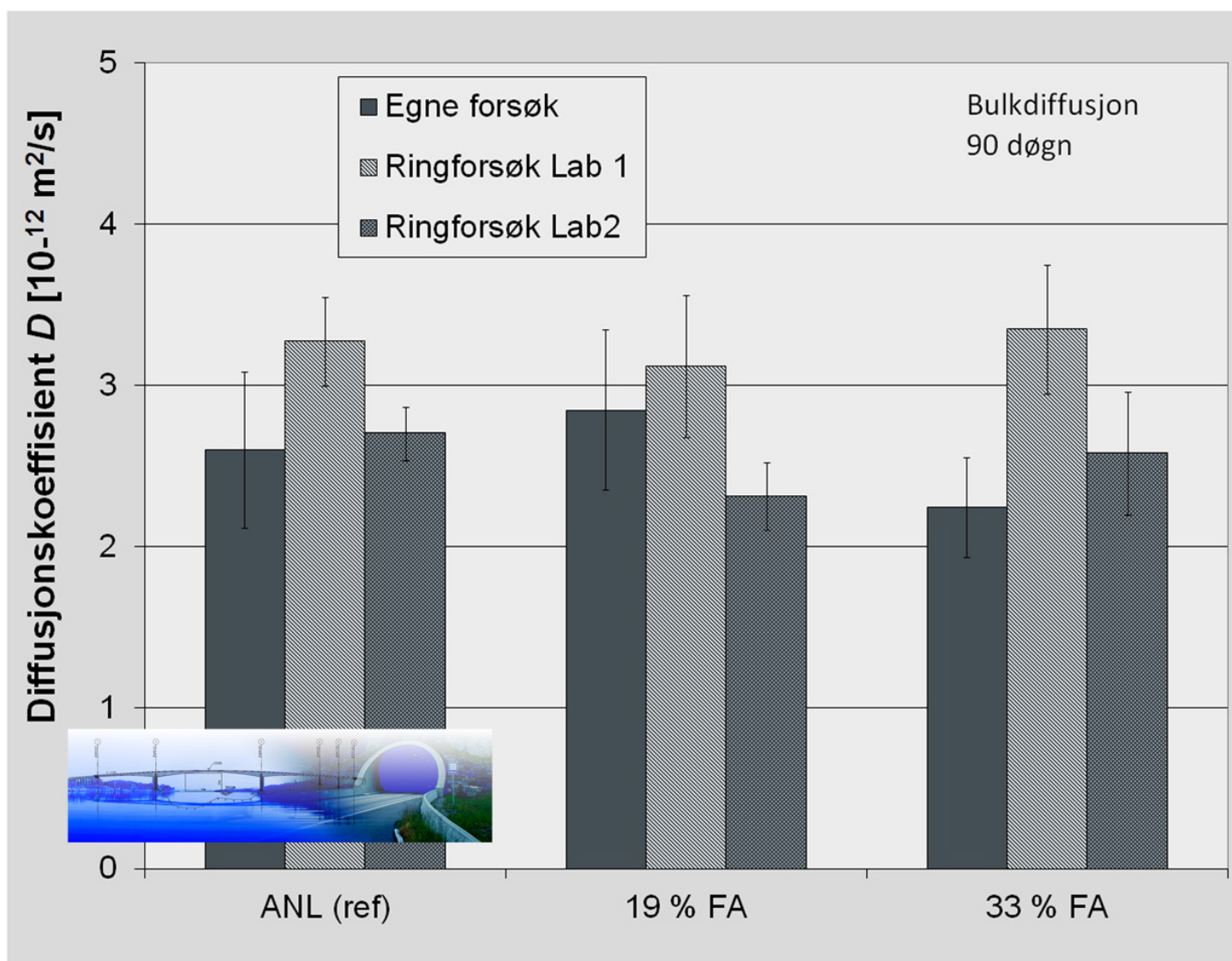


# Effekt av flygeaske på betongegenskaper

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 275



## Tittel

Effekt av flygeaske på  
betongegenskaper

## Undertittel

Laboratorieforsøk på betong i tidlig og moden  
alder

## Forfatter

Øyvind Bjøntegaard og Eva Rodum

## Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelin-  
gen

## Seksjon

Tunnel og betong

## Prosjektnummer

603242

## Rapportnummer

Nr. 275

## Prosjektleder

Synnøve A. Myren / Sølvi Austnes

## Godkjent av

Claus K. Larsen

## Emneord

Varige konstruksjoner, betong, flygeaske,  
bestandighet, fasthet, hydrasjonsvarme

## Sammendrag

Hovedhensikten har vært å studere effekten av 0, 19 % og 33 % flygeaske-innhold (FA) og to sementtyper på betongs bestandighets-egenskaper (kloridmotstand, spesifikk elektrisk motstand, samt fasthet etc) fra tidlig alder og fram til 2 år. Resultatene viser bl.a. at økende FA-dosering gjør betongen mer åpen for kloridinntrengning i veldig tidlig alder ved akselererte kloridforsøk, mens forsøk med lengre og realistisk eksponering indikerer at denne tidligeffekten ikke nødvendigvis er negativ på lengre sikt på grunn av gunstig aldring i betongene med FA. Tidlig overflatebehandling viste seg også som et lovende tiltak for å hindre tidlig kloridinntrengning. Over tid ga FA-tilsetning stor økning i betongens elektriske motstand. FA reduserer fasthetsnivået, men øker fasthetstilveksten i tiden etter 28 døgn. Den pozzolane aktiviteten til FA er avhengig av sementtypen.

## Title

Effect of flyash on concrete properties

## Subtitle

Laboratory tests on concrete in early and  
mature age

## Author

Øyvind Bjøntegaard og Eva Rodum

## Department

Traffic Safety, Environment and Technology  
Department

## Section

Tunnel og betong

## Project number

603242

## Report number

No. 275

## Project manager

Synnøve A. Myren / Sølvi Austnes

## Approved by

Claus K. Larsen

## Key words

Durable structures, concrete, flyash,  
durability, strength, hydration heat

## Summary

The main goal has been to study the effect of 0, 19 % and 33 % flyash (FA) dosage and two cement types on durability properties of concrete (chloride- and electrical resistance, and strength) from early age up to 2 years. With time the study was expanded to also including a Round-Robin test on chloride diffusion, a student project, and SEM- and TG-analyses. For the accelerated chloride diffusion test the results show that increasing FA-content gave higher chloride ingress in the very early age. However, more long-term and realistic exposure tests indicate that this early effect is not necessarily negative on the long term due to beneficial aging in the FA-concretes. Electrical resistance over time increases significantly with FA-addition. FA decreases the strength level, but increases the strength gain beyond 28 days. The pozzolanic activity of FA is dependent on the cement type.

## Forord

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra **etatsprogrammet Varige konstruksjoner**. Programmet hører til under Trafikksikkerhet-, miljø- og teknologiavdelingen i Statens vegvesen, Vegdirektoratet, og foregår i perioden 2012-2015. Hensikten med programmet er å legge til rette for at riktige materialer og produkter brukes på riktig måte i Statens vegvesen sine konstruksjoner, med hovedvekt på bruer og tunneler.

Formålet med programmet er å bidra til mer forutsigbarhet i drift- og vedlikeholdsfasen for konstruksjonene. Dette vil igjen føre til lavere kostnader. Programmet vil også bidra til å øke bevisstheten og kunnskapen om materialer og løsninger, både i Statens vegvesen og i bransjen for øvrig.

For å realisere dette formålet skal programmet bidra til at aktuelle håndbøker i Statens vegvesen oppdateres med tanke på riktig bruk av materialer, sørge for økt kunnskap om miljøpåkjenninger og nedbrytningsmekanismer for bruer og tunneler, og gi konkrete forslag til valg av materialer og løsninger for bruer og tunneler.

Varige konstruksjoner består, i tillegg til et overordnet implementeringsprosjekt, av fire prosjekter:

- Prosjekt 1: Tilstandsutvikling bruer
- Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler
- Prosjekt 3: Fremtidens bruer
- Prosjekt 4: Fremtidens tunneler

Varige konstruksjoner ledes av Synnøve A. Myren. Mer informasjon om prosjektet finnes på [vegvesen.no/varigekonstruksjoner](http://vegvesen.no/varigekonstruksjoner)

Denne rapporten tilhører **Prosjekt 3: Fremtidens bruer** som ledes av Sølvi Austnes. Prosjektet skal bidra til at fremtidige bruer bygges med materialer bedre tilpasset det miljøet konstruksjonene skal stå i. Prosjektet skal bygge på etablert kunnskap om skadeutvikling og de sårbare punktene som identifiseres i Prosjekt 1: Tilstandsutvikling bruer, og skal omhandle både materialer, utførelse og kontroll. Prosjektet skal resultere i at fremtidige bruer oppnår forutsatt levetid med reduserte og mer forutsigbare drift- og vedlikeholdskostnader.

Rapporten er utarbeidet av *Øyvind Bjøntegaard* og *Eva Rodum*, Statens vegvesen.

## HISTORIKK

Undersøkelsen ble i sin tid initiert som et samarbeidsprosjekt mellom Tunnel og betongseksjonen i Statens vegvesen (SVV) og sementleverandøren Norcem A.S. Forsøkene ble startet opp i 2007 med felles planlegging. Begge parter har benyttet de samme betongreseptene til ulike undersøkelser, hvor betongvariable har vært flyveaskedosering og type sementklinker. SVV sine undersøkelser har vært laboratoriebaserte (kloriddiffusjon, trykkfasthet, elektrisk motstand og analyse av hydrasjonsprodukter), mens en sentral aktivitet hos Norcem har vært 5 års felteksponering i sjøvann fra henholdsvis 9 døgn og 90 døgn betongalder, i tillegg til laboratorieforsøk (trykkfasthet, varmeutvikling, kloriddiffusjon og elektrisk motstand).

Rapporten omhandler kun de forsøk som er utført/finansiert av SVV, samt resultatene fra Norcems varmeutviklingsforsøk. I forhold til de opprinnelige planene, ble undersøkelsene etter hvert utvidet både med et ringforsøk på kloriddiffusjon, analyser av hydrasjonsprodukter og en tilknyttet studentoppgave på tidlig overflatebehandling. Alle disse aktivitetene er inkludert i denne rapporten. Som et supplement er det i tillegg inkludert noen laboratorieresultater fra byggeprosjekter på fullskala betonger (gjelder fasthet og kapillær sugsevne).

Reidar Kompen og Claus K. Larsen var sentrale deltagere i planleggingsfasen 2006-2007. Første forfatter var ansvarlig for koordinering med Norcem i det opprinnelige programmet (kalt «aktivitet A»), stod for forsøksplanlegging for denne i Sentrallaboratoriet, innsamling/behandling av data, og bidrag til studentoppgaven. Andre forfatter har stått for behandling av kloriddiffusjonsresultater og var svært sentral i studentoppgaven. Synnøve A. Myren har vært sentral i alt det praktiske i Sentrallaboratoriet inklusive registreringer/oppfølging ved blanding og utførelse, også studentoppgaven. Utover det har Statens vegvesens Sentrallaboratorium gjort en formidabel jobb!

Aktiviteten gikk opprinnelig under prosjektnavnet «samarbeidsprosjektet Anl-Fa», men etter etableringen av etatsprogrammet Varige konstruksjoner (VK) falt aktiviteten naturlig inn under delaktiviteten Fremtidens Brubetonger (FB-1). Det avsluttende laboratorie- og rapporteringsarbeidet er utført under VK FB-1.

# Innhold

<b>1</b>	<b>INNLEDNING</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>MATERIALER OG BETONGRESEPTER</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>PRØVNINGSPROGRAM</b> .....	<b>6</b>
3.1	OVERORDNET PRØVNINGSPROGRAM .....	6
3.2	AKTIVITET (A): SVV SENTRALLABORATORIUM – PROGRAM OG PROSEDYRER .....	7
3.2.1	Overordnet program .....	7
3.2.2	Prosedyre, kloriddiffusjon NT Build 443.....	7
3.2.3	Prosedyre, spesifikk elektrisk motstand.....	8
3.3	AKTIVITET (B) - HYDRATASJONSPRODUKTER .....	9
3.4	AKTIVITET (C) – RINGFORSØK PÅ KLORIDDIFFUSJON (98 DØGN) .....	9
3.5	AKTIVITET (D) OG (E) – EFFEKT AV TIDLIG OVERFLATEBEHANDLING PÅ KLORIDINNTRENGING.....	10
<b>4</b>	<b>RESULTATER: KLORIDDIFFUSJON – RINGFORSØK (AKTIVITET C)</b> .....	<b>12</b>
4.1	INNLEDNING .....	12
4.2	DIFFUSJONSKOEFFISIENT.....	13
4.3	OVERFLATEKONSENTRASJON $C_0$ .....	16
4.4	TOTALT INNTRENGT MENGDE KLORIDER.....	18
4.5	OPPSUMMERING RINGFORSØK .....	20
<b>5</b>	<b>RESULTATER, AKTIVITET A</b> .....	<b>22</b>
5.1	FERSK BETONG: SYNK, LUFT OG DENSITET .....	22
5.2	FASTHETSUTVIKLING .....	22
5.3	ANDRE FASTHETSRESULTATER FRA PROSJEKT (ANLEGG FA SEMENT) .....	25
5.4	SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND .....	26
5.5	KLORIDDIFFUSJON (NT BUILD 443) .....	28
5.5.1	Diffusjonskoeffisient ( $D$ ) .....	28
5.5.2	Overflatekonsentrasjon $C_0$ og totalt inntrengt mengde klorider .....	33
5.5.3	Kloridinntrengningsdybde tilsvarende 0,1 % av betongvekt.....	34
5.5.4	Relasjon mellom diffusjonskoeffisient og spesifikk elektrisk motstand.....	36
5.6	EKSTRAFORSØK VED 6 ÅRS BETONGALDER .....	36
5.6.1	Gjenværende prøvestykker og opplegg .....	36
5.6.2	Fasthetsresultater.....	37
5.6.3	Spesifikk elektrisk motstand .....	38
5.6.4	Kapillær sugehastighet og porøsitet.....	39
<b>6</b>	<b>HYDRATASJONSPRODUKTER, AKTIVITET B</b> .....	<b>42</b>
6.1	INNLEDNING .....	42
6.2	RESULTATER .....	43
6.2.1	Pozzolan aktivitet/mengde kalsiumhydroksid ( $CH$ ).....	43
6.2.2	Kjemisk bundet vann .....	45
6.2.3	Aluminatfasene.....	47
6.2.4	Bilder av pastaene etter 28 døgn, 1 år og 2 år (400x forstørrelse).....	48
6.2.5	Oppsummering, hydratasjonsprodukter.....	50
<b>7</b>	<b>EFFEKT AV TIDLIG OVERFLATEBEHANDLING, AKTIVITET D OG E</b> .....	<b>52</b>
7.1	INNLEDNING .....	52
7.2	FASTHETSUTVIKLING .....	52
7.3	ELEKTRISK MOTSTAND.....	52
7.4	IMPREGNERING VED ULIK ALDER, INNTRENGSDYBDE .....	53
7.5	IMPREGNERING ETTER 1 DØGN, KLORIDINNTRENGNING OG FILTRERINGSEFFEKT .....	54
7.6	SEM OG TYNNSLIP AV ANL 33% FA MED STOCRYL IMPREGNERING.....	55
<b>8</b>	<b>VARMEUTVIKLING</b> .....	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>OPPSUMMERING</b> .....	<b>58</b>
<b>10</b>	<b>REFERANSER</b> .....	<b>60</b>

## Liste over APPENDIX

APPENDIX 1 Prøvningsrapport, sementer og FA .....	61
APPENDIX 2 Betongresepter .....	64
APPENDIX 3 Aktivitet A – Trykkfasthet.....	71
APPENDIX 4 Aktivitet A – Elektrisk motstand .....	73
APPENDIX 5 Aktivitet A - Kloriddiffusjon (NT Build 443) .....	77
APPENDIX 6 Aktivitet A - Prøving av restprøvestykker (6 år) .....	99
APPENDIX 7 Aktivitet B (Avrop 2-A): Termogravimetri .....	119
APPENDIX 8 Aktivitet B (Avrop 2-B): SEM .....	147
APPENDIX 9 Aktivitet B - Reaktivitet og mikrostruktur (artikkel).....	199
APPENDIX 10 Aktivitet D – Betongresepter og fersk betong (studentoppgaven).....	206
APPENDIX 11 Aktivitet E (Avrop 4): SEM (fra studentoppgaven) .....	207

NB! APPENDIX er kun tilgjengelig i den elektroniske utgaven

# 1 Innledning

I rapporten er det samlet og evaluert resultater fra ulike laboratorieundersøkelser utført på syv betonger med ulike sementtype og flygeaske(FA)-innhold, alle med masseforhold 0,40. De ulike aktivitetene har strukket seg over en tidsperiode fra 2007 til 2013. Felles for alle er at de springer ut fra samme utgangspunkt, nemlig FoU-prosjektet som ved Tunnel og betongseksjonen het «Samarbeidsprosjektet ANL-FA», og som hadde oppstart i 2007. Undersøkelsene omfatter både bestandighetsegenskaper, trykkfasthet og varmeutvikling. Bakgrunnen for undersøkelsene var nye trender/endringer på sement/bindemiddel-fronten og økt fokus på bruk av flygeaske som delvis erstatning for sementklinker.

Det ble før oppstart valgt å konsentrere bestandighetsundersøkelsene om kloriddiffusjon og elektrisk motstand; begge indikatorer for betongens evne til å beskytte armering mot korrosjon. Flere undersøkelser kom til etter hvert; et ringforsøk på kloriddiffusjon, en tilknyttet studentoppgave på effekten av tidlig overflatebehandling, samt SEM (sveipeelektronmikroskopi) og TG (termogravimetrisk) analyser på pastaprøver og betong.

Opprinnelig var det også planlagt et program for ung betongegenskaper for å studere volumendringer og risstendens i herdefasen, men denne aktiviteten ble etter hvert overført til FoU-programmet COIN (Concrete Innovation Centre) ledet av SINTEF/NTNU. Denne aktiviteten rapporteres derfor separat i COIN-systemet.

Variablene i undersøkelsene har vært flygeaskedosering (0 %, 19 % og 33 % erstatning av sementen) og typen sementklinker, hvor det er såkalt anleggsklinker (ANL) og sulfatresistent (SR) klinker som er undersøkt, samt en kombinasjonsklinker bestående av 80% SR og 20 % STD (standardklinker).

## 2 Materialer og betongresepter

Hovedparametere er flygeaskedosering og klinkertype. Flygeasken (FA) er tilsatt i blanderen sammen med de andre delmaterialene, og er altså ikke sammalt med sementen (c). De 7 undersøkte betongene har alle:

- masseforhold = 0,40 beregnet med  $k_s=2$  og  $k_{fa}=1$
- 5,0% silikastøv (s) av mengde c+FA (og 4,8% s av mengde c+FA+s).
- pastavolum = 282 liter

Anvendte sementer, alle fra Norcem:

- Anleggsement (ANL) CEM I 52,5 LA
- Sulfatresistent sement (SR) CEM I 42,5 R SR LA
- Standardsement (STD) CEM I 42,5 R

Kjemisk sammensetning for komponentene er gitt i Tabell 2, klinkerfasene i Tabell 3 og densiteter i Tabell 4. Datablad for sementene ANL og SR er gitt i APPENDIX 1. Betongreseptene er gitt i APPENDIX 2.

Øvrige delmaterialer er som følger:

- Flyveaske (FA) tilsatt ved blanding: Samme FA som Norcem brukte i sin sementproduksjon i 2007. FA-mengden er oppgitt som % av c+FA. Datablad for FA er gitt i APPENDIX 1.
- Tilslag: Årdal 0-2 mm, 0-8 mm, 8-11 mm og 11-16 mm
- Superplastiserende tilsetningsstoff (SP-stoff): Sikament FB2 (18% tørrstoff)

De ulike betongene er gitt navn som vist i Tabell 1 nedenfor. De tre variantene med Anleggsement (ANL) kalles samlet for «ANL-serien», og tilsvarende for Sulfatresistent sement (SR) er «SR-serien».

**Tabell 1 Navn på de ulike blandingene, og deres FA-innhold.**

Navn på blandingene	FA-dosering
ANL (ref)	uten FA
ANL-19FA	19% FA
ANL-33FA	33% FA
SR	uten FA
SR-19FA	19% FA
SR-33FA	33% FA
STD/SR-19FA *)	19% FA

\*) Blandingen har 20% STD- og 80% SR-klinker og denne miksen får da et alkaliinnhold som er lik ANL.

**Tabell 2 Kjemisk sammensetning og partikkelstørrelsesfordeling av sementene og FA**

	ANL	SR	FA	STD
LOI	2,72 %	0,93 %	4,08 %	2,09 %
SiO <sub>2</sub>	21,09 %	22,07 %	54,40 %	20,00 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,40 %	3,64 %	22,01 %	4,95 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,62 %	5,19 %	5,83 %	3,39 %
CaO	63,95 %	63,82 %	4,80 %	61,89 %
MgO	1,78 %	1,44 %	2,22 %	2,39 %
SO <sub>3</sub>	3,22 %	2,30 %	0,52 %	3,36 %
Kalkmel	4,10 %	-	-	4,50 %
CaO frikalk	1,57 %	0,97 %	-	1,76 %
K <sub>2</sub> O	0,43 %	0,43 %	2,21 %	1,05 %
Na <sub>2</sub> O	0,35 %	0,19 %	1,15 %	0,53 %
Alkali (Na <sub>2</sub> O eq)	0,63 %	0,47 %	-	1,22 %
Karbon	-	-	3,64 %	-
Sp overflate	388	432	388	390
+90mu	9,60 %	0,20 %	5,40 %	2,00 %
+64mu	11,70 %	1,00 %	11,40 %	4,40 %
-24mu	60,40 %	82,70 %	66,30 %	66,80 %
-30mu	68,70 %	89,80 %	59,70 %	75,10 %

**Tabell 3 Klinkerfasene beregnet med Bogue (forskjellen fra 100 % skyldes gips, fri kalk, alkalisulfater og magnesiumoksid)**

	ANL	SR	STD
C <sub>3</sub> S	56 %	52 %	53 %
C <sub>2</sub> S	21 %	25 %	21 %
C <sub>3</sub> A	7 %	1 %	8 %
C <sub>4</sub> AF	11 %	17 %	10 %

**Tabell 4 Densiteter til de forskjellige komponentene**

Densitet	kg/dm <sup>3</sup>
FA	2,20
SF (920D)	2,20
ANL	3,12
SR	3,15
STD	3,15



## 3 Prøvningsprogram

### 3.1 Overordnet prøvningsprogram

Rapporten inneholder forsøksopplegg og resultater for de aktivitetene som er innrammet nedenfor. Aktivitetene under rammen er også utført som en del av samarbeidsprosjektet med Norcem, men disse er ikke gjennomført i regi av SVV og rapporteres, med unntak av varmeutvikling, andre steder. Felles for alle aktivitetene er at de benytter nominelt identiske betonger.

#### **A) Opprinnelig planlagt aktivitet - utført i SVVs Sentrallaboratorium**

Syv betonger blandet og prøvd i SVV Sentrallab., prøving opp til 2 års betongalder (2007-2009):

- Kloriddiffusjon i hht. NT Build 443 (16,5 % NaCl), samt alternativ prosedyre med redusert kloridkonsentrasjon (3 % NaCl) og lang eksponeringstid (1 år)
- Spesifikk elektrisk motstand
- Trykkfasthet
- *Norcem har i tillegg gjort herdekasseforsøk (varmeutvikling) på de samme betongene (betong blandet og prøvd hos Norcem); disse resultatene er analysert og rapportert her.*
- Ekstraforsøk ved 6 års betongalder (2013): På gjenværende prøvestykker fra programmet over ble det bestemt spesifikk elektrisk motstand, fasthet og kapillær sugeevne

#### **B) Hydratasjonsprodukter - utført ved SINTEF**

Sementpasta blandet og prøvd opp til 2 års alder ved SINTEF Byggforsk (Trondheim)

- Termogravimetri (TG/DTG-analyse)
- SEM-analyse

Samme pastasammensetninger som i betongene fra aktivitet (A).

#### **C) Ringforsøk på kloriddiffusjon – utført ved SINTEF og SVV Sentrallab.**

Deltagere: SVV Sentrallaboratorium og SINTEF Byggforsk-laboratorium (Trondheim)

Betong blandet og prøver produsert/tildannet ved SINTEF; halvparten av prøvene sendt til Sentrallab.

Omfatter fire av betongene fra aktivitet (A).

#### **D) Studentoppgave på tidlig overflatebehandling og kloridinntrengning – utført i SVV Sentrallab.**

Betong blandet og prøvd i SVV Sentrallab. Omfatter de tre betongene i ANL-serien fra aktivitet (A), og tre ulike hydrofoberende impregneringer. Klorideksponering i saltpåsprøytingskammeret.

#### **E) Oppfølging studentoppgaven– Inntrengningsdybde/hydratasjonsprodukter - utført ved SINTEF**

Et prøvestykke fra aktivitet (D) med hydrofoberende impregnering ble undersøkt ved SINTEF. SEM- og tynnslipanalyse.

Andre undersøkelser som er utført på de samme betongene, men som ikke er med i denne rapporten, er gitt nedenfor:

#### Undersøkelser utført av Norcem:

Ung betong: Trykkfasthet, aktiveringsenergi samt varmeutvikling.

Felteksponeering: Prøver produsert i SINTEF-lab. for langtids felteksponeering i sjøvann fra ca. 1 ukes alder i Eidangerfjorden; oppfølging over tid (feltekspontert i 5 år høsten 2012). Fra de samme SINTEF-blandingene ble det også laget prøver for ringforsøket på kloriddiffusjon, Sentrallab./SINTEF-lab., se aktivitet (C) i rammen ovenfor.

#### Undersøkelser som utføres innen COIN-prosjektet

Ung betong-program i NTNU/SINTEF-lab. Aktiviteten startet opp som en del av aktivitet (A), men ble etter hvert overført som aktivitet i COIN-prosjektet, delprosjekt FA3.1. Det måles her varmeutvikling, fri deformasjon, trykkfasthet, strekkfasthet, E-modul, samt spenningsutvikling ved fastholding.

### 3.2 Aktivitet (A): SVV Sentrallaboratorium – program og prosedyrer

#### 3.2.1 Overordnet program

For hver av de syv betongene, med bindemidler som ble skissert i Tabell 1, var merking av prøvestykker og forsøksopplegg som vist i Tabell 5.

Første blanding ble gjort i april 2007, de neste utover året fram til oktober. Siste forsøkstermin etter 2 år (730 døgn) ble dermed gjennomført tilsvarende gjennom året i 2009. Kloriddiffusjonsforsøkene ble utført ved fire ulike betongaldrer, og i hht. NTBuild 443 med 16,5 % NaCl-konsentrasjon og eksponeringstid 35 dager. I tillegg ble det utført en alternativ kloriddiffusjonstest, med start eksponering etter 3 døgn, ved neddykking i 3,5 % NaCl-løsning i 1 år.

**Tabell 5 Forsøksmatrise, alle betongene. Aktivitet A.**

Termin [døgn etter blanding]	Synk Densitet Luft	Fasthet	Kloriddiffusjon		Elektrisk motstand (EM)
			NTBuild 443 16,5% NaCl	("sjøvann") 3,5% NaCl	
0	x				
3		Terning 1-3	Syl 1 og 2	Syl 9 og 10	Terning 10-15
14					Terning 10-15
28		Terning 4-6			Terning 10-15
90		Terning 7-9	Syl 3 og 4		Terning 10-15
365			Syl 5 og 6	NB! Langtidslagring fram til 1 år	Terning 10-15
730		Terning 10-15 (EM-terningene)	Syl 7 og 8		Terning 10-15

#### 3.2.2 Prosedyre, kloriddiffusjon NT Build 443

Prøver eksponert etter 3 døgn:

Dag 0 Blanding og utstøping

Dag 1 morgen: Avforming, saging av sylindrene hhv. til en og to skiver, lett uttørring og påføring av epoxy lag 1 på alle flater unntatt eksponeringsflaten (sagflaten). Deretter lagring/herding ved 95-100% RH til ettermiddagen.

Dag 1 ettermiddag: Påføring av epoxy lag 2. Deretter lagring/herding ved 95-100% RH til neste dag.

Dag 2 Lagring i Ca(OH)<sub>2</sub>-løsning

Dag 3 Lagring i 16,5 % NaCl-løsning i 35 dager

Etter gjennomført eksponering: fresing av prøvestykkene i tynne sjikt (1-5 mm) fra eksponert overflate og innover, kloridanalyse av betongstøvet fra hvert sjikt. Kloriddiffusjonskoeffisienter,  $D$ , og kloridkonsentrasjon i overflata er beregnet basert på Fick's 2. lov for ren diffusjon:

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

**Likning 1**

Løsningen av ligningen uttrykkes oftest på følgende måte:

**Likning 2**

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

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, m <sup>2</sup> /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 kvadratrets metode.

#### Prøver eksponert ved øvrige aldre:

Preparering på forhånd (i hht. NT Build 443) slik at eksponering i 16,5% NaCl-løsning startet ved angitt betongalder.

*Ved en feil* ble prøvestykkene for betongen ANL, med eksponering 90 døgn, lagt i 16,5% NaCl-løsning i stedet for i mettet Ca(OH)<sub>2</sub>-løsning i tiden før påføring av epoksy. Prøvestykkene lå i NaCl-løsning i 6 døgn. Dette synes imidlertid ikke å ha påvirket resultatet nevneverdig, se resultatbehandlingen.

#### Alternativ kloriddiffusjonsprosedyre, 3,5 % NaCl-løsning i ett år

I tillegg er det utført prøving av kloridmotstand ved neddykking i 3,5 % NaCl-løsning fra 3 døgn alder, se Tabell 5. Antall prøver og forbehandling som for NT Build 443 med eksponering etter 3 døgn, se ovenfor. Etter 1 års eksponering er prøvestykkene analysert mhp kloridinntrenging og det er utført kloriddiffusjonsanalyser som for NT Build 443. Kloridkonsentrasjonen i løsningen ble jevnlig kontrollert og vedlikeholdt på 3,5 % i eksponeringsperioden.

### 3.2.3 Prosedyre, spesifikk elektrisk motstand

Spesifikk elektrisk motstand ble målt på de samme seks terningene ved hver termin, og prøvene ble vannlagret mellom hver måling. Før hver måling måles temperaturen i prøvelagringskaret og romtemperaturen. To plater i aluminium, med filt på kontaktflaten, lagres i kar med vann tilsatt et par dråper eddiksyre; løsningen skiftes tidvis og når grunnkortslutningen viser mer enn 10 Ω. Ved måling tørkes platenes bakside; forsiden med filt tørkes ikke; måling av grunnkortslutning i 60 sekunder. Prøveterningen tas så ut av vannet, legges på en klut og tørkes på sidene. Trykkflatene merket med X tørkes ikke. Elektrisk motstand måles på X – flatene. Terningen legges mellom de to platesidene med filt og et lodd på ca. 2 kg legges på topp. Det måles i 60 sekunder og motstanden  $R$ , avleses. Kortslutning måles til slutt. Platene legges tilbake i vannkaret før neste prøve. Terningene veies i luft og i vann hver gang det tas elektrisk motstand, nøyaktighet 0,1 g. Lengde, bredde og høyde på hver terning måles ved første gangs måling.

Betongens spesifikke elektriske motstand beregnes som følger:

**Likning 3**

$$\rho = \frac{R \cdot A}{d}$$

hvor  $\rho$  er betongens spesifikke elektriske motstand ( $\Omega\text{m}$ ),  $R$  er målt motstand ( $\Omega$ ),  $A$  er arealet av prøvestykkets endeflate (m<sup>2</sup>) og  $d$  er lengden av prøvestykket (m), dvs. avstanden mellom stålplatene

### 3.3 Aktivitet (B) - Hydratasjonsprodukter

Ved tilsetning av store mengder pozzolaner i betong er det av interesse å følge utviklingen av både kalsiumhydroksidmengden (CH) og mengden kjemisk bundet vann. CH-mengden er viktig fordi det er denne som sørger for at armeringsjernet er passivert med hensyn til initiering av korrosjon. I tillegg er det gunstig at betongen har en CH-reserve som kan bidra til selvretting av eventuelle riss. Og, ikke minst, avtagende CH-mengde over tid indikerer pågående pozzolanreaksjon og at betongen (pastaen) blir tettere. Kjemisk bundet vann er også en indikator fordi egenskaper som høy trykkfasthet og lav porøsitet/permeabilitet antas å være knyttet til overføring av fritt vann til bundet vann i hydrater gjennom hydratasjon.

For å se på utviklingen av mengden CH og kjemisk bundet vann, samt for å bestemme mikrostruktur og hydratasjonsprodukter over tid, ble det utført prøving på syv pastablandinger med samme pastasammensetning som i betongene. Pastablandingene ble laget uten SP-stoff. Pastaene har v/(c+2s+FA)-forhold lik 0,40, og deres sammensetning for øvrig er gitt i Tabell 6.

**Tabell 6 Sammensetning av pastablandingene (merk at silikamengden(SF) er angitt i % av c+FA+SF, mens FA er angitt i % av c+FA)**

Betongnavn	ANL	ANL-19FA	SR-19FA	STD/SR-19FA	ANL-33FA	SR-33FA	SR
	Resept 1	Resept 2	Resept 3	Resept 4	Resept 5	Resept 6	Resept 7
ANL	X	X			X		
STD				20 %			
SR			X	80 %		X	X
FA		19 %	19 %	19 %	33 %	33 %	
SF	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %
	Resept 1	Resept 2	Resept 3	Resept 4	Resept 5	Resept 6	Resept 7
Sement	523,84	410,61	411,90	411,90	331,75	332,60	525,94
FA	0,00	96,32	96,62	96,62	163,40	163,82	0,00
SF	26,41	25,56	25,64	25,64	24,97	25,03	26,52
Vann	220,10	213,00	213,66	213,66	208,05	208,58	220,98

Prøvingen ble utført i SINTEF-lab., på oppdrag fra SVV. Resultatene er rapportert i to SINTEF-rapporter:

- "Termisk prøvning og analyse av sementpasta"
- "Sveipeelektronmikroskopi (SEM) av sementpasta etter 28 døgn, 1 år og 2 år forseglet herding"

De to rapportene er vedlagt i APPENDIX 7 og APPENDIX 8. Basert på de to rapportene ble det laget en artikkel med tittelen "Reactivity and Microstructure of Ternary Cement Pastes". Artikkelen er en del av proceedings: 13<sup>th</sup> international congress on the chemistry of cement, Madrid, 3 - 8 Juli 2011. Artikkelen er vedlagt i APPENDIX 9.

### 3.4 Aktivitet (C) – Ringforsøk på kloriddiffusjon (98 døgn)

På oppdrag fra Norcem har SINTEF blant annet utført prøving iht NT Build 443 for alle syv betongtypene. Som del av dette arbeidet ble det ved SINTEF støpt ut ekstra prøvestykker for fire av betongene for et ringforsøk på kloriddiffusjon med eksponering etter 98 døgn ved SINTEF-lab. og ved SVV Sentrallab. De fire betongene som inngikk i ringforsøket var ANL, ANL-19FA, ANL-33FA og STD/SR-19FA (se Tabell 1). Ringtesten ble utført på serier med 12 parallelle prøvestykker pr. betongtype, hvorav seks prøvestykker ble prøvd ved hvert laboratorium.

Selve bestillingen til SINTEF ble gjort av Norcem, og registreringer ved blanding, trykkfasthet og evt. annet, er derfor ikke med her. Betongreseptene er nominelt identiske med betongene fra «aktivitet A». SINTEF støpte sylindrer, saget til prøvestykker og sendte halvparten av prøvene til Sentrallab.

For hver betong ble det støpt fire sylindrer. Hver sylinder ble sagt i tre skiver. Skivene ble fordelt slik at de to laboratoriene fikk hhv. 1 eller 2 skiver fra hver sylinder. Skivene var merket med blandingsnummer og sylindernummer samt hhv. Topp, Midt eller Bunn.

Fire Ø100 mm x 200 mm sylindrer ble altså støpt av hver betong, i august 2007, og videre forsøksgang var som følger:

- 0 døgn: Blanding og utstøping ved SINTEF
- 1 døgn: Avforming, vannlagring
- 90 døgn: Opp fra vannlagring, saging av sylindrer til prøvestykker og forsendelse til SVV
- 91 døgn: Ankomst SVV, nedlegging i Ca(OH)<sub>2</sub>-løsning. Samme ved SINTEF.
- Heretter følgende parallelle utførelse ved SINTEF og SVV:
- 92 døgn: Preparering ved påføring av epoksy på sideflater og bunnflate
- 93 døgn: Nedlegging i Ca(OH)<sub>2</sub>-løsning
- 98 døgn: Nedlegging i NaCl-løsning
- 133 døgn: Fresing i følgende sjikt: 0-1 mm, 1-2 mm, .... 7-8 mm, 8-10 mm, 10-12 mm, .... 18-20 mm. Kloridanalyser av alle sjikt unntatt 12-14 mm og 16-18 mm

Det er foretatt beregning av diffusjonskoeffisienter (D) samt verdier for hhv overflatekonsentrasjon ( $C_0$ ), og inntrengt mengde klorider. SINTEFs kloridanalyser ble oversendt SVV. Alle beregninger, også de basert på SINTEFs kloridanalyser, er utført av Statens vegvesen.

For resultatanalysen gjelder følgende:

- For alle serier er første målepunkt i kloridprofilene utelatt fra beregningene. For noen ganske få profiler er det i tillegg utelatt enkeltpunkter der kurven har klart avvik fra normal form. Dette gjelder én parallell i ANL-serien (3 punkt utelatt) og to paralleller i ANL-33FA-serien (hhv 1 og 3 punkt utelatt).
- Bakgrunnsverdien for kloridinnhold er satt til 0,02 %.

### 3.5 Aktivitet (D) og (E) – Effekt av tidlig overflatebehandling på kloridinntrenging

Tidlig overflatebehandling kan være et aktuelt tiltak for å øke flyveaskebetongs motstand mot kloridinntrenging i tidlig alder. For å undersøke effekten av slik overflatebehandling ble det i 2008 etablert et samarbeid med tre studenter ved Høyskolen i Oslo (HiO) vedrørende gjennomføring av studentenes hovedoppgave [2]. Det ble valgt å inkludere tre ulike overflateprodukter i kategorien hydrofoberende impregnering.

Alle utstøping og gjennomføring av forsøk ble utført ved Sentrallaboratoriet. Alle prøver for en betong ble støpt fra samme blanding. Det ble støpt ut hele terninger for prøving av trykkfasthet og elektrisk motstand, og halve terninger (halve høyden) for impregneringsforsøkene. Impregneringsforsøkene omhandlet bestemmelse av:

- Inntrengingsdybde av produktene, avhengig av betongens alder ved påføring og bruk/ikke bruk av forskalingsolje ved utstøping av prøvestykkene
- Kloridbremsende effekt av produkter påført ved ett døgn betongalder. Eksponering i saltpåsprøytingskammeret med syklisk 4 timers påsprøyting av 3 % NaCl-løsning og 4 timers opphold med tørking i vind ved bruk av vifter og åpne luker, totalt 42 døgn.

Forsøk ble gjort på tre av de syv betongene i Tabell 1, fra aktivitet A:

- ANL
- ANL-19 FA
- ANL-33 FA

Følgende hydrofoberende impregneringer ble inkludert:

- StoCryl HG 200, silan i gelform

- Sikagard-700 S, siloksan i væskeform
- Mapeis Stenimpregnering C1, silan i væskeform

Produktene ble påført støpehud; nærmere bestemt bunnflaten av de halve terningene. Tabell 7 viser målingene som ble gjort på hver betong:

**Tabell 7 Utførte målinger på hver betong**

Fersk betong	Herdet betong	Spesielle undersøkelser
Densitet	Densitet	Inntrengningsdybde impregnering
Luft	Trykkfasthet	Eksponering i saltkammer Kloridinntrengning
Synk	Elektrisk motstand	

Angående prøvningsprogrammet er følgende tekst (ned siden) hentet direkte fra studentoppgaven [2]:

- Alle tre betongene ble påført tre ulike impregneringsmidler. Påføring av impregneringsmiddel ett døgn etter støp var hovedterminen; det ble målt inntrengningsdybde på disse prøvestykkene samt kloridinnhold etter eksponering i saltpåsprøytingskammeret.
- Effekt av påføringstidspunkt ble også undersøkt, og inntrengningsdybde ved påføring etter tre og syv døgn ble derfor målt, i tillegg til etter ett døgn. Trykkfasthet og elektrisk motstand ble i tillegg dokumentert over tid.

#### Dag 1

12 hele og 27 halve terninger avformes.

- Måling av trykkfasthet på tre terninger
- Måling av elektrisk motstand på tre terninger (som gjenbrukes for alle terminer).
- Vannlagring av resterende terninger for senere prøving
- De 27 halve prøvestykkene blir påført 2 lag epoksy og deretter impregnering. Disse settes senere i et klimaskap. Prøvestykkene uten impregnering blir lagret i en lufttett glassbeholder.

#### Dag 2, lagring

De halve terningene lagres i klimaskapet.

#### Dag 3, inntrengningsdybde og avforming

Alle de 27 halvterningene tas ut av klimaskapet.

- På 12 av de halve terningene testes inntrengningsdybden på impregneringen.
- De resterende 15 blir satt inn i saltkammeret, se Figur 1.

Avforming av 12 halve prøver (seks med formolje og seks uten formolje): Alle flater ble pakket inn med aluminiumsfolie, unntatt eksponeringsflaten (forskalt bunnflate), og det ble fuget langs kanten på folien. Den frie flaten (forskalt bunnflate) ble påført impregnering.

#### Dag 5, inntrengningsdybde

Måling av inntrengningsdybde.

#### Dag 7, trykktest og avforming

Måling av trykkfasthet og elektrisk motstand.

Avforming av de siste terningene, 12 halve prøver (seks med olje og seks uten olje): Innpakking, fugging, og impregnering som beskrevet ovenfor.

#### Dag 9, inntrengningsdybde

Måling av inntrengningsdybde.

#### Dag 28, elektrisk motstand og trykktesting

Måling av trykkfasthet og elektrisk motstand.

#### Dag 45, prøver ut av saltkammer og fresing

Prøver for samme betong blir tatt ut av saltkammeret, fresing av sjikt.

#### Dag 48-51, kloridtesting

Alle sjiktene fra fresingen analyseres.

#### Dag 59, elektrisk motstand

Tre terninger testes for elektrisk motstand.

#### Dag 84, elektrisk motstand og trykktesting

Måling av elektrisk motstand, deretter trykkfasthet på de samme terningene.

For flere detaljer, se studentoppgaven [2].

Ved tidlig hydrofobierende impregnering vil inntrengingsdybden for enkelte produkter bli stor (målt opp til 11 mm i studentoppgaven). Dette anses positivt i forhold til produktets langtidseffekt. For å se på eventuelle negative effekter av den tidlige impregneringen på hydrasjonsprosessen ble det høsten 2011 besluttet å undersøke ett av prøvestykkene (ANL-33FA med Stocryl impregnering påført etter 1 døgn) ved SEM- og tynnslipanalyser. Undersøkelsene ble utført ved SINTEF Byggforsk. SINTEF-rapporten er gitt i APPENDIX 11.



Figur 1 Saltpåsprøytingskammeret (saltkammeret) i SVV Sentrallaboratoriet

## 4 Resultater: Kloriddiffusjon – ringforsøk (aktivitet C)

### 4.1 Innledning

En evaluering av ringforsøket («aktivitet C») på kloriddiffusjon mellom SINTEF og SVV gjøres her innledningsvis for å få et begrep om variasjon (reperterbarhet og reproduserbarhet) ved bestemmelse av diffusjonskoeffisient  $D$ , overflatekonsentrasjon  $C_0$ , og total mengde inntrengte klorider. Evalueringen danner en naturlig bakgrunn for den etterfølgende diskusjonen vedrørende effekten av bindemiddelsammensetning (flygeaskemengde og klinkertype) på kloridmotstanden.

Kloriddiffusjonsresultatene fra relevante betonger i «aktivitet A» (blandet og prøvd ved SVV), er også inkludert her i behandlingen av ringforsøksresultatene. Detaljerte resultater er gitt i APPENDIX 5.

Først noen begrepsdefinisjoner/-avklaringer:

- Standardavviket er i det følgende konsekvent forkortet til Std.av., og variasjonskoeffisienten for COV.
- Repeterbarhet (innen-lab-variasjon) beskriver variasjonen i resultater innen et sett med parallelle prøvestykker hvor alle forhold er nominelt identiske; dvs variasjon i resultatene fra ett og samme laboratorium ved målinger på prøvestykker produsert fra en og samme betongblanding (batch).
- Reproduserbarhet beskriver variasjonen i resultater fra forsøk hvor ett eller flere forhold kan variere mellom ulike sett av prøvestykker: Nominelt identiske prøvestykker fra ulike blandinger fra ett laboratorium prøvd i samme laboratorium (mellom-batch-variasjon), eller prøver fra samme betongblanding fra ett laboratorium som er fordelt og prøvd i to laboratorium (mellom-lab-variasjon).

Reperterbarhet kan uttrykkes enkelt ved Std.av. (og COV) for hvert sett. Reproduserbarhet er et uttrykk både for intern variasjon i hvert sett (innen-lab variasjon) og variasjon mellom sett f.eks. prøvd i ulike laboratorium (mellom-lab-variasjon). Et estimat for reproduserbarhet [1] kan angis som:

$$\text{Likning 4} \quad \text{Reproduserbarhets Std. av.} = \sqrt{\text{Std. av}_{\text{innen-lab}}^2 + \text{Std. av}_{\text{mellom-lab}}^2}$$

hvor:

$\text{Std. av}_{\text{innen-lab}}$  er gjennomsnittet av alle repeterbarhets Std.avvikene for ulike sett.

$\text{Std. av}_{\text{mellom-lab}}$  er variasjonen i resultater (Std.av.) mellom gjennomsnittsresultater fra ulike labber. Alle Std.av. i likningen over kan erstattes med COV, med tilsvarende sub-tekst.

I ringforsøket ble blanding, utstøping, lagring og saging av prøvestykker gjort ved SINTEF. Hver av de fire seriene (betongene) i ringforsøket bestod av totalt 12 prøvestykker (samme batch), hvor de to laboratoriene prøvde 6 hver. Prøvingsalderen (dvs. start eksponering i 16,5% NaCl) var 98 døgn i begge laboratoriene. Etter eksponering og fresing av betongstøv i sjikt ble støvet analysert med potensiometrisk titrering ved SVV og spektrofotometrisk metode ved SINTEF.

SVVs egne forsøk («aktivitet A») på de fire aktuelle betongene er også tatt med i evalueringen. Disse ble både blandet og prøvd i SVVs lab. Det ble tildannet to 200 x Ø100 mm sylindrer for hver av de fire betongene. Fra disse to sylindrene ble det senere sagt til hhv. en og to prøvestykker. Dvs. hvert sett (betong) er representert med tre prøvestykker. Prøvingsalderen (start eksponering) var 90 døgn.

Det antas at effekten av forskjellig prøvningstidspunkt i ringforsøket (98 døgn) og i SVVs egne forsøk (90 døgn) er ubetydelig. Dette er derfor neglisjert i sammenlikningen. Følgende sammenstillinger gjøres:

- a) ringforsøk-resultatene fra hhv SINTEF og SVV
- b) ringforsøk-resultatene fra SVV og resultatene fra SVVs egne blandinger (aktivitet A).
- c) resultatene fra alle tre variantene (ringforsøk SINTEF, ringforsøk SVV, og SVVs egne blandinger).

## 4.2 Diffusjonskoeffisient

Diffusjonskoeffisienten ( $D$ ) har enheten [ $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s]. I teksten diskuteres imidlertid parameteren uten benevnelse.

For  $D$  viser resultatene i ringforsøket, se Tabell 8 (sammenstilling a), at gjennomsnittlig variasjon (repeterbarhet, dvs. innen-lab-variasjon) for de fire prøvesettene (å 6 paralleller) i hver av de to laboratoriene var relativt lik, hhv. Std.av. 0,34 og 0,36 (COV 12,4 % og 10,9 %). Blant alle settene totalt fra de to laboratoriene varierte  $D$  fra 2,3 til 3,5; Std.av. varierte fra 0,17 til 0,59 (og COV fra 6,2 % til 19,5 %). Gjennomsnittlig samlet Std.av. (repeterbarhet) for settene i begge laboratoriene blir dermed  $\text{Std. av}_{\text{innen-lab}} = 0,35$  (og  $\text{COV}_{\text{innen-lab}} = 11,6\%$ ).

Det kan ses at  $D$  fra SVV for alle fire settene (betongene) er systematisk noe høyere enn fra SINTEF (gj.snitt 0,65 høyere  $D$ ). Forskjellen i gjennomsnittlig  $D$  mellom laboratoriene, for hvert korresponderende prøvesett (dvs. for samme betong), varierte i henhold til Std.av. fra 0,34 til 0,57 (og COV fra 10,4% til 20,9%), og gjennomsnittlig mellom-lab-variasjon  $\text{Std. av}_{\text{mellom-lab}}$  er 0,46 (og  $\text{COV}_{\text{mellom-lab}} = 15,8\%$ ). Reproduserbarhets Std.av. blir dermed 0,58 (COV=19,6 %) ved bruk av Likning 4.

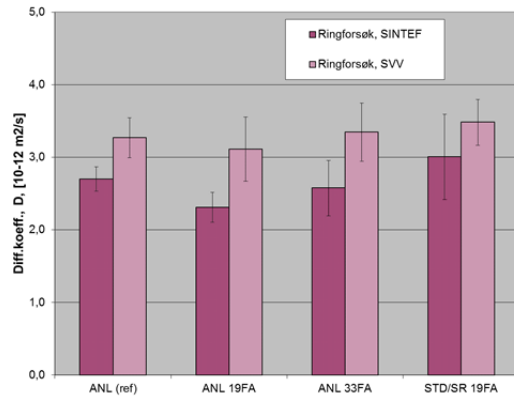
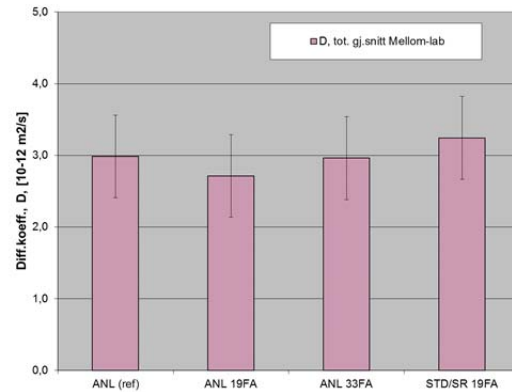
Resultatene er framstilt grafisk i Figur 2 som viser gjennomsnitt for alle prøvesettene enkeltvis med tilhørende Std.av. (repeterbarhet, dvs. innen-lab variasjon). Trenden er at gjennomsnittsresultatene fra SVV gir systematisk noe høyere  $D$  enn fra SINTEF for alle betongene, som nevnt over, men forskjellene må tolkes som ikke signifikante tatt den interne spredningen i betraktning (Std.av. er angitt i figuren).

I Figur 3 er resultatene fra de to laboratoriene, for hver betongtype, slått sammen som gjennomsnitt, og for hver betong er repoduserbarhets Std.av.=0,58 angitt på alle søylene (dvs. mellom-lab variasjon). Det at det ikke er signifikante forskjeller mellom disse fire betongtypene understrekes enda tydeligere i denne sammenstillingen.



Tabell 8 Ringforsøk SINTEF og SVV (a): Diffusjonskoeffisienter  $D$  [ $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s] og variasjon

Betong	Ringforsøk, SINTEF			Ringforsøk, SVV			$D$ , tot. gj.snitt	Std..av.	COV
	Gj.snitt $D$	Std.av.	COV	Gj.snitt $D$	Std.av.	COV	Mellom-lab	Mellom-lab	Mellom-lab
ANL (ref)	2,7	0,17	6,2 %	3,3	0,27	8,4 %	3,0	0,40	13,5 %
ANL 19FA	2,3	0,21	9,0 %	3,1	0,44	14,2 %	2,7	0,57	20,9 %
ANL 33FA	2,6	0,38	14,8 %	3,3	0,40	12,0 %	3,0	0,54	18,3 %
STD/SR 19FA	3,0	0,59	19,5 %	3,5	0,31	9,0 %	3,2	0,34	10,4 %
	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,34</b>	<b>12,4 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,36</b>	<b>10,9 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,46</b>	<b>15,8 %</b>
Gj.sn. std.av. 0,35 og COV 11,6 %									
Reproduserbarhets std.av. 0,58 og COV 19,6 %									

Figur 2 Ringforsøk (a): Gjennomsnittlig  $D$  for hver lab., med tilhørende  $\pm$  Std.av. anført som vertikal linjeFigur 3 Ringforsøk (a): Samlet gjennomsnittlig  $D$  for begge laboratoriene, med  $\pm$  estimat på reproduserbarhets-Std.av. anført som vertikal linje

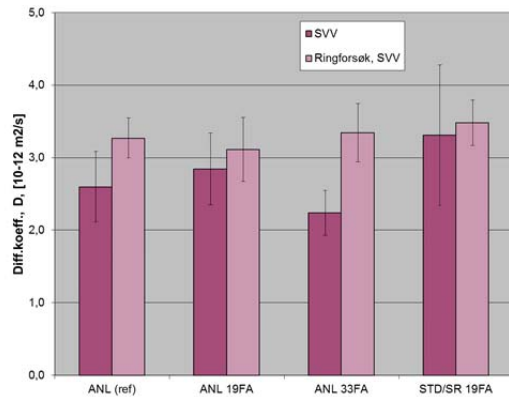
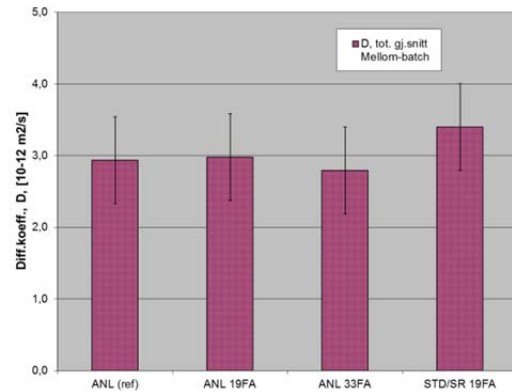
I Tabell 9 er resultater kun fra SVV sammenstilt (sammenstilling **b**), dvs. resultatene fra ringforsøket (betongen blandet ved SINTEF) og resultatene fra hovedserien («aktivitet A») på egne blandinger i SVV-lab. Hvis vi antar at mulige forskjeller i utstøping og herde-/lagringsbetingelser i de to seriene er ubetydelige, så vil sammenstillingen representere batch-til-batch variasjon (reproduserbarhet) ettersom en batch ble gjort av SVV og den andre av SINTEF; dette er i det følgende kalt mellom-batch-variasjon. Tallene for variasjon er ikke vektet i forhold til at settene i ringtest-blandingene er representert med 6 paralleller, mens SVV-blandingene har bare 3 paralleller (som er iht NT Build 443-prosedyren). Med vårt tallmateriale har en vektning imidlertid svært liten effekt på resultatene.

Denne sammenstillingen, se Tabell 9, viser for det første noe høyere  $D$ -verdier i ringforsøk-blandingene enn i SVV-blandingene (gjennomsnittlig 0,55 høyere). Vi ser også at Std.av. for SVV-blandingene (gjennomsnittlig COV=19,8%) er høyere enn i ringforsøk-blandingene (gjennomsnittlig COV=10,9%). Gjennomsnittlig samlet Std.av. (repetbarhet) for alle seriene for begge blandinger er  $Std. av_{innen-lab} = 0,46$  (og  $COV_{innen-lab} = 15,3\%$ ). Gjennomsnittlig mellom-batch-variasjon  $Std. av_{mellom-batch}$  er 0,39 (COV=13,5%). Reproduserbarhets Std.av. blir dermed 0,60 (COV=20,4%) ved bruk av Likning 4.

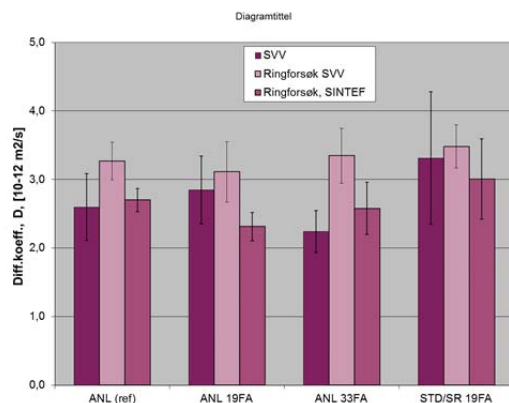
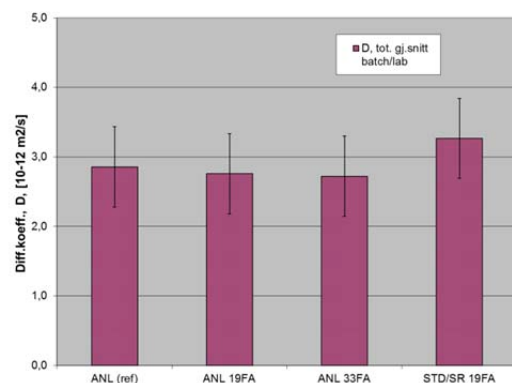
Resultatene er framstilt grafisk i Figur 4 og Figur 5. Vi kan slutte det samme her som for det rene ringforsøket diskutert tidligere; det er ingen klare effekter av betongtype og statistisk sett kunne alle resultatene ha kommet fra en og samme betong.

Tabell 9 Ringforsøk SVV og egne blandinger SVV (b): Diffusjonskoeffisienter  $D$  [ $10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s] og variasjon

Betong	SVV			Ringforsøk, SVV			$D$ , tot. gj.snitt	St.dev.	COV
	Gj.snitt $D$	Std.av.	COV	Gj.snitt $D$	Std.av.	COV	Mellom-batch	Mellom-batch	Mellom-batch
ANL (ref)	2,6	0,49	18,7 %	3,3	0,27	8,4 %	2,9	0,48	16,2 %
ANL 19FA	2,8	0,50	17,4 %	3,1	0,44	14,2 %	3,0	0,19	6,3 %
ANL 33FA	2,2	0,31	13,7 %	3,3	0,40	12,0 %	2,8	0,78	28,0 %
STD/SR 19FA	3,3	0,97	29,2 %	3,5	0,31	9,0 %	3,4	0,12	3,5 %
	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,56</b>	<b>19,8 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,36</b>	<b>10,9 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,39</b>	<b>13,5 %</b>
Gj.sn. std.av. 0,46 og COV 15,3 %									
Reproduserbarhets std.av. 0,60 og COV 20,4 %									

Figur 4 Batch-til-batch (b): Gjennomsnittlig  $D$  ved SVV for hver av de to blandingene, med tilhørende  $\pm$  Std.av. anført som vertikal linjeFigur 5 Batch-til-batch (b): Samlet gjennomsnittlig  $D$  for de to blandingene, med  $\pm$  estimat på reproduserbarhets- Std.av. (mellom-batch variasjon) anført som vertikal linje

Hvis alle de tre variantene kombineres (sammenstilling c) får vi ikke overraskende omtrent samme bilde på variasjon, dvs. når ringtest-SVV, ringtest-SINTEF og egne blandinger i SVV-lab. kombineres. I dette tilfellet er gjennomsnittlig samlet Std.av. (repetierbarhet) for alle individuelle prøvesett fra begge laboratoriene lik  $Std. av_{innen-lab} = 0,42$  (og  $COV_{innen-lab} = 14,3$  %), gjennomsnittlig mellom-batch-og-lab-variasjon  $Std. av_{mellom-batch/lab}$  er 0,39 (COV=13,9 %), og reproduserbarhets Std.av. blir 0,58 (COV=20,0 %). Resultatene er framstilt grafisk i Figur 6 og Figur 7. Som allerede diskutert; forskjellene i  $D$  mellom de ulike betongvariantene må statistisk sett betraktes som ikke signifikante.

Figur 6 Gjennomsnittlig  $D$  for alle tre variantene (c), med tilhørende  $\pm$  Std.av. anført som vertikal linjeFigur 7 Samlet gjennomsnittlig  $D$  for alle tre variantene (c), med  $\pm$  estimat på reproduserbarhets-Std.av. (mellom-batch-og-lab-variasjon) anført som vertikal linje

### 4.3 Overflatekonsentrasjon $C_0$

Overflatekonsentrasjonen ( $C_0$ ) har enheten [% av betongvekt]. I teksten diskuteres imidlertid parameteren uten benevnelse.  $C_0$  er en beregnet parameter som bl.a. er avhengig av utelatelse/ikke utelatelse av kloridprofil(er) nærmest prøvestykkets eksponerte overflate, se kap. 3.4.

Resultater og variasjon for  $C_0$  er presentert nedenfor parallelt med oppbygningen i foregående kapittel for  $D$ , dvs. i form av sammenstillingene a), b) og c), se punktliste i kapittel 4.1. For **a** (ringforsøket) er  $C_0$ -resultatene gitt i Tabell 10, Figur 8 og Figur 9. For **b** (prøving kun i SVV-lab) er resultatene gitt i Tabell 11, Figur 10 og Figur 11, og for sammenstillingen **c** (kombinasjon) er resultatene kun gitt i Figur 12 og Figur 13.

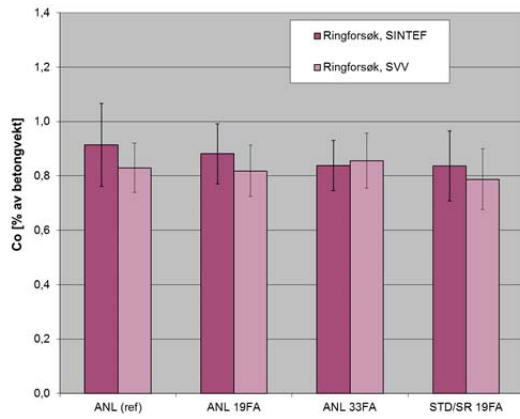
For alle individuelle prøvesett (innen-lab-variasjon) varierer  $C_0$  med et Std.av. fra 0,06 til 0,23 (COV fra 8,6% til 21,4%). Gjennomsnittlig Std.av. for hvert av de tre parallelle settene i sammenstillingene var 0,12 (COV 13,9%), 0,10 (12,1%) og 0,14 (COV 15,9%), for hhv. Ringforsøk Sintef, Ringforsøk SVV og egne blandinger SVV. Beregnet reproducerbarhets Std.av. (mellom-lab- og mellom-batch-variasjon) var 0,12 (COV 13,7%), 0,16 (COV 18,4%) og 0,15 (COV 16,9%) for hhv. sammenstilling a, b og c. Resultatene viser at det ikke er noen signifikant forskjell i  $C_0$  for de ulike betongtypene.

**Tabell 10 Ringforsøk SINTEF og SVV (a): Overflatekonsentrasjon  $C_0$  [% av betongvekt] og variasjon**

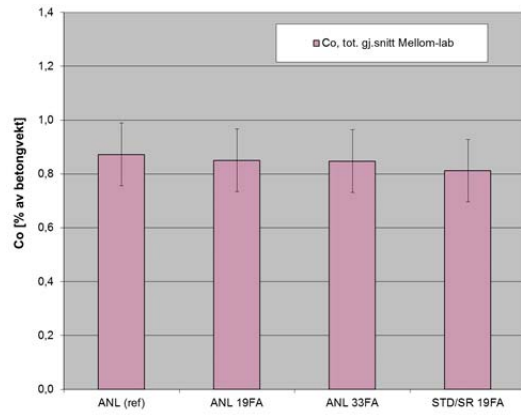
Betong	Ringforsøk, SINTEF			Ringforsøk, SVV			Co, tot. gj.snitt	Std..av.	COV
	Gj.snitt Co	Std.av.	COV	Gj.snitt Co	Std.av.	COV	Mellom-lab	Mellom-lab	Mellom-lab
ANL (ref)	0,91	0,15	16,6 %	0,83	0,09	10,9 %	0,87	0,06	6,9 %
ANL 19FA	0,88	0,11	12,5 %	0,82	0,09	11,5 %	0,85	0,04	5,2 %
ANL 33FA	0,84	0,09	11,0 %	0,86	0,10	11,8 %	0,85	0,01	1,5 %
STD/SR 19FA	0,84	0,13	15,4 %	0,79	0,11	14,2 %	0,81	0,03	4,2 %
	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,12</b>	<b>13,9 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,10</b>	<b>12,1 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,04</b>	<b>4,5 %</b>
Gj.sn. std.av. 0,11 og COV 13 %									
Reproducerbarhets std.av. 0,12 og COV 13,7 %									

**Tabell 11 Ringforsøk SVV og egne blandinger SVV (b): Overflatekons.  $C_0$  [% av betongvekt] og variasjon**

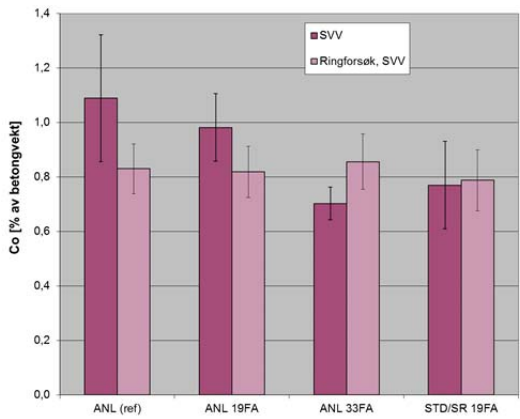
Betong	SVV			Ringforsøk, SVV			Co, tot. gj.snitt	St.dev.	COV
	Gj.snitt Co	Std.av.	COV	Gj.snitt Co	Std.av.	COV	Mellom-batch	Mellom-batch	Mellom-batch
ANL (ref)	1,09	0,23	21,4 %	0,83	0,09	10,9 %	0,96	0,18	19,1 %
ANL 19FA	0,98	0,12	12,7 %	0,82	0,09	11,5 %	0,90	0,12	12,8 %
ANL 33FA	0,70	0,06	8,6 %	0,86	0,10	11,8 %	0,78	0,11	14,0 %
STD/SR 19FA	0,77	0,16	20,9 %	0,79	0,11	14,2 %	0,78	0,01	1,6 %
	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,14</b>	<b>15,9 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,10</b>	<b>12,1 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>0,11</b>	<b>11,9 %</b>
Gj.sn. std.av. 0,12 og COV 14,0 %									
Reproducerbarhets std.av. 0,16 og COV 18,4 %									



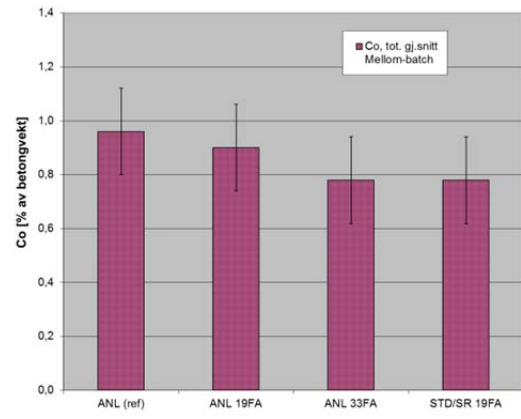
Figur 8 Ringforsøk (a): Gjennomsnittlig  $C_0$  for hver lab., med tilhørende  $\pm$  Std.av. anført som vertikal linje



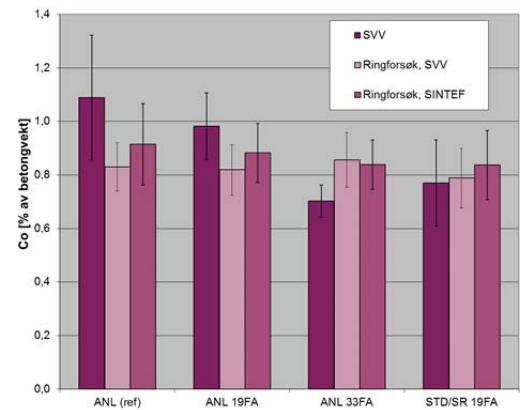
Figur 9 Ringforsøk (a): Samlet gjennomsnittlig  $C_0$  for begge laboratoriene, med  $\pm$  estimat på reproduserbarhets- Std.av. (mellom-lab-variasjon) anført som vertikal linje



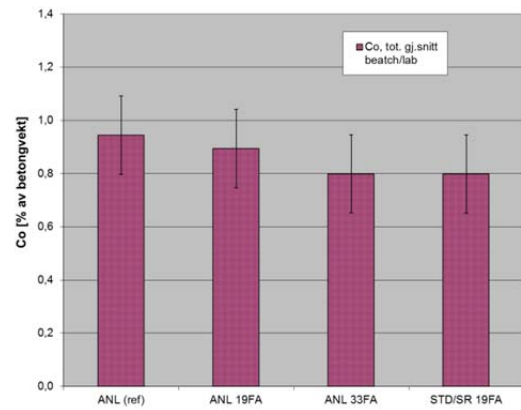
Figur 10 Batch-til-batch (b): Gjennomsnittlig  $C_0$  ved SVV for hver av de to blandingene, med tilhørende  $\pm$  Std.av. anført som vertikal linje



Figur 11 Batch-til-batch (b): Samlet gjennomsnittlig  $C_0$  for de to blandingene, med  $\pm$  estimat på reproduserbarhets- Std.av. (mellom-batch variasjon) anført som vertikal linje



Figur 12 Gjennomsnittlig  $C_0$  ved SVV for alle tre variantene (c), med tilhørende  $\pm$  Std.av. anført som vertikal linje



Figur 13 Samlet gjennomsnittlig  $C_0$  for alle tre variantene (c), med  $\pm$  estimat på reproduserbarhets-Std.av. (batch-og-lab variasjon) anført som vertikal linje

#### 4.4 Totalt inntrengt mengde klorider

Total mengde inntrengte klorider har enheten [g Cl/m<sup>2</sup>]. I teksten diskuteres imidlertid parameteren uten benevnelse.

Resultater og variasjon for totalt inntrengt mengde klorider *Cl* er presentert nedenfor tilsvarende som for oppbygningen i de foregående kapitlene (dvs. sammenstilling a, b og c).

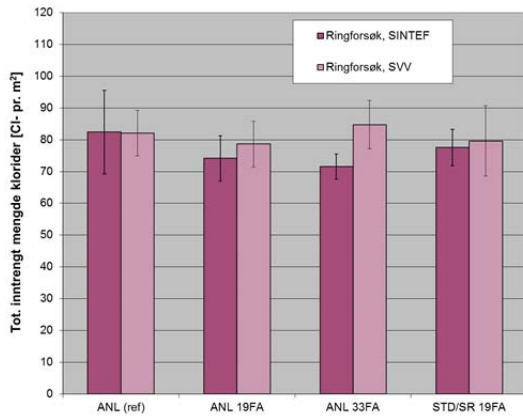
For individuelle prøvesett (innen-lab-variasjon) varierer *Cl* med et Std.av. fra 0,03 til 13,1 (COV fra 0,04 % til 15,9 %). Gjennomsnittlig Std.av. for de tre parallelle settene i a-c varierer fra 5,9 til 8,3 (COV fra 7,1 % til 10,2 %), mens beregnet reproduserbarhets Std.av. (mellom-lab-og-mellom-batch-variasjon) for *C<sub>0</sub>* varierer fra 8,6 til 13,4 (COV fra 10,9 % til 16,0 %), med laveste verdi for ringforsøket. Resultatene viser at det ikke er noen signifikant forskjell i *Cl* for de ulike betongtypene.

**Tabell 12 Ringforsøk SINTEF og SVV (a): Total mengde inntrengte klorider *Cl* [% av betongvekt] og variasjon**

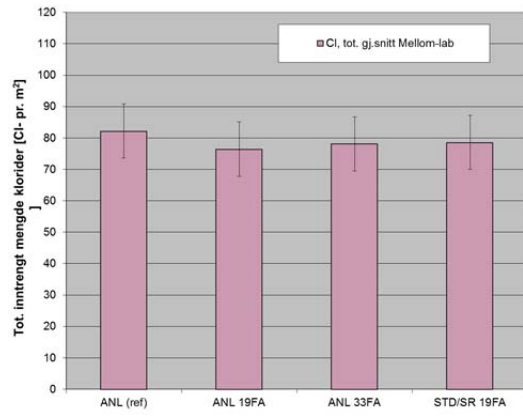
Betong	Ringforsøk, SINTEF			Ringforsøk, SVV			<i>Cl, tot. gj.snitt</i>	<i>Std..av.</i>	<i>COV</i>
	Gj.snitt Cl	Std.av.	COV	Gj.snitt Cl	Std.av.	COV	<i>Mellom-lab</i>	<i>Mellom-lab</i>	<i>Mellom-lab</i>
ANL (ref)	82,4	13,1	15,9 %	82,1	7,1	8,7 %	82,2	0,2	0,3 %
ANL 19FA	74,2	7,1	9,6 %	78,6	7,2	9,2 %	76,4	3,2	4,1 %
ANL 33FA	71,5	4,0	5,5 %	84,8	7,6	9,0 %	78,1	9,4	12,0 %
STD/SR 19FA	77,5	5,7	7,3 %	79,6	11,1	13,9 %	78,6	1,5	1,9 %
	<b>Gj.snitt =</b>	<b>7,48</b>	<b>9,6 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>8,26</b>	<b>10,2 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>3,55</b>	<b>4,6 %</b>
Gj.sn. std.av. 7,9 og COV 9,9 %							Reproduserbarhets std.av. 8,6 og COV 10,9 %		

**Tabell 13 Ringforsøk SVV og egne SVV-blandinger (b): Total mengde inntrengte klorider *Cl* [% av betongvekt] og variasjon**

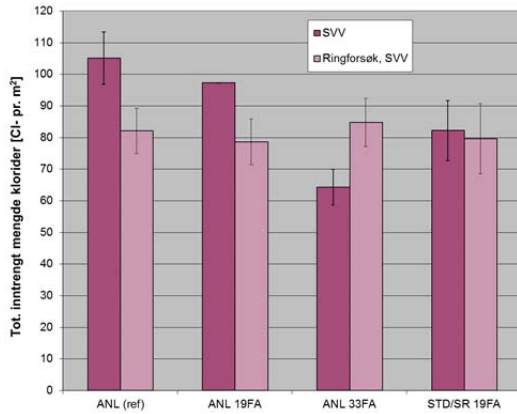
Betong	SVV			Ringforsøk, SVV			<i>Cl, tot. gj.snitt</i>	<i>St.dev.</i>	<i>COV</i>
	Gj.snitt Cl	Std.av.	COV	Gj.snitt Cl	Std.av.	COV	<i>Mellom-batch</i>	<i>Mellom-batch</i>	<i>Mellom-batch</i>
ANL (ref)	105,1	8,3	7,9 %	82,1	7,1	8,7 %	93,6	16,3	17,4 %
ANL 19FA	97,2	0,03	0,04 %	78,6	7,2	9,2 %	87,9	13,1	14,9 %
ANL 33FA	64,3	5,7	8,8 %	84,8	7,6	9,0 %	74,5	14,5	19,4 %
STD/SR 19FA	82,2	9,4	11,5 %	79,6	11,1	13,9 %	80,9	1,8	2,3 %
	<b>Gj.snitt =</b>	<b>5,86</b>	<b>7,1 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>8,26</b>	<b>10,2 %</b>	<b>Gj.snitt =</b>	<b>11,42</b>	<b>13,5 %</b>
Gj.sn. std.av. 7,1 og COV 8,7 %							Reproduserbarhets std.av. 13,4 og COV 16,0 %		



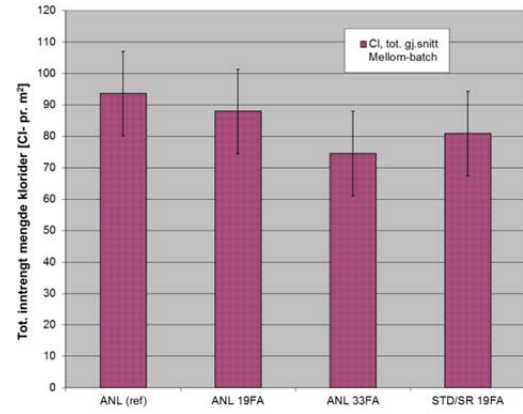
**Figur 14 Ringforsøk (a): Gjennomsnittlig tot. mengde inntrengte klorider for hver lab., med tilhørende ± Std.av. anført som vertikal linje**



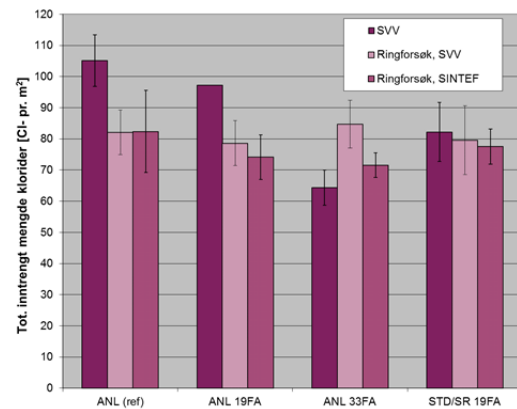
**Figur 15 Ringforsøk (a): Samlet gjennomsnittlig tot. mengde inntrengte klorider for begge laboratoriene, med ± estimat på reproduserbarhets- Std.av. (mellom-lab-variasjon) anført som vertikal linje**



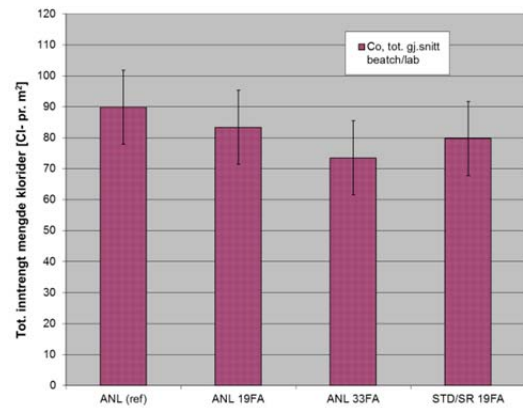
**Figur 16 Batch-til-batch (b): Gjennomsnittlig tot. mengde inntrengte klorider ved SVV for hver av de to blandingene, med tilhørende ± Std.av. anført som vertikal linje**



**Figur 17 Batch-til-batch (b): Samlet gjennomsnittlig tot. mengde inntrengte klorider for de to blandingene, med ± estimat på reproduserbarhets Std.av. (mellom-batch variasjon) anført som vertikal linje**



**Figur 18 Gjennomsnittlig tot. mengde inntrengte klorider ved SVV for de tre variantene (c), med tilhørende ± Std.av. anført som vertikal linje**



**Figur 19 Samlet gjennomsnittlig tot. mengde inntrengte klorider for de tre variantene (c), med ± estimat på reproduserbarhets- Std.av. (batch-og-lab variasjon) anført som vertikal linje**

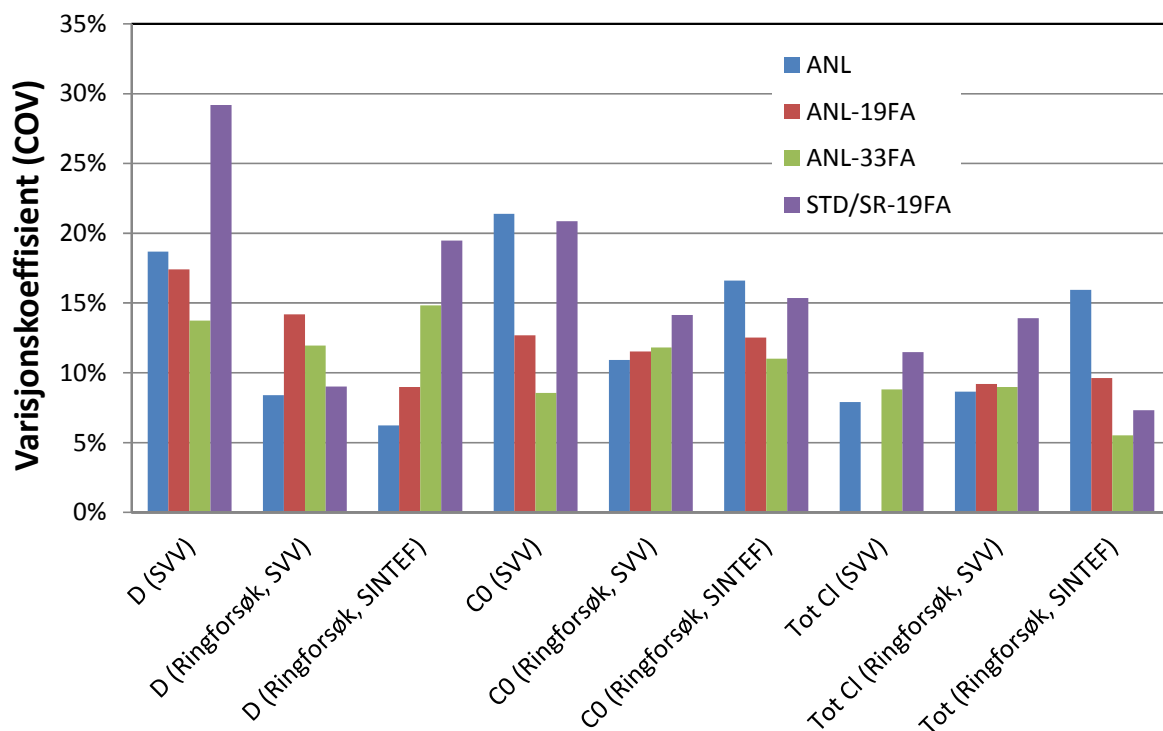
## 4.5 Oppsummering ringforsøk

Intern spredning (innen-lab) for hvert prøvesett av nominelt identiske prøver er oppsummert i Figur 20. Det er ingen systematiske forskjeller i intern spredning i SINTEF-lab og i SVV-lab. For SVVs egne blandinger for  $D$  (« $D$  (SVV)») er spredningen imidlertid en del høyere for ett prøvesett (STD/SR-19FA), men denne spredningen er utypisk høy sammenliknet med alle andre settene fra SVVs egne blandinger (medregnet også de betongene som ikke er med i dette kapitlet, se kap. 5.5).

Gjennomsnittlige spredning (innen-lab og mellom-lab) er oppsummert i Tabell 14. Ringforsøket ga for  $D$  en reproduserbarhets COV=20 % (rundet av til to gjeldende siffer). Antatt en normalfordeling så er et 90% konfidensintervall gitt ved COV x 1,64. Hvis den oppnådde reproduserbarheten har generell gyldighet betyr dette da at  $D$  fra ett prøvesett må være minst 33 % større/mindre enn  $D$  fra et annet prøvesett for at sannsynligheten for at de faktisk er ulike skal være 90 % eller høyere.

For  $C_0$  og total mengde inntrengte klorider ga ringforsøket en reproduserbarhets COV på henholdsvis 14% og 11% (rundet av til to gjeldende siffer).

I ringforsøket ga resultatene fra SVV i gjennomsnitt systematisk noe høyere  $D$  (gj.nitt  $0,65 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  høyere, dvs. drøyt 20 %) enn fra SINTEF, men rent statistisk er forskjellene mellom laboratoriene ikke signifikante tatt i betraktning den interne spredningen. Dette gjelder også forskjellene mellom de fire betongtypene; de er for små til statistisk å betraktes som signifikante. Alle prøvesettene i ringforsøket, for alle betongtypene, ga et samlet gjennomsnitt for  $D$ ,  $C_0$  og total mengde inntrengte klorider på henholdsvis  $3,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , 0,85 % av betongvekt og 79 g Cl<sup>-</sup> pr m<sup>2</sup>.



