2B-1T – støpt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Eksponent tid  | 8760   | limer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C'             | 0.926  | % betong                        |
| D              | 2.43   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9942 |                                 |
| Inntrengning   | 215.5  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 21.1   | mm                              |

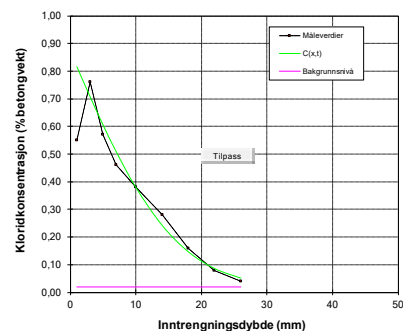
| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.51 |        |
| 3  | 0.74 | ok     |
| 5  | 0.65 | ok     |
| 7  | 0.51 | ok     |
| 10 | 0.45 | ok     |
| 14 | 0.28 | ok     |
| 18 | 0.12 | ok     |
| 22 | 0.06 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |



|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Eksponent tid  | 8760   | limer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C'             | 0.871  | % betong                        |
| D              | 2.46   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9908 |                                 |
| Inntrengning   | 210.7  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 20.9   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.65 |        |
| 3  | 0.75 | ok     |
| 5  | 0.57 | ok     |
| 7  | 0.46 | ok     |
| 10 | 0.38 | ok     |
| 14 | 0.28 | ok     |
| 18 | 0.16 | ok     |
| 22 | 0.08 | ok     |
| 26 | 0.04 | ok     |

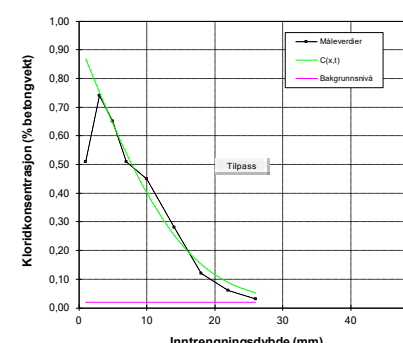


2A-1B – forskalt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Eksponent tid  | 8760   | limer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C'             | 0.926  | % betong                        |
| D              | 2.43   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9942 |                                 |
| Inntrengning   | 215.5  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 21.1   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.51 |        |
| 3  | 0.74 | ok     |
| 5  | 0.65 | ok     |
| 7  | 0.51 | ok     |
| 10 | 0.45 | ok     |
| 14 | 0.28 | ok     |
| 18 | 0.12 | ok     |
| 22 | 0.06 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |



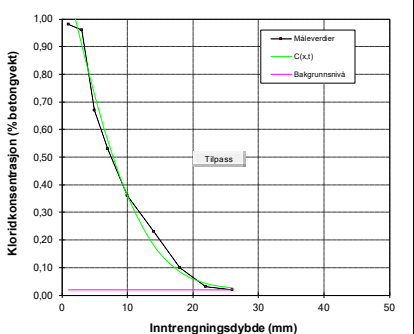
2B-1T – forskalt flate

## StdFA, 1 år

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Eksponent tid  | 9096   | limer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C'             | 1.206  | % betong                        |
| D              | 1.34   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9941 |                                 |
| Inntrengning   | 245.2  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 16.8   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.98 |        |
| 3  | 0.96 | ok     |
| 5  | 0.67 | ok     |
| 7  | 0.53 | ok     |
| 10 | 0.36 | ok     |
| 14 | 0.23 | ok     |
| 18 | 0.10 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

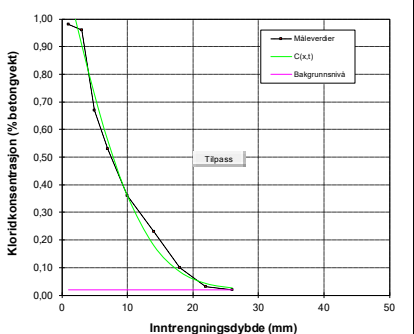


3A-1T – støpt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Eksponent tid  | 9096   | limer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C'             | 1.087  | % betong                        |
| D              | 1.21   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9975 |                                 |
| Inntrengning   | 197.3  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 15.6   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.78 |        |
| 3  | 0.78 | ok     |
| 5  | 0.65 | ok     |
| 7  | 0.50 | ok     |
| 10 | 0.32 | ok     |
| 14 | 0.11 | ok     |
| 18 | 0.04 | ok     |
| 22 | 0.02 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

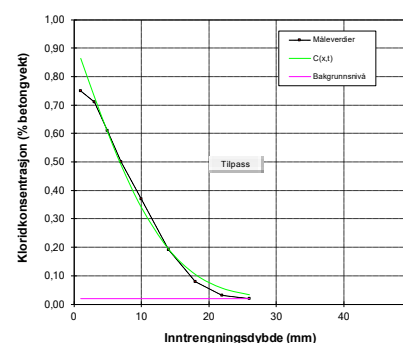


3B-1T – støpt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Eksponent tid  | 9096   | limer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C'             | 0.931  | % betong                        |
| D              | 1.25   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9976 |                                 |
| Inntrengning   | 206.4  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 18.0   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.75 |        |
| 3  | 0.71 | ok     |
| 5  | 0.61 | ok     |
| 7  | 0.50 | ok     |
| 10 | 0.37 | ok     |
| 14 | 0.19 | ok     |
| 18 | 0.08 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

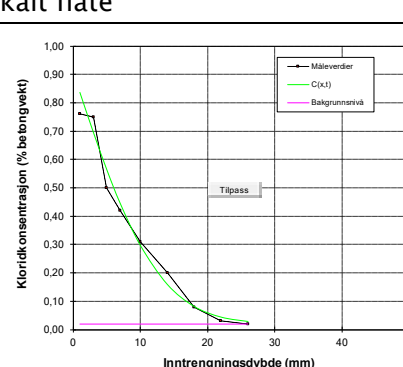


3A-1B – forskalt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Eksponent tid  | 9096   | limer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C'             | 0.909  | % betong                        |
| D              | 1.49   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9895 |                                 |
| Inntrengning   | 192.9  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 16.4   | mm                              |

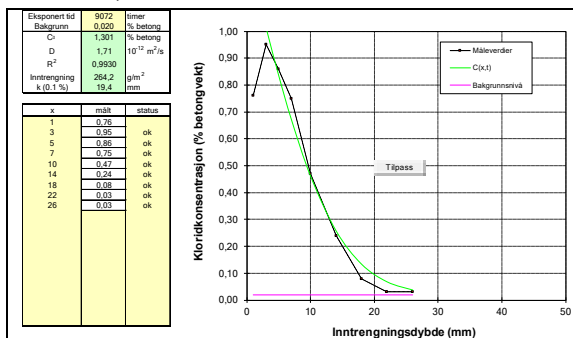
  

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.75 |        |
| 3  | 0.75 | ok     |
| 5  | 0.50 | ok     |
| 7  | 0.42 | ok     |
| 10 | 0.31 | ok     |
| 14 | 0.20 | ok     |
| 18 | 0.08 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

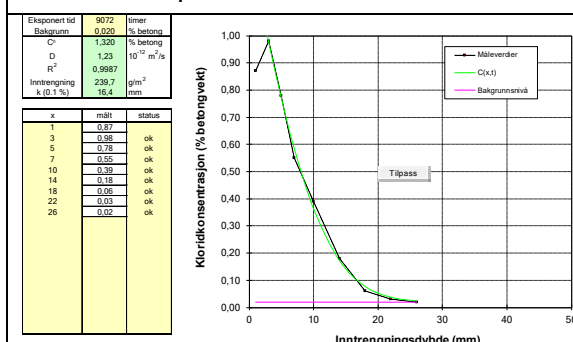


3B-1T – forskalt flate

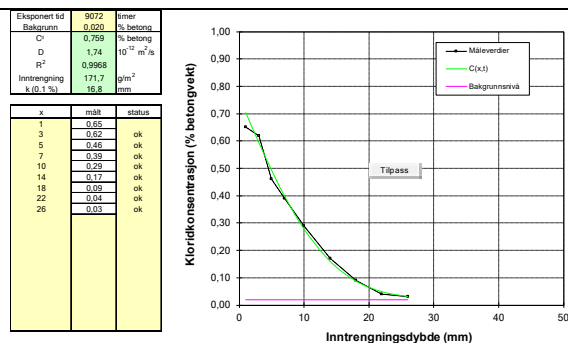
## StdFA30, 1 år



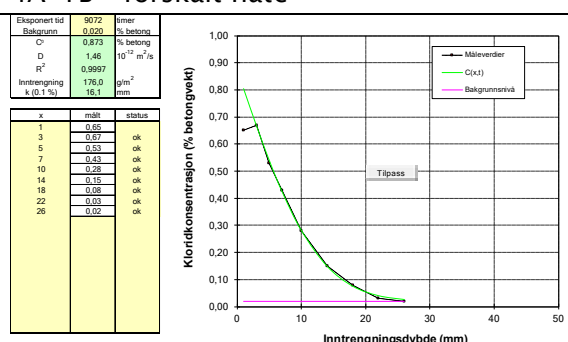
4A-1T – støpt flate



4B-1T – støpt flate

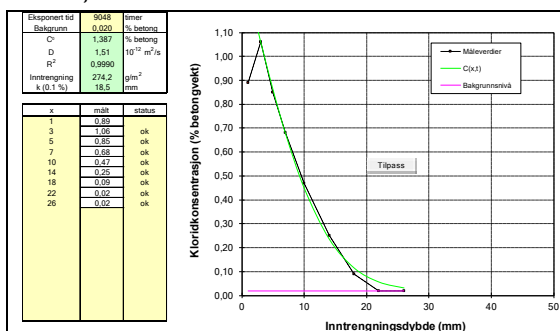


4A-1B – forskalt flate

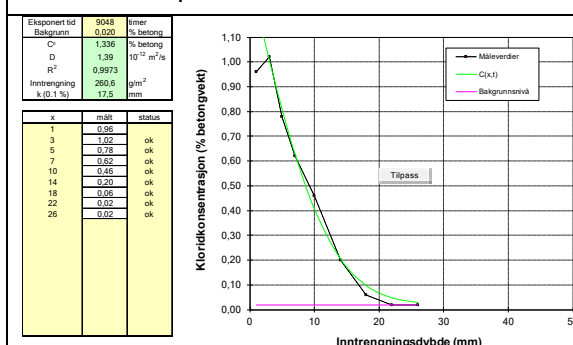


4B-1B – forskalt flate

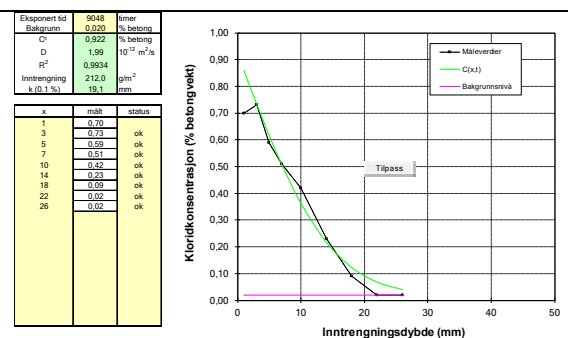
## Aal14, 1 år



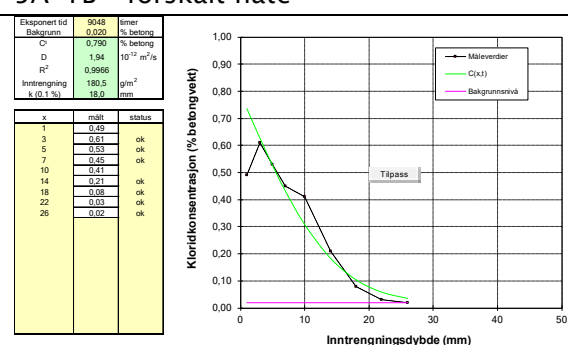
5A-1T – støpt flate



5B-1T – støpt flate



5A-1B – forskalt flate



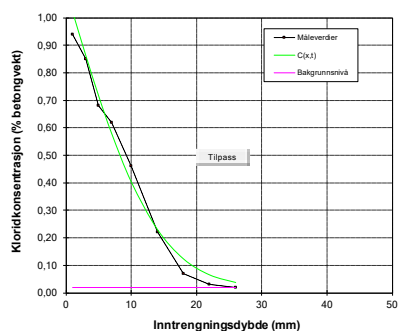
5B-1B – forskalt flate

## Aal20, 1 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8904   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.101  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 1.81   | 0.9835                              |
| R <sup>2</sup> | 0.9935 | g/m <sup>2</sup>                    |
| Inntrengning   | 249.2  | mm                                  |
| k (0.1 %)      | 19.1   |                                     |

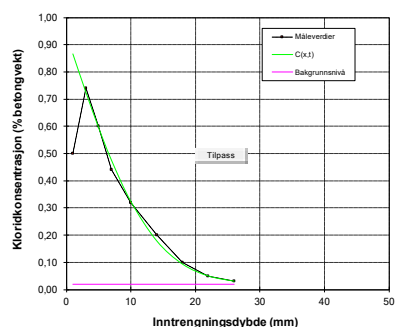
| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.94 | ok     |
| 3  | 0.85 | ok     |
| 5  | 0.58 | ok     |
| 7  | 0.82 | ok     |
| 10 | 0.46 | ok     |
| 14 | 0.22 | ok     |
| 18 | 0.07 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |



|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8904   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 0.937  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 1.84   | 0.9881                              |
| R <sup>2</sup> | 0.9881 | g/m <sup>2</sup>                    |
| Inntrengning   | 185.0  | mm                                  |
| k (0.1 %)      | 17.5   |                                     |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.50 | ok     |
| 3  | 0.48 | ok     |
| 5  | 0.60 | ok     |
| 7  | 0.44 | ok     |
| 10 | 0.32 | ok     |
| 14 | 0.20 | ok     |
| 18 | 0.16 | ok     |
| 22 | 0.05 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |

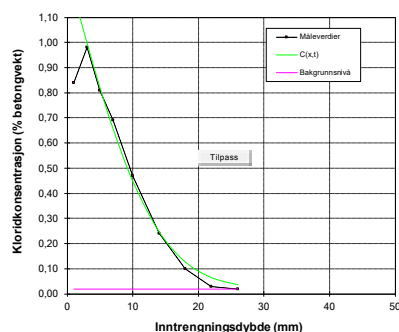


### 6A-1T - støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8904   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.286  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 1.69   | 0.9982                              |
| R <sup>2</sup> | 0.9982 | g/m <sup>2</sup>                    |
| Inntrengning   | 266.0  | mm                                  |
| k (0.1 %)      | 19.2   |                                     |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.84 | ok     |
| 3  | 0.58 | ok     |
| 5  | 0.81 | ok     |
| 7  | 0.69 | ok     |
| 10 | 0.47 | ok     |
| 14 | 0.24 | ok     |
| 18 | 0.10 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

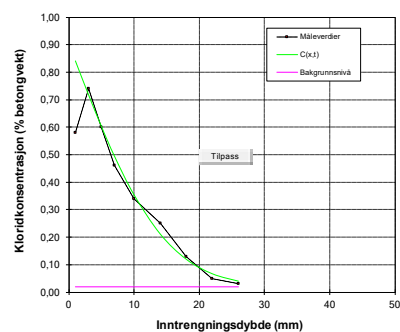


### 6A-1B - forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8904   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 0.904  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 2.00   | 0.9960                              |
| R <sup>2</sup> | 0.9960 | g/m <sup>2</sup>                    |
| Inntrengning   | 201.7  | mm                                  |
| k (0.1 %)      | 19.0   |                                     |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.58 | ok     |
| 3  | 0.74 | ok     |
| 5  | 0.50 | ok     |
| 7  | 0.46 | ok     |
| 10 | 0.34 | ok     |
| 14 | 0.25 | ok     |
| 18 | 0.13 | ok     |
| 22 | 0.05 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |



### 6B-1T - støpt flate

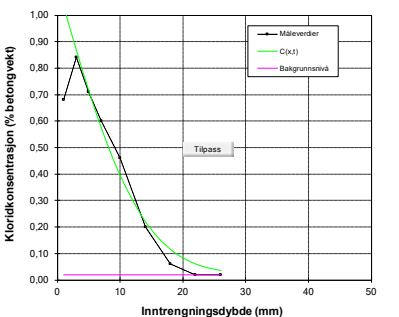
### 6B-1B - forskalt flate

## Aal30, 1 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8880   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.115  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 1.73   | 0.9937                              |
| R <sup>2</sup> | 0.9937 | g/m <sup>2</sup>                    |
| Inntrengning   | 226.9  | mm                                  |
| k (0.1 %)      | 18.7   |                                     |

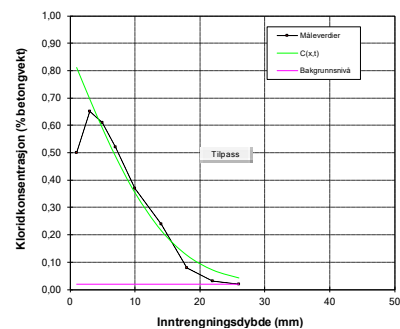
| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.88 | ok     |
| 3  | 0.84 | ok     |
| 5  | 0.71 | ok     |
| 7  | 0.60 | ok     |
| 10 | 0.46 | ok     |
| 14 | 0.20 | ok     |
| 18 | 0.08 | ok     |
| 22 | 0.02 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |



|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8880   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 0.889  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 2.14   | 0.9918                              |
| R <sup>2</sup> | 0.9918 | g/m <sup>2</sup>                    |
| Inntrengning   | 191.8  | mm                                  |
| k (0.1 %)      | 19.4   |                                     |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.50 | ok     |
| 3  | 0.65 | ok     |
| 5  | 0.61 | ok     |
| 7  | 0.52 | ok     |
| 10 | 0.37 | ok     |
| 14 | 0.24 | ok     |
| 18 | 0.08 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |



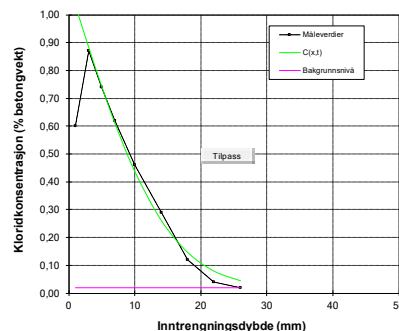
### 7A-1T - støpt flate

### 7A-1B - forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8880   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.110  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 2.06   | 0.9975                              |
| R <sup>2</sup> | 0.9975 | g/m <sup>2</sup>                    |
| Inntrengning   | 241.2  | mm                                  |
| k (0.1 %)      | 20.4   |                                     |

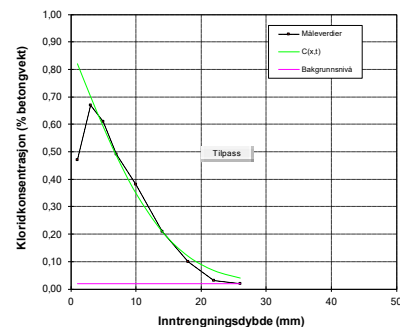
| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.60 | ok     |
| 3  | 0.87 | ok     |
| 5  | 0.74 | ok     |
| 7  | 0.62 | ok     |
| 10 | 0.46 | ok     |
| 14 | 0.29 | ok     |
| 18 | 0.12 | ok     |
| 22 | 0.04 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |



|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8880   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 0.880  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 2.04   | 0.9959                              |
| R <sup>2</sup> | 0.9959 | g/m <sup>2</sup>                    |
| Inntrengning   | 188.3  | mm                                  |
| k (0.1 %)      | 19.1   |                                     |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.47 | ok     |
| 3  | 0.67 | ok     |
| 5  | 0.61 | ok     |
| 7  | 0.49 | ok     |
| 10 | 0.38 | ok     |
| 14 | 0.21 | ok     |
| 18 | 0.10 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |



### 7B-1T - støpt flate

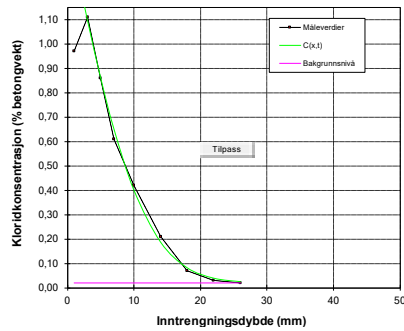
### 7B-1B - forskalt flate

## Miljø, 1 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8832   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.486  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 1.23   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9988 |                                     |
| Inntrengning   | 288.3  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 17.6   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.97 |        |
| 3  | 1.11 | ok     |
| 5  | 0.86 | ok     |
| 7  | 0.81 | ok     |
| 10 | 0.42 | ok     |
| 14 | 0.21 | ok     |
| 18 | 0.07 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

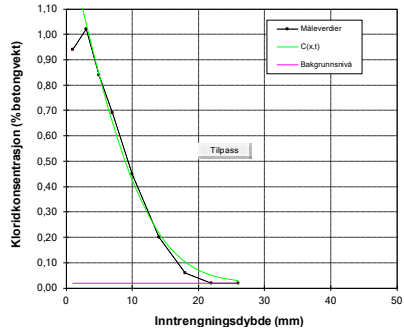


8A-1T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8832   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.378  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 1.45   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9979 |                                     |
| Inntrengning   | 266.2  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 18.1   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.94 |        |
| 3  | 1.02 | ok     |
| 5  | 0.84 | ok     |
| 7  | 0.68 | ok     |
| 10 | 0.45 | ok     |
| 14 | 0.20 | ok     |
| 18 | 0.06 | ok     |
| 22 | 0.02 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

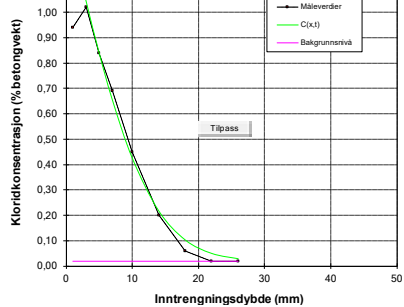


8B-1T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8832   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.38   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 0.9992 | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9992 |                                     |
| Inntrengning   | 199.4  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 16.2   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.88 |        |
| 3  | 0.73 | ok     |
| 5  | 0.58 | ok     |
| 7  | 0.45 | ok     |
| 10 | 0.21 | ok     |
| 14 | 0.15 | ok     |
| 18 | 0.05 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

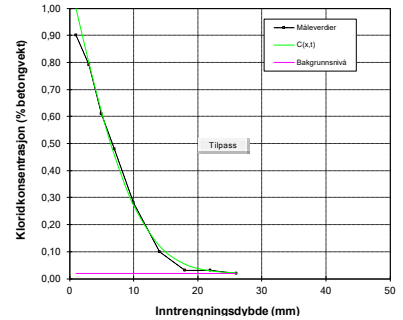


8A-1B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8832   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.102  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 1.10   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9987 |                                     |
| Inntrengning   | 198.1  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.9   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.90 |        |
| 3  | 0.75 | ok     |
| 5  | 0.61 | ok     |
| 7  | 0.48 | ok     |
| 10 | 0.25 | ok     |
| 14 | 0.10 | ok     |
| 18 | 0.03 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |



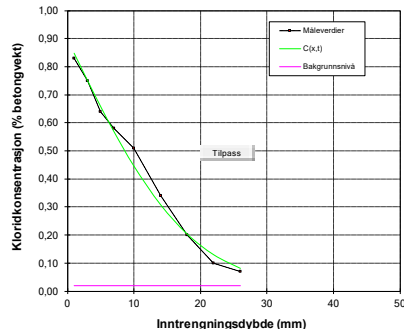
8B-1B – forskalt flate

## LV AnIFA40, 1 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8712   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.887  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 3.27   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9974 |                                     |
| Inntrengning   | 266.2  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 24.2   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.83 |        |
| 3  | 0.75 | ok     |
| 5  | 0.64 | ok     |
| 7  | 0.58 | ok     |
| 10 | 0.41 | ok     |
| 14 | 0.34 | ok     |
| 18 | 0.20 | ok     |
| 22 | 0.10 | ok     |
| 26 | 0.07 | ok     |

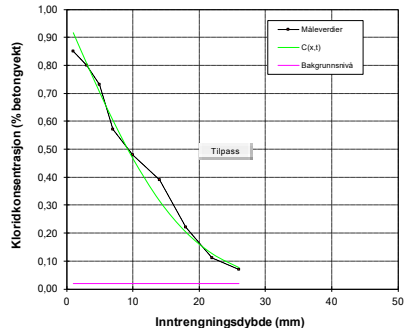


9A-1T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8712   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.971  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 3.05   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9975 |                                     |
| Inntrengning   | 278.9  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 23.9   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.85 |        |
| 3  | 0.80 | ok     |
| 5  | 0.73 | ok     |
| 7  | 0.57 | ok     |
| 10 | 0.48 | ok     |
| 14 | 0.39 | ok     |
| 18 | 0.22 | ok     |
| 22 | 0.11 | ok     |
| 26 | 0.07 | ok     |

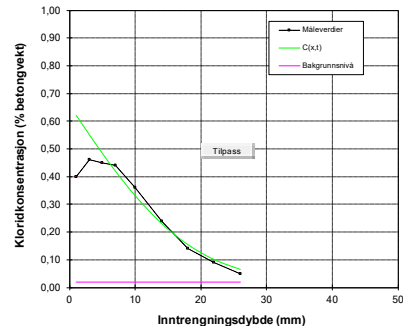


9B-1T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8712   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.656  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 3.32   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9910 |                                     |
| Inntrengning   | 170.9  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 22.1   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.40 |        |
| 3  | 0.46 | ok     |
| 5  | 0.45 | ok     |
| 7  | 0.44 | ok     |
| 10 | 0.36 | ok     |
| 14 | 0.24 | ok     |
| 18 | 0.14 | ok     |
| 22 | 0.09 | ok     |
| 26 | 0.05 | ok     |

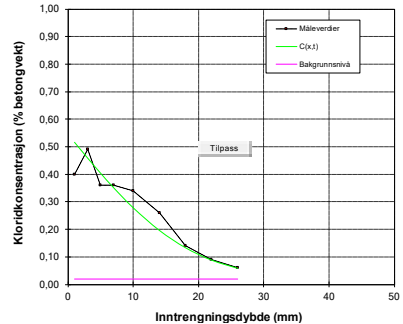


9A-1B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 8712   | limer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.545  | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| D              | 3.38   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9903 |                                     |
| Inntrengning   | 162.1  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 20.9   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.49 |        |
| 3  | 0.49 | ok     |
| 5  | 0.36 | ok     |
| 7  | 0.36 | ok     |
| 10 | 0.34 | ok     |
| 14 | 0.26 | ok     |
| 18 | 0.14 | ok     |
| 22 | 0.09 | ok     |
| 26 | 0.06 | ok     |



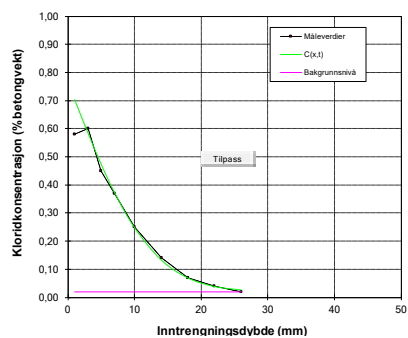
9B-1B – forskalt flate

## LV StdFA40, 1 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksp. tid      | 9072   | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.764  | % betong                            |
| D              | 1.46   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9986 |                                     |
| Inntrengning   | 155.0  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 15.5   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.58 | ok     |
| 3  | 0.60 | ok     |
| 5  | 0.45 | ok     |
| 7  | 0.37 | ok     |
| 10 | 0.25 | ok     |
| 14 | 0.14 | ok     |
| 18 | 0.07 | ok     |
| 22 | 0.04 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

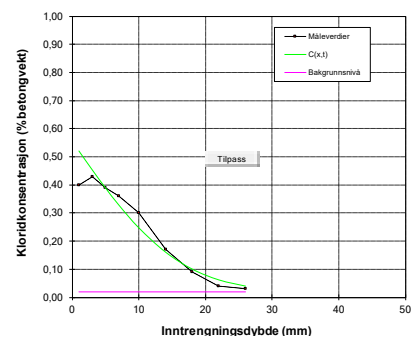


10A-1T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksp. tid      | 9072   | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.554  | % betong                            |
| D              | 2.40   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9940 |                                     |
| Inntrengning   | 139.5  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 17.7   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.40 | ok     |
| 3  | 0.43 | ok     |
| 5  | 0.39 | ok     |
| 7  | 0.36 | ok     |
| 10 | 0.30 | ok     |
| 14 | 0.17 | ok     |
| 18 | 0.09 | ok     |
| 22 | 0.04 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |

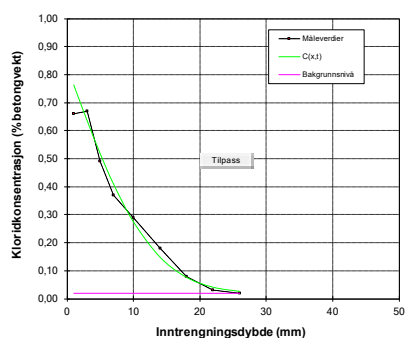


10A-1B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksp. tid      | 9072   | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.827  | % betong                            |
| D              | 1.52   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9937 |                                     |
| Inntrengning   | 174.0  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 15.2   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.66 | ok     |
| 3  | 0.67 | ok     |
| 5  | 0.49 | ok     |
| 7  | 0.37 | ok     |
| 10 | 0.29 | ok     |
| 14 | 0.18 | ok     |
| 18 | 0.08 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

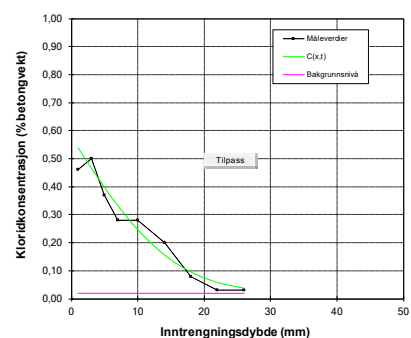


10B-1T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksp. tid      | 9072   | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.576  | % betong                            |
| D              | 2.22   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9784 |                                     |
| Inntrengning   | 139.7  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 17.3   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.46 | ok     |
| 3  | 0.50 | ok     |
| 5  | 0.37 | ok     |
| 7  | 0.28 | ok     |
| 10 | 0.28 | ok     |
| 14 | 0.20 | ok     |
| 18 | 0.08 | ok     |
| 22 | 0.03 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |



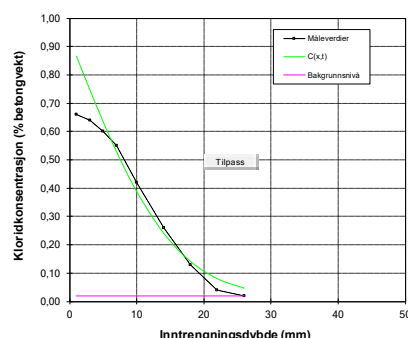
10B-1B – forskalt flate

## LV Aal40, 1 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksp. tid      | 9024   | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.937  | % betong                            |
| D              | 2.23   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9930 |                                     |
| Inntrengning   | 216.4  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 20.2   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.66 | ok     |
| 3  | 0.64 | ok     |
| 5  | 0.60 | ok     |
| 7  | 0.55 | ok     |
| 10 | 0.42 | ok     |
| 14 | 0.26 | ok     |
| 18 | 0.13 | ok     |
| 22 | 0.04 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