Figur 20 Oppsummering: Std.av<sub>innen-lab</sub> for  $D$ ,  $C_0$  og total mengde inntrengte klorider (tot Cl)

Tabell 14 Oppsummering: Gjennomsnittlig variasjon for  $D$ ,  $C_0$  og totalt mengde inntrengte klorider

Type sammenstilling	Gjennomsnittlig Std. av <sub>innen-lab</sub> ( $COV_{innen-lab}$ )	Gjennomsnittlig Std. av <sub>mellom-lab/batch</sub> ( $COV_{mellom-lab/batch}$ )	Reproduserb. Std. av (reproduserb. $COV$ )
<b>Diffusjonskoeffisient <math>D</math> [<math>10^{-12}</math> m<sup>2</sup>/s]</b>			
a) Ringforsøk SINTEF - SVV	0,35 (11,6 %)	0,46 (15,8 %)	0,58 (19,6 %)
b) SVV (ringforsøk og egne blandinger)	0,46 (15,3 %)	0,39 (13,5 %)	0,60 (20,4 %)
c) Alle tre variantene (a+b) samlet	0,42 (14,3 %)	0,39 (13,9 %)	0,58 (20,0 %)
<b>Tot. snitt :</b>	<b>0,41 (13,7 %)</b>	<b>0,41 (14,4 %)</b>	<b>0,59 (20,0 %)</b>
<b>Overflatekonsentrasjon <math>C_0</math> [% av betongvekt]</b>			
a) Ringforsøk SINTEF – SVV	0,11 (13,0 %)	0,04 (4,5 %)	0,12 (13,7 %)
b) SVV (ringforsøk og egne blandinger)	0,12 (14,0 %)	0,11 (11,9 %)	0,16 (18,4 %)
c) Alle tre variantene (a+b) samlet	0,12 (14,0 %)	0,08 (9,5 %)	0,15 (16,9 %)
<b>Tot. snitt :</b>	<b>0,12 (13,7 %)</b>	<b>0,08 (8,6 %)</b>	<b>0,14 (16,3 %)</b>
<b>Total mengde inntrengte klorider [Cl pr. m<sup>2</sup>]</b>			
a) Ringforsøk SINTEF – SVV	7,9 (9,9 %)	3,6 (4,6 %)	8,6 (10,9 %)
b) SVV (ringforsøk og egne blandinger)	7,1 (8,6 %)	11,4 (13,5 %)	13,4 (16,0 %)
c) Alle tre variantene (a+b) samlet	7,2 (9,0 %)	9,5 (11,6 %)	12,0 (14,6 %)
<b>Tot. snitt :</b>	<b>7,4 (9,2 %)</b>	<b>8,2 (9,9 %)</b>	<b>11,3 (13,8 %)</b>



## 5 Resultater, aktivitet A

I det følgende presenteres og diskuteres resultatene fra aktivitet A, se Tabell 5 kapittel 3.2.

### 5.1 Fersk betong: synk, luft og densitet

Fersk betongmålinger er vist i Tabell 15. Det var kun små variasjoner i luftinnholdet (naturlig luft) og effekten av luftinnholdet på fasthet skulle derfor være marginal. Se ellers resepter i APPENDIX 2.

**Tabell 15: Fersk betongmålinger**

Betong	Synk [mm] (og SP-dosering [litr/m <sup>3</sup> ])	Naturlig luftinnhold [%]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]
ANL (ref)	120 (3,8)	1,9	2430
ANL-19FA	185 (3,7)	1,9	2410
ANL-33FA	170 (3,1)	2,5	2420
SR	Registreringene er tapt		
SR-19FA	145 (2,2)	2,1	2400
SR-33FA	185 (2,7)	2,5	2400
SR(80%)-STD(20%)-19FA	205 (2,7)	2,6	2400

### 5.2 Fasthetsutvikling

Trykkfasthet ble bestemt ved standard forsøk på 100 x 100 mm terninger, dvs. avforming etter 1 døgn og deretter vannlagring ved 20 °C frem til prøvning. Trykkfasthet er bestemt ved 3, 28, 90 og 730 døgn alder. Hver prøvfasthet er gitt som middelverdien av tre terninger. Alle prøvfastheter er gitt i Tabell 16.

#### Modelltilpasning

Følgende eksponentielle funksjon (modell) er tilpasset fasthetsresultatene ved bruk av minste kvadratsums metode:

$$\text{Likning 5} \quad f_c(t) = f_{c,\infty} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\tau}{t}\right)^\alpha\right]$$

hvor  $f_c$  er fastheten i MPa og  $t$  er tiden i timer.  $f_{c,\infty}$  [MPa],  $\tau$  [timer] og  $\alpha$  [-] er kurvetilpasningsparametere.

Modellparameterne i Likning 5 som ga beste tilpasning for hver betong er gitt i APPENDIX 3.

Fasthetsresultatene er presentert på ulike måter fra Figur 21 til Figur 26, samt Tabell 16. Fasthetene for de ulike blandingene er stort sett jevnt monotont stigende og det blir derfor godt samsvar mellom modellen og måleresultatene, se Figur 21 og Figur 22.

Det må bemerkes at de målte fasthetene er generelt høye, og en god del høyere enn det man skulle forvente å få i praksis med fabrikkblandet betong med de samme bindemidlene. I betongene er det benyttet Årdal laboratorietilslag og de er ikke tilsatt ekstra luft; begge disse momentene bidrar tradisjonelt til god fasthet. Fasthetsresultatene bør likevel gi relevant informasjon om forskjeller mellom bindemidlene og deres tidsutvikling, se figurene Figur 21 til Figur 27 samt Tabell 16.

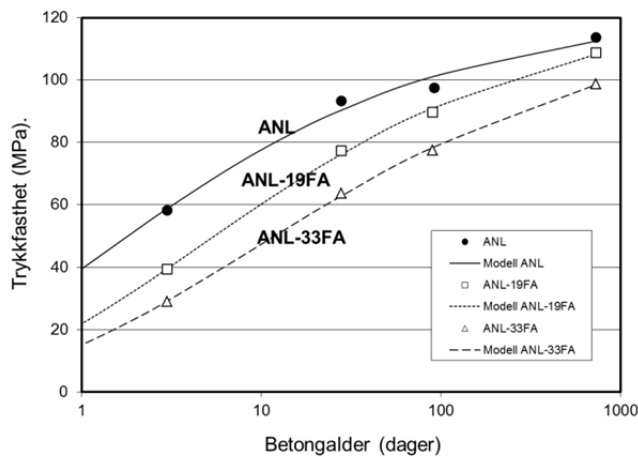
#### Effekt av klinkertype

For blandingene uten FA har SR ca. 10% lavere fasthet enn ANL både etter 28 døgn og etter 2 år. For 19% FA-innhold er det omtrent ikke forskjell mellom de to klinkertypene etter 28 døgn, og etter 2 år ligger SR-19FA 6 % lavere enn ANL-19FA. Blandingen STD/SR-19FA er mer lik SR-19FA enn ANL-19FA når det gjelder fasthetsutvikling, noe som kanskje ikke er overraskende ettersom kombinasjonen

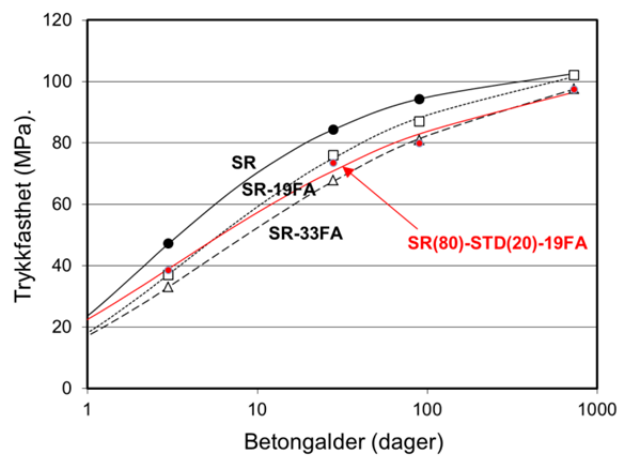
STD/SR består av 20% STD- og 80% SR-klinker. For 33% FA er bildet motsatt med høyere fasthet for SR-33FA for alle prøvningsaldre unntatt etter 2 år hvor de to blandingene (SR-33FA og ANL-33FA) har omtrent samme fasthet.

### Effekt av FA-innhold

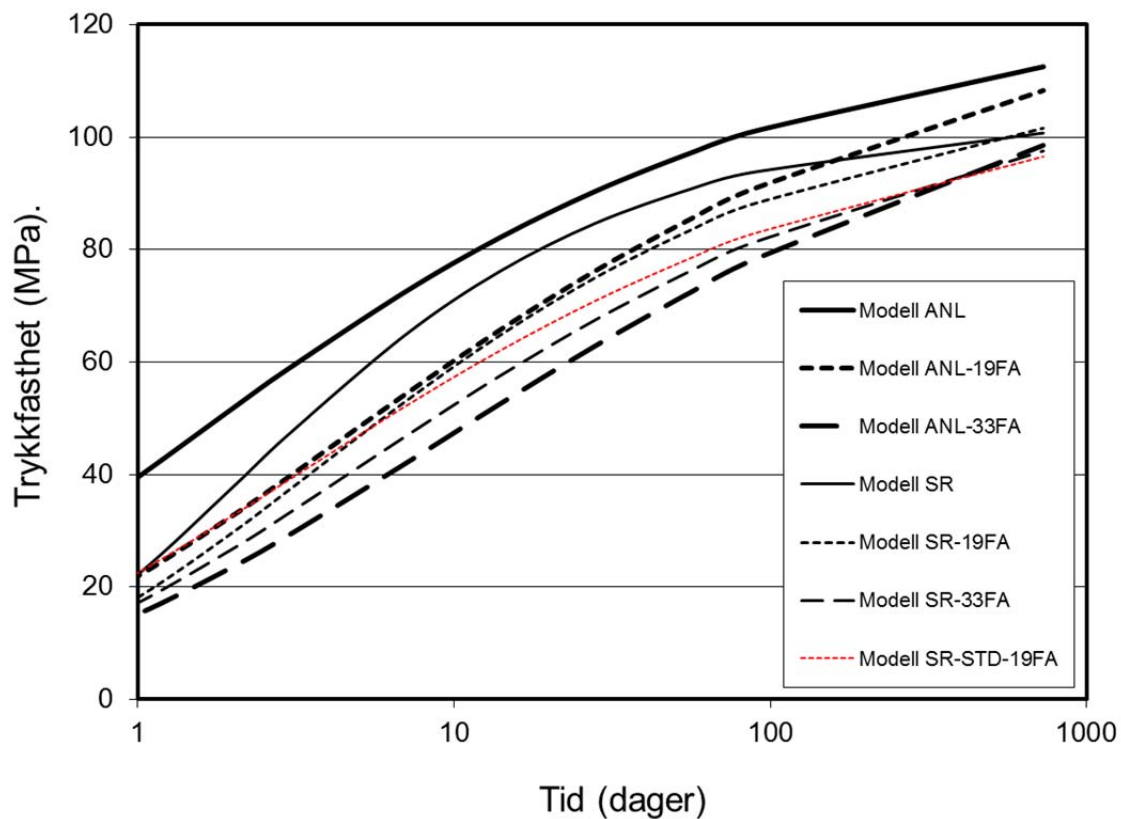
For ANL-serien reduseres fastheten med økende FA-dosering for alle aldre, men FA-betongene har større fasthetstilvekst over lang tid slik at fasthetsforskjellen avtar med tiden. Etter 2 år har ANL-19FA 4 % lavere fasthet enn ANL, mens ANL-33FA ligger 13% lavere. For SR-serien er effekten av FA mye det samme, men effekten er generelt mindre enn i ANL-serien, og etter 2 år er fasthetene i SR-serien ikke langt unna uavhengig av FA-innholdet.



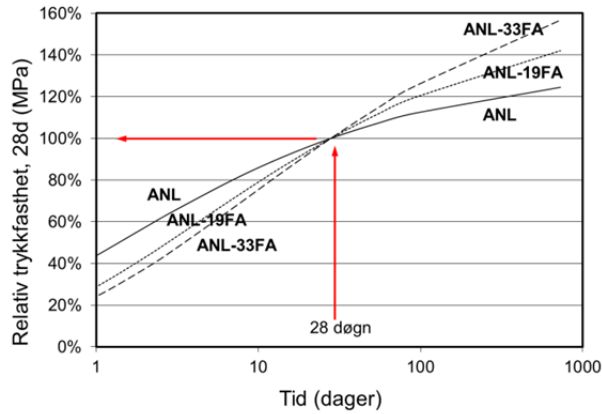
Figur 21 Fasthetsutvikling; ANL-serien



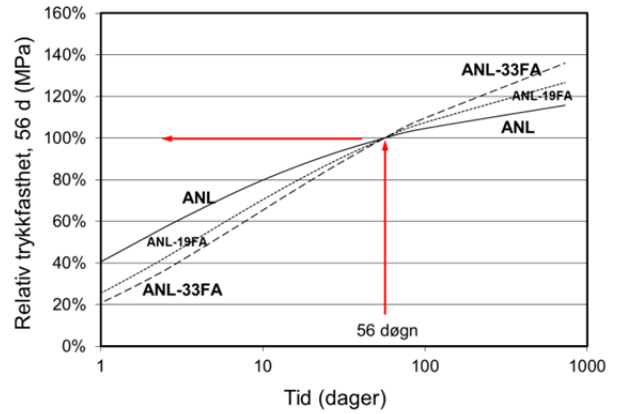
Figur 22 Fasthetsutvikling; SR-serien



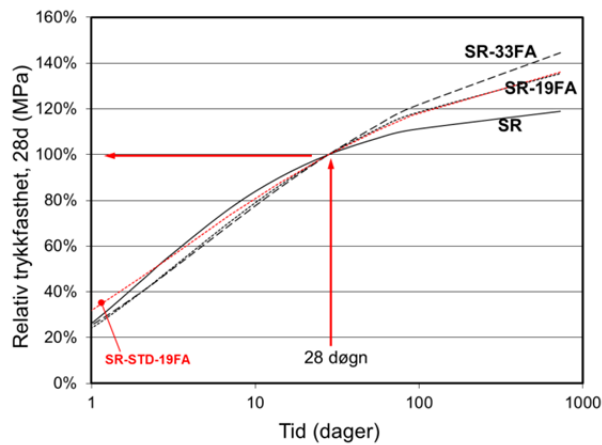
Figur 23 Fasthetsutvikling; Alle betongene (uttrykt med modellen)



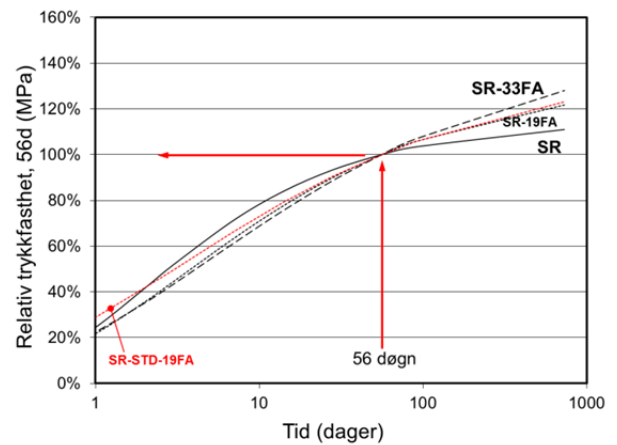
Figur 24 Fasthetsutvikling, relativ til 28-døgn; ANL-serien (uttrykt med modellen)



Figur 25 Fasthetsutvikling, relativ til 56-døgn; ANL-serien (uttrykt med modellen)



Figur 26 Fasthetsutvikling, relativ til 28-døgn; SR-serien (uttrykt med modellen)



Figur 27 Fasthetsutvikling, relativ til 56-døgn; SR-serien (uttrykt med modellen)

Tabell 16 Fasthetsresultater og relative fastheter

Fasthetsresultater							
Alder (døgn)	ANL	ANL-19FA	ANL-33FA	SR	SR-19FA	SR-33FA	STD/SR-19FA
3	58,3	39,3	29,0	47,2	37,0	33,0	38,5
28	93,3	77,3	63,7	84,3	76,0	67,8	73,5
90	97,5	89,7	77,5	94,3	87,0	81,0	79,8
730	113,8	108,7	98,8	100,5	102,0	97,7	97,5
Relative fastheter til 28 døgn							
Alder (døgn)	ANL	ANL-19FA	ANL-33FA	SR	SR-19FA	SR-33FA	STD/SR-19FA
3	63 %	51 %	46 %	56 %	49 %	49 %	52 %
28	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
90	104 %	116 %	122 %	112 %	114 %	119 %	109 %
730	122 %	141 %	155 %	119 %	134 %	144 %	133 %
Relative fastheter til referansen uten FA							
Alder (døgn)	ANL	ANL-19FA	ANL-33FA	SR	SR-19FA	SR-33FA	STD/SR-19FA
3	100 %	67 %	50 %	100 %	78 %	70 %	82 %
28	100 %	83 %	68 %	100 %	90 %	80 %	87 %
90	100 %	92 %	79 %	100 %	92 %	86 %	85 %
730	100 %	96 %	87 %	100 %	101 %	97 %	97 %

### 5.3 Andre fasthetsresultater fra prosjekt (Anlegg FA sement)

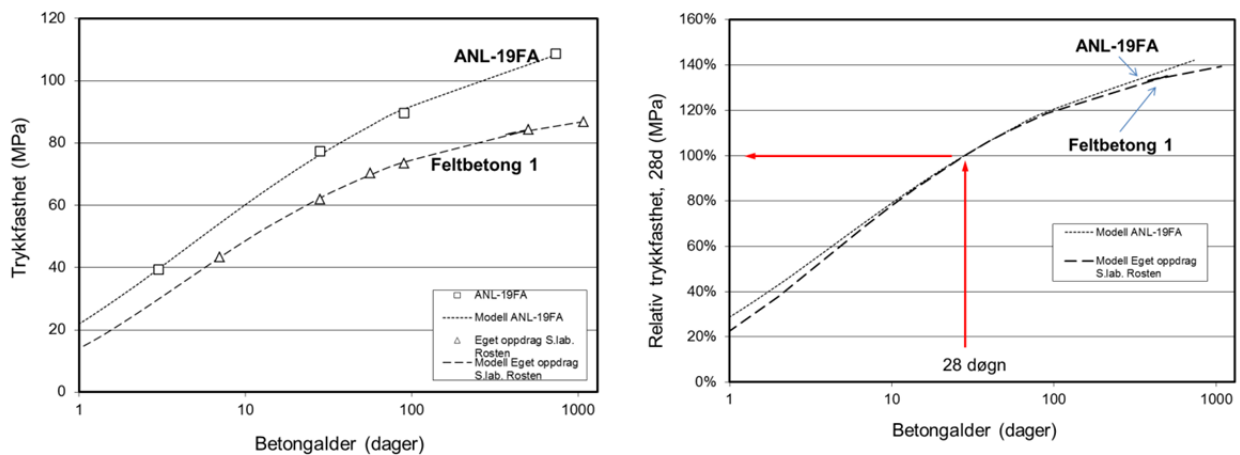
Sementen Anlegg FA kom på markedet i 2008, som erstatning for «ren» Anleggsement. Etter denne overgangen var det fra en del prosjekter i en periode meldt om problemer med å overholde kravet til 28-døgnsfasthet. Med bakgrunn i disse tilbakemeldingene, og som et supplement til det herværende prosjektet, ble det i juli 2010 støpt ut et utvidet antall terningprøver i forbindelse med en støp av et landkar til ei bru i prosjektet E6 Trondheim-Stjørdal (feltbetong fra blandeverk, B45 SV40, med Norcem Anlegg FA sement, lokalt tilslag og luftinnføring). Prøving ble gjort over tid (Sentrallaboratoriet, Region midt, Trondheim, Rosten), første prøving etter 7 døgn og siste etter 3 år.

Resultatene for denne feltbetongen («Feltbetong 1») med Anlegg FA er presentert i Figur 28 (venstre) sammen med resultatene for ANL-19FA-betongen; de to betongene har samme FA-innhold (i Anl-FA sementen er imidlertid FA sammalt med sementen, og ikke tilsatt blandingen som i ANL-19FA). Feltbetongen er tilsatt ekstra luft (4,9% luft), laboratoriebetongen ANL-19FA er uten tilsatt luft (1,9% naturlig luft), og de to betongene har forskjellig tilslag. Selv om resultatene er ulike i absoluttverdier ser vi fra Figur 28 (høyre) at den relative fasthetsutviklingen er forholdsvis lik.

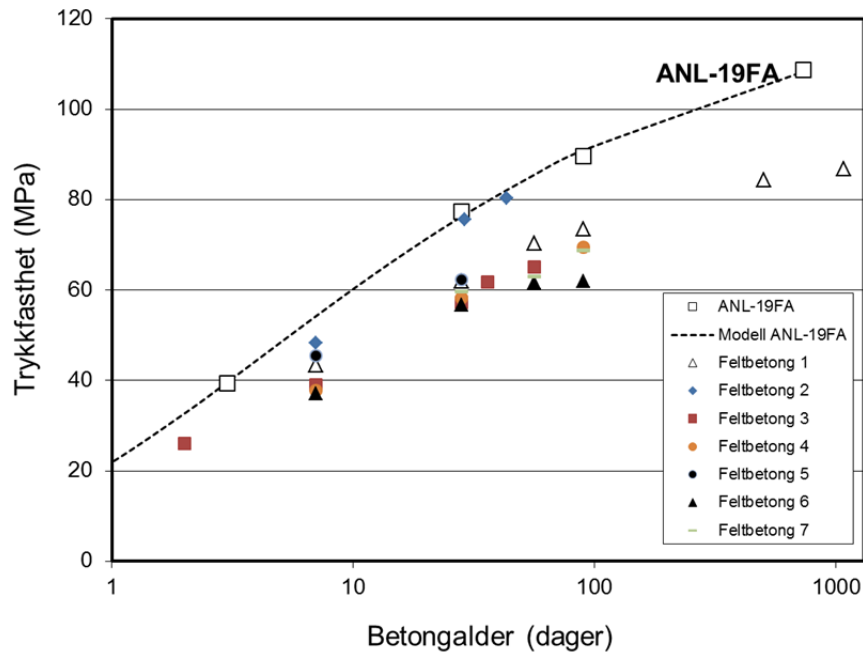
I Figur 29 er fasthetsdata fra også andre feltbetonger med Anlegg FA (Feltbetong 2 til 7), alle spesifisert som B45 SV40, gitt sammen med dataene for Feltbetong 1 og ANL-19FA. Alle feltbetongene her ble støpt i 2010 eller i 2011, feltbetongene 2-7 er også tilsatt luft, men luftinnholdet er ukjent. Mengden fasthetsdata for de ulike betongene varierer; noen datasett er basert på et relativt stort antall resultater mens andre på et mindre antall. Resultatene er ikke vektet med hensyn til datamengden.

For hver og en av betongene er det beregnet fasthetsutvikling relativ til 28-døgn. Gjennomsnittet av disse relative fasthetene for de ulike aldre er vist i Tabell 17. De ulike datasettene har ulikt antall prøvningsaldre. For hver av aldre 7, 28, 56 og 90 døgn er gjennomsnittet basert på fra 5 til 7 betonger, hvor en av dem er ANL-19FA. Den relative fasthetsutviklingen for ANL-19FA alene for disse aldre er faktisk svært lik verdiene i Tabell 17. For aldre etter 90 døgn er tallmaterialet tynt (kun ANL-19FA og Feltbetong 1).

Resultatene gir ikke grunnlag for å fatte bestemte slutninger mht fasthet, men de illustrerer klart at fastheten for ulike betonger kan variere betydelig innenfor en og samme fasthetsklasse og at faktorer som tilslagstype og luftinnhold helt sikkert spiller en viktig rolle, i tillegg til at sementens fasthetspotensial kan variere noe over tid avhengig av sementproduksjonen.



**Figur 28** Fasthetsutvikling for betongen ANL-19FA (opp til 2 år) og for en B45 SV40 feltbetong med Anlegg FA sement (opp til 3 år) fra prosjektet E6 Tr.heim-Stjørdal. Fasthetsutvikling (venstre) og fasthetsutvikling relativt til 28 døgn (høyre)



Figur 29 Fasthetsutvikling for betongen ANL-19FA og for B45 SV40-feltbetonger med Anlegg FA sement fra ulike prosjekter.

Tabell 17 Gjennomsnittlig relativ fasthetsutvikling, og variasjonsområde, blant prøvesett fra feltbetonger og fra ANL-19FA-betongen

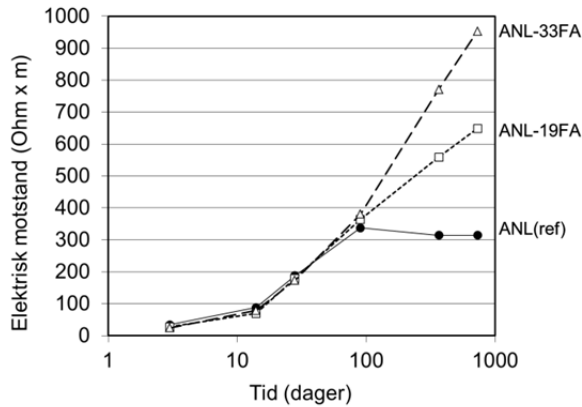
Alder	Gjennomsnittlig relativ fasthet, 28 døgn	Variasjonsområde
7 døgn	68 %	63 % - 73 %
28 døgn	100 %	-
56 døgn	111 %	105 % - 114 %
90 døgn	116 %	109 % - 119 %
1 år	133 %	(bare ett datasett)
1,4 år	137 %	136 % og 139 %
2 år	142 %	(bare ett datasett)
3 år	143 %	(bare ett datasett)

## 5.4 Spesifikk elektrisk motstand

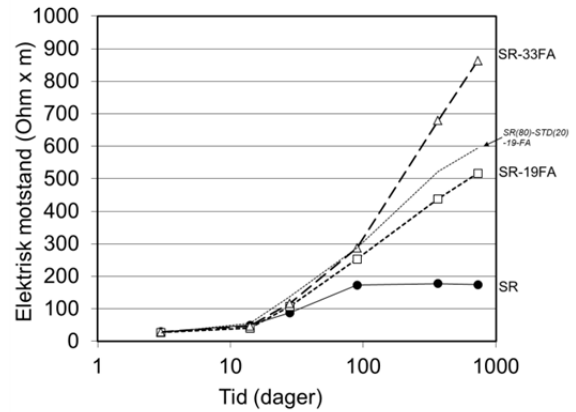
Resultatene for spesifikk elektrisk motstand fra 3 døgn til 2 år for ANL-serien er vist i Figur 30, for SR-serien i Figur 31, og for begge seriene samlet i Figur 32. Hvert punkt i figurene representerer gjennomsnittet av seks parallelle målinger (terninger), og i hvert sett måles det på de samme prøvene ved alle aldre. Spredningen i målingene er små, se Figur 33, og ingen av settene er assosiert med systematisk høyere spredning enn andre. Standardavviket øker som forventet med økende elektrisk motstand, men er i alle tilfeller lavt sammenliknet med gjennomsnittlig elektrisk motstand; og COV for alle prøvesett er kun 3,9 % i gjennomsnitt. Det er klar systematikk i resultatene og betongene utvikler klare forskjeller.

For ANL-serien er den spesifikke elektriske motstanden for betongene omtrent lik fram til 90 døgn; etter det er det høyere motstand med økt mengde FA. Etter 2 år har ANL-33FA 3,0 ganger motstanden i ANL, og ANL-19FA har 2,1 ganger motstanden i ANL. For SR-serien er mønsteret det samme, men med noe mer markert effekt av FA på elektrisk motstand allerede før 90 døgn. Etter 2 år har SR-33FA 5,0 ganger motstanden i SR, og SR-19FA har 3,0 ganger motstanden i SR. For alle tidspunkt etter 3 døgn ligger betongen SR/STD-19FA imellom ANL-19FA og SR-19FA i spesifikk elektrisk motstand.

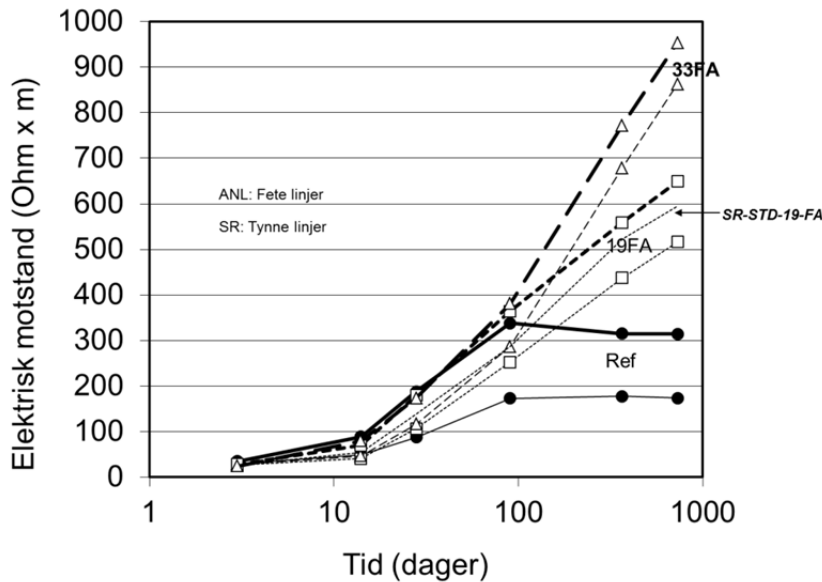
For alle tidspunkt etter 3 døgn har betongene i ANL-serien høyere elektrisk motstand enn for tilsvarende FA-mengde i SR-serien. Den relative forskjellen mellom ANL- og SR-serien avtar noe med tid og FA-dosering. Tallresultater for elektrisk motstand er gitt i APPENDIX 4



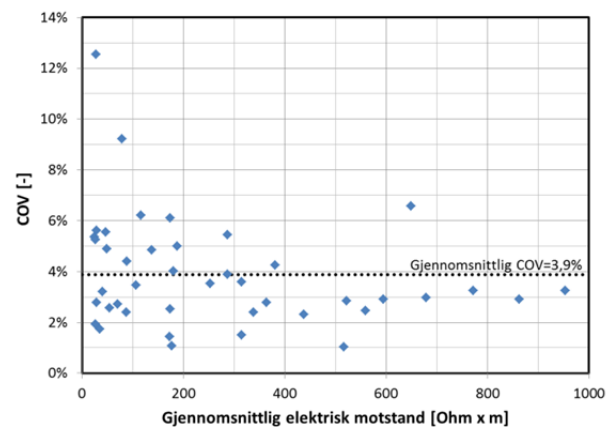
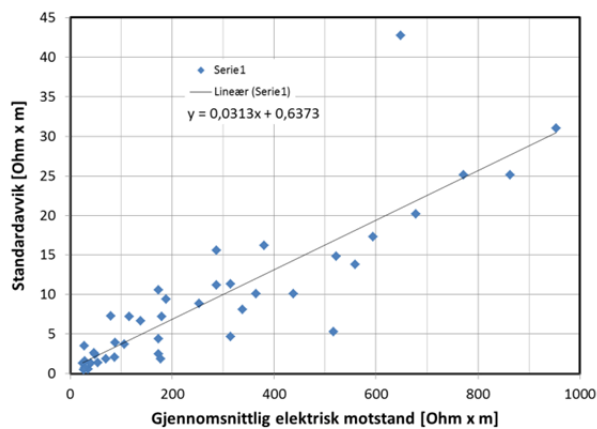
Figur 30 Spesifikk elektrisk motstand, ANL-serien



Figur 31 Spesifikk elektrisk motstand, SR-serien



Figur 32 Spesifikk elektrisk motstand, alle betongene



Figur 33 Standardavvik (venstre) og variasjonskoeffisient (COV) (høyre) for hvert prøvesett (3 prøvestykker) ved alle prøvningsaldrer. Alle resultater.

## 5.5 Kloriddiffusjon (NT Build 443)

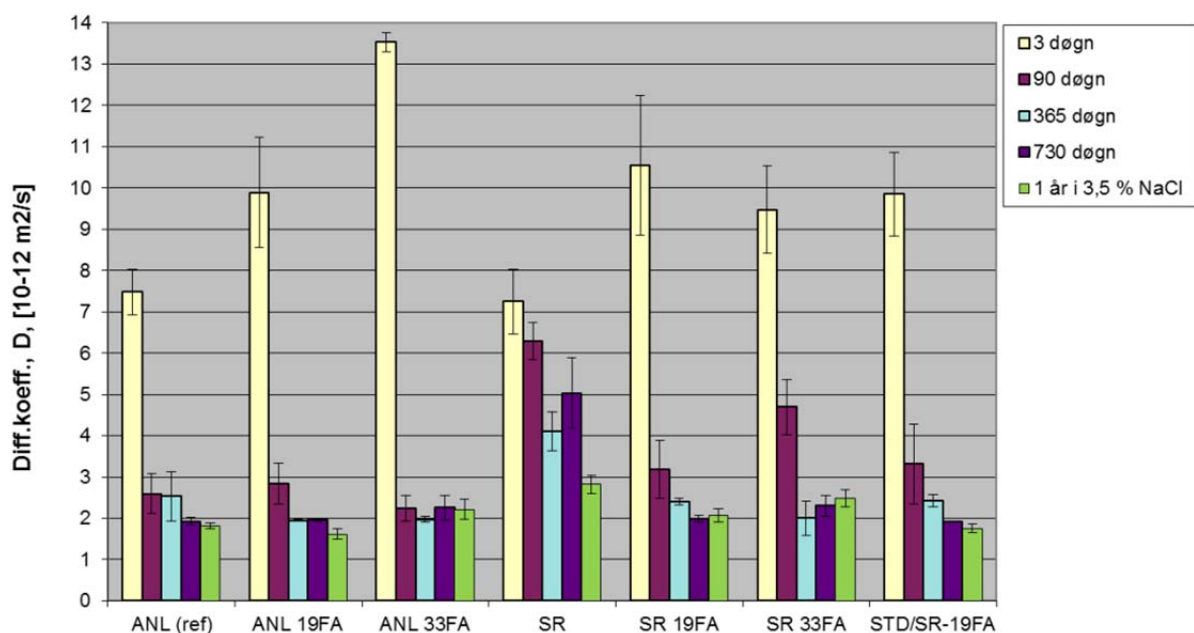
### 5.5.1 Diffusjonskoeffisient ( $D$ )

Detaljerte resultater fra kloriddiffusjonsforsøkene er gitt i APPENDIX 5. Beregnede  $D$  (gjennomsnitt) for alle betongene og eksponeringstidspunkt er gitt i Figur 34, inklusive  $Std.av.$  ( $Std. av_{innen-lab}$ ) for hvert prøvesett.  $Std. av_{innen-lab}$  (i form av COV) varierer fra 0,3 % til 29,2 % for de ulike settene (søylene), og gjennomsnittlig COV for de totalt 35 settene er 10,5 %. Figur 34 inkluderer også resultatene fra den ene serien med avvikende prosedyre i forhold til NT Build 443 (kalt «1 år i 3,5% NaCl») hvor prøvestykkene ble eksponert for 3,5 % NaCl-løsning ved 3-døgns betongalder og med varighet i 1 år. Alle de andre resultatene er basert på NT Build 443 med start eksponering (i 16,5% NaCl-løsning med varighet 35 døgn) henholdsvis etter 3, 90, 365 og 730 døgns herding. Beregnet  $D$  etter for eksempel «3 døgn» i Figur 34 er da et resultat av kloridopptaket (og betongens herdeutvikling) mellom 3 døgn og 38 døgn.

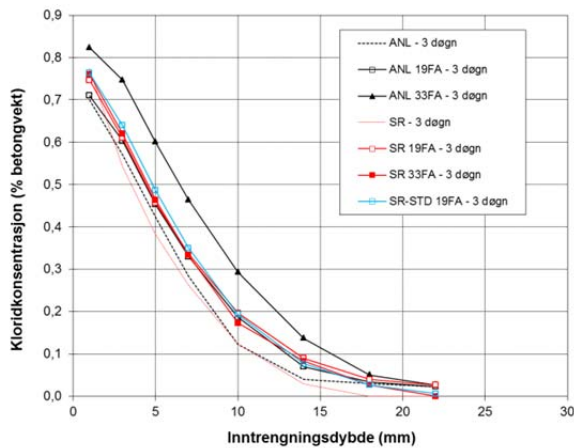
Resultatene viser at eksponering fra 3 døgn (gule søyler) skiller seg ut med høy  $D$ , og at  $D$  øker med økende FA-mengde. FA-effekten er systematisk i ANL-serien, men ikke i SR-serien. STD/SR-19FA-betongen for «3 døgn» har omtrent samme  $D$  som 19% FA i ANL- og SR-serien. Nedsenkning av prøvestykkene i 16,5% NaCl allerede etter 3 døgn er en svært «brutal» behandling av betongen, og resultatene viser at FA-betongene er betydelig mer åpen for slik tidlig kloridinntrengning sammenliknet med når de får noe lengre herdetid (se også kloridprofiler i Figur 35).

FA-betongenes kloridmotstand utvikler seg raskt i gunstig retning. Spesielt gjelder dette ANL-serien (se kloridprofiler i Figur 36 for 33% FA-betongene) hvor det allerede etter 90 døgn ikke kan ses signifikante forskjeller i  $D$  mellom de ulike FA-tilsetninger (0, 19 og 33 %), jfr også konklusjonen i forbindelse med ringforsøket i Kap. 4.

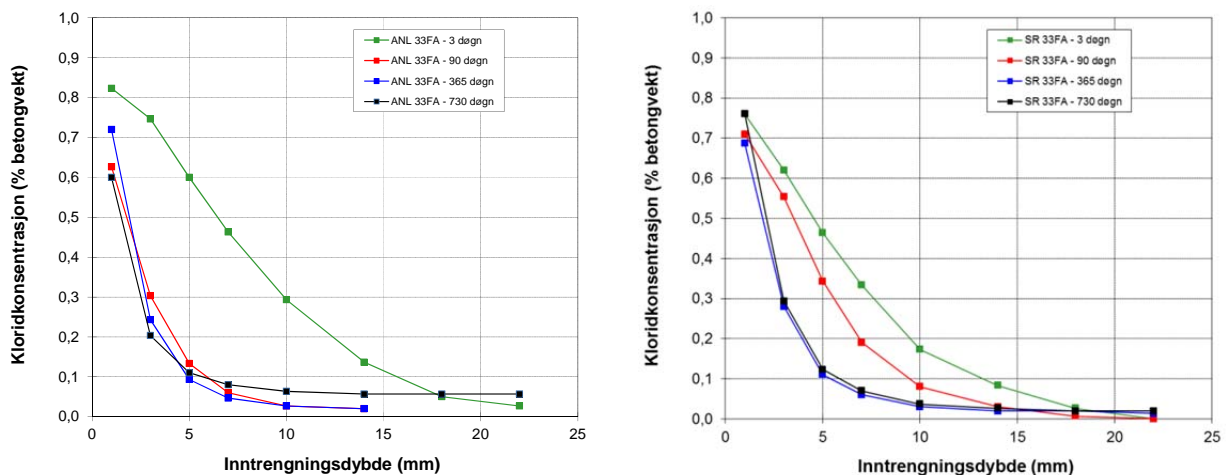
SR-serien skiller seg fra ANL-serien ved at SR (uten FA) viser lavere kloridmotstand for alle aldre, bortsett fra etter 3 døgn. Med FA (både 19 og 33 %) øker imidlertid kloridmotstanden i SR-serien betydelig, spesielt fra 1 års herdetid, hvor kloriddiffusjonskoeffisientene er på samme nivå som i ANL-serien.



Figur 34 Gjennomsnittlig  $D$  for alle betongene og alle eksponeringstidspunkt. Prosedyre NT Build 443 er brukt i alle serier unntatt for serien «1 år i 3,5 % NaCl», se tekst.  $Std.av.$  ( $\pm$ ) innen hvert prøvesett er indikert.



Figur 35 Målte kloridprofiler (middel) for alle betongene etter NT Build 443 og eksponering etter 3 døgn



Figur 36 Målte kloridprofiler (middel) for ANL 33 FA (venstre) og SR 33 FA (høyre) etter NT Build 443 og eksponering etter 3, 90, 365 og 730 døgn

I Figur 37, som viser  $D$  (m/Std.av. for hvert prøvesett), er eksponeringene etter 3 døgn tatt ut for å få bedre skala på figuren for de øvrige resultatene, samt for å vise resultater bare for standard NT Build 443-prosedyre. Dette gjelder også Figur 38, men Std.av. som her er indikert for alle betongene er «mellombatch variasjonen» (tilsvarende  $COV=20,4\%$ ) som ble funnet i kapittel 4 for eksponering etter 90 døgn (altså forventet spredning hvis vi hadde gjentatt blandingene og antatt  $COV$  uavhengig av eksponeringstidspunkt).

For eksponering etter 90 døgn ble det i kapittel 4 for de betongene som var med i ringforsøket (ANL, ANL-19FA, ANL-33 FA og STD/SR-19 FA) konkludert med at  $D$  for disse betongene ikke var signifikant forskjellig når vi betrakter spredningen innad i prøvesett (reperterbarhet), og mellom blandinger og laboratorium (reproduserbarhet). I så måte må vi her inkludere også SR 19FA i denne rekka over betonger som ikke har signifikante forskjeller i  $D$  ved 90 døgns eksponering. De to betongene som skiller seg ut med noe høyere  $D$  ved 90 døgn er dermed SR og SR 33 FA. Tendensen basert på gjennomsnittresultatene ved 90 døgn er at  $D$  i SR-serien er høyere enn i ANL-serien. For 90 døgn er det i SR-serien en synkende tendens for  $D$  med FA-innhold, men effekten er ikke systematisk.

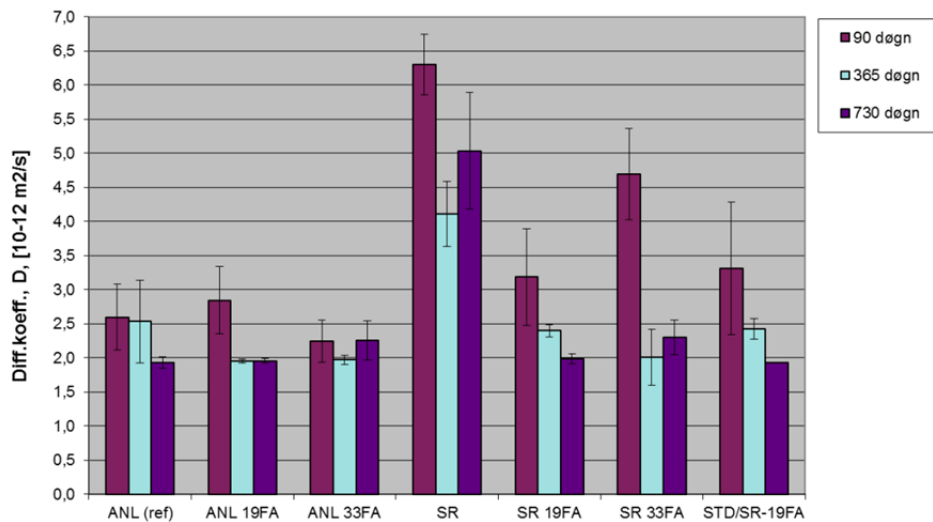
For eksponering etter 365 døgn skiller SR-betongen seg ut med høy  $D$ . Tendensen er ellers for SR at  $D$  avtar markant ved 19% FA-dosering. Ytterligere FA-dosering opp til 33% gir marginal reduksjon i  $D$ . I ANL-serien kan vi ved 365 døgn spore en liten gunstig effekt av 19% FA-dosering, men ytterligere



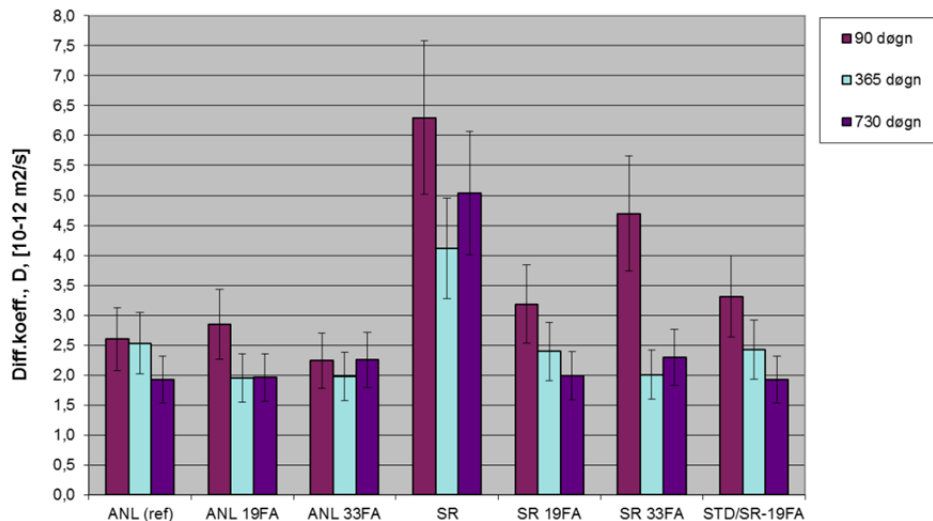
økning til 33% FA gir ingen effekt på  $D$ . Det er tvilsomt om endringene i  $D$  fra SR-19FA til SR-33FA og fra ANL til ANL-19FA er signifikante.

For eksponering etter 730 døgn er trenden for  $D$  at alle betongene er mer eller mindre like unntatt betongen SR som har betydelig høyere  $D$ .

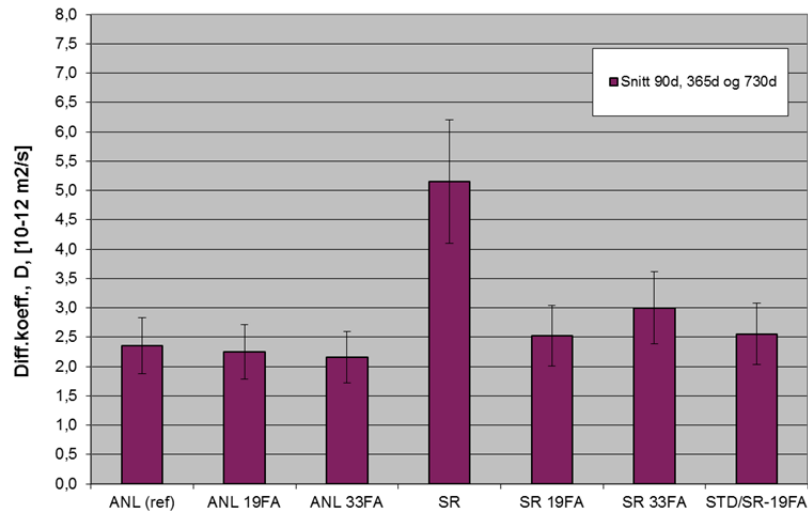
Gjennomsnittet av  $D$ , betong for betong, for 90, 365 og 730 døgn, se Figur 39, viser ingen signifikante forskjeller mellom betongene, unntatt for betongen SR som har omtrent dobbelt så høy  $D$  som de andre betongene. Trenden er imidlertid at  $D$  i SR-serien er marginalt høyere enn i ANL-serien for samme FA-dosering. Figur 40 viser kloridprofiler (middel) for eksponeringene 90, 365 og 730 døgn.



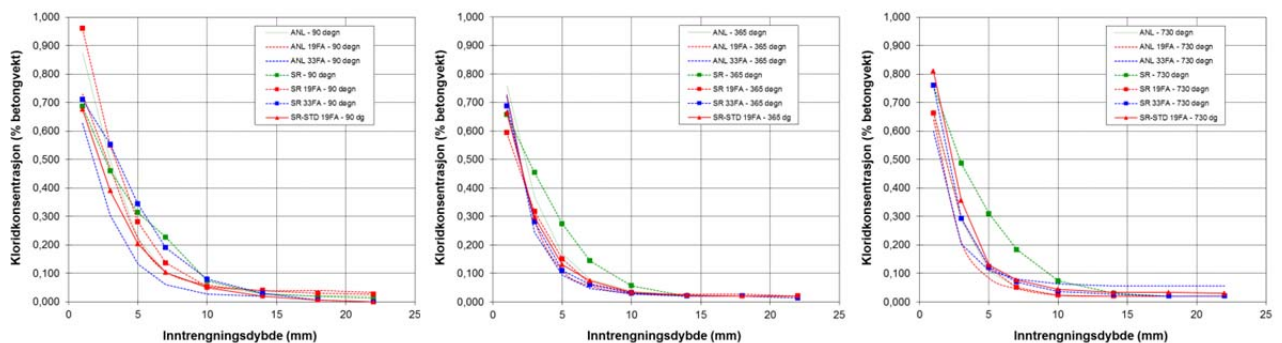
Figur 37 Samme data for  $D$  som i Figur 34, med 3 døgns eksponeringene utelatt. Std.av. ( $\pm$ ) innen hvert prøvesett er indikert



Figur 38 Samme data for  $D$  som i Figur 37. Reproduserbarhets Std.av. (tilsvarende COV=20,4 %) fra kapittel 4 er indikert på alle søyler.



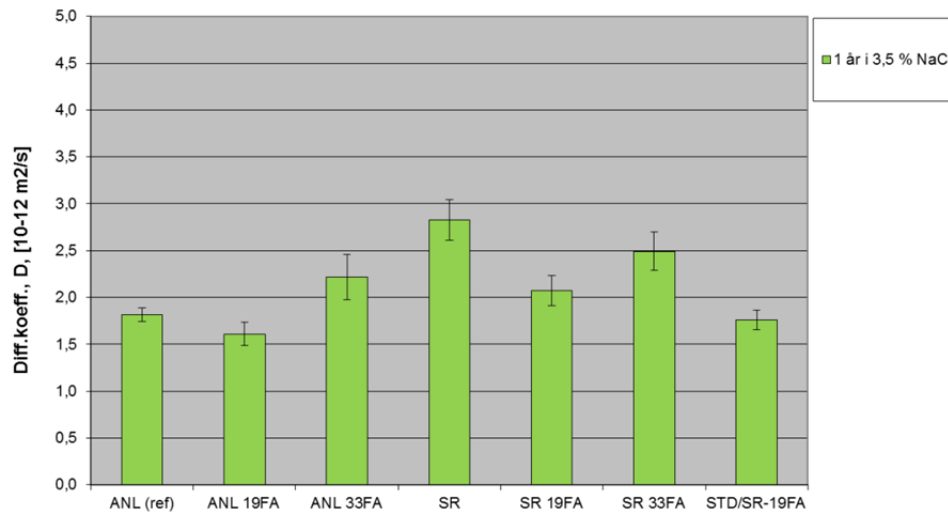
Figur 39 Gjennomsnittlig  $D$  for NT Build 443-eksponering ved 90d, 365d og 730d. Reproduserbarhets Std.av. (tilsvarende COV=20,4 %) fra kapittel 4 er indikert på alle søyler.



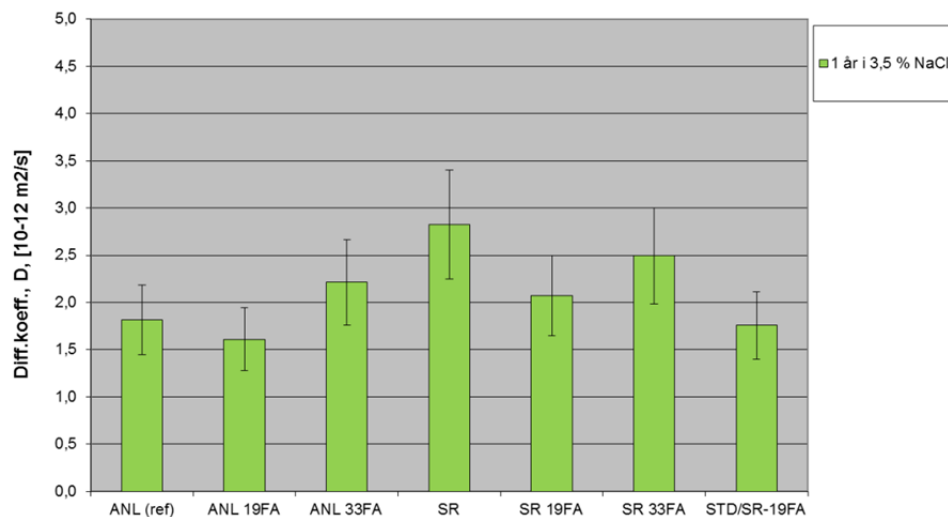
Figur 40 Målte kloridprofiler (middelverdier) etter NT Build 443 og eksponering etter 90 døgn (venstre), 365 døgn (midt) og 730 døgn (høyre)

Resultatene for eksponering «1 år i 3,5 % NaCl» fra 3 døgn er vist i Figur 41, og Figur 42 viser samme data, men med reproduserbarhets Std.av. (merk: basert på standard NT Build 443-eksponering) fra kapittel 4 indikert. Trenden er at 19 % FA er marginalt gunstigere mht lav  $D$  sammenliknet med 0 % og 33 % FA. Trenden er, også her, at  $D$  i SR-serien er noe høyere enn betongene i ANL-serien med tilsvarende FA-dosering, men forskjellen avtar med økende FA-dosering. At SR-betongene synes å ha noe lavere kloridmotstand enn ANL-betongene kan også ses direkte av kloridprofilene, se Figur 43. I SR-serien er inntrengningsdybden for kloridinnhold på 0,1% av betongvekt ca. 2 mm større enn i ANL-serien (ca. 18 mm dybde for SR- mot ca. 16 mm for ANL-serien, uansett FA-innhold).

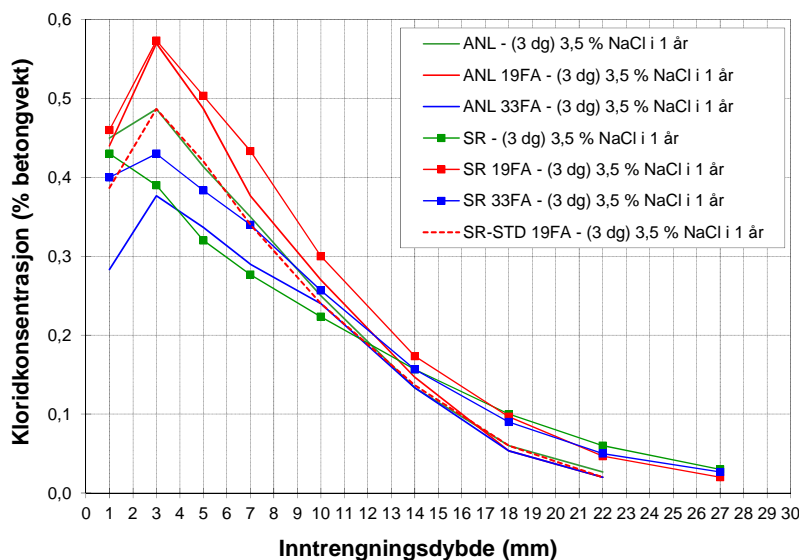
Tar man spredningen i  $D$  i betraktningen for «1 år i 3,5 % NaCl»-resultatene, så er det vanskelig å si noe entydig om  $D$  og effekten av klinkertype og FA-dosering. Av samme grunn kan det da konstateres at det ikke er noen signifikant negativ effekt av FA-dosering på  $D$  etter 1 års eksponering i 3,5 % NaCl fra 3 døgn betongalder. Den økte  $D$  i tidlig alder for FA-betongene som ble påvist for NT Build 443-proseduren (diskutert ovenfor) er ikke lenger til stede her etter 1 års eksponering i 3,5 % NaCl fra 3 døgn. I så måte er det mye bedre sammenheng i  $D$  mellom 1 års eksponering i 3,5 % NaCl fra 3 døgn og NT Build 443-resultatene for eksponering (i 35 døgn) i 16,5 % NaCl etter 1 år (365 d) og 2 år (730 d).



Figur 41 Gjennomsnittlig  $D$  for alle betongene etter 1 år i 3,5 % NaCl med start eksponering etter 3 døgn. Std.av. ( $\pm$ ) innen hvert prøvesett er indikert.



Figur 42 Gjennomsnittlig  $D$  for alle betongene etter 1 år i 3,5 % NaCl med start eksponering etter 3 døgn. Reproduserbarhets Std.av. (tilsvarende COV=20,4 %) fra kapittel 4 er indikert på alle søyler.



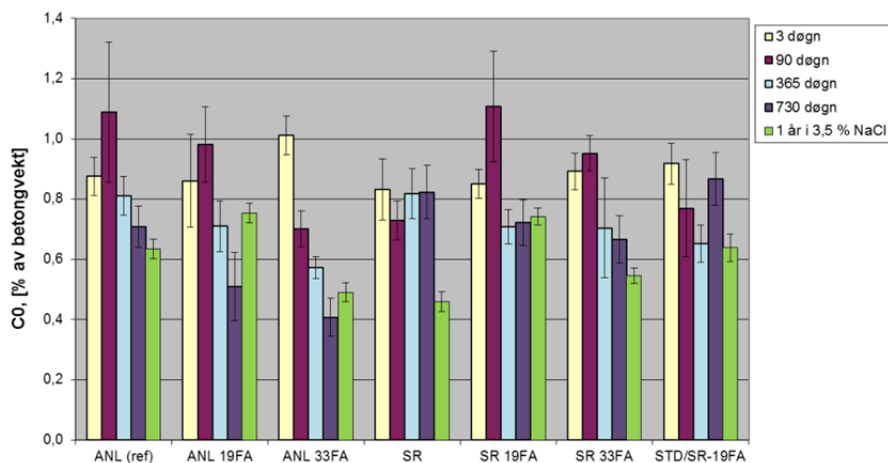
Figur 43 Målte kloridprofiler (middelverdier) etter 1 år i 3,5 % NaCl ved start eksponering etter 3 døgn

### 5.5.2 Overflatekonsentrasjon $C_0$ og totalt inntrengt mengde klorider

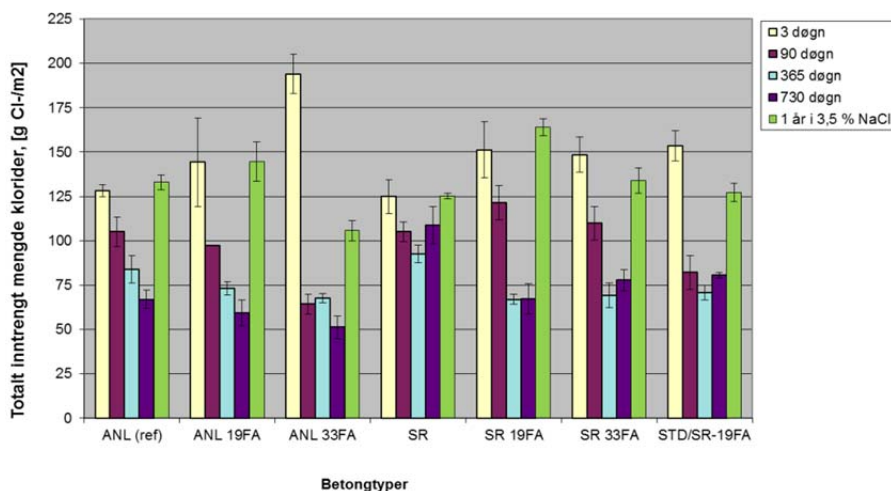
$C_0$  må betraktes delvis som en modellparameter ettersom en eller flere av kloridanalysene nærmest eksponeringsflaten utelates i regresjonsanalysen (se kap. 3.4). Gjennomsnittlig beregnet  $C_0$  (m/Std.av. for hvert prøvesett) er vist i Figur 44 og totalt inntrengt mengde klorider i Figur 45. For  $C_0$  varierer  $Std. av_{innen-lab}$  (i form av COV) fra 3,7 % til 23,6 % for de ulike settene (søylene), og gjennomsnittlig COV for de totalt 35 settene er 10,4 %. For totalt inntrengt mengde klorider varierer  $Std. av_{innen-lab}$  (i form av COV) fra 0 % til 17,4 % for de ulike settene (søylene), og gjennomsnittlig COV for de totalt 35 settene er 7,0 %.

For ANL-serien er det både for  $C_0$  og for totalt inntrengte klorider en klar tendens til avtagende verdier ved økende alder fra 90 til 730 døgn og med økende FA-innhold fra 0 til 33 %. For SR-serien har vi ikke tilsvarende systematikk, se Figur 44 og Figur 45

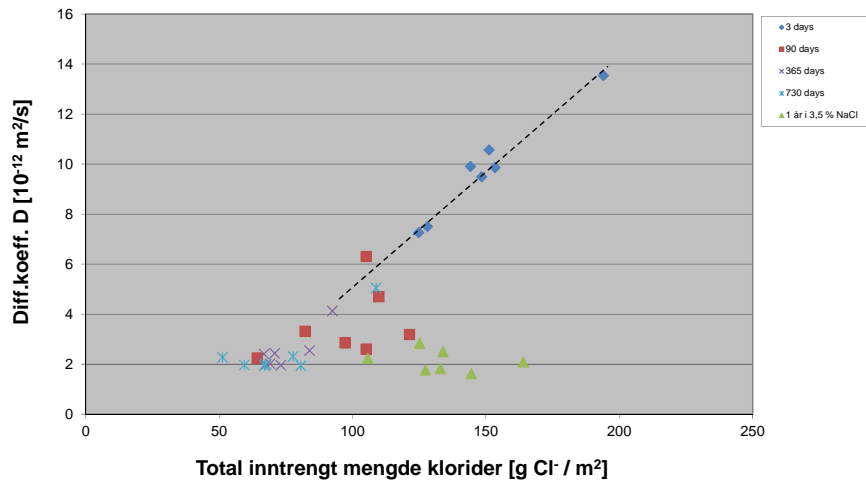
$C_0$  og totalt inntrengt mengde klorider viser ingen sammenheng innbyrdes, ei heller er det sammenheng mellom  $C_0$  og  $D$  (NT Build 443). Den eneste sammenhengen som kan spores er mellom totalt inntrengt mengde klorider og  $D$ , se Figur 46; dog bare for de betongene som har  $D$ -verdier større enn  $4 \times 10^{-12}$ , noe som omfatter alle resultatene fra eksponering ved 3 døgn samt alle resultatene for øvrig for SR (uten FA) og SR-33FA ved 90 døgn.



**Figur 44** Gjennomsnittlig  $C_0$  for alle betongene og alle eksponeringstidspunkt. Prosedyre NT Build 443 er brukt unntatt for serien «1 år i 3,5 % NaCl», se tekst. Std.av. ( $\pm$ ) innen hvert prøvesett er indikert



**Figur 45** Gjennomsnittlig totalt inntrengt mengde klorider for alle betongene og alle eksponeringstidspunkt. Prosedyre NT Build 443 er brukt unntatt for serien «1 år i 3,5 % NaCl», se tekst. Std.av. ( $\pm$ ) innen hvert prøvesett er indikert



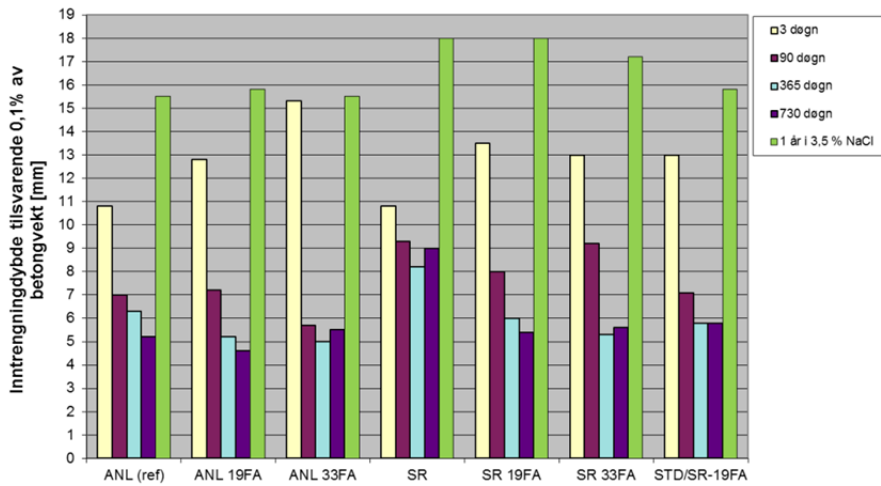
**Figur 46** Diffusjonskoeffisient  $D$  vs. total inntrengt mengde klorider for alle betongene og eksponeringstidspunkt. Stiplet trendlinje for NT Build 443-resultatene for data med  $D > 4 \times 10^{-12}$  er tegnet inn for hånd.

### 5.5.3 Kloridinntrengningsdybde tilsvarende 0,1 % av betongvekt

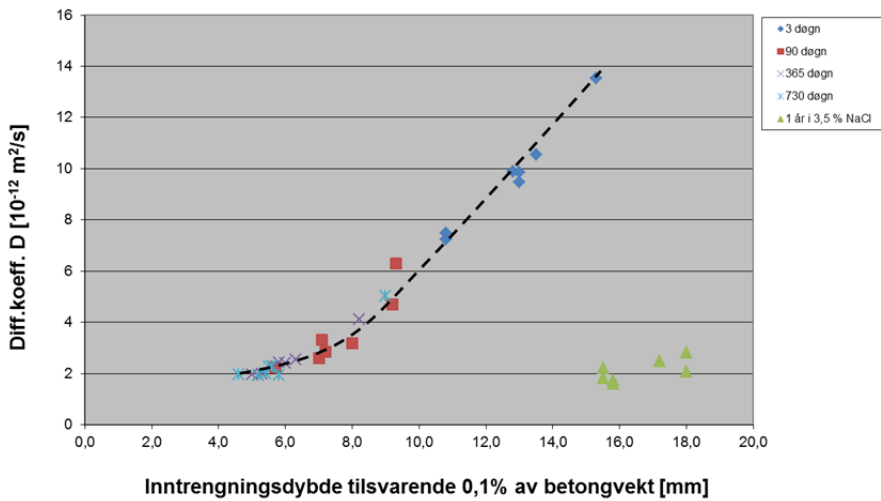
Dybden av kloridfronten, fra betongoverflaten, med en Cl<sup>-</sup>-konsentrasjon på 0,1 % av betongvekt er vist i Figur 47. Nivået 0,1 % Cl<sup>-</sup>-konsentrasjon er en valgt verdi, men er et grovt anslag på kritisk Cl<sup>-</sup>-konsentrasjon for initiering av armeringskorrosjon. For NT Build 443-forsøkene (3-730 døgn) ser vi at eksponering fra 3 døgn gir vesentlig større inntrengning enn senere eksponeringstidspunkt, noe som nok forklares med at hydrasjonsgraden i eksponeringsperioden er moderat (høy porøsitet) og at det er ubetydelig pozzolan aktivitet fra FA før 28 døgn. Stor inntrengning for 3 døgn er i tråd med diskusjonen forut for bl.a.  $D$ . SR-betongen er også her noe avvikende ettersom alle eksponeringstidspunkt gir relativt lik (og høy) inntrengningsdybde. Tidseffekten i form av redusert inntrengningsdybde er ikke overraskende størst mellom 3 døgn og 90 døgn, men med en viss videre reduksjon også fra 90 døgn til 365 døgn. Det er svært liten forskjell i inntrengningsdybde mellom betongene for eksponering ved 356 døgn og 730 døgn. Når det gjelder ANL-serien er det ingen systematisk effekt av FA-dosering på inntrengningsdybden, når vi ser bort fra eksponering etter 3 døgn.

For forsøkene «1 år i 3,5 % NaCl» med eksponering etter 3 døgn er inntrengningsdybdene for betongene høy og varierer fra 15,5 mm til 18 mm. Det er ingen klar effekt av FA-dosering i disse forsøkene, og alle betongene i SR-serien har høyere (ca. 1,5-2,0 mm høyere) inntrengningsdybde enn i ANL-serien. Betongen STD/SR-19FA har samme inntrengningsdybde som betongene i ANL-serien.

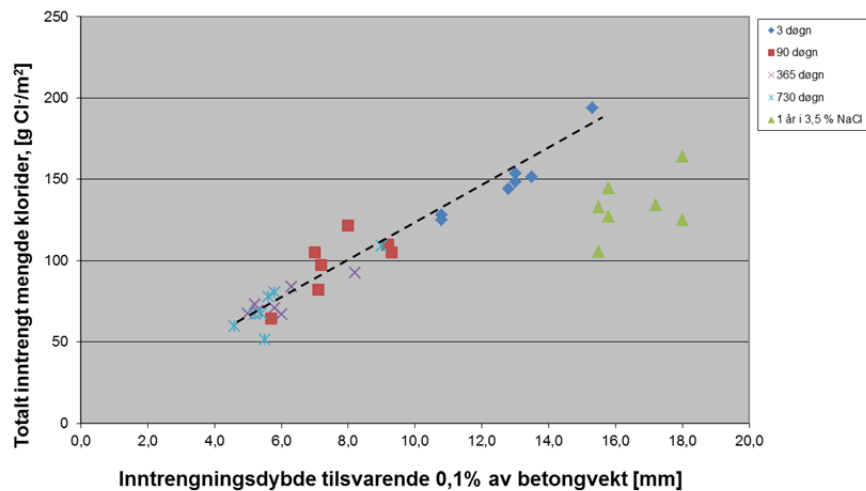
Når det gjelder sammenhenger mellom inntrengningsdybde og de andre parameterne så synes det å være en klar sammenheng med  $D$  (se Figur 48) og med totalt inntrengt mengde klorider (se Figur 49). Dette gjelder for NT Build 443-proseduren. Resultatene for prosedyren «1 år i 3,5% NaCl», med mye lengre eksponeringstid, er også inkludert i de to figurene.



Figur 47 Inntrengningsdybde med Cl<sup>-</sup>-konsentrasjon på 0,1 % av betongvekt



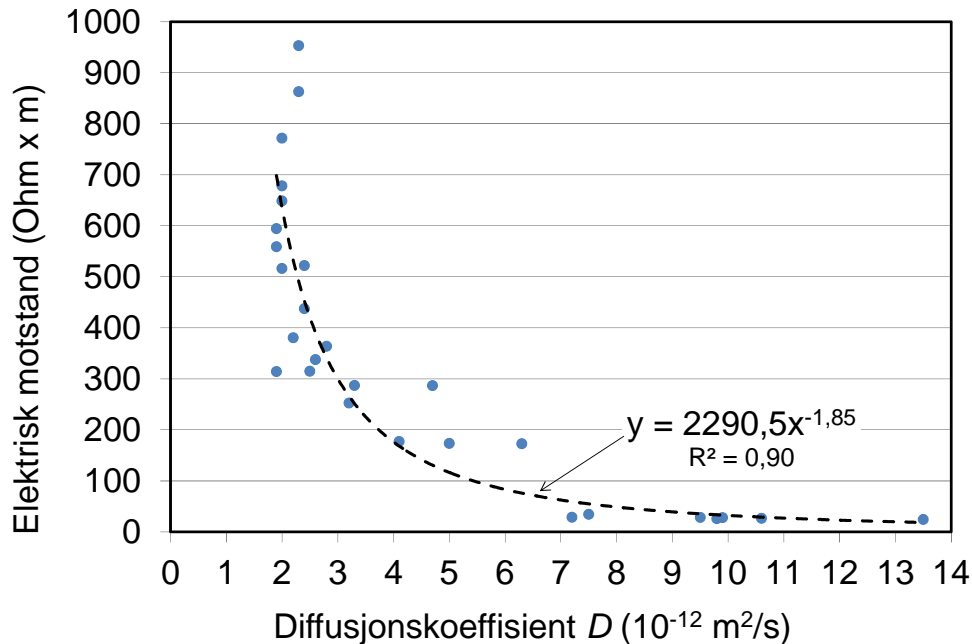
Figur 48 Diffusjonskoeffisient  $D$  vs. inntrengningsdybde. Stiplet trendlinje for NT Build 443-resultatene er tegnet inn for hånd.



Figur 49 Totalt inntrengt mengde klorider vs. inntrengningsdybde. Stiplet rettlinjede trendlinje for NT Build 443-resultatene er tegnet inn for hånd.

### 5.5.4 Relasjon mellom diffusjonskoeffisient og spesifikk elektrisk motstand

Betongens spesifikke elektriske motstand er en materialparameter som antas å relatere seg til betongens bestandighetsegenskaper, både i initieringsfasen (motstand mot kloridinntrenging) og propageringsfasen (korrosjonshastighet). Resultatene for spesifikk elektrisk motstand (diskutert i kapittel 5.4) er i Figur 50 plottet mot beregnet  $D$  for de terminer hvor de to parameterne ble målt samtidig. For  $D$ -verdier  $>$  ca  $3,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  synes det å være en sammenheng mellom de to parameterne, hvor avtagende  $D$  gir økende elektrisk motstand. For  $D <$  ca  $3,0$  er det imidlertid ingen sammenheng ettersom vi har et stort spekter av verdier for spesifikk elektrisk motstand for omtrent samme  $D$ -verdi.



Figur 50 Relasjon mellom diffusjonskoeffisient og spesifikk elektrisk motstand. Stiplet trendlinje er tilpasset alle data.

## 5.6 Ekstraforsøk ved 6 års betongalder

### 5.6.1 Gjenværende prøvestykker og opplegg

Det ble gjort prøving ved 6 års betongalder på prøvestykker som var gjenværende etter at det opprinnelige planlagte prøvningsprogrammet (opp til 2 år) var ferdig. Gjennomføringen av denne «restprøvingen» ble gjort over en relativt begrenset tidsperiode i 2013. Ettersom de ulike betongene ble blandet til ulike tider i løpet av 2007 varierer alderen på restprøvene derfor fra 5,5 til 6,0 år (snittalder er 5,7 år). For enkelthets skyld angis prøvningsalderen for alle betongene fra restprøvingen som 6 år i det etterfølgende.

Restprøvene var vannlagret ved  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  gjennom alle disse årene. Det som var igjen av terninger og sylindrer ble brukt til å måle elektrisk motstand og trykkfasthet (alle betongene), og for ANL-serien ble det i tillegg målt kapillær absorpsjon, se Tabell 18. Detaljerte resultater fra restprøvingen er gitt i APPENDIX 6. Restprøvestykkene besto av 100 mm terninger, sylindrer i full størrelse ( $\text{Ø}100 \text{ mm}$ ,  $h=200 \text{ mm}$ ) og kappede/små sylindrer ( $\text{Ø}100 \text{ mm}$  og  $h$  rundt  $70 \text{ mm}$ ).

**Tabell 18 Ekstraforsøk på restprøvestykker etter 6 år: Prøve egenskaper og antall/type prøvestykker**

Prøvd egenskap	ANL	ANL-19FA	ANL-33FA	SR	SR-19FA	SR-33FA	STD/SR-19FA
<b>Elektrisk motstand</b>	1 terning 4 sylindrer	2 terning 8 sylindrer	1 terning 7 sylindrer	1 terning 7 sylindrer	1 terning 7 sylindrer	1 terning 7 sylindrer	1 terning 7 sylindrer
<b>Trykkfasthet</b>	Samme antallet som over minus 1-2 sylindrer som gikk til prøving av kapillærabsorpsjon)			Samme antall prøvestykker som over			
<b>Kapillærabsorpsjon</b>	4 tilsagede skiver med Ø100 mm og tykkelse 20 mm			Ikke prøvd			

### 5.6.2 Fasthetsresultater

De fleste restsylindrene for hver betongtype var korte og hadde lave h/d-forhold, hovedsakelig fra 0,70 til 0,75 (diameter 100 mm); disse er omregnet til h/d=2 med omregningsfaktorer på 0,73-0,76, se Tabell 19. Dette involverer ekstrapolering av omregningsfaktor for sylindrer med h/d-forhold som er lavere enn laveste h/d forhold angitt i Håndbok 014/NS 3420 som er 0,75. For de fleste betongene var imidlertid noen av sylindrene i full størrelse. Gjennomsnittresultater og spredning (korte sylindrer er omregnet til h/d=2) er vist i Tabell 20. Figur 51 viser resultatene sammen med fastheten etter 2 år (fra kap. 5.2).

Vi ser at terning- og sylindrerresultatene er noe usystematiske, noe som muligens kan forventes ettersom de omfatter omregninger av resultater for små sylindrer samt svært begrensede data for 200 mm sylindrer og for terninger. Sylindrerresultatene viser i tillegg relativt stor intern spredning.

6-årsresultatene for ANL-serien viser en avtagende trend for fasthet med FA-innholdet, noe som er samme trend som etter 2 år. SR-serien har ikke samme avtagende trend med FA-innhold, heller motsatt ettersom SR-33% FA synes å ha hatt mer markert fasthetstilvekst fra 2 til 6 år (se snitt terning og snitt alle sylindrene).

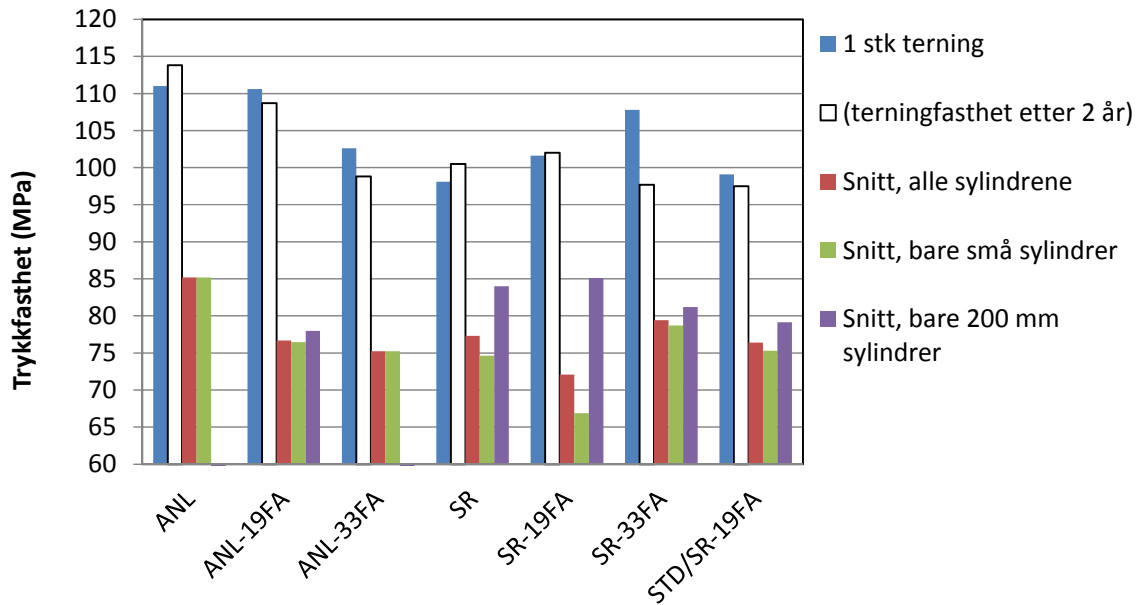
**Tabell 19 Trykkfasthet etter 6 år, enkeltresultater**

	ANL	ANL-19FA	ANL-33FA	SR	SR-19FA	SR-33FA	STD/SR-19FA
1 stk terning	111,0	110,6	102,6	98,1	101,6	107,8	99,1
Restsyl (200 mm) 1	-	78,0	-	91,0	85,1	80,9	88,7
Restsyl (200 mm) 2	-	-	-	77,0	85,1	81,5	69,6
Restsyl 1	84,1	82,1	81,8	66,0	59,4	76,9	78,9
Restsyl 2	86,3	75,7	78,7	75,0	74,9	77,6	68,5
Restsyl 3	-	76,1	76,1	77,7	66,7	76,5	80,3
Restsyl 4	-	78,7	80,7	79,8	71,7	84,3	72,2
Restsyl 5	-	78,4	80,6	74,7	61,7	78,4	76,6
Restsyl 6	-	67,9	53,6	-	-	-	-
COV, alle sylindrene	1,8 %	5,7 %	14,3 %	9,6 %	14,4 %	3,6 %	9,2 %
COV, små sylindrer	1,8 %	6,3 %	14,3 %	7,1 %	9,8 %	4,1 %	6,5 %
COV, 200 mm sylindrer	-	-	-	11,8 %	0,0 %	0,5 %	17,1 %

**Tabell 20 Trykkfasthet etter 6 år, gjennomsnittresultater**

	ANL	ANL-19FA	ANL-33FA	SR	SR-19FA	SR-33FA	STD/SR-19FA
1 stk terning	111,0	110,6	102,6	98,1	101,6	107,8	99,1
Snitt, alle sylindrene	-	76,7	-	77,3	72,1	79,4	76,4
Snitt, bare små sylindrer	85,2	76,5	75,3	74,6	66,9	78,7	75,3
Snitt, bare 200 mm sylindrer	-	78,0	-	84,0	85,1	81,2	79,2
(terningfasthet etter 2 år)	113,8	108,7	98,8	100,5	102,0	97,7	97,5





Figur 51 Trykkfasthet etter 6 år (terningfasthet etter 2 år er også inkludert)

### 5.6.3 Spesifikk elektrisk motstand

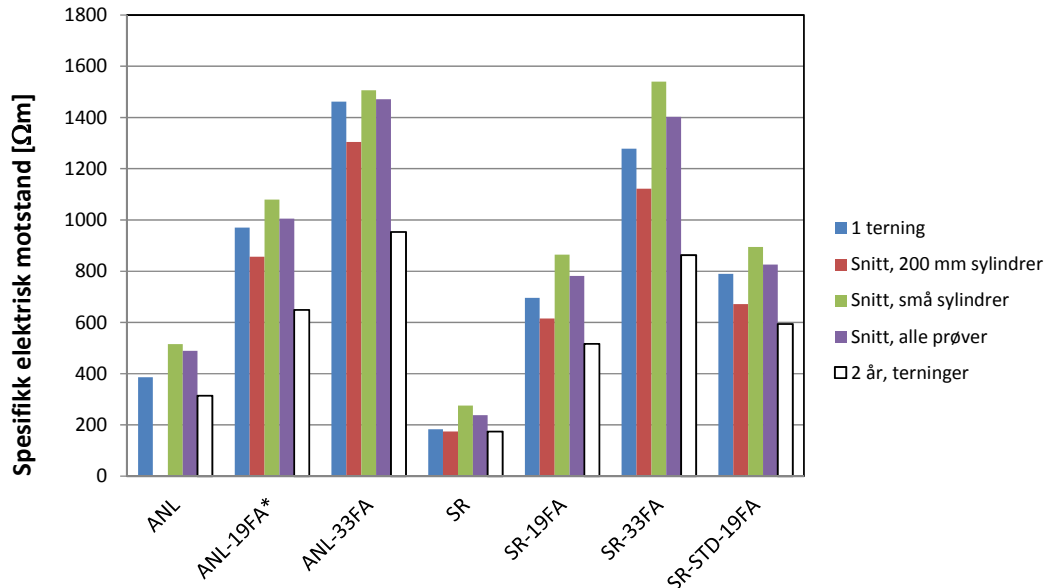
Resultatene for spesifikk elektrisk motstand er gitt i Tabell 21 og Tabell 22, samt Figur 52. Det er etter 6 år samme trend som tidligere vist for resultatene ved 2 år (kap. 5.4). Økende FA-innhold gir markant økning i spesifikk elektrisk motstand; dette gjelder både for gjennomsnittet for alle restprøvene og for hver type prøvestykke. Legger man målingen på terningen etter 6 år til grunn (dvs. samme type prøvestykke som etter 2 år) er det en klar tendens til at den %-vise økningen fra 2 år til 6 år øker med FA-dosering. Samlet gjennomsnitt etter 6 år (for alle typer prøvestykker) har høyere spredning enn hver prøvetype. Dette kan skyldes at hver type prøvestykke synes å danne sitt eget nivå for spesifikk elektrisk motstand, og måten spesifikk elektrisk motstand beregnes på (Likning 3) synes dermed å kunne ha begrensninger ved at den «overestimerer» effekten av økende tykkelse på prøvestykker. Strømløkkasje langs prøvestykkenes overflate kan tenkes å være en innvirkende faktor. De små sylindrene ( $d \approx 70$  mm) har i gjennomsnitt 22 % høyere beregnet spesifikk elektrisk motstand enn fra terning (100 mm). Sylindrene i normal størrelse ( $d=200$  mm) har i gjennomsnitt 11% lavere beregnet spesifikk elektrisk motstand enn terning.