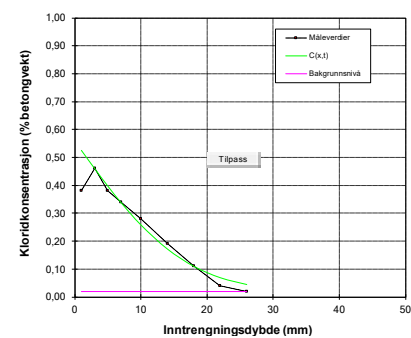


11A-1T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksp. tid      | 9024   | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.558  | % betong                            |
| D              | 2.61   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9940 |                                     |
| Inntrengning   | 139.3  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 18.6   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.38 | ok     |
| 3  | 0.46 | ok     |
| 5  | 0.38 | ok     |
| 7  | 0.34 | ok     |
| 10 | 0.28 | ok     |
| 14 | 0.19 | ok     |
| 18 | 0.11 | ok     |
| 22 | 0.04 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

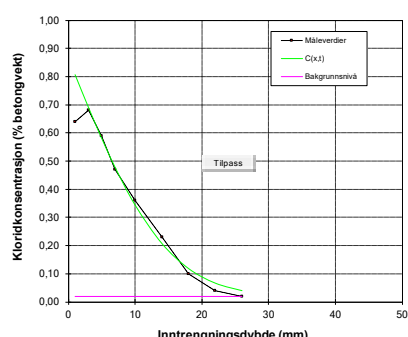


11A-1B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksp. tid      | 9024   | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.867  | % betong                            |
| D              | 2.02   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9977 |                                     |
| Inntrengning   | 199.4  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 18.9   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.64 | ok     |
| 3  | 0.68 | ok     |
| 5  | 0.59 | ok     |
| 7  | 0.47 | ok     |
| 10 | 0.36 | ok     |
| 14 | 0.23 | ok     |
| 18 | 0.10 | ok     |
| 22 | 0.04 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

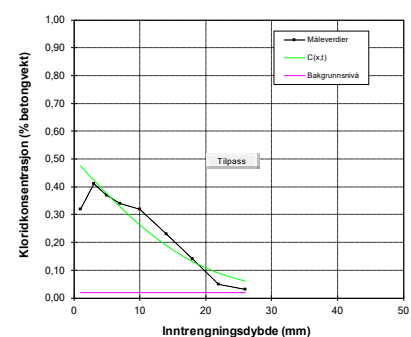


11B-1T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksp. tid      | 9024   | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.501  | % betong                            |
| D              | 3.46   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9852 |                                     |
| Inntrengning   | 143.3  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 20.4   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.32 | ok     |
| 3  | 0.41 | ok     |
| 5  | 0.37 | ok     |
| 7  | 0.34 | ok     |
| 10 | 0.32 | ok     |
| 14 | 0.23 | ok     |
| 18 | 0.14 | ok     |
| 22 | 0.05 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |

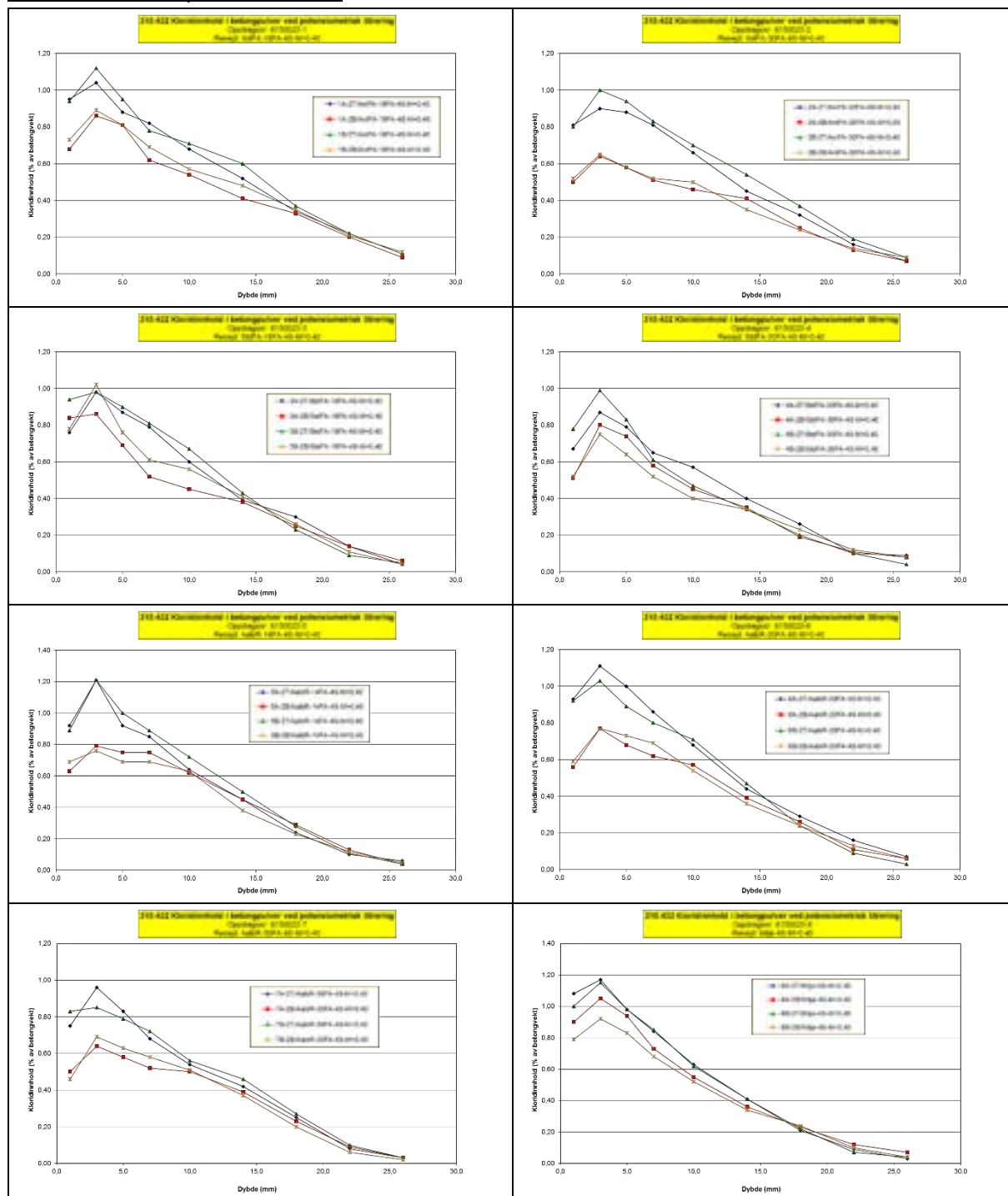


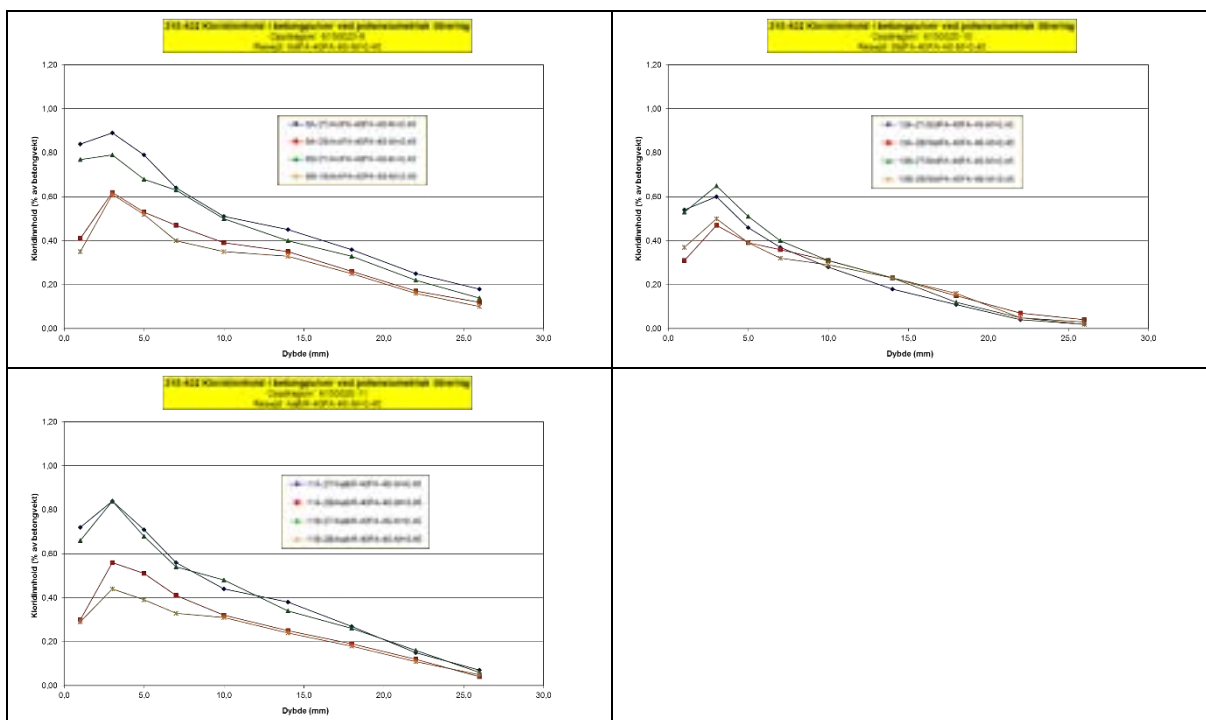
11B-1B – forskalt flate

## 2,5 års eksponering

(A=prøve A, B=prøve B, T=støpt flate, B=forskalt flate)

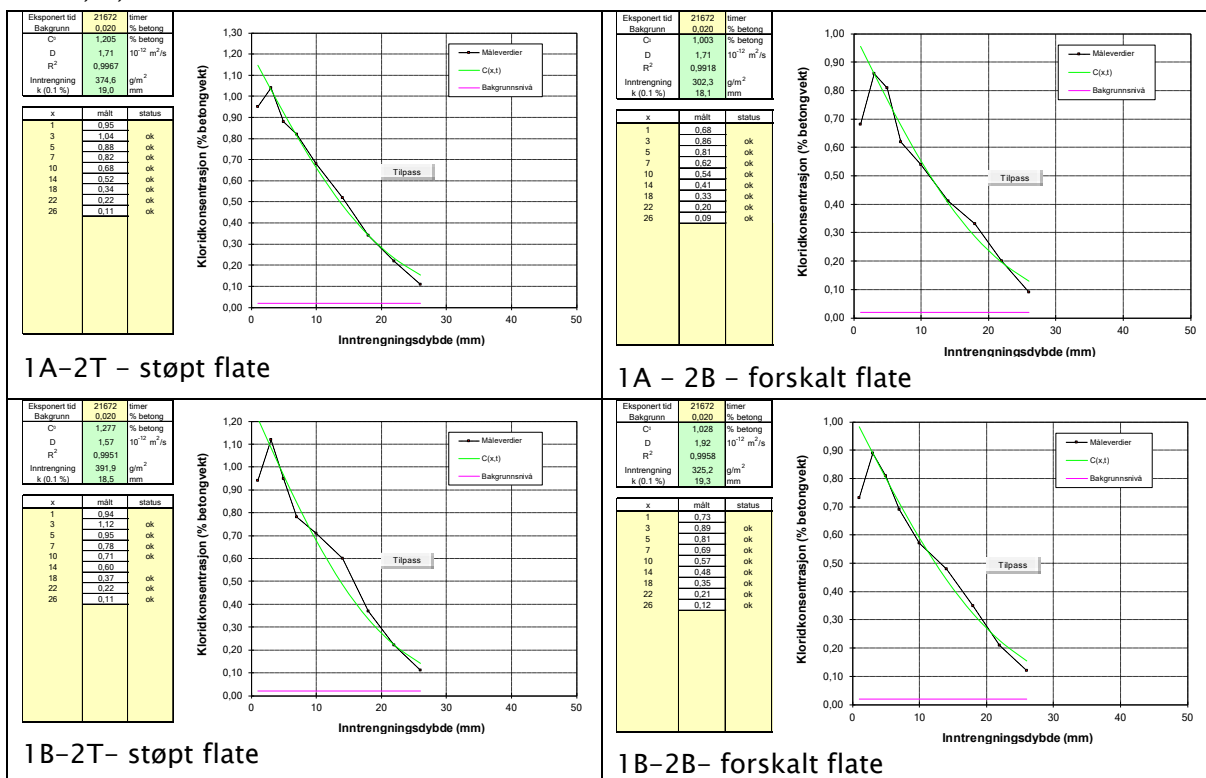
### Alle målte kloridprofiler, 2,5 år



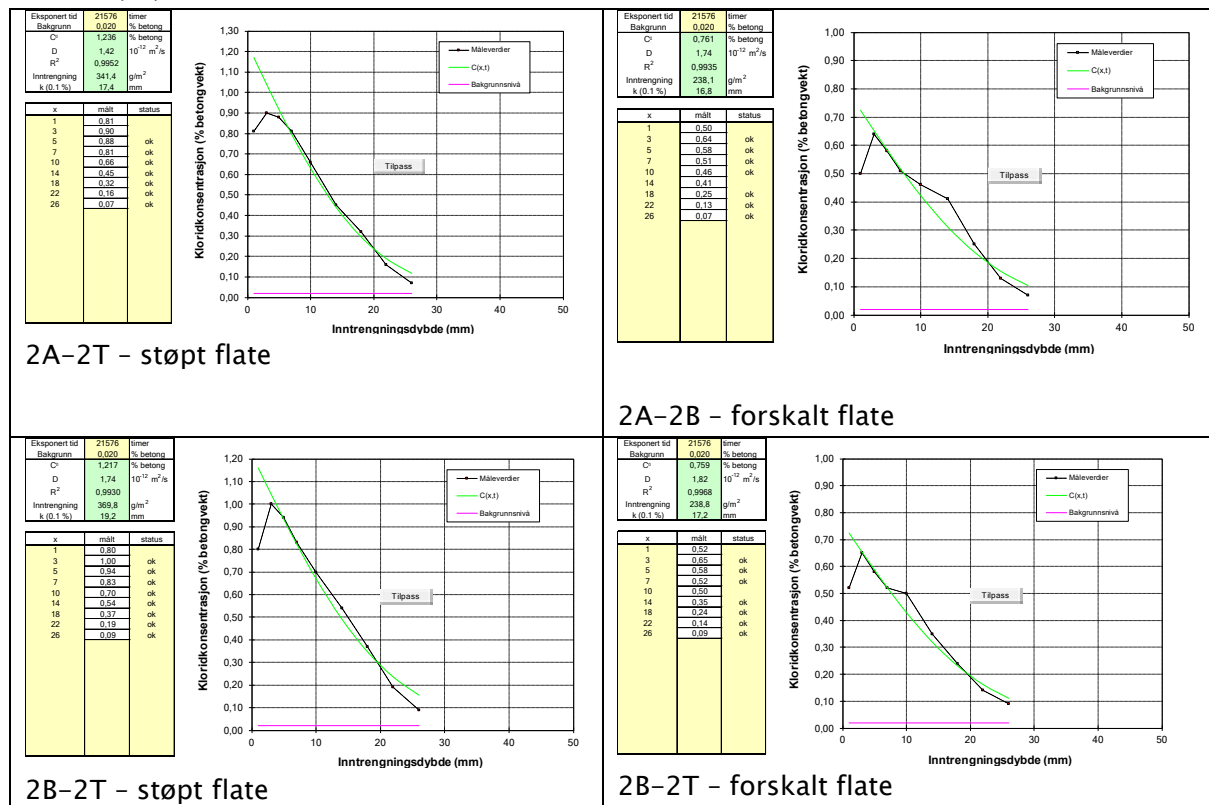


Enkeltprofiler, målt og beregnet, 2,5 år:

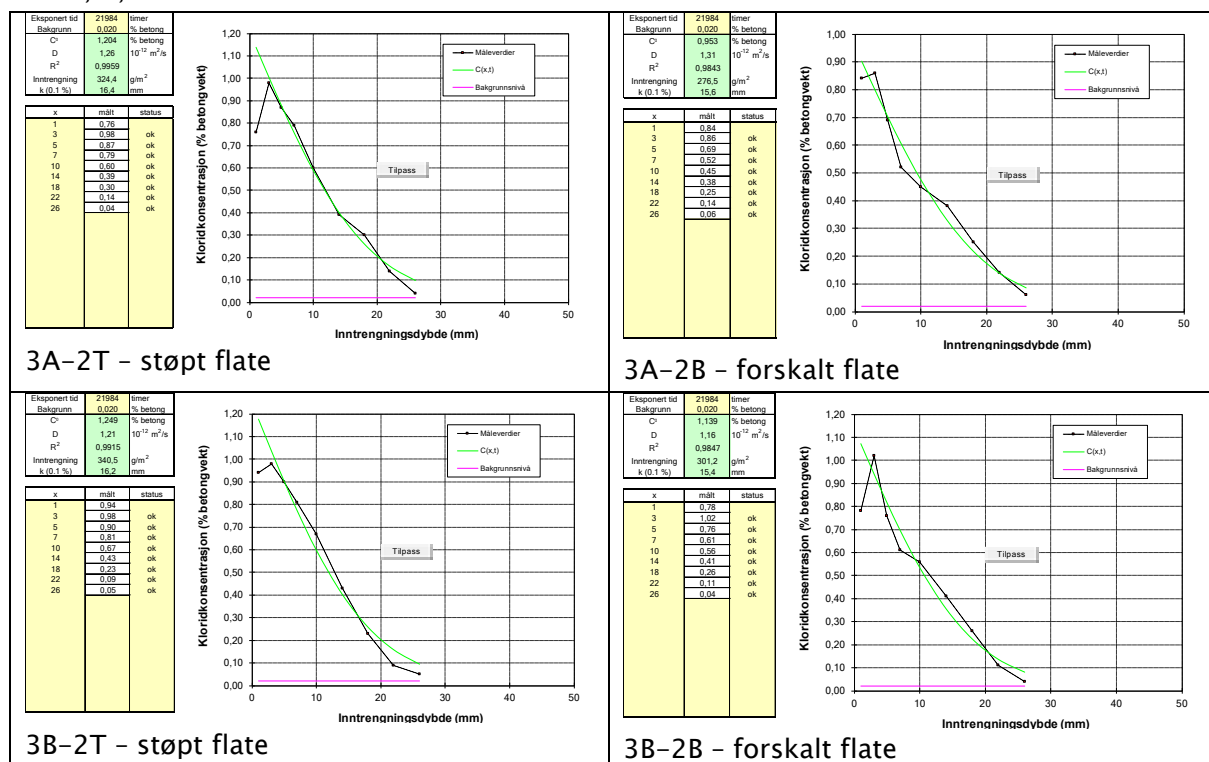
AnIFA, 2,5 år



## AnIFA30, 2,5 år



## StdFA, 2,5 år

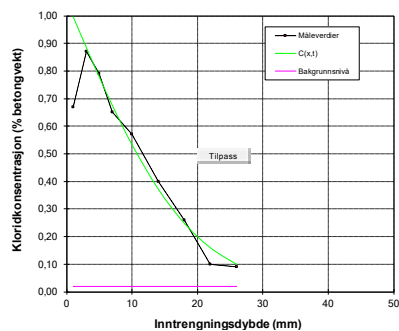


## StdFA30, 2,5 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 22008  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.053  | % betong                            |
| D              | 1.37   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9948 |                                     |
| Inntrengning   | 291.0  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 16.4   | mm                                  |

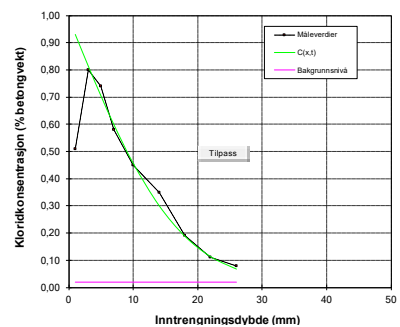
| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.87 |        |
| 3  | 0.87 | ok     |
| 5  | 0.76 | ok     |
| 7  | 0.65 | ok     |
| 10 | 0.57 | ok     |
| 14 | 0.40 | ok     |
| 18 | 0.26 | ok     |
| 22 | 0.19 | ok     |
| 26 | 0.09 | ok     |



|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 22008  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 0.989  | % betong                            |
| D              | 1.11   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9981 |                                     |
| Inntrengning   | 246.5  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.5   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.51 |        |
| 3  | 0.89 | ok     |
| 5  | 0.74 | ok     |
| 7  | 0.58 | ok     |
| 10 | 0.45 | ok     |
| 14 | 0.35 | ok     |
| 18 | 0.19 | ok     |
| 22 | 0.11 | ok     |
| 26 | 0.08 | ok     |

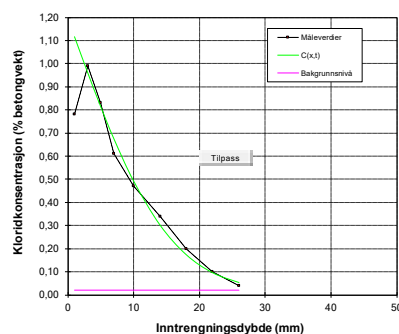


### 4A-2T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 22008  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.196  | % betong                            |
| D              | 0.90   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9951 |                                     |
| Inntrengning   | 282.2  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 13.8   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.78 |        |
| 3  | 0.98 | ok     |
| 5  | 0.83 | ok     |
| 7  | 0.61 | ok     |
| 10 | 0.47 | ok     |
| 14 | 0.34 | ok     |
| 18 | 0.20 | ok     |
| 22 | 0.10 | ok     |
| 26 | 0.04 | ok     |

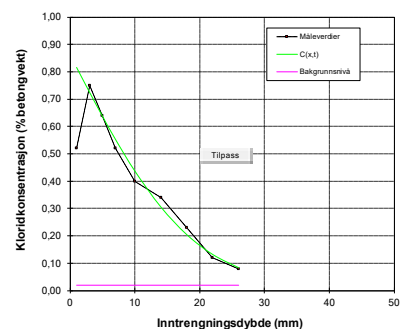


### 4A-2B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 22008  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 0.861  | % betong                            |
| D              | 1.36   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9938 |                                     |
| Inntrengning   | 234.2  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 15.5   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.52 |        |
| 3  | 0.75 | ok     |
| 5  | 0.64 | ok     |
| 7  | 0.52 | ok     |
| 10 | 0.40 | ok     |
| 14 | 0.34 | ok     |
| 18 | 0.23 | ok     |
| 22 | 0.12 | ok     |
| 26 | 0.08 | ok     |



### 4B-2T – støpt flate

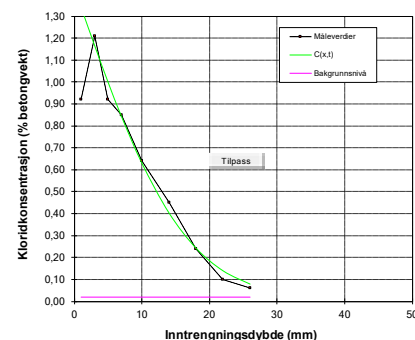
### 4B-2B – forskalt flate

## Aal14, 2,5 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 21984  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.428  | % betong                            |
| D              | 1.03   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9950 |                                     |
| Inntrengning   | 355.2  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 15.3   | mm                                  |

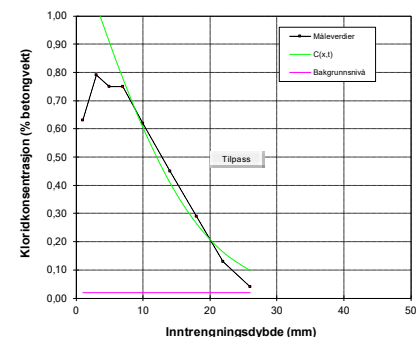
| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.92 |        |
| 3  | 1.21 | ok     |
| 5  | 0.92 | ok     |
| 7  | 0.85 | ok     |
| 10 | 0.64 | ok     |
| 14 | 0.45 | ok     |
| 18 | 0.24 | ok     |
| 22 | 0.10 | ok     |
| 26 | 0.06 | ok     |



|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 21984  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.248  | % betong                            |
| D              | 1.24   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9910 |                                     |
| Inntrengning   | 302.5  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 16.4   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.63 |        |
| 3  | 0.78 | ok     |
| 5  | 0.75 | ok     |
| 7  | 0.75 | ok     |
| 10 | 0.62 | ok     |
| 14 | 0.45 | ok     |
| 18 | 0.29 | ok     |
| 22 | 0.13 | ok     |
| 26 | 0.04 | ok     |

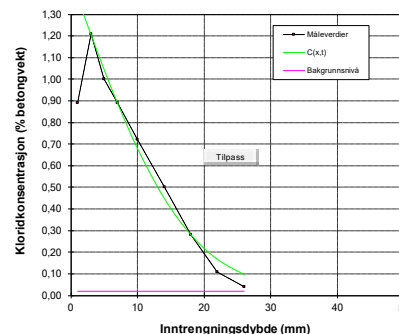


### 5A-2T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 21984  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.460  | % betong                            |
| D              | 1.14   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9956 |                                     |
| Inntrengning   | 376.3  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 16.3   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.89 |        |
| 3  | 1.21 | ok     |
| 5  | 1.00 | ok     |
| 7  | 0.89 | ok     |
| 10 | 0.72 | ok     |
| 14 | 0.50 | ok     |
| 18 | 0.28 | ok     |
| 22 | 0.11 | ok     |
| 26 | 0.04 | ok     |

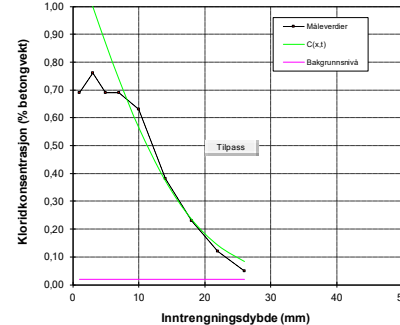


### 5A-2B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Eksponent tid  | 21984  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sup>0</sup> | 1.210  | % betong                            |
| D              | 1.14   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9890 |                                     |
| Inntrengning   | 285.7  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 15.5   | mm                                  |

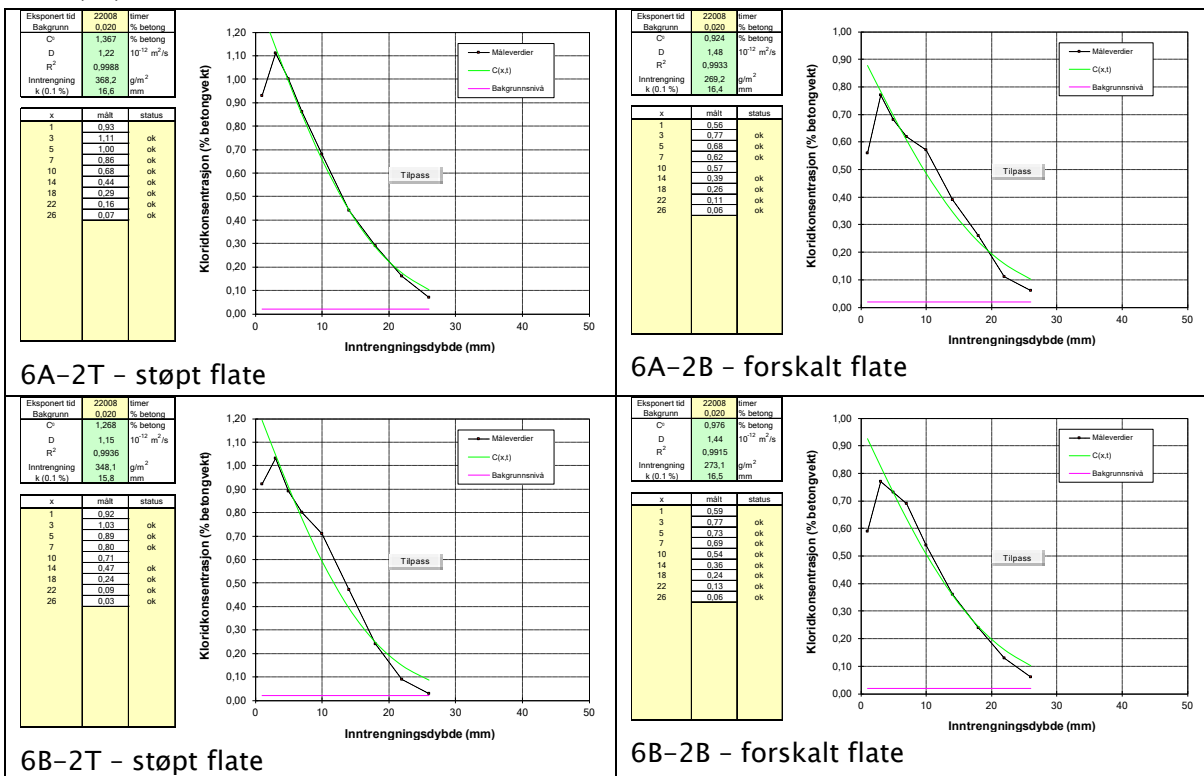
| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.69 |        |
| 3  | 0.78 | ok     |
| 5  | 0.69 | ok     |
| 7  | 0.63 | ok     |
| 10 | 0.63 | ok     |
| 14 | 0.38 | ok     |
| 18 | 0.23 | ok     |
| 22 | 0.12 | ok     |
| 26 | 0.05 | ok     |



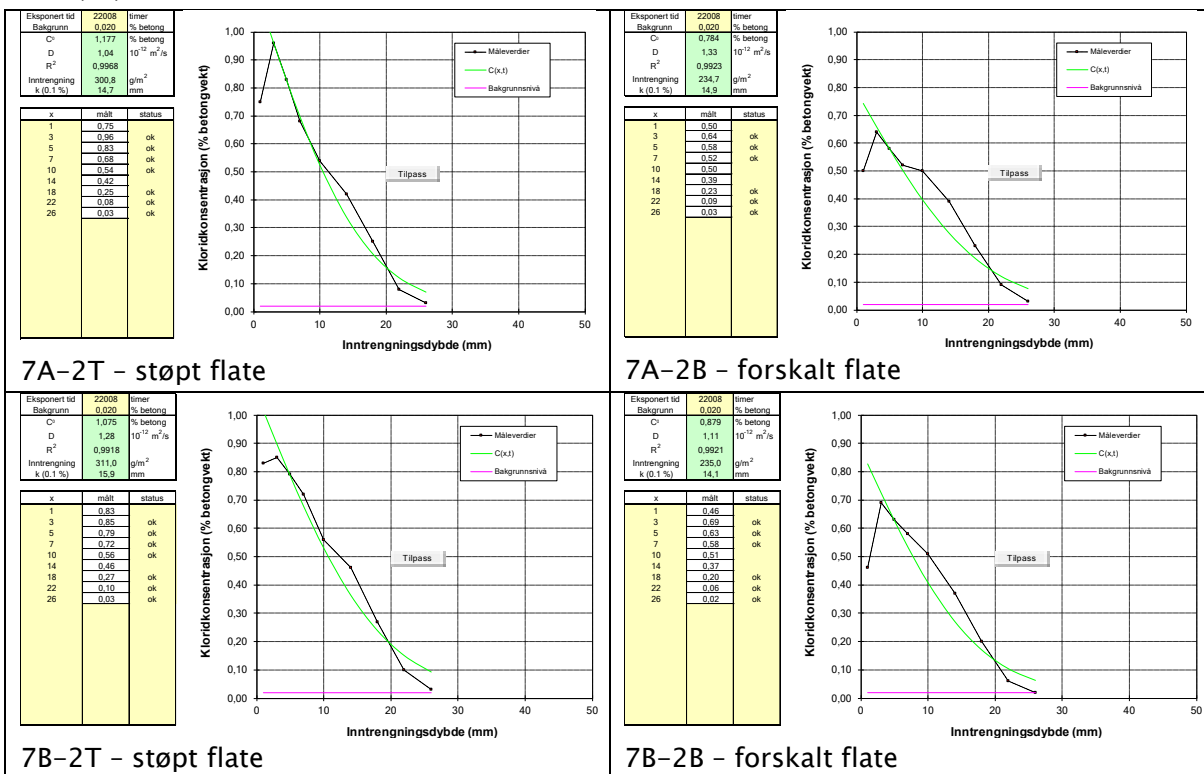
### 5B-2T – støpt flate

### 5B-2B – forskalt flate

## Aal20, 2,5 år



## Aal30, 2,5 år

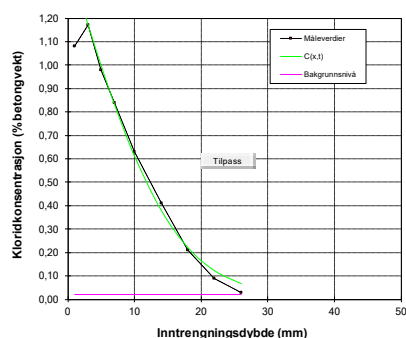


## Miljø, 2,5 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspontid      | 21984  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.452  | % betong                            |
| D              | 0.94   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9998 |                                     |
| Inntrengning   | 358.3  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.7   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 1.08 | ok     |
| 3  | 1.17 | ok     |
| 5  | 0.98 | ok     |
| 7  | 0.84 | ok     |
| 10 | 0.63 | ok     |
| 14 | 0.41 | ok     |
| 18 | 0.21 | ok     |
| 22 | 0.09 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |

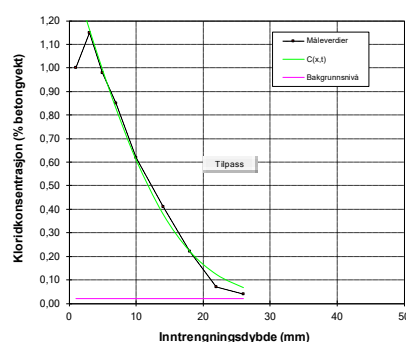


8A-2T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspontid      | 21984  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.439  | % betong                            |
| D              | 0.95   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9981 |                                     |
| Inntrengning   | 351.1  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.8   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 1.00 | ok     |
| 3  | 1.15 | ok     |
| 5  | 0.98 | ok     |
| 7  | 0.85 | ok     |
| 10 | 0.62 | ok     |
| 14 | 0.41 | ok     |
| 18 | 0.22 | ok     |
| 22 | 0.07 | ok     |
| 26 | 0.04 | ok     |

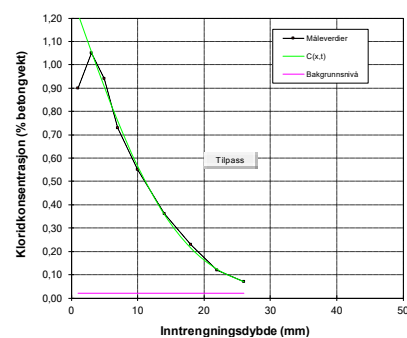


8B-2T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspontid      | 21984  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.300  | % betong                            |
| D              | 0.99   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9998 |                                     |
| Inntrengning   | 322.5  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.8   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.90 | ok     |
| 3  | 1.05 | ok     |
| 5  | 0.94 | ok     |
| 7  | 0.73 | ok     |
| 10 | 0.55 | ok     |
| 14 | 0.36 | ok     |
| 18 | 0.23 | ok     |
| 22 | 0.12 | ok     |
| 26 | 0.07 | ok     |

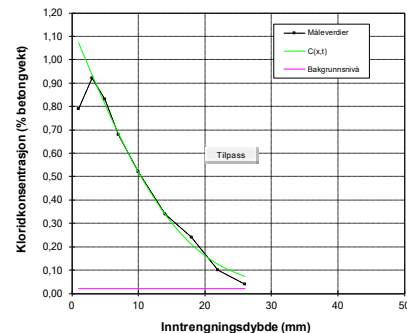


8A-2B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspontid      | 21984  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.141  | % betong                            |
| D              | 1.08   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9979 |                                     |
| Inntrengning   | 293.0  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.9   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.79 | ok     |
| 3  | 0.92 | ok     |
| 5  | 0.83 | ok     |
| 7  | 0.68 | ok     |
| 10 | 0.52 | ok     |
| 14 | 0.34 | ok     |
| 18 | 0.24 | ok     |
| 22 | 0.10 | ok     |
| 26 | 0.04 | ok     |



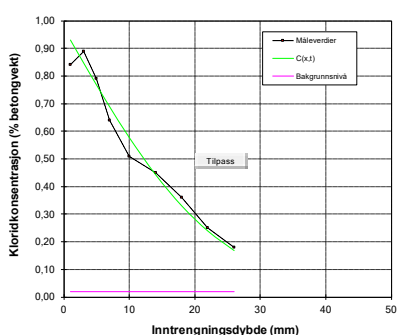
8B-2B – forskalt flate

## LV AnIFA40, 2,5 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspontid      | 21768  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.971  | % betong                            |
| D              | 2.14   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9884 |                                     |
| Inntrengning   | 325.4  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 20.1   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.84 | ok     |
| 3  | 0.89 | ok     |
| 5  | 0.79 | ok     |
| 7  | 0.64 | ok     |
| 10 | 0.51 | ok     |
| 14 | 0.46 | ok     |
| 18 | 0.36 | ok     |
| 22 | 0.25 | ok     |
| 26 | 0.18 | ok     |

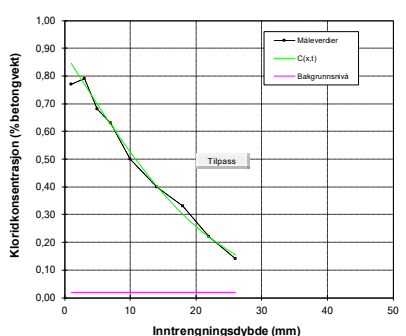


9A-2T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspontid      | 21768  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.883  | % betong                            |
| D              | 2.13   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9968 |                                     |
| Inntrengning   | 297.2  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 19.5   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.77 | ok     |
| 3  | 0.79 | ok     |
| 5  | 0.68 | ok     |
| 7  | 0.63 | ok     |
| 10 | 0.50 | ok     |
| 14 | 0.40 | ok     |
| 18 | 0.33 | ok     |
| 22 | 0.22 | ok     |
| 26 | 0.14 | ok     |

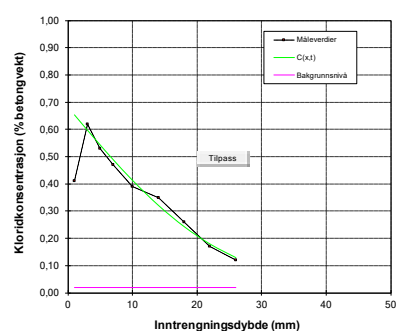


9B-2T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspontid      | 21768  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.680  | % betong                            |
| D              | 2.25   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9933 |                                     |
| Inntrengning   | 218.0  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 18.5   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.41 | ok     |
| 3  | 0.62 | ok     |
| 5  | 0.53 | ok     |
| 7  | 0.47 | ok     |
| 10 | 0.39 | ok     |
| 14 | 0.35 | ok     |
| 18 | 0.26 | ok     |
| 22 | 0.17 | ok     |
| 26 | 0.12 | ok     |

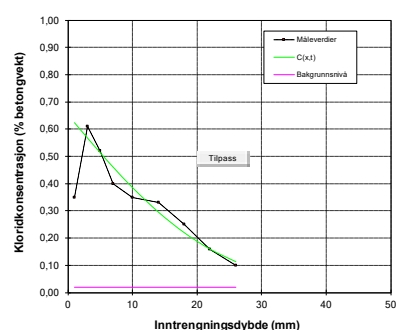


9A-2B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspontid      | 21768  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.652  | % betong                            |
| D              | 2.07   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9782 |                                     |
| Inntrengning   | 200.0  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 17.5   | mm                                  |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.35 | ok     |
| 3  | 0.81 | ok     |
| 5  | 0.52 | ok     |
| 7  | 0.40 | ok     |
| 10 | 0.35 | ok     |
| 14 | 0.33 | ok     |
| 18 | 0.26 | ok     |
| 22 | 0.16 | ok     |
| 26 | 0.10 | ok     |



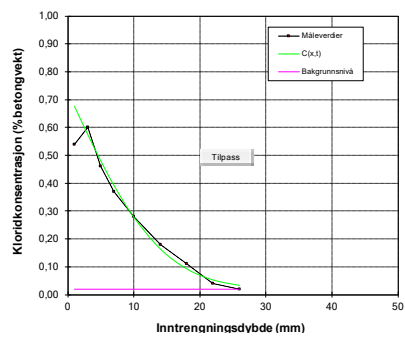
9B-2B – forskalt flate

## LV StdFA40, 2,5 år

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Ekspont tid    | 22008  | timer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C              | 0.728  | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| D              | 0.77   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9962 |                                 |
| Inntrengning   | 163.1  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 11.1   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.54 | ok     |
| 3  | 0.60 | ok     |
| 5  | 0.46 | ok     |
| 7  | 0.37 | ok     |
| 10 | 0.28 | ok     |
| 14 | 0.18 | ok     |
| 18 | 0.11 | ok     |
| 22 | 0.04 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |

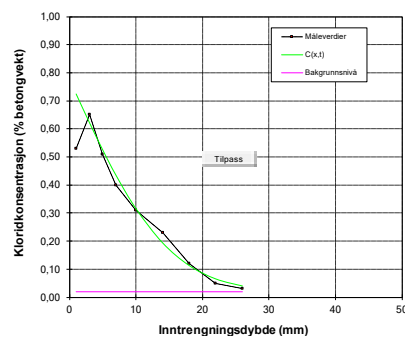


10A-2T – støpt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Ekspont tid    | 22008  | timer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C              | 0.778  | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| D              | 0.85   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9944 |                                 |
| Inntrengning   | 179.0  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 11.9   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.53 | ok     |
| 3  | 0.65 | ok     |
| 5  | 0.51 | ok     |
| 7  | 0.40 | ok     |
| 10 | 0.31 | ok     |
| 14 | 0.23 | ok     |
| 18 | 0.12 | ok     |
| 22 | 0.05 | ok     |
| 26 | 0.03 | ok     |

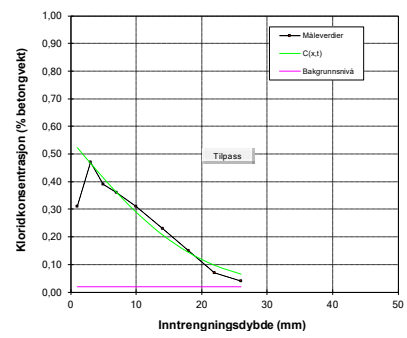


10B-2T – støpt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Ekspont tid    | 22008  | timer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C              | 0.551  | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| D              | 1.43   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9921 |                                 |
| Inntrengning   | 149.8  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 13.7   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.31 | ok     |
| 3  | 0.47 | ok     |
| 5  | 0.76 | ok     |
| 7  | 0.36 | ok     |
| 10 | 0.31 | ok     |
| 14 | 0.23 | ok     |
| 18 | 0.15 | ok     |
| 22 | 0.07 | ok     |
| 26 | 0.04 | ok     |

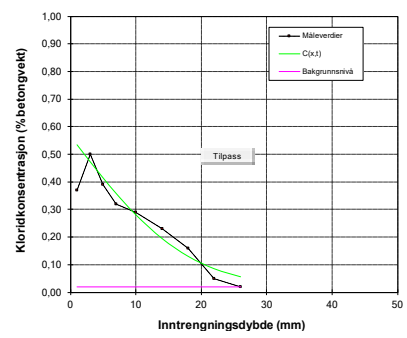


10A-2B – forskalt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Ekspont tid    | 22008  | timer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C              | 0.565  | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| D              | 1.24   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9809 |                                 |
| Inntrengning   | 149.9  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 12.9   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.37 | ok     |
| 3  | 0.50 | ok     |
| 5  | 0.35 | ok     |
| 7  | 0.32 | ok     |
| 10 | 0.29 | ok     |
| 14 | 0.23 | ok     |
| 18 | 0.16 | ok     |
| 22 | 0.05 | ok     |
| 26 | 0.02 | ok     |



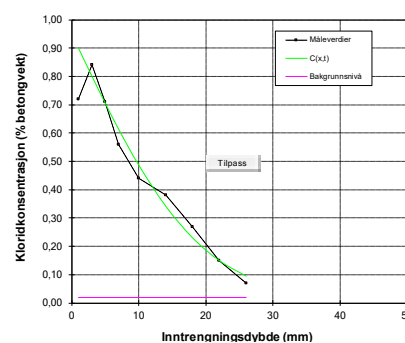
10B-2B – forskalt flate

## LV Aal40, 2,5 år

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Ekspont tid    | 21984  | timer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C              | 0.593  | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| D              | 1.39   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9898 |                                 |
| Inntrengning   | 272.8  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 16.1   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.72 | ok     |
| 3  | 0.64 | ok     |
| 5  | 0.71 | ok     |
| 7  | 0.56 | ok     |
| 10 | 0.44 | ok     |
| 14 | 0.38 | ok     |
| 18 | 0.27 | ok     |
| 22 | 0.15 | ok     |
| 26 | 0.07 | ok     |

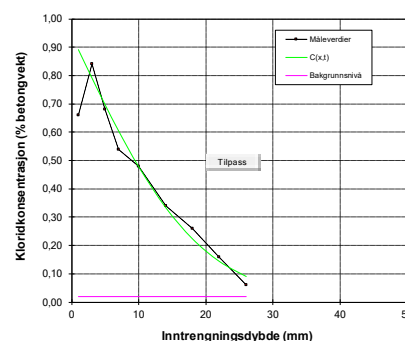


11A-2T – støpt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Ekspont tid    | 21984  | timer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C              | 0.940  | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| D              | 1.37   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9906 |                                 |
| Inntrengning   | 264.7  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 15.9   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.66 | ok     |
| 3  | 0.84 | ok     |
| 5  | 0.68 | ok     |
| 7  | 0.54 | ok     |
| 10 | 0.48 | ok     |
| 14 | 0.34 | ok     |
| 18 | 0.26 | ok     |
| 22 | 0.16 | ok     |
| 26 | 0.06 | ok     |

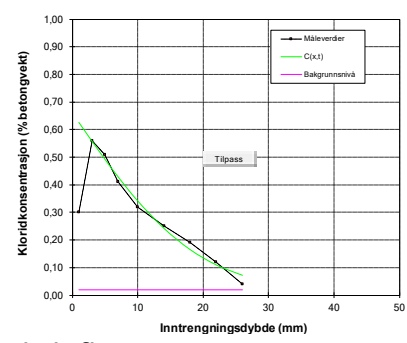


11B-2T – støpt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Ekspont tid    | 21984  | timer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C              | 0.561  | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| D              | 1.40   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9939 |                                 |
| Inntrengning   | 173.7  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 14.2   | mm                              |

| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.35 | ok     |
| 3  | 0.56 | ok     |
| 5  | 0.51 | ok     |
| 7  | 0.41 | ok     |
| 10 | 0.35 | ok     |
| 14 | 0.25 | ok     |
| 18 | 0.19 | ok     |
| 22 | 0.12 | ok     |
| 26 | 0.04 | ok     |

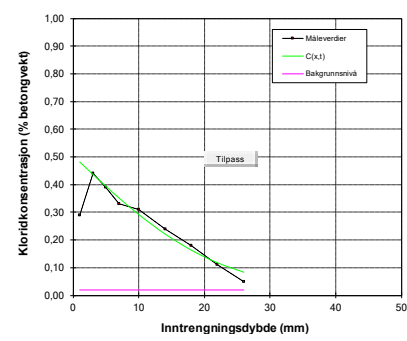


11A-2B – forskalt flate

|                |        |                                 |
|----------------|--------|---------------------------------|
| Ekspont tid    | 21984  | timer                           |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                        |
| C              | 0.595  | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| D              | 1.87   | $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| R <sup>2</sup> | 0.9903 |                                 |
| Inntrengning   | 151.7  | g/m <sup>2</sup>                |
| k (0.1 %)      | 15.2   | mm                              |

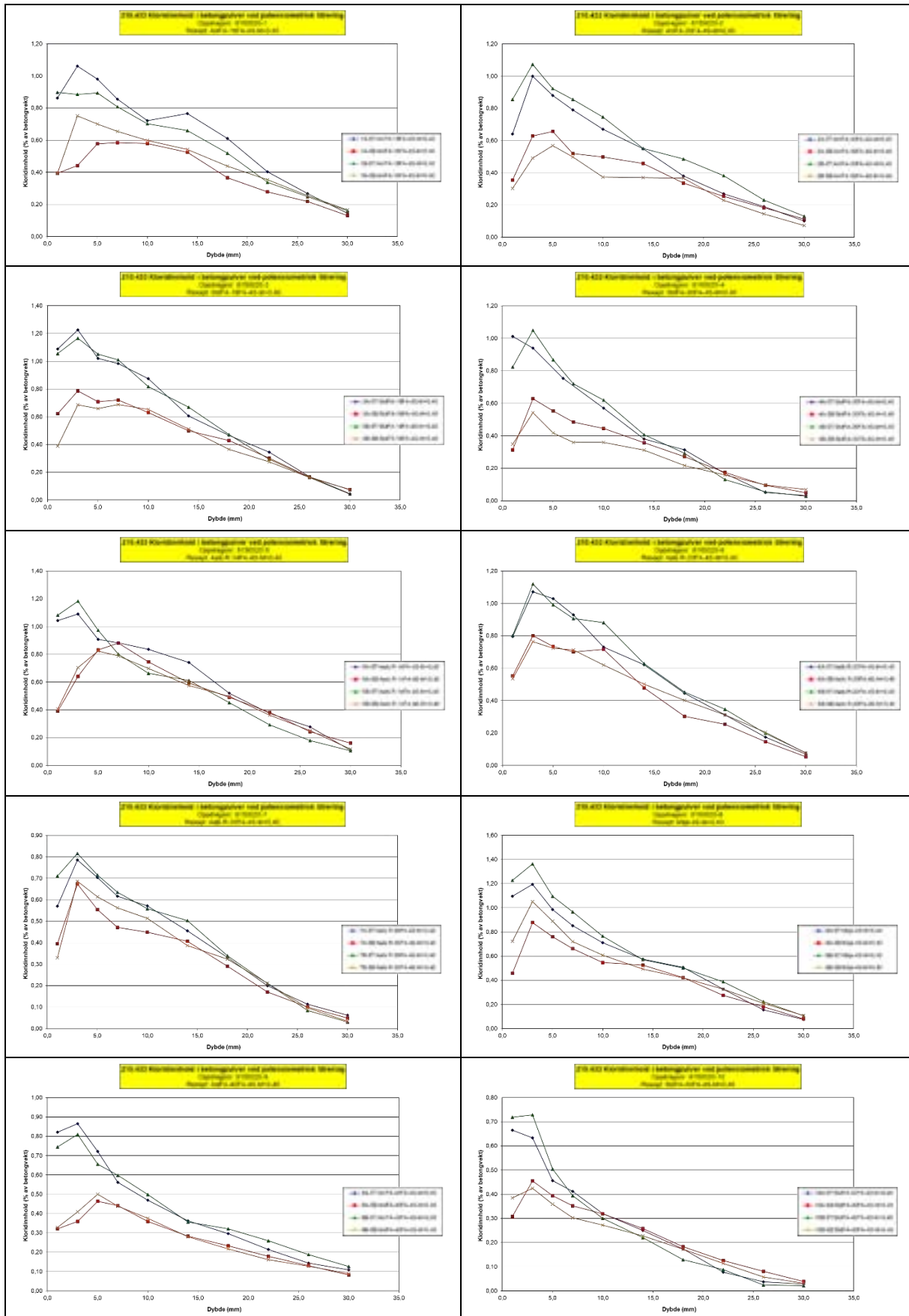
  

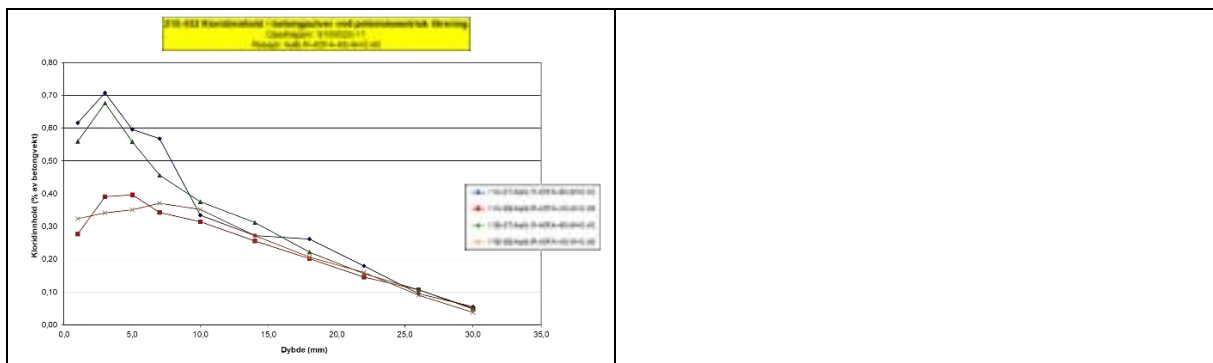
| x  | målt | status |
|----|------|--------|
| 1  | 0.29 | ok     |
| 3  | 0.44 | ok     |
| 5  | 0.39 | ok     |
| 7  | 0.33 | ok     |
| 10 | 0.31 | ok     |
| 14 | 0.23 | ok     |
| 18 | 0.18 | ok     |
| 22 | 0.11 | ok     |
| 26 | 0.05 | ok     |



11B-2B – forskalt flate

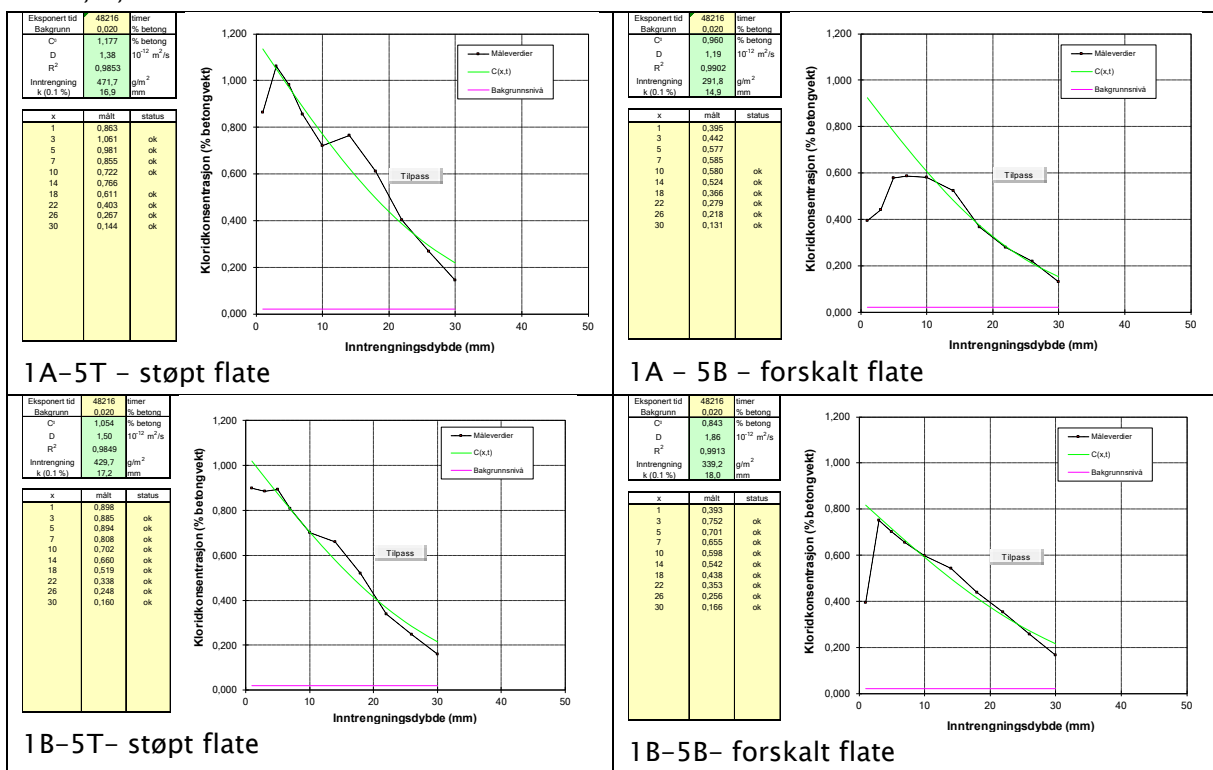
## 5.5 års exponering



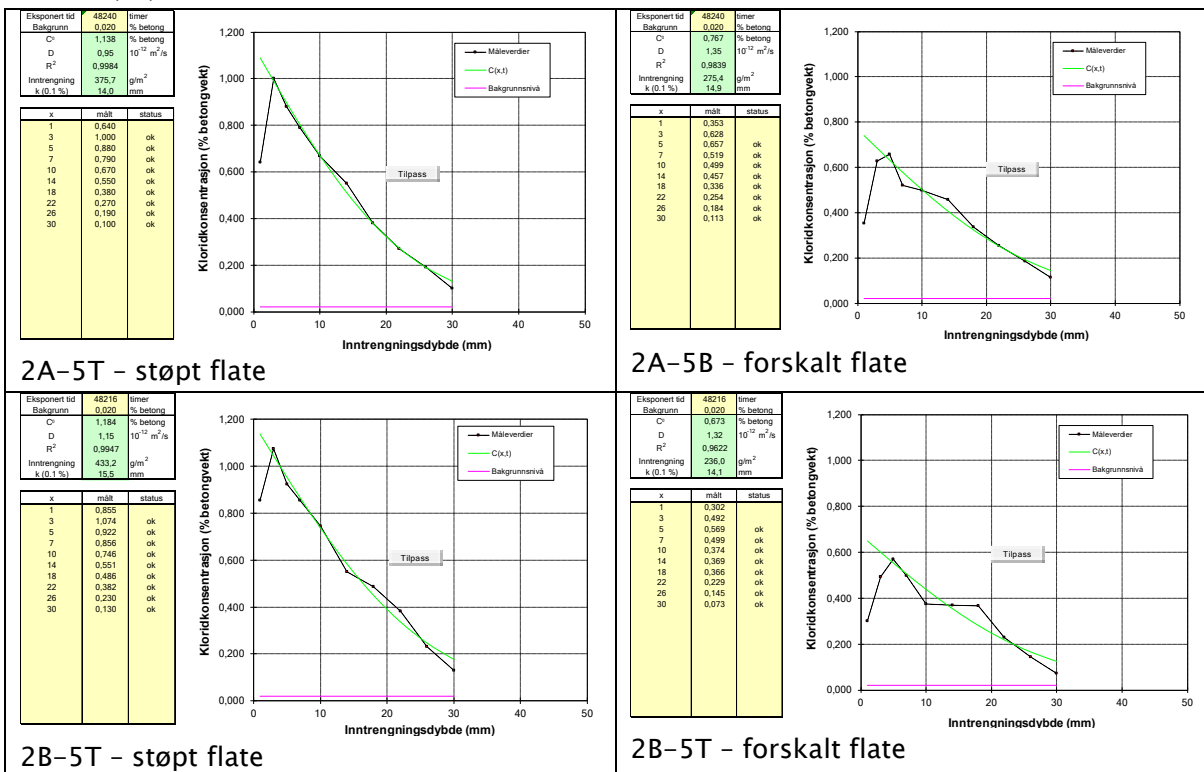


Enkeltprofiler, målt og beregnet, 5,5 år:

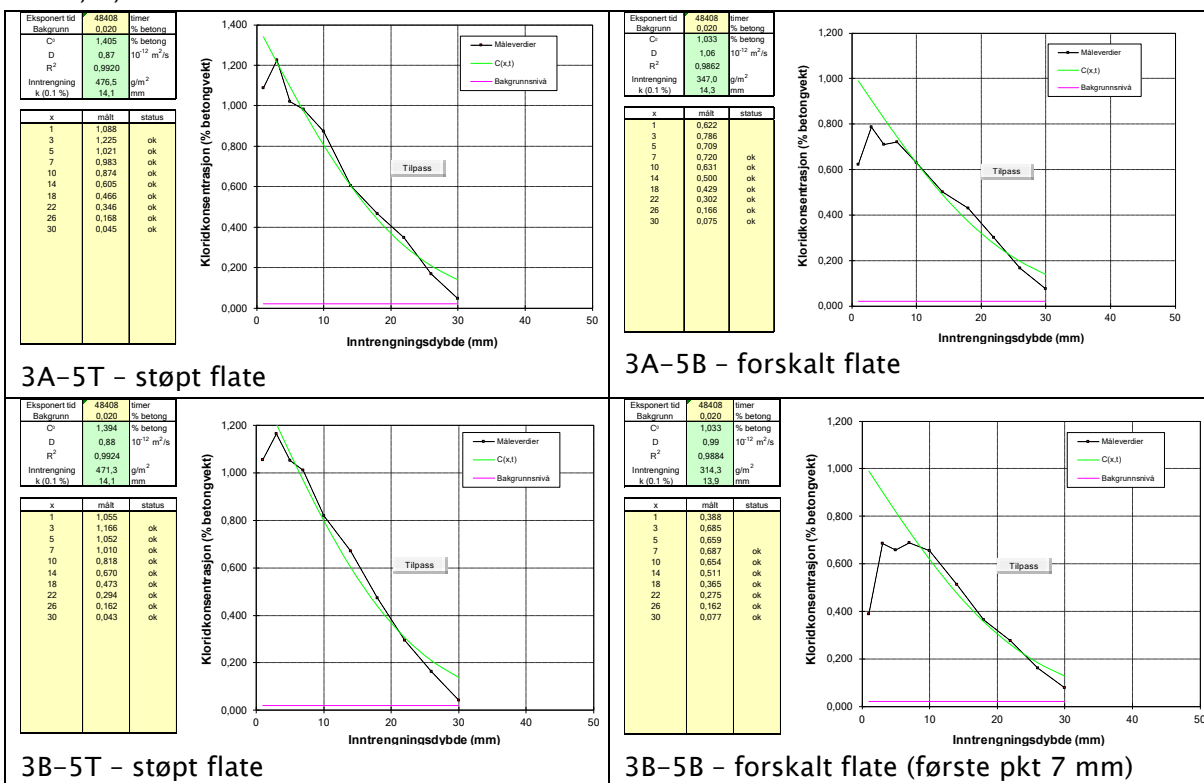
AnIFA, 5,5 år



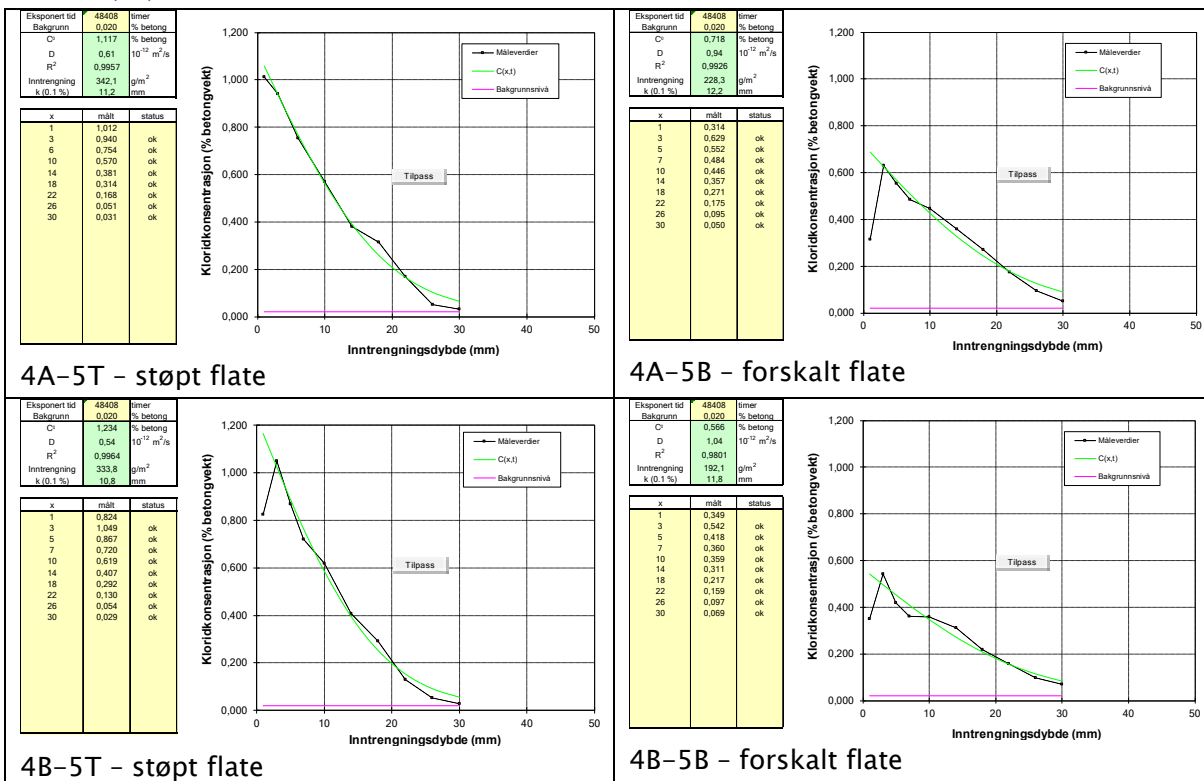
## AnIFA30, 5,5 år



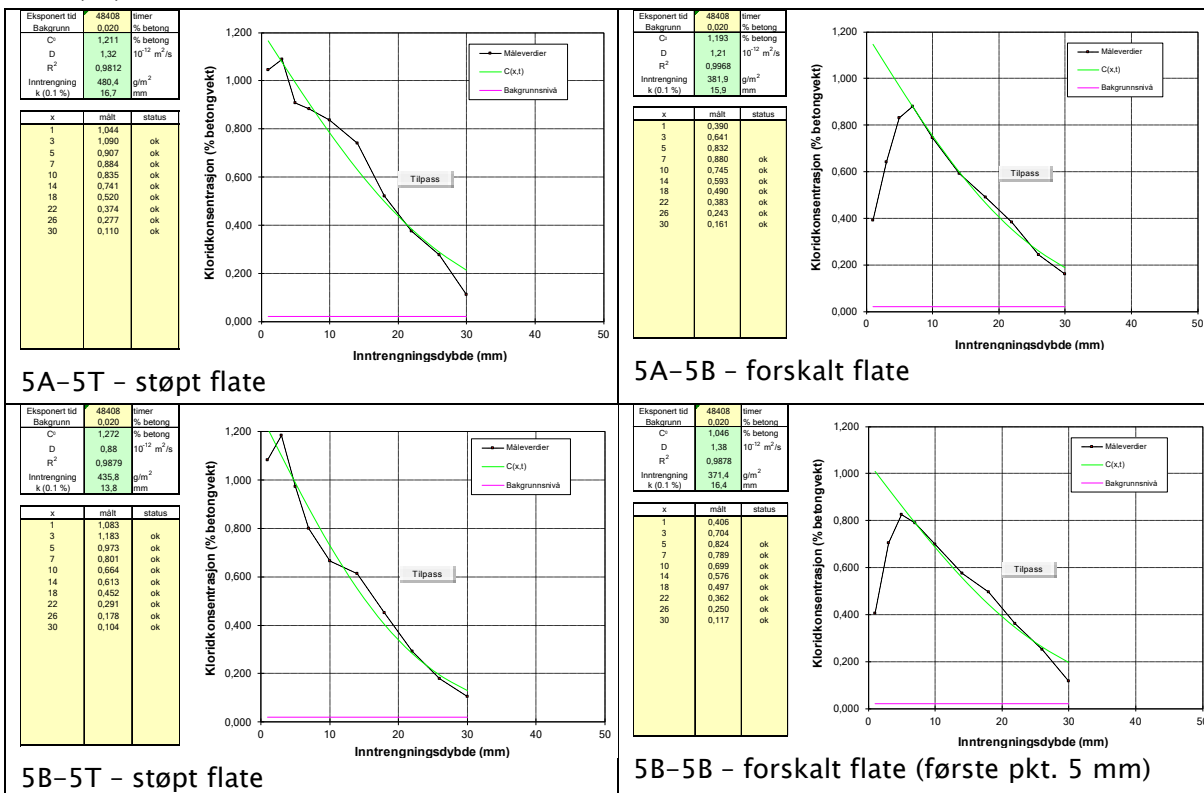
## StdFA, 5,5 år



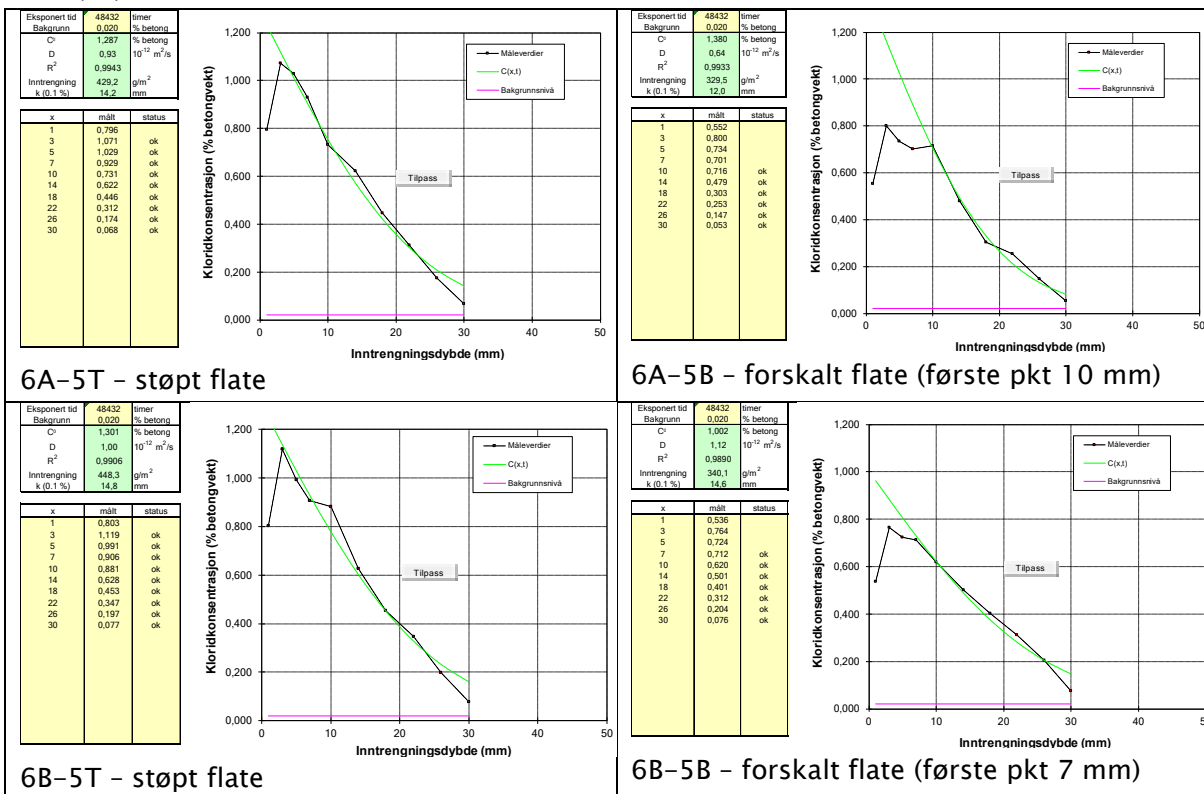
## StdFA30, 5,5 år



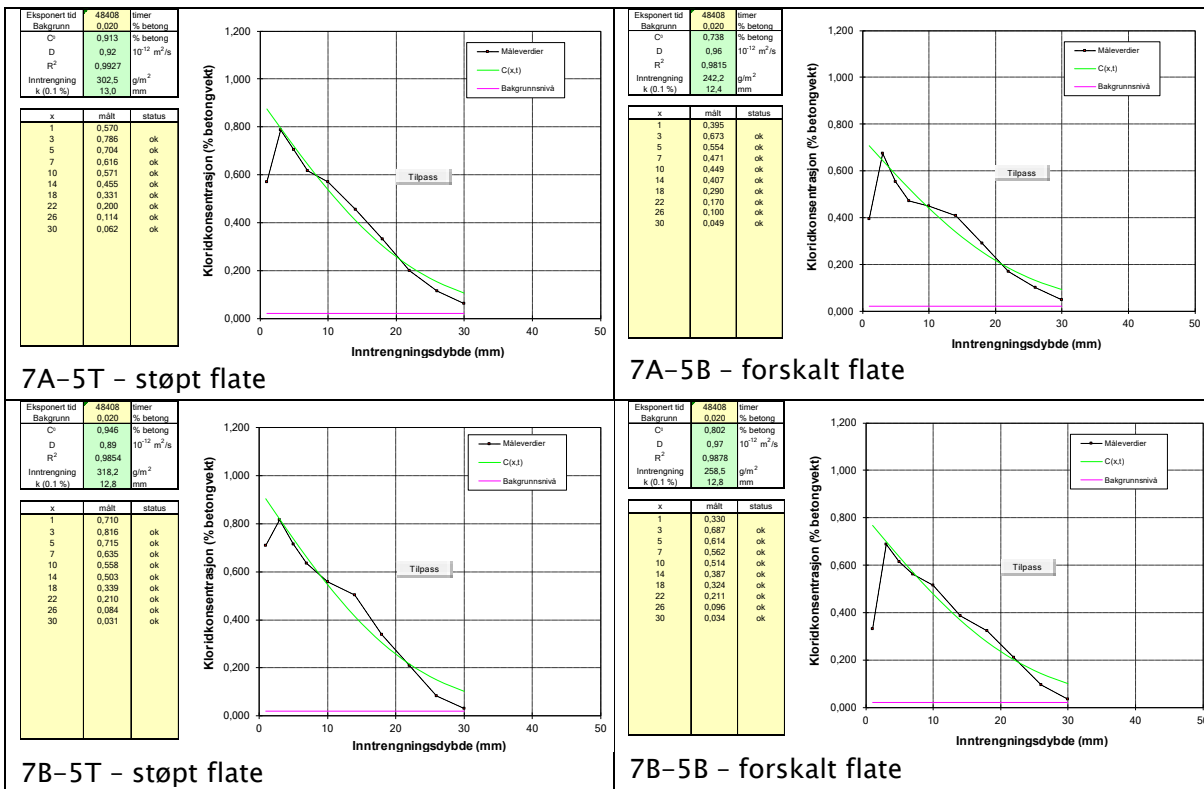
## Aal14, 5,5 år



## Aal20, 5,5 år



## Aal30, 5,5 år

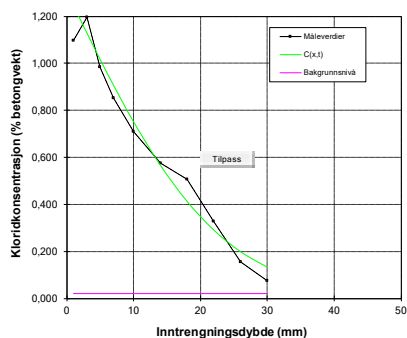


## Miljø, 5,5 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspont tid    | 48408  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.303  | % betong                            |
| D              | 0.89   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9889 |                                     |
| Inntrengning   | 448.9  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.0   | mm                                  |

| x  | mål   | status |
|----|-------|--------|
| 1  | 1.097 | ok     |
| 3  | 1.195 | ok     |
| 5  | 0.985 | ok     |
| 7  | 0.852 | ok     |
| 10 | 0.711 | ok     |
| 14 | 0.576 | ok     |
| 18 | 0.507 | ok     |
| 22 | 0.327 | ok     |
| 26 | 0.156 | ok     |
| 30 | 0.075 | ok     |

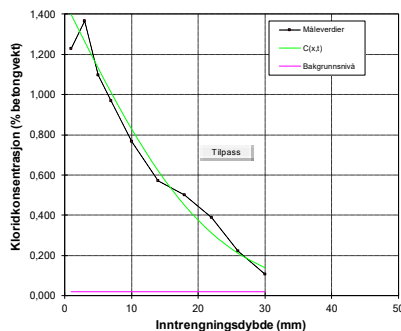


8A-5T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspont tid    | 48408  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.465  | % betong                            |
| D              | 0.85   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9892 |                                     |
| Inntrengning   | 495.7  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.0   | mm                                  |

| x  | mål   | status |
|----|-------|--------|
| 1  | 1.228 | ok     |
| 3  | 1.364 | ok     |
| 5  | 1.095 | ok     |
| 7  | 0.967 | ok     |
| 10 | 0.765 | ok     |
| 14 | 0.570 | ok     |
| 18 | 0.502 | ok     |
| 22 | 0.387 | ok     |
| 26 | 0.223 | ok     |
| 30 | 0.105 | ok     |

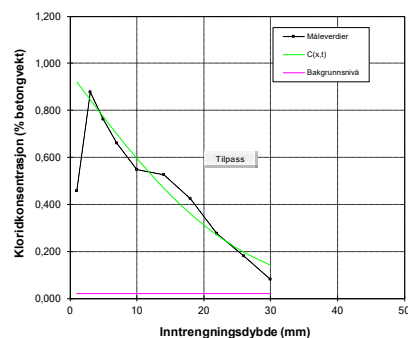


8B-5T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspont tid    | 48408  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.960  | % betong                            |
| D              | 1.12   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9883 |                                     |
| Inntrengning   | 330.9  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.5   | mm                                  |

| x  | mål   | status |
|----|-------|--------|
| 1  | 0.457 | ok     |
| 3  | 0.877 | ok     |
| 5  | 0.761 | ok     |
| 7  | 0.661 | ok     |
| 10 | 0.548 | ok     |
| 14 | 0.525 | ok     |
| 18 | 0.423 | ok     |
| 22 | 0.275 | ok     |
| 26 | 0.180 | ok     |
| 30 | 0.081 | ok     |

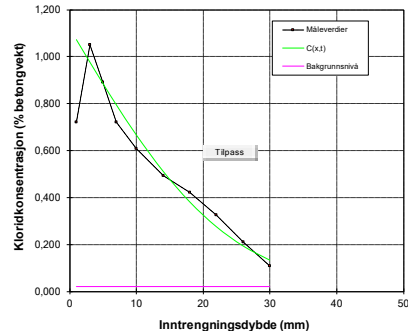


8A-5B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspont tid    | 48408  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 1.119  | % betong                            |
| D              | 0.98   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9874 |                                     |
| Inntrengning   | 379.5  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 14.1   | mm                                  |

| x  | mål   | status |
|----|-------|--------|
| 1  | 0.722 | ok     |
| 3  | 1.051 | ok     |
| 5  | 0.890 | ok     |
| 7  | 0.721 | ok     |
| 10 | 0.608 | ok     |
| 14 | 0.493 | ok     |
| 18 | 0.421 | ok     |
| 22 | 0.326 | ok     |
| 26 | 0.210 | ok     |
| 30 | 0.109 | ok     |



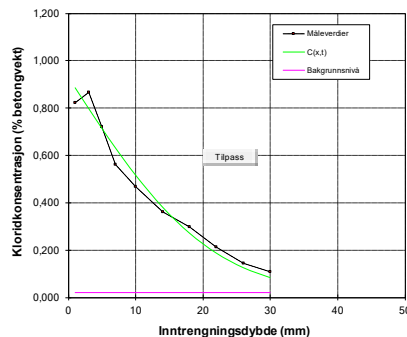
8B-5B – forskalt flate

## LV AnIFA40, 5,5 år

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspont tid    | 48408  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.929  | % betong                            |
| D              | 0.78   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9873 |                                     |
| Inntrengning   | 304.7  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 12.0   | mm                                  |

| x  | mål   | status |
|----|-------|--------|
| 1  | 0.822 | ok     |
| 3  | 0.866 | ok     |
| 5  | 0.721 | ok     |
| 7  | 0.562 | ok     |
| 10 | 0.469 | ok     |
| 14 | 0.362 | ok     |
| 18 | 0.297 | ok     |
| 22 | 0.214 | ok     |
| 26 | 0.144 | ok     |
| 30 | 0.108 | ok     |

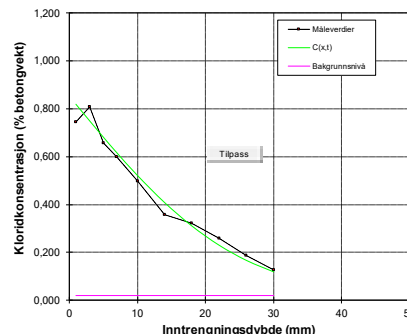


9A-5T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspont tid    | 48408  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.852  | % betong                            |
| D              | 1.05   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9882 |                                     |
| Inntrengning   | 308.1  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 13.6   | mm                                  |

| x  | mål   | status |
|----|-------|--------|
| 1  | 0.745 | ok     |
| 3  | 0.809 | ok     |
| 5  | 0.656 | ok     |
| 7  | 0.598 | ok     |
| 10 | 0.498 | ok     |
| 14 | 0.357 | ok     |
| 18 | 0.322 | ok     |
| 22 | 0.260 | ok     |
| 26 | 0.188 | ok     |
| 30 | 0.126 | ok     |

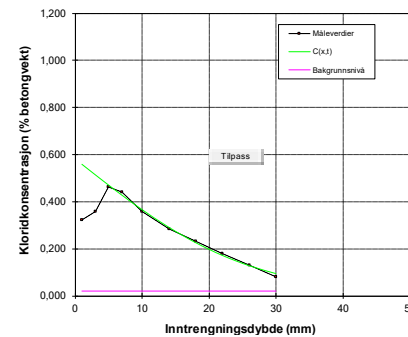


9B-5T – støpt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspont tid    | 48408  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.581  | % betong                            |
| D              | 1.14   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9979 |                                     |
| Inntrengning   | 193.2  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 12.4   | mm                                  |

| x  | mål   | status |
|----|-------|--------|
| 1  | 0.322 | ok     |
| 3  | 0.359 | ok     |
| 5  | 0.463 | ok     |
| 7  | 0.441 | ok     |
| 10 | 0.359 | ok     |
| 14 | 0.283 | ok     |
| 18 | 0.233 | ok     |
| 22 | 0.179 | ok     |
| 26 | 0.131 | ok     |
| 30 | 0.082 | ok     |

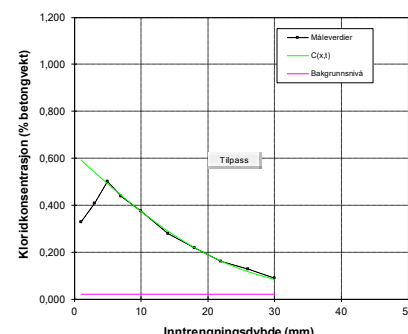


9A-5B – forskalt flate

|                |        |                                     |
|----------------|--------|-------------------------------------|
| Ekspont tid    | 48408  | timer                               |
| Bakgrunn       | 0.020  | % betong                            |
| C <sub>i</sub> | 0.618  | % betong                            |
| D              | 1.00   | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s |
| R <sup>2</sup> | 0.9990 |                                     |
| Inntrengning   | 195.8  | g/m <sup>2</sup>                    |
| k (0.1 %)      | 11.9   | mm                                  |

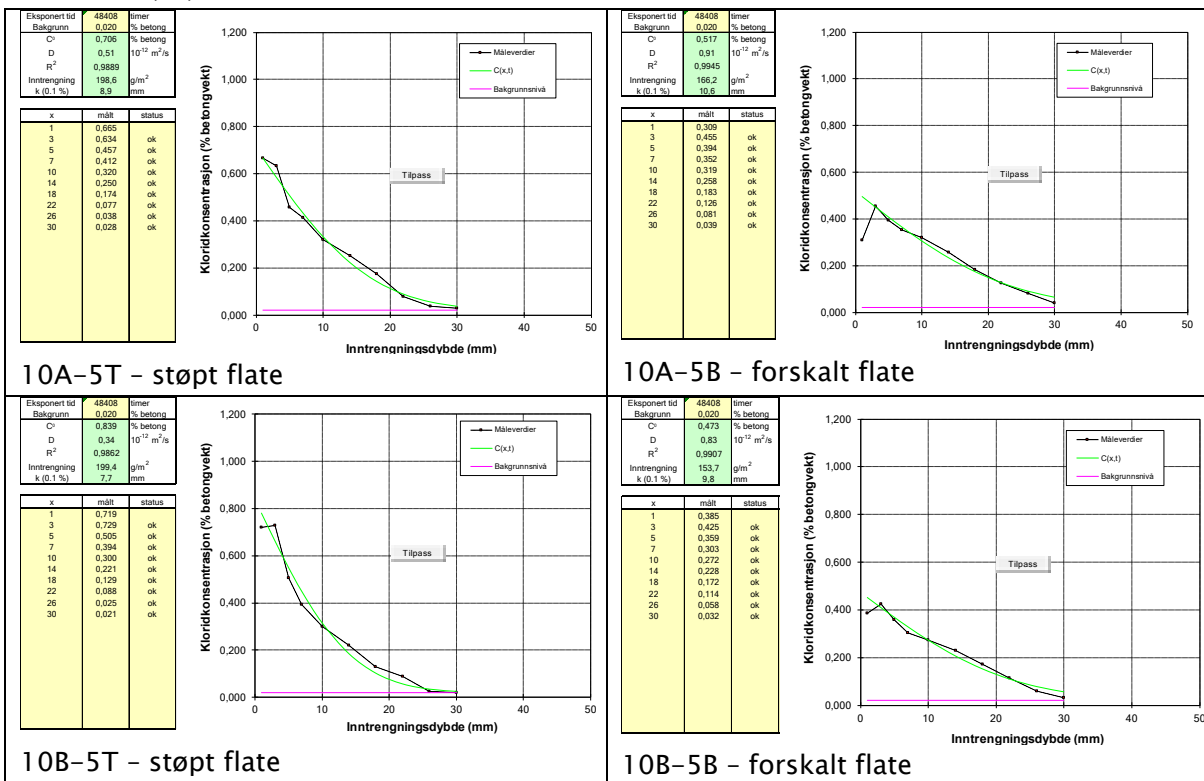
  

| x  | mål   | status |
|----|-------|--------|
| 1  | 0.520 | ok     |
| 3  | 0.409 | ok     |
| 5  | 0.500 | ok     |
| 7  | 0.438 | ok     |
| 10 | 0.376 | ok     |
| 14 | 0.280 | ok     |
| 18 | 0.217 | ok     |
| 22 | 0.162 | ok     |
| 26 | 0.127 | ok     |
| 30 | 0.089 | ok     |

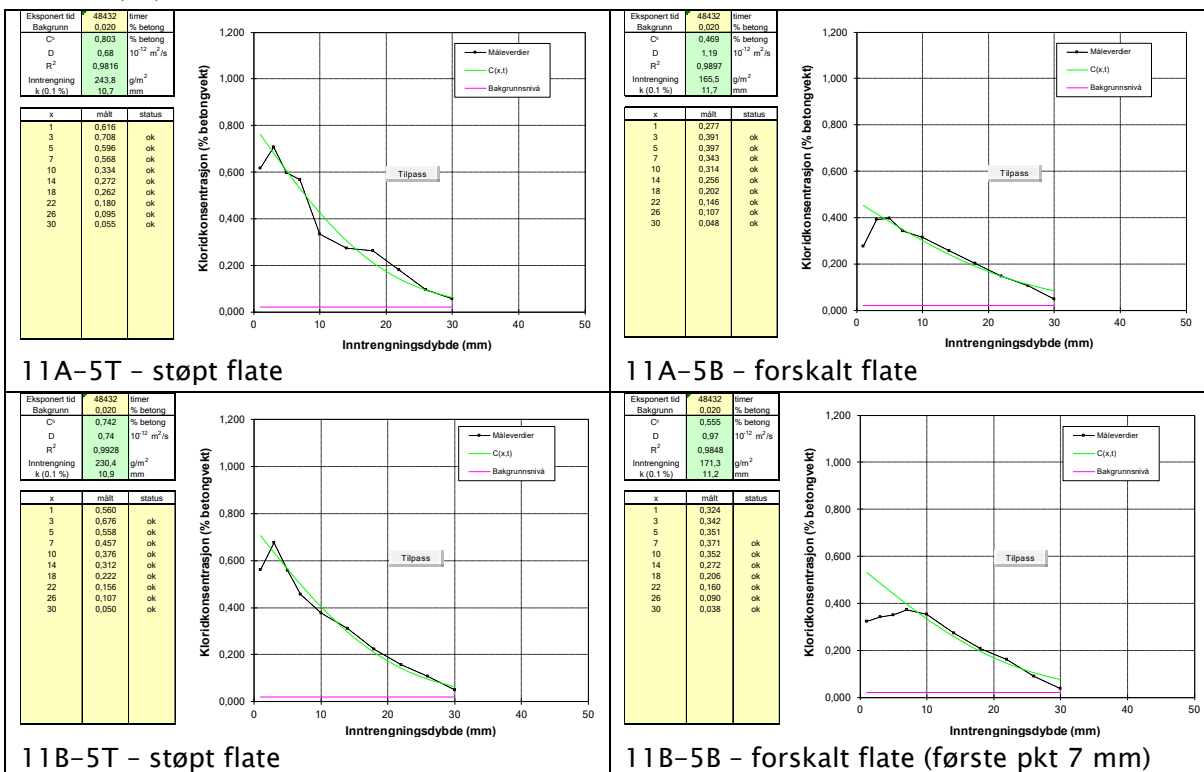


9B-5B – forskalt flate

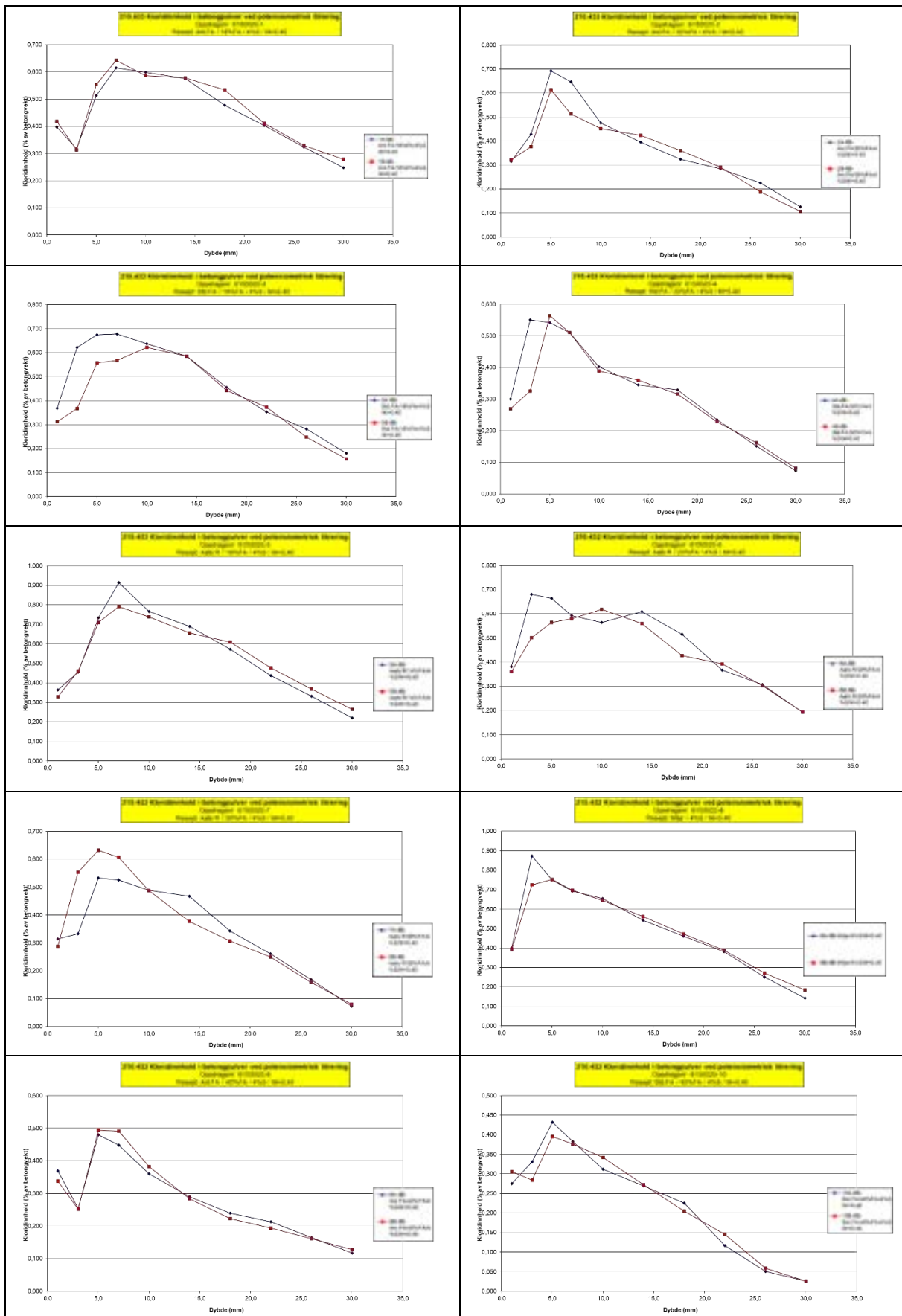
## LV StdFA40, 5,5 år

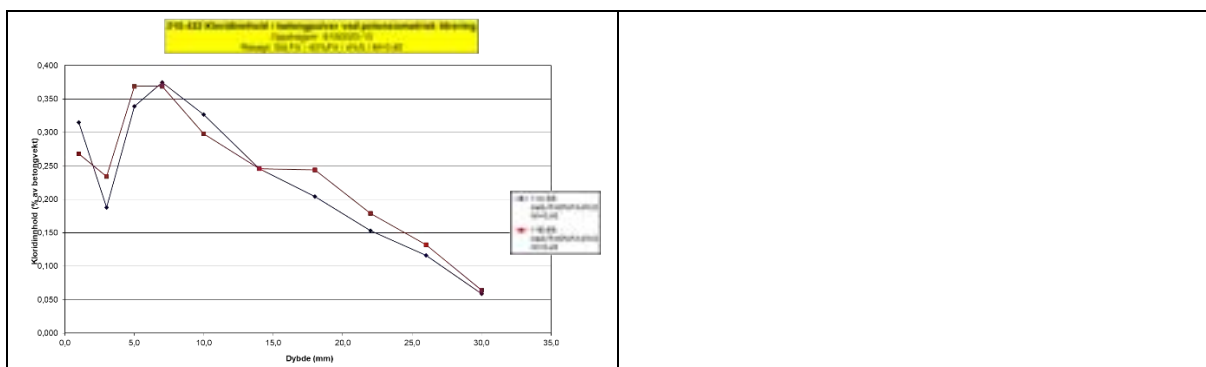


## LV Aal40, 5,5 år



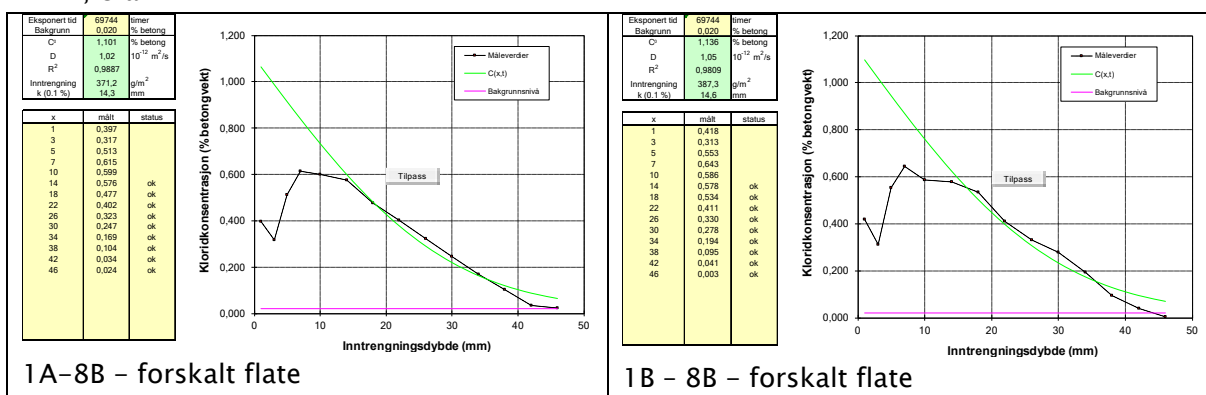
## 8 års ekspoenering



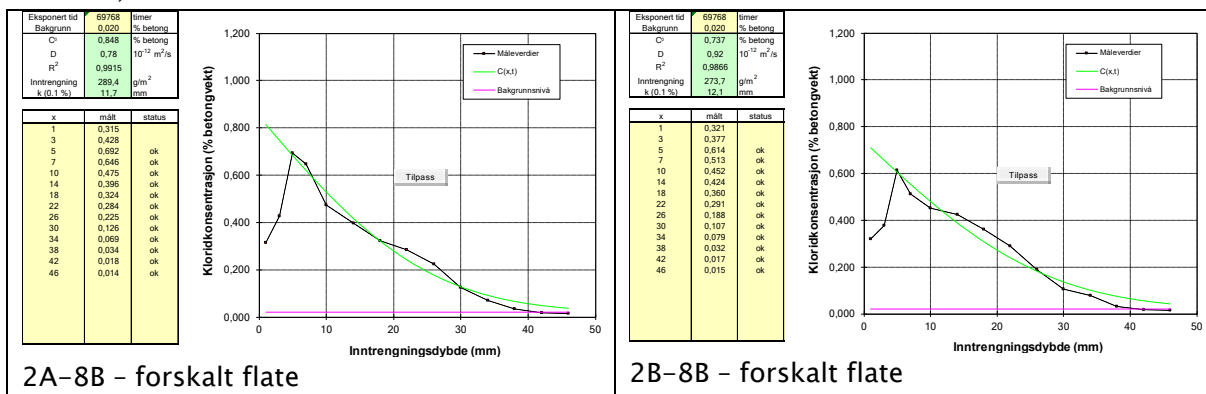


## Enkeltprofiler, målt og beregnet, 8 år:

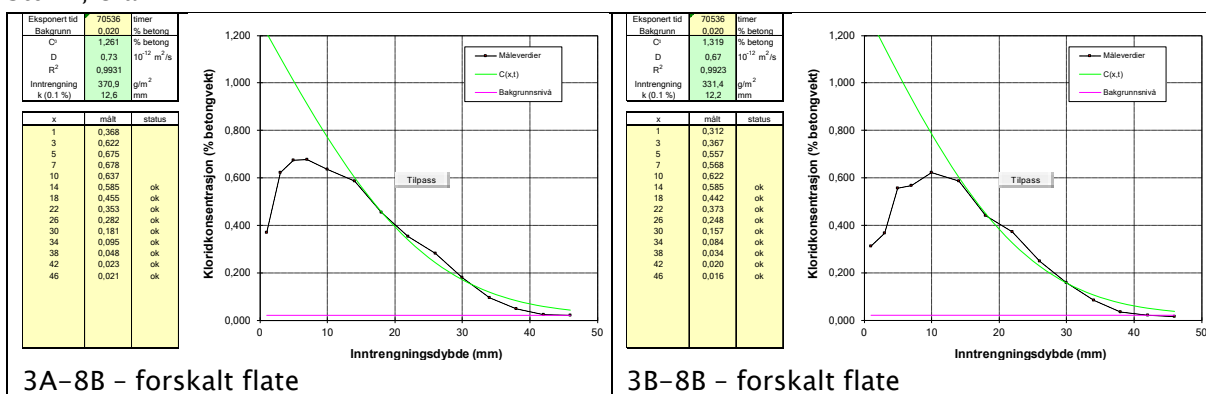
### AnIFA, 8 år



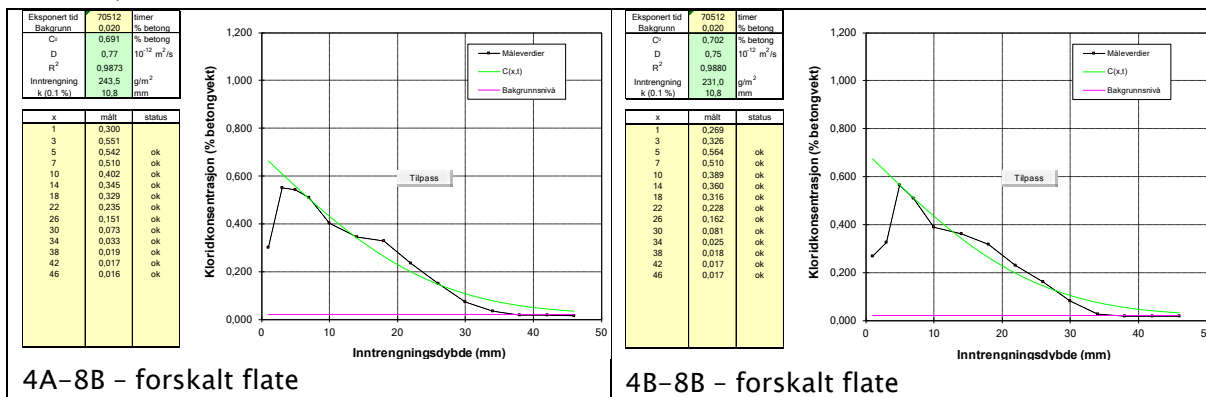
### AnIFA30, 8 år



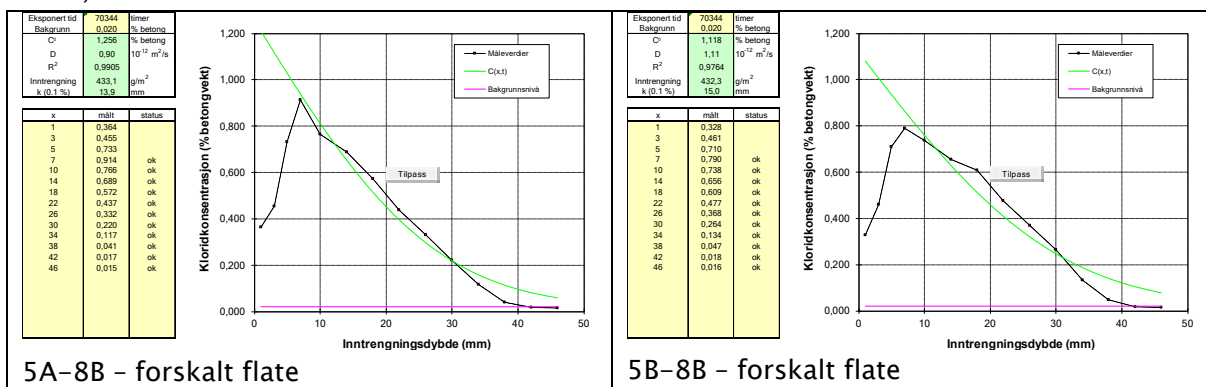
### StdFA, 8 år



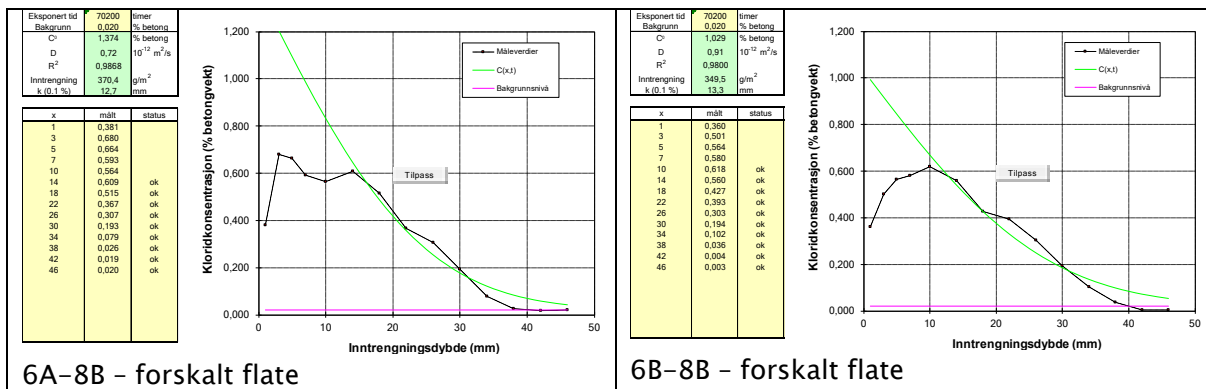
## StdFA30, 8 år



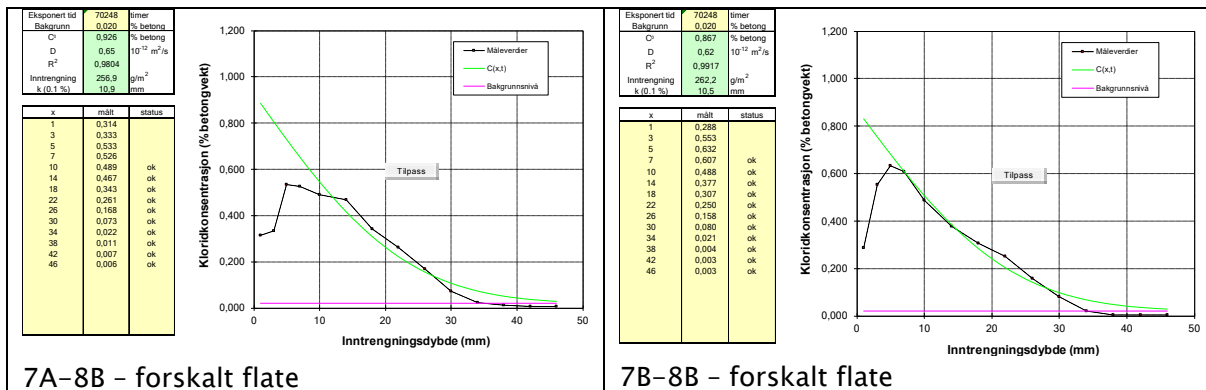
## Aal14, 8 år



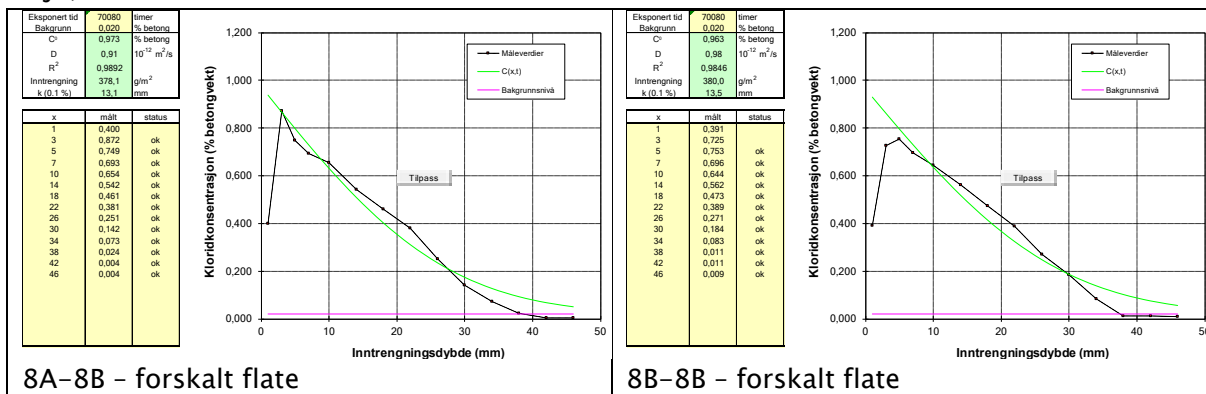
## Aal20, 8 år



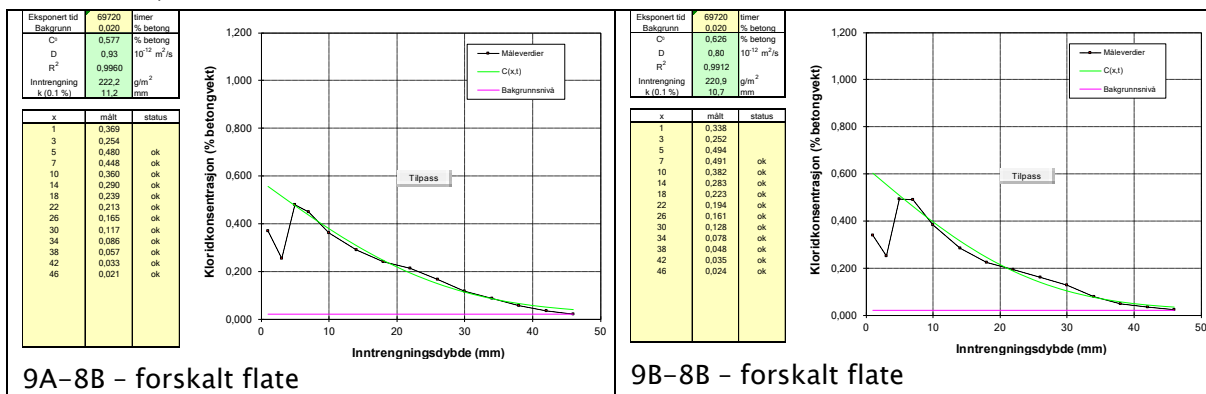
## Aal30, 8 år



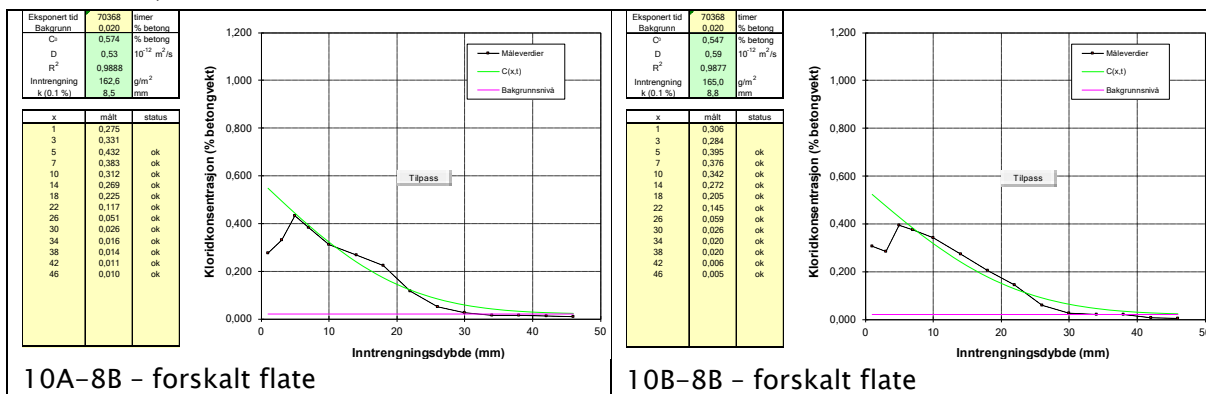
## Miljø, 8 år



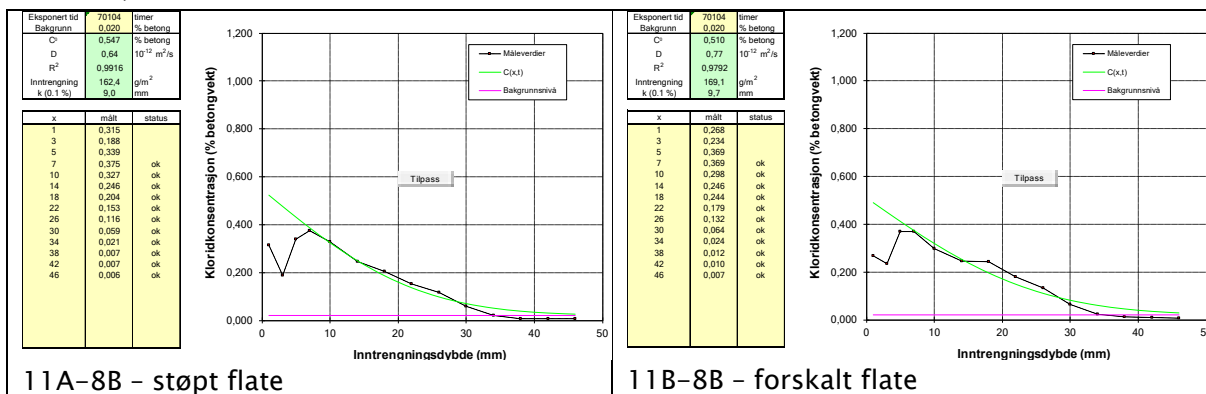
## LV AnFA40, 8 år



## LV StdFA40, 8 år



## LV Aal40, 8 år



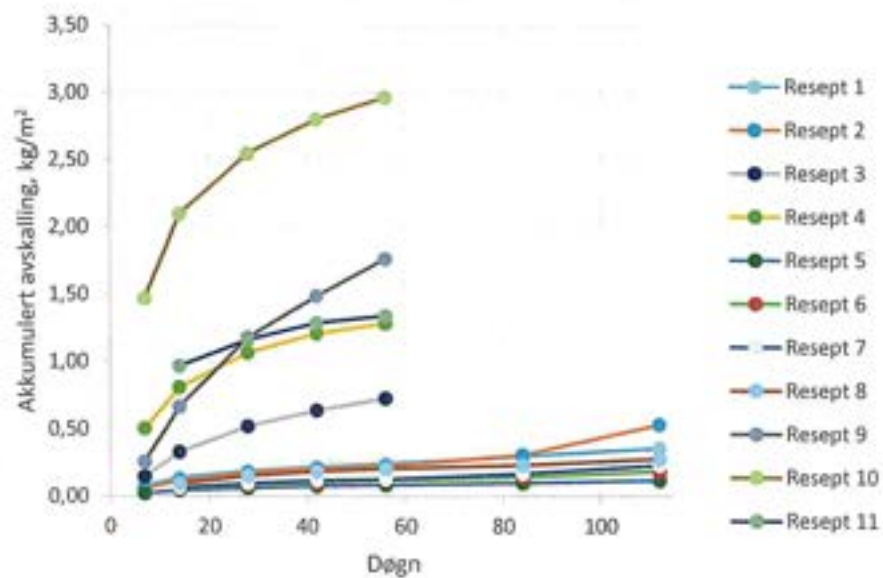
2018:00011 - Fortrolig

## Rapport

### Dokumentasjon av ulike betongresepter for brukonstruksjoner

#### Forfatter(e)

Ola Skjølsvold



# Rapport

## Dokumentasjon av ulike betongresepter for brukonstruksjoner

EMNEORD:  
Materialteknikk  
Betong  
Flygeaske  
Bestandighet

VERSJON  
1.0

DATO  
2018-01-08

FORFATTER(E)  
Ola Skjølsvold

OPPDRAGSGIVER(E)  
Statens vegvesen, Vegdirektoratet

OPPDRAGSGIVERS REF.  
Øyvind Bjøntegaard

PROSJEKTNR  
102011655

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:  
15 + 10 vedlegg

### SAMMENDRAG

Statens vegvesen reviderte i 2015 sin Håndbok N400: "Bruprosjektering" og Håndbok R762 "Standard beskrivelsestekster for bruer og kaler, hovedprosess 8" (HB R762), og i den forbindelse er det innført nye betongtyper for bruk i brukonstruksjoner: blant annet SV Standard og SV Lavvarme. Statens vegvesen ønsker å opparbeide en laboratoriebasert erfaringsdatabase for de nye betongspesifikasjonene. Som et ledd i dette har SINTEF gjennomført et omfattende prøvingsprogram for dokumentasjon av ulike egenskaper for 11 betongresepter utarbeidet av Statens vegvesen. De 11 betongene ble blandet og støpt i perioden 2015-11-03 til 2015-12-16.

Resultatene fra blanding og prøving av Resept 1 til 11 er rapportert i 11 prøvingsrapporter som er nummerert fra 3039-117A til 3039-117K. I den foreliggende rapporten er middelverdiene for alle blandinger sammenstilt i samletabeller og figurer.

Prøvingen ble avsluttet etter 2 år. Prismen prøvd for karboniseringshastighet er inntil videre lagret beskyttet på Voll feltstasjon. Det er planlagt prøving etter 5 års eksponering.

UTARBEIDET AV  
Ola Skjølsvold

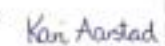
SIGNATUR



Digitally signed by  
Skjølsvold Ola  
Date: 2018.01.08  
09:55:01 +01'00'

KONTROLLERT AV  
Kari Aarstad

SIGNATUR



Kari Aarstad  
2018.01.09  
08:09:41 +01'00'

GODKJENT AV  
Gunrid Kjellmark

SIGNATUR



Kjellmark Gunrid  
2018.01.10  
10:51:46 +01'00'

RAPPORTNR  
2018:00011

ISBN

GRADERING  
Fortrolig

GRADERING DENNE SIDE  
Fortrolig

## Historikk

| VERSJON | DATO       | VERSJONSBEKRIVELSE                  |
|---------|------------|-------------------------------------|
| 0.1     | 2017-01-25 | Utkast med resultater fram til 1 år |
| 1.0     | 2018-01-08 | Endelig rapport med 2 årsresultater |

# Innholdsfortegnelse

|          |                                            |           |
|----------|--------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Bakgrunn.....</b>                       | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Delmaterialer .....</b>                 | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Prøvingsomfang .....</b>                | <b>4</b>  |
| <b>4</b> | <b>Resepter.....</b>                       | <b>5</b>  |
| <b>5</b> | <b>Prøving av fersk betong .....</b>       | <b>6</b>  |
| <b>6</b> | <b>Varmeutvikling i herdekasse .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>7</b> | <b>Prøving av herdnet betong.....</b>      | <b>8</b>  |
| 7.1      | Densitet og trykkfasthet .....             | 8         |
| 7.2      | Elektrisk motstand .....                   | 8         |
| 7.3      | Luftporestruktur.....                      | 9         |
| 7.4      | Frostmotstand.....                         | 9         |
| 7.5      | Kloridmotstand .....                       | 11        |
| 7.6      | Porøsitet.....                             | 13        |
| 7.7      | Naturlig karbonatisering .....             | 14        |
| <b>8</b> | <b>Mikroskopianalyse av tynnslip .....</b> | <b>15</b> |

## BILAG/VEDLEGG

- Vedlegg 1 Data for Norcem Anleggsement FA
- Vedlegg 2 Data for Norcem Standardsement FA
- Vedlegg 3 Data for Aalborg Rapidsement
- Vedlegg 4 Data for Cemex Miljøsement
- Vedlegg 5 Data for flygeaske
- Vedlegg 6 Data for silikastøv
- Vedlegg 7 Data for tilsetningsstoffer
- Vedlegg 8 Siktekurver for anvendt tilslag
- Vedlegg 9 SINTEF-Notat vedr mikroskopianalyser av tynnslip
- Vedlegg 10 Prøvingsrapport No 5214011626 fra EMPA

## 1 Bakgrunn

Statens vegvesen reviderte i 2015 sin Håndbok N400: "Bruprosjektering" og Håndbok R762 "Standard beskrivelsestekster for bruer og kaier, hovedprosess 8" (HB R762), og i den forbindelse er det innført nye betongtyper for bruk i brukonstruksjoner: blant annet SV Standard og SV Lavvarme. Statens vegvesen ønsker å opparbeide en laboratoriebaseret erfaringsdatabase for de nye betongspesifikasjonene. Som et ledd i dette har SINTEF gjennomført et omfattende prøvingsprogram for dokumentasjon av ulike egenskaper for 11 betongresepter utarbeidet av Statens vegvesen. De 11 betongene ble blandet og støpt i perioden 2015-11-03 til 2015-12-16.

Resultatene fra blanding og prøving av Resept 1 til 11 er rapportert i 11 prøvingsrapporter som er nummerert fra 3039-117A til 3039-117K. I den foreliggende rapporten er middelverdiene for alle blandinger sammenstilt i samletabeller og figurer.

## 2 Delmaterialer

Ved blandingene ble følgende delmaterialer benyttet

- Norcem Standardsement FA, CEM II/B-M (data er gjengitt i Vedlegg 1)
- Norcem Anleggsement FA, CEM II/A-V (data er gjengitt i Vedlegg 2)
- Aalborg Rapidsement, CEM I (data er gjengitt i Vedlegg 3)
- Cemex Miljøsement, CEM II/B-S (data er gjengitt i Vedlegg 4)
- Flygeaske tilsendt fra Norcem (data er gjengitt i Vedlegg 5)
- Elkem silikastøv 940U (data er gjengitt i Vedlegg 6)
- Mapei Dynamon SX-23 og Mapei Mapair 25 1:9 (data er gjengitt i Vedlegg 7)
- 0-8 mm natursand og 8-16 mm delvis knust singel fra Norstone Årdal (siktekurver er gjengitt i Vedlegg 8)

Fra hver av sementene, flygeaska og silikastøvet ble det tatt ut prøver som ble sendt til EMPA i Sveits for analyse. Oppdraget ble bestilt direkte av SVV, men resultatene gjengis som vedlegg til foreliggende rapport (Vedlegg 10).

## 3 Prøvingsomfang

For alle blandinger ble følgende egenskaper undersøkt for fersk betong

- Luftinnhold NS-EN 12350-7
- Densitet NS 12350-6
- Synkmål NS EN 12350-2
- Temperatur
- Varmeutvikling i herdekasse HB R210:444

Det ble støpt ut prøvestykker for følgende prøving av herdnet betong

- Densitet og trykkfasthet, 6 prøvingsterminer fra 28 dogn til 2 år NS EN 12390 del 3 og 7 (12 stk 100 mm terninger)

- Spesifikk elektrisk motstand, 6 prøvingsterminer fra 28 døgn til 2 år som beskrevet i utlysningen, tilsvarende SINTEFs prosedyre KS 14-05-04-524 (4 stk 100 mm terninger)
- Luftporestruktur NS-EN 480-11 ved 91 døgn (2 stk Ø150/300 mm sylindre)
- Frostmotstand som beskrevet i utlysningen og NS-CEN/TS 12390-9, pkt 5 (6 stk Ø100/200 mm sylindre samt tynnslipanalyse av overflatesjiktet for betongskiver etter 14 ukers luftlagring (se Vedlegg 9))
- Kloridmotstand som beskrevet i utlysningen og NT Build 443 for Resept 1, 4, 5, 8 og 9 (3 stk Ø100/200 mm sylindre)
- Kloridmotstand som beskrevet i utlysningen og NS-EN 206 NA (CEN/TS 12390-11 med 6 % NaCl) for alle resepter (3 stk Ø100/200 mm sylindre)
- Porøsitetsbestemmelse som beskrevet i utlysningen ved 90 døgn og 2 år (4 stk 100 mm terninger)
- Naturlig karbonatisering ved 91 døgn, 1 år og 2 år som beskrevet i utlysningen (2 stk 100/100/500 mm prismer)
- Det ble støpt ut 2 stk 250x400x100 mm<sup>3</sup> plater som ble sendt til oppdragsgiver for prøving

## 4 Resepter

Reseptene var utarbeidet av oppdragsgiver etter en matrise som angitt i Tabell 1.

**Tabell 1 Nominell bindemiddelsammensetning**

| Resept nr | Sementtype    | Totalt FA-innhold, % | Silika-innhold, % | Masseforhold, $v/(c+2s+0,7FA)$ |
|-----------|---------------|----------------------|-------------------|--------------------------------|
| 1         | Anlegg FA     | 18                   | 4                 | 0,40                           |
| 2         | Anlegg FA     | 30                   | 4                 | 0,40                           |
| 3         | Standard FA   | 18                   | 4                 | 0,40                           |
| 4         | Standard FA   | 30                   | 4                 | 0,40                           |
| 5         | Aalborg Rapid | 14                   | 4                 | 0,40                           |
| 6         | Aalborg Rapid | 20                   | 4                 | 0,40                           |
| 7         | Aalborg Rapid | 30                   | 4                 | 0,40                           |
| 8         | Miljøsement   | -                    | 4                 | 0,40                           |
| 9         | Anlegg FA     | 40                   | 4                 | 0,45                           |
| 10        | Standard FA   | 40                   | 4                 | 0,45                           |
| 11        | Aalborg Rapid | 40                   | 4                 | 0,45                           |

Kommentar:  $k = 1$  for sementene også når de inneholder FA eller slagg (forutsatt 18 % FA i STD FA og ANL FA). Tilsatt FA har  $k = 0,7$  og silika  $k = 2$ .

Blandingene (ca 150 liters sats) ble utført i 250 liter Eirich tvangsblander etter følgende prosedyre

- 1 min tørrblanding
- 1 min blanding ved tilsetning av vann
- ½ min blanding ved tilsetning av Dynamon SX-23 til ca 120 mm synkmål
- ½ min blanding ved tilsetning av Mapeair 25
- 1 min blanding ved evt etterdosering av Dynamon SX-23 til ca 200 mm synkmål
- 2 min henstillingstid
- 2 min blanding ved evt etterdosering av tilsetningsstoffer

Oppnådd materialsammensetning for alle resepter er gjengitt i Tabell 2.

**Tabell 2** Proporsjonert materialsammensetning i kg/m<sup>3</sup> betong (antatt 4 % luft)

| Resept nr          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Norcem Anlegg FA   | 418,2 | 347,6 |       |       |       |       |       |       | 277,9 |       |       |
| Norcem Standard FA |       |       | 418,3 | 351,9 |       |       |       |       |       | 281,2 |       |
| Aalberg Rapid      |       |       |       |       | 365,5 | 338,7 | 294,1 |       |       |       | 234,7 |
| Cemex Miljøsement  |       |       |       |       |       |       |       | 422,3 |       |       |       |
| Elkem Microsilica  | 17,6  | 17,6  | 17,6  | 17,6  | 18,0  | 18,0  | 18,0  | 17,7  | 16,6  | 16,6  | 16,9  |
| Flygeaske (Norcem) |       | 72,2  |       | 67,9  | 62,4  | 89,2  | 133,7 |       | 117,6 | 114,2 | 167,7 |
| Fritt vann         | 176,8 | 169,0 | 176,8 | 169,5 | 173,6 | 170,5 | 165,2 | 178,5 | 173,1 | 173,5 | 169,8 |
| Absorbert vann     | 5,9   | 5,9   | 5,9   | 5,9   | 5,9   | 5,9   | 5,9   | 5,9   | 5,9   | 5,9   | 5,9   |
| Årdal sand 0/8     | 902,2 | 902,2 | 902,2 | 902,2 | 902,2 | 902,2 | 902,2 | 902,2 | 902,2 | 902,2 | 902,2 |
| Årdal stein 8/16   | 802,5 | 802,5 | 802,5 | 802,5 | 802,5 | 802,5 | 802,5 | 802,5 | 802,5 | 802,5 | 802,5 |

## 5 Prøving av fersk betong

Etter avsluttet blanding ble det foretatt bestemmelse av

- Synkmål
- Luftinnhold og densitet
- Temperatur

Resultatene er gjengitt i Tabell 3.