Tabell 21 Spesifikk elektrisk motstand målt etter 6 år. Alle verdier i [ $\Omega m$ ]

	ANL	ANL-19FA	ANL-33FA	SR	SR-19FA	SR-33FA	STD/SR-19FA
1 terning	386	970	1462	183	695	1278	790
Snitt, 200 mm sylindrer	-	856	1304	174	615	1122	672
Std.av	-	73	-	7	15	38	6
COV	-	8,6 %	-	4,0 %	2,4 %	3,4 %	1,0 %
Snitt, små sylindrer	515	1079	1506	275	865	1540	895
Std.av	24	51	94	15	42	32	72
COV	4,7 %	4,7 %	6,3 %	5,5 %	4,8 %	2,1 %	8,1 %
Snitt, alle prøver	489	1005	1471	239	781	1403	826
Std.av	61	106	108	52	122	197	116
COV	12,6 %	10,5 %	7,3 %	22,0 %	15,6 %	14,1 %	14,0 %

Tabell 22 Økning i spesifikk elektrisk motstand fra 2 år til 6 år. Alle verdier i [ $\Omega\text{m}$ ]

	ANL	ANL-19FA*	ANL-33FA	SR	SR-19FA	SR-33FA	SR-STD-19FA
2 år, terninger	314	649	953	174	516	863	594
6 år, 1 terning	386	970	1462	183	695	1278	790
Økning fra 2 til 6 år	72	321	509	9	179	415	196
Økning [%] fra 2 til 6 år	23 %	49 %	53 %	5 %	35 %	48 %	33 %



Figur 52 Spesifikk elektrisk motstand etter 6 år for de ulike prøvestykkene, samt totalt gjennomsnitt.

#### 5.6.4 Kapillær sugeshastighet og porøsitet

Kapillær sugeshastighet og porøsitet ble bestemt etter 6 år kun på de tre betongene med ANL-sement, dvs. ANL, ANL-19FA og AN-33FA. Fire 20 mm tykke skiver ble sagt fra en 200 mm sylindrer, eller fra to små sylindrer, for hver av de tre betongene. Prosedyren starter med at alt porevann i skivene fjernes ved at de tørkes ved 105 °C. Deretter neddykkes prøvene i et 1-2 mm vannspeil og vannopptaket registreres så over tid. Prosedyren er beskrevet i detalj i Håndbok 014 (14.637). Fra forsøket beregnes kapillaritetstallet ( $k$ ) og motstandstallet ( $m$ ), i tillegg til porøsitet.  $k$  og  $m$  er gitt ved:

**Likning 6** 
$$k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}}$$

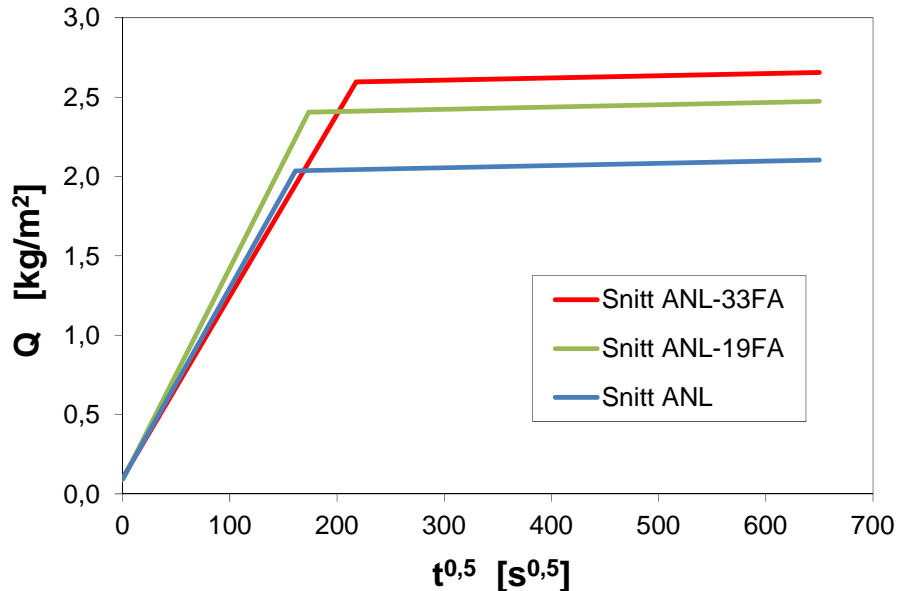
**Likning 7** 
$$m = \frac{t_{kap}}{h^2}$$

hvor  $Q_{kap}$  er mengden oppsugd vann på det tidspunktet ( $t_{kap}$ ) vannet når toppen av prøvestykket (dvs. der sugkurven flater ut).  $h$  er tykkelsen på prøveskiven (her 20 mm)

Ettersom skivetykkelsen er lik i alle tilfeller her, samt at betongene har samme pastavolum, vil både  $k$  og  $m$  være et uttrykk på finheten av kapillærporesystemet.  $K$  uttrykker hastigheten på vannoppsuget (helningen på sugkurven), og  $m$  er et uttrykk for hvor lang tid det tar for vannet å bli sugd opp gjennom hele prøvestykket.

Resultatene fra de fire parallelle skivene for hver betong viser relativt liten spredning; for sugporøsitet er variasjonskoeffisienten (COV) på 2-4 %, for makroporøsitet 6-11 %, for  $k$  2-4 %, og for  $m$  3-6 %. I det videre diskuteres bare gjennomsnittresultater, se Figur 53 og Tabell 23. Vi ser at sugporøsiteten er noe

stigende med FA-dosering (fra 10,4 % til 13,7 %). Makroporøsiteten skal i stor grad gjenspeile betongenes luftinnhold (kun naturlig luft) og resultatene er ikke veldig langt unna det som ble målt som luftinnhold i fersk betong (kap. 5.1). Resultatene for  $k$  varierer lite blant de tre betongene, noe som etter sigende kan forventes ettersom masseforholdet er det samme (0,40 beregnet med  $k_{fa}=1,0$ ) og  $k$  skal i stor grad være styrt av masseforholdet. Resultatene for  $m$  viser derimot økende verdi med FA-dosering, dvs. prøvene med FA påvirker ikke sugeshastigheten ( $k$ ), men bruker lengre tid for å suge opp vann i hele prøvens tykkelse (høyere  $t_{kap}$ ). Dette indikerer da at kapillærporesystemet i de tre betongene har omtrent samme finhet ( $k$  varierer lite), men økende FA-dosering leder til noe økende kapillærporevolum; målt som økt  $m$  (og økt sugporøsitet).

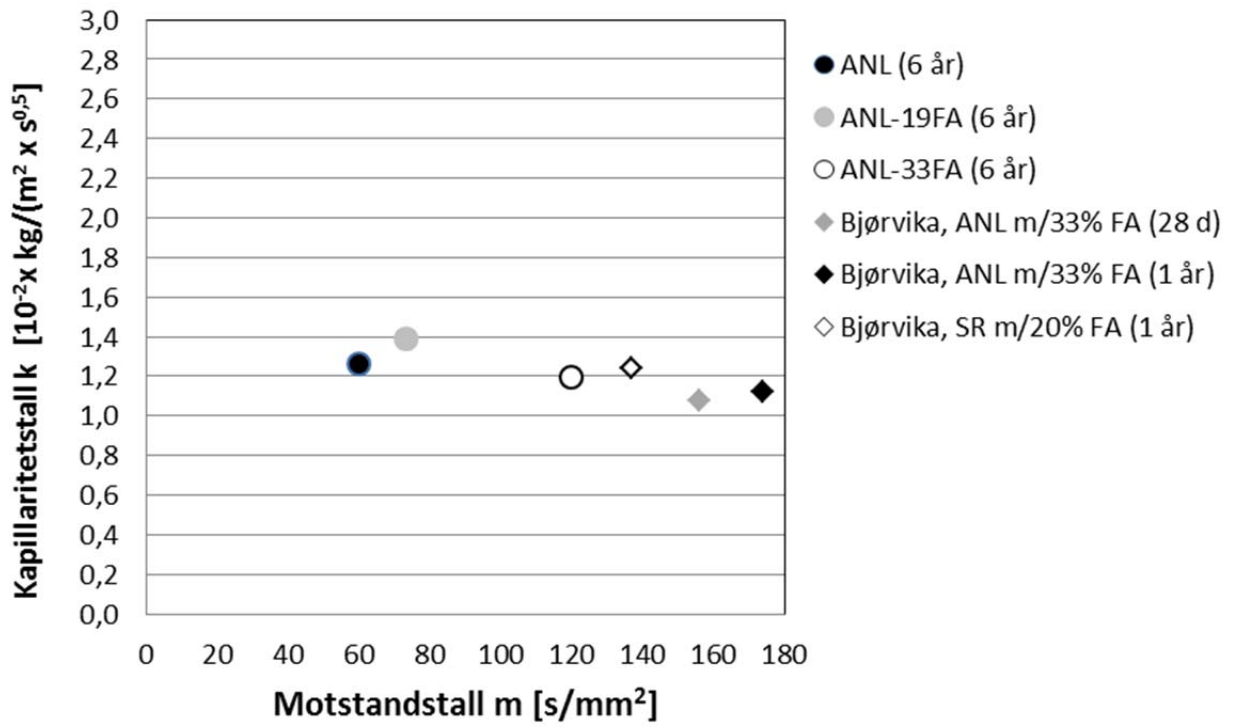


Figur 53 Gjennomsnittresultater kapillær sugeshastighet og porøsitet (6 års betongalder)

Tabell 23 Gjennomsnittresultater kapillær sugeshastighet og porøsitet (6 års betongalder)

	ANL	ANL-19FA	ANL-33FA
Densitet vannmettet - $\rho_{SSD}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2478	2441	2417
Sugporøsitet	0,104	0,125	0,137
Makroporøsitet	0,014	0,016	0,017
Motstandstall $m$ [s/mm <sup>2</sup> ]	60,2	73,1	120,0
Kapillaritetstall $k$ [kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> ] $\times 10^{-2}$	1,262	1,387	1,192

I Figur 54 nedenfor er  $k$  og  $m$ -resultatene plottet mot hverandre sammen med tre resultater fra Bjørvikaprojektet [3] ved 28 døgns og 1 års betongalder. Bjørvikabetongene (fullskala betonger med ca. 10% høyere pastavolum) hadde også masseforhold på ca. 0,40 (også beregnet med  $k_{fa}=1,0$ ). Det kan anmerkes at for alle betongene er FA tilsatt ved blanding unntatt for «Bjørvika, ANL m/33% FA» hvor FA var sammalt med sementen. Vi ser at Bjørvikaresultatene viser høyere  $m$ -verdier, men  $k$  varierer lite og er på samme nivå som i herværende undersøkelse.



Figur 54 Kapillaritetstall mot motstandstall. Figuren viser også data fra Bjørvikaprojektet [3]

## 6 Hydratasjonsprodukter, aktivitet B

### 6.1 Innledning

Undersøkelser av sementpastaprøver ble gjort ved SINTEF, som også produserte selve prøvene (Avrop 2-A og 2-B). De undersøkte bindemiddelprøvene (pastaprøvene) har samme sammensetning som de syv betongenes bindemidler i «aktivitet A». Pastaprøvene ble ved blanding laget uten bruk av tilsetningsstoff. Selve prøvningsrapportene er gitt i APPENDIX 7 og APPENDIX 8, og resultatene er også rapportert i en konferanseartikkel - gitt i APPENDIX 9. En oppsummering av de viktigste resultatene er gitt her.

Undersøkelsene omfattet:

- Termogravimetrisk analyse (prøvnings tidspunkt: 0, 1, 3, 7, 28, 90 døgn, og 1 år og 2 år).
- Sveipeelektronmikroskopi (SEM-analyse) i BSE-modus, og EDS-verifikasjon, på planslipte prøver (prøvnings tidspunkt: 28 døgn, 1 år og 2 år).

I termogravimetrisk analyse varmes prøvene gradvis opp til 1000 °C (10 °C/min) og vektendring registreres kontinuerlig. Vektendring over gitte temperaturintervall knyttes til dekomponering og mengder av gitte hydratasjonsprodukter. Sammenheng mellom temperaturintervall og hydratasjonsprodukter er som følger:

0 – 105 °C: Tap av fritt/fordampbart vann i poresystemet.

105 – 440 °C: Dekomponering av hydratasjonsfaser som C-S-H, AFm (monosulfat, monokarbonat) og AFt (ettringitt).

440 – 550 °C: Dekomponering av CH. Det rapporteres at 1% vekttap tilsvarer 4,1% CH.

Kjemisk bundet vann bestemmes fra vekttapet 105 – 550 °C.

700 – 900 °C: Dekomponering av karbonater fra kalksteinsmel og eventuelle karbonatiserte hydrater under prøvehåndteringen. Både C-S-H, CH og aluminatfaser kan karbonatisere.

I SEM-analyse får man svært forstørrede bilder (BSE, tilbakespredte elektroner) av partikler og hydrater i ulike gråtoner som reflekterer fasenes tetthet og atomnummer. Ved tvil verifiseres en fases hovedbestanddel (EDS, energidispersive spektra).

Mengden silikastøv i pastaene (og betongene i andre kapitler) er 5,0 % av mengden klinker + FA. Mengden silikastøv i forhold til selve klinkermengden blir dermed moderat økende med FA-dosering (ettersom klinkermengden avtar); silikamengden er 5,0 % av klinkermengden for pastaen uten FA, ca. 6% for pastaen med 19% FA og ca. 7% for pastaen med 33% FA. CH-mengde gitt som «% av mengde klinker + silikastøv» ville vært en naturlig referanse hvis forholdet silikastøv/klinker var konstant for alle blandingene. Man kunne da antatt at det hurtigreagerende silikastøvet konsumerte samme mengde CH uavhengig av mengden langsomtreagerende FA. All reduksjon i CH i FA-blandingene sammenliknet med blandingen uten FA kunne da tilskrives pozzolan aktivitet fra FA. Silikastøv/klinker-forholdet varierer som nevnt bare moderat slik at CH-mengde (her uttrykt som vekttap) plottet i % av klinker+silikatøv likevel vil gi en relativt direkte indikasjon på pozzolan aktivitet. Resultatene er i tillegg diskutert på basis av vekttap i forhold til mengde klinker+silikastøv+flygeaske, noe som da direkte reflekterer totalinnholdet av hydratasjonsprodukter.

Merk at bindemidlet «**STD/SR+19%FA**», som kombinerer 20% STD- og 80% SR-klinker, er i noen av de følgende figurene (som er hentet fra prøvningsrapporten) angitt feil som «STD/ANL+19%FA». Kombinasjon 20% STD og 80 % SR gir samme alkalimengde som ANL.

SEM-analysene av pastaprøvene viste at deler av silikastøvet var dårlig dispergert til tross for at det ble brukt en mikser med høy skjærhastighet (Braun, MR5550CA). Det ble imidlertid ikke brukt plastiserende tilsetningsstoff i pastaene. De mulige effektene av dette både for silikastøvet og FA sin pozzolanreaksjon er diskutert i prøvningsrapporten som følger:

*«Silikastøv vil i pozzolanreaksjonen bruke alkalier og dermed synke alkaliinnholdet i porevannet. Når silika ikke er tilstrekkelig dispergert vil denne prosessen skje mer langsomt. Når silikastøvet har reagert*

fullstendig vil det frigjøre alkaliene igjen. Alkaliene fungerer som en katalysator for pozzolanreaksjonen til silikastøvet. Alkali-innholdet spiller også en viktig rolle i pozzolanreaksjonen til FA. FA reagerer raskere med høyere alkaliinnhold (i.e. pH) i porevannet. Silikastøvet er mye mer reaktivt enn FA, selv når det er dårlig dispergert og fins som klumper. Silikastøvet påvirker hastigheten til pozzolanreaksjonen til FA, ved først å senke alkaliinnholdet i porevannet, men på lang sikt (1 og 2 år) blir effekten utjevnet siden reagert silika vil avgi alkaliene til porevannet igjen. Det er ikke sikkert om det udispergerte silikastøvet har påvirket reaktiviteten av FA, ettersom man kan forvente at pH vil bli senket like mye (eller lite) av dispergert som udispergert silikastøv. Om det hadde vært en forskjell pga udispergert silikastøv ville den nok gått i favør av høyere pH og dermed mer reagert FA.»

## 6.2 Resultater

### 6.2.1 Pozzolan aktivitet/mengde kalsiumhydroksid (CH)

*Før diskusjonen av oppnådde resultater for CH-mengder leses må det anmerkes at det knyttes en viss usikkerhet til dem. Dette på grunn av at det ikke er kjent i hvor stor grad prøvene karbonatiserte før målingene tok til. Karbonatisering representerer en feilkilde, se anmerkning (\*) til slutt i dette avsnittet. Diskusjonen nedenfor ble gjort før denne usikkerheten ble aktualisert/kjent, og må derfor leses med dette for øyet og med dette forbeholdet.*

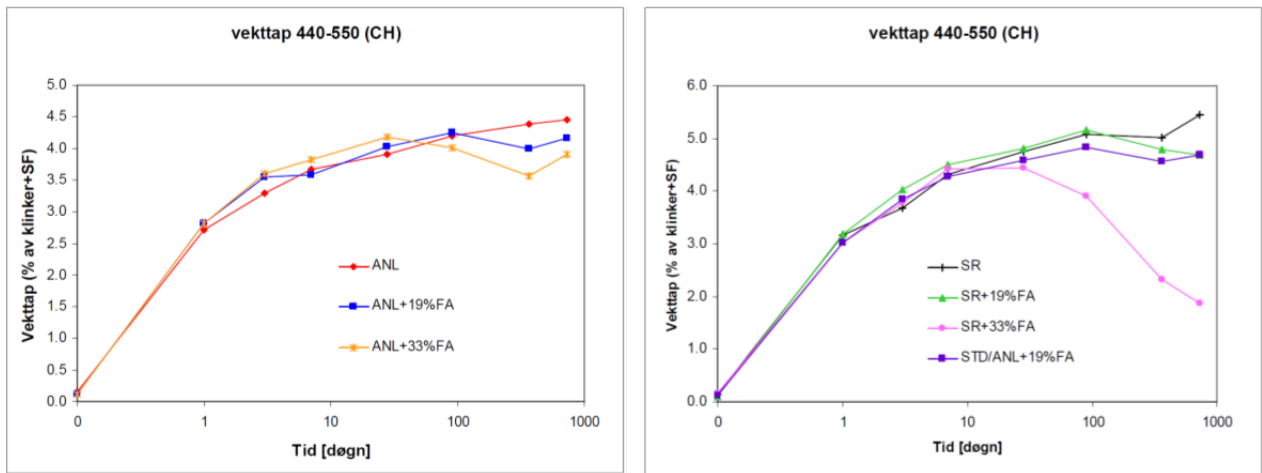
For pastaene i ANL-serien viser resultatene at mengden CH (som % av klinker+silika) kun er marginalt påvirket av FA-dosering fram til ca. 90 døgn (Figur 55 og Tabell 24). Fra 90 døgn til 2 år er det imidlertid en moderat reduksjon av CH-mengden i FA-betongene sammenliknet med ANL. For ANL-19FA og ANL-33FA-blandingene er CH-mengden etter 2 år henholdsvis 7 % og 13 % lavere enn for ren ANL. Knekkene i kurvene for FA-blandingene ved 1 år er i prøvningsrapporten forsøkt forklart med en mulig dannelse av kalsium hemi-karboaluminathydrat, som forbruker CH, og som igjen frigjøres når denne fasen omdannes til mono-karboaluminathydrat ved videre reaksjon med kalsiumkarbonat.

Også for SR-serien (Figur 55 og Tabell 24) er effekten av FA marginal for alle blandingene de første ukene. For SR-19%FA er effekten marginal også over noe lenger tid (mellom 90 døgn og 1 år). Etter 2 år er CH-mengden for SR-19%FA (og STD/SR-19% FA) 14% lavere enn for ren SR. SR-33%FA-blanding skiller seg ut med en markant reduksjon i CH-mengden fra ca. 28 døgn, og etter 2 år er CH-mengden 1/3 av mengden i SR. I Figur 56 er ANL- og SR-serien vist i samme type plot i samme figur. Etter 2 år har SR 22 % høyere CH-mengde enn ANL. SR-19%FA (samt STD/SR-19%FA) ligger 12% høyere enn ANL-19%FA. SR-33%FA, med sitt spesielle forløp, har derimot halvert CH-mengde i forhold til ANL-33%FA etter 2 år.

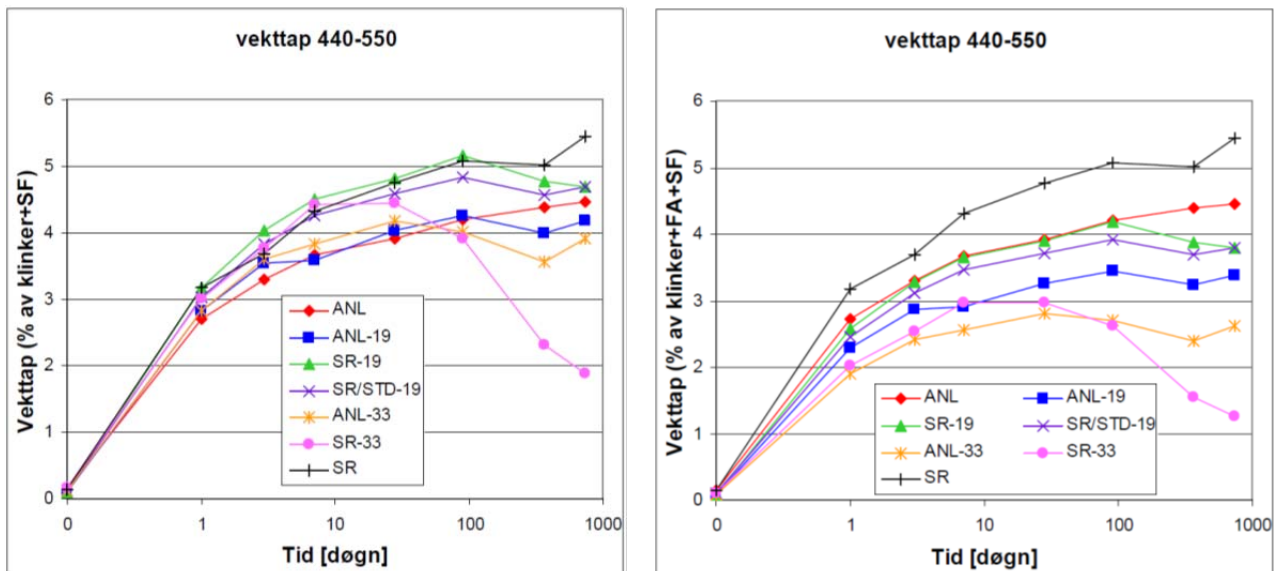
Hvis vi betrakter mengden CH relatert til hele bindemidlet, dvs. til summen av klinker+silikastøv+flygeaske, får vi naturlig nok noe større reduksjoner prosentvis enn de tallene som ble diskutert ovenfor ettersom økt FA «tynner ut» sementen og dermed reduserer mengden produsert CH, se Figur 57.

En reduksjon i CH-mengde ved FA-dosering kan tilskrives pozzolan aktivitet hos FA. Grovt sett viser resultatene dermed at det er lite pozzolan aktivitet å spore i perioden opp til 90 døgn (noe som også spesifikk elektrisk motstand målingene indikerer, se Figur 32). I tiden etter 90 døgn er det imidlertid observerbar pozzolan aktivitet. Aktiviteten er moderat i ANL-serien og mer markant i SR-serien, spesielt for SR-33%FA. Som nevnt, se anmerkning (\*) nedenfor angående forbehold mht resultatene for CH-mengder i dette avsnittet.

Det konkluderes ellers i prøvningsrapporten at samtlige blandinger har tilstrekkelig CH-mengde til å opprettholde høy nok pH til å passivere stålarming, men at «reserven» er markant redusert etter 2 år for blanding SR-33FA. Det antas at denne konklusjonen baseres på at så lenge det er CH igjen er det også nok OH<sup>-</sup> ioner i porevannet til å holde pH tilstrekkelig høy til å holde armeringen passivert.



Figur 55 CH-mengde relatert til vekttap i % av klinker+silikastøv(SF) mellom 440 °C og 550 °C i ANL-serien (venstre) og SR-serien (høyre). Vekttapet er proporsjonalt med mengden kalsiumhydroksid CH. Merk at riktig benevnelse på blandingen med kvadratisk markør i høyre figur skal være «STD/SR+19%FA». Se ellers anmerkning (\*) nedenfor angående forbehold mht resultatene i figurene.



Figur 56 CH-mengde relatert til vekttap i % av klinker+silikastøv(SF) mellom 440 °C og 550 °C for både ANL- og SR-serien. Se anmerkning (\*).

Figur 57 CH-mengderelatert til vekttap i % av klinker+silikastøv(SF)+ flygeaske(FA) mellom 440 °C og 550 °C for både ANL- og SR-serien. Se (\*).

Tabell 24 CH-mengde fra vekttapet mellom 440 °C og 550 °C (av klinker+SF) relativt til hhv. ANL og SR. Se ellers anmerkning (\*) angående forbehold mht resultatene i tabellen.

	1 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn	90 døgn	1 år	2 år
<b>ANL</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>
ANL-19%FA	104 %	108 %	98 %	103 %	101 %	91 %	93 %
ANL-33%FA	104 %	109 %	104 %	107 %	96 %	81 %	87 %
<b>SR</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>
SR-19%FA	100 %	110 %	104 %	101 %	102 %	95 %	86 %
SR-33%FA	95 %	102 %	103 %	93 %	77 %	46 %	34 %
STD/SR-19% FA	95 %	103 %	100 %	97 %	94 %	92 %	86 %

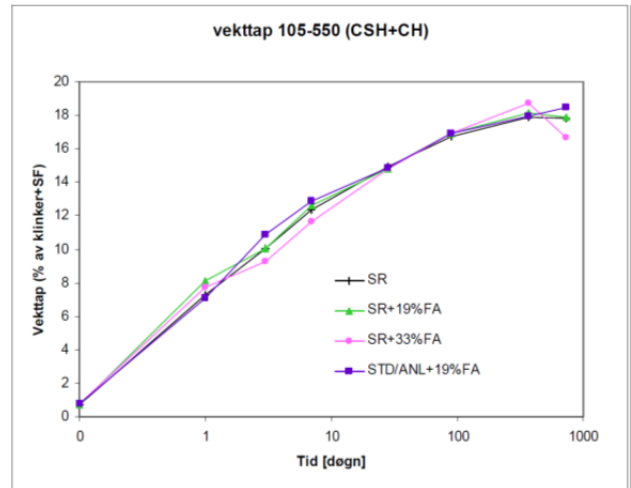
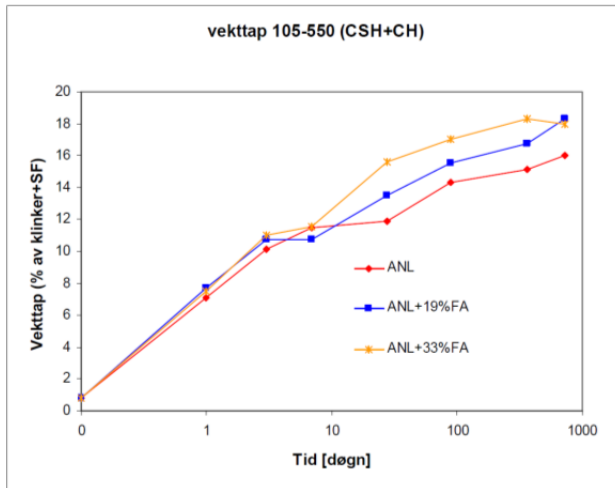
(\*) Anmerkning: På det tidspunktet forsøkene ble gjort (2007-2009) innebar prosedyren for prøvepreparering at de nedknuste pastaprøvene i en periode ble eksponert for luft før innsetting i termogravimetri-instrumentet, og det skjer dermed en viss karbonatisering av prøvene i denne perioden. Det har vært diskutert i hvor stor grad karbonatiseringen har virket inn på de presenterte CH-mengdene, og i hvor stor grad en korreksjon for dette ville ha påvirket resultatet (dvs. hvor mye økt CH-mengde i forhold det som er angitt i presentasjonene ovenfor). Karbonatisering måles som vekttapet i temperaturområdet 550-810 °C, og kan i prinsipp korrigeres for i presentasjonen av CH-mengde. Både CH og kalsium-silikat-hydrat (CSH) i prøvene kan imidlertid karbonatisere og det er usikkert hvor mye som skal tilskrives kun karbonatiseringen av CH. Eventuelt å tilskrive alt vekttap 550-810 °C karbonatisering av CH i en slik korreksjon vil overestimere CH-mengden. I presentasjonene ovenfor er det ikke korrigert for karbonatisering, og dette representerer da en underestimert av CH i prøvene. Sannheten ligger da sannsynligvis et sted i mellom. Det er nå gjort regneøvelser med å anta at all karbonatisering av prøvene er knyttet til CH basert på DTA-resultatene gitt i APPENDIX 7. I forhold til de CH-mengder som er angitt ovenfor kan en slik (overdrevet) korreksjon gi fra 30 % til 190 % høyere verdier for en og samme pasta (varierende korreksjon for ulike aldre). I senere tid er det imidlertid gjort en egen studie ved SINTEF på effekten av prøveprepareringsmetode; disse indikerer en 20 % korreksjon for karbonatisering. Det er derfor grunn til å tro at nivået for korreksjonen ligger nærmere sistnevnte verdi enn førstnevnte interval. Og, det kan derfor også være grunn til å tro at en korrekt utført korreksjon ikke i vesentlig grad ville endret inntrykket av de innbyrdes forskjellene mellom bindemidlene som er vist i presentasjonene ovenfor. Det er likevel ikke til å komme i fra at det hersker usikkerhet rundt resultatene som her er presentert for CH-mengder over tid. Merk at samme usikkerhet gjelder også da for resultatene for CH-mengder som ble publisert i en artikkel i 2011 (dvs. artikkelen gitt i APPENDIX 9). Det kan anmerkes til slutt at prøveprepareringsmetoden ved SINTEF nå er endret slik at den for framtiden skal sikre at karbonatisering av prøvene ikke finner sted.

### 6.2.2 Kjemisk bundet vann

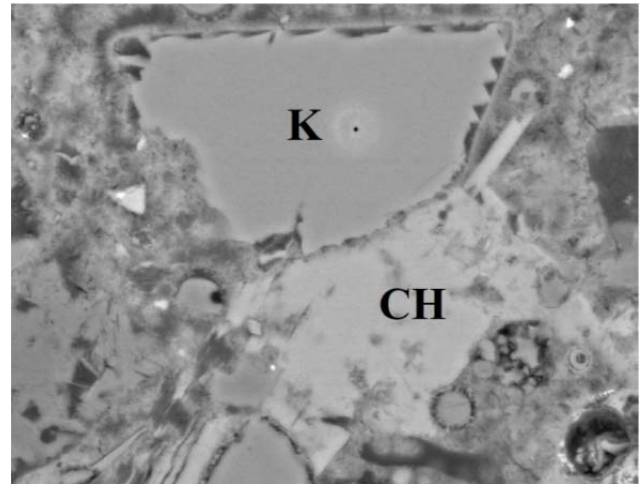
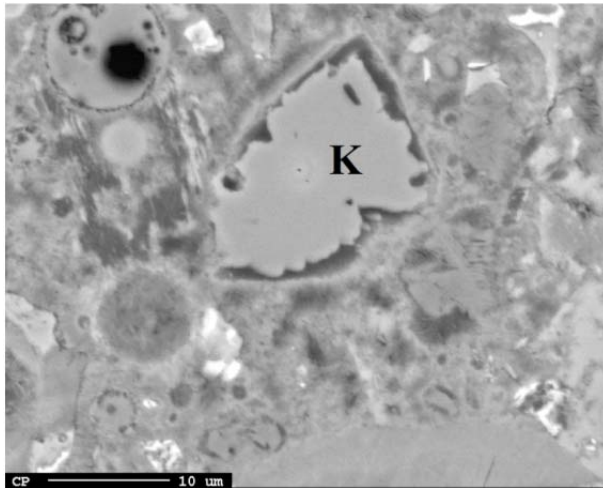
For pastaene i ANL-serien viser resultatene økende mengde kjemisk bundet vann i tiden etter 7 døgn med økende FA-innhold (Figur 58), mens kjemisk bundet vann i SR-serien synes upåvirket av FA-dosering. For SR-serien betyr dette at hydrasjonsproduktene fra FA sin pozzolanreaksjon ikke binder vann utover det som allerede er bundet i CH; dette underbygges spesielt med tanke på den markante konsumeringen av CH for SR-33FA diskutert i forrige avsnitt. Økt mengde kjemisk bundet vann med FA i ANL-serien forklares i prøvningsrapporten med at ANL er tilsatt kalksteinsfiller noe som leder til synergireaksjoner som gir mer stabil ettringitt (høy vannbinding) og kalsiumkarboaluminathydrater på bekostning av monosulfat (lavere vannbinding). Bevis på reagerte kalksteinspartikler (CaCO<sub>3</sub>) etter 2 års herding fra SEM-analyse er vist i Figur 59.

Hvis vi betrakter kjemisk bundet vann relatert til hele bindemidlet, dvs. til summen av sement+silikastøv+flygeaske, får vi at mengden kjemisk bundet vann generelt er noe lavere med FA-dosering, se Figur 60; dette gjelder også for ANL-serien. SR-serien ligger generelt noe høyere enn ANL-serien i kjemisk bundet vann etter lang tid, altså synes SR noe mer reaktiv enn ANL (SR er mer finmalt enn ANL). Forskjellen i kjemisk bundet vann mellom de to klinkerne avtar med FA-dosering (begrunnet med økt vannbinding i ANL pga. FA-kalk-synergien, som diskutert ovenfor).

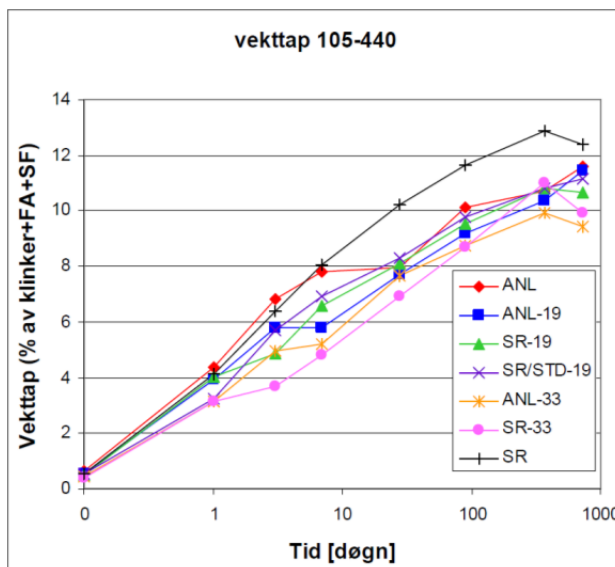




Figur 58 Kjemisk bundet vann relatert til vekttap i % av klinker+silikastøv(SF) mellom 105 °C og 550 °C i ANL-serien (venstre) og SR-serien (høyre). Vekttapet reflekterer mengden kjemisk bundet vann, dvs. mengden dannede hydrater. Merk at riktig benevnelse på blandingen med kvadratisk markør i høyre figur skal være «STD/SR+19%FA».



Figur 59 2000x forstørrelse (BSE) av ANL+33%FA pastaprøve etter 2 år forseglet herding. Bildene viser delvis reagerte kalksteinspartikler (K).



Figur 60 Kjemisk bundet vann relatert til vekttap i % av klinker + silikastøv(SF) + flygeaske(FA) mellom 105 °C og 550 °C i ANL-serien (venstre) og SR-serien (høyre). Vekttapet reflekterer mengden kjemisk bundet vann, dvs. mengden dannede hydrater. Merk at riktig benevnelse på blandingen med x-markør skal være «STD/SR+19%FA».

### 6.2.3 Aluminatfasene

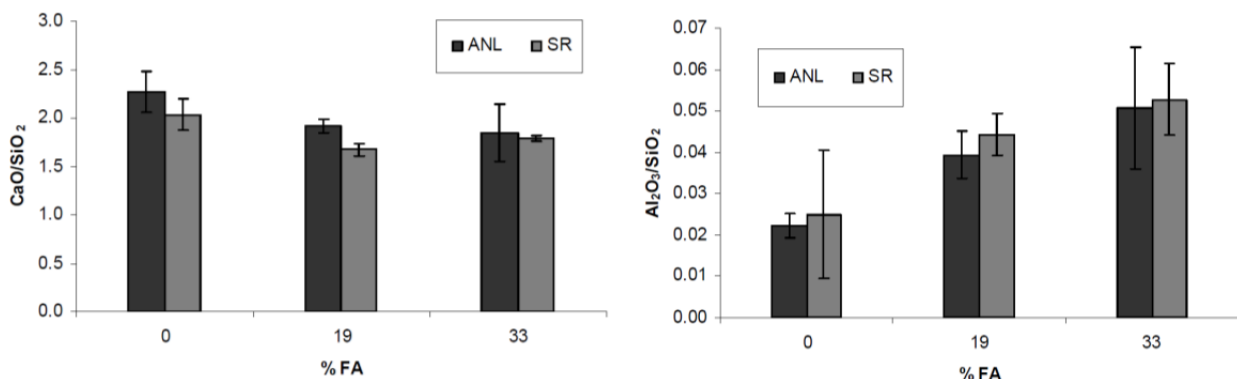
Det forklares i prøvningsrapporten at når sement erstattes med FA er det en trend at Ca/Si-forholdet i CSH-gelen avtar. Samme trend kan ses fra vår undersøkelse fra EDS-analyse etter 2 år, se Figur 61. Avtagende Ca/Si-forhold skjer samtidig med at det er en økning i Al/Si-forholdet i CSH-gelen med FA-dosering. CSH-gel fra FA sin pozzolanreaksjon har lavere Ca/Si-forhold enn fra C<sub>3</sub>S- og C<sub>2</sub>S-hydratasjon. Det er ingen vesentlige forskjeller i ANL- og SR-serien mellom Ca/Si- og Al/Si-forholdet for de ulike FA-nivåene, men Ca/Si-forholdet er i gjennomsnitt litt lavere og Al/Si-forholdet litt høyere for alle SR-blandingene.

Den markante reduksjonen i CH som tidligere er vist for blandingen SR+33%FA kan i følge prøvningsrapporten i prinsipp kunne forklares ved:

- omtrent samme mengde reagert FA som andre blandinger, men at CH likevel forbrukes ved dannelse av et høyere Ca/Si-forhold i CSH, men dette er funnet ikke å gjelde i hht. Figur 61, eller andre hydratasjonsprodukter, f.eks. mer CAH eller CASH
- mer reagert FA som forbruker CH i pozzolanreaksjonen

I prøvningsrapporten heller man derfor til at det er nederste punkt som er årsaken. Dette kan ikke skyldes høyere alkaliinnhold ettersom SR har litt lavere alkaliinnhold (0,47 %) i forhold til ANL (0,63 %) og kombinasjonssementen STD/SR (0,63 %). SR-klinkerens høye finhet (432 m<sup>2</sup>/kg) i forhold til ANL (388 m<sup>2</sup>/kg) kan være en forklaring på økt pozzolan aktivitet. Sementer med høy overflate kan reagere raskere med vann og felle ut mer CH relativt til mer grovkornete sementer. Flygeaske av klasse F hydratiserer først når porevannets pH er høy nok til å bryte ned glassfasen [4]. Hovedårsaken til lav tidlig styrkeutvikling av flygeaskebetong skyldes altså at pozzolanreaksjonen fordrer at en viss grad av sementen er hydratisert slik av CH felles ut og porevannets pH øker. Porevannets alkalitet avhenger av sementens kjemiske egenskaper og finhet. En hurtigherdende sement vil for eksempel medføre raskere økning av porevannets pH og dermed tidligere pozzolan aktivitet enn en tregere sement. Tilsvarende vil sementer med høyt alkalieinnhold (Na<sub>2</sub>O) gi porevann med høy pH i tidlig fase og dermed høyere FA-reaktivitet.

I tillegg gjelder generelt at økt mengde FA betyr mindre klinker/mindre alkalier, og reaktiviteten av FA kan således være avhengig av balansen mellom disse to effektene.



Figur 61 EDS-analyse etter 2 år: CaO/SiO<sub>2</sub>-forhold (venstre) og Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>-forhold (høyre)

Resultatene fra EDS-analysene på aluminatrike faser er gitt i Tabell 25. Forskjellene i faser i ANL- og SR-serien tilskrives at ANL, i motsetning til SR, inneholder kalksteinsmel (4,1%). Tilstedeværelse av kalksteinsmel (og dermed karbonater) gjør at de aluminatrike fasene i ANL binder mer vann enn i SR. Dette skjer ved at karbonatene bidrar til at mindre ettringitt (C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>H<sub>32</sub>) dekomponerer og går over til monosulfat (C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>H<sub>12</sub>). FA tilfører mer aluminater i systemet og effekten av kalksteinsmelet blir således forsterket. Det må da tilføyes at denne forklaringen (fra prøvningsrapporten) ikke umiddelbart synes logisk all den tid det ikke er påvist ettringitt i ANL-33%FA, se Tabell 25.

**Tabell 25 Oppsummering av EDS-analyser av aluminatrike faser**

Blanding <sup>*)</sup>	Aluminatrike faser
ANL	Hydrogarnet (C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> ) / monokarbonat (C <sub>4</sub> A $\underline{C}$ H <sub>11</sub> ) / ettringitt (C <sub>4</sub> A $\underline{S}$ <sub>3</sub> H <sub>32</sub> )
ANL+19% FA	Hydrogarnet / monokarbonat / ettringitt
ANL+33%FA	Hydrogarnet / monokarbonat / monosulfat (C <sub>4</sub> A $\underline{S}$ H <sub>12</sub> ).
SR	Strätlingitt (C <sub>2</sub> ASH <sub>8</sub> ) / monosulfat / ettringitt
SR+19%FA	Strätlingitt / monosulfat / ettringitt
SR+33%FA	Strätlingitt / monosulfat / ettringitt
STD/SR+19%FA	Monosulfat / ettringitt

<sup>\*)</sup> alle pastaene består i tillegg av 5 % silikastøv av mengden c+FA

#### 6.2.4 Bilder av pastaene etter 28 døgn, 1 år og 2 år (400x forstørrelse)

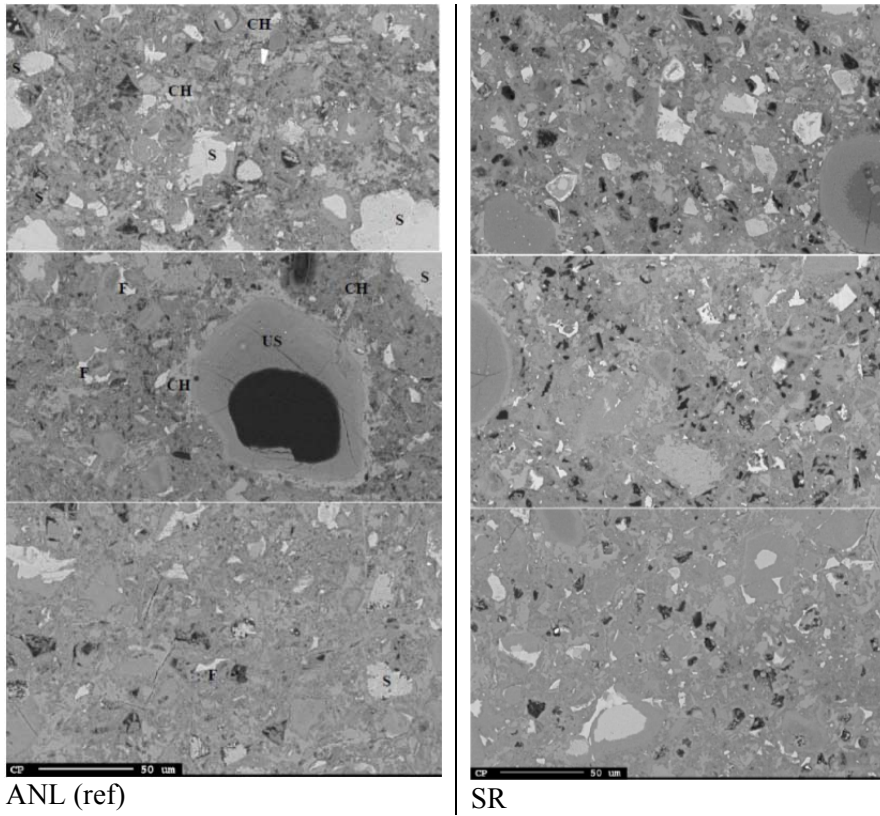
Prøvningsrapporten består av flere bilder med ulike forstørrelser. I figurene nedenfor (Figur 62 - Figur 64) er bilder for samme FA-dosering satt ved siden av hverandre. Prøvenes porøsitet vises som svarte områder på bildene (porøse områder reflekterer lite lys, tette områder reflekterer mye lys), og bildene synes således å vise direkte at FA-dosering gir høyere porøsitet etter 28 døgn.

I noen av figurene er bestanddeler anmerket med forkortelser; forklaringene er US= udispergert silikastøv, FA=flyveaske, CH=kalsiumhydroksid, S=ureagert sement og F=ureagert ferritt (C<sub>4</sub>AF). Bindemidlet CSH er jevnt grå, og sort er porer.

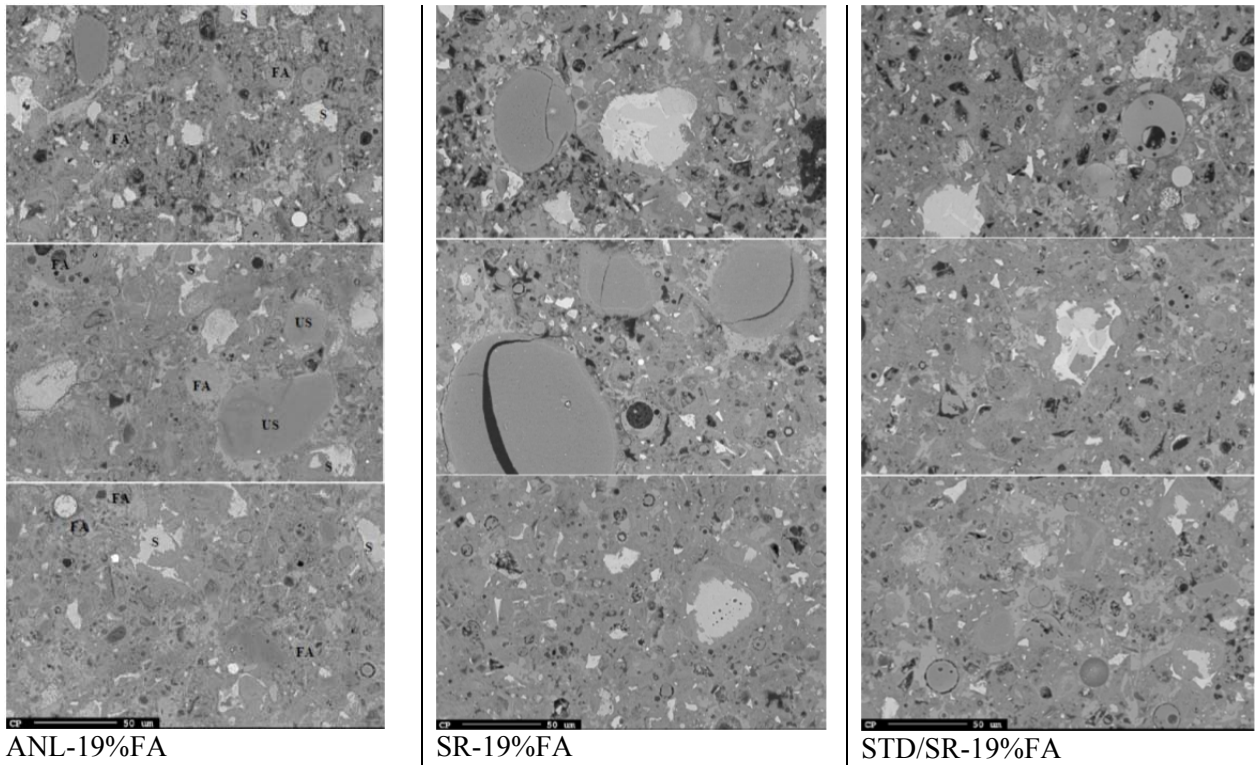
For alle pastaene kan ses en fortetning med økt herdetid, som forventet. Som tidligere nevnt består alle pastaene av udispergert silikastøv som kan ses som runde/ovale områder, gjerne oppsprukket, og noen av dem er delvis hule. Det udispergerte silikastøvet får etter hvert en krans av reagert silika. Det kan ikke utelukkes at alt silikastøvet (også kjernen) til slutt vil reagere med CH ved diffusjon ut i pastaen.

I pastaen SR-33%FA er det vanskelig å se CH i prøven, noe som stemmer med den markante CH-reduksjonen over tid som ble diskutert i forbindelse med termogravimetrianalysen (Figur 55).

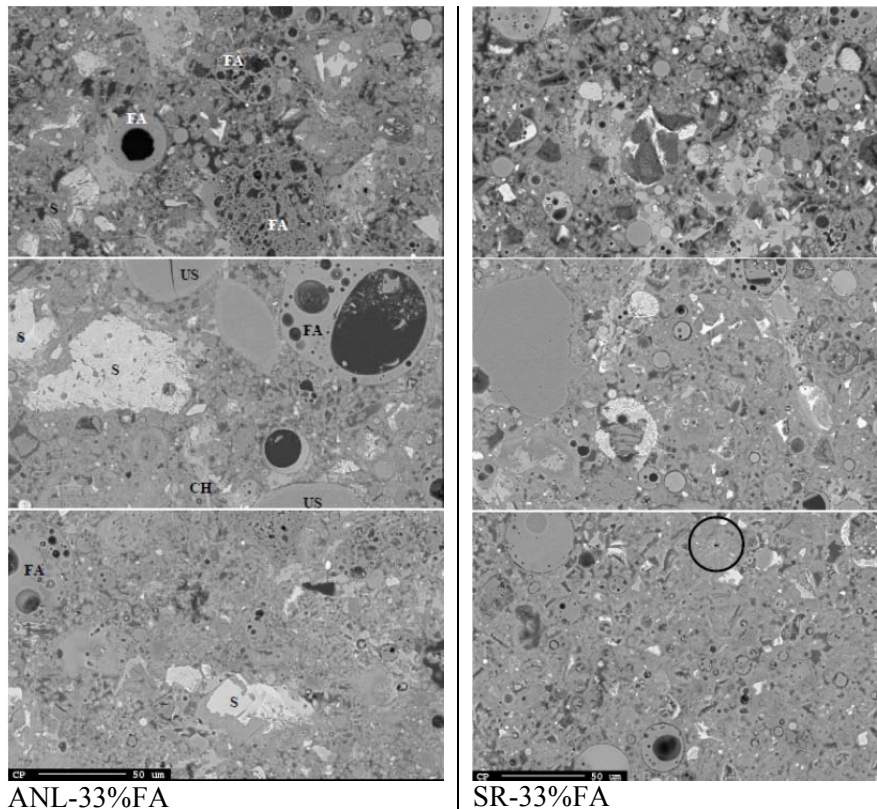
I SR-pastaen (uten FA) er det vesentlige flere Hadley-grains enn de andre pastaene, dette kan ses som irregulære sorte hull. Dette er porer fra små sementkorn som er oppløst ved diffusjon og reaksjon ut i den omkringliggende pastaen. Generelt synes det som alle pastaene som inneholder SR har noe større andel Hadley-grains, dette gjelder også pastaen STD/SR-19%FA. Hadley-grains antas ikke å ha noen negativ virkning på tetthet da dette er isolerte porer omkranset av tett CSH.



Figur 62 400x forstørrelse av pastaprøvene ANL og SR etter 28 døgn (øverst) og 1 år (midten) og 2 år forseglet herding



Figur 63 400x forstørrelse av de tre pastaprøvene med 19% FA etter 28 døgn (øverst) og 1 år (midten) og 2 år forseglet herding



**Figur 64** 400x forstørrelse av pastaprøvene med ANL-33%FA og SR-33%FA etter 28 døgn (øverst), 1 år (midten) og 2 år (nederst) forseglet herding

### 6.2.5 Oppsummering, hydrasjonsprodukter

I alle pastaprøvene var deler av silikastøvet dårlig dispergert på tross av blanding med høy skjærhastighet. Det hevdes at det er usikkert om dette har noen som helst effekt på reaktiviteten av FA, men hvis det er noen effekt vil det gå i retning av noe høyere pH og mer reagert FA.

FA-reaksjonen forbruker CH. For ANL-serien er det en viss reduksjon i CH-mengden i tiden etter ca. 90 døgn og etter 2 år har 19% og 33% FA-dosering et CH-innhold som er henholdsvis 7 % og 13 % lavere enn referansen uten FA. For SR-serien gir 19% FA en CH-reduksjonen på 14% reduksjon sammenliknet med sin referanse uten FA. For 33% FA er CH-reduksjonen målt til å være 66% etter 2 år. Pastaprøvene i SR-serien har generelt høyere CH-innhold enn ANL-serien for 0 % og 19% FA, men for SR-33% FA er det stor reduksjon i CH-innhold i tiden etter 28 døgn og etter 2 år er CH-mengden vesentlig lavere enn ANL-33% FA.

Etter 90 døgns alder (relevant periode for selvtetningsevne av riss/lekkasjer i tidlig alder) er altså CH-mengden ikke redusert av hhv. 19 % og 33 % FA i ANL-serien. Det samme gjelder også for 19 % FA i SR-serien, men for 33 % FA i SR-serien ses allerede en betydelig reduksjon i CH-mengden på dette tidspunktet.

*Det ble anmerket i diskusjonen her at det knyttes usikkerhet til resultatene for CH-mengder fordi prøvene til en viss grad karbonatiserte under prøveprepareringen; dette er en feilkilde og størrelsen på denne feilkilden er uavklart. Oppsummeringen ovenfor må derfor ses i lys av dette.*

Målingene av kjemisk bundet vann tyder på at SR er noe mer reaktiv enn ANL, antagelig på grunn av høyere finhet. Forskjellen i kjemisk bundet vann mellom SR og ANL avtar med FA-dosering. Dette er

forklart med at ANL består av en liten andel kalksteinsmel som, sammen med FA, bidrar til å opprettholde en høyere ettringitmengde (som har høy vannbinding) på bekostning av monosulfat.

FA sin pozzolanreaksjon fører til avtagende Ca/Si-forhold i CSH-gelen samtidig med Al/Si-forholdet øker. Det er ingen vesentlige forskjeller i så måte mellom ANL- og SR-serien etter 2 år.

I bildeanalysen ses at alle pastaprøvene med tiden blir tettere, og er øyensynlig uten mikrooppripping. Alle SR-pastaene har generelt flere «Hadley-grains» enn de med ANL. Dette knyttes til at SR har høyere finhet enn ANL. Hadley-grains er små tomme porer etter oppløste sementkorn. Disse porene antas ikke å påvirke bindemidlets tetthet da de er isolerte porer omkranset av tett CSH. Spesielt mye Hadley-grains ble observert i SR-blandingen uten FA.

## 7 Effekt av tidlig overflatebehandling, aktivitet D og E

### 7.1 Innledning

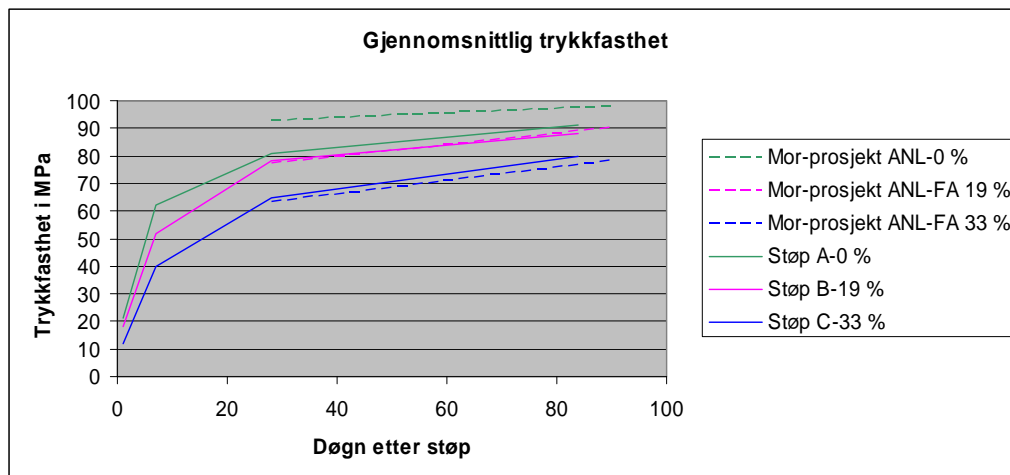
Hovedresultater fra studentoppgaven [2] er gjengitt her. Studentoppgaven sprang ut fra arbeidene i «aktivitet A» og ble samkjørt på den måten at de tre betongreseptene som ble benyttet (ANL, ANL-19FA og ANL-33FA) er de samme. Betongresepter og fersk betongmålinger fra studentoppgaven er gitt i APPENDIX 10. Hovedproblemstillingen i studentoppgaven var å se på den kloridbremsende effekten av tidlig påført overflatebehandling, ved klorideksponering i saltpåsprøytingskammeret. Det ble valgt å inkludere tre ulike hydrofoberende impregneringer, fra hhv Sika, Sto og Rescon Mapei, se avsnitt 3.5. I tillegg til produktenes kloridbremsende egenskaper ble også inntrengingsdybden av produktene undersøkt. Trykkfasthet og elektrisk motstand ble også dokumentert for de ulike betongene.

En av prøvene fra studentoppgaven ble i ettertid undersøkt ved SEM/tynnslipanalyse (Avrop 4) for å studere inntrengingsdybde ved mikroskopering og eventuelle effekter av den hydrofoberende impregneringen på hydrasjonsproduktene. Prøvningsrapporten fra undersøkelsen er gitt i APPENDIX 11.

Studentene har kalt betongene for henholdsvis «støp A-0 %», «støp B-19 %» og «støp C-33%». Disse er identiske med hhv ANL, ANL-19FA og ANL-33FA som det ellers refereres til i rapporten. Studentenes benevelser fremgår i de av de etterfølgende figurer som er hentet fra studentoppgaven. Ellers referer studentene til «mor-prosjektet» i figurer, og med det menes «aktivitet A».

### 7.2 Fasthetsutvikling

Trykkfasthetsresultater fra studentoppgaven er vist i Figur 65 sammen med resultatene fra aktivitet A («Mor-prosjekt»). Vi kan se at for 19 % og 33 % FA er resultatene svært lik, men for 0 % FA ligger resultatene fra aktivitet A 8-10 MPa (ca. 10%) høyere.



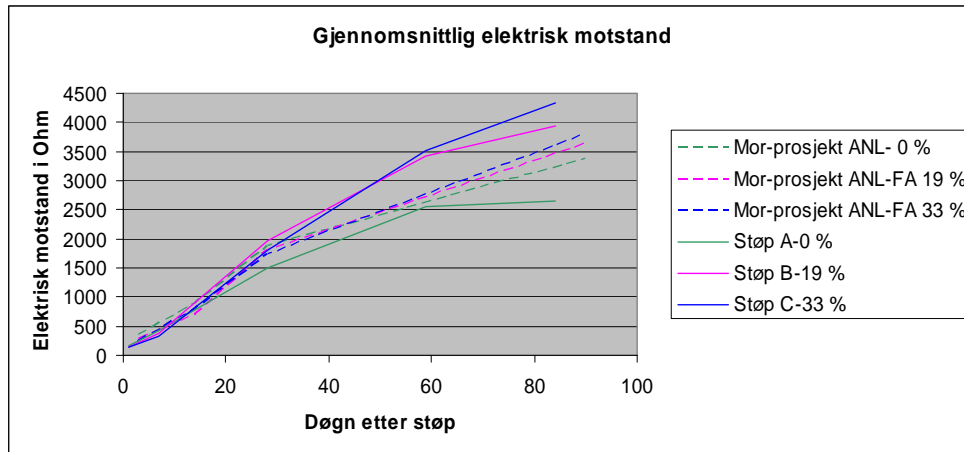
Figur 65: Trykkfasthet, resultater fra studentoppgave («støp») og fra Mor-prosjektet på de samme tre betongene.

### 7.3 Elektrisk motstand

Gjennomsnittlig elektrisk motstand fra studentoppgaven er vist i Figur 66 sammen med resultatene fra aktivitet A («Mor-prosjektet») for de samme betongene. Elektrisk motstand er i figuren angitt som målt motstand,  $R$  [Ohm], og ikke som spesifikk elektrisk motstand,  $\rho$  [Ohm x m], som brukt tidligere.

Omregning til  $\rho$  [Ohm x m] i Figur 66 fås ved å multiplisere R [Ohm] med 0,1 m iht ligning i avsnitt 3.2, dvs. Y-aksen går til 4500 Ohm som da tilsvarer 450 Ohm x m.

Siste prøvningstidspunkt for studentene var 84 døgn. Som tidligere diskutert for aktivitet A («mor-prosjektet») hadde disse tre betongene ganske lik utvikling i denne tidlige fasen, mens det fra studentoppgaven («støp») er en klarere tendens til økt elektrisk motstand med FA-innhold. Som for fasthet (diskutert ovenfor) viser også her betongen «Støp A-0%» noe avvikende oppførsel.



**Figur 66** Elektrisk motstand fra studentoppgaven («støp») og fra Mor-prosjektet («ANL») på de samme tre betongene. Merk: Målt elektrisk motstand gitt i [Ohm], multipliser med 0,1 m for omregning til spesifikk elektrisk motstand [Ohm x m].

#### 7.4 Impregnering ved ulike alder, inntrengingsdybde

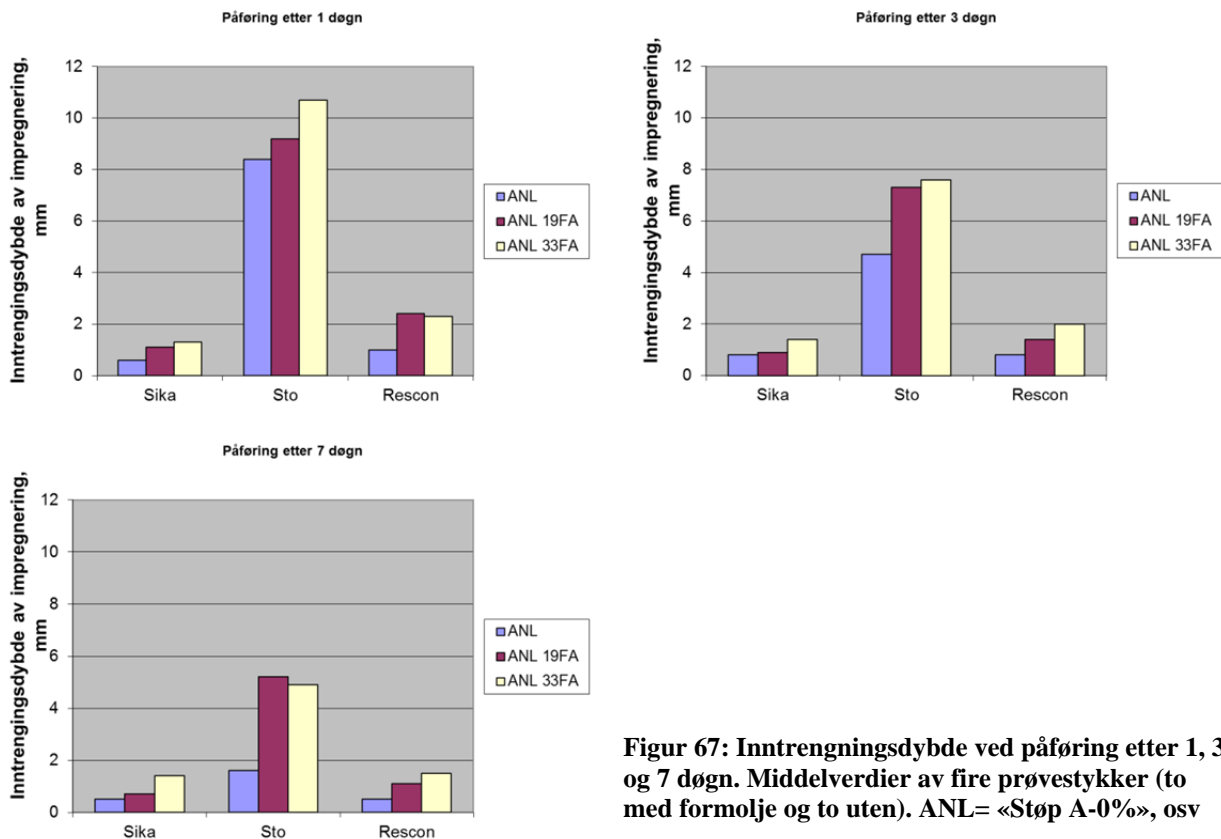
Påføring av hydrofobierende impregnering i tidlig alder kan være fordelaktig med tanke på å oppnå god inntrenging av impregneringen. Ved eventuell bruk av olje i forskalingen kan det imidlertid tenkes at det dannes en «oljefilm» på betongoverflata som reduserer muligheten for inntrenging. For å undersøke effekten av formolje på inntrengingsdybden av impregneringen, ble det støpt ut terninger i former både med og uten formolje. Alle tre impregneringene ble påført alle tre betongene i følgende varianter:

- 1 døgn etter støping, med og uten formolje
- 3 døgn etter støping, med og uten formolje
- 7 døgn etter støping, med og uten formolje

Type formolje benyttet var Sika Separol WB-130, en vannbasert biologisk nedbrytbar formolje. Det ble tildannet to parallelle prøvestykker pr variant. Inntrengingsdybden ble målt 2 døgn etter påføring ved splitting av prøvestykker i to halvdel, påføring av vann på bruddflata og måling av tykkelsen på impregnerert/ikke-sugende sone.

Studentene fant ingen systematiske forskjeller i inntrengingsdybde for prøvestykker med og uten formolje. I analysene er det derfor brukt gjennomsnittet for prøver både med og uten formolje (middel for totalt fire prøvestykker). Vi ser fra Figur 67 at trenden er redusert inntrengingsdybde med økende alder ved påføring, og «Sto» har vesentlig mer inntrengning enn de to andre. Trenden er noe økt inntrengingsdybde med økende FA-dosering.





Figur 67: Inntrengningsdybde ved påføring etter 1, 3 og 7 døgn. Middelerdier av fire prøvestykker (to med formolje og to uten). ANL= «Støp A-0%», osv

## 7.5 Impregnering etter 1 døgn, kloridinntrengning og filtreringseffekt

Prøvestykker som ble benyttet til kloridtesting ble påført hydrofoberende impregnering 1 døgn etter utstøping, deretter satt 2 døgn i klimaskap (20°C og 50 % RF), før eksponering i saltprøytungskammeret. Ubehandlede prøvestykker ble eksponert parallelt med de impregnerte prøvestykkene med start eksponering ved 3 døgns betongalder. Etter 6 ukers eksponering i kammeret ble det frest betongstøv for kloridanalyser i følgende sjikt:

- Impregnerte prøvestykker: 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 mm
- Ubehandlede referanser: 0-10, 10-15, 15-20, 20-25 mm

Alle sjiktene ble analysert med hensyn på kloridinnhold (i % av tørr betongvekt), ved potensiometrisk titrering, og total mengde inntrengte klorider (i g/m<sup>2</sup>) beregnet. Ved omregning er det antatt en tørrdensitet på 2200 kg/m<sup>3</sup> og en bakgrunnsverdi på 0,02 %.

Basert på inntrengt mengde klorider i hhv impregnerte og ubehandlede prøvestykker er det beregnet en filtreringseffekt som følger:

**Likning 8**

$$\text{Filtreringseffekt [\%]} = \left[ 1 - \frac{m_{Cl \text{ tot impregnert}}}{m_{Cl \text{ tot referanse}}} \right] \cdot 100\%$$

hvor:

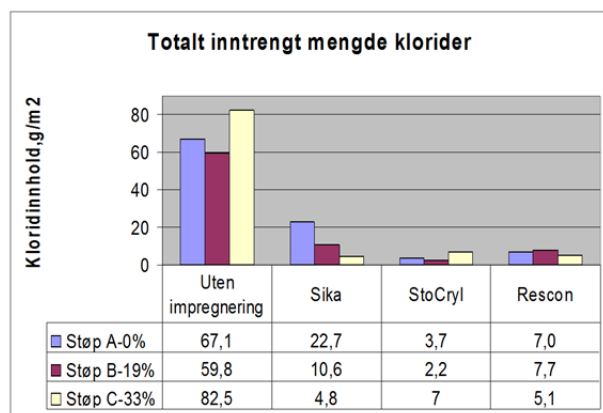
$m_{Cl \text{ tot impregnert}}$  = total inntrengt mengde klorider i impregnerte prøver (middel av tre prøvestykker)

$m_{Cl \text{ tot referanse}}$  = total inntrengt mengde klorider i ubehandlede referanser (middel av tre prøvestykker)

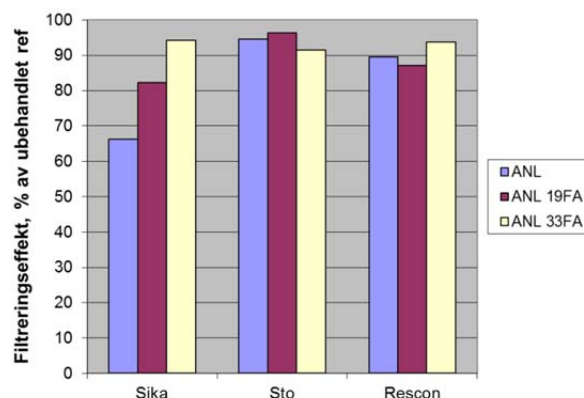
Total mengde inntrengte klorider er vist i Figur 68 og filtreringseffekten i Figur 69. For referansene «uten impregnering» i førstnevnte figur ser vi ingen systematisk effekt av FA-dosering. For NT Build 443-forsøkene (kloriddiffusjon), fra kapittel 5.5.2, var trenden systematisk økt inntrengning med FA-dosering ved eksponering etter 3 døgn. Med bakgrunn i resultatene for fasthet og elektrisk motstand kan det

imidlertid mistenkes at blandingen «Støp A-0%» av en eller annen grunn har fått avvikende sammensetning.

Alle impregneringsmidlene gir vesentlig redusert kloridinntrengning og høye filtreringseffekter, se Figur 69, med unntak av Sikas produkt påført ANL-betong hvor filtreringseffekten ligger under 70 %.



**Figur 68: Total mengde inntrengte klorider, etter 6 uker i saltpåsprøytingskammer, fra 3 døgns alder. Impregnering påført etter 1 døgn.**



**Figur 69: Filtreringseffekt, basert på Figur 68. ANL= «Støp A-0%», osv**

## 7.6 SEM og tynnslip av ANL 33% FA med Stocryl impregnering

Ett betongprøvestykke (halvterning) fra studentoppgaven med ANL og 33% FA påført StoCryl impregnering etter 1 døgn ble undersøkt ved SINTEF. Prøvningsrapporten er gitt i APPENDIX 11. Ved SINTEF-undersøkelsen var alderen på betongen ca. 3 år. Det ble gjennomført:

- måling av inntrengningsdybde
- mikroanalyse av tynnslip undersøkt i polarisasjonsmikroskop påmontert UV-filtre
- sveipeelektronmikroskopi (SEM-analyse) koplet med elementanalysator (BSE og EDS), på de samme tynnslipene

Gjennomsnittlig inntrengningsdybde ble målt til 10,5 mm på splittede flater påført vann. Dette er i overensstemmelse med studentenes egne målinger (10 mm). Karbonatiseringsdybden ble målt til 0 mm for den impregnerte flaten.

Det ble tildannet to stk tynnslip parallelt med (2 mm under) og to stk vinkelrett på hhv impregnert og ikke-impregnert (epoksybelagt) overflate.

Undersøkelser i polarisasjonsmikroskop viser at kapillærporositeten i impregnert sone er mindre enn i ikke-impregnert sone. SEM-analysene indikerer at sementkornene i impregnert sone har merkbart lavere hydratiseringsgrad enn sementkornene i ikke-impregnert sone. Dette kan skyldes at impregneringen hindrer vann i å migrere til sementkornene i impregnert sone. Forskjellen i hydratiseringsgrad skulle tyde på at porositeten i den impregnerte sonen er høyere enn i den ikke-impregnerte sonen, altså det motsatte av hva undersøkelsen i polarisasjonsmikroskopet indikerer. Det tilsynelatende misforholdet mellom resultatene antydes å kunne skyldes at Hadley grains i den velhydratiserte betongen kan gi et mer porøst inntrykk enn tilsvarende i den impregnerte betongen med færre Hadley grains. Det må bemerkes at denne forklaringen står noe i kontrast med forrige kapittel der det ble konstatert lite Hadley grains i ANL-betongene.

For CSH-gelen i impregnert og ikke-impregnert sone kan det ikke spores noen tydelig forskjell i kjemisk sammensetning. Analyse av kjemisk sammensetning synes derfor ikke å være en velegnet teknikk for å bestemme selve inntrengningsdybden.

## 8 Varmeutvikling

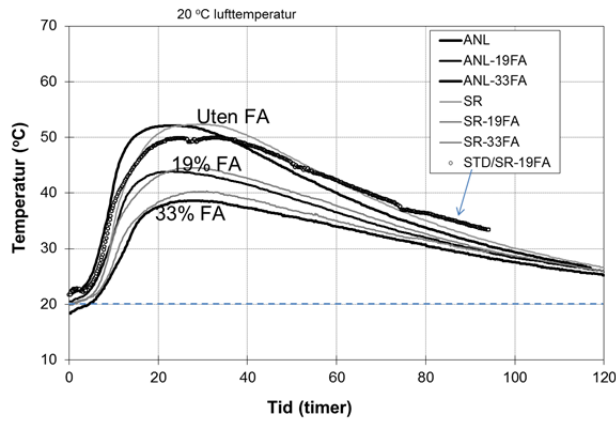
Det ble for hver betong gjort forsøk i to parallelle herdekasser; den ene herdekassa ble lagret ved 20 °C lufttemperatur og den andre ved 38 °C. Lagring ved forhøyet lufttemperatur er en måleteknisk fordel spesielt for betonger med langsom varmeutvikling; varmetapet til omgivelsen reduseres og mer av herdevarmen akkumuleres i herdekassa og dermed kan måles i form av temperaturøkning. Fersk betongtemperatur var for alle betongene ca. 20 °C. Det er benyttet standardverdier for A og B-konstantene ( $A=33500 \text{ J/mol}$  og  $B=1200 \text{ J/(mol} \times \text{K)}$ ) i hastighetsfunksjonen som brukes til å beregne modenhetsutviklingen. Modenhetsprinsippet er standard ved slike betraktninger og gås ikke gjennom her.

Målte temperaturer i herdekasseforsøkene er vist i Figur 70 (20 °C lagring) og Figur 71 (38 °C lagring). Beregnet adiabatisk temperaturutvikling for alle betongene er gitt i Figur 72, og isoterm varmeutvikling i Figur 73. Tabell 26 gir avleste verdier for den adiabatisk temperaturøkningen etter 48 timer og isoterm varmeutvikling etter 150 modenhetstimer. Forskjellen mellom betongene for disse verdiene gir direkte (uten videre beregninger) et ganske godt inntrykk av hvilke forskjeller man kan forvente når det gjelder maksimumstemperatur i en relativt massiv konstruksjon.

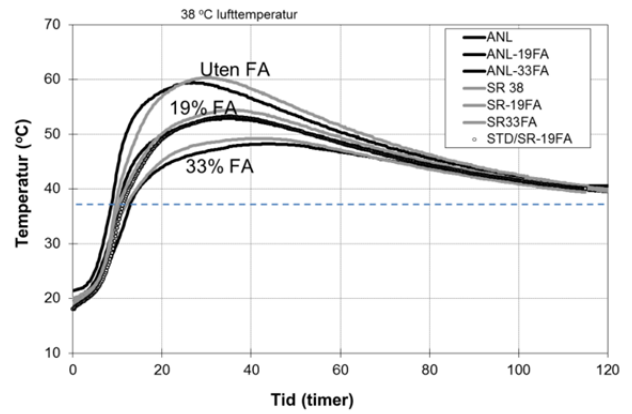
Fra resultatene ser vi at økende FA-dosering ikke overraskende gir mer langsom varmeutvikling og redusert sluttvarme. I gjennomsnitt (Tabell 26) viser resultatene at 19 % og 33 % FA, for både ANL og SR, reduserer adiabatisk temperaturøkning etter 48 timer med henholdsvis ca. 15 % og ca. 30 %, og isoterm varmeutvikling ved 150 modenhetstimer reduseres henholdsvis ca. 10 % og 20 %. SR-serien gir noe mer varmeutvikling (ca. 5%) enn ANL-serien, men forskjellen avtar med FA-dosering. STD/SR-19FA oppfører seg omtrent som SR-19FA.

**Tabell 26** Adiabatisk temperaturøkning etter 48 timer ( $\Delta T_{ad,48h}$ ) og isoterm varmeutvikling etter 150 modenhetstimer ( $Q_{iso,150Mh}$ )

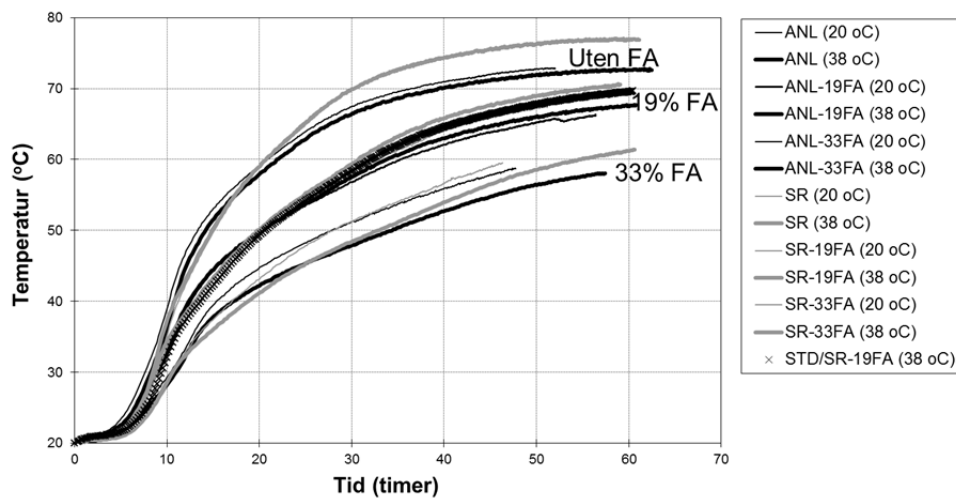
Blanding	Temperatur (°C)		Relativ til uten FA	Varme (kJ/kg)		Relativ til uten FA
	$\Delta T_{ad,48h}$	Snitt		$Q_{iso,150 Mh}$	Snitt	
<b>ANL (20 oC)</b>	52,4	52,0	100 %	323,7	322,2	100 %
<b>ANL (38 oC)</b>	51,6			320,6		
<b>ANL-19FA (20 oC)</b>	44,7	45,1	87 %	288,7	291,3	90 %
<b>ANL-19FA (38 oC)</b>	45,5			293,9		
<b>ANL-33FA (20 oC)</b>	38,8	37,3	72 %	266,2	259,2	80 %
<b>ANL-33FA (38 oC)</b>	35,8			252,2		
<b>SR (20 oC)</b>	56,1	56,1	100 %	342,9	342,0	100 %
<b>SR (38 oC)</b>	56,1			341,1		
<b>SR-19FA (20 oC)</b>	46,7	47,6	85 %	298,2	302,8	89 %
<b>SR-19FA (38 oC)</b>	48,5			307,4		
<b>SR-33FA (20 oC)</b>	40	38,9	69 %	274,9	269,1	79 %
<b>SR-33FA (38 oC)</b>	37,8			263,3		
<b>STD/SR-19FA (38)</b>	47,2	47,2	84 %	300,4	300,4	88 %



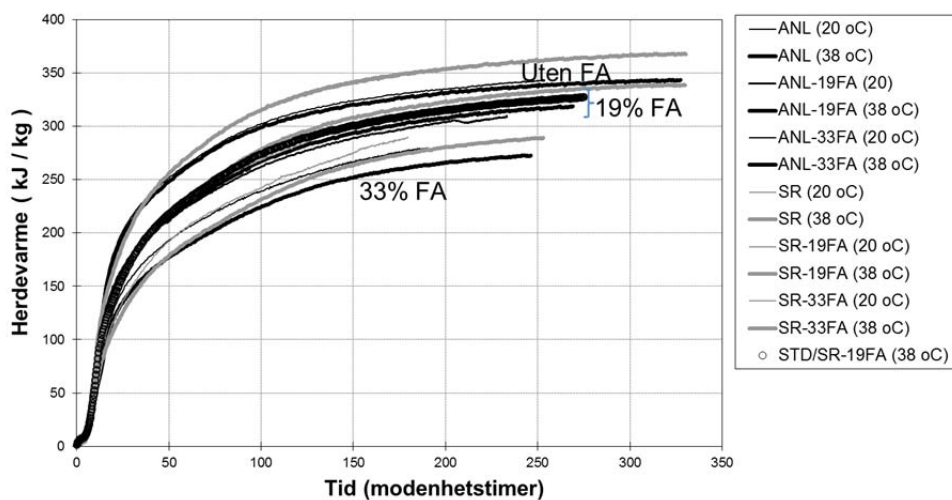
Figur 70 Målt temperaturutvikling i Norcem herdekasseforsøk, 20 °C lufttemperatur



Figur 71 Målt temperaturutvikling i Norcem herdekasseforsøk, 38 °C lufttemperatur



Figur 72 Beregnet adiabatisk temperaturutvikling, Norcem herdekasseforsøk (merk: SR (20 °C) og SR (38 °C) er overlappende)



Figur 73 Beregnet adiabatisk varmetutvikling pr. kg bindemiddel, Norcem herdekasseforsøk (merk: SR (20 °C) og SR (38 °C) er overlappende)

## 9 Oppsummering

### *Proporsjonering:*

Betongene (og pastaene) inneholder henholdsvis 0, 19 og 33% flygeaske(FA) på erstatningsbasis med sement; de er proporsjonert med masseforhold=0,40 og 5% silikastøv av mengde c+FA. Ved beregning av masseforhold er det benyttet  $k_s=2$  for silikastøvet og  $k_{fa}=1$  for flygeasken.

### *Sementklinkerne ANL og SR:*

ANL er i motsetning til SR tilsatt 4,1 % kalksteinsmel. ANL er relativt grovmalt sammenliknet med SR. ANL har noe høyere alkaliinnhold enn SR, og ANL har høyere  $C_3A$ -innhold og lavere  $C_4AF$  enn SR.