**Tabell 3** Data for fersk betong

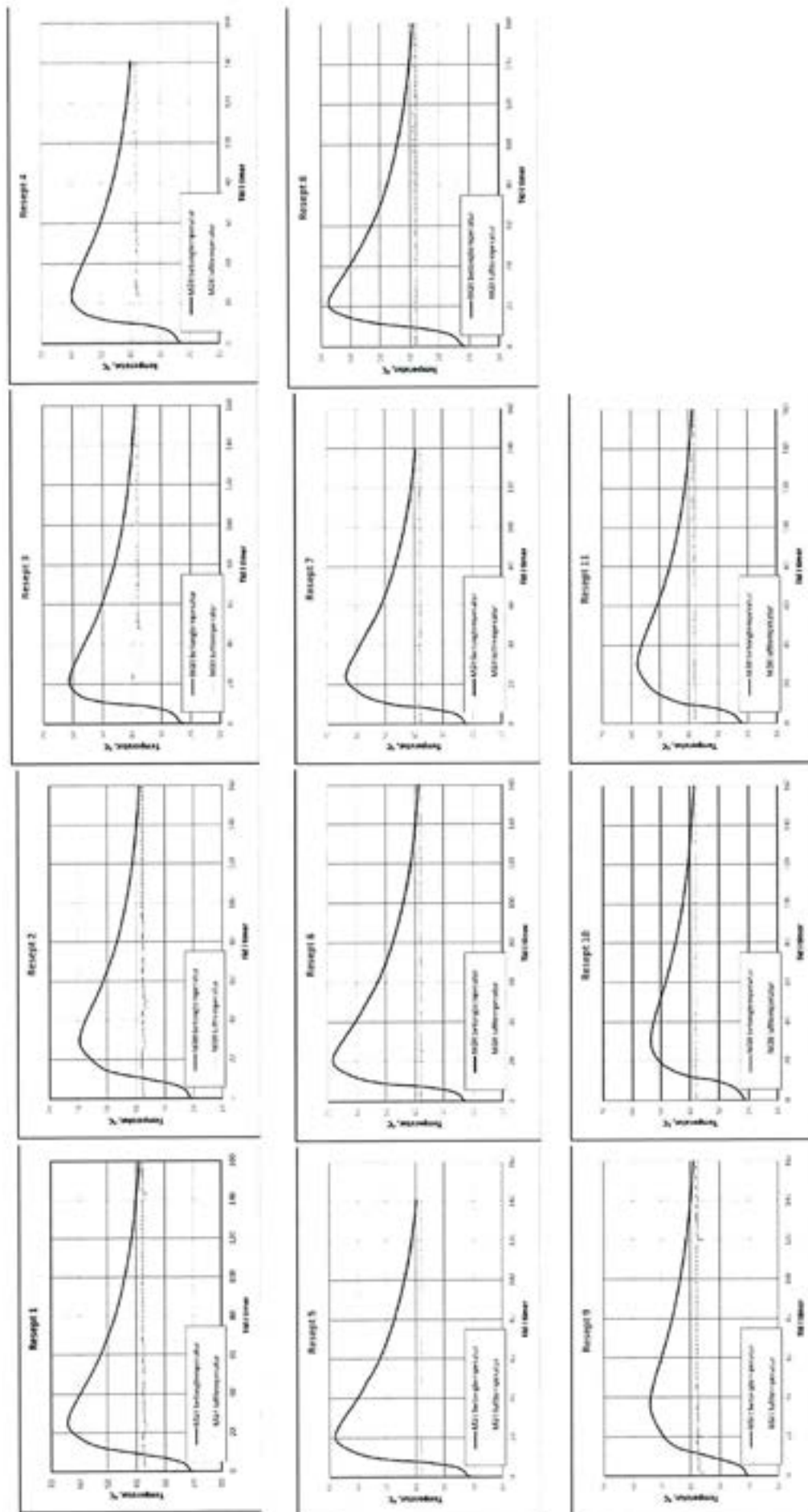
| Resept nr                   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Synkmål, mm                 | 210  | 230  | 200  | 200  | 200  | 210  | 200  | 200  | 210  | 210  | 220  |
| Densitet, kg/m <sup>3</sup> | 2330 | 2293 | 2320 | 2300 | 2297 | 2328 | 2293 | 2336 | 2285 | 2284 | 2290 |
| Luftinnhold, %              | 4,5  | 5,2  | 4,5  | 4,9  | 5,8  | 4,4  | 5,5  | 4,2  | 5,2  | 5,0  | 5,2  |
| Temperatur, °C              | 21,0 | 20,0 | 21,0 | 21,5 | 20,0 | 21,5 | 21,5 | 21,5 | 20,0 | 20,0 | 21,5 |

## 6 Varmeutvikling i herdekasse

Det ble støpt ut 50 liter betong i isolert kasse for bestemmelse av varmeutvikling. Kassen er laget av 20 mm plastbelagt kryssfiner med 100 mm ekspandert polystyren innvendig. Betongvolumet er 370x370x370 mm<sup>3</sup>. Kassen ble plassert i varmerom ved ca 38 °C.

Logging (hvert 15 min) av temperatur i luft og betong, som startet 25 min etter vanntilsetning, ble utført med Testo temperaturloggere. Temperaturkurvene er gjengitt i Figur 1.

Data i excel-fil er oversendt oppdragsgiver per e-post.



**Figur 1** Varmeutvikling i herdekasse

## 7 Prøving av herdnet betong

### 7.1 Densitet og trykkfasthet

Det ble støpt ut 12 stk 100 mm terninger for bestemmelse av densitet og trykkfasthet etter 28, 56, 91, 181 døgn samt 1 og 2 års vannlagring (2 terninger per alder). Prøvingen ble utført i henhold til NS-EN 12390 del 7 og 3. Det ble benyttet Mettler Toledo 32 kg vekt og FormTest 2000 kN trykkpresse. Resultatene er gjengitt i Tabell 4 og 5.

**Tabell 4 Resultater, midlere densitet for terninger, kg/m<sup>3</sup>**

| Resept nr  |          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|            |          | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
| Prøvsalder | 28 døgn  | 2364 | 2342 | 2365 | 2339 | 2337 | 2381 | 2327 | 2364 | 2310 | 2304 | 2299 |
|            | 56 døgn  | 2365 | 2342 | 2370 | 2346 | 2328 | 2354 | 2320 | 2357 | 2315 | 2311 | 2315 |
|            | 91 døgn  | 2369 | 2335 | 2376 | 2348 | 2327 | 2362 | 2321 | 2358 | 2321 | 2318 | 2320 |
|            | 181 døgn | 2362 | 2349 | 2372 | 2343 | 2338 | 2372 | 2316 | 2377 | 2317 | 2318 | 2320 |
|            | 1 år     | 2358 | 2347 | 2369 | 2345 | 2341 | 2374 | 2331 | 2377 | 2324 | 2312 | 2317 |
|            | 2 år     | 2346 | 2339 | 2373 | 2342 | 2348 | 2371 | 2324 | 2385 | 2328 | 2325 | 2312 |

**Tabell 5 Resultater, midlere trykkfasthet for terninger, MPa**

| Resept nr  |          | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     | 7    | 8    | 9    | 10   | 11    |
|------------|----------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| Prøvsalder | 28 døgn  | 64,0  | 52,2 | 66,5 | 60,0 | 76,8 | 80,4  | 68,0 | 75,9 | 38,9 | 45,6 | 56,2  |
|            | 56 døgn  | 72,1  | 62,6 | 71,9 | 64,9 | 77,2 | 86,9  | 71,6 | 79,6 | 48,5 | 53,3 | 62,8  |
|            | 91 døgn  | 75,2  | 68,0 | 77,2 | 67,7 | 81,4 | 86,2  | 77,5 | 83,0 | 51,3 | 58,9 | 67,2  |
|            | 181 døgn | 78,5  | 72,2 | 79,0 | 73,4 | 88,8 | 94,9  | 79,5 | 87,2 | 57,6 | 60,9 | 72,4  |
|            | 1 år     | 81,9* | 78,3 | 85,6 | 78,8 | 93,9 | 91,2* | 84,4 | 91,0 | 62,1 | 66,8 | 77,1* |
|            | 2 år     | 87,1  | 82,4 | 87,9 | 81,7 | 94,5 | 93,1* | 89,5 | 90,1 | 68,4 | 70,7 | 79,7  |

\*Unormalt stor spredning (særlig for Blanding 6)

### 7.2 Elektrisk motstand

Det ble støpt ut 4 stk 100 mm terninger for bestemmelse av spesifikk elektrisk motstand etter 28, 56, 91 og 182 døgn samt 1 og 2 års vannlagring. Prøvingen ble utført etter SINTEFs interne metode KS 14-05-04-524 med Agilent LCR-meter og 10 mm tykke, 120x120 mm<sup>2</sup>, stålskiver. Det ble benyttet elektrisk ledende gel mellom betongen og stålplatene samt 3,5 kg lodd på toppen i 1 min før avlesning.

Spesifikk elektrisk motstand er beregnet som:

$$\rho = R \cdot A / l, \text{ hvor}$$

R = avlest motstand i  $\Omega$

A = prøvestykkets areal i m<sup>2</sup>

L = avstand mellom prøvestykkets måleflater i m

Resultatene er gjengitt i Tabell 6.

**Tabell 6 Resultater, midlere elektrisk motstand for terninger,  $\Omega m$** 

| Resultater, indlere elektrisk mdsstand for tendinger, 220 |          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Resept nr                                                 |          | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
| Prøvingsalder                                             | 28 dagn  | 92  | 101 | 195 | 196 | 187 | 181 | 192 | 242 | 71  | 167 | 122 |
|                                                           | 56 dagn  | 172 | 186 | 329 | 347 | 327 | 313 | 315 | 402 | 125 | 267 | 205 |
|                                                           | 91 dagn  | 247 | 265 | 391 | 434 | 419 | 413 | 430 | 492 | 166 | 363 | 290 |
|                                                           | 181 dagn | 345 | 392 | 470 | 543 | 550 | 536 | 598 | 509 | 265 | 502 | 433 |
|                                                           | 1 år     | 509 | 588 | 604 | 743 | 755 | 720 | 803 | 573 | 445 | 729 | 683 |
|                                                           | 2 år     | 715 | 879 | 720 | 912 | 852 | 828 | 973 | 697 | 741 | 940 | 966 |

### 7.3 Luftporestruktur

Det ble støpt ut 2 stk Ø150/300 mm sylindre for luftporeanalyse i herdnet betong. Prøvingen ble utført ved alder ca 3 måneder. Sylindrene ble lagret i vannbad inntil saging på langs for tildanning av ei ca 20 mm tykk skive midt i tverrsnittet. Prøvingen ble utført av VBM-Laboratoriet. Et sammendrag av resultatene er gjengitt i Tabell 7.

**Tabell 7 Luftporeanalyse herdnet betong (middel for 2 prøvestykker)**

| Resept                         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Luftinnhold, %                 | 3,7  | 4,4  | 3,3  | 3,1  | 4,7  | 2,1  | 4,5  | 3,1  | 5,8  | 5,2  | 5,2  |
| Spesifikk overflate, $mm^{-1}$ | 28   | 37   | 34   | 53   | 24   | 46   | 37   | 27   | 50   | 40   | 46   |
| Avstandsfaktor, mm             | 0,22 | 0,15 | 0,19 | 0,12 | 0,22 | 0,17 | 0,15 | 0,24 | 0,10 | 0,13 | 0,12 |

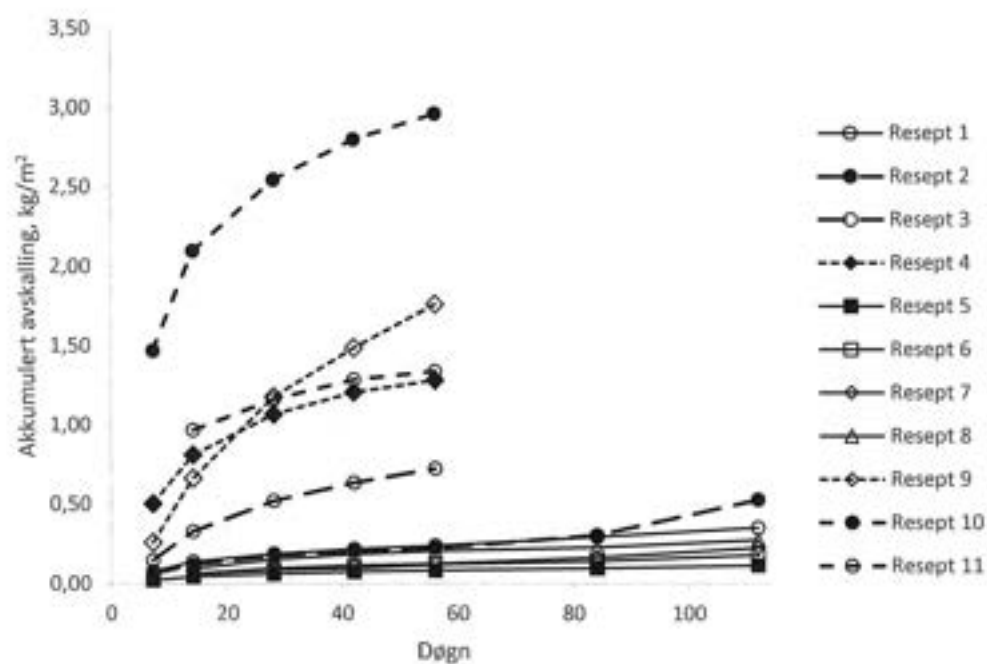
### 7.4 Frostmotstand

Det ble støpt ut 6 stk Ø100/200 mm sylindre for bestemmelse av frostmotstand i henhold til CEN-TS 12390-9 med frysemedium 3 % NaCl-løsning (Boråsmetoden). Sylindrene ble lagret i vann fram til 21 døgns alder da det ble tildannet ei 50 mm tykk skive fra sjiktet 20-70 mm fra alle sylindrenes toppflater. To skiver fra toppen (0-20 mm) av sylindrene ble tatt vare på og lagret i luft av 20 °C, 60 % RF sammen med skivene for bestemmelse av frostmotstand. Preparering av prøvestykkene ble utført etter 14 ± 1 ukes lagring i luft. Frostprøvingen ble utført i KylCity fryse/tineskap i perioden 2016-03-04 til 2016-08-05. Resultatene er gjengitt i Tabell 8 og framstilt grafisk i Figur 2.

Ved oppstart preparering ble betongens karboniseringsdybde målt for skiver (toppen av sylindrene som angitt ovenfor) lagret sammen med prøvestykker til bestemmelse av frostmotstand. For disse skivene ble det også tildannet tynnslip (ca 20 x 40 mm) av overflatesjiktet mot karbonisert sagflate, se pkt 8.

**Tabell 8 Frostprøving (middel for 6 prøvestykker)**

| Resept                                                        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|---------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Karbonatiseringsdybde ved start frostprøving, mm              | 0,6  | 1,5  | 0,2  | 1,0  | ≈ 0  | ≈ 0  | 0,6  | ≈ 0  | 2,7  | 2,5  | 1,6  |
| Akkumulert avskalling etter 56 døgn, m56, kg/m <sup>2</sup>   | 0,24 | 0,22 | 0,73 | 1,28 | 0,08 | 0,12 | 0,13 | 0,21 | 1,76 | 2,96 | 1,34 |
| m56/m28                                                       | 1,28 | 1,27 | 1,39 | 1,20 | 1,36 | 1,42 | 1,31 | 1,36 | 1,50 | 1,16 | 1,15 |
| Akkumulert avskalling etter 112 døgn, m112, kg/m <sup>2</sup> | 0,36 | 0,53 | -    | -    | 0,12 | 0,18 | 0,23 | 0,28 | -    | -    | -    |


**Figur 2 Akkumulert avskalling ved frostprøving**

## 7.5 Kloridmotstand

Det ble støpt 6 stk Ø100/200 mm sylindre for bestemmelse av motstand mot kloridinntrenging. Initielt kloridinnhold ble bestemt for avkapp fra prøve sylindre til å være 0,01 % Cl<sup>-</sup> for alle resepter.

*CEN-TS 12390-11/NS-EN 206+NA*

Alle prøvestykker ble lagret i saltløsninger i plastkasser med lokk i temperaturstyrt rom (20 °C). Saltløsningen ble kontrollert ved oppstart og avslutning av eksponeringsperioden. Fresing av støv i tynne sjikt ble utført med betongfres. Kloridanalysene ble utført med Metrohm automatisk titrator.

Tre sylindre ble anvendt til prøving i henhold til CEN-TS 12390-11 og NS-EN 206+NA ved 3 måneders neddykking i 6 % NaCl-løsning. Som prøvestykker ble benyttet 100 mm skiver fra nedre del av 3 sylindre og da slik at eksponeringsflata representerer flata i avstand 100 mm fra sylinderens avstrykningsflate (skivene ble nummerert 7-9). Prepareringen (vakuummetning og maling med epoksy) ble utført slik at eksponeringen startet ved alder  $91 \pm 1$  døgn. Et sammendrag av resultatene er gjengitt i Tabell 9 og Figur 3.

Eksponeringen ble utført i perioden 2016-03-15 til 2016-06-14.

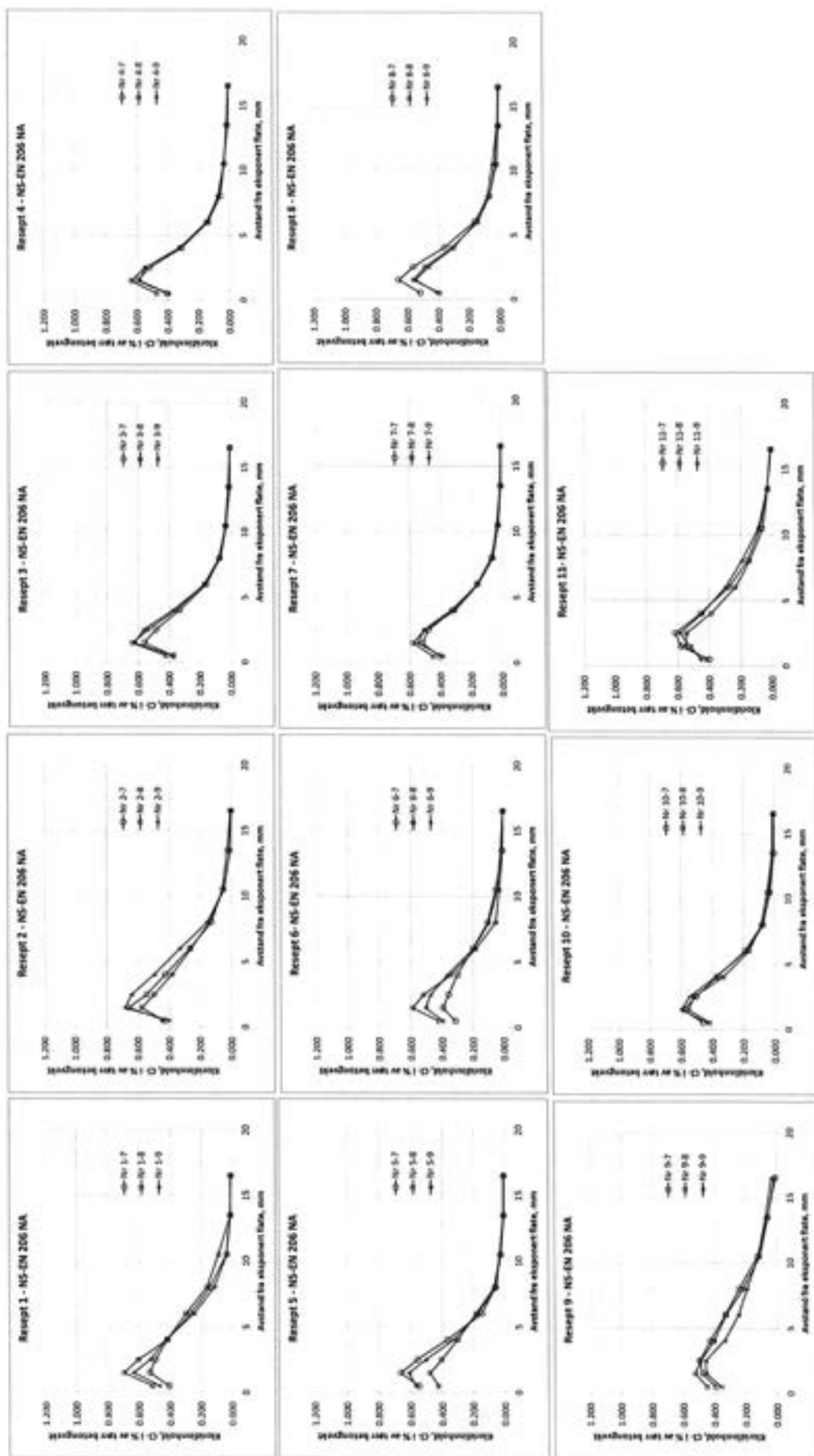
*NT Build 443*

Tre sylindre ble anvendt til prøving i henhold til NT Build 443 (HB R210, prosedyre 441) ved 35 døgn neddykking i saltløsning med 165 g NaCl per liter destillert vann. Som prøvestykker ble benyttet 100 mm skiver fra nedre del av 3 sylindre og da slik at eksponeringsflata representerer flata i avstand 100 mm fra sylinderens avstrykningsflate (skivene ble nummerert 10-12). Prepareringen (maling med epoksy) ble utført slik at eksponeringen startet ved alder  $91 \pm 1$  døgn. Et sammendrag av resultatene er gjengitt i Tabell 9 og Figur 4.

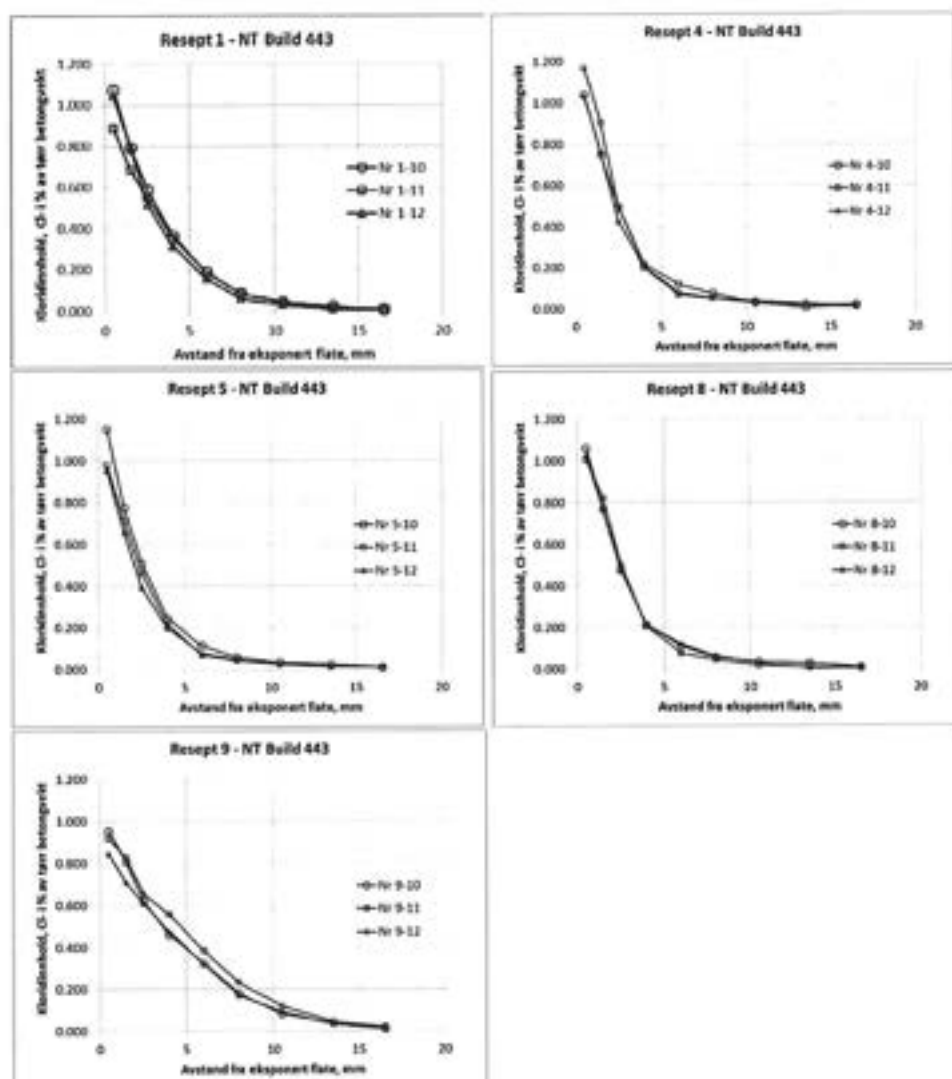
Eksponeringen ble utført i perioden 2016-03-15 til 2016-04-19.

**Tabell 9 Resultater, NS-EN 206+NA og NT Build 443**

| Resept       |                                                          | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|--------------|----------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NS-EN 206+NA | Overflatekons., C <sub>0</sub> , % Cl <sup>-</sup>       | 0,79 | 0,82 | 0,83 | 0,85 | 0,80 | 0,67 | 0,76 | 0,81 | 0,60 | 0,79 | 0,86 |
|              | Diffusjonskoeff., D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 2,51 | 2,51 | 1,58 | 1,40 | 1,61 | 2,29 | 1,64 | 1,53 | 4,82 | 1,77 | 2,43 |
| NT Build 443 | Overflatekons., C <sub>0</sub> , % Cl <sup>-</sup>       | 1,03 | -    | -    | 1,34 | 1,15 | -    | -    | 1,27 | 0,94 | -    | -    |
|              | Diffusjonskoeff., D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s | 2,96 | -    | -    | 1,34 | 1,47 | -    | -    | 1,43 | 6,59 | -    | -    |



**Figur 3** Kloridprofiler fra prøving i hht NS-EN 206+NA (CEN TS 12390-11)



Figur 4 Kloridprofiler fra prøving i henhold til NT Build 443

## 7.6 Porøsitet

Det ble støpt ut 4 stk 100 mm terninger for bestemmelse av porøsitet. Terningene ble lagret i vannbad fram til prøving ved alder 91 døgn og 2 år. Prøvingen ble utført ved at det ble saget til 4 stk 20 mm skiver fra hver av 2 terninger ved hver prøvingstermin. Skivene ble tildannet parallelt med avstrykningsflata og etter at 5 mm fra topp og bunn ble skåret av. Skivene ble nummerert 1-4 (skive nr 1 nærmest avstrykningsflata). Skivene ble rengjort ved skylling med rent vann og børsting med stålborste etter tildanning.

Deretter ble alle skivene

- Tørket ved 105 °C i 7 døgn og veid ( $g_1$ )
- Vannlagret i 7 døgn, tørket av og veid i luft ( $g_2$ ) og vann ( $g_3$ )
- Lagret 2 døgn i vann i trykktank ved 50 atm trykk, tørket av og veid ( $g_4$ )

Basert på registrerte vektorer ble følgende parametre beregnet

Prøvestykkets volum:  $V = (g_2 - g_3) / \rho_w$   
 Sugmettet densitet:  $\rho_s = g_2 / V$   
 Sugporøsitet:  $P_s = (g_2 - g_1) / V \cdot \rho_w$   
 Makroporøsitet:  $P_m = (g_4 - g_1) / V \cdot \rho_w$   
 PF-faktor:  $PF = P_m / (P_s + P_m)$

Vannets densitet ( $\rho_w$ ) settes lik 1000 kg/m<sup>3</sup>. Det ble benyttet Mettler Toledo 4 kg vekt. Resultatene er gjengitt i Tabell 10 (91 døgn) og 11 (2 år).

**Tabell 10 Porøsitet, resultater etter 91 døgn**

| Resept                                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sugporøsitet, %                       | 14,0 | 13,1 | 14,1 | 13,4 | 12,9 | 12,2 | 12,6 | 13,6 | 14,2 | 14,7 | 13,5 |
| Makroporøsitet, %                     | 3,7  | 4,8  | 3,4  | 3,9  | 4,5  | 3,8  | 5,1  | 3,2  | 4,6  | 4,7  | 4,9  |
| Totalporøsitet, %                     | 17,6 | 17,9 | 17,4 | 17,3 | 17,4 | 16,0 | 17,6 | 16,8 | 18,8 | 19,3 | 18,4 |
| Sugmettet densitet, kg/m <sup>3</sup> | 2350 | 2328 | 2364 | 2353 | 2332 | 2366 | 2319 | 2378 | 2311 | 2307 | 2313 |
| PF-faktor                             | 0,21 | 0,27 | 0,20 | 0,22 | 0,26 | 0,24 | 0,29 | 0,19 | 0,25 | 0,24 | 0,27 |

**Tabell 11 Porøsitet, resultater etter 2 år**

| Resept                                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sugporøsitet, %                       | 14,1 | 13,2 | 14,8 | 14,3 | 13,3 | 12,5 | 12,8 | 13,7 | 14,5 | 14,7 | 13,5 |
| Makroporøsitet, %                     | 3,5  | 4,5  | 3,2  | 3,8  | 4,0  | 3,3  | 4,6  | 3,2  | 4,2  | 4,1  | 4,5  |
| Totalporøsitet, %                     | 17,6 | 17,7 | 18,0 | 18,0 | 17,3 | 15,8 | 17,5 | 16,9 | 18,7 | 18,8 | 18,0 |
| Sugmettet densitet, kg/m <sup>3</sup> | 2364 | 2358 | 2366 | 2342 | 2342 | 2380 | 2339 | 2370 | 2338 | 2327 | 2328 |
| PF-faktor                             | 0,20 | 0,26 | 0,18 | 0,21 | 0,24 | 0,21 | 0,26 | 0,19 | 0,23 | 0,22 | 0,25 |

## 7.7 Naturlig karbonatisering

Det ble støpt ut 2 stk 100/100/500 mm prismer for utendørs beskyttet eksponering. Prismene ble lagret inne i et glissent skur beskyttet mot nedbør på Voll feltstasjon i Trondheim. Prismene ble plassert på feltstasjonen direkte etter avforming ved 1 døgn alder. Prismene ble lagret liggende på trekantlister med avstrykningsflata ned. Det ble utført måling av karbonatisering etter 91 døgn samt 1 og 2 års eksponering. Ved hver måletermin ble det splittet av ei skive med tykkelse ca 50 mm. Etter splitting ble det påført fargeindikator (fenolftalein eller thymolftalein) på ferske bruddflater. Måling ble foretatt 24 timer etter påføring. Hver registrering ble utført manuelt med en nøyaktighet på  $\pm 0.5$  mm. Verdiene for topp-, bunn- og sideflater varierer en del. Middelverdiene for 4 sideflater (2 prismer) er gjengitt i Tabell 12.

**Tabell 12 Målt karbonatiseringsdybde etter eksponering utendørs og beskyttet mot nedbør**

| Resept                            |         | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
|-----------------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Karbonatiseringsdybde i mm etter* | 91 døgn | 0,8 | 1,3 | 1,3 | 1,9 | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 2,9 | 3,1 | 2,4 |
|                                   | 1 år    | 1,5 | 2,7 | 1,4 | 2,9 | 0,2 | 0,9 | 1,4 | 1,5 | 6,3 | 5,4 | 4,0 |
|                                   | 2 år    | 2,0 | 4,2 | 3,0 | 4,8 | 1,1 | 1,4 | 2,2 | 1,7 | 8,8 | 8,1 | 6,0 |

\*Verdiene representerer middel av begge sideflater for 2 prismer

## 8 Mikroskopianalyse av tynnslip

Ved oppstart preparering til frostprøvingen ble betongens karboniseringsdybde målt for skiver (toppen av sylindrene som angitt i pkt 7.4) lagret sammen med prøvestykker til bestemmelse av frostmotstand. For disse skivene ble det også tildannet tynnslip (ca 20 x 40 mm) av overflatesjiktet mot karbonisert sagflate etter 14 ukers luftlagring.

Tynnslipene ble vurdert i stereomikroskop av SINTEF. Resultatene er gjengitt i Notat i Vedlegg 9. Ved analysen ble det kun observert mindre områder med lavere porøsitet i de ytterste ca 0,7 mm for blandinger 1, 5 og 7. Det var ingen sammenheng mellom observert porøsitetsforskjell og karboniseringsdybde.





Teknologi for et bedre samfunn  
[www.sintef.no](http://www.sintef.no)

### REPORT ON QUALITY TEST

|                                                             |                        |
|-------------------------------------------------------------|------------------------|
| Customer: Signun Kjør Bremseth                              | Your ref.: 149/15      |
| Date received: 30.11.2015                                   | Our ref.: TF-2015-0008 |
| Sample Marked: Forsendelse av 500kg til Sintef              |                        |
| Gj.snittsprøve av 700kg,uttatt på Cristina Masaveu 27.11.15 |                        |

| Parameter:                        |          | Results:   | Method:  |
|-----------------------------------|----------|------------|----------|
| <b>CHEMICAL COMPOSITION</b>       |          |            |          |
| <b>Chemical Parameters</b>        |          |            |          |
| Fly Ash                           |          | 16.9 %     | PD1748   |
| Free Lime                         |          | 1.40 %     | PD0468   |
| Loss On Ignition                  | LOI      | 1.42 %     | EN196-2  |
| Sulfur Trioxide-III               | SO3      | 2.78 %     | PD1752   |
| Carbon                            | C        | 0.44 %     | PD1752   |
| Total Chloride                    | Cl       | 0.033 %    | EN196-2  |
| Water soluble Chromium            | Cr(VI)   | 0.36 mg/kg | EN196-10 |
| <b>XRF Analysis</b>               |          |            |          |
| Silica Oxide                      | SiO2     | 26.89 %    | EN196-2  |
| Aluminum Oxide                    | Al2O3    | 7.63 %     | EN196-2  |
| Ferric Oxide                      | Fe2O3    | 4.55 %     | EN196-2  |
| Calcium Oxide                     | CaO      | 53.59 %    | EN196-2  |
| Potassium Oxide                   | K2O      | 0.57 %     | EN196-2  |
| Sodium Oxide                      | Na2O     | 0.44 %     | EN196-2  |
| Magnesium Oxide                   | MgO      | 1.64 %     | EN196-2  |
| Titanium Dioxide                  | TiO2     | 0.396 %    | EN196-2  |
| Phosphorous Pentoxide             | P2O5     | 0.247 %    | EN196-2  |
| Manganic Oxide                    | Mn2O3    | 0.062 %    | EN196-2  |
| Sodium Oxide Equivalent           | Na2O Eq. | 0.82 %     | EN196-2  |
| <b>TECHNICAL PARAMETERS</b>       |          |            |          |
| <b>Compressive Strength</b>       |          |            |          |
| After 1 day                       |          | 15.4 MPa   | EN196-1  |
| After 2 days                      |          | 20.5 MPa   | EN196-1  |
| After 7 days                      |          | 41.1 MPa   | EN196-1  |
| <b>Fineness</b>                   |          |            |          |
| Specific surface, Blaine          |          | 362 m2/kg  | EN196-6  |
| <b>Particle Size Distribution</b> |          |            |          |
| Sieve Passing                     | <24 µm   | 75.0 %     | PD1749   |
| Sieve Passing                     | <30 µm   | 83.4 %     | PD1749   |
| Sieve Residue                     | >64 µm   | 1.4 %      | PD1749   |
| Sieve Residue                     | >90 µm   | 0.1 %      | PD1749   |
| <b>Other Technical Parameters</b> |          |            |          |
| False Set                         |          | 0 min      | PD1793   |
| Time of Setting                   |          |            |          |
| Initial                           |          | 114 min    | EN196-3  |
| Normal Consistency                |          |            |          |
| Temperate climate 20°C            |          | 27.5 %     | EN196-3  |

Norcem A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory.

10.12.2015

\_\_\_\_\_  
Laboratory Manager

NORCEM AS

Address:  
Sveinsson 2  
P.O. Box 28  
N-1601 Brevik

Phone:  
Telex:  
Cable:  
Brevik Norway

+47 20 57 20 00  
+47 20 57 24 00  
NO 334 949148 V47  
800 28 12 088

Head Office:  
Ulsteinveien 28  
P.O. Box 140 Ulstein  
6218 Øyle



## REPORT ON QUALITY TEST

In commission from: Markedsavdelingen  
 Sample marked: Norcem Standard FA cement CEM II/B-M 42.5 R  
 Pall nr.6  
 Our Ref.: AZ-2015-0095      Your Ref: 63-15

### CHEMICAL ANALYSIS EN 196-2

### PHYSICAL TEST EN 196

|                                                       |            |                             |                        |
|-------------------------------------------------------|------------|-----------------------------|------------------------|
| Loss on ignition (L.O.I.)                             | 2.76 %     | <b>FINENESS</b>             |                        |
| Free Lime                                             | 1.59 %     | Particle analysis +90 mic.  | 0.2 %                  |
| Tot. Chloride                                         | 0.055 %    | " " +64 mic.                | 2.1 %                  |
| Water soluble Chromium (Cr <sup>6+</sup> )            | 2.00 mg/kg | " " -24 mic.                | 74.8 %                 |
| Sulphur Trioxide (SO <sub>3</sub> )                   | 3.21 %     | " " -30 mic.                | 82.1 %                 |
| Silica (SiO <sub>2</sub> )                            | 25.30 %    | Specific Surface; Blaine    | 446 m <sup>2</sup> /kg |
| Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )             | 7.83 %     |                             |                        |
| Ferric Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )        | 3.82 %     |                             |                        |
| Lime (CaO)                                            | 52.50 %    | <b>STANDARD CONSISTENCY</b> |                        |
| Magnesia (MgO)                                        | 2.29 %     | Temperate climate 20°C      | 28.5 %                 |
| Phosphorus Pentoxide (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 0.270 %    |                             |                        |
| Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)                    | 1.19 %     | Le Chatelier expansion      | 0.0 mm                 |
| Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)                      | 0.57 %     |                             |                        |
| Alkali (Na <sub>2</sub> O Eq.)                        | 1.35 %     | <b>SETTING TIME</b>         |                        |
|                                                       |            | Initial                     | 160 min.               |
|                                                       |            | <b>COMPRESSIVE STRENGTH</b> |                        |
|                                                       |            | 1 day                       | 21.0 MPa               |
|                                                       |            | 2 days                      | 32.3 MPa               |
|                                                       |            | 7 days                      | 42.9 MPa               |
|                                                       |            | 28 days                     | 53.4 MPa               |

Norcem A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory, July 6<sup>th</sup> 2015

kcs.

*Kirsti Coen Sævi*  
Laboratory Manager

#### NORCEM A.S

Address:  
Setreveien 2  
P.O.Box 38  
N-3991 Brevik

Phone: +47 35 57 20 00  
Telefax: +47 35 57 04 00

Entno:  
NO 934 949 545 VAT  
Bank account:  
6093 06 12488

Head Office:  
Lilaskensien 2b  
P.O.Box 143 Lilleaker  
0216 Oslo



Typiske egenskabsværdier – Marts 2016

## RAPID® cement / RAPID® AALBORG CEMENT®

2. halvår 2015

RAPID® cement er certificeret hos Bureau Veritas Certification med certifikat nr. 0615-CPR-9806 og cemenbetegnelsen CEM I 52,5 N (LA). CE-mærket er angivet på den tilhørende deklaration.

### Fysiske egenskaber

|                                |                    |      |
|--------------------------------|--------------------|------|
| Trykstyrke (EN 196-1)          |                    |      |
| 1 døgn                         | MPa                | 26   |
| 2 døgn                         | MPa                | 38   |
| 7 døgn                         | MPa                | 57   |
| 28 døgn                        | MPa                | 66   |
| Begyndende afbinding           | min                | 144  |
| Volumenbestandighed            | mm                 | 0,4  |
| Finhed                         | m <sup>2</sup> /kg | 444  |
| Refleksion, (DIN 5033)         | %                  | 32   |
| Absolut densitet               | kg/m <sup>3</sup>  | 3120 |
| Bulkdensitet                   | kg/m <sup>3</sup>  | 1170 |
| Varmed udvikling iht. EN 196-9 | kJ/kg              | 369  |

### Boguesammensætning for klinker

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| C <sub>3</sub> S  | % | 67 |
| C <sub>2</sub> S  | % | 9  |
| C <sub>4</sub> A  | % | 8  |
| C <sub>4</sub> AF | % | 12 |

### Sekundære komponenter og tilsætninger

|                                 |       |      |
|---------------------------------|-------|------|
| SO <sub>3</sub>                 | %     | 3,2  |
| MgO                             | %     | 1,0  |
| Ækv. Na <sub>2</sub> O          | %     | 0,6  |
| Cl <sup>-</sup>                 | %     | 0,03 |
| Glødetab                        | %     | 2,3  |
| Uopløselig rest                 | %     | 0,6  |
| Vandopløseligt Cr <sup>6+</sup> | mg/kg | ≤ 2  |



**MILJØSEMENT**  
**CEM II/B-S 52,5 N**
**Tekniske data**

April 2015

 Tiltredstillere kravene iht. EN 197-1: CEM II/B-S 52,5 N  
 Produktet er sertifisert (CE-mærket) iht. EN 197-1 av VOZ, Tyskland

**Egenskaper**
**Tilsetning**

MILJØSEMENT kan brukes med tilsetningsstoffer, luftinnføringsmidler, silika, flygeaske og slag.  
 Prøvetilsetninger bør alltid foretas for å sikre riktig dosering.

**Forsiktighetsregler ved bruk av sement**

Tørt sementpulver har ingen skadelig effekt på tørr hud. Fuktig sement virker aggressiv på hud, og på slimhinner i øyne, nese og svelg.

- Bruk derfor hansker, støvmaske og vernebriller hvor det er fare for sprut.
- Sement på hud vaskes bort med såpe og rikelig rent vann. Sørg for grundig vask etter arbeidstidens slutt. Hvis det oppstår hudirritasjon, kontakt lege.

**Har man fått sement i øynene:**

- Skyll snarest med rikelig med vann.
- Ikke gnål
- Kontakt lege.

**Har man fått sement i nese, svelg eller munn:**

- Drikk rikelige mengder med rent vann.
- Kontakt lege.

**Typiske data:**

| Kjemiske egenskaper |                                   | vekt %   |
|---------------------|-----------------------------------|----------|
| Kalk                | (CaO)                             | 56       |
| Silisium            | (SiO <sub>2</sub> )               | 25       |
| Aluminium           | (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 6,3      |
| Jern                | (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 2,1      |
| Magnesium           | (MgO)                             | 4,0      |
| Sulfat              | (SO <sub>3</sub> )                | 3,1      |
| Kalium              | (K <sub>2</sub> O)                | 0,82     |
| Natrium             | (Na <sub>2</sub> O)               | 0,31     |
| Alkali ekv.         | (Na <sub>2</sub> Oekv)            | 0,80     |
| (C <sub>3</sub> A)  |                                   | 5,3      |
| Gledetap            |                                   | 1,7      |
| Uløselig rest       |                                   | 0,6      |
| Vannløslig klorid   | (Cl <sup>-</sup> )                | 0,07     |
| Vannløslig krom     | Cr <sup>(VI)</sup>                | <2 mg/kg |

**Fysiske data**

|                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| Finhet (blaine) | 460 m <sup>2</sup> /kg |
| Densitet        | 3,06 g/cm <sup>3</sup> |
| Bulkdensitet    | 1,1 g/cm <sup>3</sup>  |
| Andel slag      | Ca 33%                 |
| Bindetid        | 170 min                |
| Ekspansjon      | 1,0 mm                 |
| Trykfasthet     | 1 d 16 MPa             |
|                 | 2 d 28 MPa             |
|                 | 28 d 59 MPa            |


 CEMEX AS  
 Tel +473102101  
[www.cemex.no](http://www.cemex.no)

 Grenland 70A  
 N-3045 DRAMMEN

| REPORT ON QUALITY TEST                             |                           |            |                        |                    |
|----------------------------------------------------|---------------------------|------------|------------------------|--------------------|
| Customer                                           | Sigrun Kjør Bremseth      |            | Your ref.: 116/15      |                    |
| Received date                                      | 07.10.2015                |            | Our ref.: LN-2015-0029 |                    |
| Sample Marked                                      | Fa III SVV v10,Bjæstegård |            |                        |                    |
|                                                    | Uttatt 500kg              |            |                        |                    |
| Parameter:                                         | Results:                  |            |                        | Method:            |
| CHEMICAL COMPOSITION                               |                           |            |                        |                    |
| Chemical Parameters                                |                           |            |                        |                    |
| Sulfur Trioxide-IR                                 | SO3                       | 0.87       | %                      | PD1752             |
| Carbon                                             | C                         | 0.58       | %                      | PD1752             |
| Loss On Ignition                                   | LOI                       | 1.18       | %                      | EN196-2            |
| XRF Analysis                                       |                           |            |                        |                    |
| Silica Oxide                                       | SiO2                      | 56.84      | %                      | EN196-2            |
| Aluminium Oxide                                    | Al2O3                     | 25.18      | %                      | EN196-2            |
| Ferric Oxide                                       | Fe2O3                     | 7.17       | %                      | EN196-2            |
| Calcium Oxide                                      | CaO                       | 3.87       | %                      | EN196-2            |
| Potassium Oxide                                    | K2O                       | 1.43       | %                      | EN196-2            |
| Sodium Oxide                                       | Na2O                      | 0.60       | %                      | EN196-2            |
| Magnesium Oxide                                    | MgO                       | 1.20       | %                      | EN196-2            |
| Titanium Dioxide                                   | TiO2                      | 1.279      | %                      | EN196-2            |
| Phosphorous Pentoxide                              | P2O5                      | 0.332      | %                      | EN196-2            |
| Chloride                                           | Cl                        | 0.005      | %                      | EN196-2            |
| Chromium Oxide                                     | Cr2O3                     | 0.022      | %                      | EN196-2            |
| Zinc Oxide                                         | ZnO                       | 0.019      | %                      | EN196-2            |
| Strontium Oxide                                    | SiO                       | 0.054      | %                      | EN196-2            |
| Sodium Oxide Equivalent                            | Na2O Eq.                  | 1.82       | %                      | EN196-2            |
| TECHNICAL PARAMETERS                               |                           |            |                        |                    |
| Fineness                                           |                           |            |                        |                    |
| Specific Weight                                    |                           | 2.31       | g/cm3                  | PD1777             |
| Specific surface, Blaine                           |                           | 294        | m2/kg                  | EN196-6            |
| NorceM A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory, |                           | 15.10.2015 |                        | Laboratory Manager |

**NORCEM A.S**

 Address:  
 Sætreveien 2  
 P.O. Box 38  
 N-3991 Brevik

 Phone: +47-35-57 20 00  
 Telefax: +47-35-57 04 90  
 EMail: NO 934 949 145 VAT  
 Bank Account: 6003 06 12488

 Head Office:  
 Lilleakerveien 2b  
 P.O. Box 143 Lilleaker  
 0216 Oslo

**Analyse av silikastøv Elkem 940U**

|                   |                                |          |
|-------------------|--------------------------------|----------|
|                   | <b>Type</b>                    | 940U     |
|                   | <b>Nr .</b>                    | 3073236  |
|                   | <b>Sub</b>                     |          |
|                   | <b>Dato</b>                    | 01/07/15 |
| %                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.35     |
| %                 | CaO                            | 0.26     |
| %                 | Cl                             | 0.08     |
| %                 | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.00     |
| %                 | CuO                            | 0.00     |
| %                 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.11     |
| %                 | K <sub>2</sub> O               | 0.76     |
| %                 | MgO                            | 0.33     |
| %                 | MnO                            | 0.017    |
| %                 | Na <sub>2</sub> O              | 0.16     |
| %                 | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.09     |
| %                 | SiO <sub>2</sub>               | 96.45    |
| %                 | SO <sub>3</sub>                | 0.09     |
| %                 | TiO <sub>2</sub>               | 0.002    |
| %                 | ZnO                            | 0.038    |
| %                 | SiC                            | 0.35     |
| kg/m <sup>3</sup> | Bulk d.                        |          |
| tonn              | Lotvekt                        |          |
| %                 | Colour                         | 43       |
| %                 | H <sub>2</sub> O               | 0.7      |
| %                 | +45my                          | 0.14     |
| %                 | C                              | 0.6      |
| %                 | LOI 950                        | 0.90     |
|                   | pH                             | 7.9      |

## VEDLEGG 7

### Data for tilsetningsstoffer

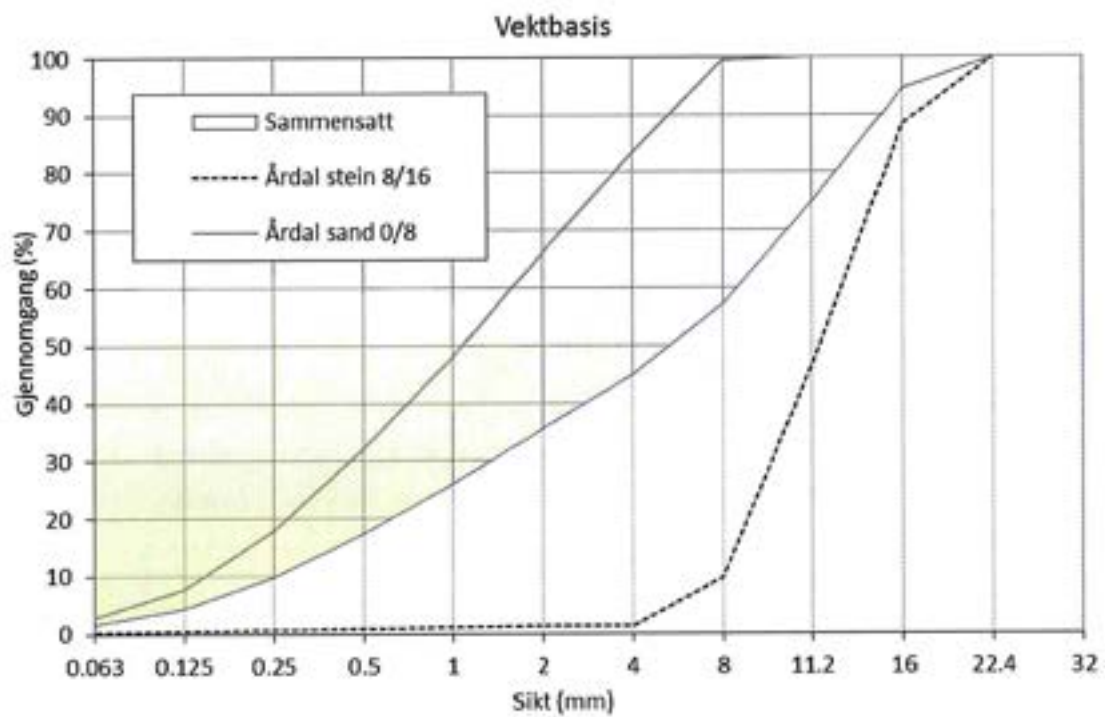
#### TEKNISKE DATA (typiske verdier) Dynamon SX-23

| PRODUKTBESKRIVELSE                                |                         |
|---------------------------------------------------|-------------------------|
| Form:                                             | væske                   |
| Farge:                                            | gulbrun                 |
| Viskositet:                                       | lettflytende; <30 mPa·S |
| Terrstoffinnhold %:                               | 23.0 ± 1.1              |
| Densitet, g/cm <sup>3</sup> :                     | 1.05 ± 0.02             |
| pH:                                               | 6 ± 1                   |
| Kloridinnhold, %:                                 | < 0.05                  |
| Alkaliinnhold (Na <sub>2</sub> O-ekvivalenter) %: | < 2.0                   |

#### TEKNISKE DATA (typiske verdier) Mapair 25 1:9

| PRODUKTBESKRIVELSE                            |                          |
|-----------------------------------------------|--------------------------|
| Form:                                         | væske                    |
| Farge:                                        | gjennomsiktig            |
| Viskositet:                                   | lettflytende; < 20 mPa·S |
| Terrstoffinnhold, %:                          | 0.42 ± 0.04              |
| Tyngdetetthet, g/cm <sup>3</sup> :            | 1.00 ± 0.02              |
| pH:                                           | 8.5 ± 1                  |
| Kloridinnhold, %:                             | ≤ 0.05                   |
| Alkaliinnhold (Na <sub>2</sub> O-ekvivalent): | ≤ 0.2                    |

**VEDLEGG 8**  
**Siktekurver for anvendt tilslag**



**VEDLEGG 9**  
**Notat fra SINTEF**  
**Mikroskopianalyse av tynnslip**  
**13 sider**



# Notat

## Dokumentasjon av ulike betongresepter – mikroskopianalyser av tynnslip

SAKSBEHANDLER / FORFATTER

Marit Haugen

*Marit Haugen* Marit Haugen  
2017.02.09 13:05:49  
+01'00'

GÅR TIL

Øyvind Bjøntegaard, Statens vegvesen

|            |           |             |              |
|------------|-----------|-------------|--------------|
| BEHANDLING | UTTALELSE | ORIENTERING | ETTER AVTALE |
|------------|-----------|-------------|--------------|

X

PROSJEKTNR / SAK NR

102011655

DATO

2017-02-09

GRADERING

Fortrolig

### 1 PRØVEMATERIALET

En sylinderskive fra hver av de 11 blandingene med ulike resepter ble splittet. Skivene har alle vært lagret i 14 uker i inneluft av 60 % RF og 20 °C sammen med prøvestykker for frostprøving. Fra overflatesjiktet til skivene ble det tildannet fluorescensimpregnerte tynnslip med den karbonatiserte sageflaten som toppflate. Denne flaten er motstående flate til flaten som ble frostprøvd. De framstilte tynnslipene dekker et betongareal på ca 20 mm x 40 mm, og tynnslipenes toppflate og lengdeakse er plassert langs den karbonatiserte sageflaten. På denne måten blir mest mulig av den karbonatiserte sageflaten innlemmet i tynnslipene.

### 2 UTFØRT UNDERSØKELSE

Alle tynnslipene ble undersøkt i polarisasjonsmikroskop påmontert UV-filtre. Etter oppdragsgivers ønske ble følgende parametere undersøkt:

- \* Karboniseringsdybde i toppsjiktet
- \* Eventuelle mikroriss i toppsjiktet (karbonisert sjikt)
- \* Eventuelle porositetsforskjeller i toppsjiktet sett i sammenheng med betongen forøvrig

### 3 RESULTATER

I Tabell 1 er resultatene fra mikroskopianalysen oppsummert. Foto nr 1-33 viser bilder av tynnslipene.

**Tabell 1. Tynnslipobservasjoner**

| Prøve | Karbonatiseringsdybde, mm | Vurdering av karbonatiseringsfront | Mikroriss i toppsjiktet | Porøsitetsskille i toppsjiktet                                                         |
|-------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 0,3-1,0                   | Relativt jevn                      | Svært, svært lite       | Lokalt områder med litt lavere porøsitet enn betongen forøvrig til maks dybde 0,7 mm * |
| 2     | 0,6-2,3                   | Litt ujevn                         | Lite                    | Ikke observert                                                                         |
| 3     | 0,4-2,0                   | Litt ujevn                         | Noe                     | Ikke observert                                                                         |
| 4     | 0,6-3,6                   | Noe ujevn                          | Svært lite              | Ikke observert                                                                         |
| 5     | 0-1,8                     | Jevnt lav, rundt 0,2 mm            | Lite                    | Lokalt områder med litt lavere porøsitet enn betongen forøvrig til maks dybde 0,7 mm * |
| 6     | 0-1,4                     | Jevnt lav, rundt 0,2-0,4 mm        | Lite                    | Ikke observert                                                                         |
| 7     | 0,2-2,6 mm                | Noe ujevn                          | Noe                     | Lokalt områder med litt lavere porøsitet enn betongen forøvrig til maks dybde 0,7 mm * |
| 8     | 0-1,4 mm                  | Litt ujevn                         | Svært lite              | Ikke observert                                                                         |
| 9     | 2,6-4,0 mm                | Relativ jevn                       | Svært lite              | Ikke observert                                                                         |
| 10    | 2,0-3,0 mm                | Relativ jevn                       | Svært, svært lite       | Ikke observert                                                                         |
| 11    | 0,8-2,4 mm                | Relativ jevn                       | Svært lite              | Ikke observert                                                                         |

\* Det er ingen tydelig sammenheng mellom karbonatisering og skille i porøsitet i toppsjiktet

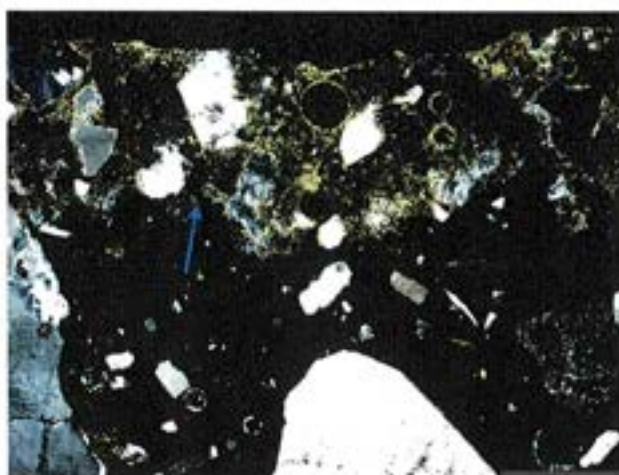


Foto nr 1. Prøve 1. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er relativt jevn. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

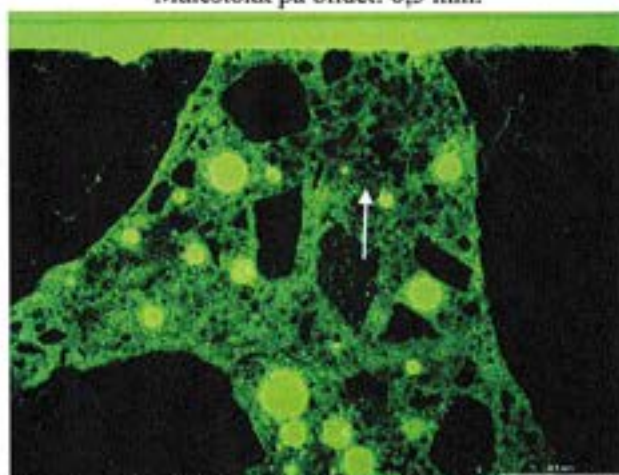


Foto nr 2. Prøve 1. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Tilslagskorn er mørkegrønne (tette), mens sementpastaen er lysere grønn (mer porøs). Lys grønn sementpastaen er mer porøs enn mørk grønn. Bildet viser et lokalt område i toppsjiktet (pil) med litt lavere porøsitet enn betongen forøvrig. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

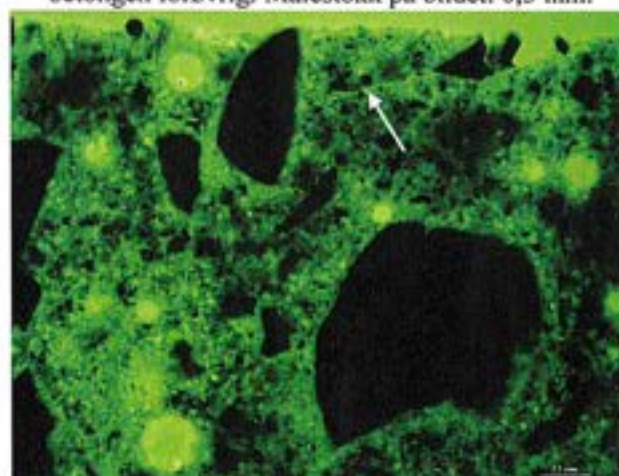


Foto nr 3. Prøve 1. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et mikroriss i toppsjiktet (pil). Omfanget av mikroriss er svært, svært lavt. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

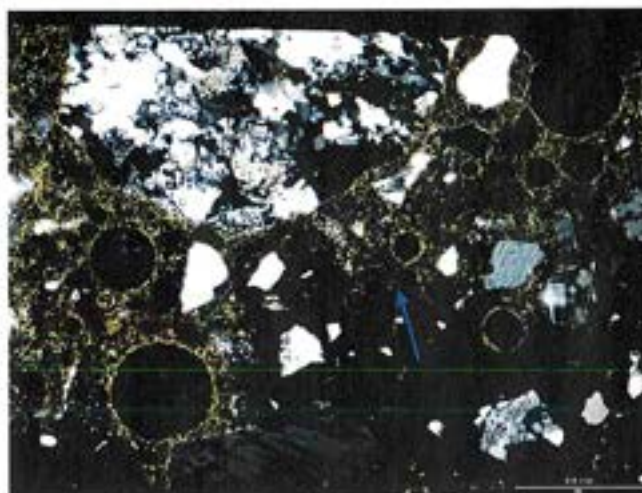


Foto nr 4. Prøve 2. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er litt ujevn. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

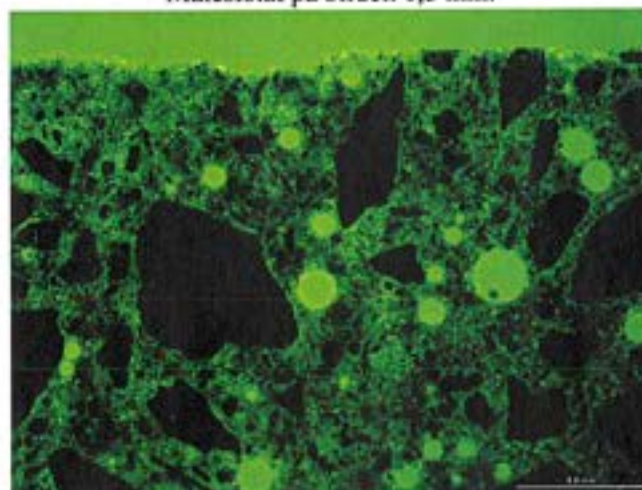


Foto nr 5. Prøve 2. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Det kan ikke observeres forskjell i porøsitet i toppsjiktet sammenlignet med betongen forøvrig. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