*Fasthet:* Fastheten reduseres generelt med økt FA-innhold. Fastheten ved 3 døgn reduseres markant med økende FA-dosering sammenliknet med referansen uten FA, men for alle aldre senere enn 3 døgn øker fasthetstilveksten med økende FA-dosering. Fra 28 døgn oppnådde SR (uten FA) ca. 10 % lavere fasthet enn ANL (uten FA). Med tilsetning av FA blir fastheten for de to klinkerne mer lik. For 19 % FA-dosering er fastheten ved 28 døgn sammenliknet med egen referanse uten FA 83 % og 90 % for henholdsvis ANL og SR, og for 33 % FA tilsvarende henholdsvis 68 % og 80 %. 19 % FA gir ingen/marginal reduksjon i fastheten etter 2 år, mens 33 % FA gir noe redusert fasthet for ANL. Ekstraprøvingen etter 6 år indikerer at SR-33FA har hatt mest markert fasthetsøkning fra 2 til 6 år.

*Spesifikk elektrisk motstand:* Resultatene hadde liten intern spredning og viser systematisk økt spesifikk elektrisk motstand med FA-dosering over tid. For ANL-serien er spesifikk elektrisk motstand markant økende med FA-dosering i tiden etter 90 døgn, og for SR-serien er samme effekt synlig allerede etter 28 døgn. Betongene i ANL-serien har generelt litt høyere elektrisk motstand enn i SR-serien, men forskjellen avtar noe med økende FA-dosering. 33% FA gir 3 (for ANL) til 5 (for SR) ganger høyere spesifikk elektrisk motstand etter 2 år sammenliknet med egne referanser uten FA. FA har altså størst effekt på spesifikk elektrisk motstand i SR-serien, men ANL-serien ligger likevel høyere ved alle aldre. Fra TG-analysene viste FA høyere pozzolan aktivitet med SR enn med ANL; det er trolig at dette medvirker til FA sin ekstra positive effekt på spesifikke elektriske motstand i SR. Ekstraprøvingen etter 6 år viser kun marginal økning i spesifikk elektrisk motstand fra 2 til 6 år for betongene uten FA, men for betongene med FA er det markant økning også i denne perioden.

### *Kloriddiffusjon, ringforsøk:*

For de parallelle prøvestykkene (produsert ved SINTEF) eksponert etter 98 døgn ligger den interne variasjonen for beregnet diffusjonskoeffisient ( $D$ ) fra hver av de to laboratoriene på samme nivå; COV varierte fra 6 % til 20 % og med gjennomsnittlig COV på 11 % og 12 % henholdsvis for de to laboratoriene. Forskjellen mellom laboratoriene i gjennomsnittlig diffusjonskoeffisient varierte i henhold til en COV på 16 %, og reproduktbarhetsvariasjonen kan beskrives med en COV på 20 %. I ringforsøket ga SVVs resultater systematisk høyere  $D$  enn SINTEF, en forskjell som er i samme størrelsesorden som reproduktbarhetsvariasjonen. Når vi inkluderer også SVVs egne blandinger på de samme betongene i vurderingen får vi omtrent samme bilde på variasjon som over. Resultatene, med sin interne spredning, viser for de fire betongene som var med i ringforsøket (ANL, ANL-19FA, ANL-33FA og STD/SR-19FA) at det ikke er signifikante forskjeller i  $D$  ved eksponering etter 98 døgn alder. Det samme kan sies også om beregnet overflatekonsentrasjon og total mengde inntrengte klorider.

### *Kloriddiffusjon*

For NT Build 443-eksponering ved 3 døgn alder er det for ANL-serien en klar økning i gjennomsnittlig  $D$  med økende FA-innhold. For samme eksponering ligger  $D$  for SR og SR-19FA på samme nivå som hhv ANL og ANL 19FA, mens SR-33FA har noe lavere gjennomsnittlige  $D$  enn SR-19FA. For eksponering ved 90 døgn alder er det ingen signifikant forskjell i  $D$  for betongene ANL, ANL-19FA, ANL-33FA, SR-19FA og STD/SR-19FA. Dette underbygges også av ringforsøket. Betongene SR og SR-33FA skiller seg imidlertid ut med til dels betydelig høyere  $D$  enn de øvrige betongene. For eksponeringstidspunktene 1 år og 2 år er det kun betongen SR som skiller seg ut med høyere  $D$ . Det kan synes som en  $D$  på ca.  $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  er en slags felles nedre grense som betongene (unntatt SR uten FA) går imot i løpet av forsøksperioden på 2 år.

Det er en sammenheng mellom  $D$  og spesifikk elektrisk motstand kun for tilfellene med beregnet  $D > 3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Omtrent samme forhold gjelder også for sammenhengene  $D$  og total inntrengt mengde klorider, samt  $D$  og kloridinntrengingsdybde.

For varianten med 1 års «feltrelevant» eksponering i 3,5 % NaCl-løsning fra 3 døgn er det ingen systematisk/signifikant effekt av FA (hverken negativ eller positiv), men for begge klinkerne har 19 % FA noe lavere  $D$  som gjennomsnitt. Ellers er trenden at SR-serien gir høyere  $D$  enn ANL-serien for tilsvarende FA-dosering, men forskjellen avtar med økende FA-dosering. At SR-betongene kan synes å ha noe lavere kloridmotstand enn ANL-betongene indikeres også direkte av kloridprofilene ved at kloridinntrengingsdybden for SR-serien er ca. 2 mm større enn i ANL-serien, uansett FA-innhold.

#### *Tidlig overflatebehandling/impregnering (av forskalt støpehud)*

Det ble ikke observert noen klar effekt på inntrengingsdybden av om formene var behandlet med forskalingsolje eller ikke. De tre undersøkte hydrofobere impregneringsproduktene som ble benyttet på ANL-betongene (0, 19 og 33 % FA) hadde svært ulik inntrengingsdybde, men alle produktene hadde likevel markant evne til å redusere kloridinntrengningen i tidlig alder - og dermed høy filtreringseffekt for alle FA-doseringene. Inntrengingsdybden av impregneringene øker med økende FA-innhold, men avtar med økende alder ved påføring (henholdsvis etter 1, 3 og 7 døgn). SEM-analyse av ett 3 år gammelt prøvestykke med ANL-33FA påført ett av impregneringsproduktene ved 1 døgn alder (inntrengingsdybde 10 mm), antyder at det ikke skjer endringer i hydrasjonsproduktenes kjemiske sammensetning. Det ble imidlertid observert merkbart lavere hydratiseringsgrad i sementkornene i impregnerert sone, hvilket kan skyldes impregneringens vannavstøtende effekt. Til tross for lavere hydratiseringsgrad, som skulle medføre en høyere porøsitet, ble det i polarisasjonsmikroskop observert indikasjoner på lavere kapillærporøsitet. Det antydes at dette kan skyldes at Hadley grains i den velhydratiserte betongen gir et mer porøst inntrykk enn det den i praksis har. Det var ingen karbonatisering i impregnerert sone etter 3 år.

#### *Varmeutvikling*

Økende FA-dosering gir mer langsom varmeutvikling og redusert totalvarme. 19 % og 33 % FA, for både ANL og SR, reduserer adiabatisk temperaturøkning etter 48 timer med henholdsvis ca. 15 % og ca. 30 %, og isotherm varmeutvikling ved 150 modenhetstimer reduseres henholdsvis ca. 10 % og 20 %. SR-serien gir noe mer varmeutvikling (ca. 5%) enn ANL-serien, men forskjellen avtar noe med FA-dosering.

#### *Hydrasjonsprodukter/pozzolan aktivitet - pastaprøver*

For ANL-serien er mengde CH (som % av klinker + FA) relativt lite påvirket av FA-mengde; etter 2 år er det 7 % og 13 % reduksjon i CH-mengden for henholdsvis 19 % og 33 % FA. For SR-serien og 19 % FA er trenden noe det samme med 14 % redusert CH-mengde etter 2 år, men for SR med 33 % FA er det en markant reduksjon allerede fra ca. 28 døgn og etter 2 år er CH-mengden redusert til  $\frac{1}{3}$  sammenliknet med betongen uten FA. For 0 % og 19 % FA har SR generelt høyere CH-mengde enn ANL over prøvetiden på 2 år, men for SR med 33 % FA er bildet helt snudd om pga. den kraftige CH-reduksjonen. Det bemerkes at det er usikkerhet knyttet til de rapporterte CH-mengdene, se kapittel 6.2.1. I SR-serien ble det generelt funnet mer kjemisk bundet vann enn i ANL-serien, men forskjellen mellom klinkerne avtar med FA-dosering grunnet økt vannbinding i ANL-klinkeren sannsynligvis pga. en FA/kalk-synergieffekt som gir økt ettringittmengde på bekostning av monosulfat. Det er ikke detektert noen forskjeller i Ca/Si- og Al/Si-forholdet i aluminatfasene ved FA-dosering for ANL og SR, men hvilke aluminatfaser som dannes er litt ulikt noe som tilskrives at ANL er tilsatt kalsteinsmel. Det observeres i SR-serien generelt flere Hadley-grains enn i ANL-serien noe som tilskrives at SR har høyest finhet.

#### *K-faktor for flygeaske*

Virkningsfaktor for FA ( $k$ -faktor) er ikke studert eksplisitt i denne undersøkelsen som har brukt  $k=1,0$  ved proporsjonering av masseforhold=0,40 i blandingene med 19% og 33% FA. Ved å sammenlikne betongene med FA mot korrespondere referansebetong uten FA går det likevel an å si noe om  $k$ . For fasthet i ANL-serien er  $k$  for FA under 1,0 gjennom hele forsøksperioden på 2 år. For SR-serien gjelder det samme, men  $k$  er høyere gjennom hele perioden og for fastheten ved 2 år er  $k$  ca. 1,0 ettersom FA omtrent ikke gir fasthetsreduksjon sammenliknet med SR uten FA ved denne alderen.

For kloridmotstand (NT Build 443), i form av diffusjonskoeffisienter, synes  $k$  i ANL-serien å være (minst) 1,0 fra ca. 90 døgn (eller et sted mellom 3 døgn og 90 døgn, som var måletidspunktene), mens i SR-serien har referansen SR så lav kloridmotstand at FA gir gunstig effekt for alle terminene unntatt 3 døgn, dvs.  $k$  er (minst) 1,0 unntatt for 3 døgneksponeringen. For spesifikk elektrisk motstand er  $k$  lik 1,0 fra tidlig alder av både i ANL- og fra SR-serien, og fra ca. 90 døgn til 2 år (og videre til 6 år, jfr. resultatene fra ekstraprøvene) vokser  $k$  til langt over 1,0.

## 10 Referanser

- [1] ISO 5725-2:1994 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic methods for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method
- [2] Krogh S., Overgård T.S. og Strømfjord H. (2008) Betong i tidlig alder – effekt av sementtype og impregnering vedrørende kloridinntrengning. Hovedprosjekt ved Høgskolen i Oslo, Avd. for ingeniørutdanning
- [3] Smeplass S., Bjøntegaard Ø., Kompen R., Haram E. (2010) Bjørvika submerged tunnel, experiences. Crack-control in the concrete's hardening phase. (in Norwegian: Senketunnelen i Bjørvika, erfaringsrapport. Kontroll med opprissing i betongens herdefase). Technology report no. 2580, Norwegian Public Roads Administration, Road Directorate. 2010-03-05, ISSN 1504-5005
- [4] Fray A.L.A., Bijen J.M. og de Haan Y.M. (1989) The Reaction of Fly Ash in Concrete. A critical Examination., Cem. Concr. Res., 19 (1989) 235-246

# APPENDIX 1 Prøvningsrapport, sementer og FA



## PRØVNINGSRAPPORT

Prøven merket: Anleggsement fra Sjørøya til Forsøksement/Bruksprøving innk. 10.02.06  
 Prøve kode: EG1-06 Ref:

### KJEMISK ANALYSE

### FYSIKALSK PRØVNING EN 196

Glødetap		2.72 %	<b>FINHET</b>		
Kiselsyre	(SiO <sub>2</sub> )	21.09 %	Partikkelanalyse	+90my	9.6 %
Aluminiumoksyd	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.40 %	" "	+64my	11.7 %
Jernoksyd	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.62 %	" "	-24my	60.4 %
Kalsiumoksyd	(CaO)	63.95 %	" "	-30 my	68.7 %
Magnesiumoksyd	(MgO)	1.78 %	Sp. overflate	Blaine	388 m <sup>2</sup> /kg
Svoveltrioksyd	(SO <sub>3</sub> )	3.22 %	<b>NORMAL KONSISTENS</b>		
Kalkmel		4.1 %	Vannbehov		26.0 %
Fri kalk		1.57 %	<b>VOLUMBESTANDIGHET</b>		
Kaliumoksyd	(K <sub>2</sub> O)	0.43 %	Le Chatelier		0.5 mm
Natriumoksyd	(Na <sub>2</sub> O)	0.35 %	<b>BINDETIDER</b>		
Alkali		0.63 %	Stærkning begynt		120 min.
			<b>TRYKKFASTHET</b>		
			1 døgn		16.7 MPa
			2 døgn		27.9 MPa
			7 døgn		45.3 MPa
			28 døgn		59.1 MPa

Norcem A.S Brevik, Lab Fellestjenester, 15. mars 2006

po.  
fo

*Kjetil Lie*  
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

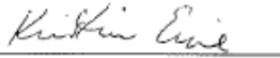
Ent.no:  
NO 934 949 145 VAT  
Bank account:  
6003 06 12488

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



## REPORT ON QUALITY TEST

Sample marked: CEM I 42,5R SR-LA/Norcem SR    January 26th 2005  
 Our Ref.: DK1-05    Your Ref:

CHEMICAL ANALYSIS			PHYSICAL TEST EN 196	
Loss on ignition	(L.O.I.)	0.93 %	<b>FINENESS</b>	
Silica	(SiO <sub>2</sub> )	22.07 %	Particle analysis	+90 mic.    0.2 %
Alumina	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.64 %	" "	+64 mic.    1.0 %
Ferric Oxide	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.19 %	" "	-24 mic.    82.7 %
Lime	(CaO)	63.82 %	" "	-30 mic.    89.8 %
Magnesia	(MgO)	1.44 %	Sp.surface,	Blaine    432 m <sup>2</sup> /kg
Sulphur Trioxide		2.30 %	<b>STANDARD CONSISTENCY</b>	
Free Lime		0.97 %	Temperate climate	20°C    27.6 %
Potassium Oxide	(K <sub>2</sub> O)	0.43 %	<b>SETTING TIME</b>	
Sodium Oxide	(Na <sub>2</sub> O)	0.19 %	Initial	170 min.
Lime Saturation Factor		89.6 %	<b>COMPRESSIVE STRENGTH</b>	
Alkali	(Na <sub>2</sub> O Eq.)	0.47 %	1 day	19.2 MPa
Phosphorus Pentoxide	(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.09 %	2 days	30.0 MPa
Water soluble Chrome		0.0 mg/kg	7 days	44.2 MPa
<b>MINERAL COMPOSITION</b>			28 days	61.6 MPa
C <sub>2</sub> S		23 %		
C <sub>3</sub> S		54 %		
C <sub>3</sub> A		0.9 %		
C <sub>4</sub> AF		15.8 %		
Norcem A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory    March 21th 2005				
po. p <sub>o</sub>			 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

Ent.no:  
 NO 834 949 145 VAT  
 Bank account:  
 6003 06 12488

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

**PRØVNINGSRAPPORT**

 Prøven merket : Danaske utfatt silo i Brevik 12.03.02 (1big bag til lab+2big bag til KK)  
 Prøve kode : LN21-02

Glødetap		4.08 %
Kiselsyre	(SiO <sub>2</sub> )	54.40 %
Aluminiumoksyd	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	22.01 %
Jernoksyd	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.83 %
Kalsiumoksyd	(CaO)	4.80 %
Magnesiumoksyd	(MgO)	2.22 %
Svoveltrioksyd	(SO <sub>3</sub> )	0.52 %
Kaliumoksyd	(K <sub>2</sub> O)	2.21 %
Natriumoksyd	(Na <sub>2</sub> O)	1.15 %
Krom	(Cr.)	90 mg/kg
Karbon		3.64 %
Blaine		388 m <sup>2</sup> /kg
Malvern	<24my	59.7 %
Malvern	<30my	66.3 %
Malvern	>64my	11.4 %
Malvern	>90my	5.4 %
Litervekt løs		0.89 kg/l
Litervekt stampet		0.98 kg/l
Sp.vekt		2.20 g/cm <sup>3</sup>

 Norcem A.S Brevik, Lab Fellestjenester, 31. august 2005  
 po.

 \_\_\_\_\_  
 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

## APPENDIX 2 Betongresepter

Prosj./ Id.: 1-ANL(ref) / Samarb SVV Norcem

Blandevolum:	45 liter
Dato:	24.apr.07
Tidspunkt for vanntilsetning	10:00
Ansvarlig:	Øyvind Bjøntegaard
Utført av:	SAM, ØB, ØL

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt %	Korr. kg	Oppveid kg
Norcem Anlegg	360,2	16,208			16,208
Silikastøv	18,0	0,810			0,810
Flygeaske	0,0	0,000			0,000
Fritt vann	158,5	7,131		-1,881	5,251
Absorbent vann	12,1	0,547			0,547
Årdal vasket natursand 0-8 mm	751,4	33,812	4,6	1,555	35,368
Årdal natur fillersand 0-2 mm	204,2	9,189	2,0	0,184	9,372
Årdal vasket 8-11 mm	585,1	26,331	0,0	0,000	26,331
Årdal vasket 11-16 mm	315,6	14,201	0,0	0,000	14,201
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	60	0,000	0,000
Sikament FB2	3,8	0,173	82	0,142	0,173
Tss3	0,0	0,000	60	0,000	0,000
Tss4	0,0	0,000	0	0,000	0,000

5,797

Fersk betong						
Tid etter vanntilsetning						
Synkmål	120	mm				
Luft	1,9	%				
Densitet	2426	kg/m <sup>3</sup>				

Prøvestykker (antall)						
Utstøpningstidspunkt	Fra ca. kl. 10.15 til 11.00					
15 Terninger (100)	Støpt sist					
10 Sylindre (100x200)	Støpt først					
Kommentar:	Vi brukte 64g mer SikaFB2 enn proporsjonert, dvs. tot. 173g					

Prosj./ Id.: 2-ANL\_19FA / Samarb SVV Norcem

Blandevolum:	50 liter
Dato:	8.mai.07
Tidspunkt for vanntilsetning	09:07
Ansvarlig:	Øyvind Bjøntegaard
Utført av:	SAM, ØL

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt %	Korr. kg	Oppveid kg	
Norcem Anlegg	282,4	14,118			14,118	
Silikastøv	17,5	0,875			0,875	
Flygeaske	66,4	3,318			3,318	
Fritt vann	153,5	7,674		-1,571	6,103	6,710
Absorbert vann	12,1	0,607			0,607	
Årdal vasket natursand 0-8 mm	751,4	37,569	2,2	0,827	38,396	
Årdal natur fillersand 0-2 mm	204,2	10,210	5,8	0,592	10,802	
Årdal vasket 8-11 mm	585,1	29,257	0,0	0,000	29,257	
Årdal vasket 11-16 mm	315,6	15,778	0,0	0,000	15,778	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Sikament FB2	3,7	0,186	82	0,153	0,186	
Tss3	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Tss4	0,0	0,000	0	0,000	0,000	

Fersk betong						
Tid etter vanntilsetning						
Synkmål	185	mm				
Luft	1,9	%				
Densitet	2408	kg/m <sup>3</sup>				

Prøvestykker (antall)						
Utstøpningstidspunkt	Fra ca kl. 09.30 til 10.15					
16 Terninger (100)	Støpt sist		(NB! 18 terninger ble støpt ut)			
12 Sylindre (100x200)	Støpt først					
Kommentar:	Vi brukte 77g mer SikaFB2 enn proporsjonert, dvs. tot. 186g (all betongen helt tilbake i blanderen etter første synkmåling)					

Prosj./ Id.: 5-ANL\_33FA / Samarb SVV Norcem

Blandevolum:	50 liter
Dato:	07.08.2007
Tidspunkt for vanntilsetning	08:50
Ansvarlig:	Øyvind Bjøntegaard
Utført av:	Synnøve Myren / Øystein Lahaug / ..

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt %	Korr. kg	Oppveid kg	
Norcem Anlegg xxx	228,7	11,437			11,437	
Silikastøv	17,2	0,858			0,858	
Flygeaske xxx	112,1	5,604			5,604	
Fritt vann	150,1	7,503		-1,959	5,544	6,151
Absorbert vann	12,1	0,607			0,607	
Årdal vasket natursand 0-8 mm	751,4	37,569	3,3	1,240	38,809	
Årdal natur fillersand 0-2 mm	204,2	10,210	5,8	0,592	10,802	
Årdal vasket 8-11 mm	585,1	29,257	0,0	0,000	29,257	
Årdal vasket 11-16 mm	315,6	15,778	0,0	0,000	15,778	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0	0,000	60	0,000	0,000	
Sikament FB2	3,1	0,154	82	0,127	0,154	
Tss3	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Tss4	0,0	0,000	0	0,000	0,000	

Fersk betong						
Tid etter vanntilsetning						
Synkmål	170 mm					
Luft	2.5%					
Densitet	2420 kg/m <sup>3</sup>					

Prøvestykker (antall)						
Utstøpningstidspunkt						
16 Terninger (100)	+ 1 Ekstra					
12 Sylindre (100x200)	+ 1 Ekstra					

Prosj./ Id.:	7-SR / Samarb SVV Norcem
--------------	--------------------------

Blandevolum:	50 liter
Dato:	09.10.2007
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Øyvind Bjøntegaard
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt %	Korr. kg	Oppveid kg	
Norcem SR xxx	361,6	18,080			18,080	
Silikastøv	18,1	0,904			0,904	
Flygeaske xxx	0,0	0,000			0,000	
Fritt vann	159,1	7,955		-2,143	5,812	6,419
Absorbent vann	12,1	0,607			0,607	
Årdal vasket natursand 0-8 mm	751,4	37,569	4,3	1,615	39,185	
Årdal natur fillersand 0-2 mm	204,2	10,210	4,3	0,439	10,649	
Årdal vasket 8-11 mm	585,1	29,257	0,0	0,000	29,257	
Årdal vasket 11-16 mm	315,6	15,778	0,0	0,000	15,778	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Sikament FB2	2,2	0,108	82	0,089	0,108	
Tss3	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Tss4	0,0	0,000	0	0,000	0,000	

Fersk betong						
Tid etter vanntilsetning						
Synkmål	Registreringene blandedagen synes å være tapt, dette					
Luft	gjelder også forbruket av SP-stoff					
Densitet						

Prøvestykker (antall)						
Utstøpningstidspunkt						
16 Terninger (100)						
12 Sylindre (100x200)						

Prosj./ Id.: 3-SR\_19FA / Samarb SVV Norcem

Blandevolum:	50 liter
Dato:	22.mai.07
Tidspunkt for vanntilsetning	10:37
Ansvarlig:	Øyvind Bjøntegaard
Utført av:	SAM, Geir + ?

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt %	Korr. kg	Oppveid kg	
Norcem SR	283,2	14,162			14,162	
Silicastøv	17,6	0,878			0,878	
Flygeaske	66,6	3,328			3,328	
Fritt vann	154,0	7,698		-1,330	6,368	6,975
Absorbert vann	12,1	0,607			0,607	
Årdal vasket natursand 0-8 mm	751,4	37,569	1,7	0,639	38,208	
Årdal natur fillersand 0-2 mm	204,2	10,210	5,9	0,602	10,812	
Årdal vasket 8-11 mm	585,1	29,257	0,0	0,000	29,257	
Årdal vasket 11-16 mm	315,6	15,778	0,0	0,000	15,778	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
0	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Sikament FB2	2,2	0,109	82	0,089	0,109	
Tss3	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Tss4	0,0	0,000	0	0,000	0,000	

Fersk betong						
Tid etter vanntilsetning						
Synkmål	145	mm				
Luft	2,1	%				
Densitet	2402	kg/m <sup>3</sup>				

Prøvestykker (antall)						
Utstøpningstidspunkt						
16 Terninger (100)	Start	11.15				
12 Sylindre (100x200)	Start	11.00				
Kommentar:	Første blanding forkastet pga overdos. av SP					
	Benyttet betong har SP som proporsjonert					

Prosj./ Id.: 6-SR\_33FA / Samarb SVV Norcem

Blandevolum:	50 liter
Dato:	18.09.2007
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Øyvind Bjøntegaard
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt %	Korr. kg	Oppveid kg	
Norcem SR xxx	229,3	11,465			11,465	
Silikastøv	17,2	0,860			0,860	
Flygeaske xxx	112,4	5,618			5,618	
Fritt vann	150,4	7,521		-2,164	5,357	5,964
Absorbent vann	12,1	0,607			0,607	
Årdal vasket natursand 0-8 mm	751,4	37,569	4,3	1,615	39,185	
Årdal natur fillersand 0-2 mm	204,2	10,210	4,3	0,439	10,649	
Årdal vasket 8-11 mm	585,1	29,257	0,0	0,000	29,257	
Årdal vasket 11-16 mm	315,6	15,778	0,0	0,000	15,778	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0	0,000	60	0,000	0,000	
Sikament FB2	2,7	0,134	82	0,110	0,134	
Tss3	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Tss4	0,0	0,000	0	0,000	0,000	

Fersk betong						
Tid etter vanntilsetning						
Synkmål	185 mm					
Luft	2,50 %					
Densitet	2400					

Prøvestykker (antall)						
Utstøpningstidspunkt	Vanntilsetning kl. 09.00					
16 Terninger (100)						
12 Sylindre (100x200)						
Kommentar:	133,6 g SP totalt					



Prosj./ Id.: 4-80SR\_20STD\_19FA / Samarb SVV Norcem

Blandevolum:	50 liter
Dato:	07.08.2007
Tidspunkt for vanntilsetning	
Ansvarlig:	Øyvind Bjøntegaard
Utført av:	

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt %	Korr. kg	Oppveid kg	
Norcem SR 80%+STD20%	283,2	14,161			14,161	
Silikastøv	17,6	0,878			0,878	
Flygeaske	66,6	3,328			3,328	
Fritt vann	154,0	7,698		-2,252	5,446	6,053
Absorbent vann	12,1	0,607			0,607	
Årdal vasket natursand 0-8 mm	751,4	37,569	4,2	1,578	39,147	
Årdal natur fillersand 0-2 mm	204,2	10,210	5,5	0,562	10,771	
Årdal vasket 8-11 mm	585,1	29,257	0,0	0,000	29,257	
Årdal vasket 11-16 mm	315,6	15,778	0,0	0,000	15,778	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Sikament FB2	2,7	0,137	82	0,113	0,137	
Tss3	0,0	0,000	60	0,000	0,000	
Tss4	0,0	0,000	0	0,000	0,000	

Fersk betong						
Tid etter vanntilsetning	Vanntilsetning 08.55					
Synkmål	205 mm					
Luft	2,55 %					
Densitet	2400					

Prøvestykker (antall)						
Utstøpningstidspunkt						
16 Terninger (100)						
12 Sylindre (100x200)						
Kommentar:	Total mengde SP 136,7 g					

## APPENDIX 3 Aktivitet A – Trykkfasthet

Bl.1

ANL							Std.av fasthet	COV fasthet
Prøve	Alder (d)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkfasthet (MPa)	Snitt alder	Snitt trykkfasthet ANL			
1	3	2440	57,5	3	58,3	0,8	1,3 %	
2	3	2450	58,5	28	93,3			
3	3	2460	59,0	92	97,5			
4	28	2470	94,5	730	113,8			
5	28	2460	95,5					
6	28	2460	90,0					
7	92	2460	98,5					
8	92	2460	94,5					
9	92	2460	99,5					
10	730		105,0					
11	730		117,0					
12	730		114,0					
13	730		116,0					
14	730		115,5					
15	730		115,0					

Modell				
Tid (døgn)	Tid (timer)	ANL	Trykk-fasthet	$\Delta Y^2$
0	0	-		
0,5	12	27,6		
1	24	39,5		
2	48	51,8		
3	72	58,8	58,3	0,24
7	168	72,5		
14	336	82,1		
28	672	90,4	93,3	8,77
56	1344	97,2		
92	2208	101,2	97,5	13,95
730	17520	112,5	113,8	1,53

$f_{cv}$	122,3
$\tau$	33
$\alpha$	0,40
$\Sigma \Delta Y^2$	24
$R^2$	0,9850

Relativ	
28 d	56 d
-	-
0,31	0,28
0,44	0,41
0,57	0,53
0,65	0,61
0,80	0,75
0,91	0,85
1,00	0,93
1,08	1,00
1,12	1,04
1,24	1,16

Bl.2

ANL-19FA							Std.av fasthet	COV fasthet
Prøve	Alder (d)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkfasthet (MPa)	Snitt alder	Snitt trykkfasthet ANL-19FA			
1	3	2440	40,0	3	39,3	2,6	6,5 %	
2	3	2430	36,5	28	77,3			
3	3	2440	41,5	90	89,7			
4	28	2440	78,0	730	108,7			
5	28	2450	75,5					
6	28	2430	78,5					
7	90	2440	90,0					
8	90	2440	89,5					
9	90	2440	89,5					
10	730		110,0					
11	730		111,0					
12	730		108,5					
13	730		105,0					
14	730		106,0					
15	730		111,5					

Modell				
Tid (døgn)	Tid (timer)	ANL-19FA	Trykk-fasthet	$\Delta Y^2$
0	0	-		
0,5	12	13,0		
1	24	21,9		
2	48	32,7		
3	72	39,6	39,3	0,06
7	168	54,2		
14	336	65,7		
28	672	76,2	77,3	1,24
56	1344	85,4		
90	2160	91,0	89,7	1,65
730	17520	108,3	108,7	0,15

$f_{cv}$	125,2
$\tau$	105
$\alpha$	0,38
$\Sigma \Delta Y^2$	3
$R^2$	0,9988

Relativ	
28 d	56 d
-	-
0,17	0,15
0,29	0,26
0,43	0,38
0,52	0,46
0,71	0,63
0,86	0,77
1,00	0,89
1,12	1,00
1,19	1,06
1,42	1,27

Bl.5

ANL-33FA							Std.av fasthet	COV fasthet
Prøve	Alder (d)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkfasthet (MPa)	Snitt alder	Snitt trykkfasthet ANL-33FA			
1	3	2420	29,0	3	29,0	0,5	1,7 %	
2	3	2410	28,5	28	63,7			
3	3	2430	29,5	90	77,5			
4	28	2430	63,0	729	98,8			
5	28	2420	63,5					
6	28	2440	64,5					
7	90	2430	74,5					
8	90	2430	77,5					
9	90	2430	80,5					
10	729		99,5					
11	729		97					
12	729		99,5					
13	729		97,5					
14	729		101,5					
15	729		97,5					

Modell				
Tid (døgn)	Tid (timer)	ANL-33FA	Trykk-fasthet	$\Delta Y^2$
0	0	-		
0,5	12	8,7		
1	24	15,2		
2	48	23,6		
3	72	29,2	29,0	0,04
7	168	41,9		
14	336	52,6		
28	672	62,9	63,7	0,63
56	1344	72,4		
90	2160	78,4	77,5	0,73
729	17496	98,5	98,8	0,05

$f_{cv}$	122,6
$\tau$	207
$\alpha$	0,34
$\Sigma \Delta Y^2$	1
$R^2$	0,9994

Relativ	
28 d	56 d
-	-
0,14	0,12
0,24	0,21
0,38	0,33
0,46	0,40
0,67	0,58
0,84	0,73
1,00	0,87
1,15	1,00
1,25	1,08
1,57	1,36

Bl.7

SR							Std.av fasthet	COV fasthet
Prøve	Alder (d)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkfasthet (MPa)	Snitt alder	Snitt trykkfasthet SR			
1	3		46,5	3	47,2	0,6	1,2 %	
2	3		47,5	28	84,3			
3	3		47,5	90	94,3			
4	28	2440	84	729	100,5			
5	28	2430	82,5					
6	28	2430	86,5					
7	90		95,5					
8	90		97					
9	90		90,5					
10	729		99,5					
11	729		98					
12	729		99					
13	729		102,5					
14	729		103,5					
15	729		100,5					

Modell				
Tid (døgn)	Tid (timer)	SR	Trykk-fasthet	$\Delta Y^2$
0	0	-		
0,5	12	9,8		
1	24	22,2		
2	48	37,8		
3	72	47,1	47,2	0,00
7	168	64,8		
14	336	76,2		
28	672	84,7	84,3	0,12
56	1344	90,8		
90	2160	93,8	94,3	0,27
729	17496	100,7	100,5	0,05

$f_{cv}$	103,5
$\tau$	49
$\alpha$	0,61
$\Sigma \Delta Y^2$	0
$R^2$	0,9997

Relativ	
28 d	56 d
-	-
0,12	0,11
0,26	0,24
0,45	0,42
0,56	0,52
0,76	0,71
0,90	0,84
1,00	0,93
1,07	1,00
1,11	1,03
1,19	1,11

Effekt av flygeaske på betongegenskaper i tidlig og moden alder - laboratorieforsøk

Bl.3

SR-19FA

Prøve	Alder (d)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkfasthet (MPa)	Snitt alder	Snitt trykkfasthet SR-19FA	Std.av fasthet	COV fasthet
1	3		37	3	37,0	0,5	1,4 %
2	3		36,5	28	76,0	1,3	1,7 %
3	3		37,5	90	87,0	1,0	1,1 %
4	28	2430	76,5	729	102,0	1,8	1,8 %
5	28	2440	74,5				
6	28	2440	77				
7	90		86				
8	90		87				
9	90		88				
10	729		101,5				
11	729		99,5				
12	729		101,5				
13	729		102,5				
14	729		105				
15	729		102				

Tid (døgn)	Tid (timer)	Modell		
		SR-19FA	Trykk-fasthet	$\Delta Y^2$
0		-		
0,5	12	9,2		
1	24	18,1		
2	48	29,7		
3	72	37,2	37,0	0,04
7	168	52,9		
14	336	64,8		
28	672	75,0	76,0	0,97
56	1344	83,5		
90	2160	88,2	87,0	1,53
729	17496	101,6	102,0	0,17

Relativ	
28 d	56 d
-	-
0,12	0,11
0,24	0,22
0,40	0,36
0,50	0,45
0,71	0,63
0,86	0,78
1,00	0,90
1,11	1,00
1,18	1,06
1,35	1,22

$f_{cr}$	110,8
$\tau$	87
$\alpha$	0,46
$\Sigma \Delta Y^2$	3
$R^2$	0,9988

Bl.6

SR-33FA

Prøve	Alder (d)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkfasthet (MPa)	Snitt alder	Snitt trykkfasthet SR-33FA	Std.av fasthet	COV fasthet
1	3		33	3	33,0	1,0	3,0 %
2	3		34	28	67,8	1,5	2,3 %
3	3		32	90	81,0	2,8	3,5 %
4	28	2430	66,5	730	97,7	3,6	3,6 %
5	28	2420	67,5				
6	28	2430	69,5				
7	90		83				
8	90		79				
9	90		-				
10	730		99,5				
11	730		98				
12	730		98,5				
13	730		91				
14	730		97,5				
15	730		101,5				

Tid (døgn)	Tid (timer)	Modell		
		SR-33FA	Trykk-fasthet	$\Delta Y^2$
0		-		
0,5	12	9,5		
1	24	17,1		
2	48	26,8		
3	72	33,1	33,0	0,01
7	168	46,7		
14	336	57,6		
28	672	67,5	67,8	0,12
56	1344	76,2		
90	2160	81,4	81,0	0,16
730	17520	97,5	97,7	0,01

Relativ	
28 d	56 d
-	-
0,14	0,13
0,25	0,23
0,40	0,35
0,49	0,43
0,69	0,61
0,85	0,76
1,00	0,89
1,13	1,00
1,21	1,07
1,45	1,28

$f_{cr}$	112,5
$\tau$	121
$\alpha$	0,39
$\Sigma \Delta Y^2$	0
$R^2$	0,9999

Bl.4

SR-STD-19FA

Prøve	Alder (d)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkfasthet (MPa)	Snitt alder	Snitt trykkfasthet SR-STD-19FA	Std.av fasthet	COV fasthet
1	3		40	3	38,5	1,5	3,9 %
2	3		38,5	28	73,5	2,2	3,0 %
3	3		37	90	79,8	3,8	4,7 %
4	28	2420	72	730	97,5	3,9	4,0 %
5	28	2430	76				
6	28	2420	72,5				
7	90		81,5				
8	90		82,5				
9	90		75,5				
10	730		97,5				
11	730		101,5				
12	730		96				
13	730		97,5				
14	730		101,5				
15	730		91				

Tid (døgn)	Tid (timer)	Modell SR-STD-19FA		
		SR-STD-19FA	Trykk-fasthet	$\Delta Y^2$
0		-		
0,5	12	13,8		
1	24	22,5		
2	48	32,7		
3	72	39,0	38,5	0,26
7	168	52,1		
14	336	62,0		
28	672	70,9	73,5	6,82
56	1344	78,5		
90	2160	82,9	79,8	9,67
730	17520	96,5	97,5	0,92

Relativ	
28 d	56 d
-	-
0,19	0,18
0,32	0,29
0,46	0,42
0,55	0,50
0,73	0,66
0,88	0,79
1,00	0,90
1,11	1,00
1,17	1,06
1,36	1,23

$f_{cr}$	108,8
$\tau$	77
$\alpha$	0,39
$\Sigma \Delta Y^2$	18
$R^2$	0,9904

## APPENDIX 4 Aktivitet A – Elektrisk motstand

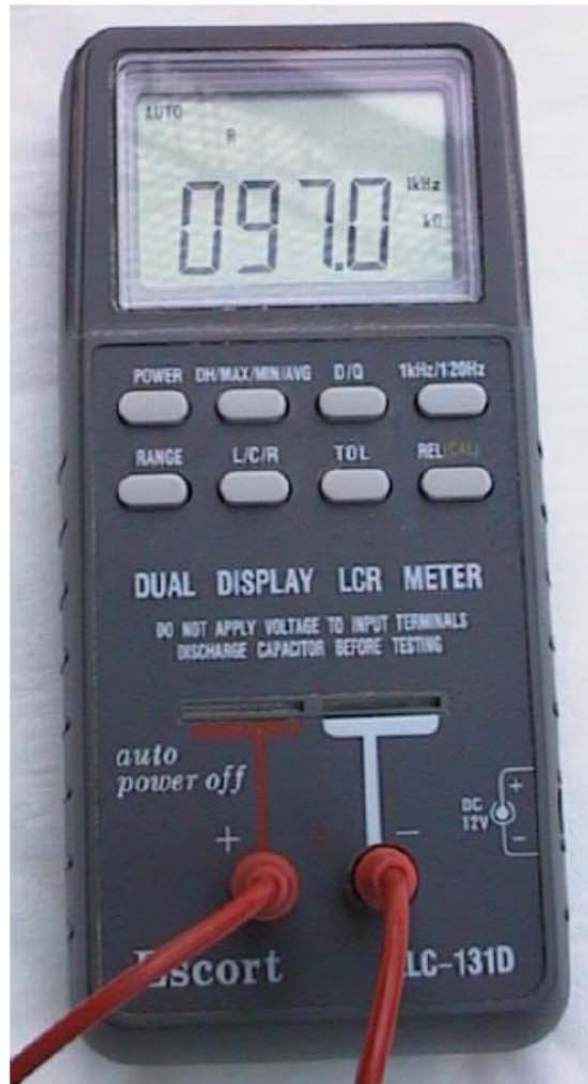
### Resultater

Rådata	Alder (dager)								Ohm x m		Alder (dager)					
Ohm	3	14	28	90	365	730			3	14	28	90	365	730		
ANL(ref)	345	886	1881	3377	3148	3143		ANL(ref)	34,5	88,6	188,1	337,7	314,8	314,3		
Std.av	6	39	94	81	113	47		Std.av	0,6	3,9	9,4	8,1	11,3	4,7		
								COV	1,7 %	4,4 %	5,0 %	2,4 %	3,6 %	1,5 %		
ANL-19FA	279	698	1797	3640	5591	6488		ANL-19FA	27,9	69,8	179,7	364,0	559,1	648,8		
Std.av	35	19	72	101	138	427		Std.av	3,5	1,9	7,2	10,1	13,8	42,7		
								COV	12,5 %	2,7 %	4,0 %	2,8 %	2,5 %	6,6 %		
ANL-33FA	243	792	1735	3805	7718	9532		ANL-33FA	24,3	79,2	173,5	380,5	771,8	953,2		
Std.av	13	73	106	162	251	310		Std.av	1,3	7,3	10,6	16,2	25,1	31,0		
								COV	5,3 %	9,2 %	6,1 %	4,3 %	3,3 %	3,3 %		
Ohm	3	14	Termin			365	730			Ohm x m		Termin			365	730
SR(ref)	288	490	873	1728	1772	1737		SR(ref)	28,8	49,0	87,3	172,8	177,2	173,7		
Std.av	8	24	21	25	19	44		Std.av	0,8	2,4	2,1	2,5	1,9	4,4		
								COV	2,8 %	4,9 %	2,4 %	1,4 %	1,1 %	2,5 %		
SR-19FA	267	404	1067	2527	4376	5163		SR-19FA	26,7	40,4	106,7	252,7	437,6	516,3		
Std.av	14	13	37	89	101	53		Std.av	1,4	1,3	3,7	8,9	10,1	5,3		
								COV	5,2 %	3,2 %	3,5 %	3,5 %	2,3 %	1,0 %		
SR-33FA	285	469	1160	2867	6783	8630		SR-33FA	28,5	46,9	116,0	286,7	678,3	863,0		
	16	26	72	156	202	251		Std.av	1,6	2,6	7,2	15,6	20,2	25,1		
								COV	5,6 %	5,5 %	6,2 %	5,4 %	3,0 %	2,9 %		
SR-STD-19FA	260	545	1380	2873	5221	5944		SR-STD-19FA	26,0	54,5	138,0	287,3	522,1	594,4		
Std.av	5	14	67	112	148	173		Std.av	0,5	1,4	6,7	11,2	14,8	17,3		
								COV	1,9 %	2,6 %	4,9 %	3,9 %	2,8 %	2,9 %		

Måleutstyr / prosedyre – Elektrisk motstand

## BRUKSANVISNING MOTSTANDSMÅLER

### Escort ELC-131D



*Måling av elektrisk motstand i betong*

Vegteknisk avdeling, Betongkontoret, mars 1998

### Klargjøring av instrumentet:

1. Instrumentet slås på (og av) ved å trykke på "POWER" knappen, se *pil 1*
2. Riktig måling (motstand) velges ved å trykke 2 ganger på "L/C/R" knappen, se *pil 2*
3. Det skal da stå "R" på displayet, slik som vist på figurer under, se *pil 3*
4. Enheten skal da være  $\Omega$  (ohm),  $k\Omega$  (kilo-ohm), eller  $M\Omega$  (mega-ohm), se *pil 4*. Enheten velges automatisk av instrumentet, og må alltid skrives opp ved måling.
5. Kontroller at det står "1kHz" til høyre i displayet, se *pil 5*. Dersom det står "120Hz", må knappen "1kHz/120Hz" trykkes på, se *pil 6*.
6. Målingen kan foretas – se fremgangsmåte under.



Ved spørsmål eller problemer med måleutstyret eller bruken av det, kontakt:

Claus K. Larsen  
Vegteknisk avdeling, Betongkontoret  
PB 8142 DEP  
0033 Oslo  
tlf.: 22073223 (90554403), fax: 22073444

### **Måleprosedyre for betongprøver:**

1. Instrumentet klargjøres som angitt over.
2. De to måleplatene tas opp av herdekaret, der de har ligget ca ett døgn, uten avrenning av vannet (litt vann renner av uten at det har betydning). Platene holdes vannrett slik at minst mulig vann renner av filten.
3. Platen uten håndtak legges med filten opp på en benk, samtidig som den andre platen (med håndtak) legges oppå, med filt mot filt.
4. Måleledningene plugges inn i platene og i instrumentet. Rekkefølgen og plasseringen av pluggene spiller ingen rolle.
5. Et lodd på minst 3 kg legges på den øverste platen (nå vil en del av vannet i filten bli presset ut). Kortslutningsmotstanden leses av etter 20-30 sekunder. Den bør være mindre enn 50  $\Omega$  (ohm). Dersom den er mye større bør kontrollpunktene under sjekkes.
6. Loddet tas av og den øverste platen legges forsiktig på benken med filten ned. Dette skal skje uten at platen holdes på høykant, slik at vann ikke renner av. Den underste platen røres ikke.
7. Betongprøven tas opp av herdekaret, tørkes med en fuktig klut på alle flater, og plasseres forsiktig på den underste platen slik at den ikke ligger oppå noen av naglene som fester filten til platen. Plasser prøven likt fra gang til gang, slik at samme flater måles hver gang.
8. Den øverste platen legges forsiktig på prøven, slik at ingen av naglene som fester filten til platen ligger oppå prøven. Prøv å holde platen vannrett under håndtering.
9. Loddet plasseres slik at vekten blir jevnt fordelt på den øverste platen, og motstanden leses av etter 20-30 sekunder. Det spiller liten rolle dersom det siste tallet bak punktum (komma) forandres med tiden, så lenge det skjer sakte.
10. Punkt 6-9 gjentas for hver ny måling (ny terning).
11. For hver 10. måling, eller etter en måleserie dersom det er færre enn 10 prøver, skal kortslutningsmotstanden måles. Den vil normalt øke noe fra første måling, men ikke mye.

### **Kontrollpunkter:**

1. Vannet i herdekaret bør holde romtemperatur, og ikke være nettopp skiftet. Som en retningsgiver kan motstanden i vannet måles. Dette gjøres ved å holde begge ledningenes plugg helt under vann med ca 10 cm mellomrom (hold i plastikken). Motstanden bør ikke være særlig høyere enn ca 200  $\Omega$  (jo lavere jo bedre).
2. Sjekk at filten på platene er "søkk våte."
3. Vær nøye med at den øverste platen holdes mest mulig vannrett under håndtering, slik at vannet ikke renner av filten.
4. Legg ALLTID loddet på !

## APPENDIX 5 Aktivitet A - Kloriddiffusjon (NT Build 443)

### NT Build 443:

Det er foretatt beregning av diffusjonskoeffisienter, samt verdier for hhv overflatekonsentrasjon ( $C_0$ ), inntrengt mengde klorider og  $k$  (0,1 %) (beregnet avstand fra betongoverflaten hvor kloridinnholdet i betongen er 0,1 % etter 1 års eksponering).

For alle serier er første målepunkt i kloridprofilene utelatt fra beregningene.

Bakgrunnsverdien for kloridinnhold er satt til 0,02 % for de aller fleste profiler. For betongtypene ANL-33FA og SR-STD-19FA, herdetid 730 døgn før eksponering, er det imidlertid en tendens til utflating av de målte profilene på et høyere nivå. For disse er det valgt å legge inn utflatingsnivåene som bakgrunnsnivå, hhv 0,04 %, 0,06 % og 0,07 % (ANL-33FA) og 0,03 %, 0,03 % og 0,04 % (SR-STD-19FA). Årsaken til de forhøyede bakgrunnsnivåene i disse tilfellene er ikke kjent, og det ble ikke gjort ekstra undersøkelser for evt. å oppklare forholdet.

De beregnede verdier for de ulike betongtyper er vist i Tabell 27 - Tabell 30 (middelverdier og standardavvik for 3 paralleller) og fremstilt grafisk i Figur 74 - Figur 77.

Målte kloridprofiler, 3 paralleller pr serie, er vist for samtlige betongtyper og eksponeringsaldre i Oversikt 1.

Målte kloridprofiler, middelverdier pr betongtype, er vist for hver betongtype (alle eksponeringsaldre) i Oversikt 2.

Målte kloridprofiler, middelverdier pr betongtype, er vist for hver eksponeringsalder (alle betongtyper) i Oversikt 3.

### 1 års eksponering i 3,5 % NaCl-løsning:

Det er foretatt beregning av diffusjonskoeffisienter, samt verdier for hhv overflatekonsentrasjon ( $C_0$ ), inntrengt mengde klorider og  $k$  (0,1 %) (beregnet avstand fra betongoverflaten hvor kloridinnholdet i betongen er 0,1 % etter 1 års eksponering). I dette tilfellet, hvor prøvestykkene faktisk har vært eksponert i 1 år, så representerer  $k$  (0,1 %) dybden fra overflata hvor kloridinnholdet er målt til 0,1 %.

For alle serier er første målepunkt i kloridprofilene utelatt fra beregningene. Bakgrunnsverdien for kloridinnhold er satt til 0,02 %.

De beregnede verdier for de ulike betongtyper er vist i Tabell 31 (middelverdier og standardavvik for 3 paralleller) og fremstilt grafisk i Figur 78 - Figur 81.

Målte kloridprofiler, 3 paralleller pr serie, er vist for samtlige betongtyper og eksponeringsaldre i Oversikt 4.

Målte kloridprofiler, middelverdier pr betongtype, er vist for hver betongtype i Figur 82.

### Ringtest – NT Build 443:

De beregnede verdier for de ulike betongtyper i ringtesten er vist i Tabell 32 - Tabell 35 (middelverdier og standardavvik for 6 paralleller) og fremstilt grafisk i Figur 83 - Figur 86. I Figur 87 er beregnede diffusjonskoeffisienter sammenstilt med beregnede diffusjonskoeffisienter for samme betongtyper, basert på prøving utført ved Sentrallab. (Tabell 27, kolonne 3: 90 døgn).

Målte kloridprofiler, 6 paralleller pr SINTEF-serie og 6 paralleller pr SVV-serie, samt middelverdier for hver serie, er vist for de ulike betongtyper i Oversikt 5.



**Tabell 27 Beregnede diffusjonskoeffisienter,  $D$  ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), etter 35 døgns eksponering iht NT Build 443. Middelerverdier av 3 paralleller (standardavvik i kursiv)**

Betongtype	NT Build 443 Alder ved start eksponering			
	3 dogn	90 dogn	365 dogn	730 dogn
ANL (ref)	7,5	2,6 <sup>*)</sup>	2,5	1,9
	<i>0,6</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,1</i>
ANL 19FA	9,9	2,8	1,9	2,0
	<i>1,3</i>	<i>0,5</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>
ANL 33FA	13,5	2,2	2,0	2,3
	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>
SR	7,2	6,3	4,1	5,0
	<i>0,8</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,9</i>
SR 19FA	10,6	3,2	2,4	2,0
	<i>1,7</i>	<i>0,7</i>	<i>0,1</i>	<i>0,1</i>
SR 33FA	9,5	4,7	2,0	2,3
	<i>1,1</i>	<i>0,7</i>	<i>0,4</i>	<i>0,3</i>
STD(20%) SR(80%) 19FA	9,8	3,3	2,4	1,9
	<i>1,0</i>	<i>1,0</i>	<i>0,2</i>	<i>0,0</i>

\*) Ved en feil ble prøvestykkene lagt i 16,5% NaCl-løsning i stedet for mettet  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -løsning før påføring av epoksy. Prøvestykkene lå i NaCl-løsning i 6 dogn.

**Tabell 28 Beregnede overflatekonsentrasjoner,  $C_0$  (% av betongvekt), etter 35 døgns eksponering iht NT Build 443. Middelerverdier av 3 paralleller (stdavvik i kursiv)**

Betongtype	NT Build 443 Alder ved start eksponering			
	3 dogn	90 dogn	365 dogn	730 dogn
ANL (ref)	0,88	1,09 <sup>*)</sup>	0,81	0,71
	<i>0,06</i>	<i>0,23</i>	<i>0,06</i>	<i>0,07</i>
ANL 19FA	0,86	0,98	0,71	0,51
	<i>0,15</i>	<i>0,12</i>	<i>0,08</i>	<i>0,11</i>
ANL 33FA	1,01	0,70	0,57	0,41
	<i>0,06</i>	<i>0,06</i>	<i>0,04</i>	<i>0,06</i>
SR	0,83	0,73	0,82	0,82
	<i>0,10</i>	<i>0,06</i>	<i>0,08</i>	<i>0,09</i>
SR 19FA	0,85	1,11	0,71	0,72
	<i>0,05</i>	<i>0,18</i>	<i>0,06</i>	<i>0,08</i>
SR 33FA	0,89	0,95	0,70	0,67
	<i>0,06</i>	<i>0,06</i>	<i>0,17</i>	<i>0,08</i>
STD(20%) SR(80%) 19FA	0,92	0,77	0,65	0,87
	<i>0,07</i>	<i>0,16</i>	<i>0,06</i>	<i>0,09</i>

\*) Ved en feil ble prøvestykkene lagt i 16,5% NaCl-løsning i stedet for mettet  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -løsning før påføring av epoksy. Prøvestykkene lå i NaCl-løsning i 6 dogn.

**Tabell 29 Totalt inntrengt mengde klorider, (g Cl / m<sup>2</sup>), etter 35 døgns eksponering iht NT Build 443. Middelerverdier av 3 paralleller (standardavvik i kursiv)**

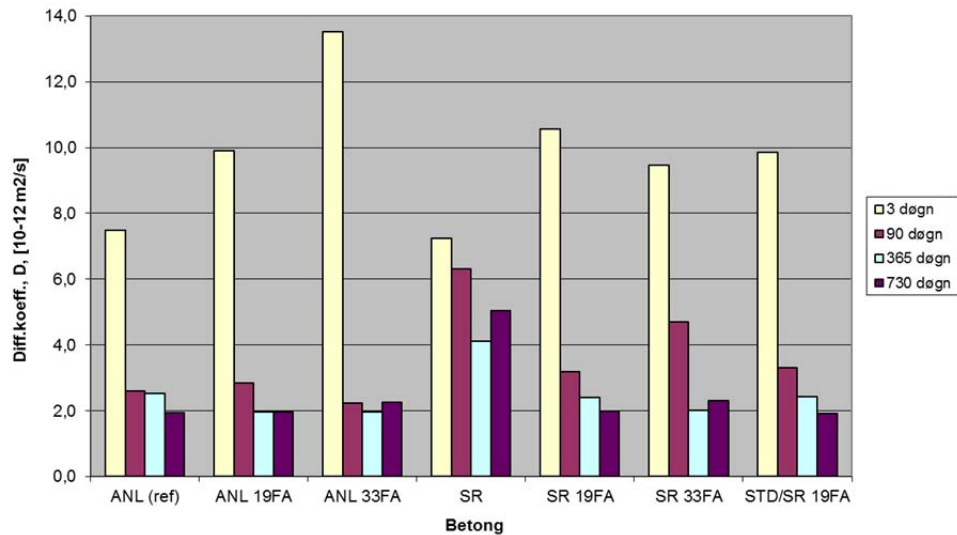
Betongtype	NT Build 443 Alder ved start eksponering			
	3 døgn	90 døgn	365 døgn	730 døgn
ANL (ref)	128	105 <sup>*)</sup>	84	67
	<i>3</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	<i>5</i>
ANL 19FA	144	97	73	59
	<i>25</i>	<i>0</i>	<i>4</i>	<i>7</i>
ANL 33FA	194	64	68	51
	<i>11</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<i>6</i>
SR	125	105	93	109
	<i>9</i>	<i>5</i>	<i>5</i>	<i>10</i>
SR 19FA	151	121	67	67
	<i>16</i>	<i>10</i>	<i>3</i>	<i>9</i>
SR 33FA	148	110	69	78
	<i>10</i>	<i>10</i>	<i>7</i>	<i>6</i>
STD(20%) SR(80%) 19FA	153	82	71	81
	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>4</i>	<i>2</i>

\*) Ved en feil ble prøvestykkene lagt i 16,5% NaCl-løsning i stedet for mettet Ca(OH)<sub>2</sub>-løsning før påføring av epoksy. Prøvestykkene lå i NaCl-løsning i 6 døgn.

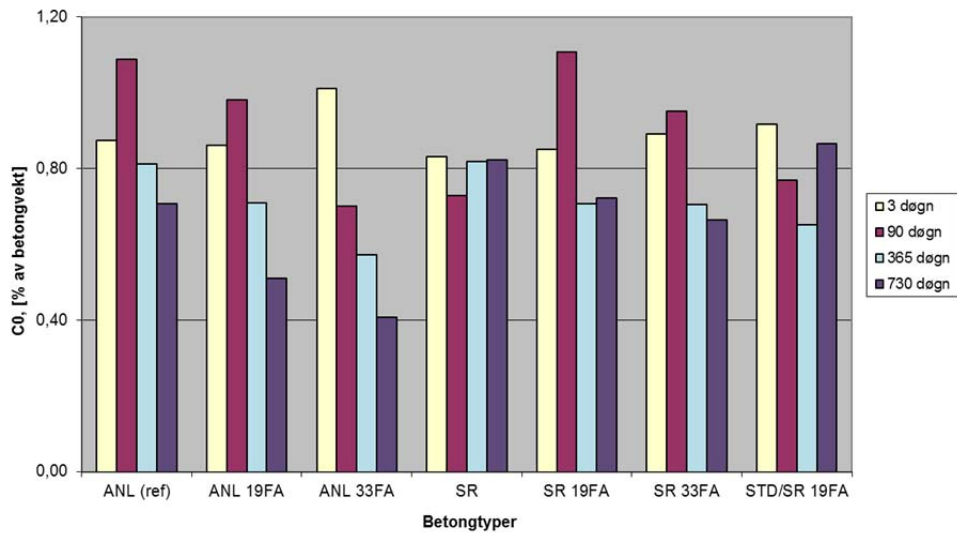
**Tabell 30 Beregnet avstand fra betongoverflaten hvor kloridinnholdet i betongen er 0,1% etter 1 års eksponering (k (0,1%), mm), etter 35 døgns eksponering iht NT Build 443. Middelerverdier av 3 paralleller (standardavvik i kursiv)**

Betongtype	NT Build 443 Alder ved start eksponering			
	3 døgn	90 døgn	365 døgn	730 døgn
ANL (ref)	36,4	22,6 <sup>*)</sup>	20,6	17,3
	<i>0,6</i>	<i>1,2</i>	<i>1,9</i>	<i>0,3</i>
ANL 19FA	41,4	23,0	17,4	15,4
	<i>2,8</i>	<i>1,1</i>	<i>0,6</i>	<i>1,2</i>
ANL 33FA	51,0	18,6	16,2	18,5
	<i>1,3</i>	<i>1,4</i>	<i>0,2</i>	<i>1,8</i>
SR	35,2	31,6	26,4	29,1
	<i>1,1</i>	<i>1,3</i>	<i>0,7</i>	<i>1,8</i>
SR 19FA	42,9	25,1	19,3	17,7
	<i>4,1</i>	<i>1,7</i>	<i>0,6</i>	<i>0,8</i>
SR 33FA	41,2	29,5	17,3	18,5
	<i>1,7</i>	<i>2,0</i>	<i>0,6</i>	<i>0,8</i>
STD(20%) SR(80%) 19FA	42,3	22,9	18,9	19,3
	<i>1,5</i>	<i>2,4</i>	<i>0,6</i>	<i>0,9</i>

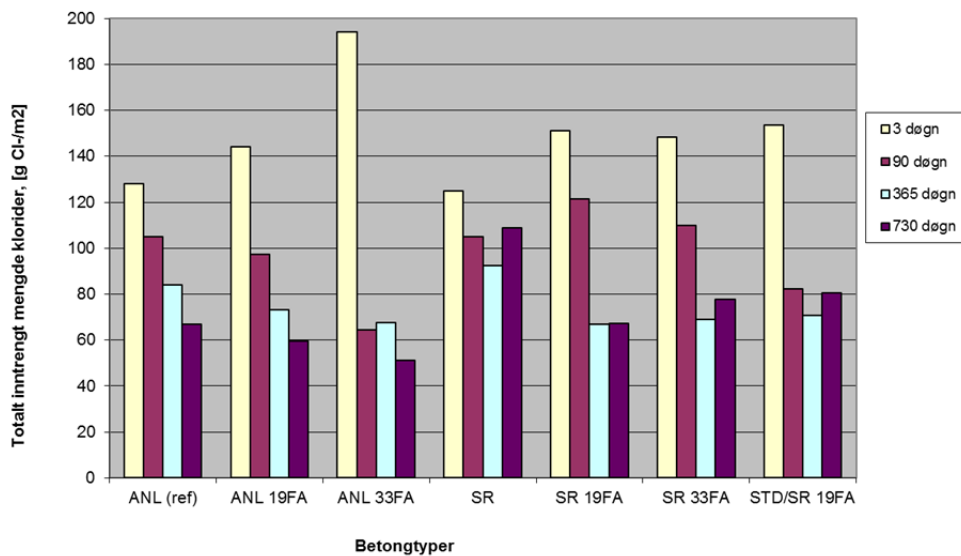
\*) Ved en feil ble prøvestykkene lagt i 16,5% NaCl-løsning i stedet for mettet Ca(OH)<sub>2</sub>-løsning før påføring av epoksy. Prøvestykkene lå i NaCl-løsning i 6 døgn.



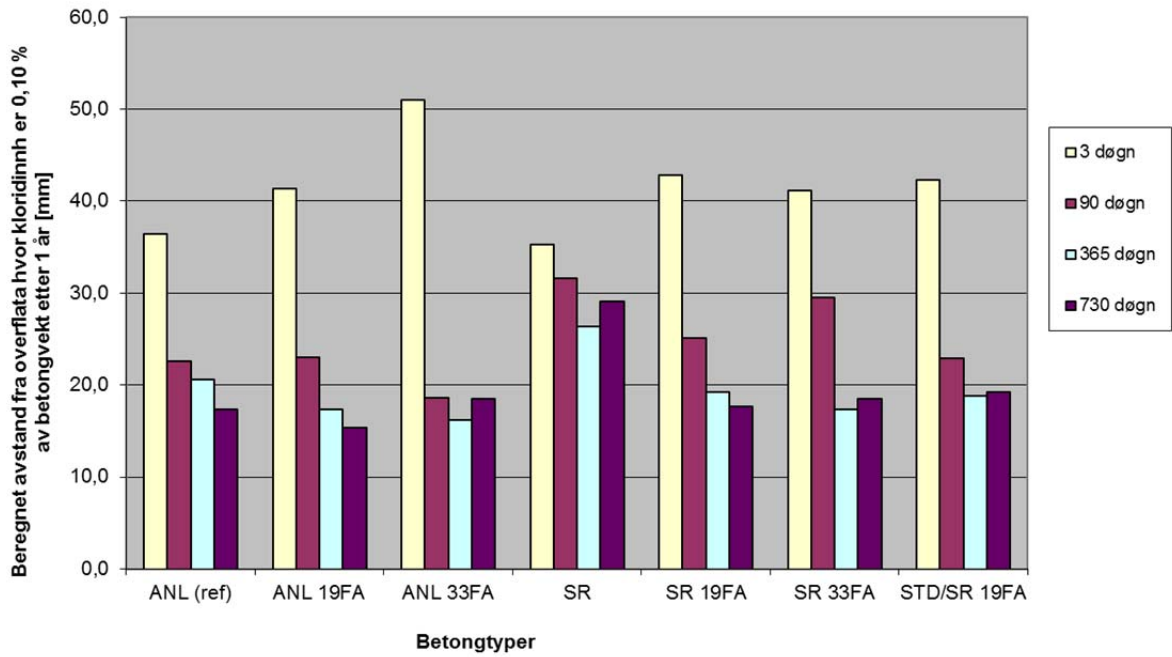
Figur 74 Beregnede kloriddiffusjonskoeffisienter, samtlige betongtyper og eksponeringsaldre



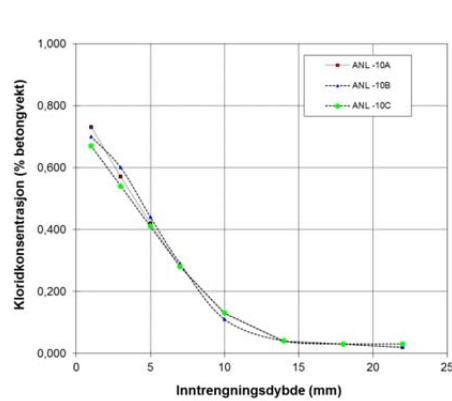
Figur 75 Beregnede overflatekonsentrasjoner, samtlige betongtyper og eksponeringsaldre



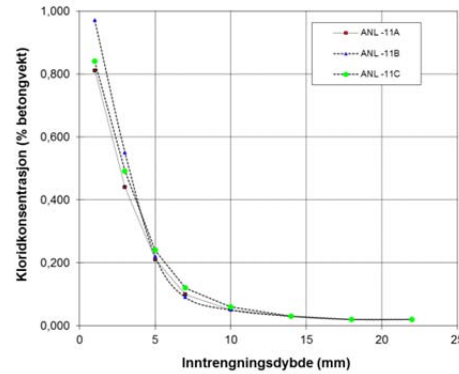
Figur 76 Beregnet totalt inntrengt mengde klorider, samtlige betongtyper og eksponeringsaldre



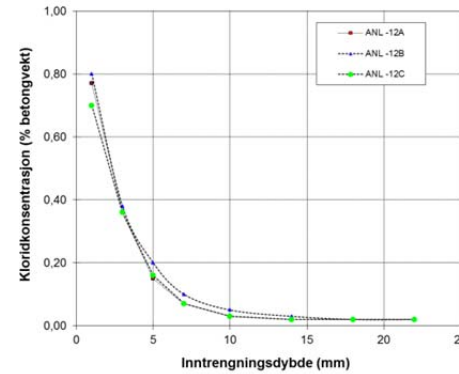
**Figur 77** Beregnet avstand fra overflata hvor kloridinnholdet er 0,10 % etter 1 år, samtlige betongtyper og eksponeringsaldre



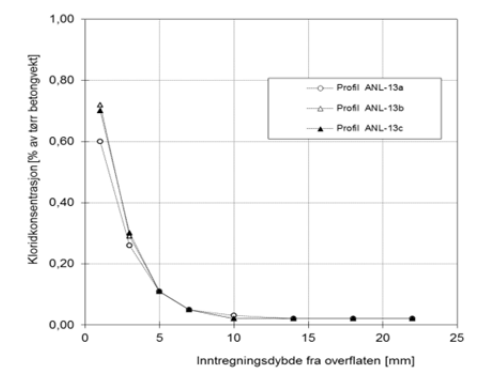
ANL – 3 dg



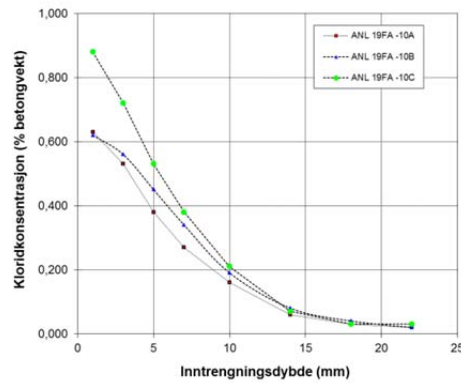
ANL – 90 dg



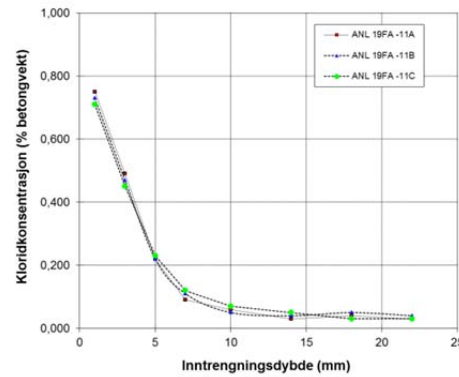
ANL – 365 dg



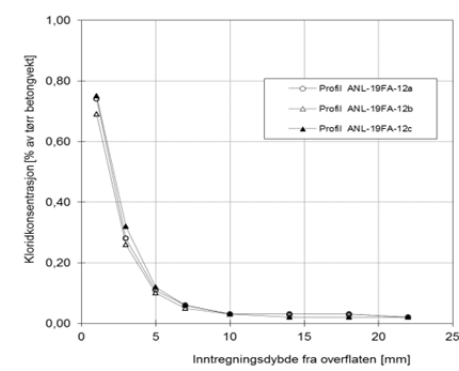
ANL – 730 dg



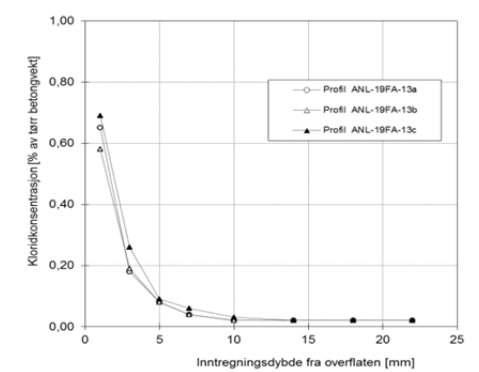
ANL-19FA – 3 dg



ANL-19FA – 90 dg

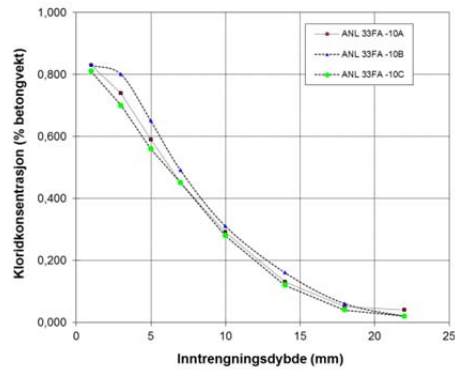


ANL-19FA – 365 dg

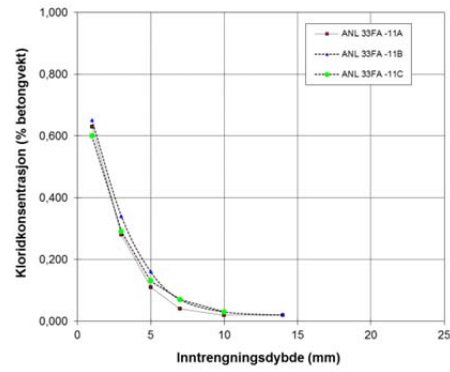


ANL-19FA – 730 dg

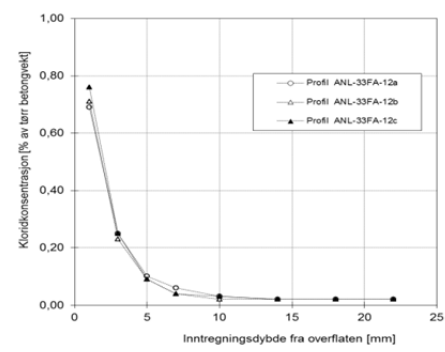
**Oversikt 1: Målte kloridprofiler, 3 paralleller pr serie, for samtlige betongtyper og eksponeringsaldre**



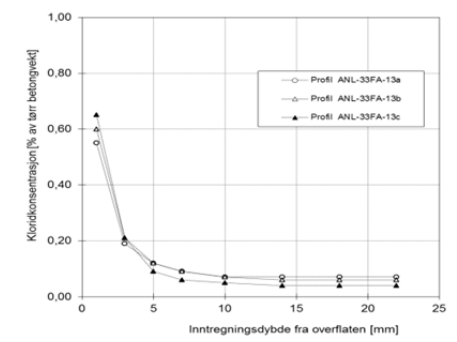
ANL-33FA – 3 dg



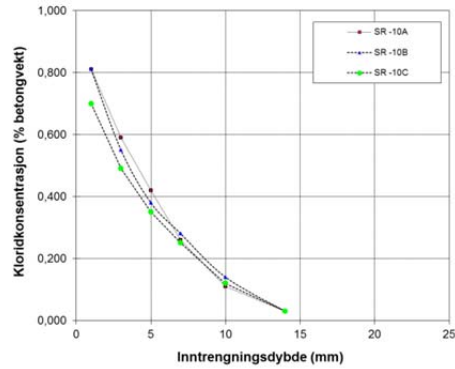
ANL-33FA – 90 dg



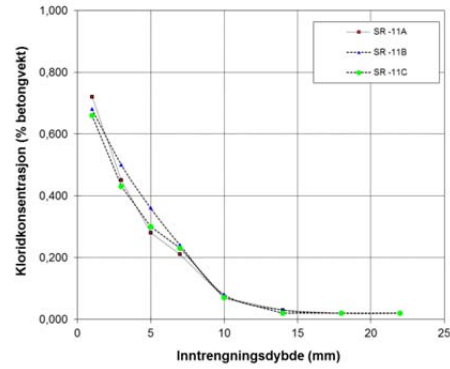
ANL-33FA – 365 dg



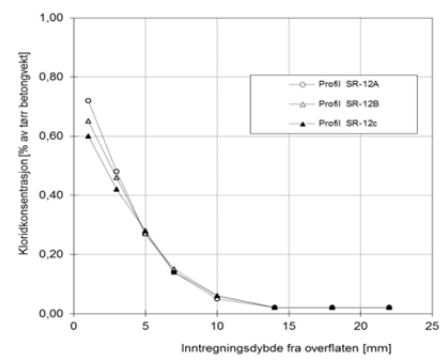
ANL-33FA – 730 dg



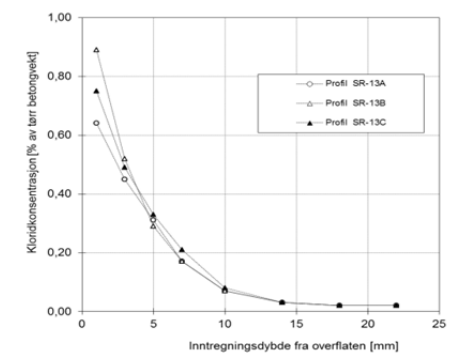
SR – 3 dg



SR – 90 dg

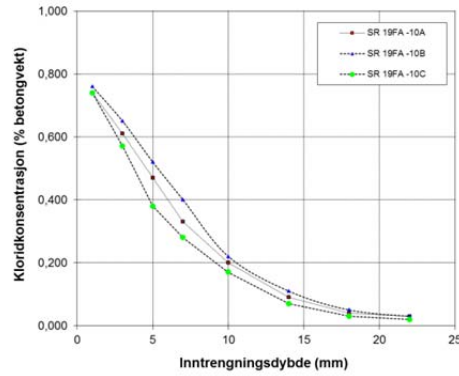


SR – 365 dg

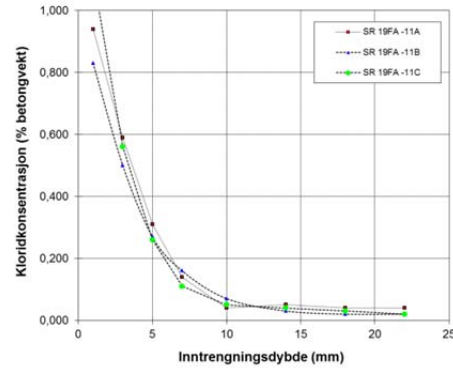


SR – 730 dg

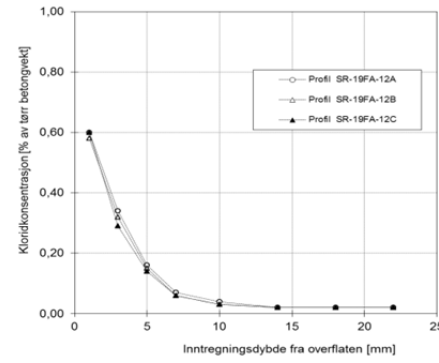
Oversikt 1 (forts)



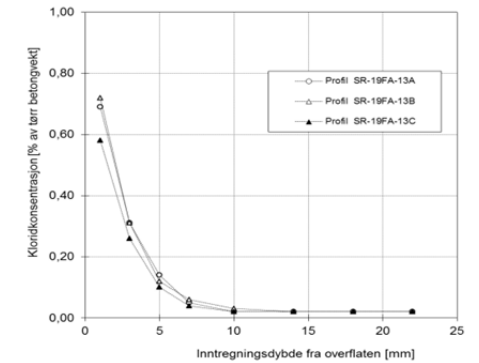
SR-19FA – 3 dg



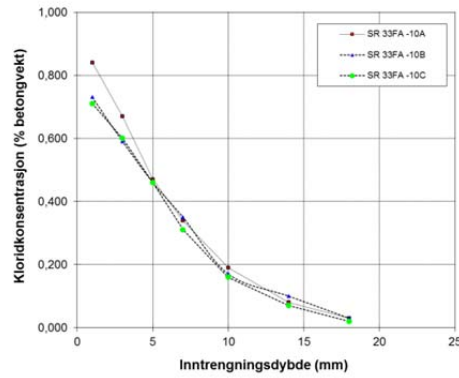
SR-19FA – 90 dg



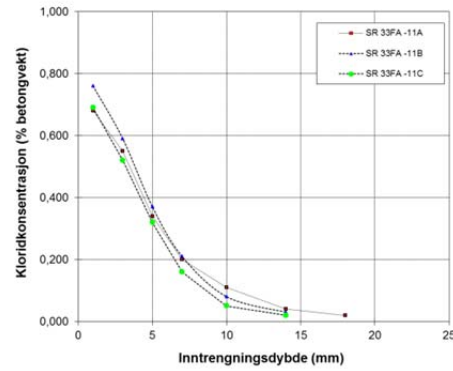
SR-19FA – 365 dg



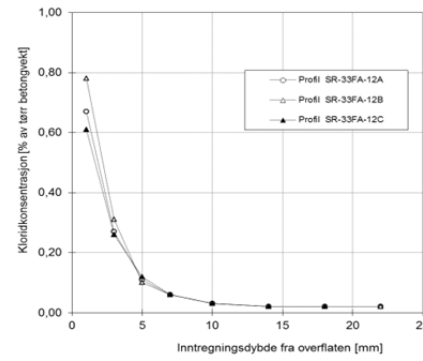
SR-19FA – 730 dg



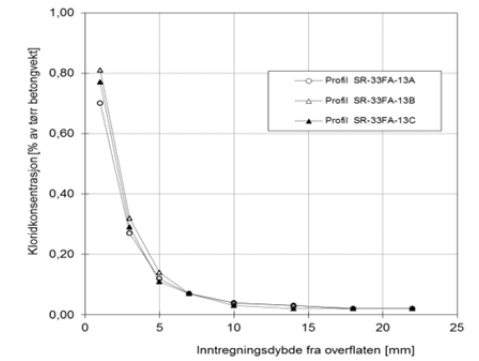
SR-33FA – 3 dg



SR-33FA – 90 dg

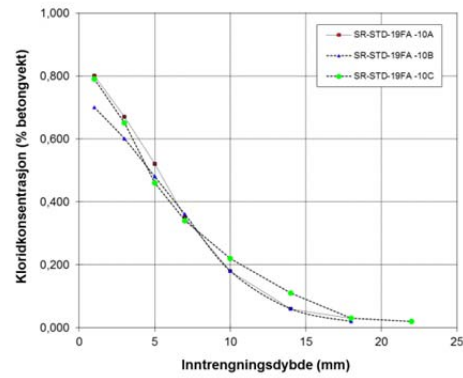


SR-33FA – 365 dg

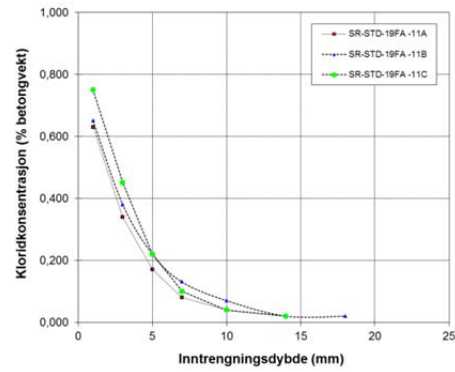


SR-33FA – 730 dg

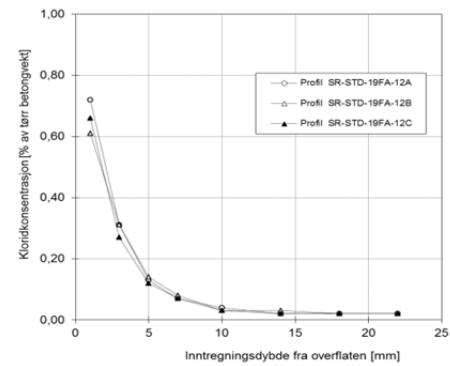
Oversikt 1 (forts)



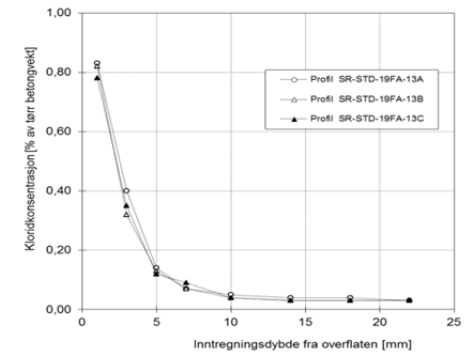
SR-STD-19FA – 3 dg



SR-STD-19FA – 90 dg



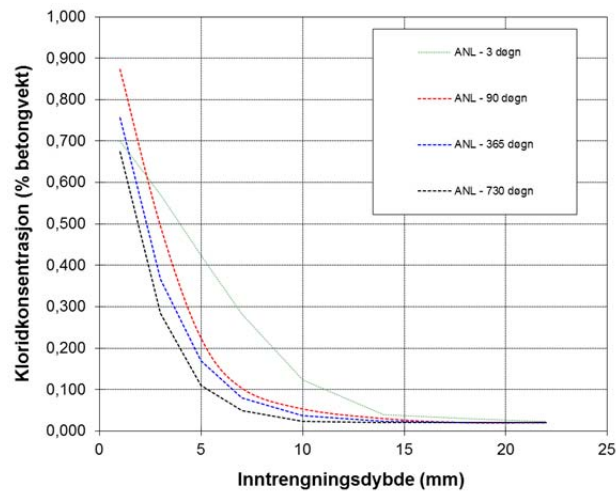
SR-STD-19FA – 365 dg



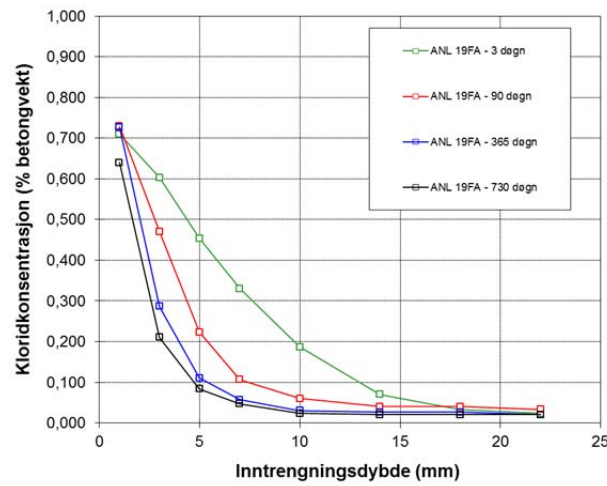
SR-STD-19FA – 730 dg

Oversikt 1 (forts)

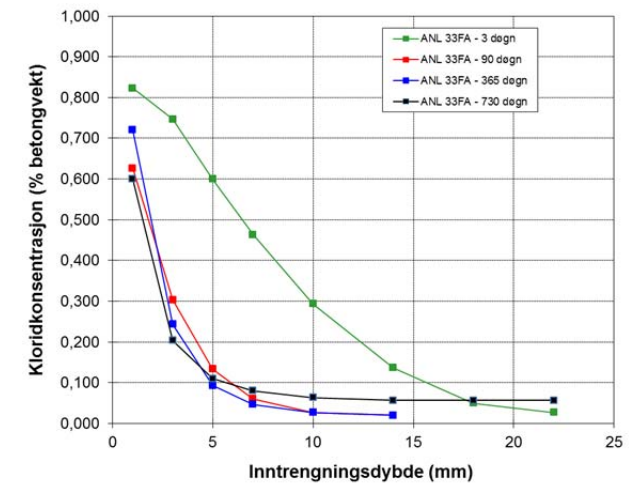




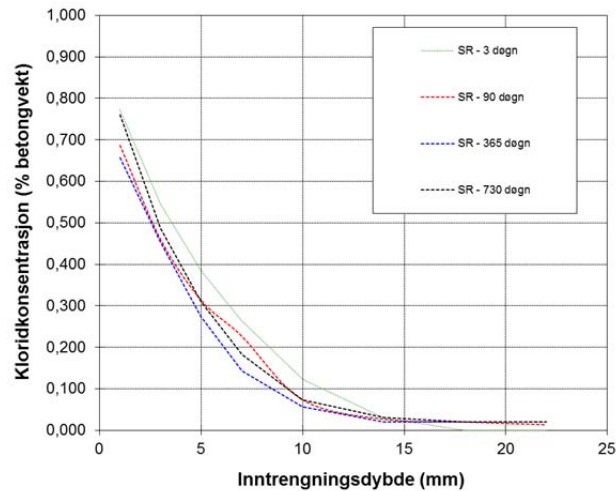
ANL



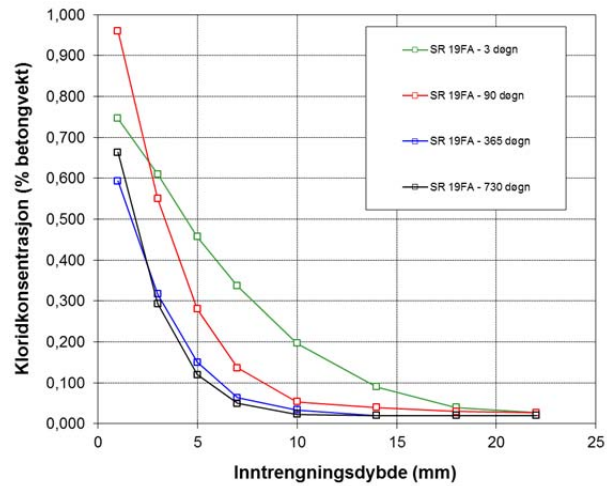
ANL-19FA



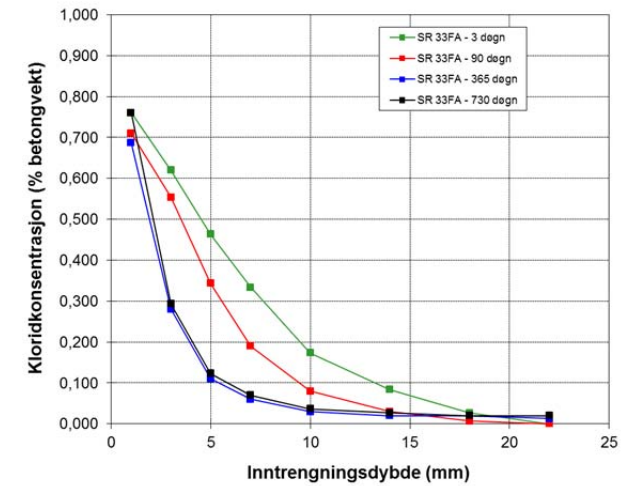
ANL-33FA



SR

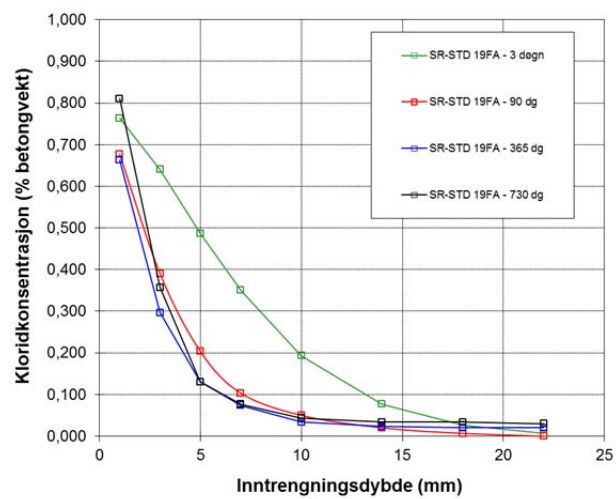


SR-19FA



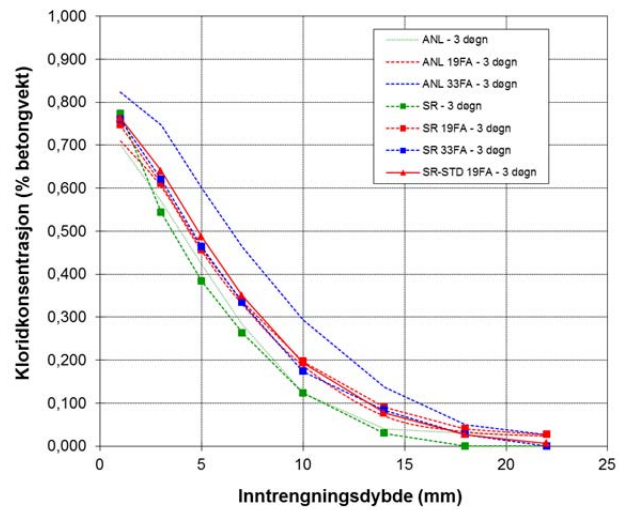
SR-33FA

**Oversikt 2: Målte kloridprofiler, middelverdier pr serie, for hver betongtype (alle eksponeringsaldre)**

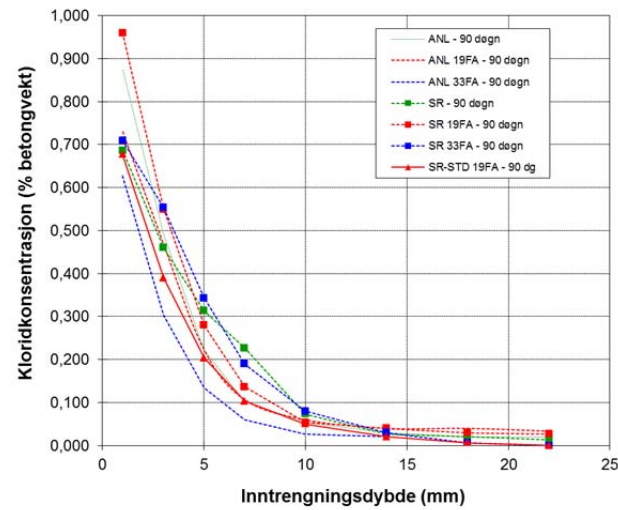


SR-STD-19FA

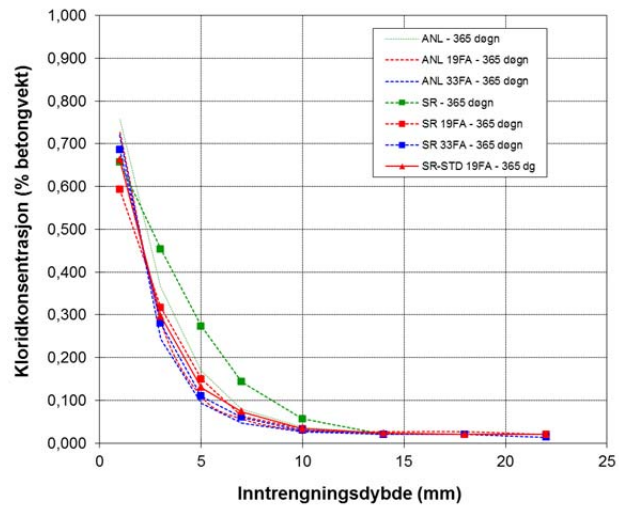
Oversikt 2 (forts)



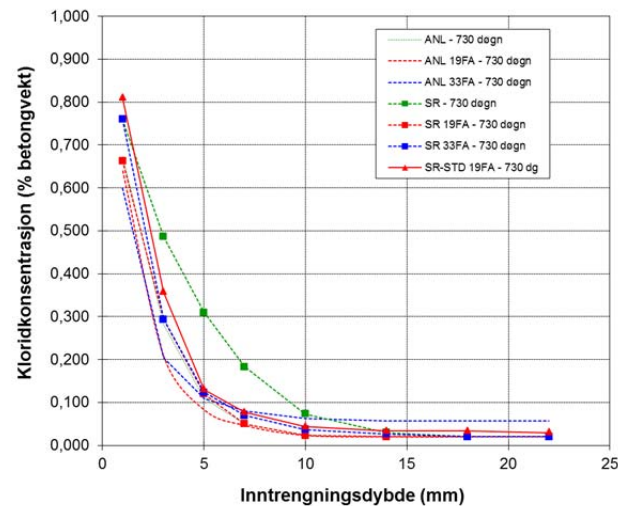
3 døgns herdetid før eksponering



90 døgns herdetid før eksponering



365 døgns herdetid før eksponering

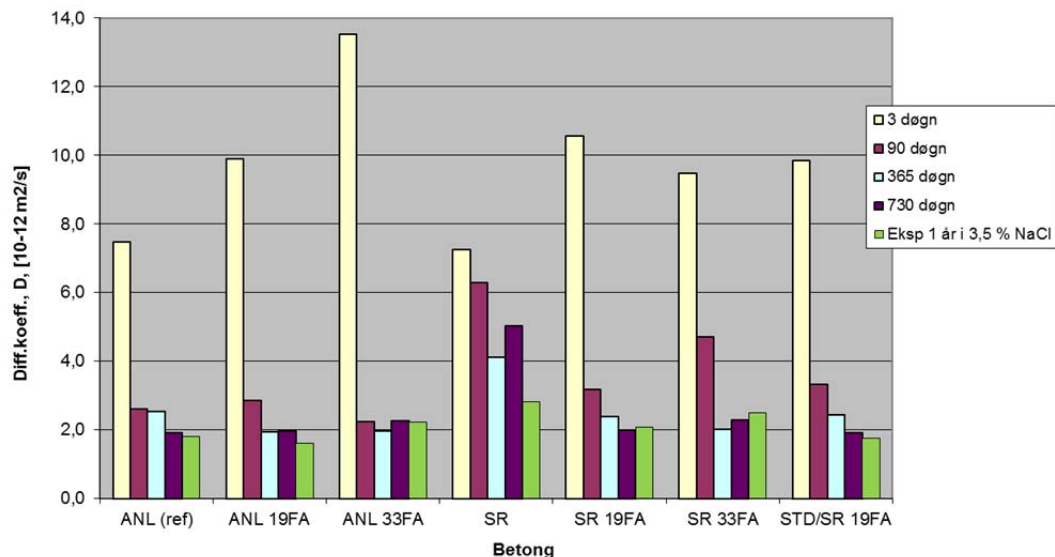


730 døgns herdetid før eksponering

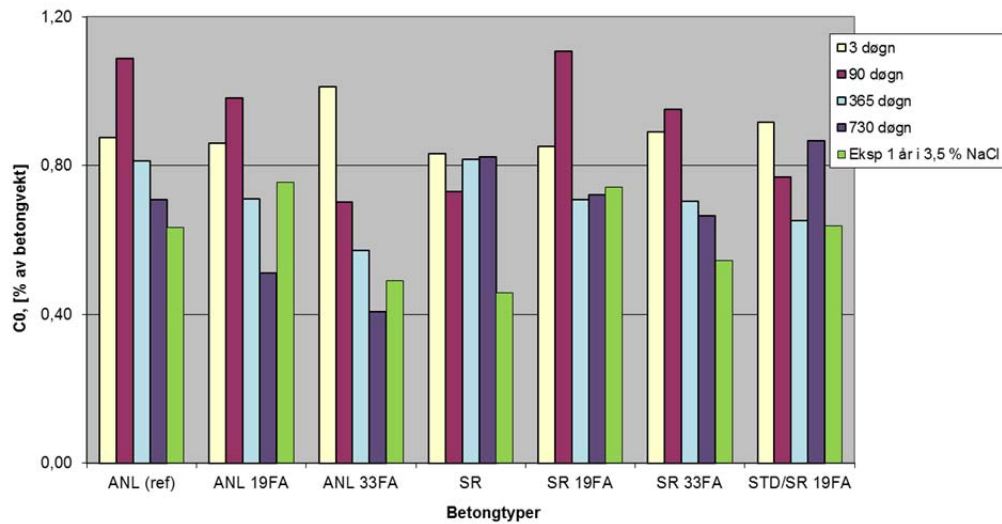
**Oversikt 3: Målte kloridprofiler, middelverdier pr serie, for hver eksponeringsalder (alle betongtyper)**

**Tabell 31** Beregnede diffusjonskoeffisienter,  $D$ , overflatekonsentrasjon,  $C_0$ , totalt inntrengt mengde klorider og  $k$  (0,1%), etter 1 års eksponering i 3,5 % NaCl-løsning. Middelerverdier av 3 paralleller (standardavvik i kursiv)

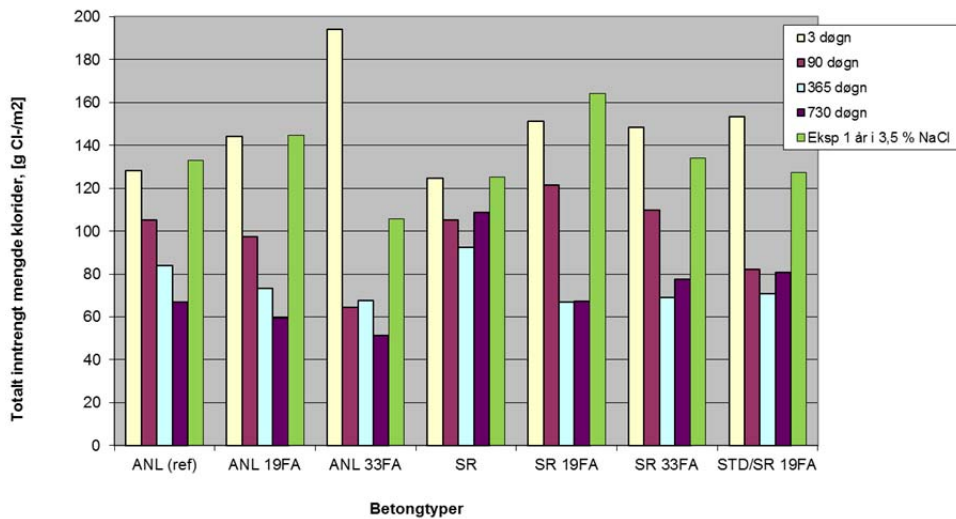
Betongtype	Eksponert neddykket i 3,5 % NaCl-løsning i 1 år			
	$D$ ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	$C_0$ (% av betongvekt)	Inntrengt mengde klorider (g Cl <sup>-</sup> / m <sup>2</sup> )	$k$ (0,1 %) (mm)
ANL (ref)	1,8 <i>0,1</i>	0,63 <i>0,03</i>	133 <i>4</i>	16,2 <i>0,4</i>
ANL 19FA	1,6 <i>0,1</i>	0,75 <i>0,03</i>	145 <i>11</i>	16,1 <i>0,8</i>
ANL 33FA	2,2 <i>0,2</i>	0,49 <i>0,03</i>	106 <i>6</i>	16,2 <i>0,5</i>
SR	2,8 <i>0,2</i>	0,46 <i>0,03</i>	125 <i>2</i>	17,8 <i>0,3</i>
SR 19FA	2,1 <i>0,2</i>	0,74 <i>0,03</i>	164 <i>5</i>	18,2 <i>0,7</i>
SR 33FA	2,5 <i>0,2</i>	0,55 <i>0,03</i>	134 <i>7</i>	17,9 <i>0,6</i>
STD(20%) SR(80%) 19FA	1,8 <i>0,1</i>	0,64 <i>0,05</i>	127 <i>5</i>	15,9 <i>0,2</i>



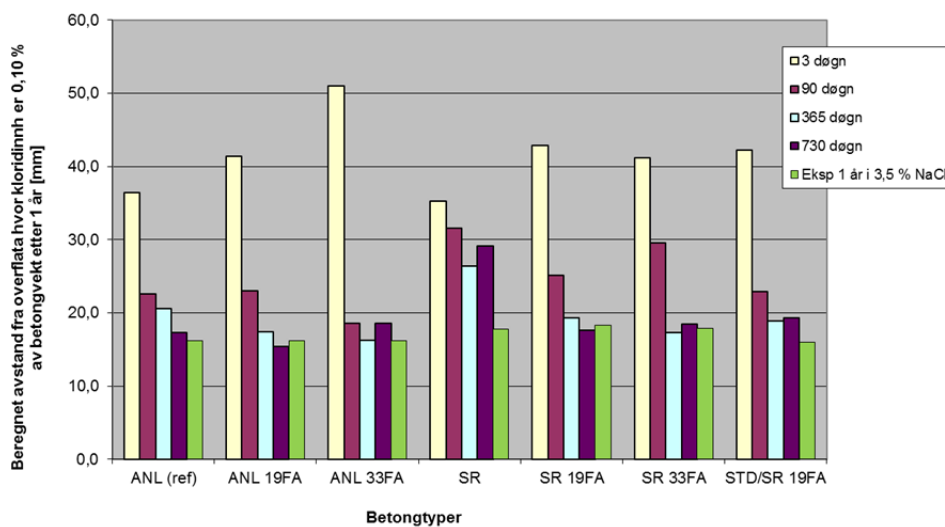
**Figur 78** Beregnede kloriddiffusjonskoeffisienter etter 1 års lagring i 3,5 % NaCl-løsning. Sammenstilt med beregnede verdier etter NT Build 443 (samtlige betongtyper og eksponeringsaldre)



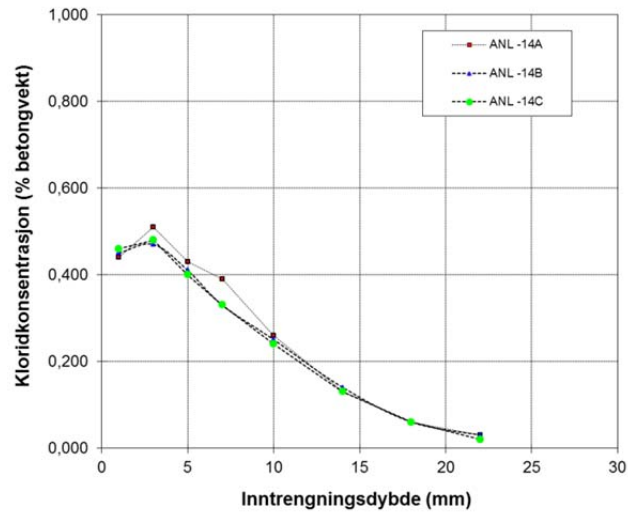
Figur 79 Beregnede overflatekonsentrasjoner etter 1 års lagring i 3,5 % NaCl-løsning. Sammenstilt med beregnede verdier etter NT Build 443 (samtlige betongtyper og eksponeringsaldre)



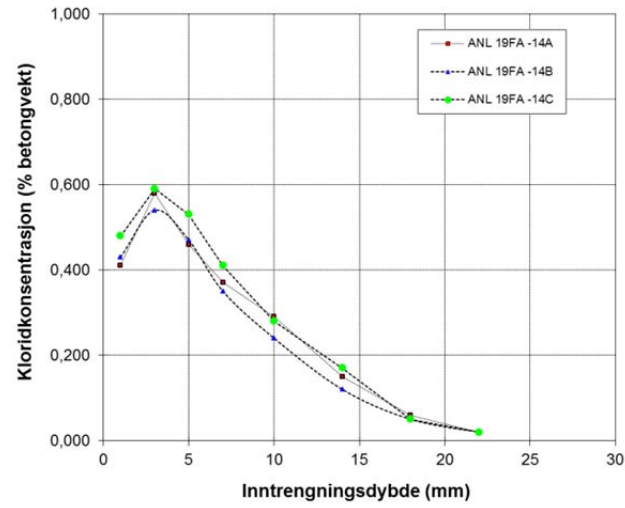
Figur 80 Totalt inntrengt mengde klorider, beregnet etter 1 års lagring i 3,5 % NaCl-løsning. Sammenstilt med beregnede verdier etter NT Build 443 (samtlige betongtyper og eksponeringsaldre)



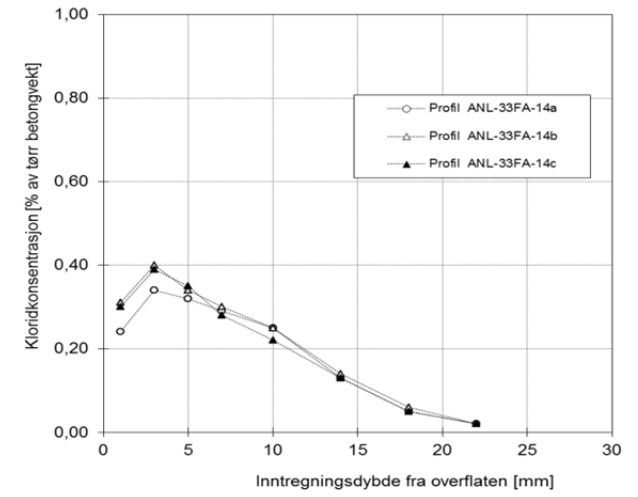
Figur 81 Avstand fra overflata hvor kloridinnholdet er 0,10 % etter 1 års lagring i 3,5 % NaCl-løsning. Sammenstilt med beregnede verdier iht NT Build 443 (samtlige betongtyper og eksponeringsaldre)



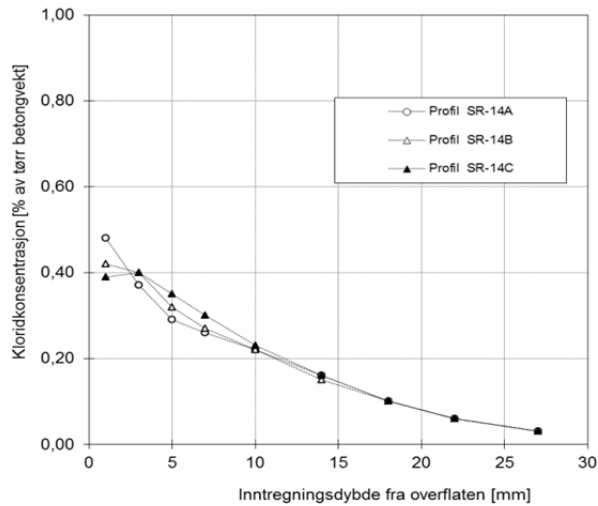
ANL



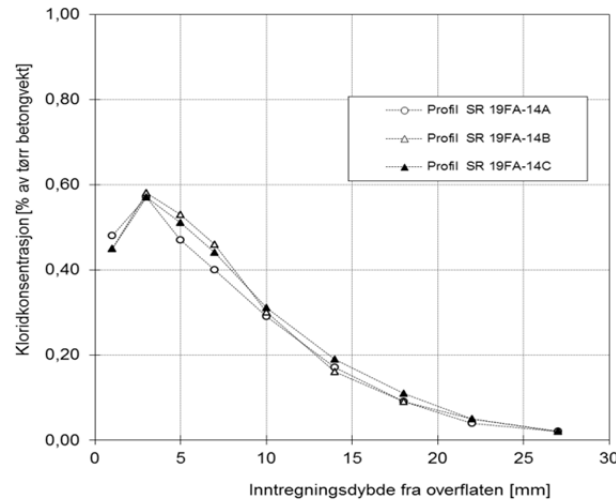
ANL-19FA



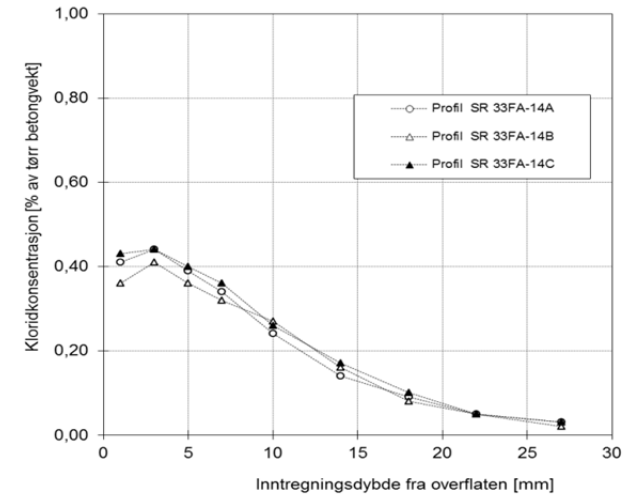
ANL-33FA



SR

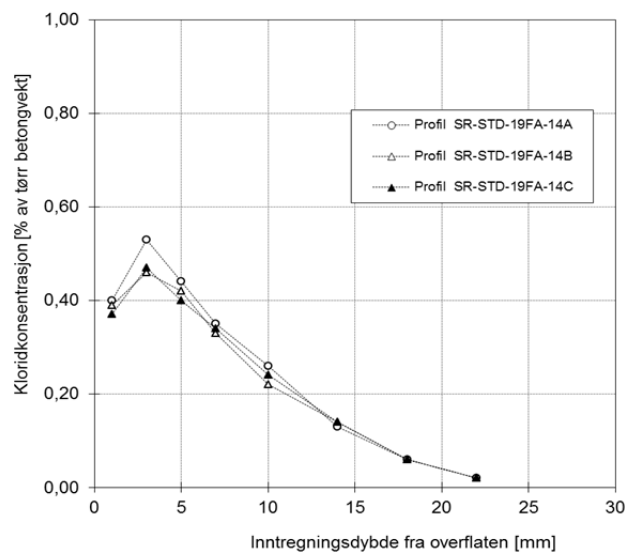


SR-19FA



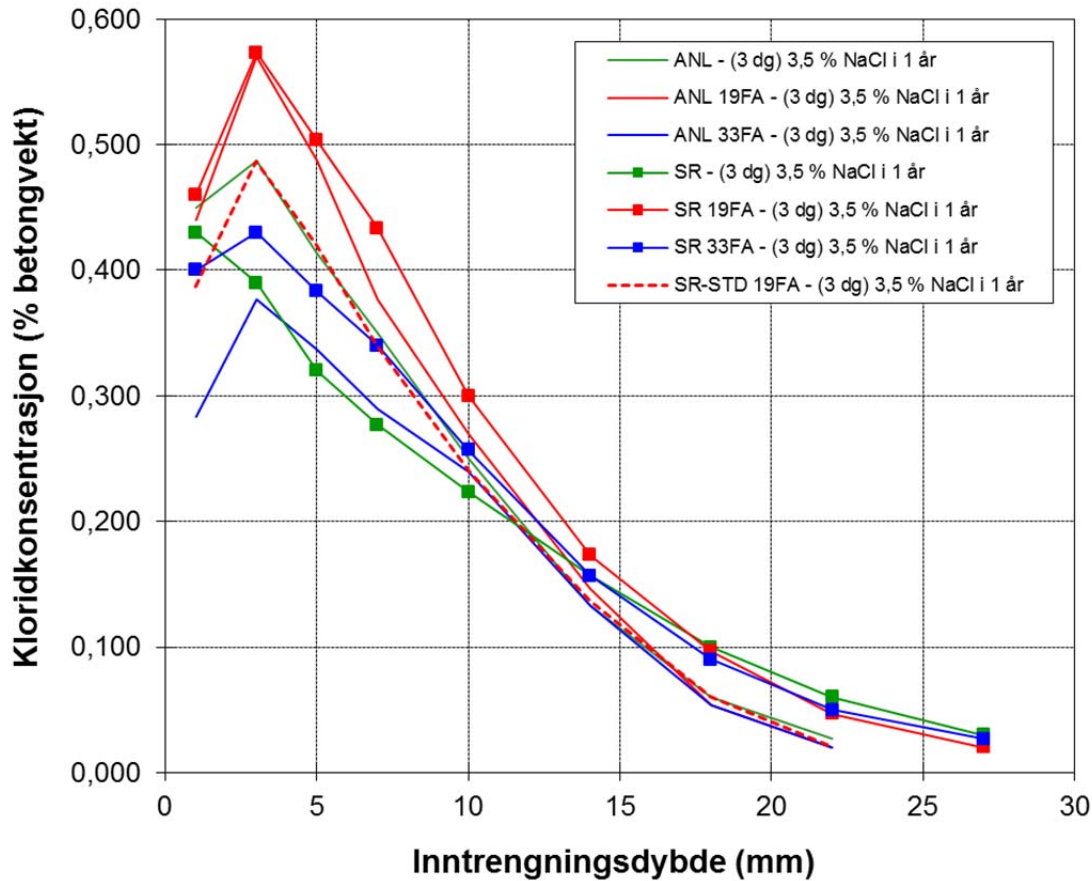
SR-33FA

**Oversikt 4: Målte kloridprofiler, 3 paralleller pr serie, for samtlige betongtyper etter 1 års eksponering i 3,5 % Na Cl-løsning**



SR-STD-19FA

**Oversikt 4 (forts)**



Figur 82 Målte kloridprofiler, middelerverdier av 3 paralleller, etter 1 års lagring i 3,5 % NaCl-løsning.

Tabell 32 RINGTEST - Beregnede diffusjonskoeffisienter,  $D$  ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), etter 35 døgns eksponering iht NT Build 443. Middelerverdier av 6 paralleller (stdavvik i kursiv)

Betongtype	Ringtest 90 dg		
	SINTEF	SVV	middel
ANL (ref)	2,7 <i>0,2</i>	3,3 <i>0,3</i>	3,0
ANL 19FA	2,3 <i>0,2</i>	3,1 <i>0,4</i>	2,7
ANL 33FA	2,6 <i>0,4</i>	3,3 <i>0,4</i>	3,0
STD(20%) SR(80%) 19FA	3,0 <i>0,6</i>	3,5 <i>0,3</i>	3,2



**Tabell 33 RINGTEST - Beregnede overflatekonsentrasjoner,  $C_0$  (% av betongvekt), etter 35 døgns eksponering iht NT Build 443. Middelerverdier av 6 paralleller (stdav i kursiv)**

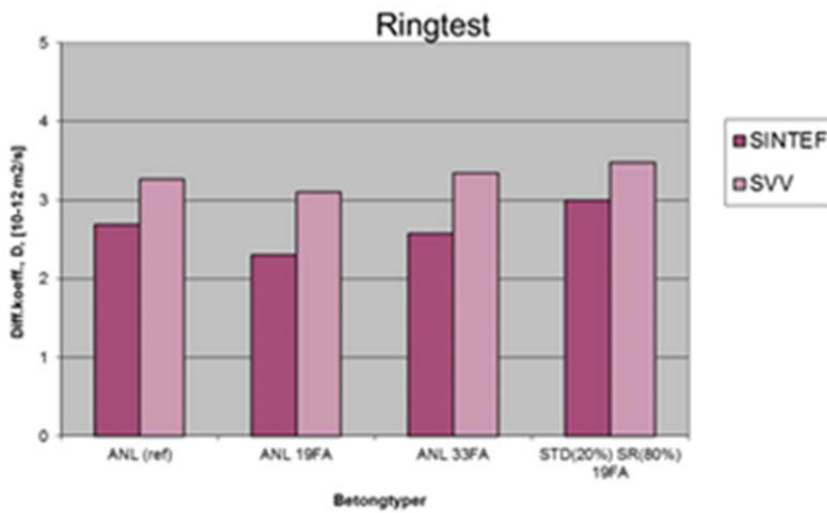
Betongtype	Ringtest 90 dg		
	SINTEF	SVV	middel
ANL (ref)	0,9 <i>0,2</i>	0,8 <i>0,1</i>	0,9
ANL 19FA	0,9 <i>0,1</i>	0,8 <i>0,1</i>	0,9
ANL 33FA	0,8 <i>0,1</i>	0,9 <i>0,1</i>	0,8
STD(20%) SR(80%) 19FA	0,8 <i>0,1</i>	0,8 <i>0,1</i>	0,8

**Tabell 34 RINGTEST - Totalt inntrengt mengde klorider, ( $\text{g Cl}^- / \text{m}^2$ ), etter 35 døgns eksponering iht NT Build 443. Middelerverdier av 6 paralleller.**

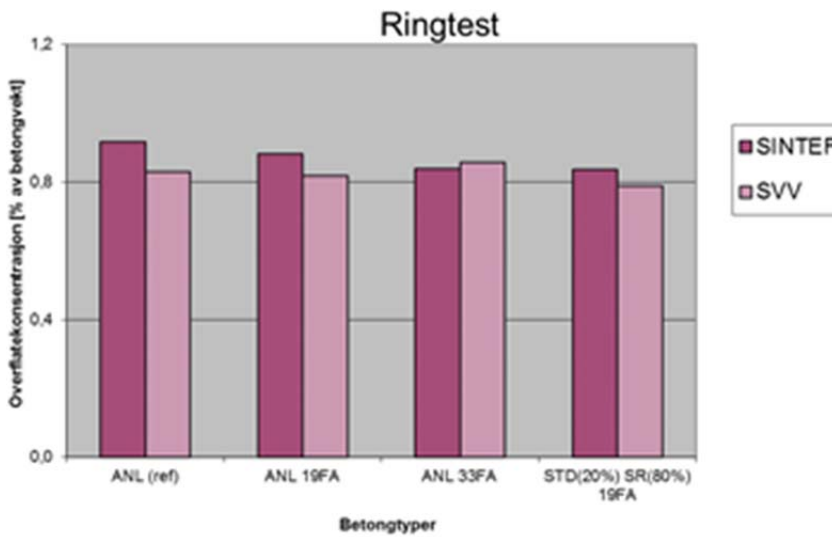
Betongtype	Ringtest 90 dg		
	SINTEF	SVV	middel
ANL (ref)	82,4	79,6	81,0
ANL 19FA	74,2	76,2	75,2
ANL 33FA	71,5	81,8	76,6
STD(20%) SR(80%) 19FA	77,5	76,8	77,2

**Tabell 35 RINGTEST - Beregnet avstand fra betongoverflaten hvor kloridinnholdet i betongen er 0,1% etter 1 års eksponering ( $k$  (0,1%), mm), etter 35 døgns eksponering iht NT Build 443. Middelerverdier av 6 paralleller.**

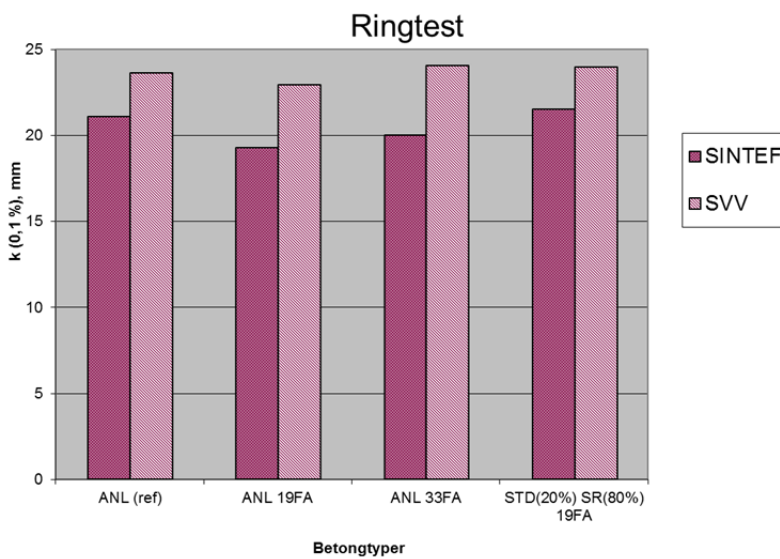
Betongtype	Ringtest 90 dg		
	SINTEF	SVV	middel
ANL (ref)	21,1	23,6	22,4
ANL 19FA	19,3	22,9	21,1
ANL 33FA	20,0	24,1	22,0
STD(20%) SR(80%) 19FA	21,5	24,0	22,7



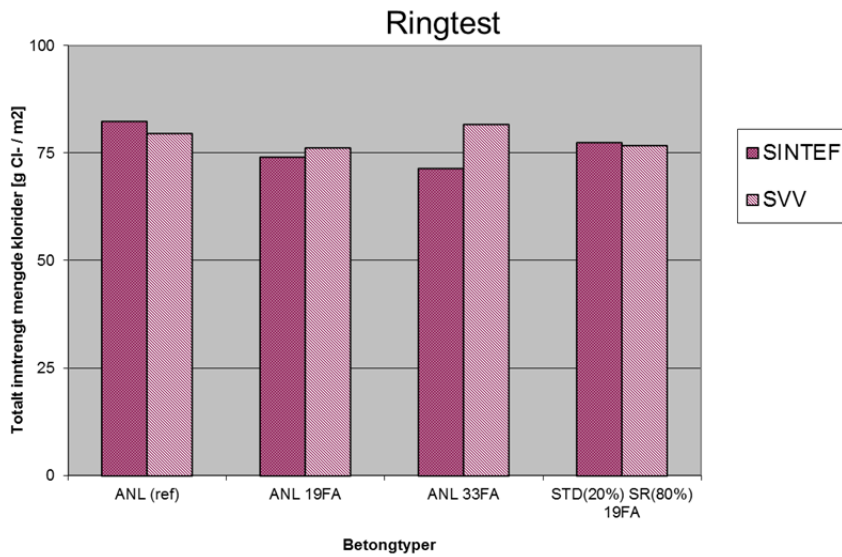
Figur 83 Beregnede kloriddiffusjonskoeffisienter, hhv ved SINTEF og SVV



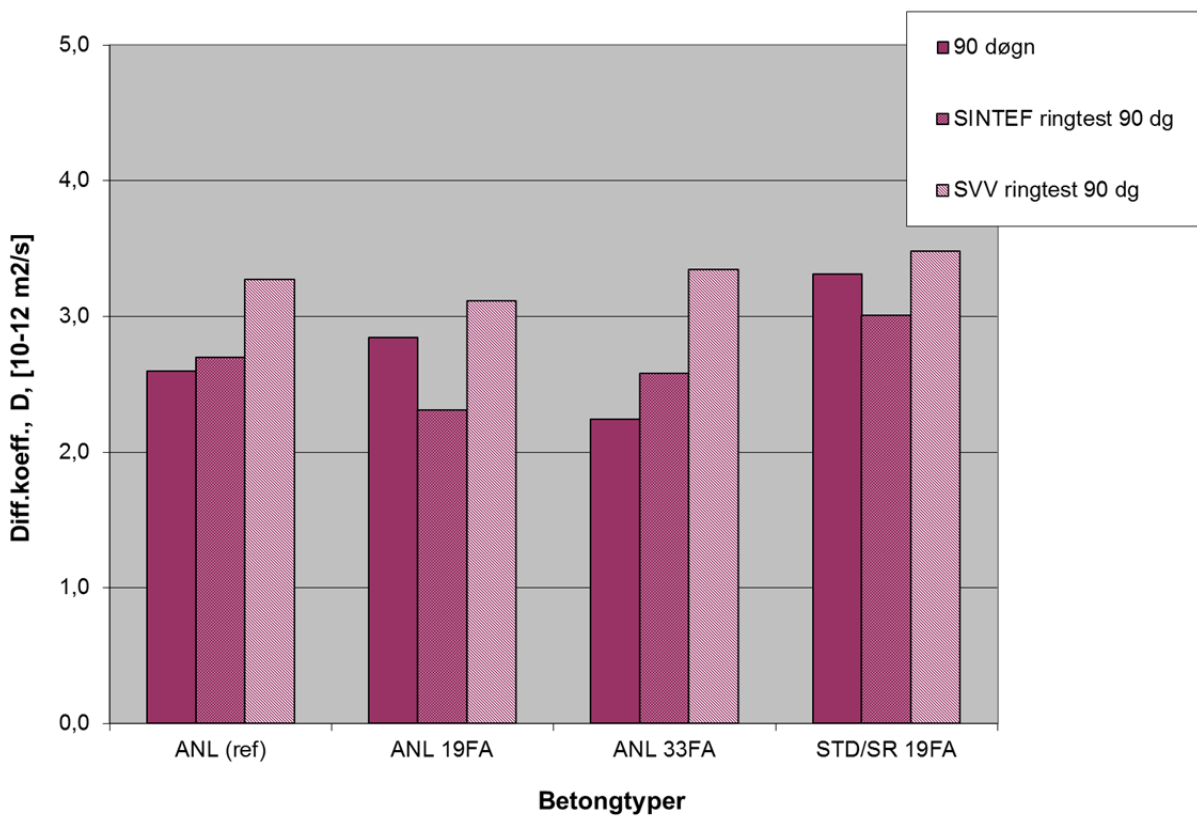
Figur 84 Beregnede overflatekonsentrasjoner, hhv ved SINTEF og SVV



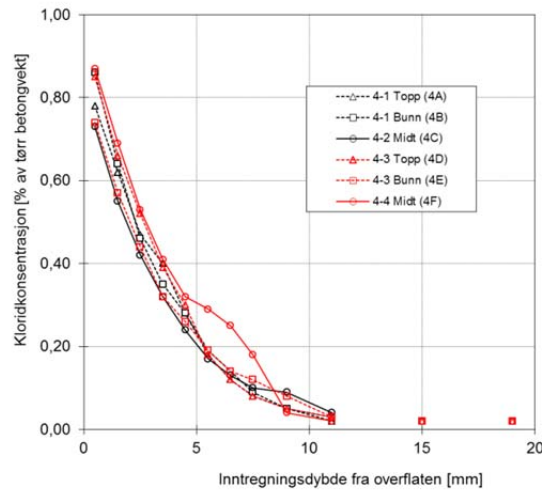
Figur 85 Beregnet totalt inntrent mengde klorider, hhv ved SINTEF og SVV



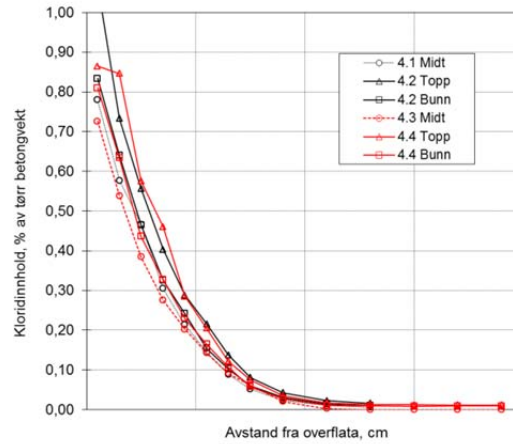
Figur 86 Beregnet avstand fra overflata hvor kloridinnholdet er 0,10 % etter 1 år, hhv ved SINTEF og SVV



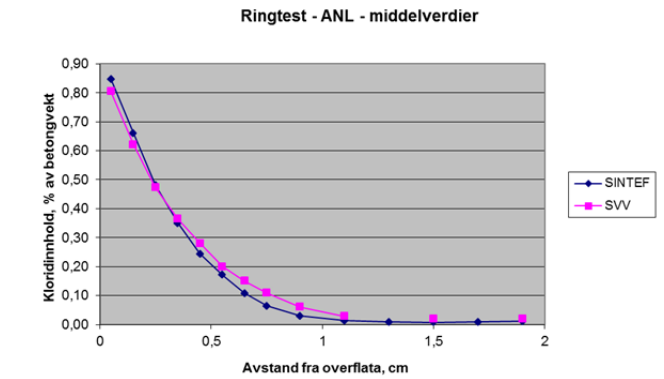
Figur 87 Beregnede diffusjonskoeffisienter fra ringtesten sammenstilt med beregnede diffusjonskoeffisienter for samme betongtyper, basert på prøving utført ved Sentrallab. (Mor-prosjekt)



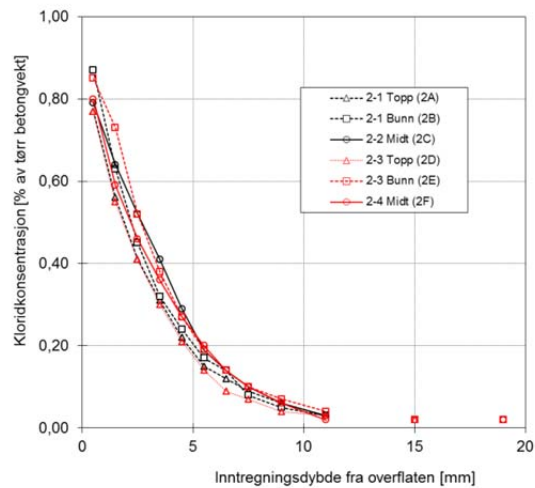
ANL – Ringtest SVV



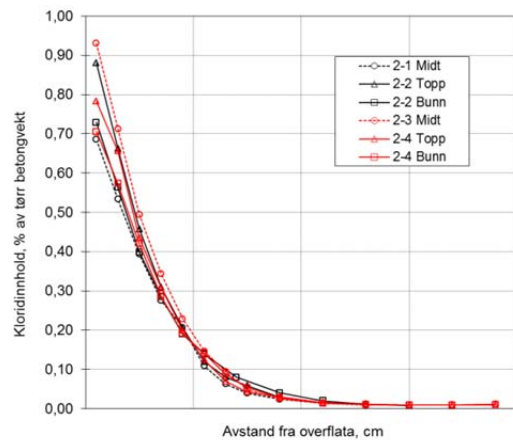
ANL – Ringtest SINTEF



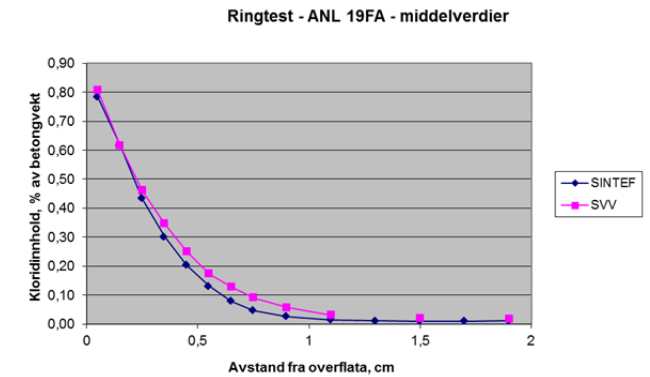
ANL – Ringtest - middelverdier



ANL 19FA – Ringtest SVV

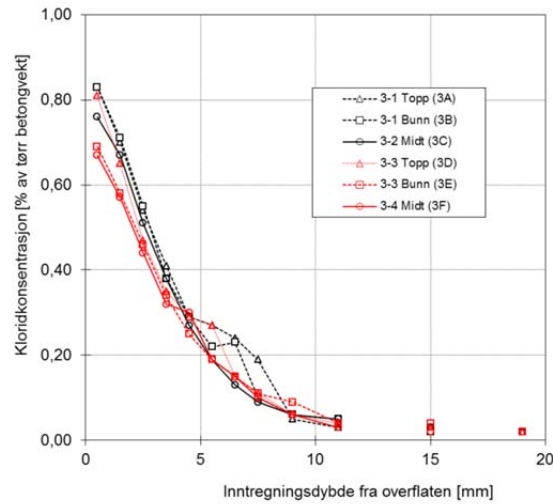


ANL 19FA – Ringtest SINTEF

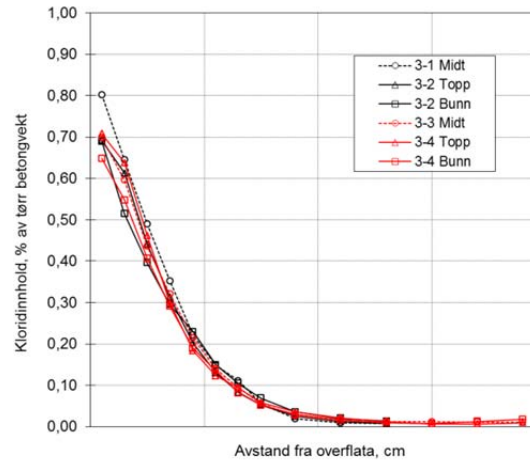


ANL 19FA – Ringtest - middelverdier

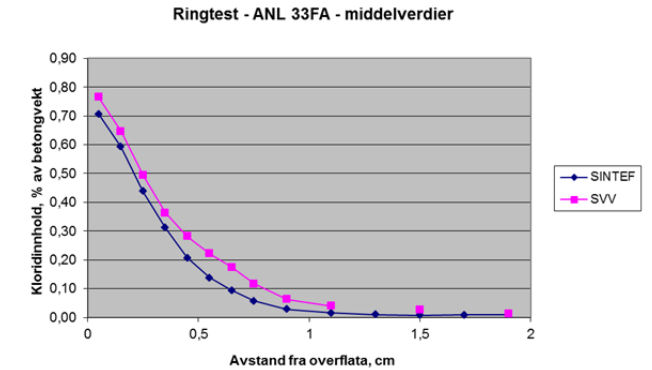
**Oversikt 5: Målte kloridprofiler, hhv 6 paralleler pr serie og middelverdier, for SVV- og SINTEF-serier**



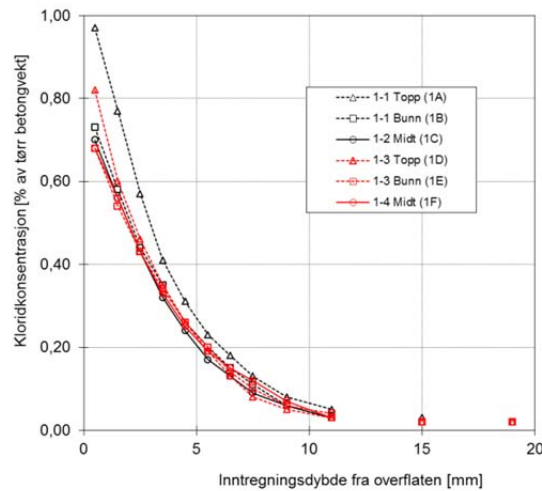
ANL 33FA – Ringtest SVV



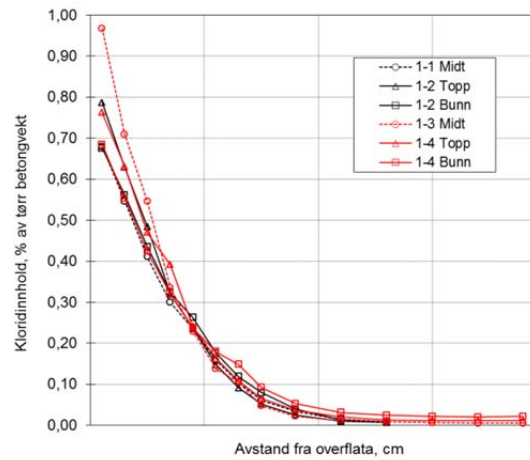
ANL 33FA – Ringtest SINTEF



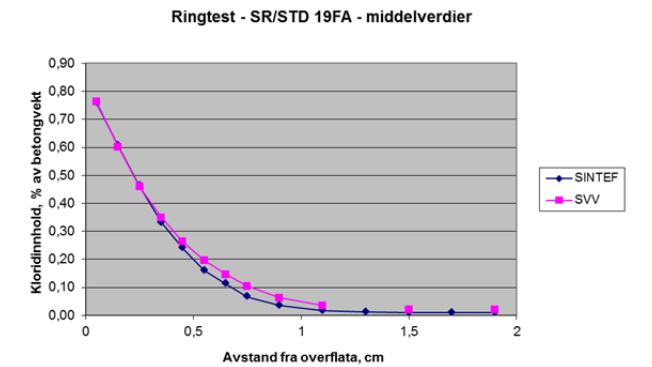
ANL 33FA – Ringtest - middelverdier



STD/SR 19FA – Ringtest SVV



STD/SR 19FA – Ringtest SINTEF



STD/SR 19FA – Ringtest - middelverdier

Oversikt 5 (forts)

## APPENDIX 6 Aktivitet A - Prøving av restprøvestykker (6 år)

Region Øst  
Sentrallaboratoriet  
Arbeidsskjema for laboratorieanalyser



Statens vegvesen

### Herdet betong - Elektrisk motstand

Oppdragsnr. N700012      Utført dato 19.03.2013,05.04.2013      Signatur **Benteg**

Prosjekt: Samarbeidsprosjekt ANL-FA      Resept: Blanding 1 - ANL (Ref. )

Steppedato: 24.04.2007      Tidspunkt: 10:15-11:00

Temperatur - Luft: 21°C / 22°C      Avlesning etter: 60 sek.

Vann: 20°C / 20,5°C

Pr.nr. - Ant.d. prøvestykke	Type	a*b	Høyde	Dato	Tidspunkt hh:mm	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Motstand Ω	Kortslutning Ω	Spesifikk el. motstand Ωm
02stra-2145d.	Terning	0,1		19.03.2103	12:20				3859	5,578	386
10-2173d.	Syl,rest	ukjen *		05.04.2013	10:05				4500	6,845	505
12-2173d.	Syl,rest	ukjen *		05.04.2013	10:10				4873		547
13-2173d.	Syl,rest	0,0686		05.04.2013	10:15				4281		490
14-2173d.	Syl,rest	0,0734		05.04.2013	10:20				4846	6,044	519
											Gj.snitt
											489
											Std.ev
											61
											COV
											13 %

\* Antall 70mm, dvs 0,07 m

VEDLEGG 6 Ekstraprøving etter 6 år



Statens vegvesen

Region Øst

Sentrallaboratoriet

Arbeidsskjema for laboratorieanalyser

### Herdet betong - Elektrisk motstand

Oppdragsnr. N700013      Urført dato 19.03.05.04.08.04.05.06.2013      Signatur Benteg

Prosjekt: Samarbeidsprosjekt ANL-FA      Resept: Blanding 2 - ANL 19FA

Stapedato: 24.04.2007      Tidspunkt: 09:30-10:15

Temperatur - Luft: 21°C/22°C/22°C/23°C      Avlesning etter: 60 sek.

Vann: 20°C/20,5°C/20,5°C/20,5°C

Pr.nr. - Ant. d.	Type prøvestykke	a*b	Hd	Dato	Tidspunkt hh:mm	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Motstand Ω	Kortslutning Ω	Spesifikk el. motstand Ωm
EkstraA-2156d	Terning	0,1		19.03.2013	12:25				9608		961
EkstraB-2156d	Terning	0,1		19.03.2013	12:30				8726		979
EkstraA-2171d	Sylinder	0,2		08.04.2013	11:15				23130	4,022	908
EkstraB-2171d	Sylinder	0,2		08.04.2013	11:20				20490		805
10-2173d	Syl,rest	0,0721		05.04.2013	10:20				10550	6,044	1149
11-2173d	Syl,rest	0,0757		05.04.2013	10:25				9841		1021
12-2173d	Syl,rest	0,0734		05.04.2013	10:30				10230		1095
13-2172d	Syl,rest	0,0711		05.04.2013	10:35				9394		1038
14-2173d	Syl,rest	0,0707		05.04.2013	10:40				9834	4,467	1092
EkstraA-2235d	Syl,rest	0,0808		05.06.2013	12:50				8998	3,493	875

Gj.snitt  
992  
Std.av  
108  
COV  
10,9 %



Statens vegvesen

Region Øst  
Sentrallaboratoriet  
Arbeidsskjema for laboratorieanalyser

**Herdet betong - Elektrisk motstand**

Oppdragsnr. N700016	Utført dato 19.03.08.04.05.06.2013	Signatur	Benteg
---------------------	------------------------------------	----------	--------

Prosjekt: Samarbeidsprosjekt ANL-FA      Resept: Blanding 5 - ANL 33FA

Støpedato: 07.08.2007      Tidspunkt: \_\_\_\_\_

Temperatur - Luft: 21°C/22°C/23°C/      Avlesning etter: 60 sek.

Vann: 20°C/20,5°C/20,5°C/

Pr.nr. - Ant. d.	Type prøvestykke	d*b	H <sub>0</sub>	Dato	Tidspunkt hh:mm	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Motstand Ω	Kortslutning Ω	Spesifikk el. motstand Ωm
Ekstra-2051d	Tenning	0,1		19.03.2013	12:45				14620		1462
Ekstra-2071d	Sylinder	0,2		08.04.2013	11:10				33200		1304
10-2071d	Syl,rest	0,0726		08.04.2013	10:45				12970	4,054	1403
11-2071d	Syl,rest	0,0737		08.04.2013	10:50				13910		1482
12-2071d	Syl,rest	0,0682		08.04.2013	10:55				14160		1631
13-2071d	Syl,rest	0,0731		08.04.2013	11:00				14640		1573
14-2071d	Syl,rest	0,0735		08.04.2013	11:05				13480	4,396	1440
Ekstra-2235d	Syl,rest	0,0828		05.06.2013	12:55				12060	3,493	1144

Gjennomsnitt  
1430  
Std.av  
153  
COV  
10,7 %





Statens vegvesen

**Sentrallaboratoriet**  
**Arbeidsskjemaer for laboratorieanalyser**  
KS-dokument KSV-10055-14-008

**Herdet betong - Elektrisk motstand**

Oppdragsnr. N700018	Utført dato 19.03.10.04.08.06.2013	Signatur	Benteg
---------------------	------------------------------------	----------	--------

Prosjekt: Samarbeidsprosjekt ANL-FA      Resept: Blanding 7 - SR

Stapedato: 09.10.2007      Tidspunkt: \_\_\_\_\_

Temperatur - Luft: 21°C/22°C/24°C      Avlesning etter: 60 sek.

Vann: 20°C/20,5°C/21,5°C

Pr.nr. - Ant. d.	Type prøvestykke	a*b	Hø	Dato	Tidspunkt hh:mm	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Motstand Ω	Kortslutning Ω	Spesifikk el. motstand Ωm
Ekstra-1988d	Terning	0,1		19.03.2013	12:55				1830	6,978	183
EkstraA-2069d	Sylinder	0,2		08.06.2013	12:50				4303	2,400	169
EkstraB-2069d	Sylinder	0,2		08.06.2013	12:55				4556		179
10-2010d	Syl,rest	0,0726		10.04.2013	09:40				2743	6,630	297
11-2010d	Syl,rest	0,0732		10.04.2013	09:45				2516		270
12-2010d	Syl,rest	0,0726		10.04.2013	09:50				2611		282
13-2010d	Syl,rest	0,0743		10.04.2013	09:55				2422		256
14-2010d	Syl,rest	0,0732		10.04.2013	10:00				2535	5,029	272

Gjennnitt  
239  
Std.av  
52  
COV  
22,0 %



Statens vegvesen

### Herdet betong - Elektrisk motstand

Oppdragsnr. N700014      Utført dato 19.03.20.03,08.06.2013      Signatur      Benteg

Prosjekt: Samarbeidsprosjekt ANL-FA      Resept: Blanding 3 - SR 19FA  
Støpedato: 22.05.2007      Tidspunkt: 11:00-11:30

Temperatur - Luft: 21°C/21°C/24°C      Avlesning etter: 60 sek.

Vann: 20°C/20°C/21,5°C

Pr.nr. - Ant.d.	Type prøvestykke	a*b	Høyde	Dato	Tidspunkt hh:mm	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Motstand Ω	Kortslutning Ω	Spesifikk el. motstand Ωm
Ekstra-2128d.	Terning	0,1		19.03.2013	12:35				6954		695
EkstraA-2209d	Sylinder	0,2		08.06.2103	12:30				15940	4,186	626
EkstraB-2209d	Sylinder	0,2		08.06.2103	12:35				15400		605
10-2129d.	Syl.rest	0,0735		20.03.2013	12:00				8380	4,700	895
10-2129d.	Syl.rest	0,0773		20.03.2013	12:05				8010		814
10-2129d.	Syl.rest	0,0735		20.03.2013	12:10				8145		870
10-2129d.	Syl.rest	0,0766		20.03.2013	12:15				8115		832
10-2129d.	Syl.rest	0,0739		20.03.2013	12:20				8590	5,872	913

Gjennsnitt  
781  
Std.av  
122  
COV  
15,6 %



Statens vegvesen

### Herdet betong - Elektrisk motstand

Oppdragsnr. N700017      Utført dato 19.03.08.04.08.06.2013      Signatur      Benteg

Prosjekt: Samarbeidsprosjekt ANL-FA      Resept: Blanding 6 - SR 33FA

Støpedato: 18.09.2007      Tidspunkt: \_\_\_\_\_

Temperatur - Luft: 21°C/22°C/24°C      Avlesning etter: 60 sek.

Vann: 20°C/20,5°C/21,5°C

Pr.nr. - Ant.d.	Type prøvestykke	α*b	Høyde	Dato	Tidspunkt hh:mm	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Motstand Ω	Kortslutning Ω	Spesifikk el. motstand Ωm
Ekstra-2009d.	Terning	0,1		19.03.2013	12:50				12780		1278
EkstraA-2090d	Sylinder	0,2		08.06.2013	12:40				29270	3,893	1149
EkstraB-2090d	Sylinder	0,2		08.06.2013	12:45				27880		1095
10-2029d.	Syl.rest	0,0729		08.04.2013	10:15				13970	4,156	1505
11-2029d.	Syl.rest	0,0709		08.04.2013	10:20				13870		1536
11-2029d.	Syl.rest	0,0736		08.04.2013	10:25				14710		1570
11-2029d.	Syl.rest	0,0687		08.04.2013	10:30				13780		1575
11-2029d.	Syl.rest	0,0747		08.04.2013	10:35				14380	4,054	1512

Gjennomsnitt  
1403  
Std.av  
197  
COV  
14,1 %

**Herdet betong - Elektrisk motstand**

Oppdragsnr. N700015	Utført dato 19.03.22.03.08.06.2013	Signatur	Benteg
---------------------	------------------------------------	----------	--------

Prosjekt: Samarbeidsprosjekt ANL-FA	Resept: Blanding 4 - SR-STD 19FA
Støpedato: 03.09.2007	Tidspunkt:

Temperatur - Luft: 21°C/21°C/24°C Avlesning etter: 60 sek.

Vann: 20°C/20°C/21,5°C

Pr.nr. - Ant.d.	Type prøvestykke	$\alpha^*b$	Høyde	Dato	Tidspunkt hh:mm	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Motstand $\Omega$	Kortslutning $\Omega$	Spesifikk el. motstand $\Omega m$
Ekstra-2024d.	Terning	0,1		19.03.2013	12:40				7897		790
EkstraA-2105d.	Sylinder	0,2		08.06.2013	12:35				17220		676
EkstraB-2105d.	Sylinder	0,2		08.06.2013	12:40				16990	3,893	667
10-2027d	Sylrest	0,0739		22.03.2013	10:25				8180	4,426	869
11-2027d.	Sylrest	0,0778		22.03.2013	10:30				7952		803
12-2027d	Sylrest	0,0724		22.03.2013	10:35				8863		961
13-2027d.	Sylrest	0,0720		22.03.2013	10:40				8937		975
14-2027d	Sylrest	0,0734		22.03.2013	10:45				8087	5,753	865

Gjennsnitt  
826  
Std.av  
116  
COV  
14,0 %

**14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder**

Oppdragsnr. N700012

Utført dato 19.03.05.04.2013

Signatur BME

PROSJEKTNR.: 102596 Sam. arb. ANL FA	LEVERANDØR:
BYGGEPLASS: Lab	RESEPTNR.:
ENTREPRENØR:	FØLGESEDDENR.:
KONSTRUKSJON:	STØPEDATO: 24.04.2007
	SIGN.:

Fasthet- og bestandighetsklasse: ANL (Red.) bl. 1

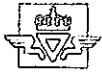
Dmaks:                      Synk:                      Luft:                      Bet.temp.:                      °C    Lufttemp.:                      °C

**Prøving av trykkfasthet**

Prøve nr.	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Trykkflate		Høyde mm	Bruddlast kN	Trykkfasthet MPa	Gj.snitt trykkfasthet MPa
				Ø(mm)a (mm)	Ø(mm)b (mm)				
19.03 21561 Elast. terning	2505.0	1491.0	2470	100.9	100.5	100.1	1124.1	110.85	111.0 Punkt
05.04 21732 10 syl. rester 12	Går til kap. 13.14								
13	1329.7	796.1	2463	100.0	100.1	68.6	918.9	116.76 · 0,72 = 84,1	
14	1420.9	849.3	2460	100.0	100.1	73.4	905.0	115.00 · 0,75 = 86,3	
									Smitt = 85,2 SYL.
13	H/D =	68,6/100 =	0,69	F =	0,72				
14	H/D =	0,73		F =	0,75				

Merknader (bøyningsbruddets karakter, uregelmessigheter ved prøvestykkene, m.v.):

(Pr. 21 - Elast. terning)  
(Pr. 22 - Syl. rester 13, 14) slettes i løst sys

**14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder**

Oppdragsnr. N700013

Utført dato 19.03.05.04.09.08.2013

Signatur BMC

20.08.2013

PROSJEKTNR.:	LEVERANDØR:
BYGGEPLASS:	RESEPTNR.:
ENTREPRENØR:	FØLGESEDDELNR.:
KONSTRUKSJON:	STØPEDATO: 24.04.2007
	SIGN.:

Fasthet- og bestandighetsklasse: ANL 19 FA bl.2

Dmaks:                      Synk:                      Luft:                      Bet.temp.:                      °C      Lufttemp.:                      °C

**Prøving av trykkfasthet**

Prøve nr.	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Trykkflate		Høyde mm	Bruddlast kN	Trykkfasthet MPa	Gj.snitt trykkfasthet MPa
				Ø(mm)a (mm)	Ø(mm)b (mm)				
19.03 ANL 19 FA	2440.2	1443.8	2420	100.7	100.1	100.1	1125.4	111.94	Gj.snitt 110,6
	2453.8	1453.5	2420	100.9	100.2	100.2	1104.9	109.29	
	1392.7	829.1	2464	99.8	100.0	72.1	869.3	110.90	0,74 = 82,1
05.04 21736	1457.2	866.7	2451	99.9	100.1	75.7	782.4	99.62	0,76 = 75,7
	1402.1	836.5	2442	99.7	99.8	73.4	793.9	101.49	0,75 = 76,1
	1372.3	816.0	2458	99.9	100.0	71.1	846.3	107.75	0,73 = 78,7
	1357.5	809.2	2450	99.8	99.9	70.7	841.7	107.38	0,73 = 78,4
08.06 2237d 20.08 2210f	3804.8	2248.2	2407	100.2	99.8	199.6	612.3	77.96	1,0 = 78,0
	1555.1	927.8	2450	100.0	99.9	80.8	684.1	87.1	0,78 = 67,9
	<del>1554.2</del>	<del>918.3</del>							

Smith = 76,7  
SYL.

Merknader (bøyningsbruddets karakter, uregelmessigheter ved prøvestykkene, m.v.):



## 14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder

Oppdragsnr. N700016 Utført dato 19.03.08.04.2013 Signatur BHF

20.08.2013

PROSJEKTNR.:	LEVERANDØR:
BYGGEPLASS:	RESEPTNR.:
ENTREPRENØR:	FØLGESEDELNR.:
KONSTRUKSJON:	STØPEDATO: 07.08.2007
	SIGN.:

Fasthet- og bestandighetsklasse: ANL 33FA bl. 5

Dmaks:                      Synk:                      Luft:                      Bet.temp.:                      °C    Lufttemp.:                      °C

## Prøving av trykkfasthet

Prøve nr.	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Trykkflate		Høyde mm	Bruddlast kN	Trykkfasthet MPa	Gj.snitt trykkfasthet MPa
				Ø(mm)a (mm)	Ø(mm)b (mm)				
19.03 2671 Hvite terning	2441.1	1435.9	2410	100.2	100.3	100.2	1035.9	102.56	
10-syl. røt	1381.1	812.9	2422	100.0	100.0	72.6	856.5	109.05	0,75 = 81,8
11	1395.3	821.5	2415	99.8	99.9	73.7	811.1	103.48	0,76 = 78,7
12	1284.3	758.5	2422	99.6	99.4	68.2	833.4	107.18	0,71 = 76,1
13	1389.5	821.1	2415	100.1	100.1	73.1	835.4	106.15	0,76 = 90,7
14	1410.5	834.6	2439	99.9	100.2	73.5	834.6	106.05	0,76 = 80,6
20.08 23100 Elektron røt on syl	1559.2	918.7	2450	99.6	99.8	82.8	532.0	63.8	0,79 = 53,6
							Ut-elast!		

Snitt = 79,6  
S/L.

Merknader (bøyningsbruddets karakter, uregelmessigheter ved prøvestykkene, m.v.):

**14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder**

Oppdragsnr. N700018

Utført dato 19.03.10.04, (8.06.2013) Signatur BME

PROSJEKTNR.:	LEVERANDØR:
BYGGEPLASS:	RESEPTNR.:
ENTREPRENØR:	FØLGESEDDLN.:
KONSTRUKSJON:	STØPEDATO: 09.10.2007
	SIGN.:

Fasthet- og bestandighetsklasse: SR bl. 7

Dmaks:                      Synk:                      Luft:                      Bet.temp.:                      °C    Lufttemp.:                      °C

## Prøving av trykkfasthet

Prøve nr.	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Trykkflate		Høyde mm	Bruddlast kN	Trykkfasthet MPa	Gj.snitt trykkfasthet MPa
				Ø(mm)a (mm)	Ø(mm)b (mm)				
19.03 19.03 Elektron terning	2461.8	1456.3	2430	100.5	100.6	100.2	991.5	98.07	
10.04 23.04 11	1368.2	806.1	2400	100.0	100.0	72.6	691.3	88.02	0,75 = 66,0
12	1405.0	835.2	2449	99.9	99.9	73.2	784.4	100.08	0,75 = 75,0
13	1392.5	823.8	2447	99.8	100.0	72.6	812.3	103.63	0,75 = 77,7
14	1427.0	846.1	2445	99.8	100.2	74.3	835.4	106.37	0,75 = 79,8
	1393.8	824.4	2429	99.9	99.8	73.2	780.4	99.96	0,75 = 74,7
Elektron Syl.	3816.6	2256.6	2420	100.0	99.8	200.4	713.6	91.04	1,0 = 91,0
Elektron Syl.	3812.7	2255.7	2420	100.0	100.0	200.1	667.2	77.31	1,0 = 77,3

Smitt = 77,4  
Syl.

Merknader (bøyningsbruddets karakter, uregelmessigheter ved prøvestykkene, m.v.):





## 14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder

Oppdragsnr. N706014

Utført dato 19.03., 20.03., 03.06.2011 Signatur BMG

PROSJEKTNR.:	LEVERANDØR:
BYGGEPLASS:	RESEPTNR.:
ENTREPRENØR:	FØLGESEDELNR.:
KONSTRUKSJON:	STØPEDATO: 22.05.2007
	SIGN.:

Fasthet- og bestandighetsklasse: SR 19FA bl.3

Dmaks:                      Synk:                      Luft:                      Bet.temp.:                      °C      Lufttemp.:                      °C

## Prøving av trykkfasthet

Prøve nr.	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Trykkflate		Høyde mm	Bruddlast kN	Trykkfasthet MPa	Gj.snitt trykkfasthet MPa	
				Ø(mm)a (mm)	Ø(mm)b (mm)					
10.03 10	2471.6	1459.7	2440	100.9	100.3	100.1	1028.2	101.60	NB! UTGÅR	
2003 2001	105 syl. røt	1382.2	815.4	2394	100.0	100.0	73.5	621.8	79.17	0,75 = <del>59,4</del>
	11	1471.7	872.7	2429	100.0	99.8	77.3	762.0	97.22	0,77 = 74,9
	12	1412.3	839.4	2447	100.1	99.8	73.5	698.2	88.90	0,75 = 66,7
	13	1464.2	865.7	2439	99.9	99.9	76.6	736.1	93.91	0,77 = 71,7
	14	1416.3	842.6	2440	100.0	100.0	73.9	646.3	82.29	0,75 = 61,7
01.06 2001B	14	3830.9	2266.8	2645	100.0	99.6	200.3	665.4	85.06	1.0 = 85,1
	14	3792.9	2234.3	2401	100.2	99.9	200.5	669.3	85.05	1.0 = 85,1

Snni A = 74,2  
SYL.

NB!

Merknader (bøyingsbruddets karakter, uregelmessigheter ved prøvestykkene, m.v.):

Pr. syl. røt = 1 luke slipt, malt og skote m/rettholat (ingen glipper) lufteforstykk fra

Målt h = 4 pkt      Målt dia = 2 pkt

**14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder**

Oppdragsnr. N700017

Utført dato 19.03.09.07, 08.04.2007

Signatur BMG

PROSJEKTNR.:	LEVERANDØR:
BYGGEPLASS:	RESEPTNR.:
ENTREPRENØR:	FØLGESEDDENR.:
KONSTRUKSJON:	STØPEDATO: 18.09.2007
	SIGN.:

Fasthet- og bestandighetsklasse: SR 33FA bl. 6

Dmaks:                      Synk:                      Luft:                      Bet.temp.:                      °C    Lufttemp.:                      °C

**Prøving av trykkfasthet**

Prøve nr.	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Trykkflate		Høyde mm	Bruddlast kN	Trykkfasthet MPa	Gj.snitt trykkfasthet MPa
				Ø(mm)a (mm)	Ø(mm)b (mm)				
19.03.2007 Elektr. terning	2436.5	1436.2	2410	100.7	100.4	99.9	1090.1	107.82	
10.04.2007 11-	1357.2	819.3	2413	100.1	100.1	72.9	829.7	105.43	0.73 = 76.9
04.04.2007 12	1349.8	797.6	2410	100.3	100.3	70.9	839.9	106.30	0.73 = 77.6
13	1349.7	825.1	2417	100.2	100.0	73.6	813.3	103.35	0.74 = 76.5
14	1295.3	763.8	2401	99.9	100.0	68.7	845.0	113.95	0.72 = 84.3
05.06.2007 Elektr. syl.	1414.5	836.7	2426	99.7	99.7	74.7	804.5	103.05	0.76 = 78.4
05.06.2007 Elektr. syl.	3765.8	2215.1	2400	99.8	99.6	201.0	631.8	80.93	1.0 = 80.9
05.06.2007 Elektr. syl.	3755.5	2199.1	2401	99.8	100.1	200.0	640.1	81.50	1.0 = 81.5

Snitt = 79,4  
SYL.

Merknader (bøyningsbruddets karakter, uregelmessigheter ved prøvestykkene, m.v.):

**14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder**

Oppdragsnr. N700015

Utført dato 19.03.22.03, 08.06.2013

Signatur BME

PROSJEKTNR.:	LEVERANDØR:
BYGGEPLASS:	RESEPTNR.:
ENTREPRENØR:	FØLGESEDELNR.:
KONSTRUKSJON:	STØPEDATO: 03.09.2007
	SIGN.:

Fasthet- og bestandighetsklasse: SR-STD 19FA bl. 4

Dmaks:                      Synk:                      Luft:                      Bet.temp.:                      °C    Lufttemp.:                      °C

**Prøving av trykkfasthet**

Prøve nr.	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Trykkflate		Høyde mm	Bruddlast kN	Trykkfasthet MPa	Gj.snitt trykkfasthet MPa
				Ø(mm)a (mm)	Ø(mm)b (mm)				
19 03 10/11 Elastisk terning	2483.7	1464.0	2450	101.0	100.3	100.2	1003.6	99.07	
10-Sylindr	1425.4	847.8	2471	99.8	99.8	73.9	821.4	105.21	0,75 = 78,9
11	1462.0	856.4	2397	99.7	100.1	77.8	696.8	88.90	0,77 = 68,5
20 03 20/21 12	1384.3	820.4	2449	99.4	99.9	73.4	835.8	107.06	0,75 = 80,3
13	1380.6	820.2	2441	99.9	100.1	72.0	765.9	97.52	0,74 = 72,2
14	1402.1	832.1	2427	100.0	100.2	73.4	803.1	102.05	0,75 = 76,6
10 02 10/21 Elastisk	3787.6	2228.1	2409	99.8	99.8	201.0	694.0	88.72	1,0 = 88,7
10 02 10/21 Elastisk	3772.7	2225.9	2400	99.9	99.6	200.9	544.7	69.63	1,0 = 69,6

Snitt = 76,4  
SYL.

Merknader (bøyningsbruddets karakter, uregelmessigheter ved prøvestykkene, m.v.):



## 14.637 Kapillær sugehastighet og porøsitet, PF

Side 1 av 2

Oppdragsnr. N700012

Utført dato: 10.06-14.06,17.06-19.06.2013

Signatur

Benteg

Prosjekt:

Sam.arb.prosjekt-ANLFA

Resept: Blanding I-ANL(Ref.)

Prøve er merket:

A,B,C,D

Støpedato:

24.04.2007

Prøvens alder:

2239d.

Start suging:

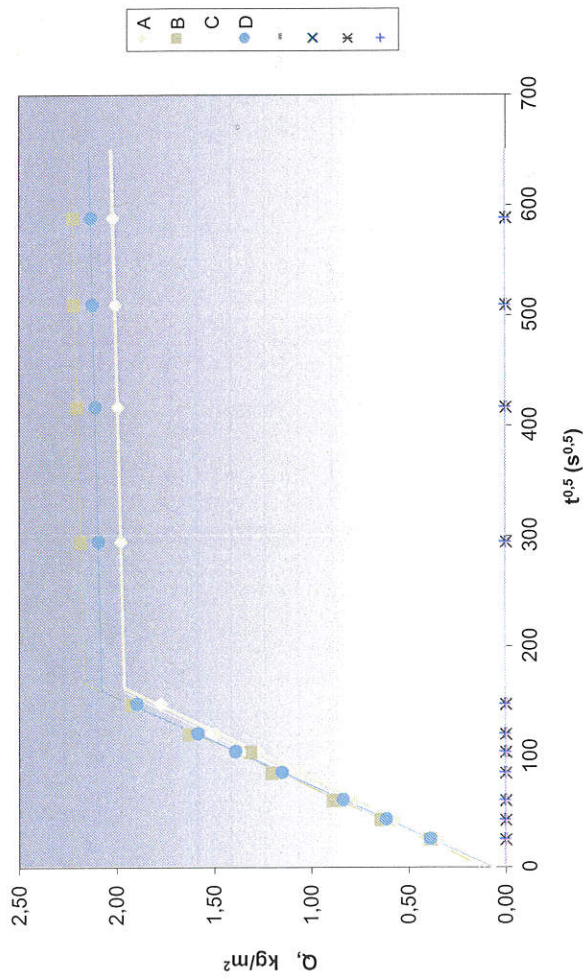
dato: 10.06.2013

tid (tt:mm): 10:30

Dato	KI	Suge- tid (s)	Vekt (g) etter:	Prøvestykket merket			
				A	B	C	D
10.06.13	10:30		Tørrking, g <sub>t</sub>	385,72	387,73	373,99	378,45
10.06.13	10:40	600	10 min suging	388,39	390,75	377,03	381,46
10.06.13	11:00	1800	30 min suging	390,08	392,74	378,83	383,23
10.06.13	11:30	3600	1 time suging	391,74	394,66	380,58	384,98
10.06.13	12:30	7200	2 timer suging	393,99	397,13	382,92	387,45
10.06.13	13:30	10800	3 timer suging	395,70	398,00	384,65	389,33
10.06.13	14:30	14400	4 timer suging	397,39	400,48	385,98	390,84
10.06.13	16:30	21600	6 timer suging	399,59	402,79	387,96	393,30
11.06.13	10:30	86400	1 døgn suging	401,21	404,83	389,49	394,82
12.06.13	10:35	173100	2 døgn suging	401,32	404,98	389,65	394,96
13.06.13	10:30	259200	3 døgn suging	401,42	405,09	389,76	395,07
14.06.13	10:30	345600	4 døgn suging	401,52	405,15	389,83	395,14
17.06.13	10:30	604800	Vannmetting e / 3d. (luft), g <sub>2</sub>	401,67	405,40	390,02	395,38
17.06.13	10:30	604800	Vannmetting (vann)	240,42	241,36	232,94	235,28
19.06.13	12:05	783300	Trykkmetting e / 2d. (luft), g <sub>5</sub>	403,64	407,83	392,11	397,87
19.06.13	12:05	783300	Trykkmetting (vann), g <sub>4</sub>	242,32	243,76	235,05	237,73
Mål	sidekant a / diameter d (mm)			100,0	100,0	100,0	100,0
	sidekant b (mm)						
	høyde (mm)			21,1	21,3	20,1	20,7

## 14.637 Kapillær sugehastighet og porøsitet, PF

Side 2 av 2



	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Prøvestykket merket					
Areal (mm <sup>2</sup> )	7854,0	7854,0	7854,0	7854,0	
Prøvestykkets volum (ml)	161,3	164,1	157,1	160,1	
Densitet tørr (kg/m <sup>3</sup> )	2391,0	2363,2	2381,2	2363,2	<u>2375</u>
Densitet faststoff (kg/m <sup>3</sup> )	2689,8	2693,1	2691,7	2689,4	<u>2691</u>
Sug porøsitet	9,9 %	10,8 %	10,2 %	10,6 %	<u>10,4 %</u>
Makro porøsitet	1,2 %	1,5 %	1,3 %	1,6 %	<u>1,4 %</u>
Total porøsitet	11,1 %	12,3 %	11,5 %	12,1 %	<u>11,8 %</u>
Beregnet v/c etter Powers	0,43	0,44	0,43	0,44	<u>0,43</u>
Densitet vannmettet - ρ <sub>ssp</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2490	2471	2483	2469	<u>2478</u>
α 1,00					
Kapillaritetstallet k [kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ]	0,0121	0,0130	0,0123	0,0130	<u>0,0126</u>
Motstandstallet m [s/mm <sup>2</sup> ]	58,76	61,00	62,10	58,74	<u>60,2</u>
Q <sub>kap</sub>	1,95	2,16	1,96	2,07	
Rot t <sub>kap</sub>	161,7	166,4	158,4	158,6	
t <sub>kap</sub>	26162,4	27676,8	25088,4	25169,5	



## 14.637 Kapillær sugeshastighet og porøsitet, PF

Side 1 av 2

Oppdragsnr. N700013

Utført dato:

10.06-14.06,17.06-19.06.2013

Signatur Benteg

Prosjekt:

Sam.arb.prosjekt-ANLFA

Resept: Blanding 2-ANL19FA

Prøve er merket: A,B,C,D

Støpedato: 24.04.2007

Prøvens alder: 2225d.

Start suging:

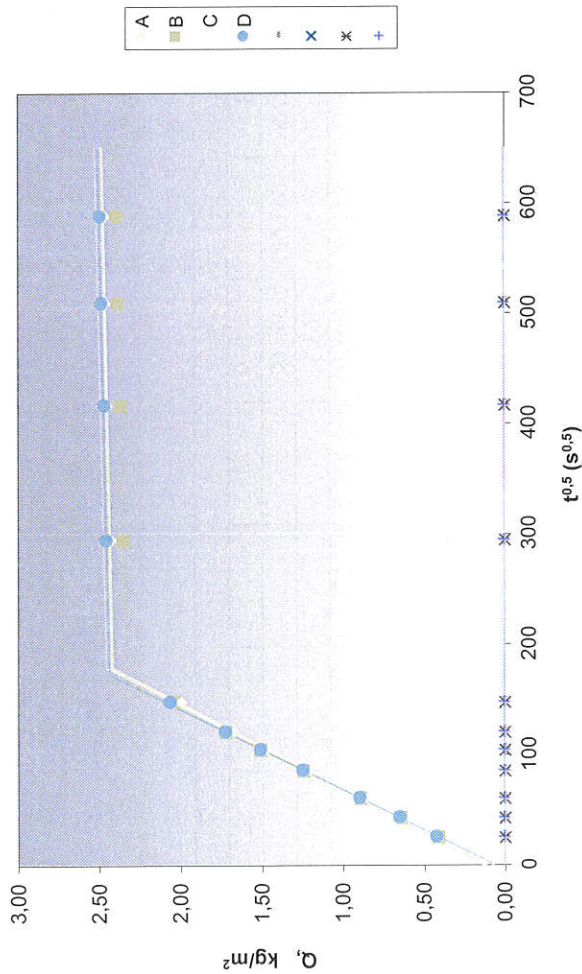
dato: 10.06.2013

tid (tt:mm): 10:34

Dato	Kl	Suge- tid (s)	Vekt (g) etter:	Prøvestykket merket			
				A	B	C	D
10.06.13	10:34		Tøking, g <sub>1</sub>	368,40	357,90	357,58	360,02
10.06.13	10:44	600	10 min suging	371,75	361,10	360,79	363,32
10.06.13	11:04	1800	30 min suging	373,62	362,91	362,57	365,10
10.06.13	11:34	3600	1 time suging	375,49	364,86	364,40	367,02
10.06.13	12:34	7200	2 timer suging	378,07	367,62	367,11	369,77
10.06.13	13:34	10800	3 timer suging	379,99	369,71	369,19	371,83
10.06.13	14:34	14400	4 timer suging	381,56	371,37	370,84	373,52
10.06.13	16:34	21600	6 timer suging	384,07	373,88	373,40	376,18
11.06.13	10:34	86400	1 døgn suging	387,46	376,32	376,94	379,25
12.06.13	10:39	173100	2 døgn suging	387,63	376,46	377,11	379,36
13.06.13	10:34	259200	3 døgn suging	387,73	376,57	377,20	379,48
14.06.13	10:34	345600	4 døgn suging	387,76	376,63	377,28	379,56
17.06.13	10:34	604800	Vannmetting e / 3d. (luft), g <sub>2</sub>	387,93	376,81	377,40	379,71
17.06.13	10:34	604800	Vannmetting (vann)	229,50	222,68	222,57	223,83
19.06.13	12:10	783360	Trykkmetting e / 2d. (luft), g <sub>3</sub>	390,30	379,40	379,71	382,22
19.06.13	12:10	783360	Trykkmetting (vann), g <sub>4</sub>	231,80	225,25	224,80	226,28
Mål	sidekant a / diameter d (mm)			100,0	100,0	100,0	100,0
	sidekant b (mm)						
	høyde (mm)			20,5	20,1	20,1	20,5

**14.637 Kapillær sugehastighet og porøsitet, PF**

Side 2 av 2



	A	B	C	D	Glennomsnitt
Prøvestykket merket					
Areal (mm <sup>2</sup> )	7854,0	7854,0	7854,0	7854,0	
Prøvestykkets volum (ml)	158,5	154,2	154,9	155,9	
Densitet tørr (kg/m <sup>3</sup> )	2324,3	2321,8	2308,3	2308,7	<u>2316</u>
Densitet faststoff (kg/m <sup>3</sup> )	2696,9	2698,1	2693,0	2691,9	<u>2695</u>
Sug porøsitet	12,3 %	12,3 %	12,8 %	12,6 %	<u>12,5 %</u>
Makro porøsitet	1,5 %	1,7 %	1,5 %	1,6 %	<u>1,6 %</u>
Total porøsitet	13,8 %	13,9 %	14,3 %	14,2 %	<u>14,1 %</u>
Beregnet v/c etter Powers	0,45	0,45	0,46	0,45	<u>0,45</u>
Densitet vannmettet - ρ <sub>SSP</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2448	2444	2436	2435	<u>2441</u>
α 1,00					
Kapillaritetstallet k [kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> ]	0,0136	0,0140	0,0137	0,0142	<u>0,0139</u>
Motstandstallet m [s/mm <sup>2</sup> ]	75,23	68,70	78,64	69,99	<u>73,1</u>
Q <sub>kap</sub>	2,42	2,33	2,45	2,43	
Rot t <sub>kap</sub>	177,8	166,6	178,2	171,5	
t <sub>kap</sub>	31614,0	27753,7	31771,8	29414,9	



## 14.637 Kapillær sugehastighet og porøsitet, PF

Side 1 av 2

Oppdragsnr. N700016

Utført dato: 10.06-14.06,17.06-19.06.2013

Signatur Benteg

Prosjekt: Sam.arb.prosjekt-ANLFA

Resept: Blanding 5-ANL33FA

Prøve er merket: A,B,C,D

Støpedato: 07.08.2007

Prøvens alder: 2134d.

Start suging:

dato: 10.06.2013

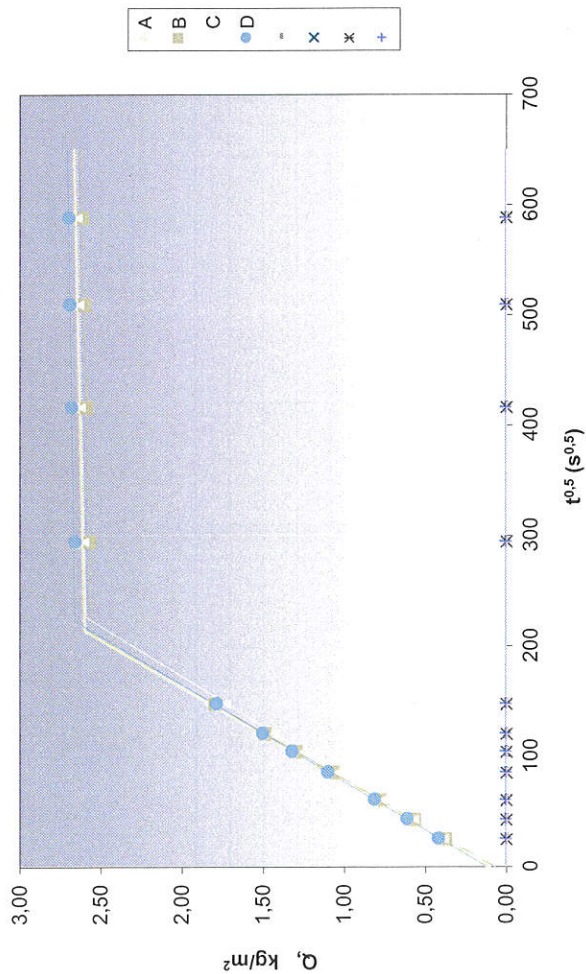
tid (tt:mm): 10:38

Dato	K1	Suge- tid (s)	Vekt (g) etter:	Prøvestykket merket			
				A	B	C	D
10.06.13	10:38		Tørrking, g <sub>1</sub>	338,48	346,98	357,01	355,53
10.06.13	10:48	600	10 min suging	341,58	349,89	359,96	358,79
10.06.13	11:08	1800	30 min suging	343,16	351,40	361,41	360,30
10.06.13	11:38	3600	1 time suging	344,80	353,02	362,93	361,87
10.06.13	12:38	7200	2 timer suging	347,12	355,33	365,10	364,13
10.06.13	13:38	10800	3 timer suging	348,86	357,14	366,78	365,87
10.06.13	14:38	14400	4 timer suging	350,35	358,64	368,19	367,28
10.06.13	16:38	21600	6 timer suging	352,71	361,08	370,51	369,53
11.06.13	10:38	86400	1 døgn suging	358,93	367,09	377,38	376,36
12.06.13	10:42	173040	2 døgn suging	359,10	367,24	377,54	376,53
13.06.13	10:38	259200	3 døgn suging	359,21	367,35	377,62	376,62
14.06.13	10:38	345600	4 døgn suging	359,28	367,42	377,69	376,68
17.06.13	10:38	604800	Vannmetting e / 3d. (luft), g <sub>2</sub>	359,51	367,68	377,99	377,00
17.06.13	10:38	604800	Vannmetting (vann)	210,78	215,77	221,91	220,51
19.06.13	12:15	783420	Trykkmetting e / 2d. (luft), g <sub>3</sub>	362,15	370,18	380,39	379,67
19.06.13	12:15	783420	Trykkmetting (vann), g <sub>4</sub>	213,35	218,25	224,32	223,15
Mål	sidekant a / diameter d (mm)			100,0	100,0	100,0	100,0
	sidekant b (mm)						
	høyde (mm)			19,3	19,6	20,3	20,4



**14.637 Kapillær sugehastighet og porøsitet, PF**

Side 2 av 2



Provestykket merket	A	B	C	D	Gjennomsnitt
Areal (mm <sup>2</sup> )	7854,0	7854,0	7854,0	7854,0	
Provestykkets volum (ml)	148,8	151,9	156,1	156,5	
Densitet tørr (kg/m <sup>3</sup> )	2274,7	2283,8	2287,5	2271,5	<u>2279</u>
Densitet faststoff (kg/m <sup>3</sup> )	2705,0	2695,4	2690,6	2685,7	<u>2694</u>
Sug porøsitet	14,1 %	13,6 %	13,4 %	13,7 %	<u>13,7 %</u>
Makro porøsitet	1,8 %	1,6 %	1,5 %	1,7 %	<u>1,7 %</u>
Total porøsitet	15,9 %	15,3 %	15,0 %	15,4 %	<u>15,4 %</u>
Beregnet v/c etter Powers	0,47	0,46	0,46	0,46	<u>0,46</u>
Densitet vannmettet - ρ <sub>SSD</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2416	2420	2422	2409	<u>2417</u>
Kapillaritetsallet k [kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> ]	0,0122	0,0121	0,0115	0,0120	<u>0,0119</u>
Motstandstallet m [s/mm <sup>2</sup> ]	122,22	116,13	123,59	117,94	<u>120,0</u>
Q <sub>kap</sub>	2,59	2,55	2,59	2,65	
Rot t <sub>kap</sub>	213,4	211,2	225,7	221,5	
t <sub>kap</sub>	45526,8	44613,4	50931,8	49081,7	

## APPENDIX 7 Aktivitet B (Avrop 2-A): Termogravimetri

SBF BK F10001 – Fortrolig

# RAPPORT

VEDLEGG 7 Avrop 2A

## Termisk prøving og analyse av sementpasta

Tone Østnor, Klaartje De Weerd, Harald Justnes

**SINTEF Byggforsk**

Byggematerialer og konstruksjoner

Mars 2010

www.sintef.no



**SINTEF Byggforsk**

Byggematerialer og konstruksjoner

Postadresse: 7465 Trondheim  
Besøk: Richard Birkelands vei 3  
Telefon: 73 59 52 24  
Telefaks: 73 59 71 36

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

**SINTEF RAPPORT**

TITTEL

**Termisk prøving og analyse av sementpasta**

FORFATTER(E)

Tone Østnor, Klaartje De Weerd og Harald Justnes

OPPDRAGSGIVER(E)

Statens Vegvesen Vegdirektoratet

RAPPORTNR. SBF BK F10001	GRADERING Fortrolig	OPPDRAGSGIVERS REF. Øyvind Bjøntegaard	
GRADER. DENNE SIDE Fortrolig	ISBN	PROSJEKTNR. 3D0590.02	ANTALL SIDER OG BILAG 27
ELEKTRONISK ARKIVKODE I:/pro/3D0590.02/Endelig Rapport StatensVegvesen DTA-analyse.doc	PROSJEKTLÉDER (NAVN, SIGN.) Tone Østnor <i>Tone Østnor</i>	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Harald Justnes <i>Harald Justnes</i>	
ARKIVKODE	DATO 2010-03-07	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Ola Skjølvold, Forskningsleder <i>Ola Skjølvold</i>	

**SAMMENDRAG**

Denne rapporten omhandler termisk prøving og analyse av 7 pastablandinger med henholdsvis anleggsement (ANL), standardsement (STD) og sulfatresistentsement (SR) med 0, 19 og 33 % erstatning av flygeaske (FA). Pastablandingene ble analysert med hensyn på mengde kalsiumhydroksid (CH) og kjemisk bundet vann som funksjon av tid ved 20 °C. Alle pastablandingene hadde vann/bindemiddel forhold på 0,40, samt 4,8 % silikastøv.

Herdereaksjonen til pastablandingene ble stoppet rett etter blanding (0 døgn) og ved henholdsvis 1, 3, 7, 28 og 90 døgn, samt 1 og 2 år. Herdereaksjonen ble stoppet ved å knuse pastaprøvene og tilsette etanol for å erstatte fritt vann, for så å tørke prøvene ved 105 °C.

Vekttap av kalsiumhydroksid (CH) og totalt kjemisk bundet vann ble bestemt ved termogravimetri (TG). Prøvene ble varmet opp fra 30 °C til 1100 °C med en oppvarmingshastighet på 10 °C/min samtidig som vekttapet ble registrert.

Tilsats av flygeaske øker mengde kjemisk bundet vann i forhold til klinkerinnholdet for anleggsement (ANL) og sulfatresistentsement (SR) med 4,8 % silikastøv fra og med 28 døgn alder. Økt mengde bundet vann samsvarer ikke med tilsvarende reduksjon i mengde kalsiumhydroksid, noe som skulle være forventet ut i fra en pozzolan reaksjon mellom flygeaske og kalsiumhydroksid. Alle prøvene hadde tilstrekkelig mengde gjenværende kalsiumhydroksid til å beskytte armeringen i betong mot korrosjon.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Materialteknologi	Materials technology
GRUPPE 2	Betong	Concrete
EGENVALGTE	Sement	Cement
	Pozzolaner	Pozzolans
	Termisk analyse	Thermal analysis

## **INNHALDSFORTEGNELSE**

<b>1</b>	<b>INNLEDNING .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>EKSPERIMENTELT .....</b>	<b>4</b>
	2.1 Resepter for pastablandinger .....	4
	2.2 Termisk analyse.....	5
<b>3</b>	<b>RESULTATER .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>DISKUSJON.....</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>KONKLUSJON .....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>REFERANSER .....</b>	<b>27</b>

## 1 INNLEDNING

Under utvikling av blandingssementer med mye pozzolaner, eventuelt ved store tilsetninger av pozzolaner til ferdig betong, er det viktig å ha kontroll med utviklingen av både mengden kalsiumhydroksid i bindemiddelet og total mengde kjemisk bundet vann. Mengden kalsiumhydroksid er viktig fordi dette er selve bufferen som sørger for at armeringsjernet er passivert med hensyn til initiering av korrosjon. Kjemisk bundet vann er viktig fordi egenskaper som økt trykkfasthet og nedsatt porøsitet og permeabilitet oppnås ved overføring av flytende vann til bundet vann i hydrater igjennom hydratasjon og pozzolane reaksjoner.

Denne rapporten presenterer et studium av 7 pastablandinger med silikastøv og varierende dosering av flygeaske (FA) med hensyn på mengde kalsiumhydroksid og kjemisk bundet vann som funksjon av tid ved 20 °C.

Hovedmineralene i portlandsement er C<sub>3</sub>S (45-65 %) og C<sub>2</sub>S (15-25 %) og de danner begge et amorft kalsiumsilikathydrat bindemiddel (CSH) og krystallinsk kalsiumhydroksid (CH) under sin hydratasjon;



og



C<sub>2</sub>S hydratiserer mye senere enn C<sub>3</sub>S og produserer mye mindre CH, selv om den i prinsippet danner samme type CSH.

Den pozzolane reaksjon mellom kalsiumhydroksid (CH) fra sementhydratasjonen og silikastøv (S) kan forenkles til



Det vil si at den danner mer av det samme bindemiddelet CSH som C<sub>3</sub>S og C<sub>2</sub>S mens kalsiumhydroksid (CH) forbrukes.

Flygeaske består i stor grad av kuleskall bestående av et aluminosilikat (AS) amorft glass. Det er umulig å balansere dets pozzolane reaksjon, men den danner 3 hovedtyper produkter;



Der CSH er det tradisjonelle bindemiddelet, CAH er ulike kalsiumaluminathydrater og C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> er et blandingsprodukt som heter Strätlingite.

Silikastøv er et raskere reagerende pozzolan enn flygeaske. Med disse konkurrerende produserende og konsumerende reaksjoner av kalsiumhydroksid er det nesten umulig å forutsi hva mengden i en blandingssement eller betong vil være, særlig ettersom reaksjonene har ulike hastigheter. Derfor er det viktig å måle innholdet for å kunne dokumentere det, noe som er gjort i dette arbeidet.

## 2 EKSPERIMENTELT

### 2.1 Resepter for pastablandinger

Densiteten til de ulike komponentene i forsøksseriene er listet opp i Tabell 1, mens de relative reseptene for de 7 ulike pastablandingene er angitt i Tabell 2. De faktiske innvektene er gitt i Tabell 3. I henhold til den Europeiske sementstandard med Norsk tillegg er Norcem standard sement (STD) av typen CEM I 42,5R, anlegg sement (ANL) av typen CEM I 52,5 LA, mens sulfatresistent sement (SR) benevnes CEM I 42,5R SR LA.

Tabell 1: Densitet til de forskjellige komponentene.

Densitet	kg/dm <sup>3</sup>
FA	2,20
SF (920D)	2,20
ANL	3,12
SR	3,15
STD	3,15

Tabell 2: Mengde av komponenter i %.

	Resept 1	Resept 2	Resept 3	Resept 4	Resept 5	Resept 6	Resept 7
ANL	X	X			X		
STD				20 %			
SR			X	80 %		X	X
FA		19 %	19 %	19 %	33 %	33 %	
SF	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %

Tabell 3: Mengde av hvert stoff i g.

	Resept 1	Resept 2	Resept 3	Resept 4	Resept 5	Resept 6	Resept 7
Sement	523,84	410,61	411,90	411,90	331,75	332,60	525,94
FA	0,00	96,32	96,62	96,62	163,40	163,82	0,00
SF	26,41	25,56	25,64	25,64	24,97	25,03	26,52
Vann	220,10	213,00	213,66	213,66	208,05	208,58	220,98

Alle komponentene som er listet opp i Tabell 2 ble benyttet i de forskjellige pastablandingene. Alle pastablandingene hadde vann/bindemiddel forhold på 0,40, og alle blandingene ble tilsatt 4,8 % silikastøv.

Pastablandingene ble blandet i en mikser med høy skjærhastighet (Braun, MR5550CA). Blandeprosedyren bestod av å tilsette tørt pulver til vannet, blande i ½ minutt, la blandingen hvile i 5 minutter for så å blande igjen i 1 minutt. Prosedyren opphever eventuell falsk størkning.

Pastablandingene ble lagret ved 20 °C i glass med plastlokk, altså forseglet herding. Herdereaksjonen ble stoppet rett etter blanding (0 døgn) og ved henholdsvis 1, 3, 7, 28, 90 døgn, 1 år og 2 år. Herdeprosessen ble stoppet ved å knuse pastaprøvene og tilsette etanol for å erstatte fritt vann, for så å tørke dem ved 105 °C. Ved tørking på 105 °C i en ovn har man ikke full kontroll på den relative fuktigheten. Når relativ fuktigheten blir for lav kan prøven tørkes for mye og visse hydratasjonsfaser dekomponeres. I tillegg karbonatiserer prøvene under tørking.

## 2.2 Termisk analyse

Vekttap av kalsiumhydroksid (CH) og totalt kjemisk bundet vann ble bestemt ved termisk analyse. Analysene ble utført på instrumentet Mettler Toledo TGA/SDTA851 LF 1600 med nitrogen som inert gass. Instrumentet gir 3 kurver; DTA (differensial termisk analyse) som angir energiutvekslingen med prøven og avgjør om en reaksjon er endoterm (opptar varme) eller eksoterm (avgir varme). TGA (termogravimetrisk analyse) gir selve vektendringen i et prøvemateriale kontinuerlig som funksjon av temperaturen. DTGA (differensial termogravimetrisk analyse) som gjør det lettere å se ved hvilken temperatur en reaksjon starter og slutter.

Prøvene ble varmet opp fra 30 °C til 1000 °C med en oppvarmingshastighet på 10 °C/min.

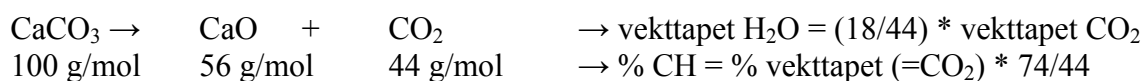
Vekttapet mellom 105 og 440 °C skyldes dekomponering av hydratasjonsfaser som CSH, AFm (f.eks. monosulfat og monokarbonat) og AFt (f.eks. ettringitt). Ut fra dette vekttapet kan kjemisk bundet vann i selve bindemidlet bestemmes.

DTA-kurven viser et skarpt endotermt signal mellom 440 og 550 °C på grunn av dekomponering av CH som blir dannet under hydratasjonen. Mengden av CH ble beregnet fra vekttapet i området 440 - 550 °C, og signalet er spesielt tydelig på DTG-kurven. Mengde CH kan beregnes ut fra vekttapet som følgende:



1 % vekttap (440-550 °C) stemmer overens med 4.1 % Ca(OH)<sub>2</sub>.

Vekttapet mellom 550-810 °C skyldes dekomponering av karbonater fra kalksteinsmel og eventuelle karbonatiserte hydrater under prøvehåndteringen. Hvilke hydratasjonsfaser som har karbonatisert kan ikke med sikkerhet bestemmes. Både CSH, CH og aluminatfaser kan karbonatisere. Mengde karbonatisering er en viktig parameter ved tolking av resultatene. Når en prøve karbonatiserer mye mer enn andre lignende prøver kan det føre til store avvik i CH mengden bestemt med TGA og kan denne verdien ikke tas i betraktning. For å ha en idé om effekten av karbonatiseringen på mengde CH, blir det i denne rapporten antatt at bare CH karbonatiseres og at det fører til 1 % vekttap.



1 % vekttap (550 – 810 °C) tilsvarer 1.7 % Ca(OH)<sub>2</sub>.

Ved blandinger tilsatt FA oppstår det et vekttap ved ca 900 °C selv uten at hydratasjonen har startet (0 døgn, rett etter blanding). Vekttapet ved samme temperatur er minimalt for blandinger uten FA-erstating.

Vekttap mellom 105 og 440 °C, 440 og 550 °C, og 550-810 °C for de forskjellige pasta-blandingene etter 0, 1, 3, 7, 28, 90 døgn, 1 år og 2 år er listet opp i Tabell 4 - 12. Resultatene er oppgitt per klinkervekt, per vekt av klinker sammen med silikastøv (SF), og per vekt av klinker, silika-støv og flygeaske. TGA-, DTGA- og DTA-kurvene er framstilt i Figur 10 - 16.

Vekttapet er uttrykt som % av tørrvekt av prøven. Tørrvekt er beregnet i henhold til ligning (5)

$$M_{tørr} = M_{tot} - (m_{i\_døgn} - m_{0\_døgn}) \quad (5)$$

$M_{tørr}$  er tørrvekt,  $M_{tot}$  totalvekt,  $m_{i\_døgn}$  vekttapet mellom 105 °C og 1000 °C målt ved  $i$  døgn, og  $m_{0\_døgn}$  vekttapet mellom 105 °C og 1000 °C målt ved 0 døgn.

Instrumentet måler vekttap som % av totalt innveid prøve. For å beregne det som % av tørrvekt mellom for eksempel 105 °C og 440 °C, brukes ligning (6)

$$\frac{m_{105-440}}{M_{tørr}} = \left( \frac{m_{105-440}}{M_{tot}} \right) \cdot \left( \frac{M_{tot}}{M_{tørr}} \right) \quad (6)$$

$\frac{m_{105-440}}{M_{tørr}}$  er vekttapet mellom 105 °C og 440 °C som % av tørrvekt,  $\left( \frac{m_{105-440}}{M_{tot}} \right)$  er vekttapet

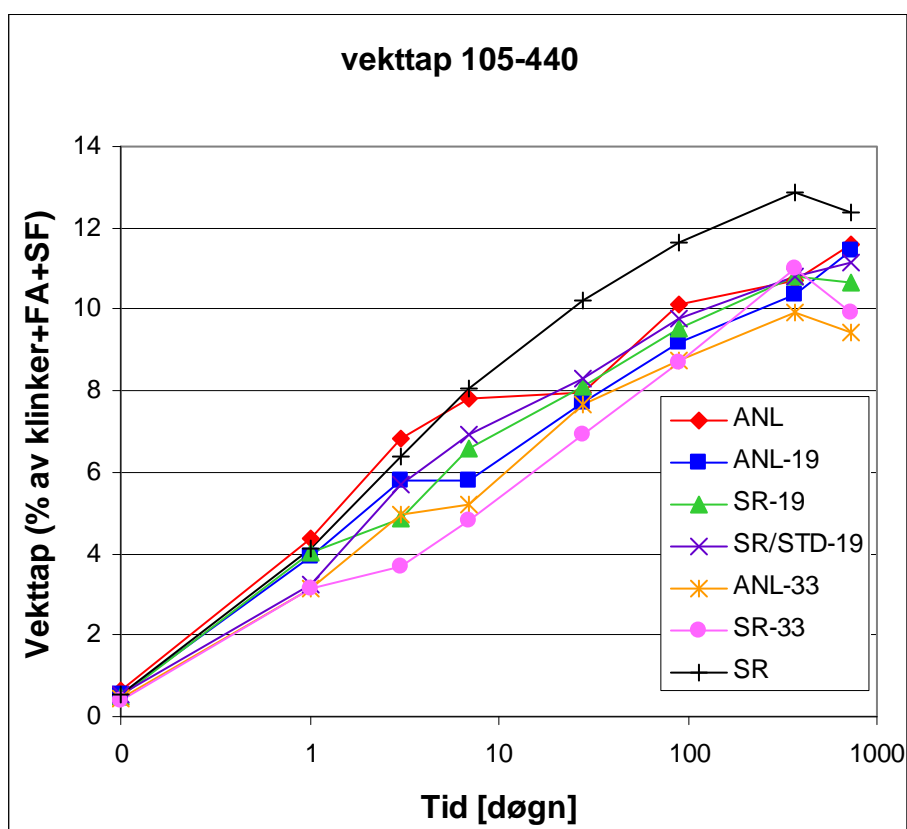
som er målt av instrumentet, og  $\left( \frac{M_{tot}}{M_{tørr}} \right)$  er forholdet mellom tørr- og totalvekt.



### 3 RESULTATER

Tabell 4: Vekttap mellom 105 °C og 440 °C i % av klinker+FA+SF. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

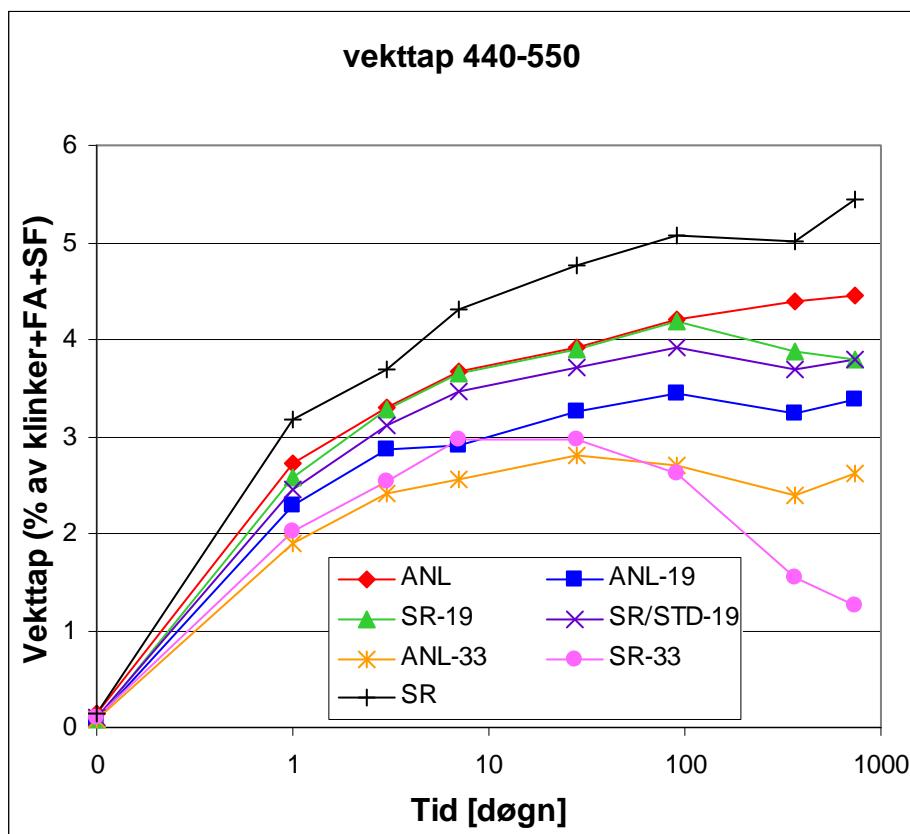
Tid [døgn]	Blanding						
	ANL	ANL-19	SR-19	SR/STD-19	ANL-33	SR-33	SR
0,1	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6
1	4,4	3,9	4,0	3,3	3,1	3,2	4,1
3	6,8	5,8	4,9	5,7	5,0	3,7	6,4
7	7,8	5,8	6,6	6,9	5,2	4,8	8,0
28	8,0	7,7	8,1	8,3	7,6	6,9	10,2
90	10,1	9,2	9,5	9,8	8,7	8,7	11,7
365	10,7	10,3	10,8	10,8	9,9	11,0	12,9
730	11,6	11,5	10,7	11,1	9,4	9,9	12,4



Figur 1: Vekttap mellom 105 °C og 440 °C i % av klinker+FA+SF som funksjon av tid. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

Tabell 5: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker+FA+SF. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

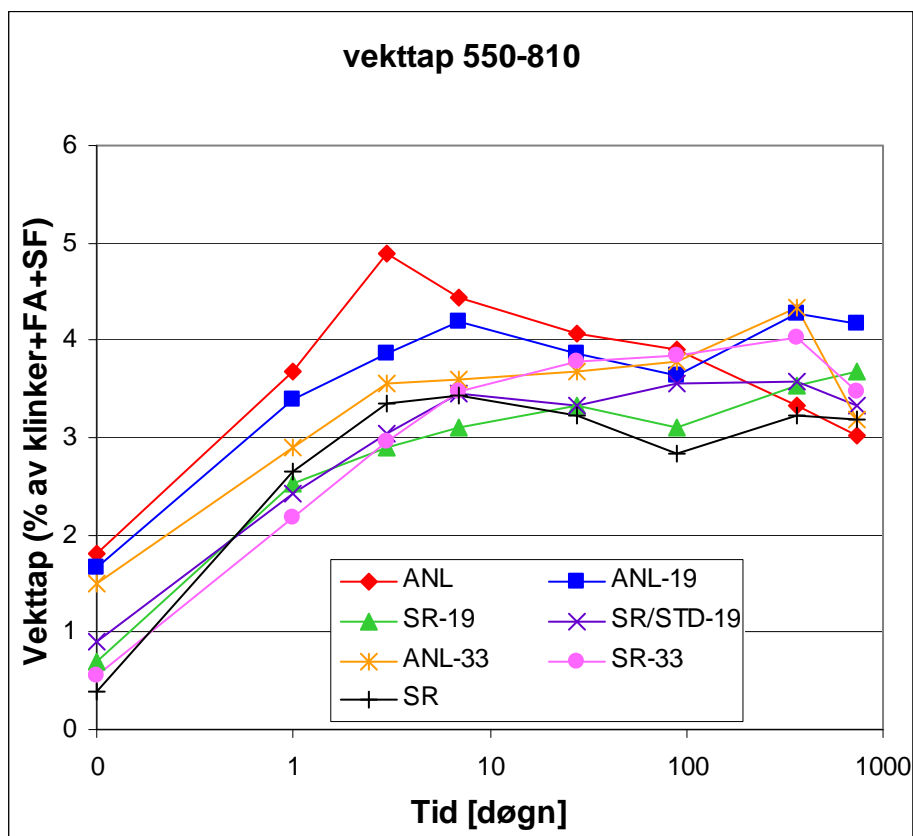
Tid [døgn]	Blanding						
	ANL	ANL-19	SR-19	SR/STD-19	ANL-33	SR-33	SR
0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
1	2,7	2,3	2,6	2,5	1,9	2,0	3,2
3	3,3	2,9	3,3	3,1	2,4	2,5	3,7
7	3,7	2,9	3,6	3,5	2,6	3,0	4,3
28	3,9	3,3	3,9	3,7	2,8	3,0	4,8
90	4,2	3,4	4,2	3,9	2,7	2,6	5,1
365	4,4	3,2	3,9	3,7	2,4	1,6	5,0
730	4,5	3,4	3,8	3,8	2,6	1,3	5,5



Figur 2: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker+FA+SF som funksjon av tid. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

Tabell 6: Vekttap mellom 550 °C og 810 °C i % av klinker+FA+SF. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

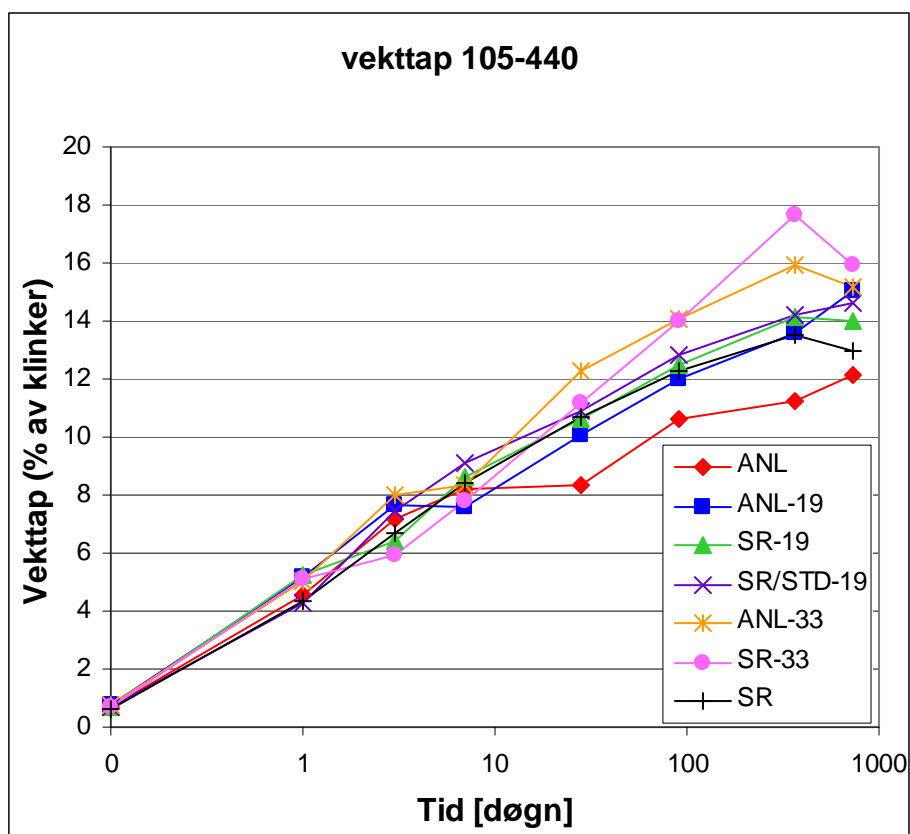
Tid [døgn]	Blanding						
	ANL	ANL-19	SR-19	SR/STD-19	ANL-33	SR-33	SR
0,1	1,8	1,7	0,7	0,9	1,5	0,6	0,4
1	3,7	3,4	2,5	2,4	2,9	2,2	2,7
3	4,9	3,9	2,9	3,1	3,6	3,0	3,4
7	4,4	4,2	3,1	3,5	3,6	3,5	3,4
28	4,1	3,9	3,3	3,3	3,7	3,8	3,2
90	3,9	3,6	3,1	3,6	3,8	3,8	2,8
365	3,3	4,3	3,5	3,6	4,3	4,0	3,2
730	3,0	4,2	3,7	3,3	3,2	3,5	3,2



Figur 3: Vekttap mellom 550 °C og 810 °C i % av klinker+FA+SF som funksjon av tid. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

Tabell 7: Vekttap mellom 105 °C og 440 °C i % av klinker. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF,

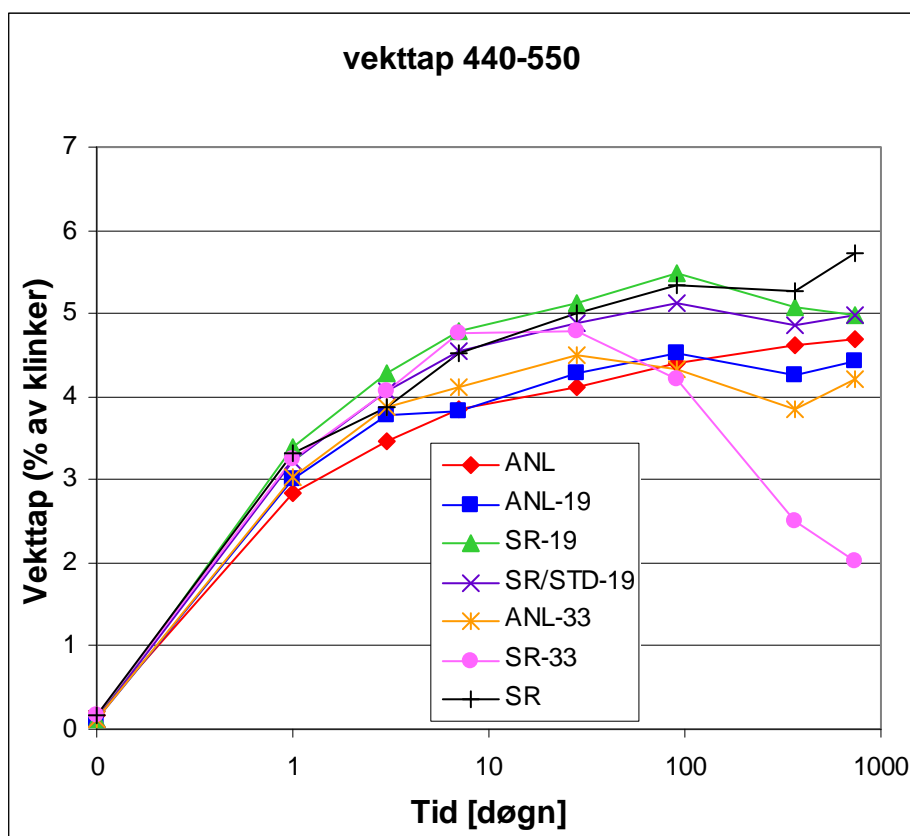
Tid [døgn]	Blanding						
	ANL	ANL-19	SR-19	SR/STD-19	ANL-33	SR-33	SR
0,1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
1	4,6	5,2	5,3	4,3	5,0	5,1	4,3
3	7,2	7,6	6,4	7,5	8,0	5,9	6,7
7	8,2	7,6	8,6	9,1	8,4	7,8	8,4
28	8,4	10,1	10,6	10,9	12,3	11,1	10,7
90	10,6	12,0	12,5	12,8	14,0	14,0	12,2
365	11,3	13,6	14,2	14,2	15,9	17,7	13,5
730	12,2	15,0	14,0	14,6	15,1	15,9	13,0



Figur 4: Vekttap mellom 105 °C og 440 °C i % av klinker som funksjon av tid. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

Tabell 8: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

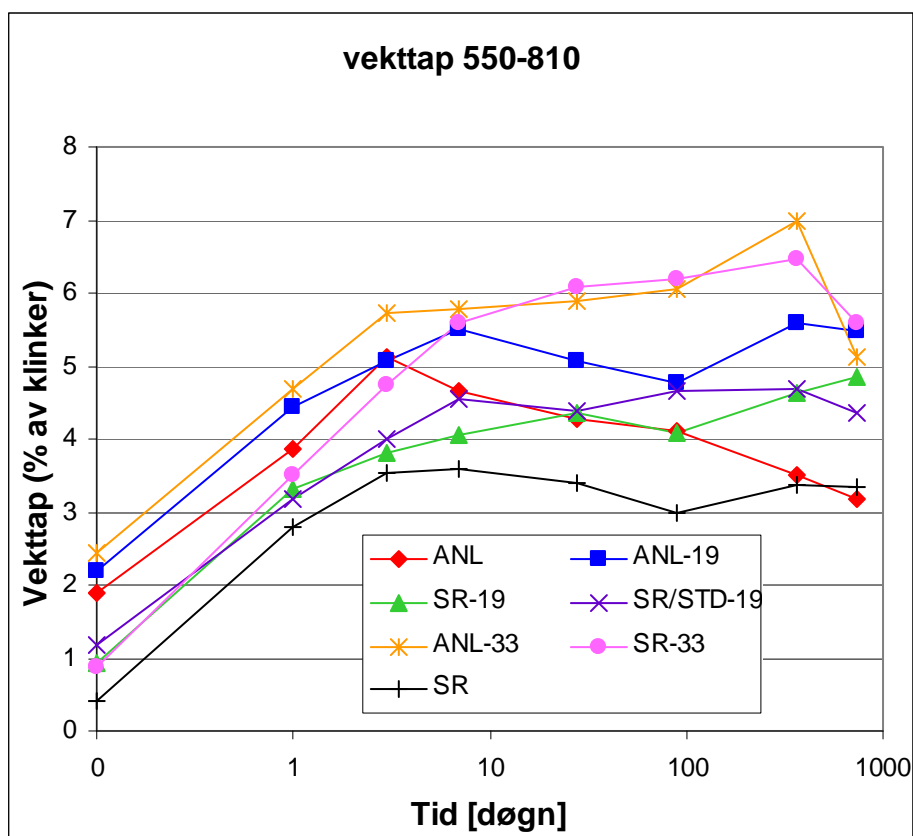
Tid [døgn]	Blanding						
	ANL	ANL-19	SR-19	SR/STD-19	ANL-33	SR-33	SR
0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
1	2,8	3,0	3,4	3,2	3,0	3,2	3,3
3	3,5	3,8	4,3	4,1	3,9	4,1	3,9
7	3,9	3,8	4,8	4,5	4,1	4,8	4,5
28	4,1	4,3	5,1	4,9	4,5	4,8	5,0
90	4,4	4,5	5,5	5,1	4,3	4,2	5,3
365	4,6	4,2	5,1	4,9	3,8	2,5	5,3
730	4,7	4,4	5,0	5,0	4,2	2,0	5,7



Figur 5: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker som funksjon av tid. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

Tabell 9: Vekttap mellom 550 °C og 810 °C i % av klinker. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

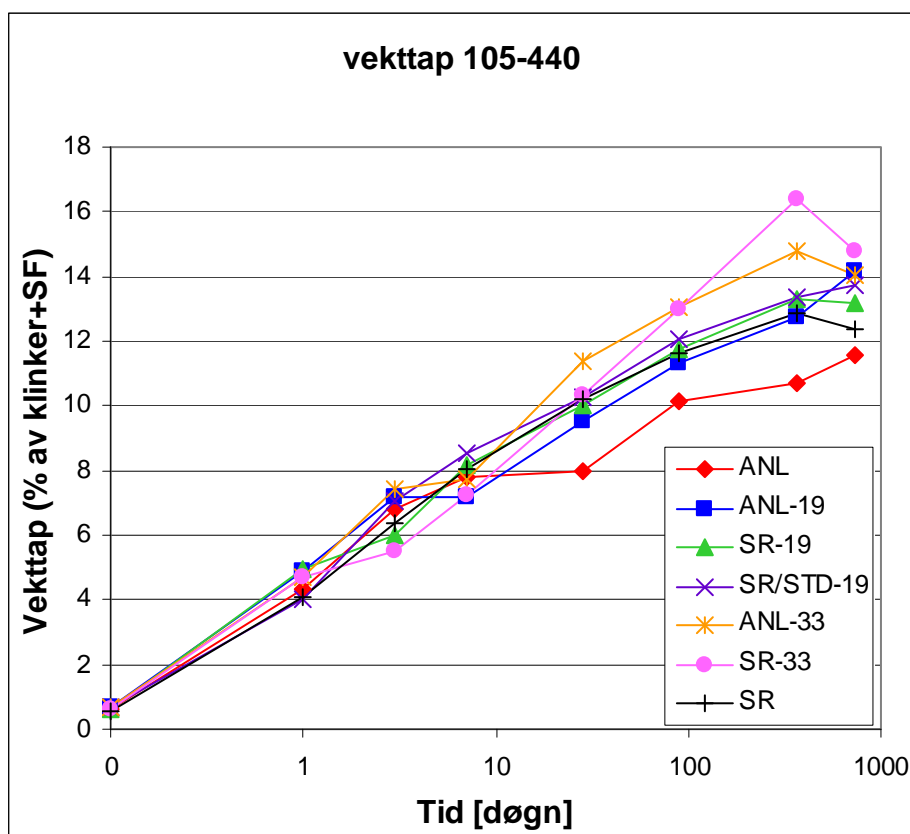
Tid [døgn]	Blanding						
	ANL	ANL-19	SR-19	SR/STD-19	ANL-33	SR-33	SR
0,1	1,9	2,2	0,9	1,2	2,4	0,9	0,4
1	3,9	4,4	3,3	3,2	4,7	3,5	2,8
3	5,1	5,1	3,8	4,0	5,7	4,7	3,5
7	4,7	5,5	4,1	4,5	5,8	5,6	3,6
28	4,3	5,1	4,4	4,4	5,9	6,1	3,4
90	4,1	4,8	4,1	4,7	6,1	6,2	3,0
365	3,5	5,6	4,6	4,7	7,0	6,5	3,4
730	3,2	5,5	4,8	4,4	5,1	5,6	3,3



Figur 6: Vekttap mellom 550 °C og 810 °C i % av klinker som funksjon av tid. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

Tabell 10: Vekttap mellom 105 °C og 440 °C i % av klinker+SF. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

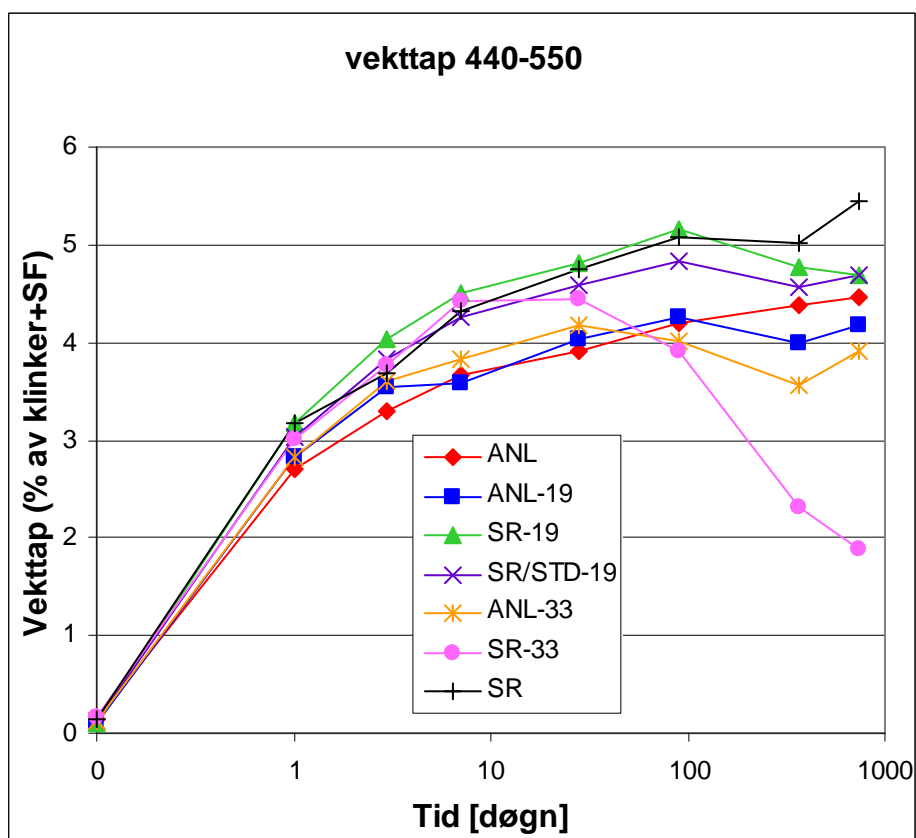
Tid [døgn]	Blanding						
	ANL	ANL-19	SR-19	SR/STD-19	ANL-33	SR-33	SR
0,1	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6
1	4,4	4,9	4,9	4,0	4,7	4,7	4,1
3	6,8	7,2	6,0	7,0	7,4	5,5	6,4
7	7,8	7,2	8,1	8,6	7,8	7,2	8,0
28	8,0	9,5	10,0	10,3	11,4	10,3	10,2
90	10,1	11,3	11,8	12,1	13,0	13,0	11,7
365	10,7	12,8	13,3	13,3	14,8	16,4	12,9
730	11,6	14,2	13,2	13,7	14,1	14,8	12,4



Figur 7: Vekttap mellom 105 °C og 440 °C i % av klinker+SF som funksjon av tid. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

Tabell 11: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker+SF. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

Tid [døgn]	Blanding						
	ANL	ANL-19	SR-19	SR/STD-19	ANL-33	SR-33	SR
0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
1	2,7	2,8	3,2	3,0	2,8	3,0	3,2
3	3,3	3,5	4,0	3,8	3,6	3,8	3,7
7	3,7	3,6	4,5	4,3	3,8	4,4	4,3
28	3,9	4,0	4,8	4,6	4,2	4,4	4,8
90	4,2	4,3	5,2	4,8	4,0	3,9	5,1
365	4,4	4,0	4,8	4,6	3,6	2,3	5,0
730	4,5	4,2	4,7	4,7	3,9	1,9	5,5

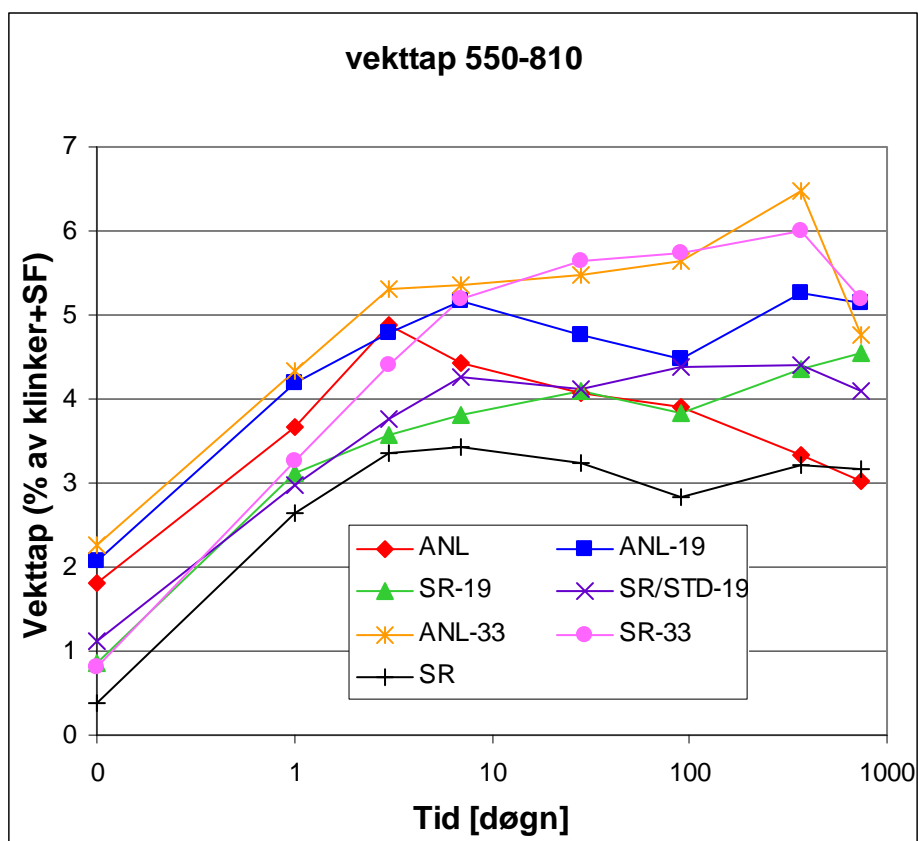


Figur 8: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker+SF som funksjon av tid. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

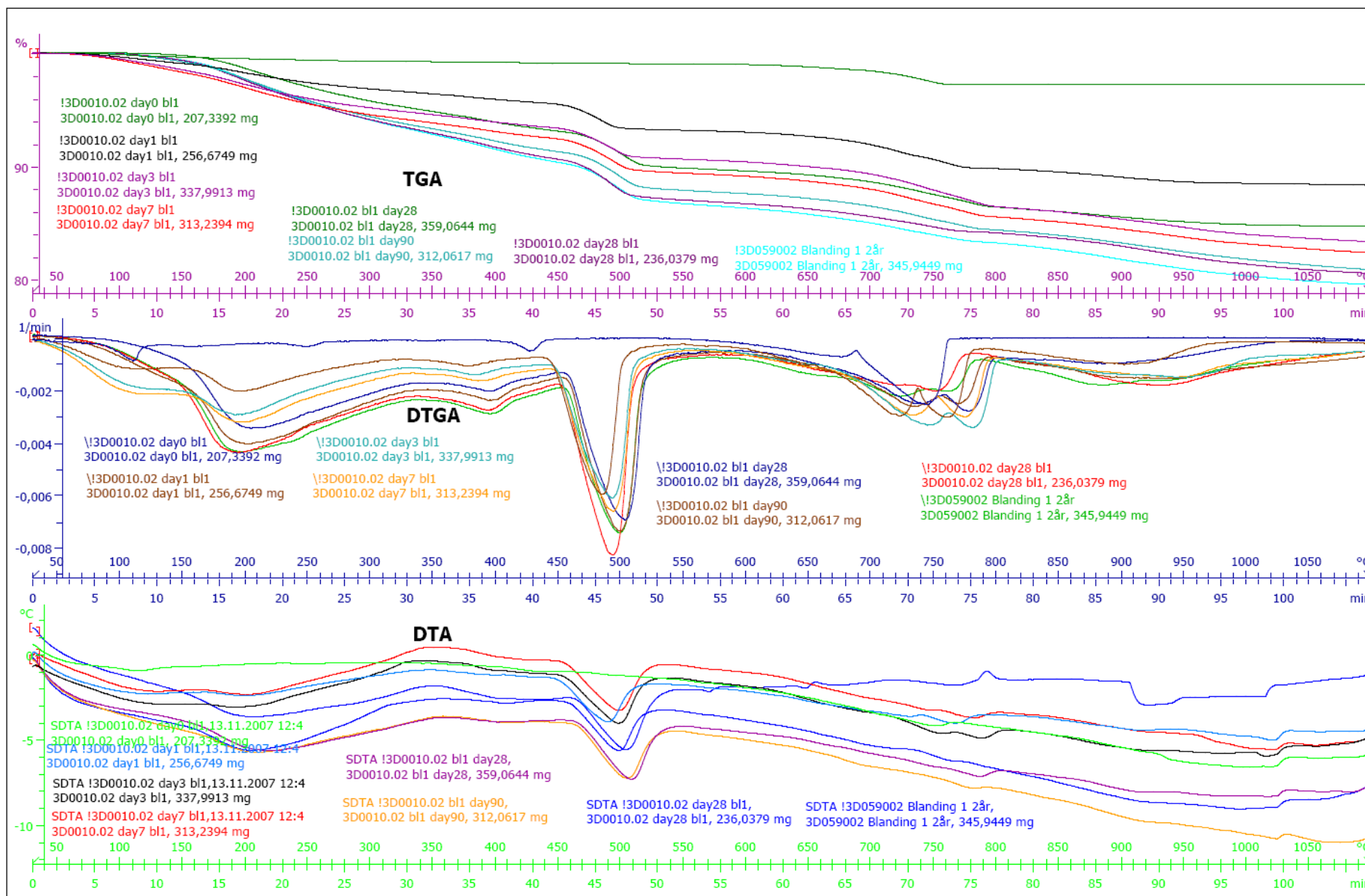


Tabell 12: Vekttap mellom 550 °C og 810 °C i % av klinker+SF. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.

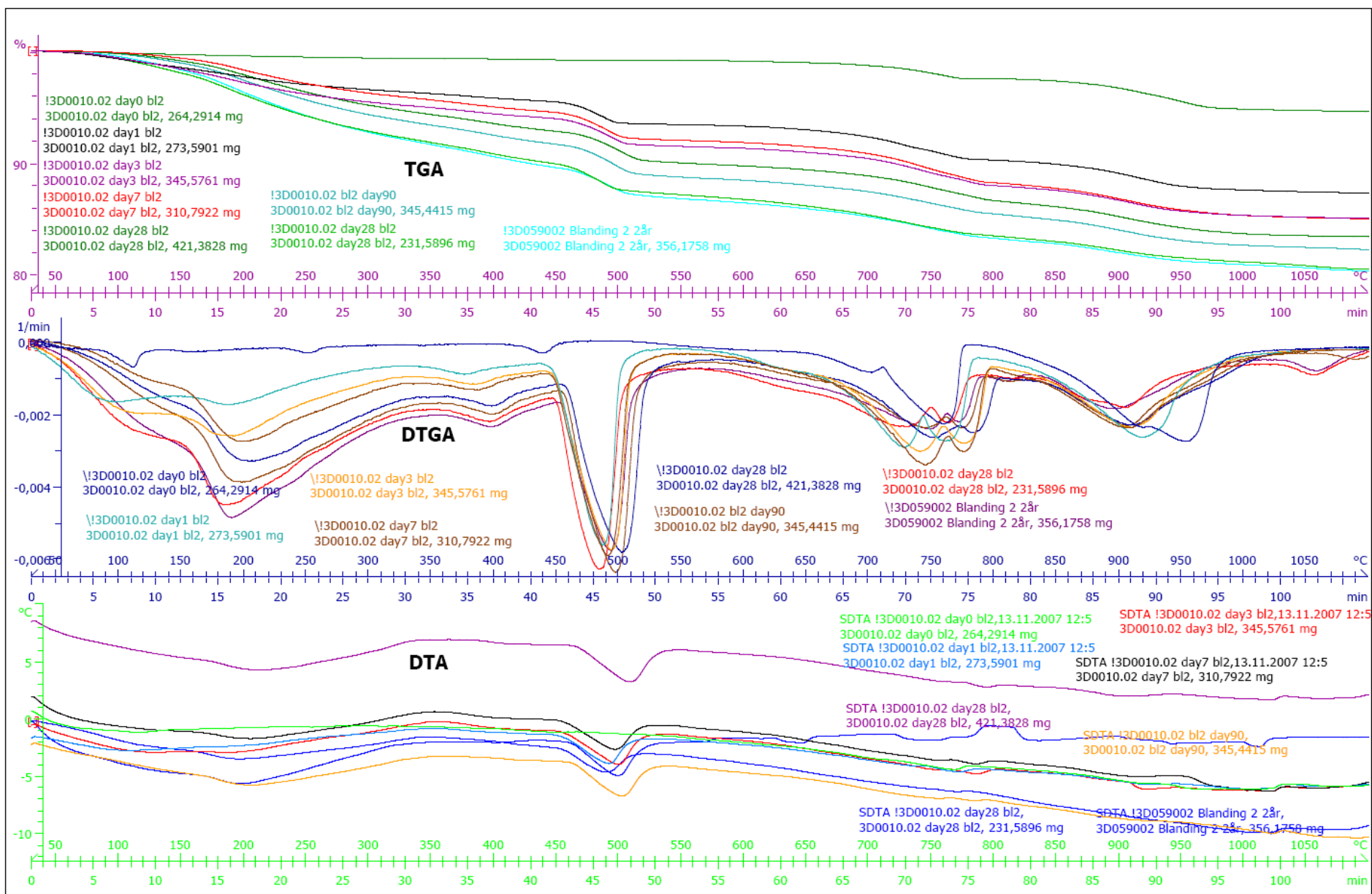
Tid [døgn]	Blanding						
	ANL	ANL-19	SR-19	SR/STD-19	ANL-33	SR-33	SR
0,1	1,8	2,1	0,9	1,1	2,3	0,8	0,4
1	3,7	4,2	3,1	3,0	4,3	3,3	2,7
3	4,9	4,8	3,6	3,8	5,3	4,4	3,4
7	4,4	5,2	3,8	4,3	5,4	5,2	3,4
28	4,1	4,8	4,1	4,1	5,5	5,6	3,2
90	3,9	4,5	3,8	4,4	5,6	5,7	2,8
365	3,3	5,3	4,4	4,4	6,5	6,0	3,2
730	3,0	5,1	4,6	4,1	4,8	5,2	3,2



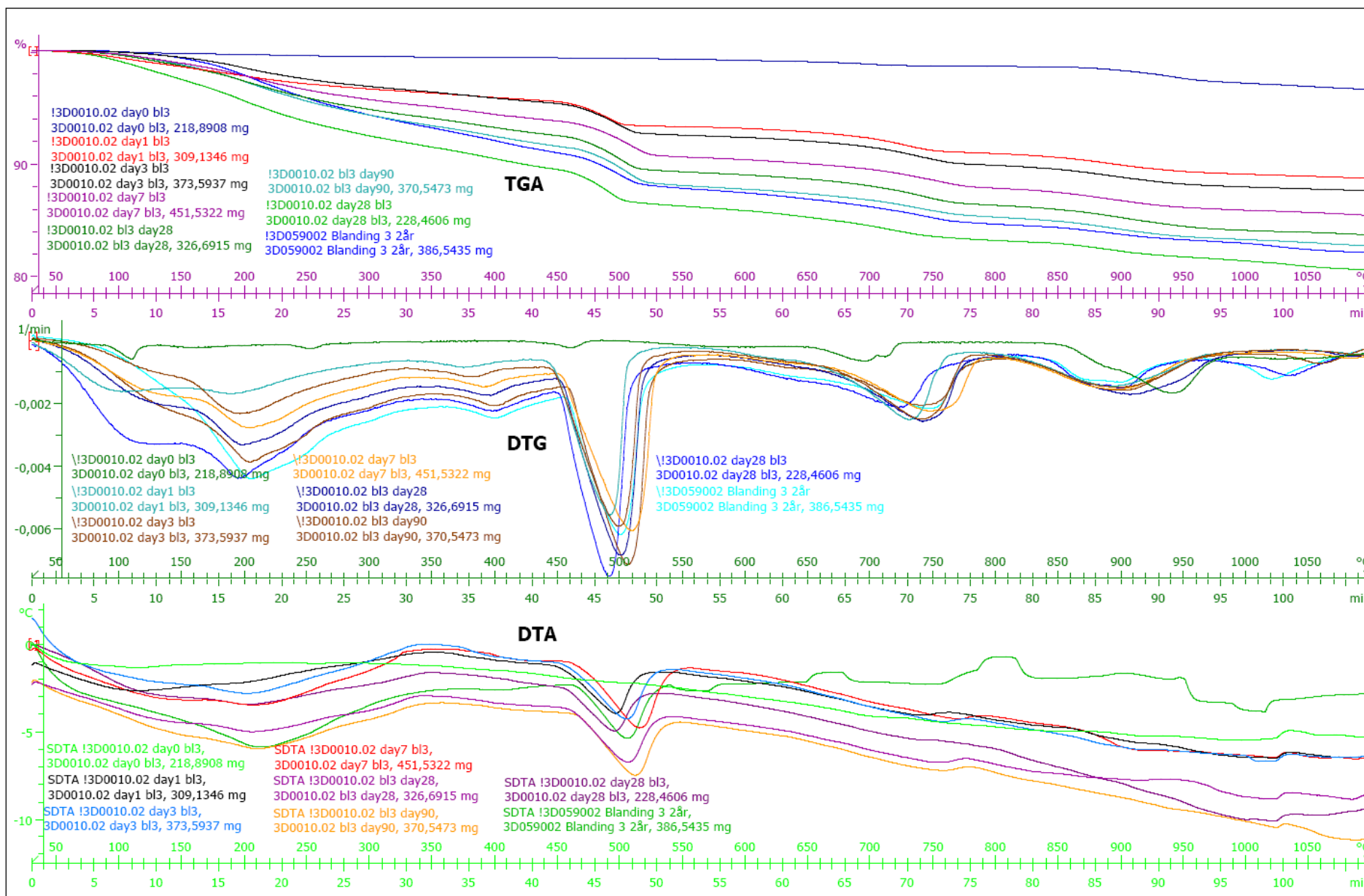
Figur 9: Vekttap mellom 550 °C og 810 °C i % av klinker+SF som funksjon av tid. Nummer etter bindestrek for blandingene angir mengde FA, ellers har alle blandinger 4,8 % SF.



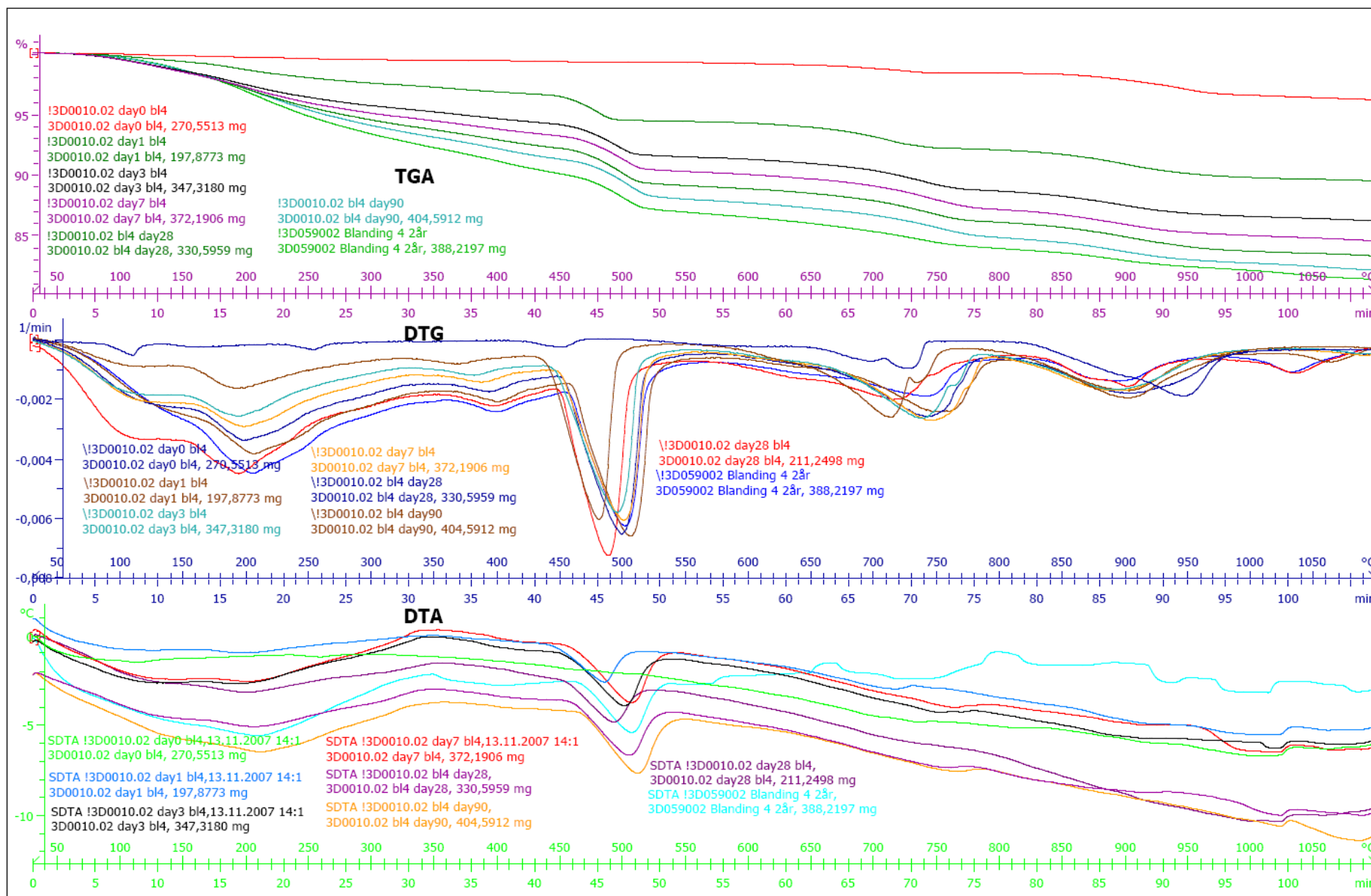
**Figur 10: TGA/DTG/DTA kurver for pastblanding 1 (ANL+SF) etter 0, 1, 3, 7, 28, 90 døgn, 1 år og 2 år herding ved 20 °C.**



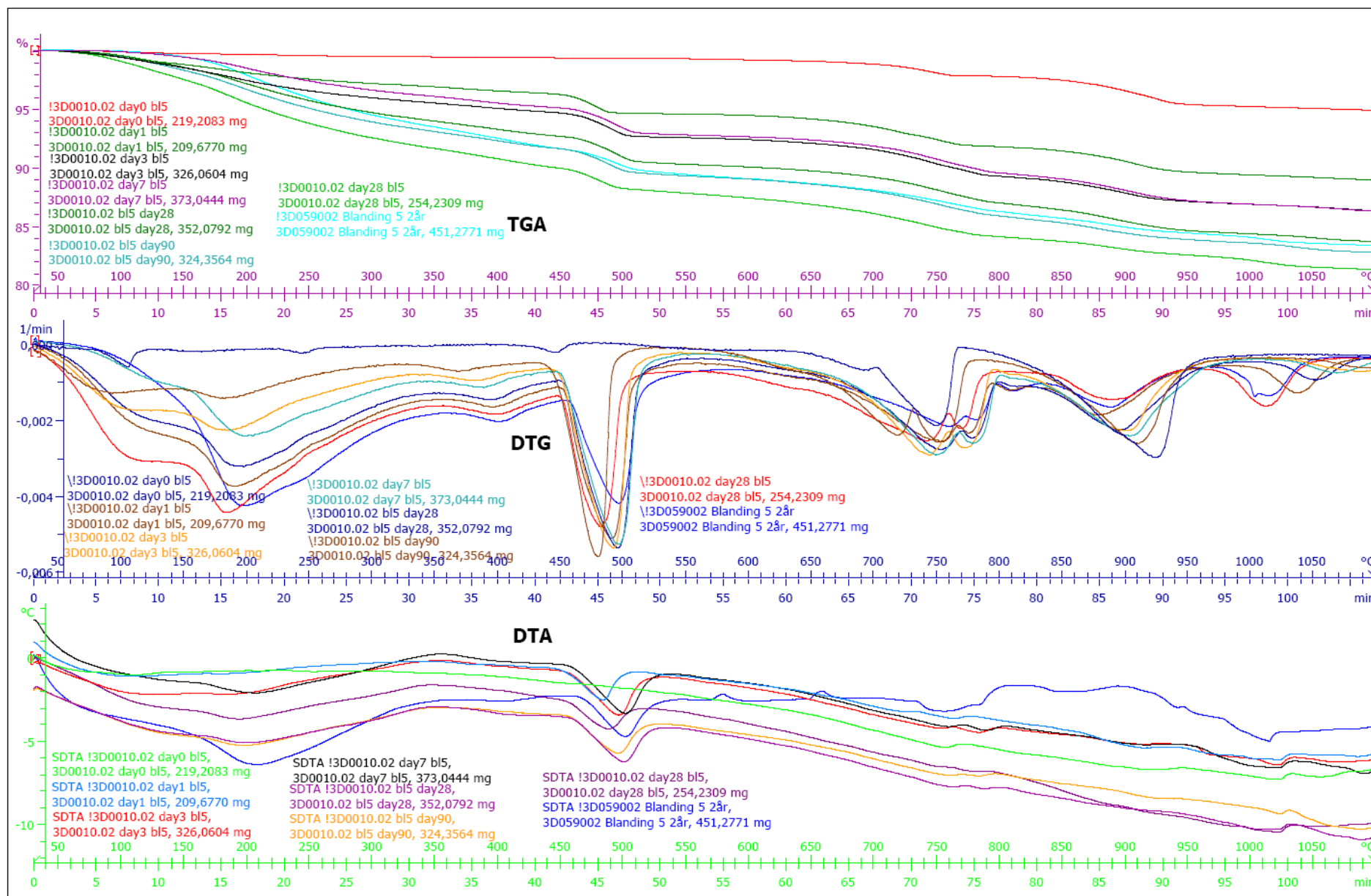
**Figur 11: TGA/DTG/DTA kurver for pastblanding 2 (ANL + 19 % FA+SF) etter 0, 1, 3, 7, 28, 90 døgn, 1 år og 2 år herding ved 20 °C.**



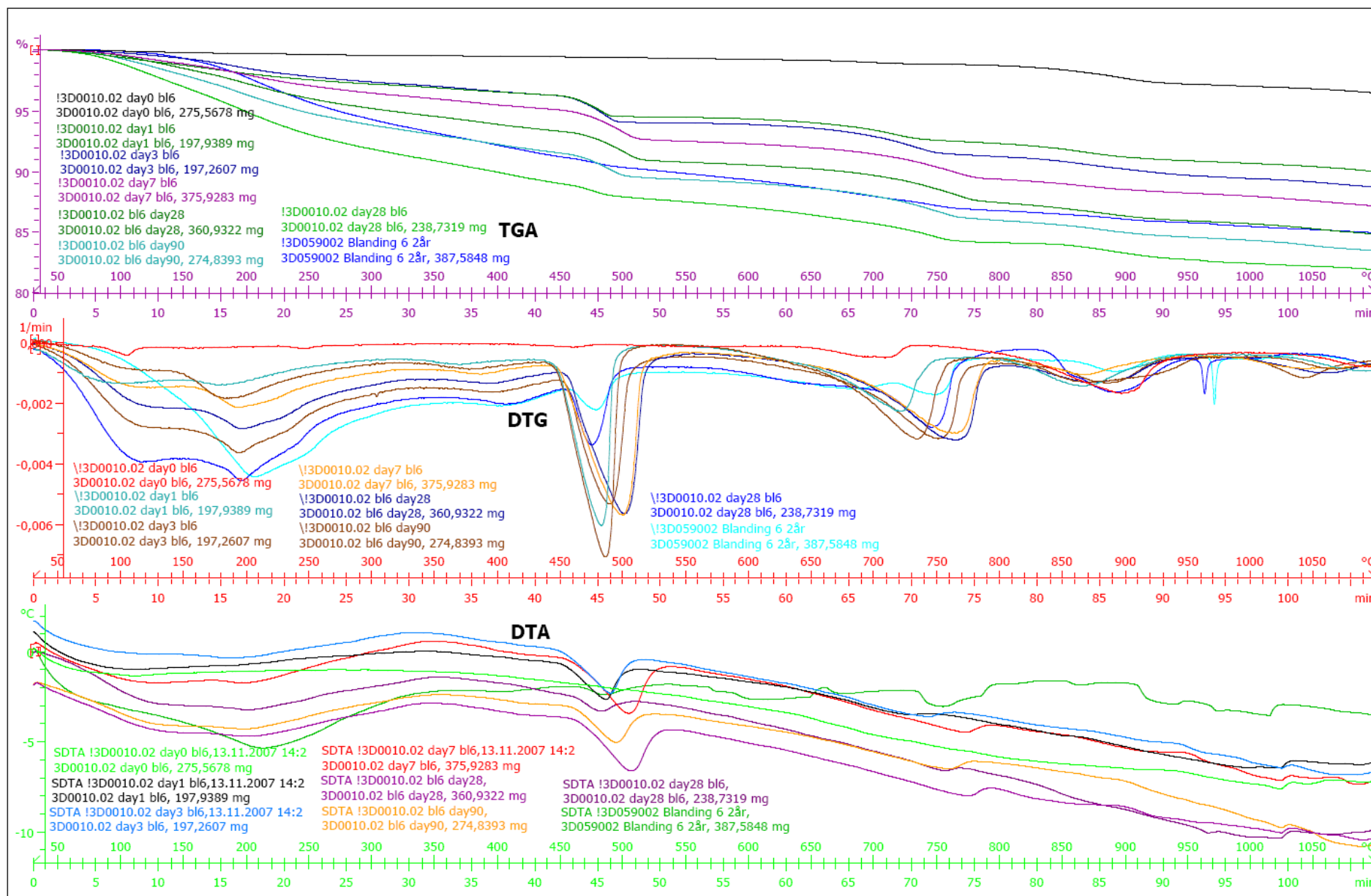
Figur 12: TGA/DTG/DTA kurver for pastblanding 3 (SR+ 19 % FA+SF) etter 0, 1, 3, 7, 28, 90 døgn, 1 år og 2 år herding ved 20 °C.



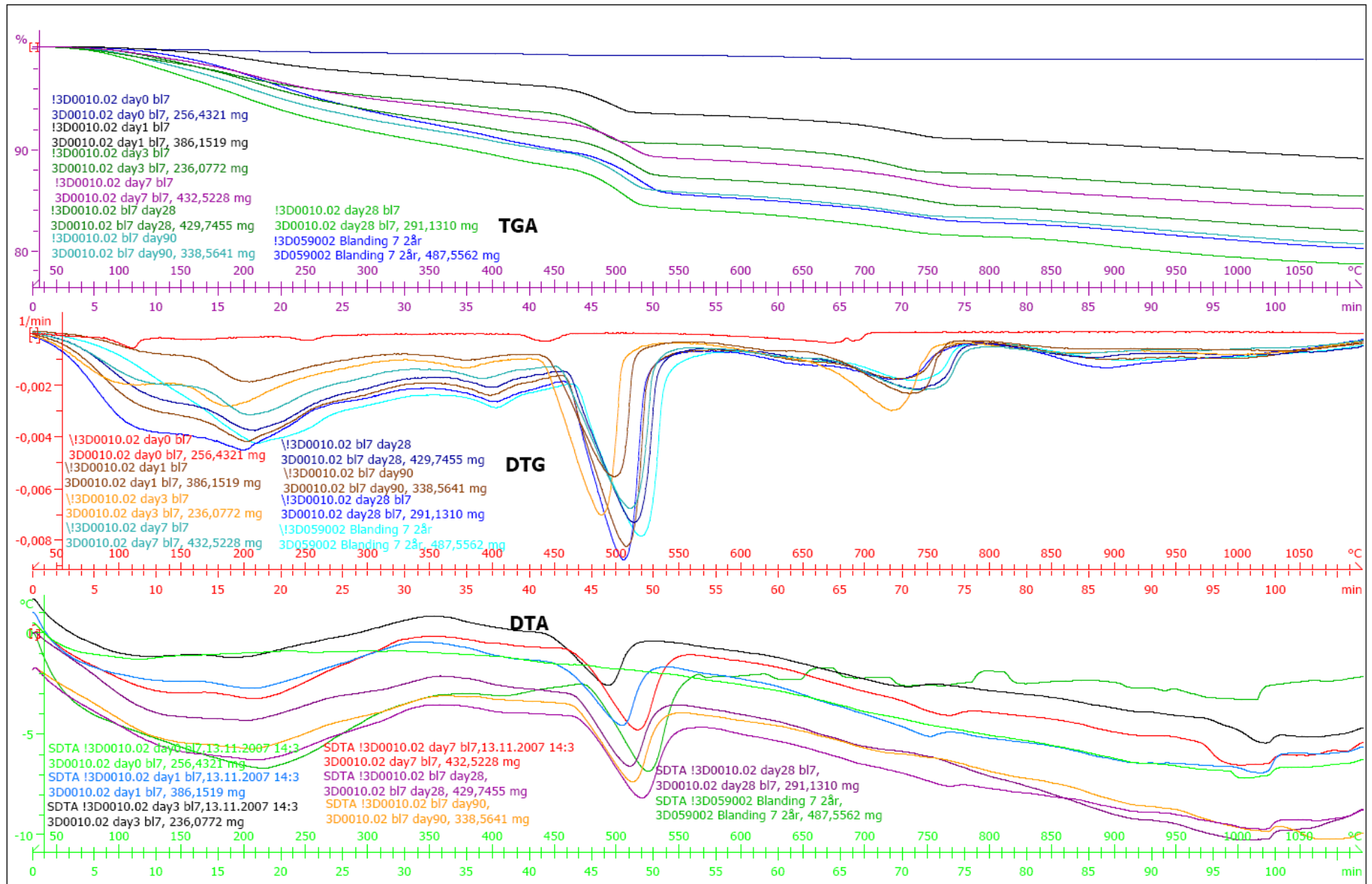
Figur 13: TGA/DTG/DTA kurver for pastblending 4 (20 % STD+80 % SR+ 19 % FA+SF) etter 0, 1, 3, 7, 28, 90 døgn, 1 år og 2år herding ved 20 °C.



Figur 14: TGA/DTG/DTA kurver for pastblanding 5 (ANL+33 % FA+ SF) etter 0, 1, 3, 7, 28, 90 døgn, 1 år og 2 år herding ved 20 °C.



Figur 15: TGA/DTG/DTA kurver for pastblanding 6 (SR+ 33 % FA+SF) etter 0, 1, 3, 7, 28, 90 døgn, 1 år og 2 år herding ved 20 °C.



Figur 16: TGA/DTG/DTA kurver for pastblanding 7 (SR+SF) etter 0, 1, 3, 7, 28, 90 døgn, 1 år og 2 år herding ved 20 °C.

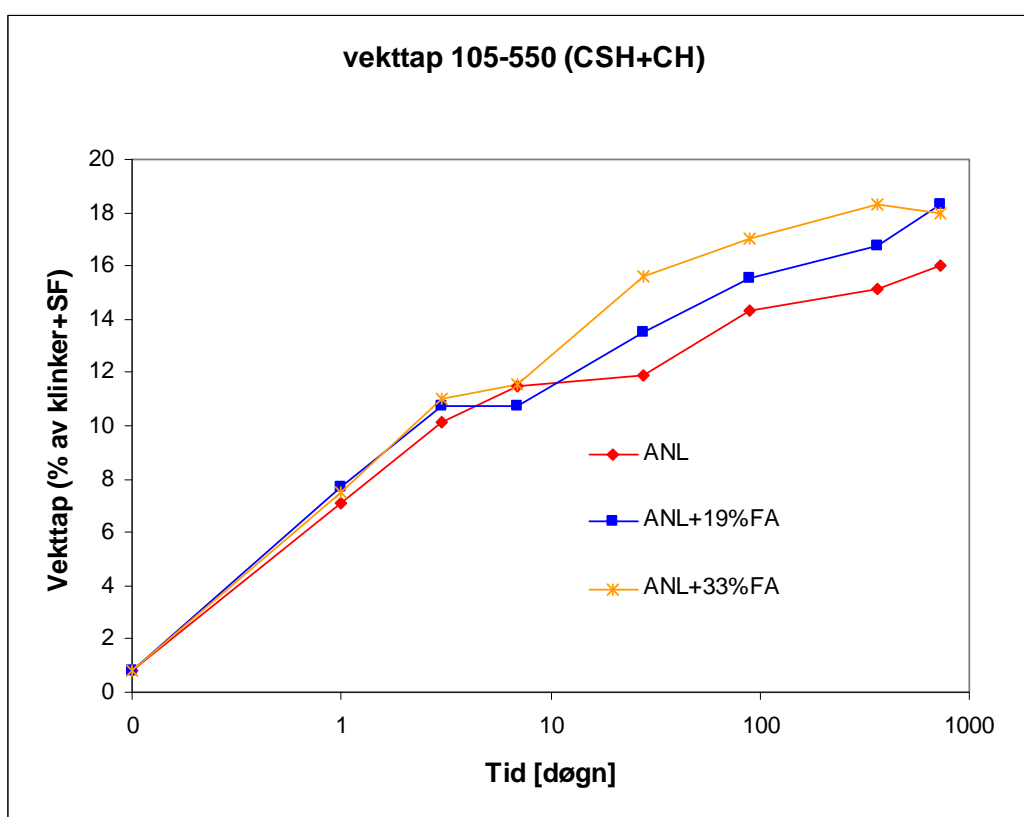


## 4 DISKUSJON

I denne rapporten ble det fokusert på resultatene per vekt av summen av klinker og silikastøv siden samme mengde silikastøv ble brukt for alle blandinger (4,8 %) og denne kombinasjonen kan anses som referanse.

Tabell 13: Vekttap mellom 105 °C og 550 °C i % av klinker + SF for ANL-sement.

105-550 C ANL								
FA [%]	0,1 døgn	1 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn	90 døgn	1 år	2 år
0	0,79	7,06	10,12	11,49	11,87	14,33	15,11	16,03
19	0,80	7,69	10,72	10,76	13,53	15,57	16,76	18,33
33	0,81	7,51	11,03	11,58	15,59	17,05	18,34	17,96



Figur 17: Vekttap mellom 105 °C og 550 °C i % av klinker + SF i funksjon av FA-erstatning og tid for ANL-sement.

Tabell 13 og Figur 17, og Tabell 14 og Figur 18 viser vekttapet mellom 105 °C og 550 °C relativt til klinker - og silikastøvinneholdet for henholdsvis ANL - og SR - sement. Vekttapet mellom 105 °C og 550 °C skyldes dekomponering av hydrater i bindemidlet. Vekttapet øker ikke ved tilsetning av flygeaske før 7 døgn. Dette viser at flygeaske ikke produserer ekstra hydratasjonsfaser før 7 døgn, eventuelt ikke bruker mer vann enn hva som allerede er bundet i den kalsiumhydroksid den måtte ha reagert med. For ANL-sement øker vekttapet med økende mengde FA-erstatning etter 28 døgn. Dette indikerer dannelse av ekstra hydratasjonsprodukter fra pozzolanreaksjonen til flygeaske. For SR-sement er det ikke en lignende økning i mengde bundet vann i bindemiddelet.

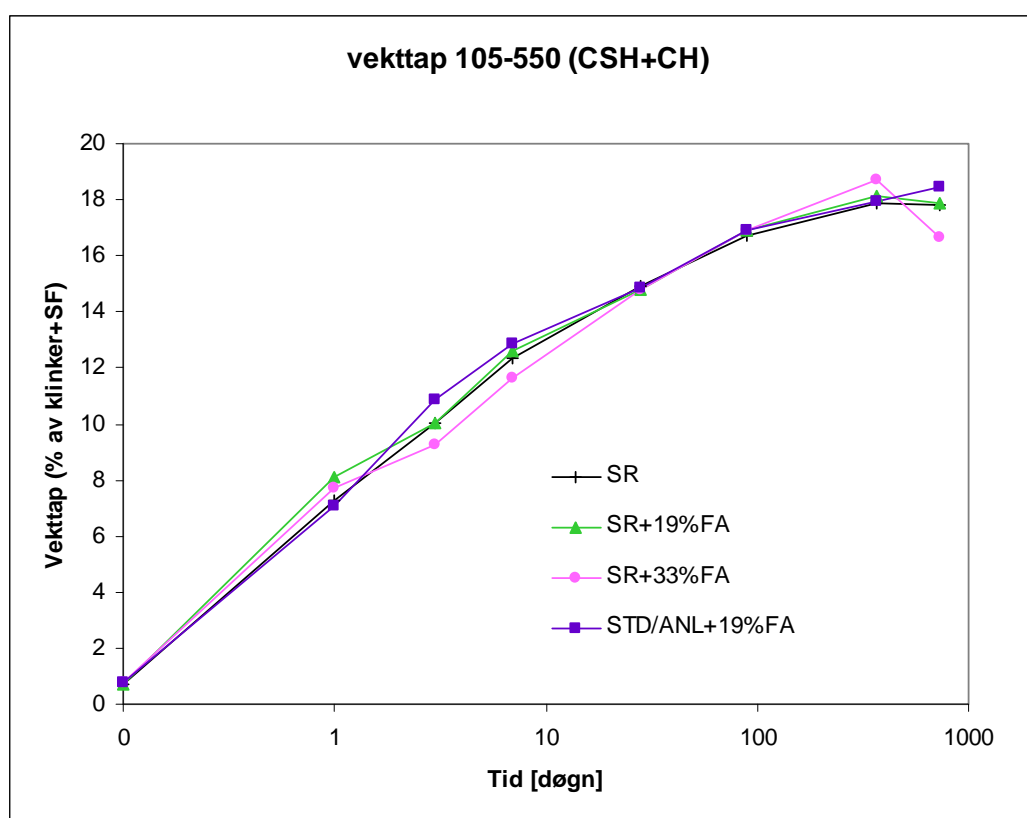
SR-sement uten FA-erstatning har et høyere vekttap enn ANL uten FA-erstatning etter 7 døgn. Derimot har begge sementtyper nesten samme vekttap ved 33 % FA-erstatning.

Figur 17 og Figur 18 viser at mengde bundet vann av noen blandinger minsker mellom 1 og 2 år. Dette skyldes prøvetilberedning til 2 års prøvene. Prøvene ble tørket litt for mye før dem ble analysert i TGA selv om samme prosedyren som før ble brukt. Muligens var relativ fuktighet i ovnen lavere enn før. Hydratasjonsproduktene som dekomponeres ved 100-200 °C ble dermed delvis uttørket før testen (se Figur 10 til Figur 16).

STD/ANL+19 % FA har omkring samme mengde aluminatfaser som SR+19 % FA og ble derfor sammenlignet (Figur 18 og Figur 20). Begge blandinger oppfører seg veldig likt over tid når det gjelder mengde bundet vann og CH.

Tabell 14: Vekttap mellom 105 °C og 550 °C i % av klinker + SF for SR-sement.

	105-550 C SR							
FA [%]	0,1 døgn	1 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn	90 døgn	1 år	2år
0	0,71	7,28	10,06	12,35	14,95	16,74	17,87	17,82
19	0,73	8,13	10,05	12,64	14,81	16,92	18,11	17,86
33	0,78	7,72	9,26	11,63	14,79	16,92	18,73	16,68



Figur 18: Vekttap mellom 105 °C og 550 °C i % av klinker + SF i funksjon av FA-erstatning og tid for SR-sement og STD/ANL.

Tabell 15 og Figur 19, og Tabell 16 og Figur 20 viser vekttap mellom 440 °C og 550 °C for henholdsvis ANL og SR sement. Dette vekttapet er proporsjonalt med kalsiumhydroksid (CH) mengden. Pozzolanreaksjonen fører til en reduksjon av CH mengden som beskrevet i innledningen.

CH mengden i ren ANL og SR øker med økende sementhydratasjon og tid.

I begynnelsen av hydratasjonen øker CH mengden litt når sementene blir erstattet med FA. Dette tyder på en fillereffekt av FA. For ANL og SR med FA er denne effekten synlig fram til 28 døgn, unntatt for ANL-33 % FA hvor CH mengden allerede begynner å minske etter 7 døgn pga pozzolaneffekten.

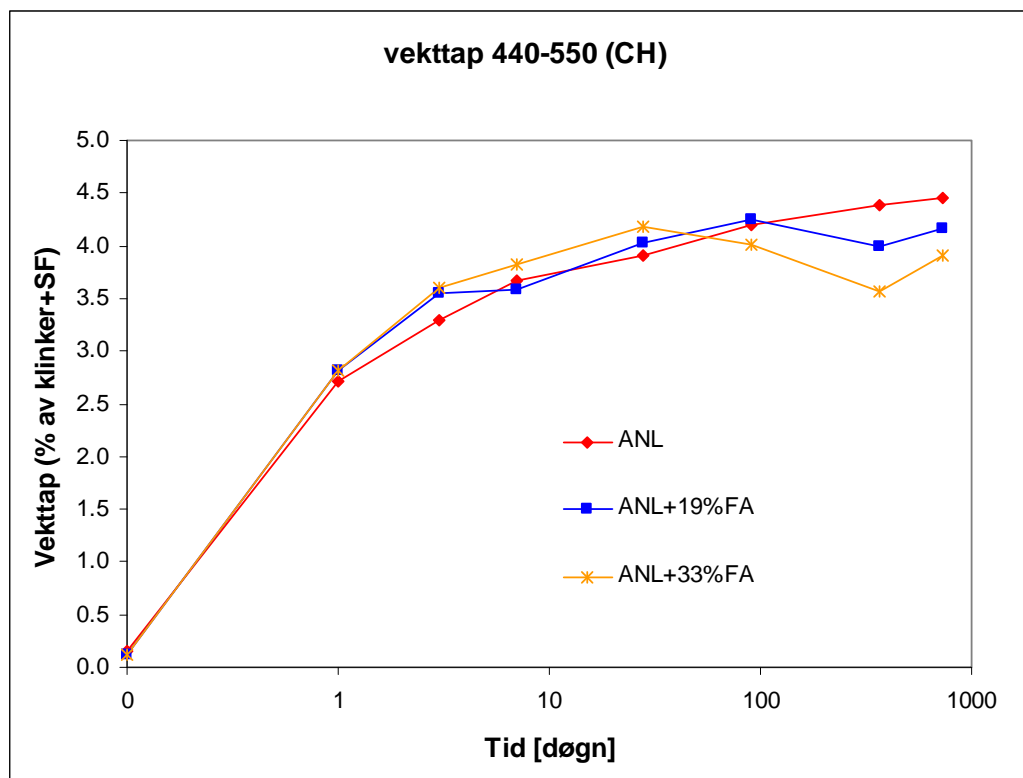
CH - kurven for ANL-33 % FA viser en knekk etter 90 døgn, noe som tyder på at CH blir forbrukt av FA. For ANL-19 % FA er det en trend til minskende CH etter 1 år.

CH-kurven til SR-33 % FA viser allerede en knekk mellom 7 og 28 døgn, noe som tyder på at FA reagerer raskt med CH. For SR-19 % FA er det en knekk i CH-kurven etter 90 døgn.

Den største CH reduksjonen oppnås for SR-sement med 33 % FA. Dette kan tyde på at FA reagerer mest når den blir blandet inn i SR-sement. Mengde bundet vann (105-550 °C) i SR-sementen øker ikke med økende FA reaksjon. I ANL-sementen fører pozzolanreaksjonen til FA til en økning i mengde bundet vann. Dette kan muligens bli forklart ved at reaksjonsproduktene til pozzolanreaksjonen til FA i SR-sement er forskjellig (mindre vannrik) fra reaksjonsproduktene dannet i ANL-sement.

Tabell 15: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker + SF for ANL-sement.

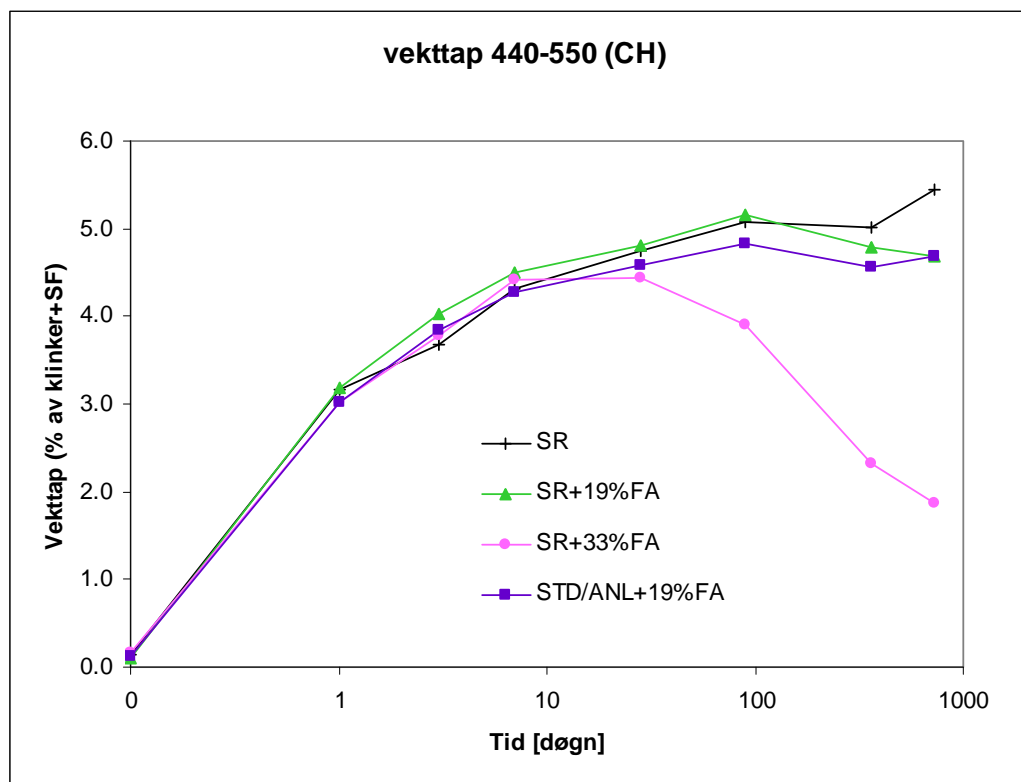
	440-550 C ANL							
FA [%]	0,1 døgn	1 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn	90 døgn	1 år	2 år
0	0,15	2,71	3,29	3,67	3,91	4,20	4,39	4,46
19	0,11	2,82	3,54	3,59	4,03	4,26	4,00	4,17
33	0,12	2,82	3,60	3,83	4,19	4,02	3,56	3,90



Figur 19: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker + SF i funksjon av FA-erstatning og tid for ANL-sement.

Tabell 16: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker + SF for SR-sement.

440-550 C SR								
FA [%]	0,1 døgn	1 døgn	3 døgn	7 døgn	28 døgn	90 døgn	1 år	2 år
0	0,15	3,17	3,68	4,31	4,75	5,08	5,02	5,45
19	0,11	3,18	4,04	4,50	4,81	5,16	4,78	4,68
33	0,16	3,01	3,77	4,42	4,44	3,91	2,32	1,87



Figur 20: Vekttap mellom 440 °C og 550 °C i % av klinker + SF i funksjon av FA erstatning og tid for SR sement og STD/ANL.

Hos blandingene som inneholder FA oppstår det et vekttap ved ca 900 °C uten at hydratasjonen har startet (0 døgn, rett etter blanding). Vekttapet er minimalt for blandinger uten FA-erstatning ved samme temperatur. For å gi svar på hva vekttapet skyldes trengs det nærmere analyse.

## 5 KONKLUSJON

Den anvendte SR-sementen er mer reaktiv enn ANL-sementen fra 7 døgn.

Referanse sementene (ANL-sement og SR-sement) uten FA binder mer vann i hydratasjonsproduktene (105-550 °C) enn de som inneholder FA. Det kan konkluderes med at pozzolanreaksjonen av FA ikke helt kompensere for klinkererstatningen med hensyn til kjemisk bundet vann.

Mengden bundet vann (105-550 °C) i forhold til klinkerinnholdet øker over tid når FA er tilsatt i ANL-sement pasta med 4,8 % silikastøv.

For SR-sement er det et forbruk av CH, men ikke en økning i den totale mengden bundet vann relativt til klinkerinnholdet. Dette skyldes at reaksjonsproduktene ikke binder mer vann enn det vannet som er tilgjengelig i CH.

Omkring like mye vann ble bundet i hydratasjonsproduktene (105-550 °C) for ANL-sement og SR-sement som inneholder 33 % FA.

CH forbruk er et mål for pozzolanreaksjonen av FA. FA kombinert med SR-sement gir høyere CH forbruk enn i ANL-sement. Når CH forbruket er høyere forventes det at mer bindemiddel blir dannet.

Økningen i mengde bundet vann samsvarer ikke med tilsvarende reduksjon i mengde kalsiumhydroksid. Dette kan tyde på dannelse av forskjellige reaksjonsprodukter i de forskjellige sementene. Reaksjonsproduktene av FA i SR-sementen kan for eksempel være mindre vannrik enn for dem som blir dannet i ANL-sement. Oppløst glass fra FA kan også binde seg direkte til CSH istedet for å forbruke CH. Konsekvensen av en slik reaksjonsrute ville være en CSH med lavere Ca/Si forhold og høyere Al/Si forhold.

Tilstedeværelsen av en betydelig mengde kalsiumhydroksid i bindemidlet (4 % vekttap tilsvarer ca 16 % CH) sikrer både en pH buffer og en pH i likevekt med vann på 12,5. Dette betyr at hvis de undersøkte pastaene brukes som bindemiddel i armert betong, vil armeringen være passivert med hensyn til korrosjon, men bufferet med CH har blitt mindre.

## 6 REFERANSER

Langan, B.W., Weng, K. and Ward, M.A.: **“Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement”**, Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp.1045-1051.

Marsh, B.K. and Day, R.L.: **“Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes”**, Cement and Concrete Research, Vol. 18, 1988, pp. 301-310.

Pane I. and Hansen, W.: **“Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis”**, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 1155-1164.

Ramachandran, V.S, Paroli, R.M., Beaudoin, J.J. and Delgado, A.H.: **“Handbook of thermal analysis of construction materials”**, Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, Noyes publications, 2002, ISBN 0-8155-1487-5.

Villain, G, Thiery, M. and Platret, G.: **“Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry”**, Cement and Concrete Research, Vol. 37, 2007, pp. 1182-1192.

## APPENDIX 8 Aktivitet B (Avrop 2-B): SEM





**SINTEF Byggforsk**  
Byggematerialer og konstruksjoner

Postadresse: 7465 Trondheim  
Besøk: Richard Birkelands vei 3  
Telefon: 73 59 52 24  
Telefaks: 73 59 71 36

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

# SINTEF RAPPORT

TITTEL

**Sveipeelektronmikroskopi (SEM) av sementpasta etter 28 døgn, 1 år og 2 år forseglet herding**

FORFATTER(E)

Klaartje De Weerdt, Harald Justnes og Tone Østnor

OPPDRAGSGIVER(E)

Statens Vegvesen Vegdirektoratet

RAPPORTNR. SBF BK F10002	GRADERING Fortrolig	OPPDRAGSGIVERS REF. Øyvind Bjøntegaard	
GRADER. DENNE SIDE Fortrolig	ISBN	PROSJEKTNR. 3D0590.02	ANTALL SIDER OG BILAG 51
ELEKTRONISK ARKIVKODE l:/pro/3D0590.02/02/SEM undersøkelse/Endelig Rapport StatensVegvesen SEM 28 d 1 og 2 aar .doc	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Tone Østnor <i>Tone Østnor</i>	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Harald Justnes <i>Harald Justnes</i>	
ARKIVKODE	DATO 2010-03-15	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Ola Skjølvold, Forskningsleder <i>Ola Skjølvold</i>	

## SAMMENDRAG

Mikrostrukturen til ternære bindemidler bestående av Portland sement, 4,8 % silikastøv og 0, 19 eller 33 % flygeaske har vært undersøkt med sveipeelektronmikroskopi (SEM). Tre ulike Portland sementer ble brukt. De totalt 7 ulike bindemidlene ble undersøkt etter 28 døgn, 1 år og 2 år forseglet herding. Alle vann - fast stoff forhold var 0,40.

Det viste seg at deler av silikastøvet var dårlig dispergert i pastaen til tross for en blander med høy skjæreenergi. Det er ikke sikkert dette vil være et problem i betong hvor gnisning av tilslag vil hjelpe til nedknusning av silikaklumpene på 100-200 µm. Dessuten ville nok et plastiserende tilsetningsstoff ha hjulpet på dispergeringen.

Denne rapporten bygger videre på rapporten med TGA resultatene (rapportnr. SBF BK F10001). Rapporten viste at FA reagerte forskjellig med ANL og SR sement. I ANL sement ble det bundet ekstra vann i de pozzolane hydratasjonsproduktene, mens i SR ble bare vannet bundet i kalsiumhydroksid (CH) brukt. Et tydelig forbruk av CH ble påvist når 33 % av SR ble erstattet med FA, mens 33 % FA i ANL forbrukte bare en liten mengde CH over tid.

Disse forskjellene kan skyldes dannelse av forskjellige hydratasjonsprodukter. SEM er en utmerket teknikk til å sammenligne mikrostrukturen og hydratasjonsfasene (både krystallinske og amorfe). Sammenhengen mellom fasthet, mengde bundet vann og mikrostruktur er blitt diskutert i detalj.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Materialteknologi	Materials technology
GRUPPE 2	Betong	Concrete
EGENVALGTE	Sement	Cement
	Pozzolaner	Pozzolans
	Sveipeelektronmikroskopi	Scanning electron microscopy

## INNHOLDSFORTEGNELSE

<b>1</b>	<b>INNLEDNING .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>EKSPERIMENTELT .....</b>	<b>4</b>
2.1	Resepter for pastblandinger .....	4
2.2	Sveipeelektronmikroskopi (SEM) .....	5
<b>3</b>	<b>RESULTATER OG DISKUSJON .....</b>	<b>6</b>
3.1	Anleggsement med kun 4,8 % silikastøv (ANL) .....	6
3.2	Anleggsement med 4,8 % silikastøv og 19 % flygeaske (ANL-19) .....	12
3.3	Sulfatresistent sement med 4,8 % silikastøv og 19 % flygeaske (SR-19).....	19
3.4	Standardsement og SR sement med 4,8 % silikastøv og 19 % flygeaske (STD/SR-19)23	
3.5	Anlegg sement, 4,8 % silikastøv og 33 % flygeaske (ANL-33) .....	27
3.6	Sulfatresistent sement med 4,8 % silikastøv og 33 % flygeaske (SR-33).....	33
3.7	Sulfatresistent sement med kun 4,8 % silikastøv (SR).....	39
<b>4</b>	<b>KOMMENTARER OG KONKLUSJON .....</b>	<b>43</b>
4.1	Generelt .....	43
4.2	Diskusjon SEM resultater.....	43
4.2.1	Forskjell i hydrasjonsprodukter.....	46
4.2.2	Forskjell i mikrostruktur .....	48
<b>5</b>	<b>Referanser .....</b>	<b>51</b>



## 1 INNLEDNING

Under utvikling av blandingssementer med mye pozzolaner, eventuelt ved store tilsetninger av pozzolaner til ferdig betong, er det viktig å ha kontroll med utviklingen av både mengden kalsiumhydroksid i bindemiddelet og total mengde kjemisk bundet vann. Mengden kalsiumhydroksid er viktig fordi dette er selve bufferen som sørger for at armeringsjernet er passivert med hensyn til initiering av korrosjon. Kjemisk bundet vann er viktig for egenskaper som økt trykkfasthet, samt nedsatt porøsitet og permeabilitet som oppnås ved maksimal overføring av flytende vann til vann i hydrater igjennom hydratasjon og pozzolane reaksjoner.

Denne rapporten omhandler et studium av 7 pastablandinger med silikastøv og forskjellig erstatning av flygeaske (FA) med hensyn på nettopp mengde kalsiumhydroksid og kjemisk bundet vann som funksjon av tid ved 20 °C.

Hovedmineralene i Portland sement er  $C_3S$  (45-65 %) og  $C_2S$  (15-25 %) og de danner begge et amorft kalsiumsilikathydrat bindemiddel (CSH) og krystallinsk kalsiumhydroksid (CH) under sin hydratasjon;



og



$C_2S$  hydratiserer mye senere enn  $C_3S$  og produserer mye mindre CH, selv om den i prinsippet danner samme type CSH.

Den pozzolane reaksjon mellom kalsiumhydroksid (CH) fra sementhydratasjonen og silikastøv (S) kan forenkles til



Det vil si at den danner mer av det samme bindemiddelet CSH som  $C_3S$  og  $C_2S$  mens kalsiumhydroksid (CH) forbrukes.

Flygeaske består i stor grad av kuleskall bestående av et aluminosilikat (AS) amorft glass. Det er umulig å balansere dets pozzolane reaksjon, men det danner 3 hovedtyper produkter;



Der CSH er det tradisjonelle bindemiddelet, CAH er ulike kalsiumaluminathydrater og  $C_2ASH_8$  er et spesifikt produkt som heter Strätlingite.

Silikastøv er et raskere reagerende pozzolan enn flygeaske. Med disse konkurrerende produserende (sementhydratasjon) og konsumerende (pozzolane) reaksjoner av kalsiumhydroksid er det nesten umulig å forutsi hva mengden i en blandingssement eller betong vil være, særlig ettersom reaksjonene har ulike hastigheter. Derfor er det viktig å måle innholdet av kalsiumhydroksid for å kunne dokumentere det, noe som er gjort i dette arbeidet, i tillegg til å dokumentere andre hydratasjonsprodukter.

## 2 EKSPERIMENTELT

### 2.1 Resepter for pastablandinger

Kjemisk sammensetning og partikkelstørrelsesfordelingen til de ulike komponentene i forsøksseriene er listet opp i Tabell 1. Tabell 2 viser klinkerfasene beregnet med Bogue og densiteten er gitt i Tabell 3, mens de relative reseptene for de 7 ulike pastablandingene er angitt i Tabell 4. De faktiske innvektene er gitt i Tabell 5. I henhold til den Europeiske sementstandarden med Norsk tillegg er Norcem standard sement (STD) av typen CEM I 42,5R, anlegg sement (ANL) av typen CEM I 52,5 LA, mens sulfatresistent sement (SR) benevnes CEM I 42,5R SR LA.

**Tabell 1: Kjemisk sammensetning og partikkelstørrelsesfordeling av materialene**

	ANL	SR	FA	STD
LOI	2,72 %	0,93 %	4,08 %	2,09 %
SiO <sub>2</sub>	21,09 %	22,07 %	54,40 %	20,00 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,40 %	3,64 %	22,01 %	4,95 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,62 %	5,19 %	5,83 %	3,39 %
CaO	63,95 %	63,82 %	4,80 %	61,89 %
MgO	1,78 %	1,44 %	2,22 %	2,39 %
SO <sub>3</sub>	3,22 %	2,30 %	0,52 %	3,36 %
Kalkmel	4,10 %	-	-	4,50 %
CaO frikalk	1,57 %	0,97 %	-	1,76 %
K <sub>2</sub> O	0,43 %	0,43 %	2,21 %	1,05 %
Na <sub>2</sub> O	0,35 %	0,19 %	1,15 %	0,53 %
Alkali (Na <sub>2</sub> O eq)	0,63 %	0,47 %	-	1,22 %
Karbon	-	-	3,64 %	-
Sp overflate	388	432	388	390
+90mu	9,60 %	0,20 %	5,40 %	2,00 %
+64mu	11,70 %	1,00 %	11,40 %	4,40 %
-24mu	60,40 %	82,70 %	66,30 %	66,80 %
-30mu	68,70 %	89,80 %	59,70 %	75,10 %

**Tabell 2: Klinkerfasene beregnet med Bogue (forskjellen fra 100 % skyldes gips, kalkstein, fri kalk, alkalisulfater og magnesiumoksid).**

	ANL	SR	STD
C <sub>3</sub> S	43 %	52 %	40 %
C <sub>2</sub> S	28 %	24 %	27 %
C <sub>3</sub> A	6 %	1 %	7 %
C <sub>4</sub> AF	11 %	16 %	10 %

**Tabell 3: Densitet til de forskjellige komponentene.**

Densitet	kg/dm <sup>3</sup>
FA	2,20
SF (920D)	2,20
ANL	3,12
SR	3,15
STD	3,15

**Tabell 4: Mengde av komponenter i %.**

	ANL	ANL-19	SR-19	STD/SR-19	ANL-33	SR-33	SR
ANL	95,2 %	76,2 %			62,2 %		
STD				15 %			
SR			76,2 %	61 %		62,2 %	95,2 %
FA		19 %	19 %	19 %	33 %	33 %	
SF	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %	4,8 %

**Tabell 5: Mengde av hvert stoff i g.**

	ANL	ANL-19	SR-19	STD/SR-19	ANL-33	SR-33	SR
Sement	524	411	412	374	332	333	526
FA	0	96	97	88	163	164	0
SF	26	26	26	23	25	25	27
water	220	213	214	194	208	209	221

Alle komponentene som er listet opp i Tabell 2 ble benyttet i de forskjellige pastablandingene. Alle pastablandingene hadde vann/bindemiddel forhold på 0,40, og alle blandingene ble tilsatt 4,8 % silikastøv.

Pastablandingene ble blandet i en mikser med høy skjærhastighet (Braun, MR5550CA). Blandeprosedyren bestod av å tilsette tørt pulver til vannet, blande i ½ minutt, la blandingen hvile i 5 minutter for så å blande igjen i 1 minutt. Prosedyren opphever eventuell falsk størkning.

Pastablandingene ble lagret ved 20 °C i glass med plastlokk, altså forseglet herding. Herdereaksjonen ble stoppet rett etter blanding (0 døgn) og ved henholdsvis 28 døgn, 1 år og 2 år. Herdeprosessen ble stoppet ved å knuse pastaprøvene til biter og tilsette etanol for å erstatte fritt vann, for så å tørke dem ved 105 °C. Bitene ble deretter støpt inn i epoksy, kuttet og planpolert.

## 2.2 Sveipeelektronmikroskopi (SEM)

De planpolerte prøvepreparatene ble først pådampet ett lag karbon for å gjøre dem elektrisk ledende. Deretter ble de plassert i sveipeelektronmikroskopet og undersøkt i en modus kalt tilbakespredte elektroner (BSE). Dette er en modus hvor en detektor fanger opp hvor mange elektroner som spretter tilbake fra den innkommende elektronstrålen. Hvis en strukturell detalj har høy tetthet eller består av atomer med høyt atomnummer, vil mange elektroner sprette tilbake og detaljen oppfattes som lys. Motsatt, hvis en strukturell detalj har lav tetthet eller består av atomer med lavt atomnummer, vil få elektroner sprette tilbake og detaljen oppfattes som mørk. På den måten vil et BSE bilde bestå av detaljer med ulike gråtoneverdier. F eks vil en pore, som nå er fylt med epoksy, fremstå som svart. Sementmineralet  $C_4AF$ , som inneholder jern (høyt atomnummer), vil fremstå som hvitt når det er ureagert. De øvrige fasene vil ha gråtoneverdier et sted imellom og kan identifiseres basert på erfaring og i tvilstilfeller verifiseres ved hjelp av energidispersive spektra (EDS) som viser semi-kvantitativ kjemisk sammensetning.

Energidispersive spektra er basert på at den innkommende elektronstrålen sparker noen av elektronene i de enkelte atomer opp i en høyere energibane rundt kjernen. Når disse elektronene igjen faller ned i sin opprinnelige bane sender de ut en røntgenstråle med bølgelengde (og energi) som er karakteristisk for hvert atom. Detektoren klarer å skille ut hver stråle med ulik energi og deres intensitet som er proporsjonal med mengden av hver type atom. På den måten kan man generere et spektrum hvor hvert atom er representert med ulike topper ved ulike energier av ulik intensitet. Dette kan også omregnes til en tabulert semi-kvantitativ sammensetning.

### 3 RESULTATER OG DISKUSJON

#### 3.1 Anleggsement med kun 4,8 % silikastøv (ANL)

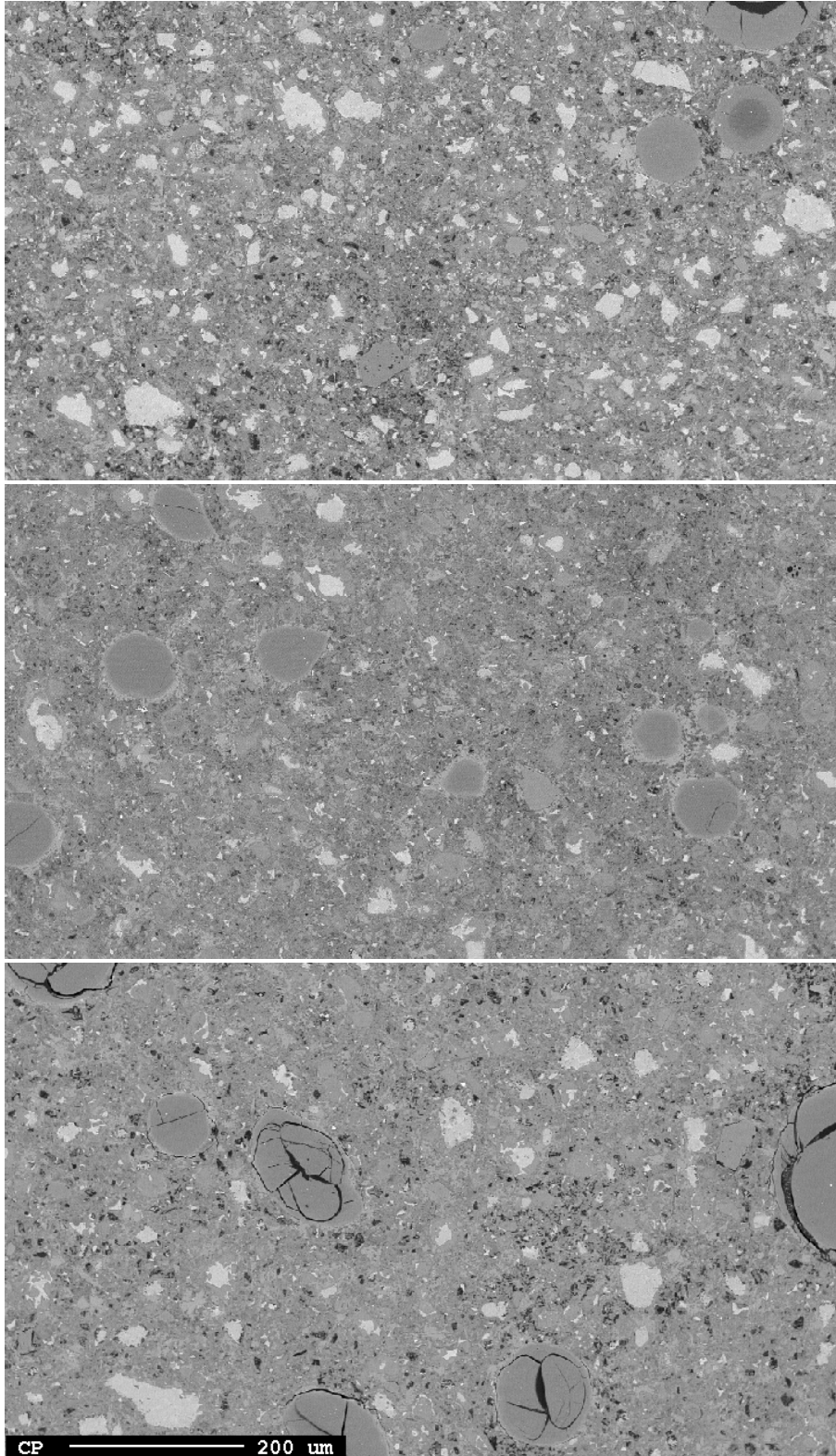
Figur 1 viser en oversikt over et tverrsnitt av pastaprøven ANL ved 100x forstørrelse etter henholdsvis 28 døgn, 1 års og 2 års forseglet herding. Oversikten viser mange flere ”hvite korn” ved 28 døgn enn ved 1 og 2 år. Dette er uhydratiserte sementkorn og viser at hydrasjonsgraden er større ved 1 og 2 år enn ved 28 døgn, hvilket er som forventet. Bildene viser avrundede, grå felt av størrelse ca 100  $\mu\text{m}$  og nedover, og hvor noen er oppsprukket. Dette er udispergert silikastøv som har reagert til en vannrik gel med litt kalsium og alkalier som har diffundert inn i partikkelen, og oppsprekningen er uttørkingssvinn under vakuüm. Ved 28 døgn kan man se at noen av partiklene har en lys randsone og et mørkt indre, hvilket sannsynligvis er en reaksjonsfront (dvs. det indre er ennå ikke tilført andre ioner). Ved 1 år er silikastøvklumpene mer jevnt grå, men nå har de fått en tynn, lys overgangssone til pastaen som kan tyde på en sone mer rik på kalsium og/eller alkalier.

Figur 2 viser en 400x forstørrelse av blant annet et ureagert sementkorn ved 28 døgn i øvre bildet som en illustrasjon av hvordan et slikt ser ut med denne metoden, mens midtre bilde er en 400x forstørrelse av en udispergert klump av silikastøv. Nedre bilde viser reagert pasta etter 2 år forseglet herding. Ureagerte sementkorn er merket S og fremstår ganske lyse i øvre bilde med antydning av enda lysere detaljer. Det lyseste er ferritt fasen ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), men det litt mindre lyse er silikatmineralene alitt ( $\text{C}_3\text{S}$ ) og belitt ( $\text{C}_2\text{S}$ ). Ferrittfasen er tregt reagerende og sees tydeligere i nedre bilde som hvite områder merket F med tilstøtende grå områder som nå etter 1 år er reagerte silikatfaser. Merk at de ureagerte sementkornene i øvre bilde har en tett randsone av CSH-gel (såkalt indre produkt) og en mer porøs CSH (med noen svarte hull som er større porer) i matrisen for øvrig (såkalt ytre produkt). Kalsiumhydroksid, som er et annet av hydrasjonsproduktene, fremstår som en gråtone mellom CSH og  $\text{C}_3\text{S}$  og er merket CH. I nedre bilde vises en stor klump udispergert silikastøv merket US som er hul inni. Denne virker også å være omringet av et lag med lys grå, massiv kalsiumhydroksid.

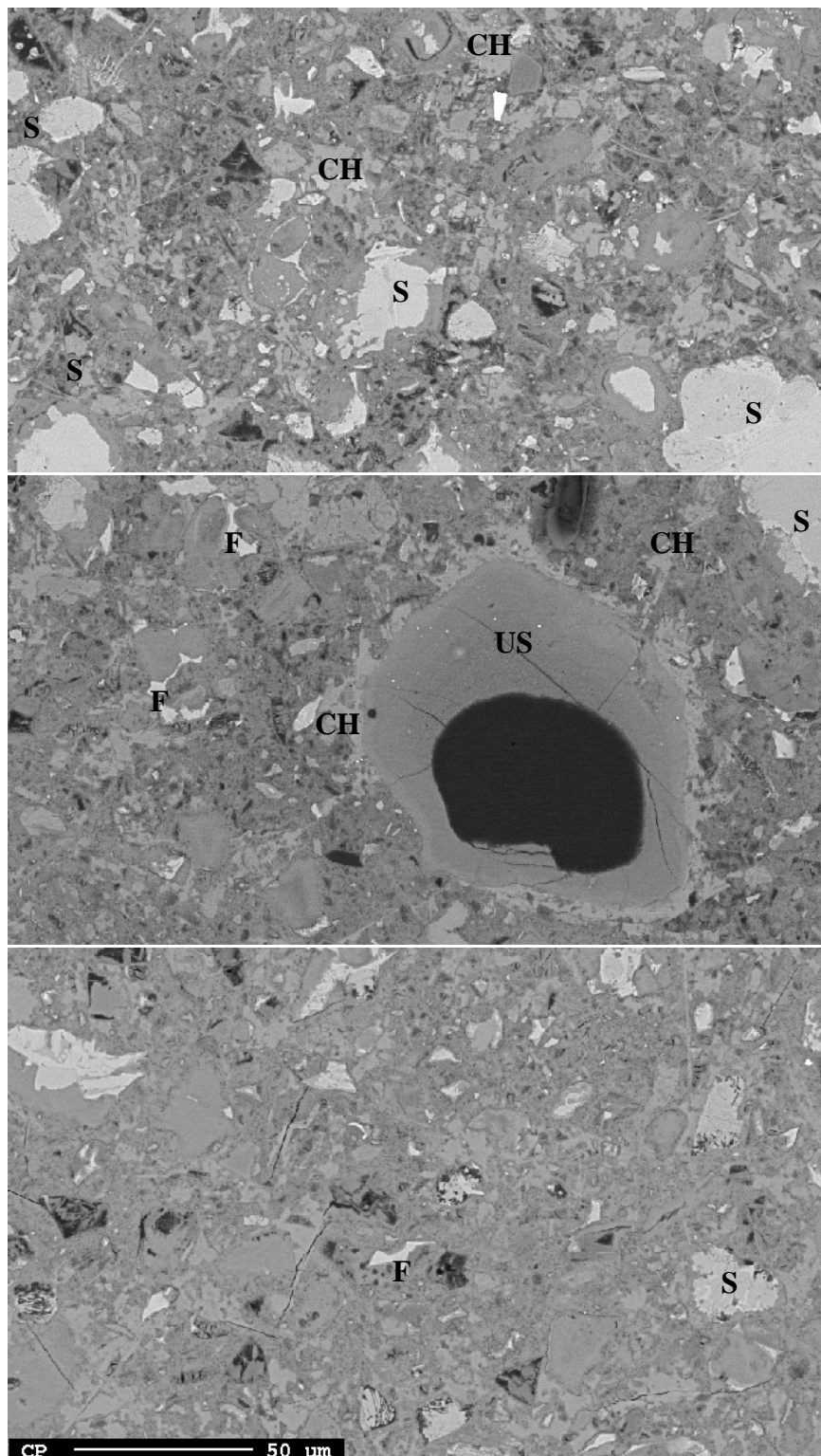
Figur 3 viser bilder på 2000x forstørrelse av pasta ANL etter 2 år forseglet herding. Steder hvor CSH-fasen er analysert med EDS er angitt med en sirkel. Resultatene av EDS analysen i molforhold (ikke masse) for ulike kjemiske elementer er gitt i Tabell 7.

De Ca/Al-rike hydrasjonsfasene som ble analysert for pasta ANL etter 2 års forseglet herding er vist i Figur 4 med tilhørende EDS-analyser gitt i Tabell 8.

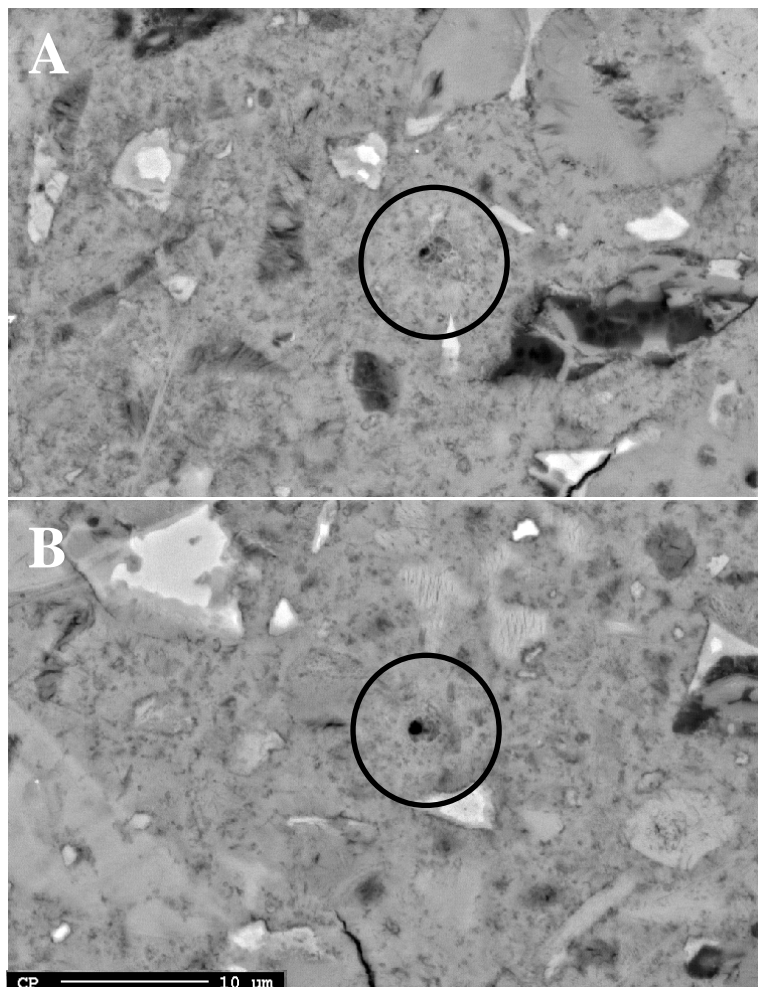
Tabell 6 gir molforholdene for typiske hydrasjonsfaser som kan brukes til identifikasjon av hydrasjonsfasene med EDS.



**Figur 1: 100x forstørrelse av pastaprøve ANL etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) herding.**



**Figur 2: 400x forstørrelse av pastaprøve ANL etter 28 d (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding. S = ureagert sement, CH = kalsiumhydroksid, US = udispergert silikastøv, F = ureagert ferritt fase ( $C_4AF$ ), et av sementmineralene. Bindemidlet CSH er det jevnt grå imellom og sort er porer.**



**Figur 3: 2000x forstørrelse av pastaprøve ANL etter 2 år forseglet herding. CSH-fasen angitt med sirkel ble analysert med EDS. Merket etter selve analysepunktet er synlig som et hull.**

**Tabell 6: Molforhold mellom oksider for forskjellige hydratasjonsfaser**

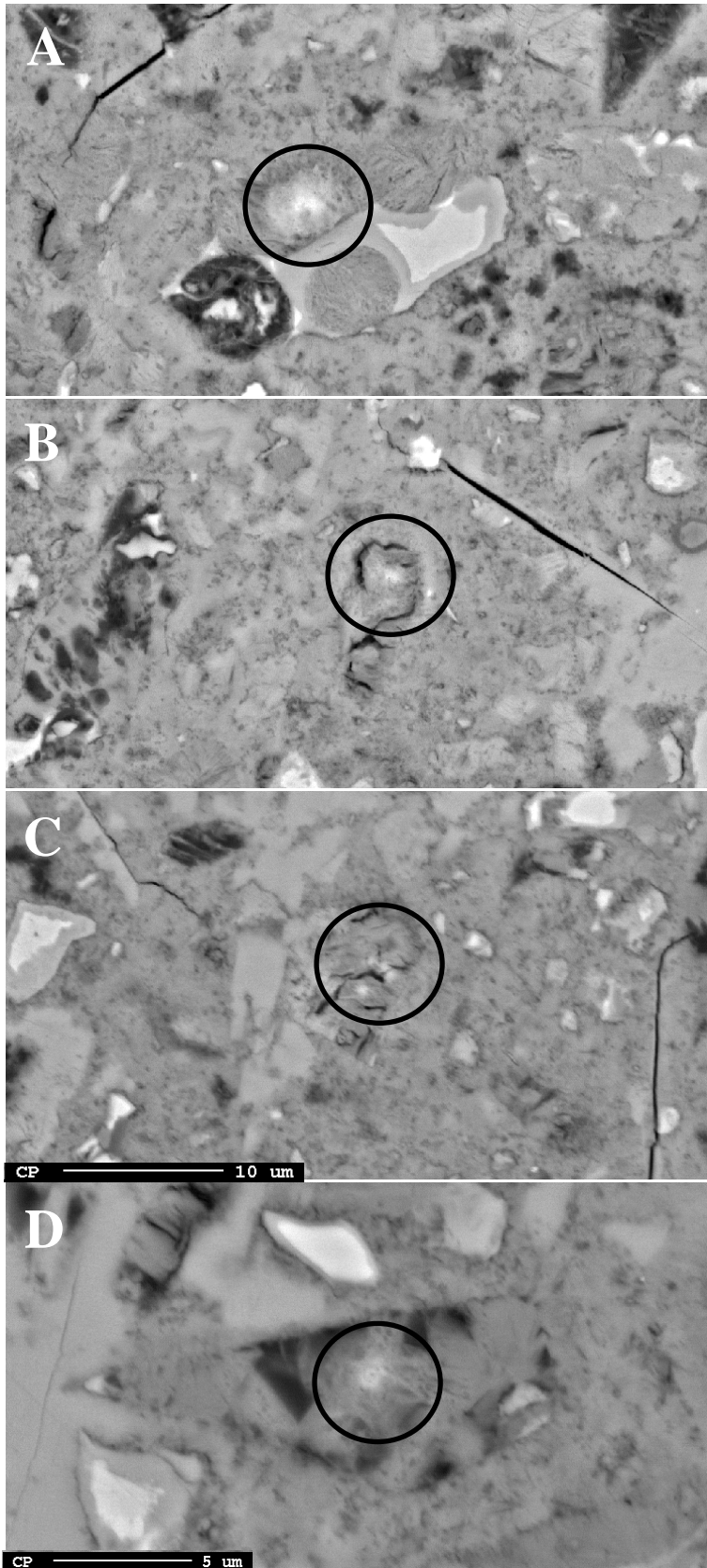
	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CSH	1,7-2.1	høy	høy	-
E, ettringitt (C <sub>6</sub> AS <sub>3</sub> H <sub>32</sub> )	høy	6	2	3
monosulfat (C <sub>4</sub> ASH <sub>12</sub> )	høy	4	4	1
T, thaumasitt (C <sub>3</sub> SSCH <sub>15</sub> )	3	høy	3	høy
monokarbonat (C <sub>4</sub> ACH <sub>11</sub> )	høy	4	høy	lav
strätlingitt (C <sub>2</sub> ASH <sub>8</sub> )	2	2	høy	lav
hydrogarnet (C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> )	høy	3	høy	lav

**Tabell 7: EDS-resultater av CSH gitt i molforhold mellom forskjellige oksider**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>
Figur 3 A	2,1	0,02
Figur 3 B	2,4	0,02

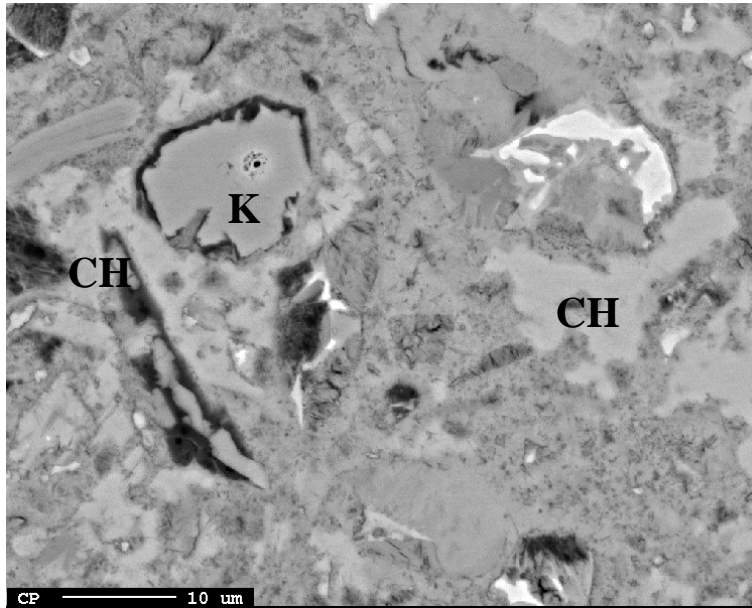
**Tabell 8: EDS-resultater gitt i molforhold mellom forskjellige oksider**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	fase
Figur 4 A	15,4	2,6	8,1	0,3	hydrogarnet
Figur 4 B	12,7	4,5	1,9	2,4	ettringitt
Figur 4 C	17,2	7,3	1,3	5,6	ettringitt
Figur 4 D	27,3	3,0	13,3	0,2	hydrogarnet



**Figur 4: 2000x forstørrelse (A-C) og 4000x forstørrelse (D) av pastaprøve ANL etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasen angitt med sirkel ble analysert med EDS. Merket etter analysen er synlig som et lyst punkt. Målet var å finne Ca/Al-rike hydratasjonsfaser.**





**Figur 5: 1500x forstørrelse av pastaprøve ANL etter 2 år forseglet herding. Bildet vise en delvis reagert kalksteinspartikkel (K). Merket etter elektronstrålen for EDS er klart synlig som et sort punkt. Legg merke til forskjell i gråtone mellom kalsiumhydroksid (CH) og kalksteinspartikkelen (K).**

### 3.2 Anleggsement med 4,8 % silikastøv og 19 % flygeaske (ANL-19)

Figur 6 viser en 100x oversikt over pastaprøven ANL-19 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. Man kan igjen se at det er flere ureagerte sementkorn (fremstår som hvite prikker) ved 28 døgns alder enn etter 1 år, som naturlig er ved økende hydratasjonsgrad. Også denne pastablandingen har udispergert silikastøv. De nye runde kuleskall (fremstår som ringer i tverrsnitt) eller fylte kuler, begge med svarte, runde hull (porer) i selve materialet, er flygeaske (fra kullfyrte kraftverk).

Figur 7 viser en 400x oversikt over pastaprøven ANL-19 etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding for sammenlikning. Det midtre bildet viser udispergert silikastøv nedre til høyre og et ureagert flygeaskekorn oppe til venstre. Man kan også umiddelbart få et inntrykk av pastaen i det midterste og nederste bildet er mindre porøs enn i det øverste pga mindre svarte flekker (porer). Igjen er dette på grunn av økt hydratasjonsgrad ved 1 og 2 års alder versus 28 døgn. Men også på grunn av reagert flygeaske. I Fig. 5 så man de grove flygeaskekornene tydelig, mens ved 400x forstørrelse i Fig. 6 tydelig kan se mindre fraksjoner av flygeaske som runde fylte kuler med noen små svarte, runde porer i. Disse har størrelse fra 10 µm og nedover og er altså mindre enn det gjennomsnittlige sementkorn på 15-20 µm. Det ser ut til at både udispergert silikastøv og ureagerte flygeaskekorn har anriket kalsiumhydroksid i sin umiddelbare nærhet. Dette sees som en irregulær mellomgrå masse rundt disse.

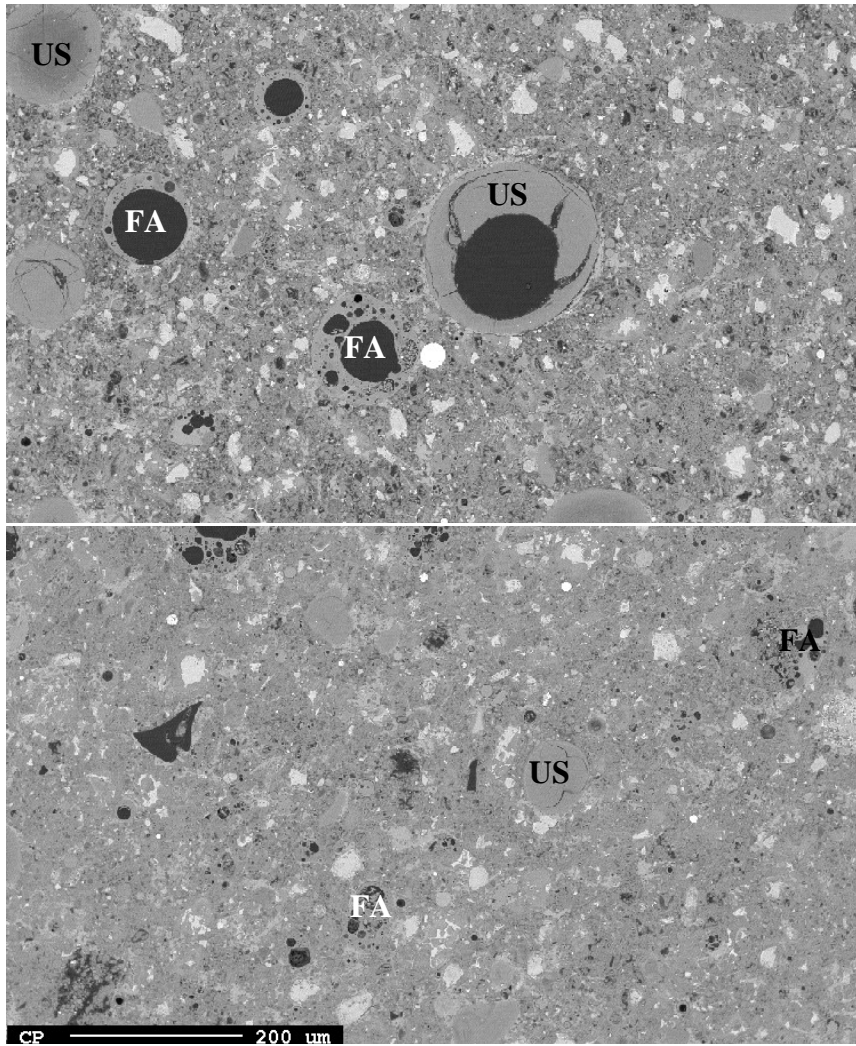
Figur 8 viser bilder på 2000x forstørrelse av pastaprøve ANL-19 etter 2 år forseglet herding. Steder hvor CSH-fasen er analysert med EDS er angitt med en sirkel. Resultatene av EDS analysen i molforhold er gitt i Tabell 9.

De Ca/Al-rike hydratasjonsfasene som ble analysert for pastaprøve ANL-19 2 etter 2 års forseglet herding er vist i Figur 9 og EDS-analysene er gitt i Tabell 10.

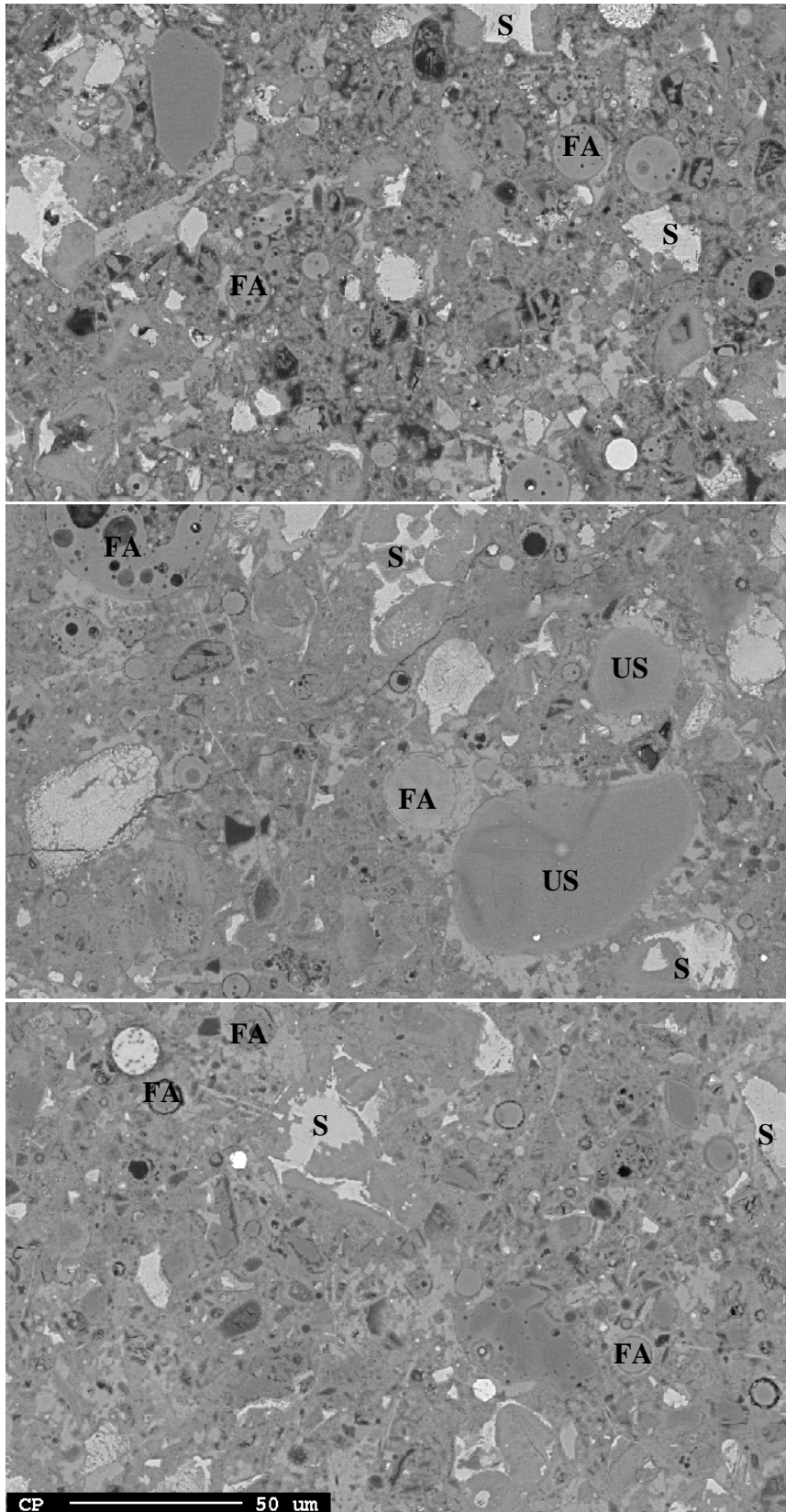
Figur 10 viser flygeaske partikler med en tydelig reaksjonsrand.

For å sjekke om det fins noen forskjell i sammensetning på reagerende FA partikler, ble noen FA partikler analysert med EDS og sammenliknet med gjennomsnittsverdien for FA bestemt med XRF. Figur 11 viser FA partiklene som ble analysert med EDS og resultatene er gitt i Tabell 11. Som forventet fins det variasjon i sammensetningen av FA partiklene, men det gjennomsnittlige  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  forholdet for de analyserte partikler (4,8) er relativt likt bulksammensetningen (4,0) av FA bestemt ved XRF, særlig når man tar hensyn til det store standardavviket for punktanalysen. Forskjellen var stort sett at  $\text{SiO}_2$  var noe høyere for reagerende partikler i forhold til bulk, samtidig som innholdet av CaO og  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  var lavere.

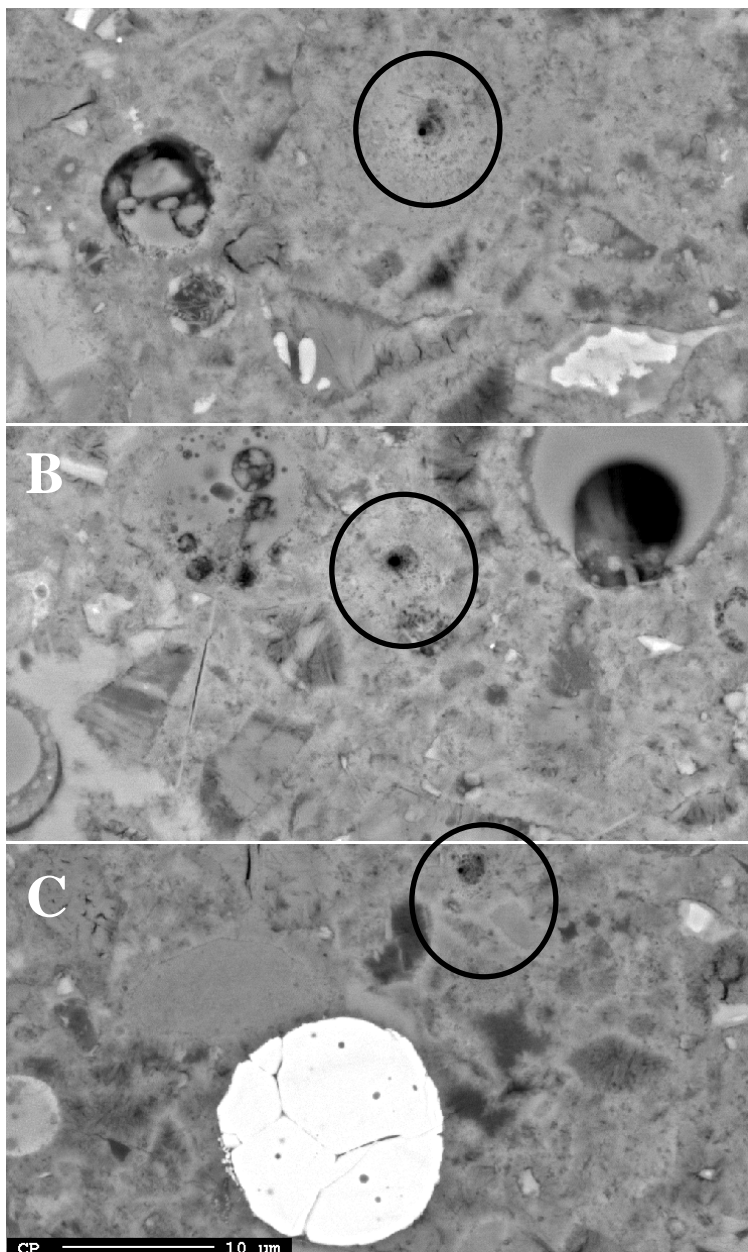
Figur 12 viser en FA partikkel, en delvis reagert kalksteinpartikkel og kalsiumhydroksid.



**Figur 6: 100x oversikt av pastaprøve ANL-19 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. Udispergert silikastøv er merket US, mens flygeaske er merket FA.**



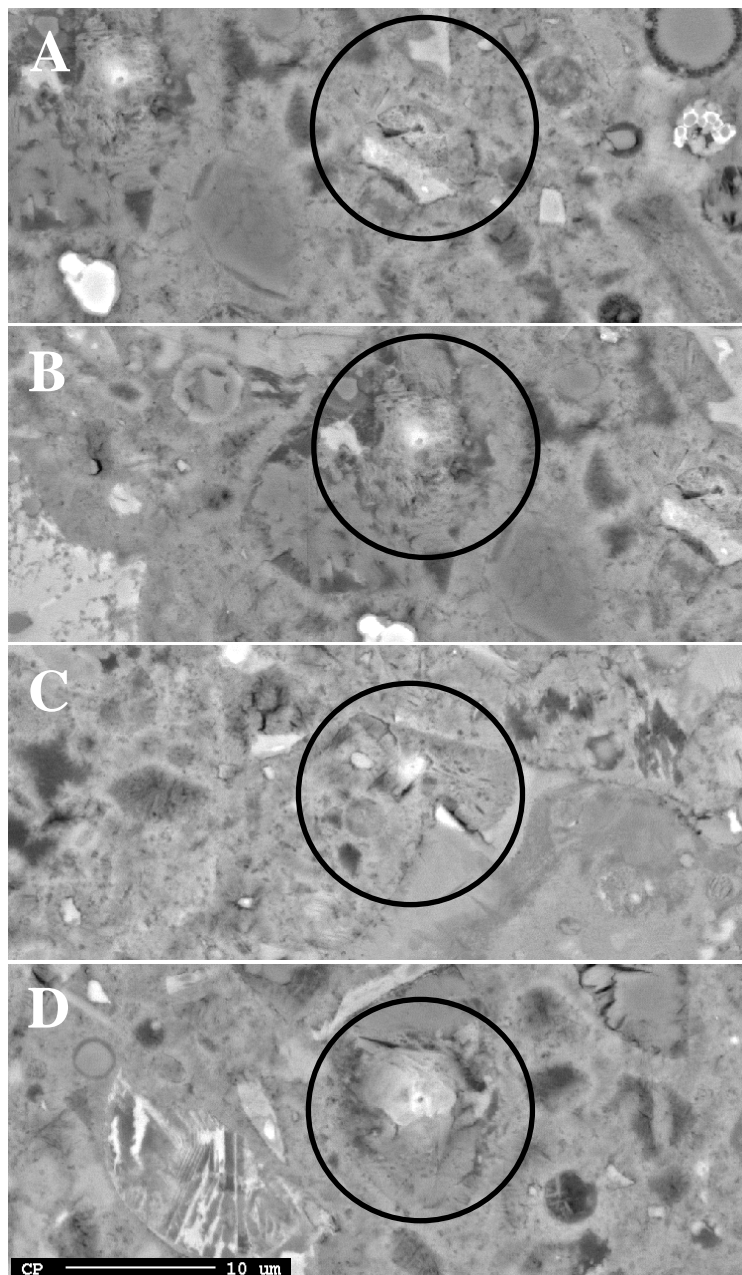
**Figur 7: 400x oversikt av pastaprøve ANL-19 etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forsejlet herding. Udispergert silikastøv er merket US, mens flygeaske er merket FA. Ureagert sement er merket S.**



**Figur 8: 2000x forstørrelse av pastaprøve ANL-19 etter 2 år forseglet herding. Hydrasjonsfasen som er angitt med sirkel ble analysert med EDS. Merket etter analysen er synlig som et sort hull. Formålet var bestemmelse av CSH sammensetning.**

**Tabell 9: EDS-resultater av CSH gitt i molforhold mellom forskjellige oksider**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>
Figur 8 A	1,8	0,03
Figur 8 B	1,9	0,05
Figur 8 C	2,0	0,04

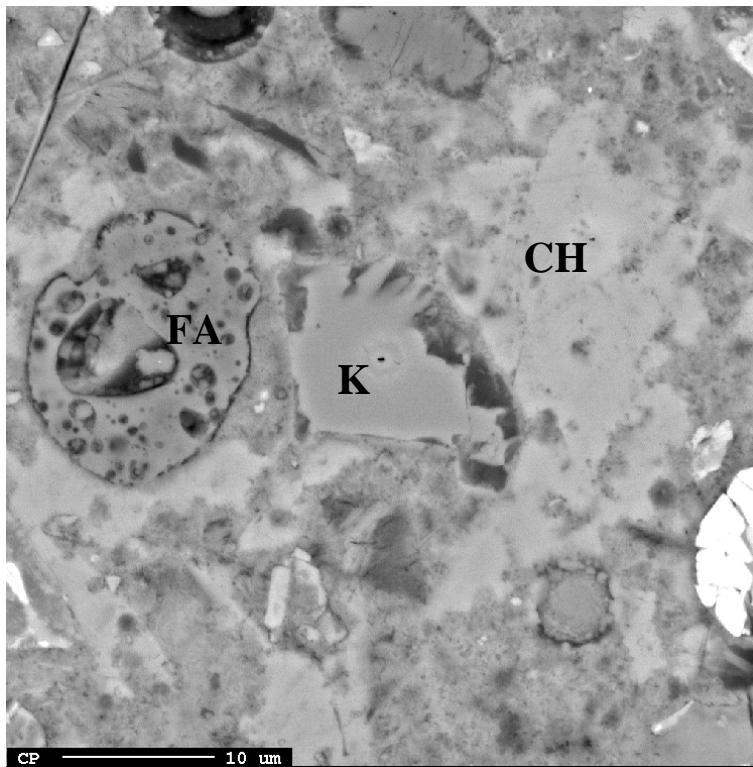


**Figur 9: 2000x forstørrelse av pastaprøve ANL-19 etter 2 år forseglet herding. Hydrasjonsfasene som er angitt med sirkel ble analysert med EDS. Merket etter analysen er synlig som et lyst punkt hvor hydratatet er delvis termisk dekomponert. Formålet var identifikasjon av Ca/Al-rike hydrasjonsfaser.**

**Tabell 10: EDS analyse Ca/Al/S-rike faser. Resultatene er gitt i molforhold mellom forskjellige oksider.**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	type
Figur 9 A	9,1	5,6	6,2	0,9	ettringitt–monokarb?
Figur 9 B	9,2	2,7	20,3	0,1	hydrogarnet
Figur 9 C	9,6	4,7	1,6	2,9	ettringitt
Figur 9 D	11,7	3,5	22,4	0,2	hydrogarnet - monokarbonat





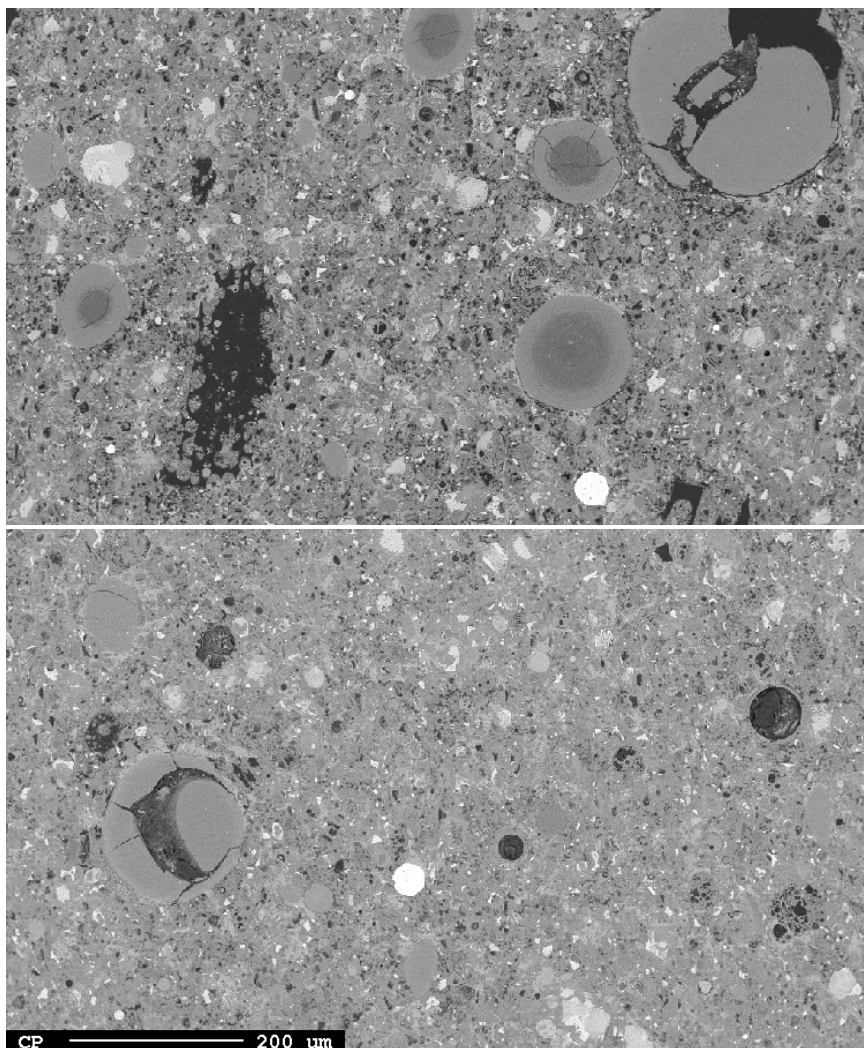
**Figur 12: 2000x forstørrelse av pastaprøve ANL-19 etter 2 år forseglet herding. Dette bildet viser en FA partikkel (FA), kalksteinspartikkel som har reagert (K) og kalsiumhydroksid (CH).**



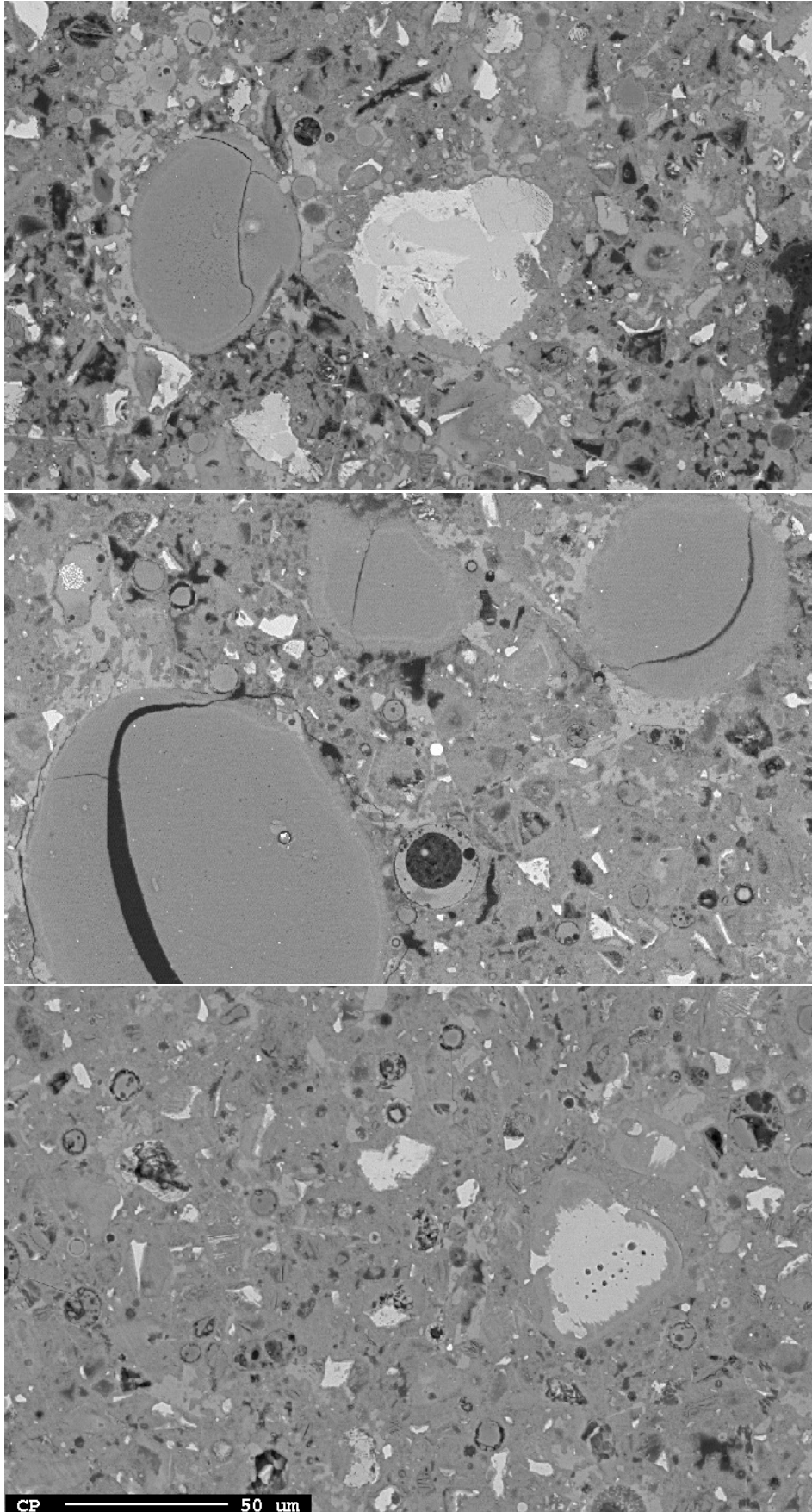
### 3.3 Sulfatresistent sement med 4,8 % silikastøv og 19 % flygeaske (SR-19)

Figur 13 viser en 100x oversikt over pastaprøve SR-19 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. Man kan igjen se at det er flere ureagerte sementkorn (fremstår som hvite prikker) ved 28 døgns alder enn etter 1 år, som naturlig er ved økende hydratasjonsgrad. Nedre bilde synes også å være tettere (dvs. ha færre svarte porer). Også denne pastablandingen har udispergert silikastøv. Igjen fremstår flygeaske som runde kuleskall (sees som ringer i tverrsnitt) eller fylte kuler, begge med svarte, runde hull (porer) i selve materialet. Det kan synes som det er noe mindre ureagerte sementkorn i pasta SR-19 enn i pastaprøve ANL-19 med anleggsement, hvilket betyr høyere hydratasjonsgrad for SR sement. Men det kan være vanskelig å bedømme visuelt, og man måtte i så fall benytte et billedanalyseprogram og flere bilder for å finne statistisk signifikante forskjeller.

Figur 14 viser en 400x oversikt over pastaprøve SR-19 etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding. Det kan synes som pasta med SR sement har større andel irregulære porer enn anlegg sement (såkalte "Hadley grains") som kan skyldes oppløsning av mindre sementkorn.



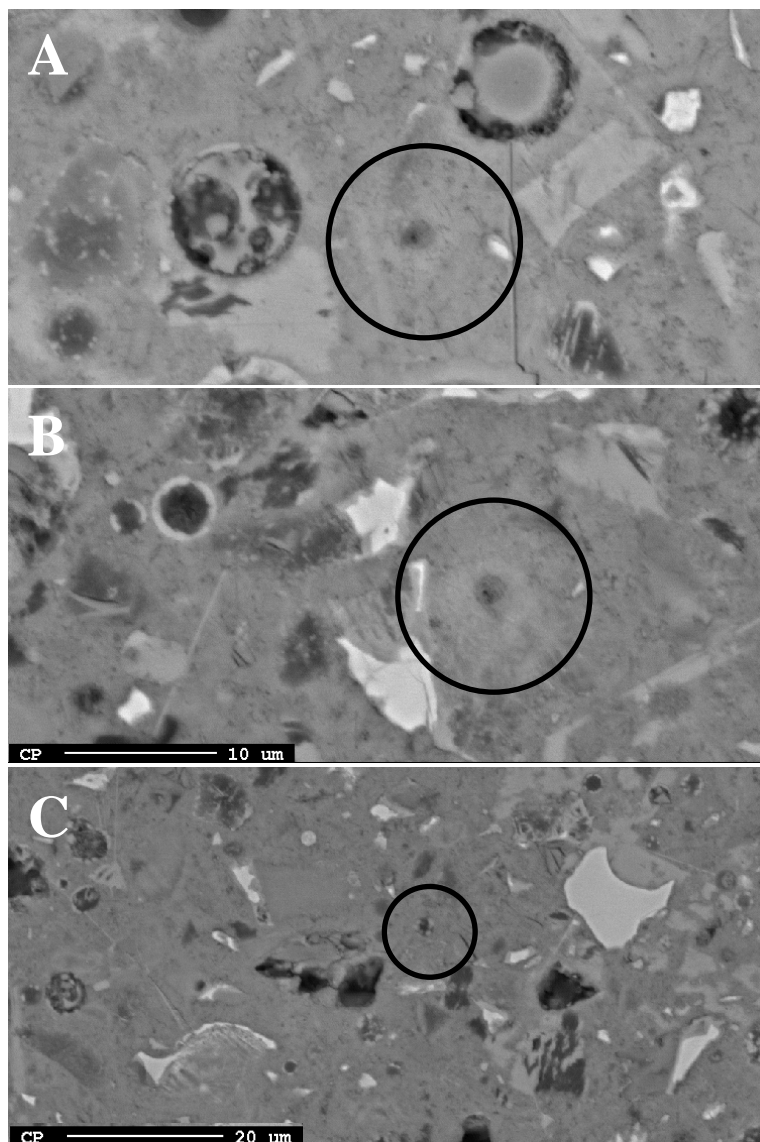
**Figur 13: 100x oversikt over pastaprøve SR-19 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding.**



**Figur 14:** 400x oversikt over pastaprøve SR-19 etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding.

Figur 15 viser bilder med 2000x forstørrelse av pastaprøve SR-19 etter 2 år forseglet herding. Steder hvor CSH-fasen er analysert med EDS er angitt med en sirkel og resultatene i molforhold er gitt i Tabell 12.

De Ca/Al-rike hydratasjonsfasene som ble analysert for pastaprøve SR-19 etter 2 års forseglet herding er vist i Figur 16. EDS-analysene og tolkningen er gitt i Tabell 13.

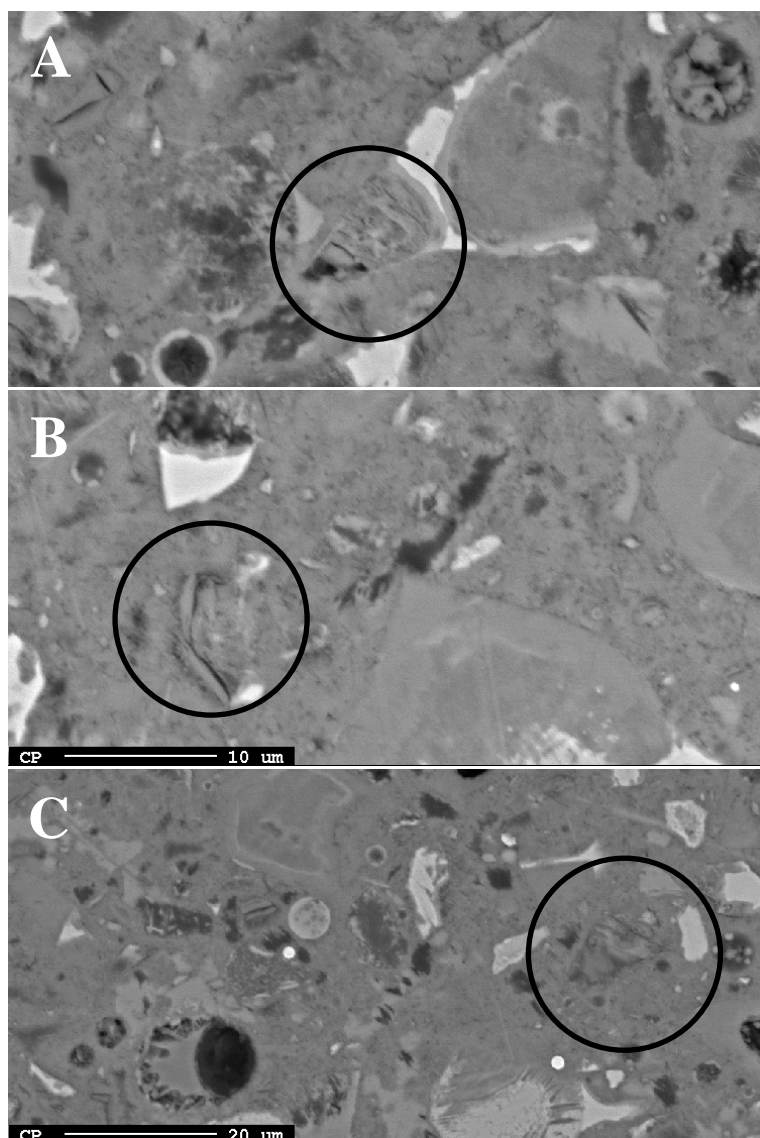


**Figur 15: 2000x forstørrelse (A og B) og 1000x forstørrelse (C) av pastaprøve SR-19 etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasen angitt med sirkel ble analysert med EDS. Merket etter analysen er synlig som sorte hull. Formålet var å bestemme CSH sammensetningen.**

**Tabell 12: EDS-resultater av CSH gitt i molforhold mellom forskjellige oksider**

	$\text{CaO/SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$
Figur 15 A	1,7	0,04
Figur 15 B	1,6	0,05
Figur 15 C	1,7	0,05

I øverste bildet i Figur 15 vises det også et gap (sort) mellom pasta og ureagerte flygeaske korn (runde) som tyder på at de reagerer ved oppløsning og feller ut som produkter i møte med kalsium lenger bort.



**Figur 16: 2000x forstørrelse (A og B) og 1000x forstørrelse (C) av pastaprøve SR-19 etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasen angitt med sirkel ble analysert med EDS. Merket etter analysen er synlig. Formålet var identifikasjon av Ca/Al-rike hydratasjonsfaser.**

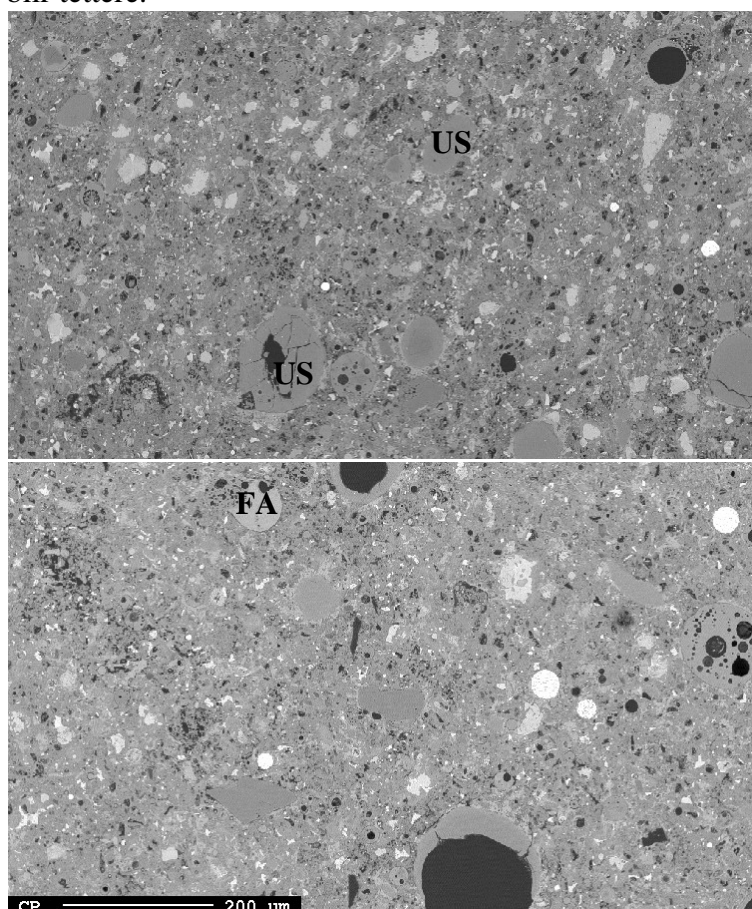
**Tabell 13: EDS analyse Ca/Al/S-rike faser. Resultatene er gitt i molforhold mellom forskjellige oksider.**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	type
Figur 16 A	4,6	3,3	1,9	1,7	ettringitt-monosulfat-strätlingitt
Figur 16 B	4,7	4,2	2,2	1,9	ettringitt-monosulfat-strätlingitt
Figur 16 C	2,1	6,4	6,7	1,0	ettringitt-monosulfat-strätlingitt (evt. CSH)

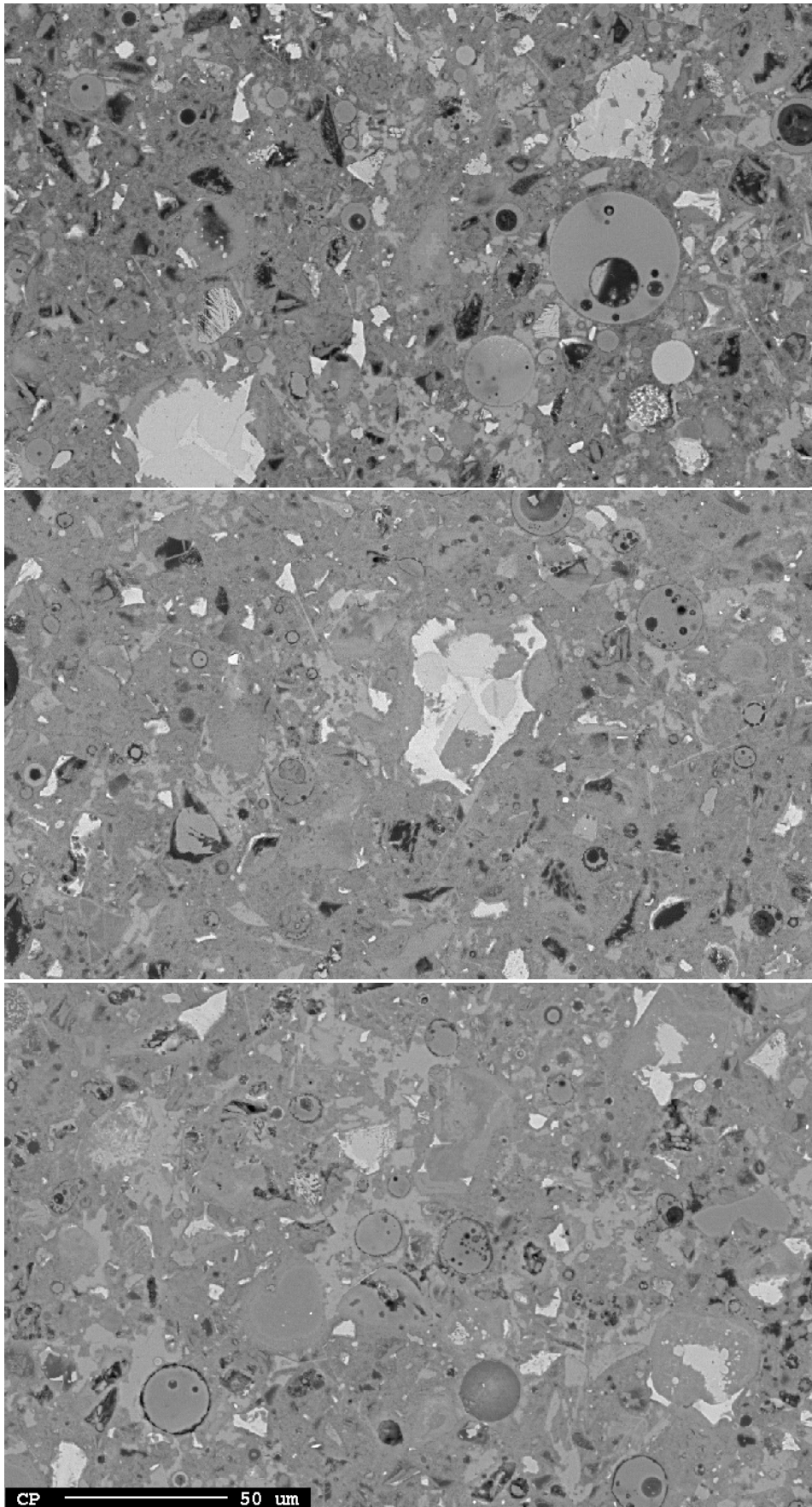
### 3.4 Standardsement og SR sement med 4,8 % silikastøv og 19 % flygeaske (STD/SR-19)

Figur 17 viser 100x forstørrelse av pastaprøve STD/SR-19 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. Det nedre bildet virker generelt lysere fordi det har mindre svarte porer enn det øvre, hvilket er ensbetydende med høyere hydrasjonsgrad etter 1 år enn etter 28 døgn. I denne pasta er det også en del udispergert silikastøv, og sågar noen større klumper som er hule inne som vist i nedre bilde. Disse må ikke forveksles med flygeaske, men man kan skille dem ved at flygeaskeveggen ofte har små sorte hull (bobler) i seg i motsetning til silikastøv som er jevnt grå. De kan selvfølgelig også skilles ut ifra kjemisk sammensetning med EDS. Denne pastaen ser også ut til å ha en del "Hadley grains", som er små irregulære porer (fremstår sort) som sannsynligvis skyldes oppløste, små sementkorn. Disse har sannsynligvis ikke noe særlig innvirkning på den totale permeabiliteten fordi omgivende bindemiddel nødvendigvis må bli tilsvarende tettere og disse porene er innkapslet i dette.

Figur 18 viser 400x forstørrelse av pastaprøve STD/SR-19 etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding. Den tettere strukturen av pastaprøve STD/SR-19 etter 1 og 2 år herding enn etter 28 døgn er her enda tydeligere. Det kan også sees i midtre og nedre bildet at en del av de mindre flygeaskekornene (runde, fylte <math>< 10 \mu\text{m}</math>) delvis har gått i oppløsning (tæres av alkaliene i løsningen) og etterlatt et lite tomt gap rundt partikkelen. Oppløst "glass" fra flygeaskekornene vil felle ut andre steder i pastaen når de møter f eks kalsiumhydroksid. Man kan altså ha lokale forskjeller i porevannssammensetning grunnet hindret diffusjon ettersom pastaen blir tettere.



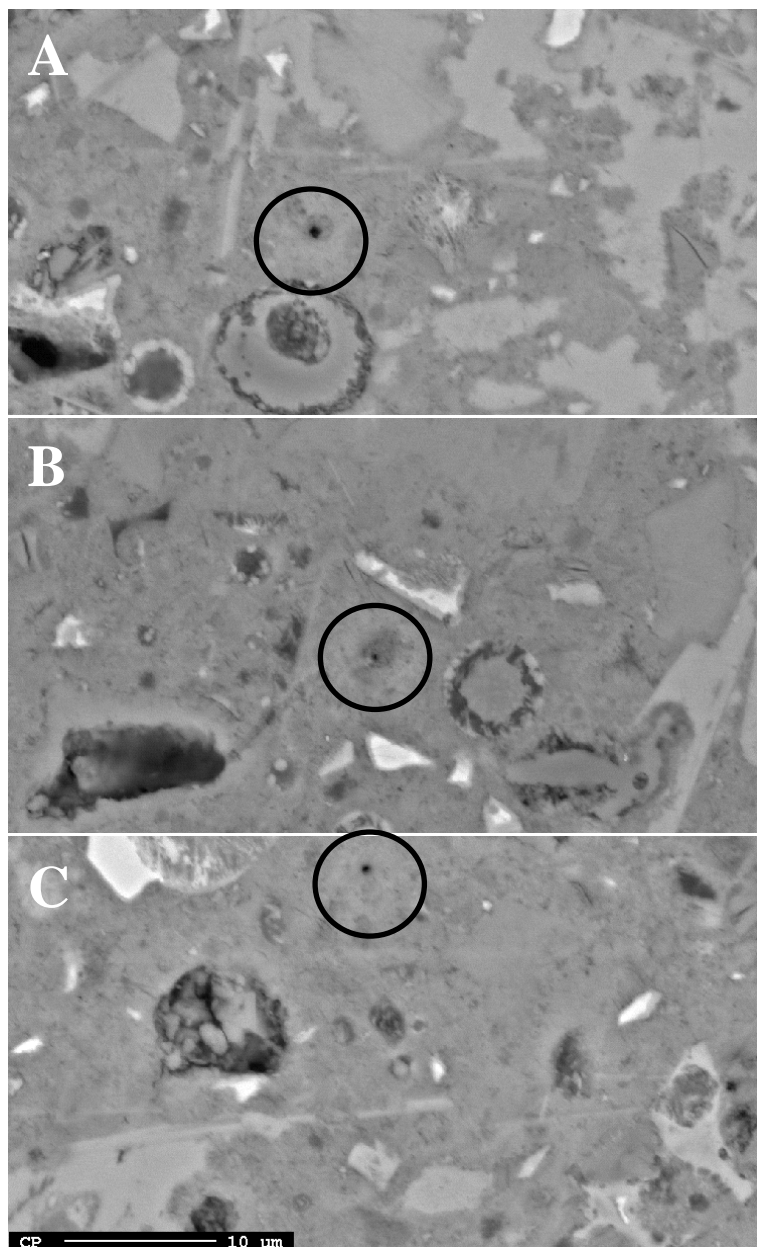
**Figur 17: 100x forstørrelse av pastaprøve STD/SR-19 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. I nedre del av bildet er det hule klumper av udispergert silikastøv (US). Disse må ikke forveksles med flygeaske (FA).**



**Figur 18: 400x oversikt over pastaprøve STD/SR-19 etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding.**

Figur 19 viser bilder med 2000x forstørrelse av pastaprøve STD/SR-19 etter 2 år forseglet herding. Steder hvor CSH-fasen er analysert med EDS er angitt med en sirkel og resultatene er gitt i Tabell 14 som molforhold (ikke masse) mellom ulike oksider.

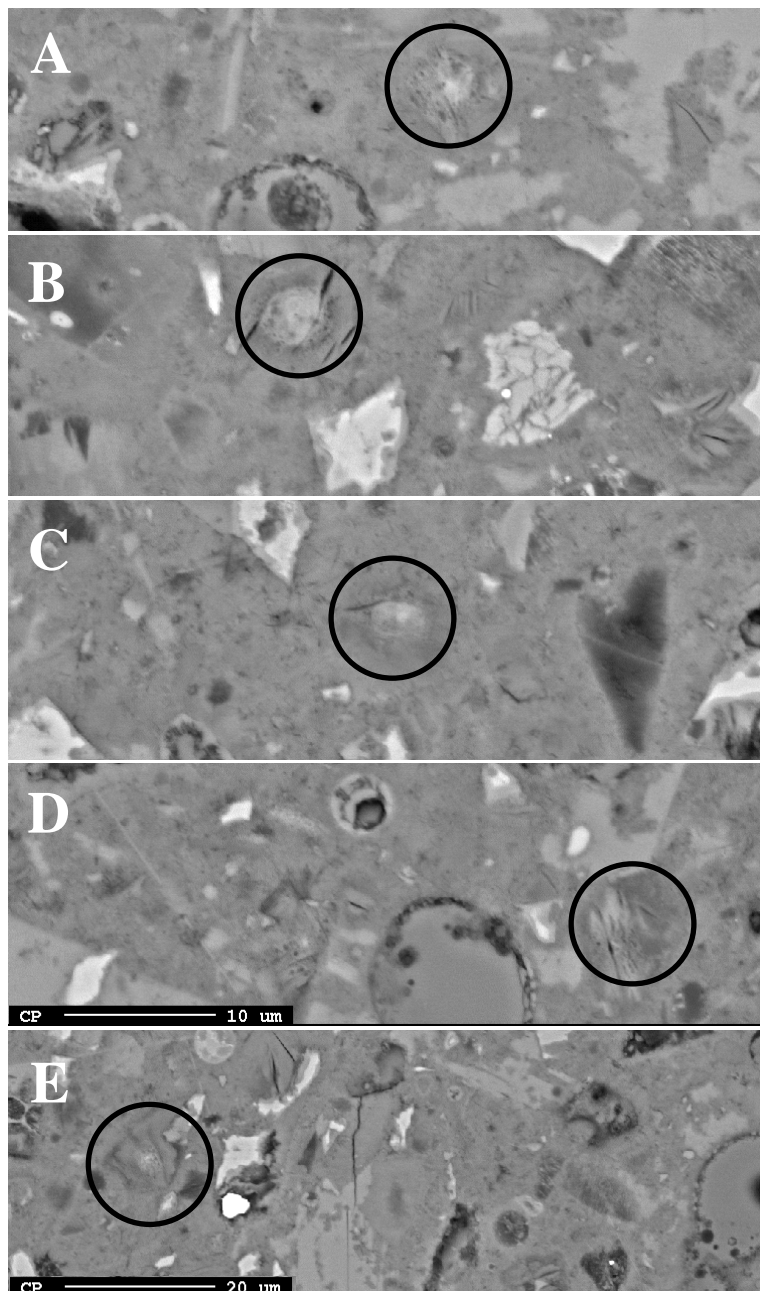
Ca/Al-rike hydratasjonsfasene som ble analysert for pastaprøve STD/SR-19 etter 2 års forseglet herding er vist i Figur 20. EDS-resultatene og tolkningen er gitt i Tabell 15.



**Figur 19: 2000x forstørrelse av pastaprøve STD/SR-19 etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasen angitt med sirkel ble analysert med EDS. Formålet var bestemmelse av CSH sammensetningen.**

**Tabell 14: EDS-resultater av CSH gitt i molforhold mellom forskjellige elementer**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>
Figur 19 A	2,2	0,04
Figur 19 B	1,6	0,03
Figur 19 C	2,2	0,04



**Figur 20: 2000x forstørrelse (A-D) og 1000x forstørrelse (E) av pastaprøve STD/SR-19 etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasen angitt med sirkel ble analysert med EDS. Merket etter analysen er synlig som lyst punkt. Formålet var identifikasjon av Ca/Al-rike hydratasjonsfaser.**

**Tabell 15: EDS analyse Ca/Al/S-rike faser. Resultatene er gitt i molforhold mellom forskjellige elementer.**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	type
Figur 20 A	7,5	4,7	2,7	1,7	ettringitt-monosulfat
Figur 20 B	9,6	3,7	4,2	0,9	monosulfat
Figur 20 C	14,6	3,8	1,9	2,0	ettringitt-monosulfat
Figur 20 D	8,1	3,2	1,5	2,2	ettringitt-monosulfat
Figur 20 E	9,5	3,7	1,8	2,0	ettringitt-monosulfat



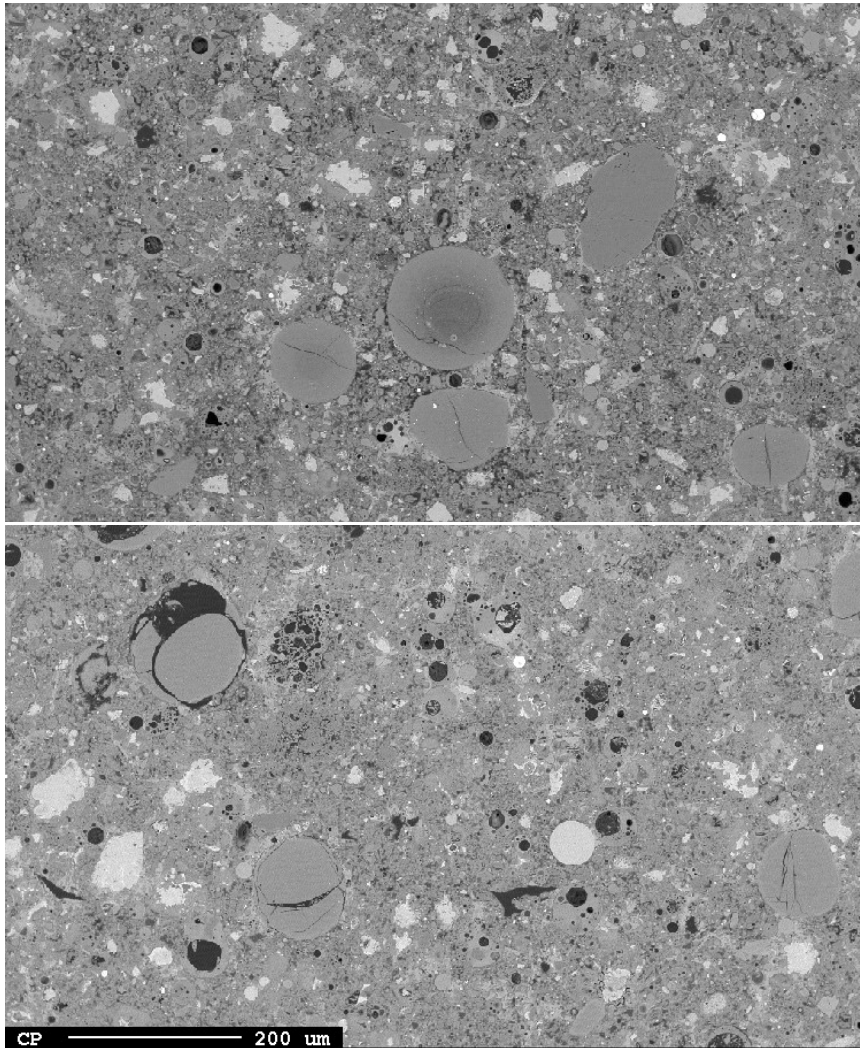
### 3.5 Anlegg sement, 4,8 % silikastøv og 33 % flygeaske (ANL-33)

Figur 21 viser en 100x oversikt over pastaprøve ANL-33 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. Igjen har pastaen etter 1 år generelt tettere struktur enn etter 28 døgn grunnet økt hydrasjonsgrad og økt reaktivitet av flygeaske. Det er mye udispergert silikastøv ved begge aldre, men i likhet med pasta 4 så virker klumpene av silikastøv i større grad å være hule etter 1 år sammenliknet med 28 døgn. Den ytre del av klumpen reagerer med kalsium til en CSH-gel med lavere Ca/Si forhold enn vanlig, mens alkalier diffunderer lenger inn i klumpen. Alkalisilikater er løselige. Man kan derfor ikke utelukke at det indre av klumpen etter hvert går i oppløsning og diffunderer ut i pastaen for så å felle ut som CSH når den møter kalsiumhydroksid. Man får da en syklus hvor alkalier fungerer som en katalysator og ikke forbrukes over tid (med unntak av den fraksjonen av alkalier som kan inngå i CSH- strukturen). En slik syklus er skissert i likning 5;

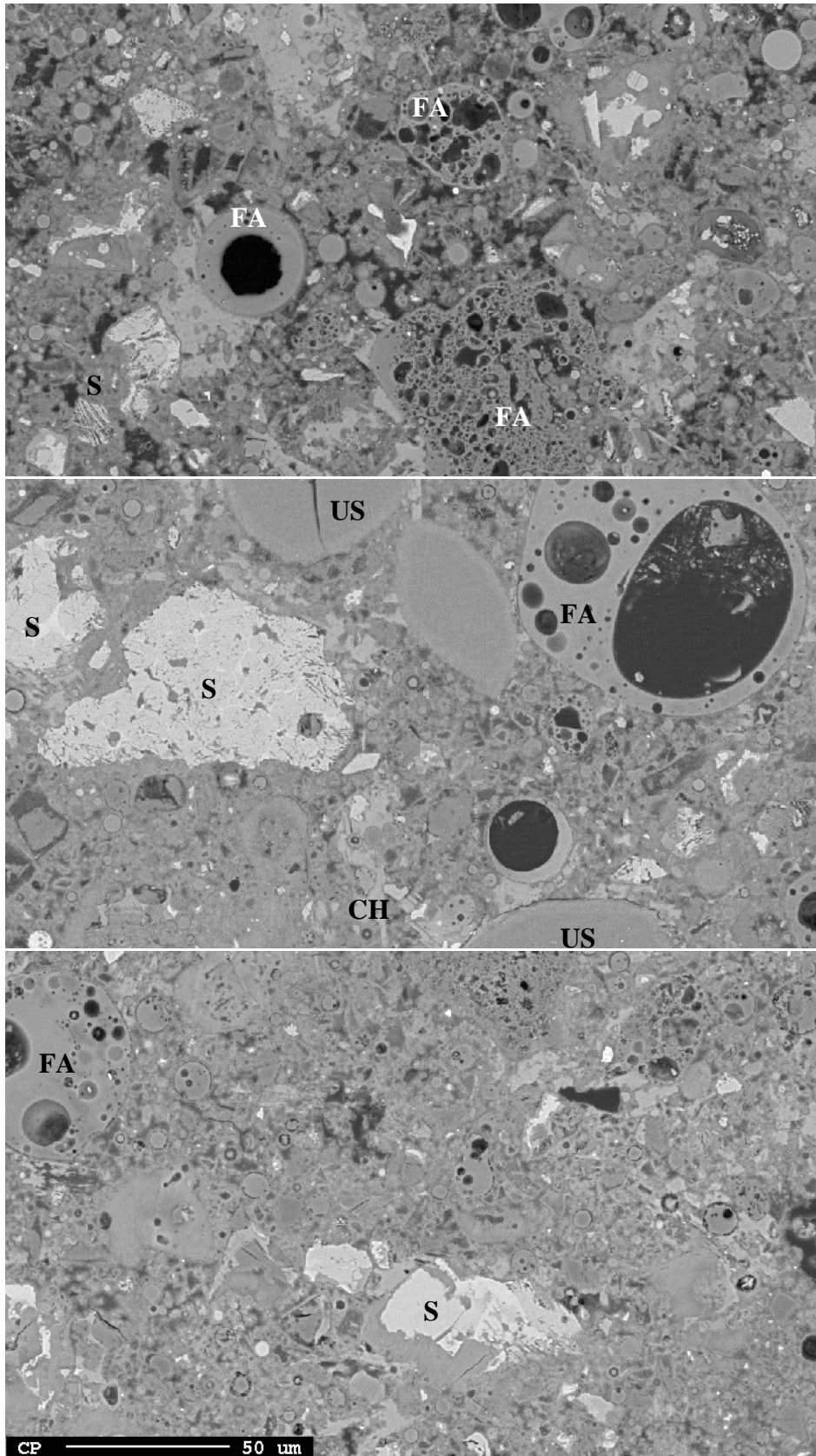


hvor sementkemikerens kortform er benyttet, der S = SiO<sub>2</sub>, C = CaO, H = H<sub>2</sub>O, N = Na<sub>2</sub>O og K = K<sub>2</sub>O. (aq) betyr oppløst i vann og (s) betyr fast stoff.

Figur 22 viser en 400x oversikt over pastaprøve ANL-33 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding.



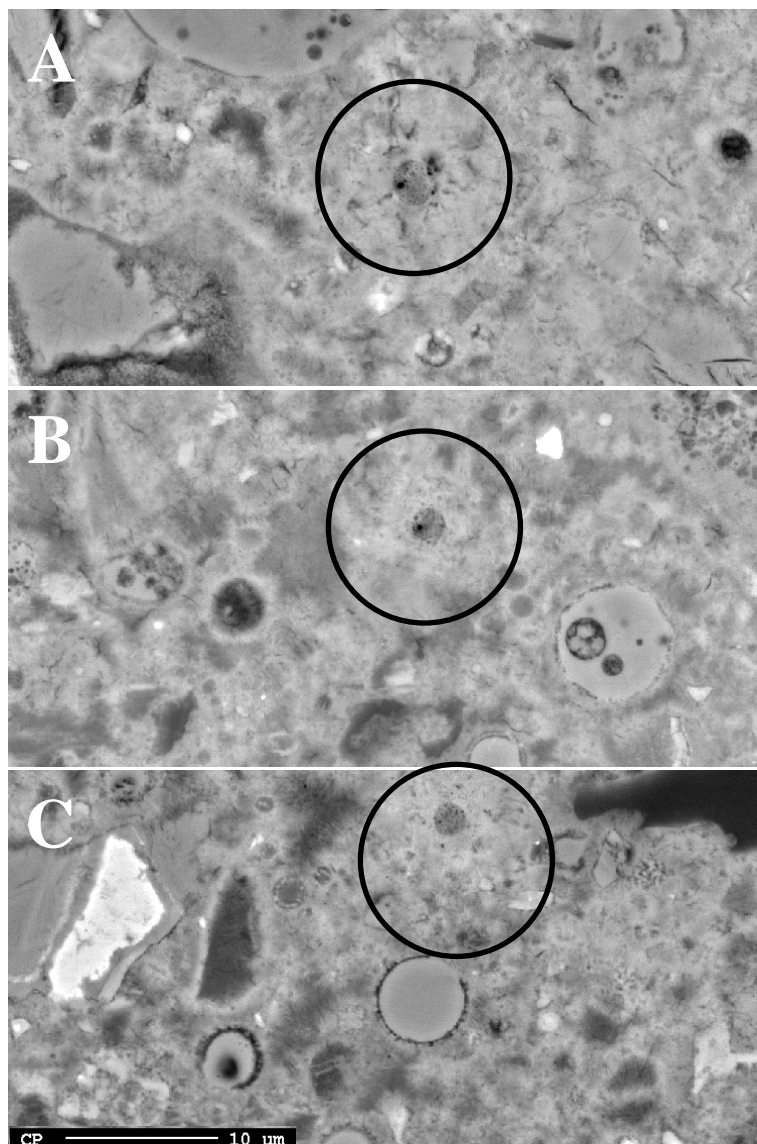
**Figur 21: 100x oversikt over pastaprøve ANL-33 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. Det er udispergert silikastøv i begge tilfeller, men de ser i større grad ut til å være hule etter 1 år og det kan derfor være mulig at den indre del går i oppløsning og diffundere ut i pasta etter hvert.**



**Figur 22: 400x forstørrelse av pastaprøve ANL-33 etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding. Merkene US, FA, CH og S angir henholdsvis udispergert silikastøv, flygaske, kalsiumhydroksid og ureagert sement. Spesielt øvre bilde viser ulike former av flygaskekorn.**

Figur 23 viser bilder med 2000x forstørrelse av pastaprøve ANL-33 etter 2 år forseglet herding. Steder hvor CSH-fasen er analysert med EDS er angitt med sirkel og resultatene er gitt i Tabell 16 som molforhold av ulike oksider.

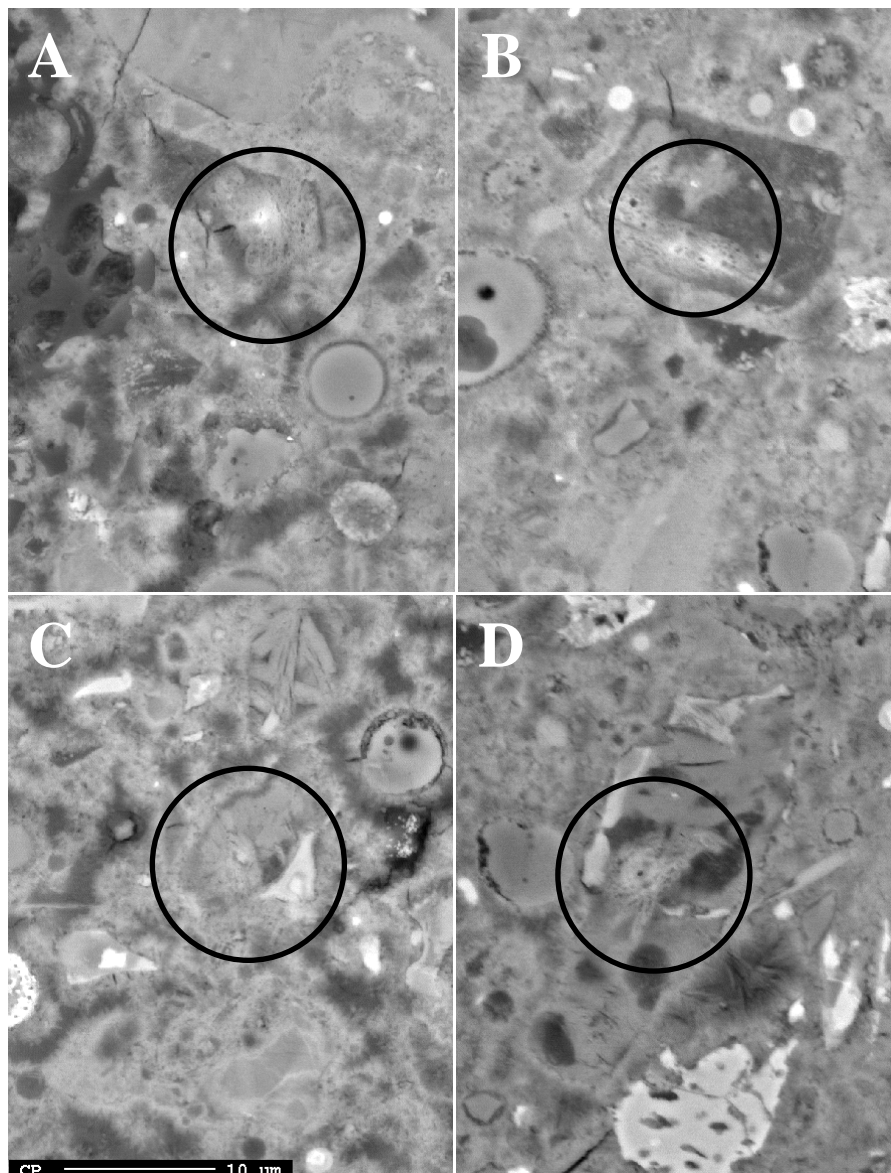
Ca/Al-rike hydratasjonsfasene som ble analysert for pastaprøve ANL-33 etter 2 års forseglet herding er vist i Figur 24. EDS-resultatene og tolkningen er gitt i Tabell 17.



**Figur 23: 2000x forstørrelse av pastaprøve ANL-33 etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasen angitt med sirkel ble analysert med EDS. Merket etter analysene er synlige. Formålet var bestemmelse av CSH-sammensetningen.**

**Tabell 16: EDS-resultater av CSH gitt i molforhold mellom de forskjellige elementene**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>
Figur 23 A	1,9	0,05
Figur 23 B	2,1	0,06
Figur 23 C	1,5	0,03



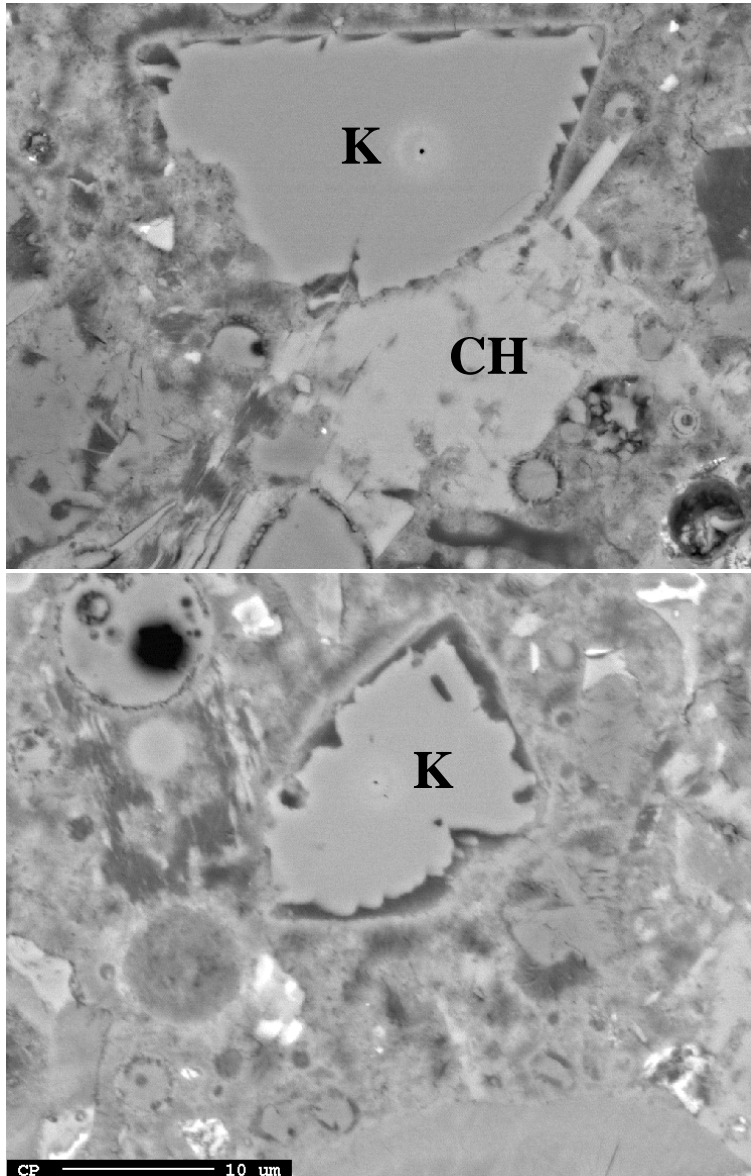
**Figur 24:** Bildene (2000x forstørrelse) viser pastaprøve ANL-33 etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasen angitt med sirkel ble analysert med EDS. Merket etter analysen er synlig. Formålet var identifikasjon av Ca/Al-rike hydratasjonsfaser.

**Tabell 17:** EDS analyse Ca/Al/S-rike faser. Resultatene er gitt i molforhold mellom de forskjellige elementene

	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	type
Figur 24 A	13,5	3,5	4,0	0,9	monosulfat
Figur 24 B	12,4	3,7	12,1	0,3	monokarbonat
Figur 24 C	15,4	3,0	15,1	0,2	hydrogarnet
Figur 24 D	19,3	4,7	23,8	0,2	monokarbonat

Figur 25 viser delvis reagerte kalksteinspartikler som finnes i pastaprøve ANL-33 etter 2 år forseglet herding.

CH markerer kalsiumhydroksid.

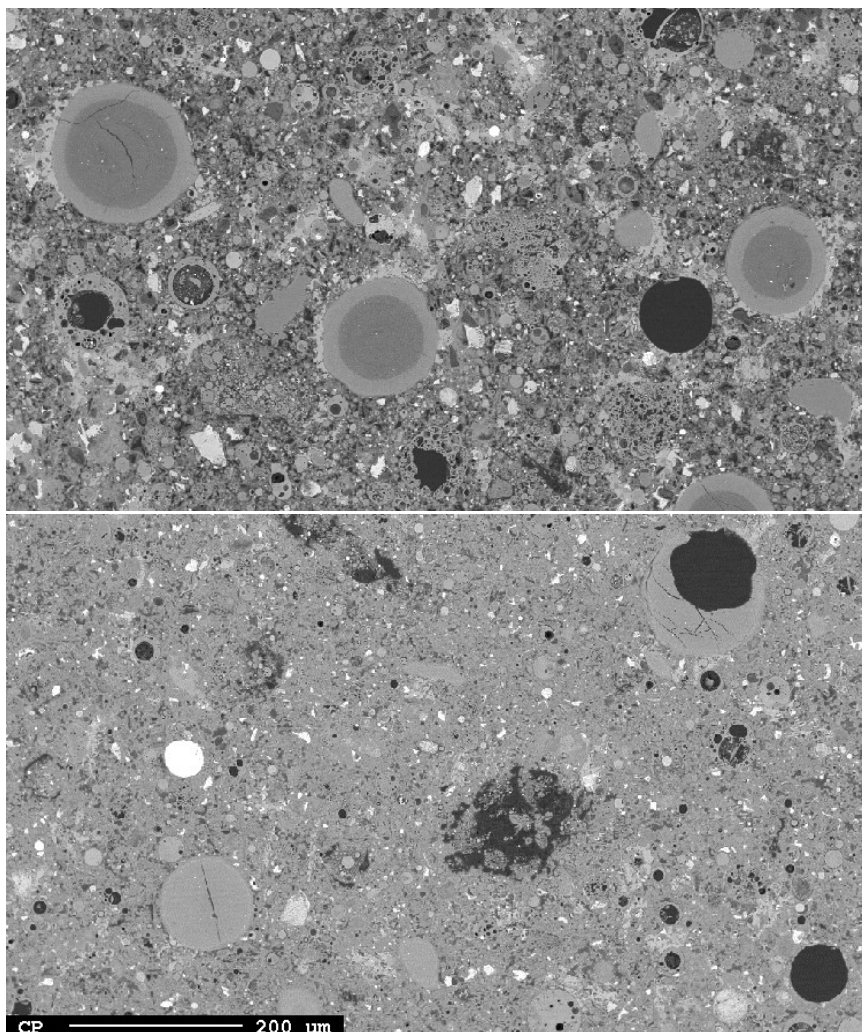


**Figur 25: 2000x forstørrelse av pastaprøve ANL-33 etter 2 år forseglet herding. Bildene viser delvis reagerte kalksteinpartikler (K). CH markerer kalsiumhydroksid.**

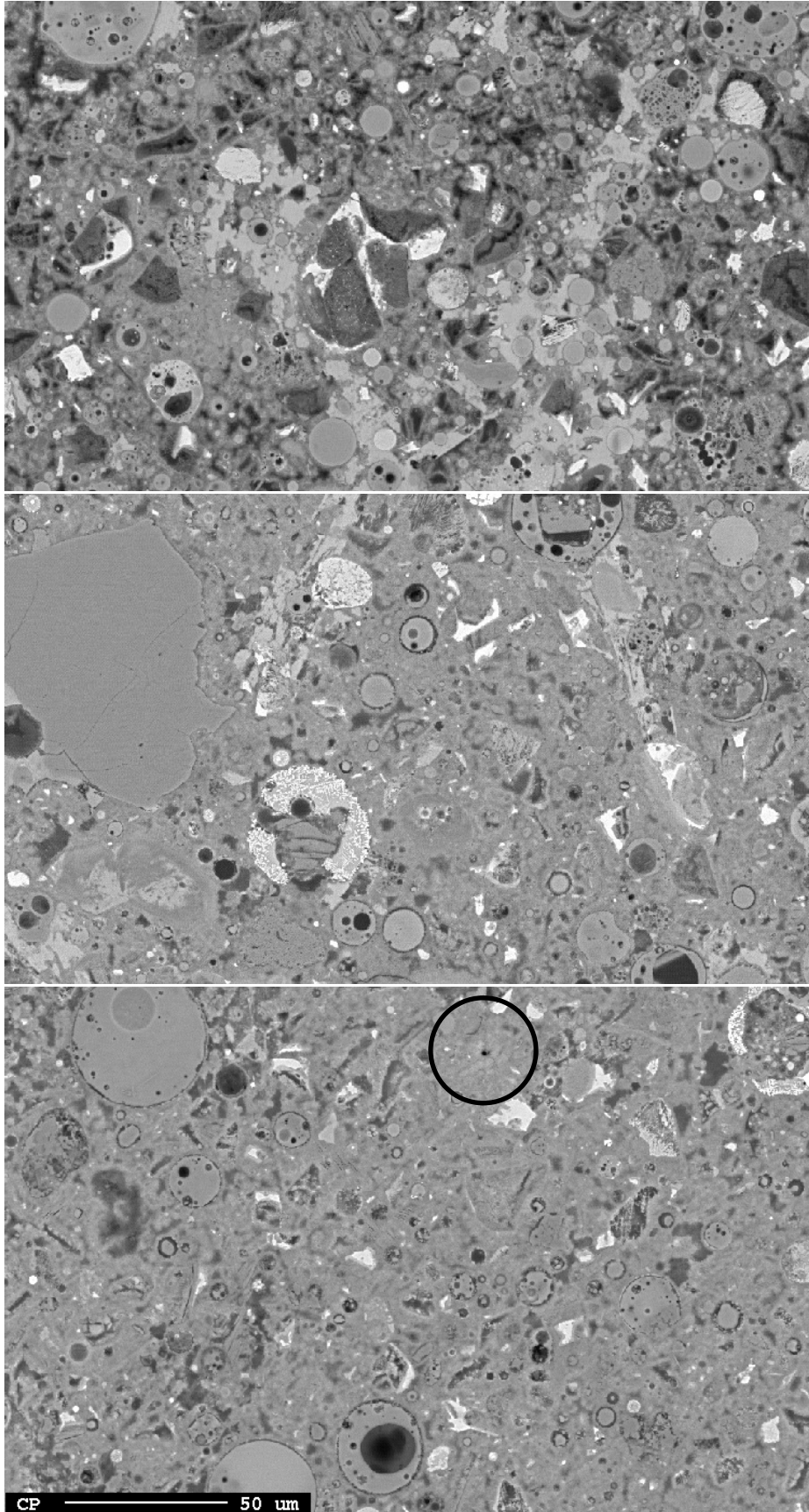
### 3.6 Sulfatresistent sement med 4,8 % silikastøv og 33 % flygeaske (SR-33)

Figur 26 viser 100x oversikt for pastaprøve SR-33 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. Igjen synes strukturen etter 1 år mye tettere enn etter 28 døgn grunnet økt hydratasjonsgrad og økt mengde reagert flygeaske. Også denne pasta har udispergerte klumper av silikastøv, og etter 28 døgn er det tydelig en ytre, lysere reaksjonsone hvor kalsium og alkalier kan ha trengt inn. Etter 1 år er klumpene av silikastøv mer jevnt grå og noen av dem er også hule slik at en oppløsning over tid ikke kan utelukkes (som for pastaprøve ANL-33).

Figur 27 viser strukturen av pastaprøve SR-33 i 400x forstørrelse etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding. Her ser man også tydelig hvor mye tettere mikrostruktur pastaen har etter 1 og 2 år forseglet herding sammenliknet med etter 28 døgn. Det er mindre kalsiumhydroksid ved 1 år enn etter 28 døgn grunnet den pozzolane reaksjonen til flygeasken. Etter 2 år forseglet herding var det vanskelig og finne CH i prøven (høyt CH forbruk bekreftet med DTA/TG i Fig. 38). Figur 28 viser et eksempel på en av de få ansamlingene av CH som fantes i prøven.

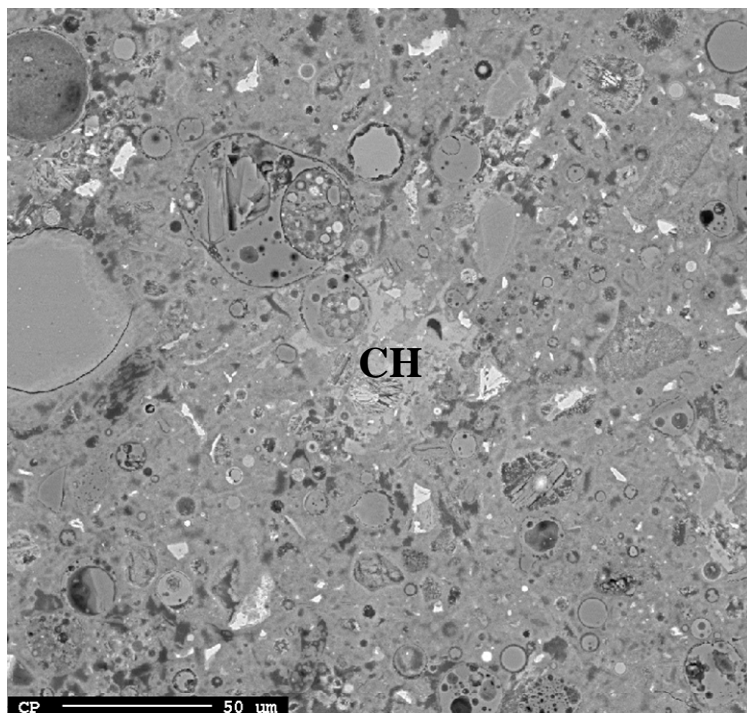


**Figur 26: 100x oversikt over pastaprøve SR-33 etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. Merk at udispergert silikastøv har tydelig ytre reaksjonsringer i øvre bilde.**

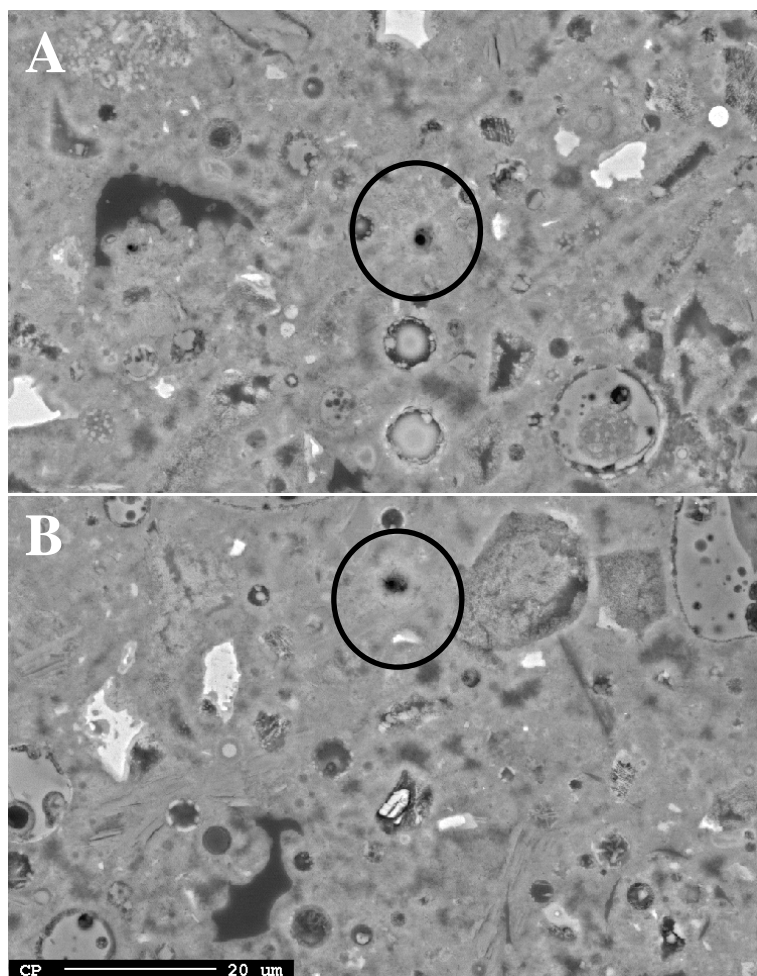


**Figur 27: 400x forstørrelse av pastaprøve SR-33 etter 28 døgn (øvre) 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding.**





**Figur 28:** 400x forstørrelse av pastaprøve SR-33 etter 2 år forseglet herding. Det er veldig lite CH igjen i prøven.



**Figur 29:** 1000x forstørrelse av pastaprøve SR-33 etter 2 år forseglet herding. CSH angitt med sirkel ble analysert med EDS. Formålet var bestemmelse av CSH-sammensetningen.

Figur 29 viser bilder med 2000x forstørrelse av pastaprøve SR-33 etter 2 år forseglet herding. Steder hvor CSH-fasen er analysert med EDS er angitt med en sirkel og resultatene er gitt i Tabell 18 som molforhold av ulike oksider.

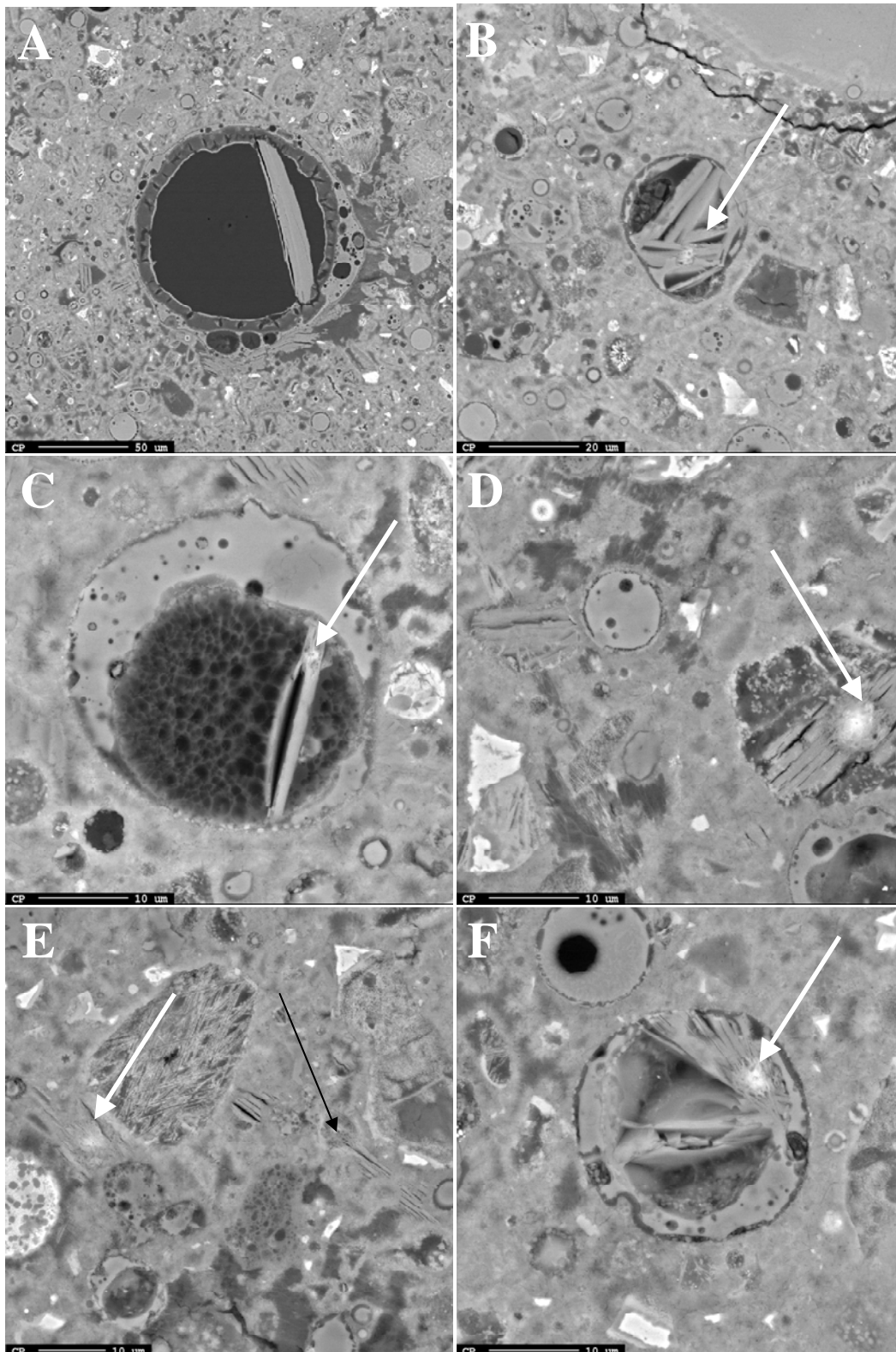
De Ca/Al-rike hydratasjonsfasene som ble analysert for pastaprøve SR-33 etter 2 års forseglet herding er vist i Figur 30 og Figur 31. Tilhørende EDS-resultater og tolkning er gitt i Tabell 19. Analysene ble ofte tatt av krystaller i hulrom som f. eks. "Hadley grains" eller flygeaskepartikler. På denne måten unngås det at analysen av denne fasen blir blandet med andre faser i EDS analysen. I EDS analysene blir omtrent  $1 \mu\text{m}^3$  analysert.

**Tabell 18: EDS-resultater av CSH gitt i molforhold mellom forskjellige oksider**

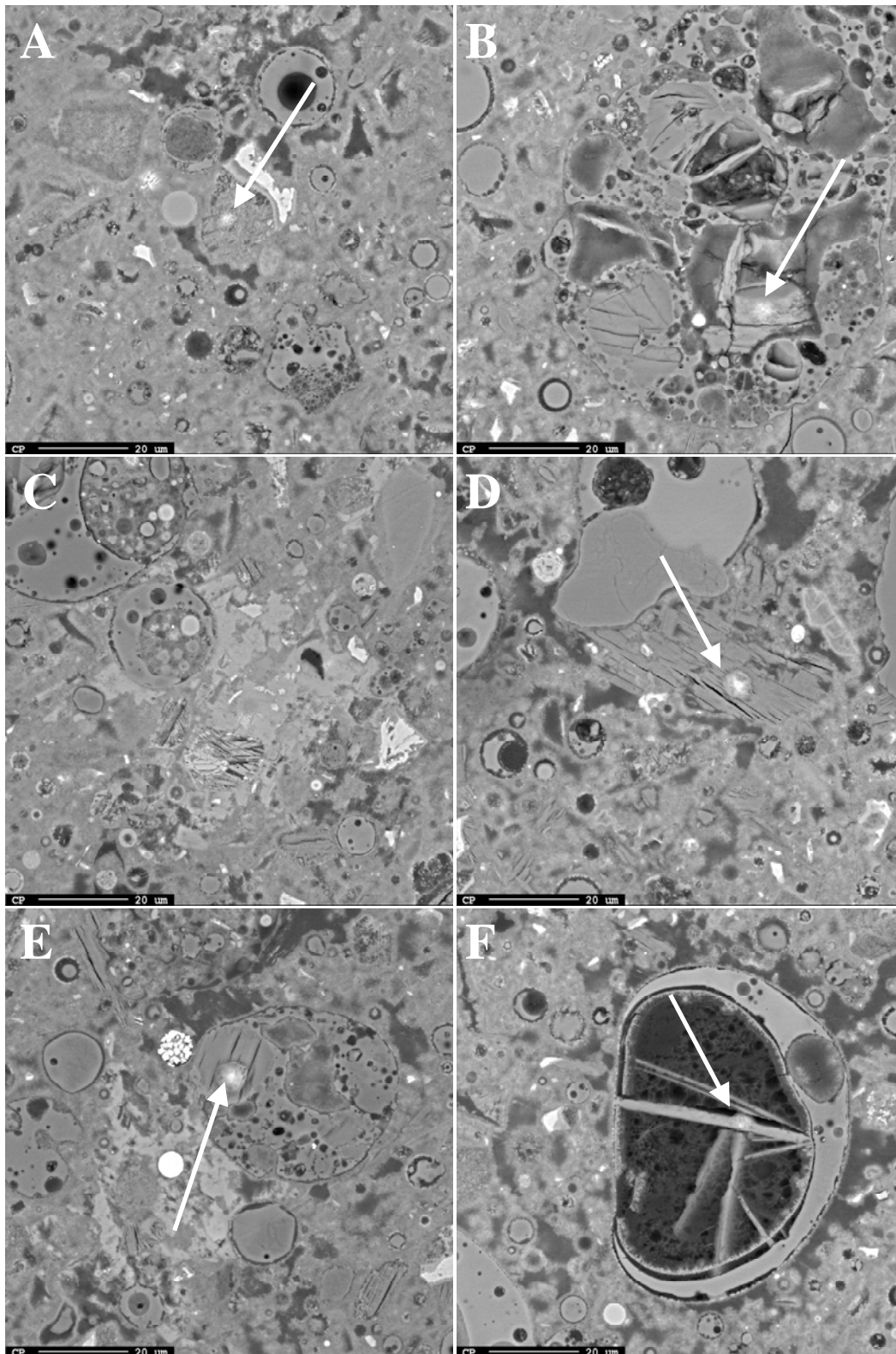
	CaO/SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>
Figur 27	1,8	0,06
Figur 29 A	1,8	0,04
Figur 29 B	1,8	0,06

**Tabell 19: EDS analyse Ca/Al/S-rike faser som vist i Figur 30 og Figur 31. Resultatene er gitt i molforhold mellom forskjellige oksider**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Type
Figur 30 B	0,8	1,6	-	0,0	strätlingitt
Figur 30 C	0,9	1,7	187	0,0	strätlingitt
Figur 30 D	5,5	3,4	2,4	1,4	ettringitt-monosulfat-strätlingitt
Figur 30 E	5,3	4,5	2,6	1,7	ettringitt-monosulfat-strätlingitt
Figur 30 E	18,1	3,8	1,8	2,0	ettringitt-monosulfat
Figur 30 F	1,0	1,6	129	0,0	strätlingitt
Figur 31 A	2,6	3,1	2,0	1,6	ettringitt-monosulfat-strätlingitt
Figur 31 B	20,3	3,3	1,9	1,7	ettringitt-monosulfat
Figur 31 D	2,4	2,5	3,1	0,8	ettringitt-monosulfat-strätlingitt
Figur 31 E	14,7	3,6	2,2	1,7	ettringitt-monosulfat
Figur 31 F	15,5	3,3	1,6	2,0	ettringitt-monosulfat



**Figur 30:** Bildene er forstørret 400x f (A), 1000x (B) og 1500x (C-F) og viser pastaprøve SR-33 etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasene angitt med pil ble analysert med EDS. Formålet var identifikasjon av rene Ca/Al-rike hydratasjonsfaser.



**Figur 31: Bildene (1000x) viser pastaprøve SR-33 etter 2 år forseglet herding. Hydrasjonsfasen angitt med pil ble analysert med EDS. Formålet var identifikasjon av rene Ca/Al-rike hydrasjonsfaser.**

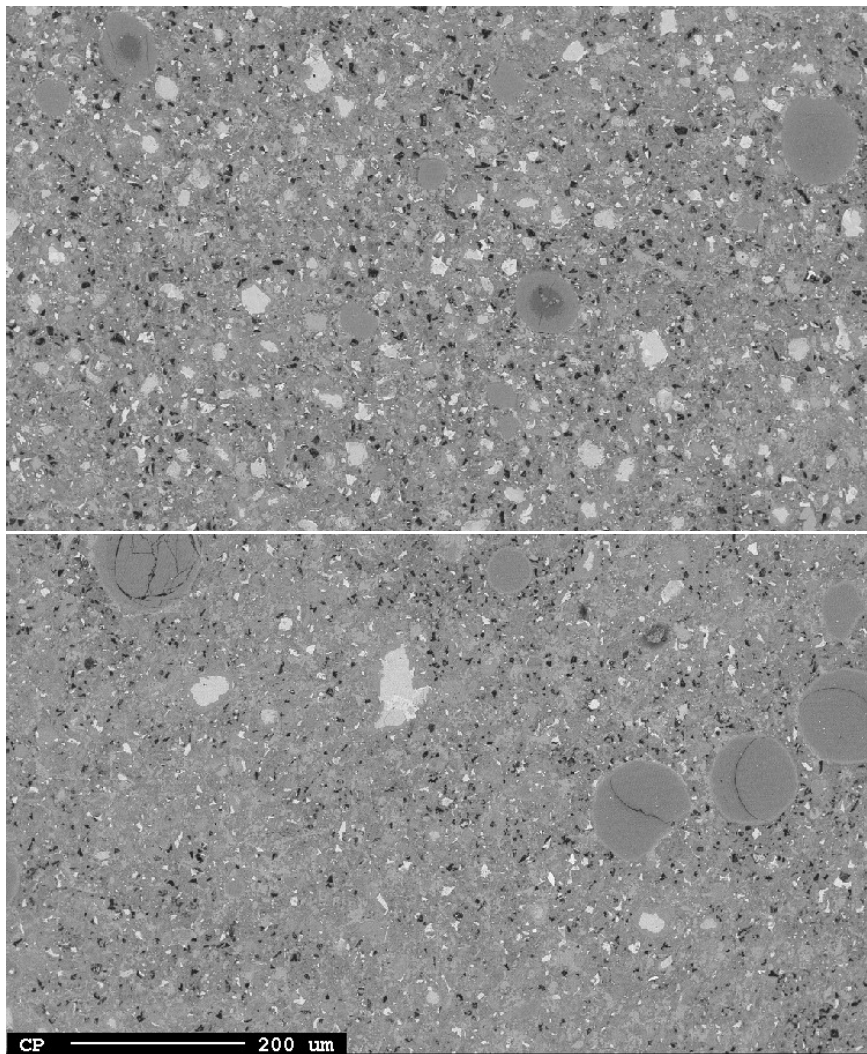
### 3.7 Sulfatresistent sement med kun 4,8 % silikastøv (SR)

Figur 32 viser 100x oversikt over pastaprøve SR etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding. Generelt sett er det flere hvite, uhydratiserte sementkorn i øvre bilde enn i nedre, hvilket reflekterer økt hydrasjonsgrad i perioden. Denne pasta har også mye udispergert silikastøv. Et annet fenomen er at denne pastaen ser ut til å ha et vesentlig større antall "Hadley grains" enn de øvrige. Disse fremstår som irregulære, sorte hull etter at små sementkorn sannsynligvis har gått i oppløsning. Disse hullene har sannsynligvis ikke særlig negativ innflytelse på permeabiliteten, da de ligger innkapslet i et bindemiddel som nødvendigvis må være tettere enn det ville vært hvis dette fenomenet ikke oppstod.

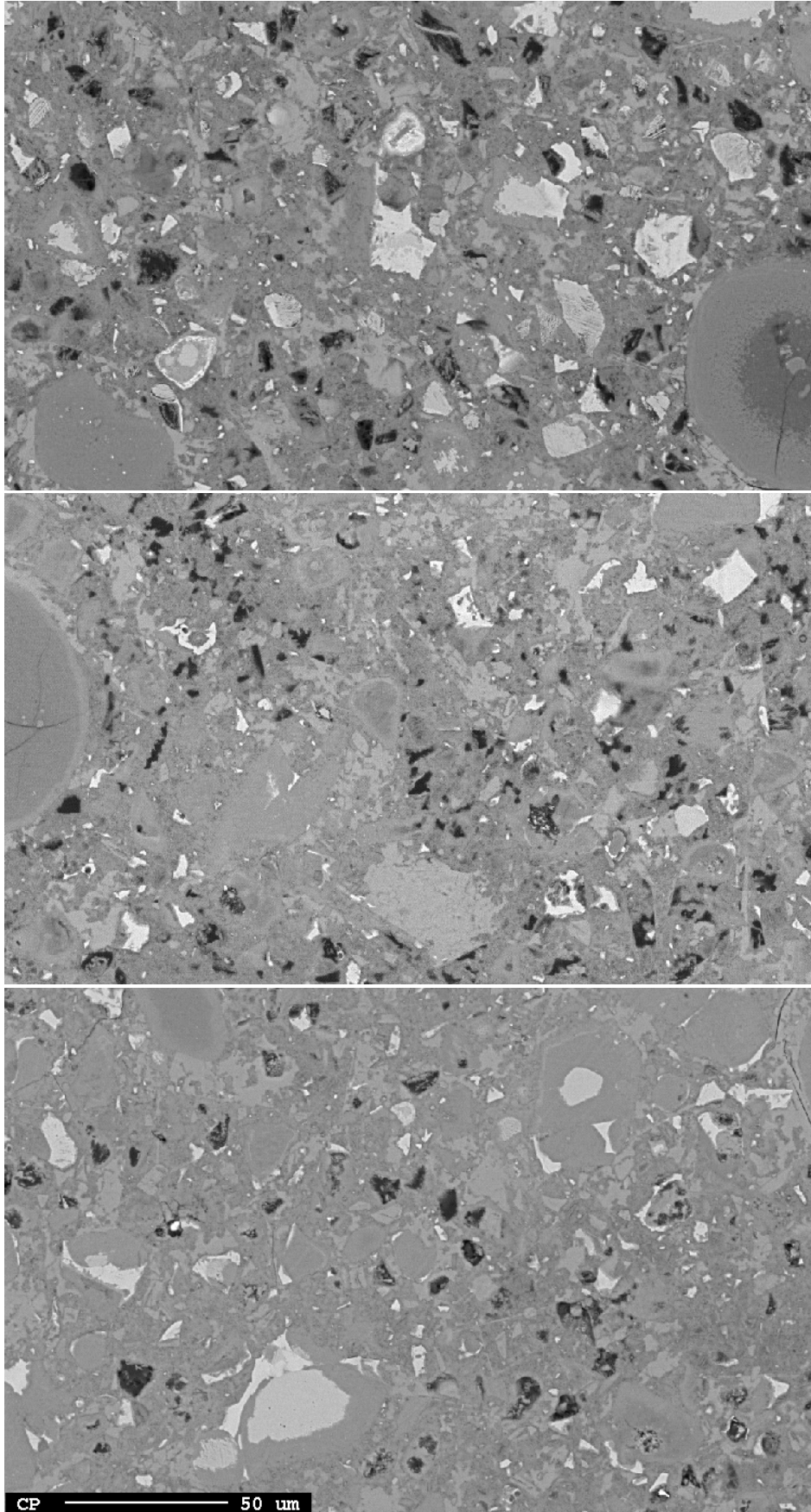
Fig. 23 viser 400x oversikt over pastaprøve SR etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding. Nå er det enda mer tydelig at det er flere ureagerte sementkorn i øvre bilde enn i nedre, samt at antall "Hadley grains" kommer tydeligere frem. Det virker som antall "Hadley grains" er færre ved 2 år enn ved 28 døgn, og er delvis i ferd med å gro igjen ved 2 års alder.

Figur 34 viser bilder på 2000x forstørrelse av pastaprøve SR etter 2 år forseglet herding. Steder hvor CSH-fasen er analysert med EDS er angitt med en hel sirkel og resultatene er gitt i Tabell 20 som molforhold av ulike oksider.

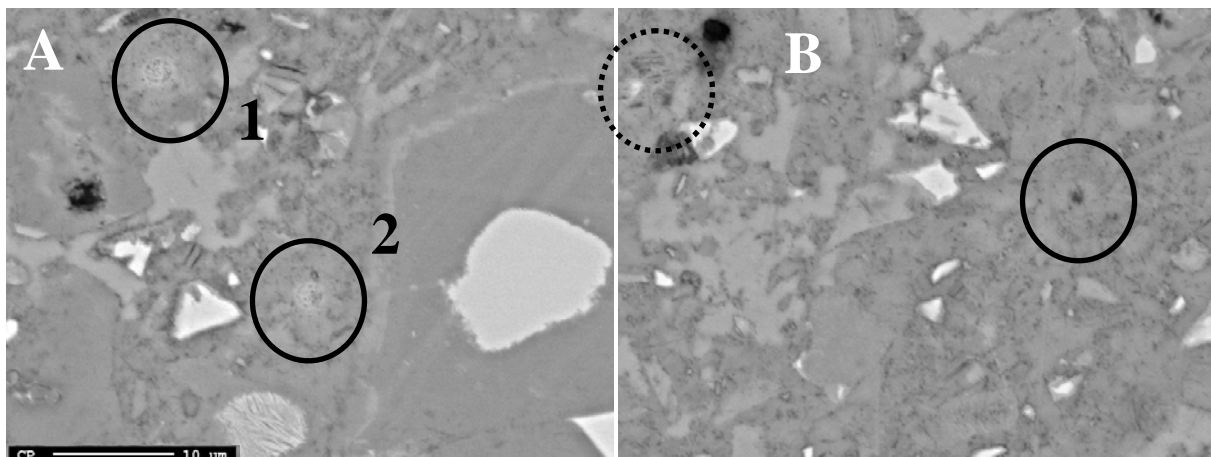
De Ca/Al-rike hydrasjonsfasene som ble analysert for pastaprøve SR etter 2 års forseglet herding er vist i Figur 34 og Figur 35. EDS-resultatene og tolkningen er gitt i Tabell 21.



**Figur 32: 100x forstørrelse av pastaprøve SR etter 28 døgn (øvre) og 1 år (nedre) forseglet herding.**



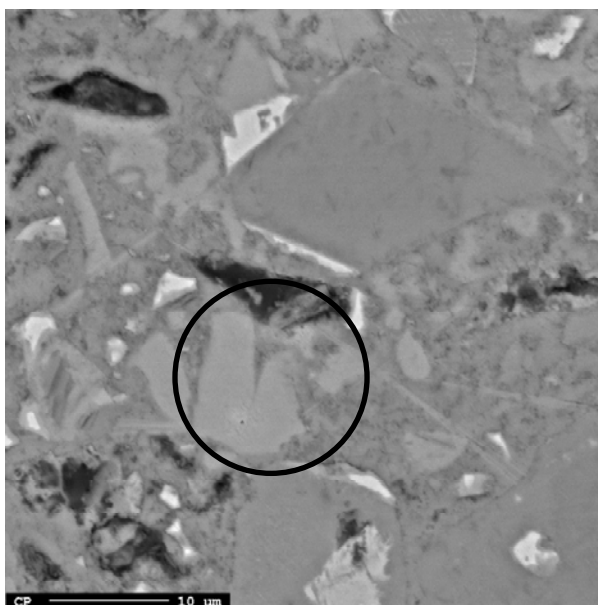
**Figur 33: 400x forstørrelse av pastaprøve SR etter 28 døgn (øvre), 1 år (midtre) og 2 år (nedre) forseglet herding.**



**Figur 34: 2000x forstørrelse av pastaprøve SR etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasene angitt med full sirkel er CSH og den angitt med stripet sirkel er Ca/Al-rike faser. De ble analysert med EDS. Merket etter analysen er synlig.**

**Tabell 20: EDS-resultater av CSH gitt i molforhold mellom forskjellige oksider**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>
Figur 34 A 1	2,0	0,02
Figur 34 A 2	1,9	0,01
Figur 34 B	2,2	0,04



**Figur 35: 2000x forstørrelse av pastaprøve SR etter 2 år forseglet herding. Hydratasjonsfasen angitt med hel sirkel er en Ca/Al-rik fase som ble analysert med EDS. Merket etter analysen er synlig som en liten sort prikk.**

**Tabell 21: EDS analyse Ca/Al/S-rike faser. Resultatene er gitt i molforhold mellom forskjellige oksider**

	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	type
Figur 34	4,6	4,3	1,9	2,3	ettringitt-monosulfat-strätlingitt
Figur 35	5,5	3,6	1,6	2,2	ettringitt-monosulfat-strätlingitt



## 4 KOMMENTARER OG KONKLUSJON

### 4.1 Generelt

Mikrostrukturen til ternære bindemiddel bestående av Portlandsement, 4,8 % silikastøv og 0, 19 eller 33 % flygeaske har vært undersøkt med sveipeelektronmikroskopi (SEM). Tre ulike Portland sementer ble brukt. De totalt 7 ulike bindemiddelene ble undersøkt etter 28 døgn, 1 og 2 år forseglet herding. Alle vann - fast stoff forhold var 0,40.

Det viste seg at deler av silikastøvet var dårlig dispergert til tross for at en blander med høy skjæreenergi var benyttet. Det er ikke sikkert dette vil være et problem i betong hvor gnisning av tilslag vil hjelpe til nedknusning av klumpene på 100-200  $\mu\text{m}$ . Dessuten ville nok et plastiserende tilsetningsstoff ha hjulpet på dispergeringen.

Silikastøv vil i pozzolanreaksjonen bruke alkalier og dermed synker alkaliinnholdet i porevannet. Når silika ikke er tilstrekkelig dispergert vil denne prosessen skje mer langsomt. Når silikastøvet har reagert fullstendig vil det frigjøre alkaliene igjen. Alkaliene fungerer som en katalysator for pozzolanreaksjonen til silikastøvet.

Alkali-innholdet spiller også en viktig rolle i pozzolanreaksjonen til FA. FA reagerer raskere med høyere alkaliinnhold (i.e. pH) i porevannet. Silikastøvet er mye mer reaktivt enn FA, selv når det er dårlig dispergert og fins som klumper. Silikastøvet påvirker hastigheten til pozzolanreaksjonen til FA, ved først å senke alkaliinnholdet i porevannet, men på lang sikt (1 og 2 år) blir effekten utjevnet siden reagert silika vil avgi alkaliene til porevannet igjen.

Det er ikke sikkert om udispergerte silikastøvet har påvirket reaktiviteten av flygeasken, ettersom man kan forvente at pH vil bli senket like mye (eller lite) av dispergert som udispergert silikastøv. Om det hadde vært en forskjell pga udispergert silikastøv ville den nok gått i favør av høyere pH og dermed mer reagert flygeaske.

Samtlige bindemiddel hadde tilstrekkelige mengde kalsiumhydroksid til å opprettholde høy nok pH til å passivere stål i en armert betong, men "reserven" var betydelig redusert for blanding SR-33.

Bindemidlene virket tette uten mikrosprekker og hadde betydelig mindre porøsitet ved 1 og 2 år enn etter 28 døgn herding grunnet økt hydrasjonsgrad og reagert mengde flygeaske.

### 4.2 Diskusjon SEM resultater

Denne rapporten bygger videre på rapporten med TGA resultatene (SBF BK F10001). Figur 36 og Figur 37 viser TGA resultatene for ANL sement med ulike mengder flygeaske. Figur 38 og Figur 39 gir tilsvarende resultatene for SR sement.

ANL og SR sement reagerer på forskjellig måte med flygeaske.

Med økende FA erstatning binder ANL sement mer vann i forhold til klinker og SF. SR sementen binder ikke mer vann med økende FA-erstatning.

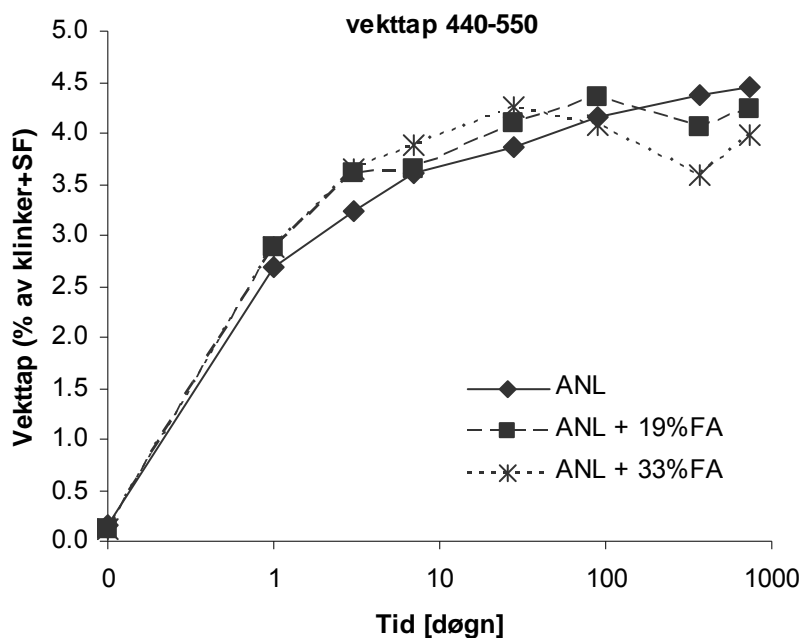
For ANL sementen er mengde CH i bindemidlet uavhengig av mengde FA. For SR-sementen gjelder det samme for 19 % FA, men CH forbruket for 33 % FA er imidlertid markant etter 28 døgn.

En skulle forvente at høyere CH forbruk førte til høyere mengde bundet vann. Dette gjelder for ANL-sement, SR med 33 % FA derimot har høyt CH-forbruk men binder ikke noe ekstra vann (vekttap 105 - 550 °C).

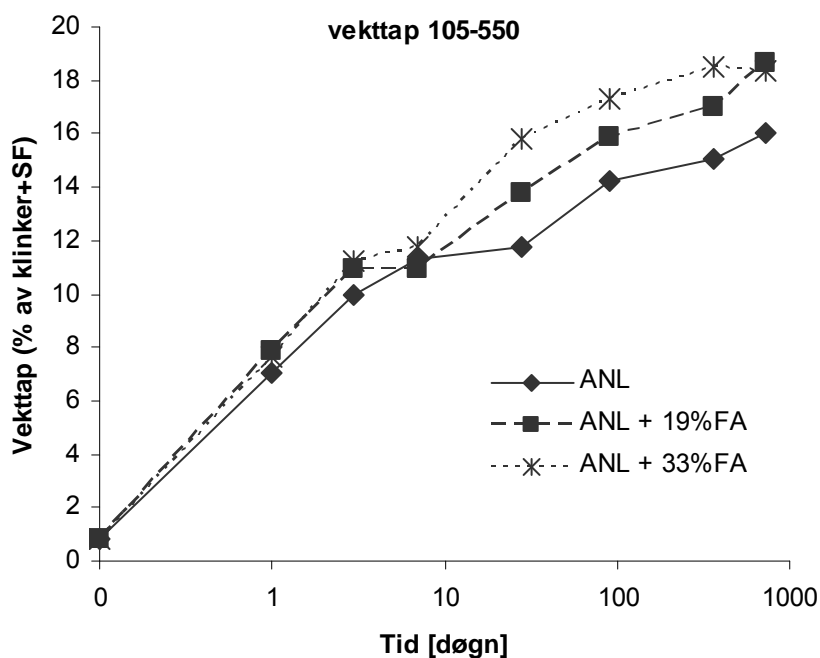
Denne forskjellen mellom ANL og SR sementen kan være på grunn av to årsaker:

1. Forskjell i hydrasjonsprodukter
2. Forskjell i mikrostruktur

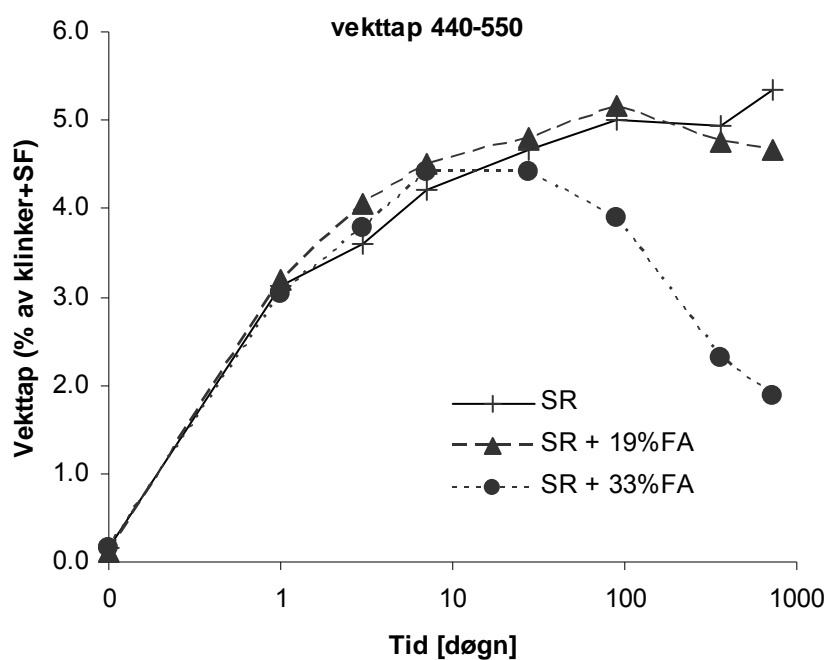
Videre blir begge muligheter diskutert.



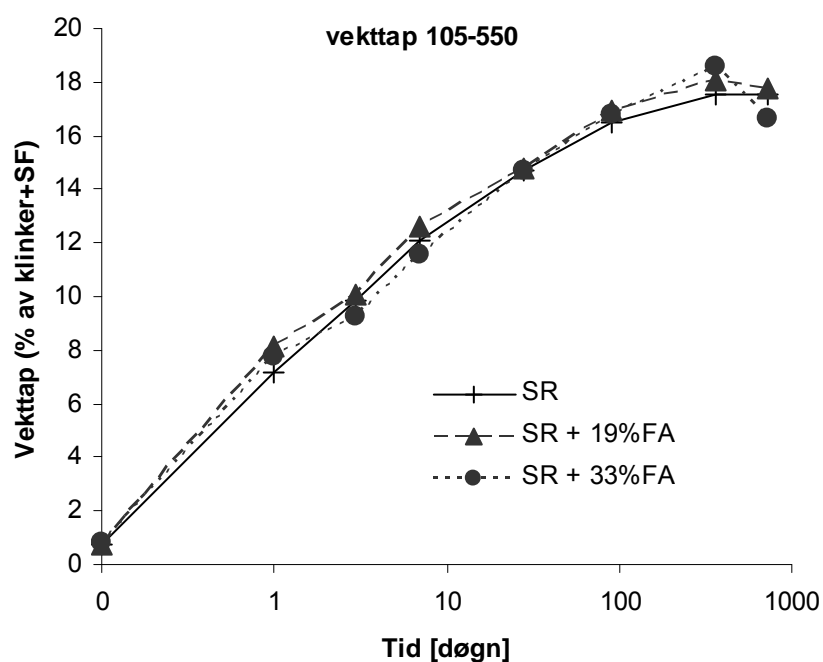
**Figur 36: Vekttap ved CH dekomponering i forhold til klinker+SF over tid som viser tilnærmet uendret CH mengde som funksjon av FA mengde.**