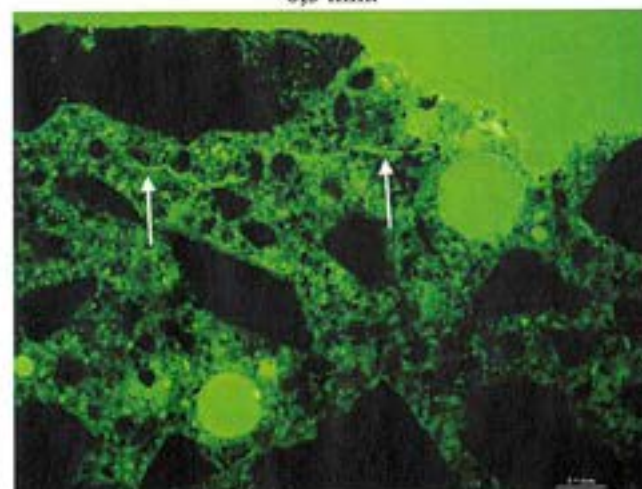


Foto nr 6. Prøve 2. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser mikroriss i toppsjiktet (piler). Omfanget av mikroriss er lavt. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

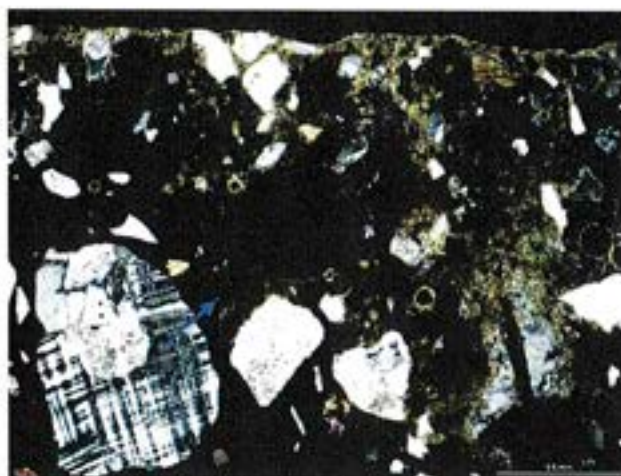


Foto nr 7. Prøve 3. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er litt ujevn. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

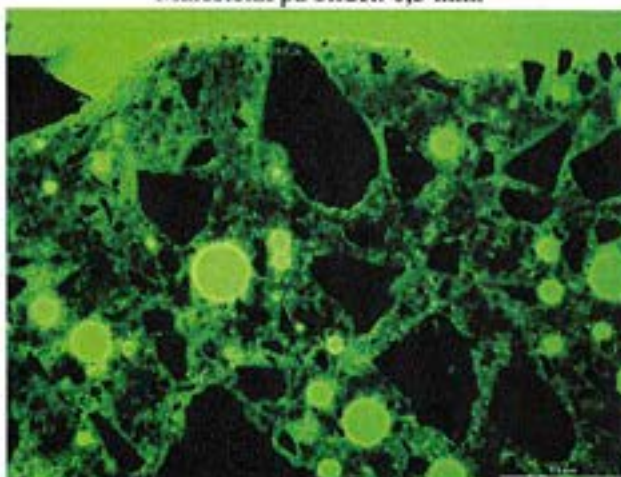


Foto nr 8. Prøve 3. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Det kan ikke observeres forskjell i porøsitet i toppsjiktet sammenlignet med betongen forøvrig. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

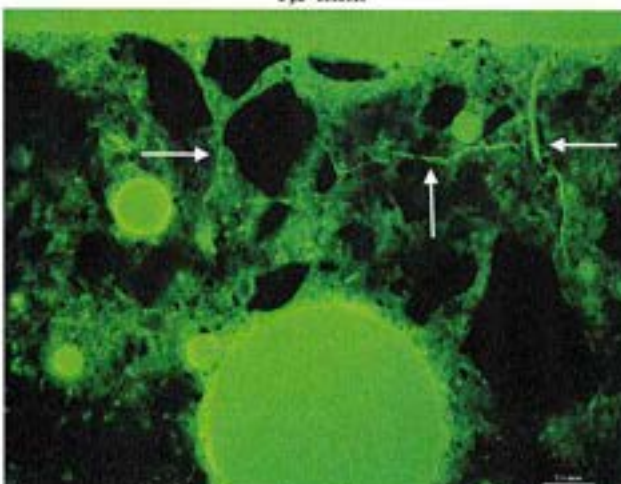


Foto nr 9. Prøve 3. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser mikroriss i toppsjiktet (piler). Omfanget av mikroriss er moderat. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

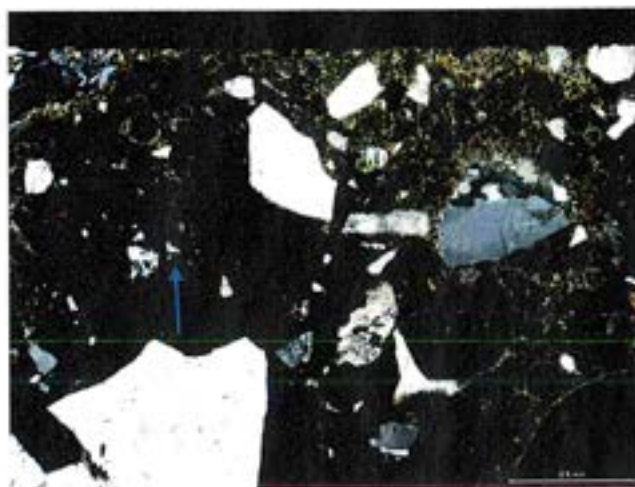


Foto nr 10. Prøve 4. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er noe ujevn. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

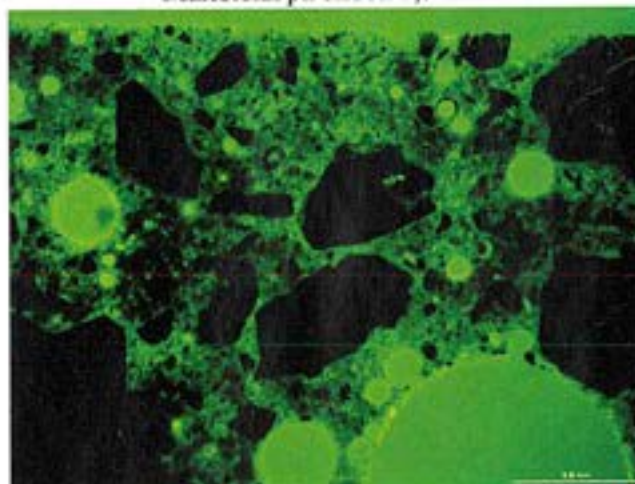


Foto nr 11. Prøve 4. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Det kan ikke observeres forskjell i porøsitet i toppsjiktet sammenlignet med betongen forøvrig. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

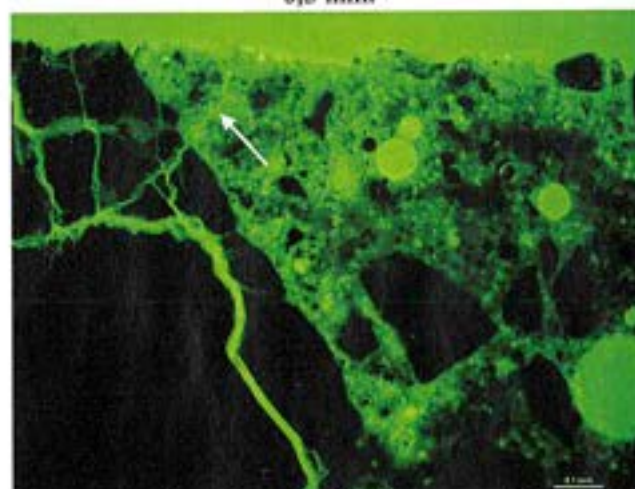


Foto nr 12. Prøve 4. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et mikroriss i toppsjiktet (pil). Omfanget av mikroriss er svært lavt. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

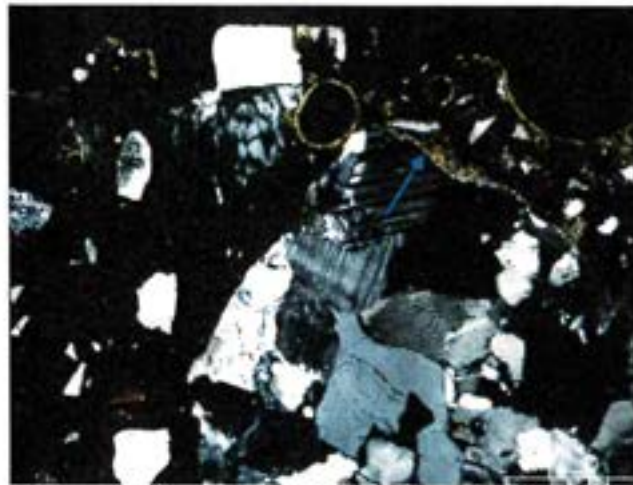


Foto nr 13. Prøve 5. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er jevnt lav. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

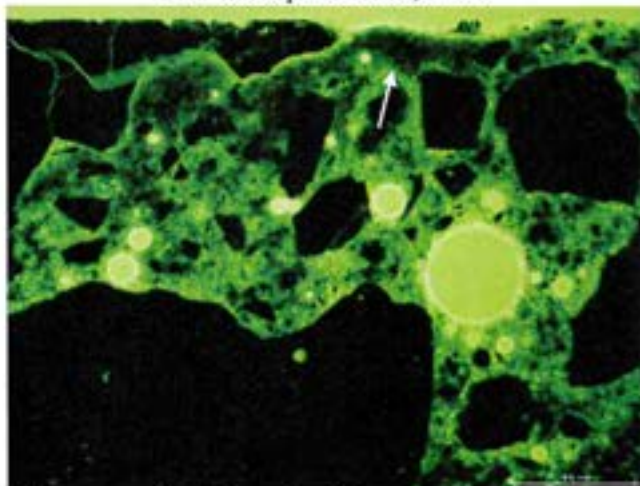


Foto nr 14. Prøve 5. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et lokalt område i toppsjiktet med litt lavere porøsitet enn betongen forøvrig (pil). Målestokk på bildet: 0,5 mm.

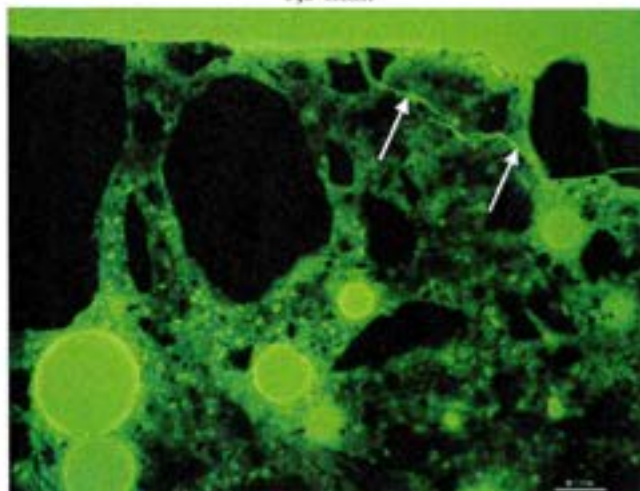


Foto nr 15. Prøve 5. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser mikroriss i toppsjiktet (piler). Omfanget av mikroriss er lavt. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

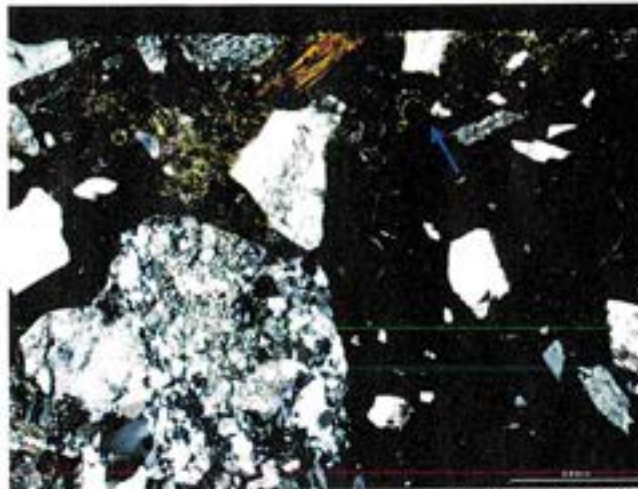


Foto nr 16. Prøve 6. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er jevnt lav. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

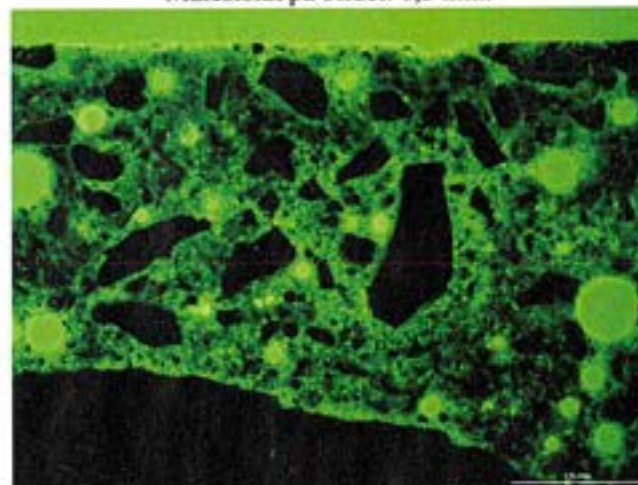


Foto nr 17. Prøve 6. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Det kan ikke observeres forskjell i porøsitet i toppsjiktet sammenlignet med betongen forøvrig. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

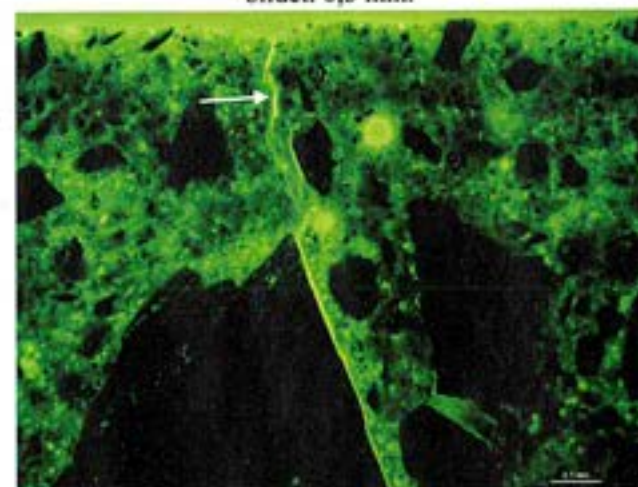


Foto nr 18. Prøve 6. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et mikroriss i toppsjiktet (pil). Omfanget av mikroriss er lavt. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

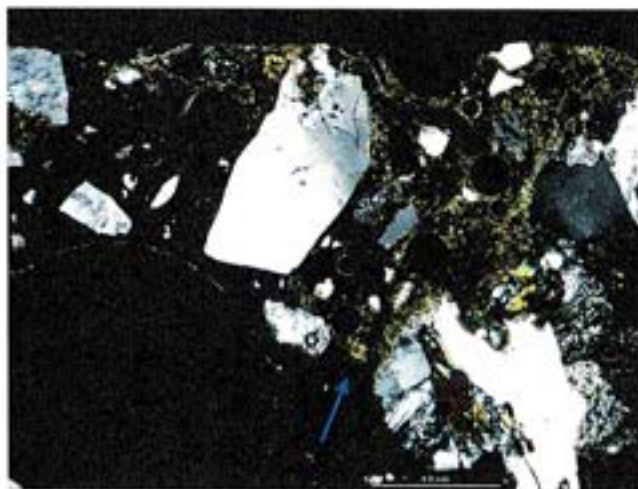


Foto nr 19. Prøve 7. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er noe ujevn. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

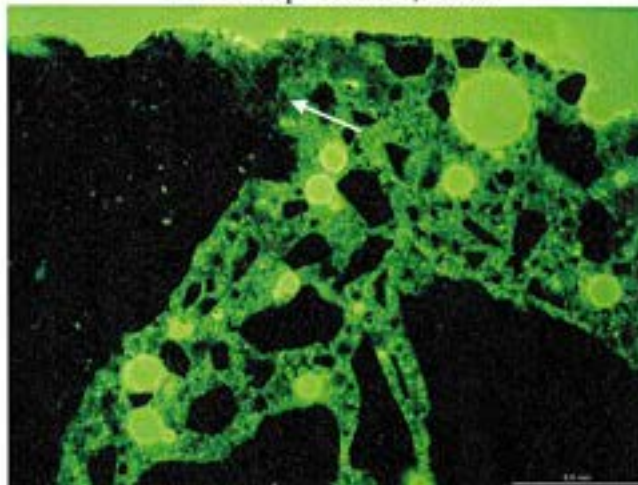


Foto nr 20. Prøve 7. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et lokalt område i toppsjiktet med litt lavere porøsitet enn betongen forøvrig (pil). Målestokk på bildet: 0,5 mm.

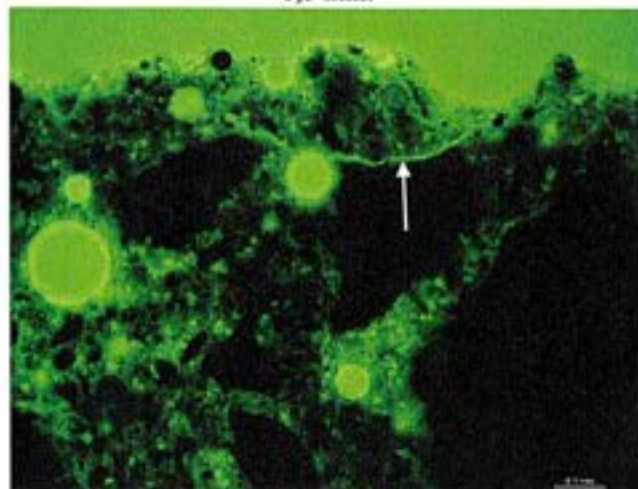


Foto nr 21. Prøve 7. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et mikroriss i toppsjiktet (pil). Omfanget av mikroriss er moderat. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

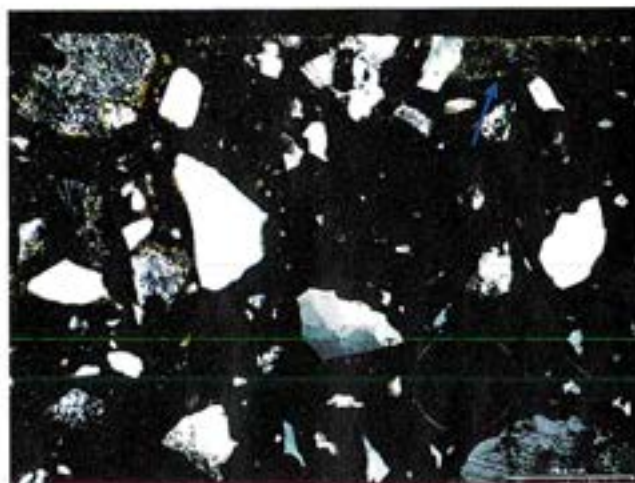


Foto nr 22. Prøve 8. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er litt ujevn. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

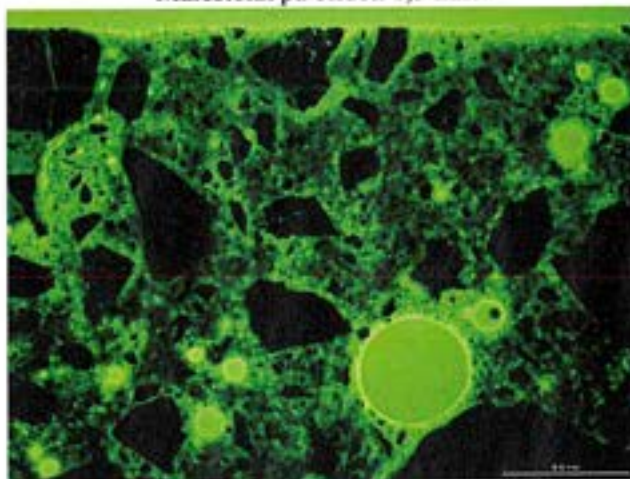


Foto nr 23. Prøve 8. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Det kan ikke observeres forskjell i porøsitet i toppsjiktet sammenlignet med betongen forøvrig. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

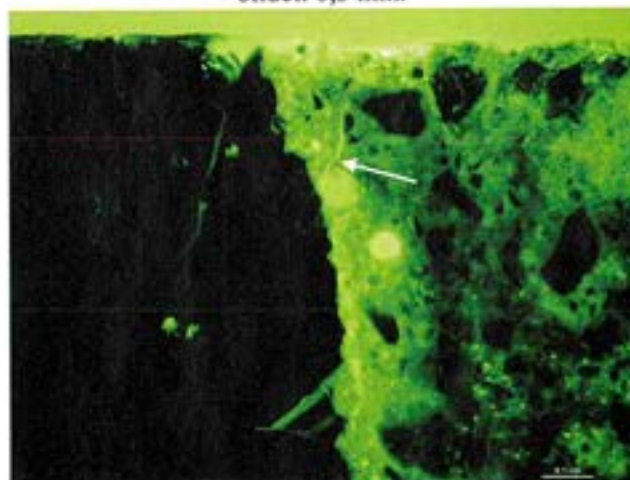


Foto nr 24. Prøve 8. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et mikroriss i toppsjiktet (pil). Omfanget av mikroriss er svært lavt. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

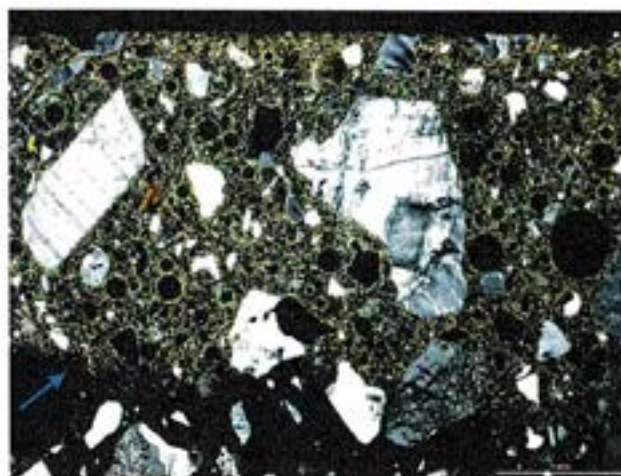


Foto nr 25. Prøve 9. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er relativt jevn. Målestokk på bildet: 1 mm.

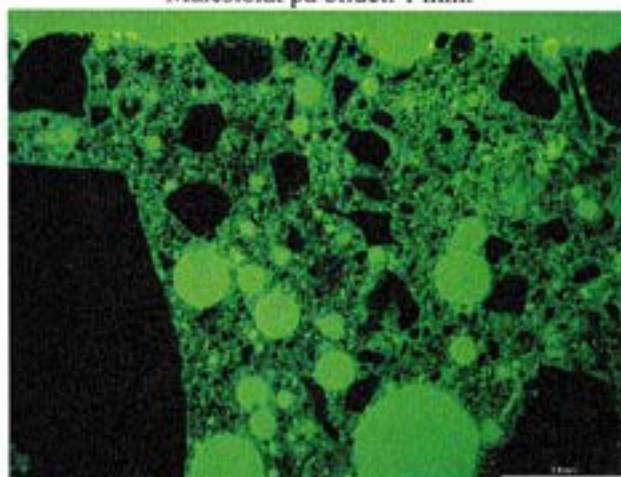


Foto nr 26. Prøve 9. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Det kan ikke observeres forskjell i porøsitet i toppsjiktet sammenlignet med betongen forøvrig. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

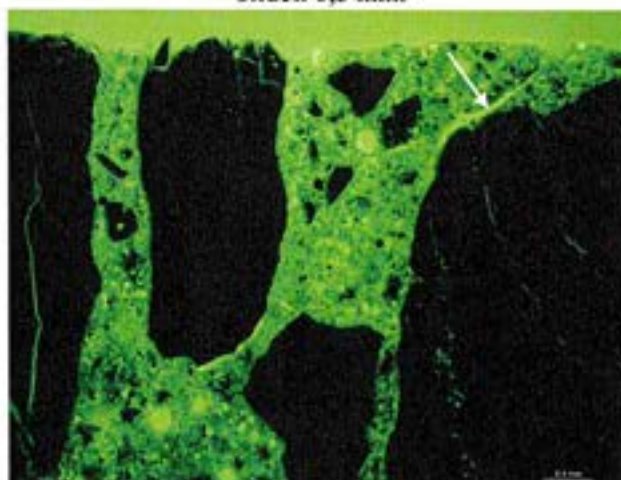


Foto nr 27. Prøve 9. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et mikroriss i toppsjiktet (pil). Omfanget av mikroriss er svært lavt. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

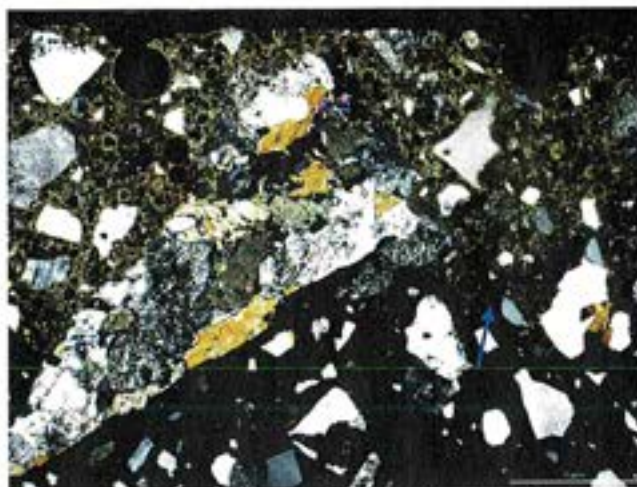


Foto nr 28. Prøve 10. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er relativt jevn. Målestokk på bildet: 1 mm.

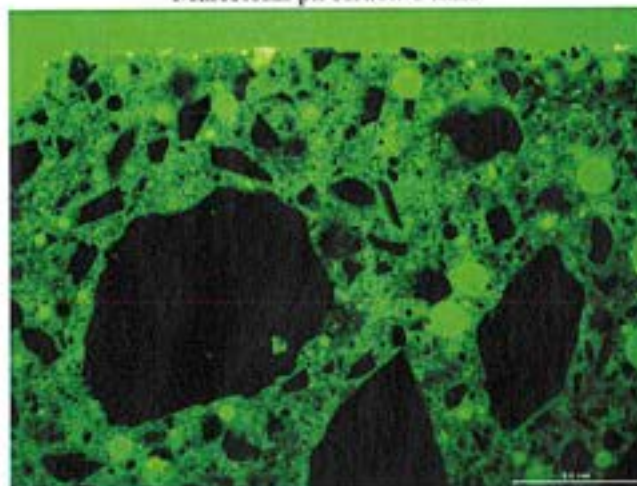


Foto nr 29. Prøve 10. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Det kan ikke observeres forskjell i porøsitet i toppsjiktet enn i betongen forøvrig. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

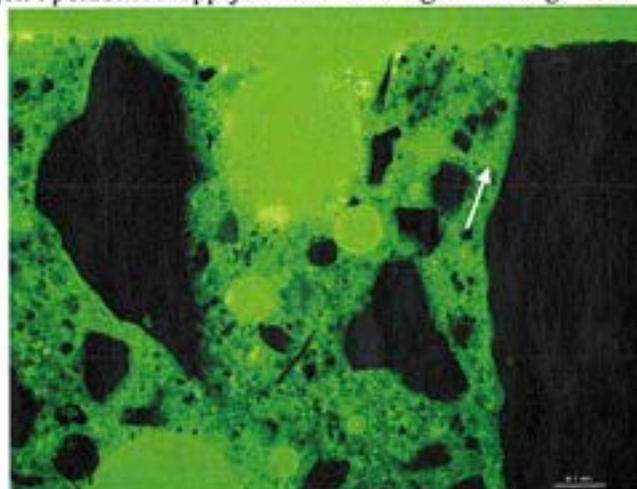


Foto nr 30. Prøve 10. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et mikroriss i toppsjiktet (pil). Omfanget av mikroriss er svært, svært lavt. Målestokk på bildet: 0,1 mm.

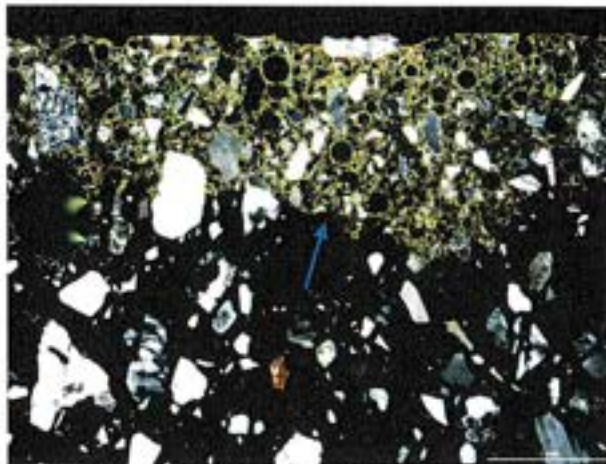


Foto nr 31. Prøve 11. Utsnitt av tynnslipet fotografert i polarisert lys (toppflaten øverst). Bildet viser et utsnitt av karbonatiseringsfronten (lys brun, pil) i toppsjiktet. Karbonatiseringsfronten er relativt jevn. Målestokk på bildet: 1 mm.

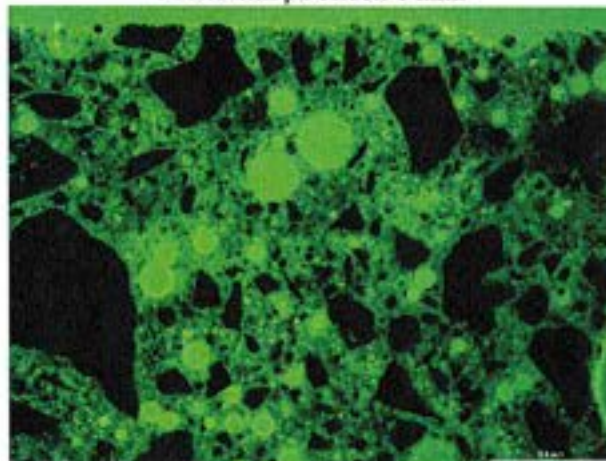


Foto nr 32. Prøve 11. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Det kan ikke observeres forskjell i porøsitet i toppsjiktet sammenlignet med betongen forøvrig. Målestokk på bildet: 0,5 mm.

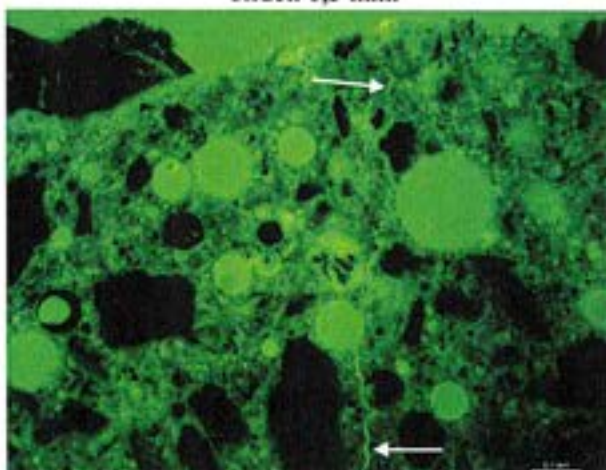


Foto nr 33. Prøve 11. Utsnitt av tynnslipet fotografert i fluorescerende lys (toppflaten øverst). Bildet viser et mikroriss i toppsjiktet (piler). Omfanget av mikroriss er svært lavt. Målestokk på bildet: 0,1 mm.



**VEDLEGG 10**  
**Prøvingsappport fra EMPA**  
**Analysis of cementitious materials**  
**15 sider**

Se Vedlegg 1 side V20



Statens vegvesen  
Pb. 1010 Nordre Ål  
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

[firmapost@vegvesen.no](mailto:firmapost@vegvesen.no)

ISSN: 1893-1162

[vegvesen.no](http://vegvesen.no)

**Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag**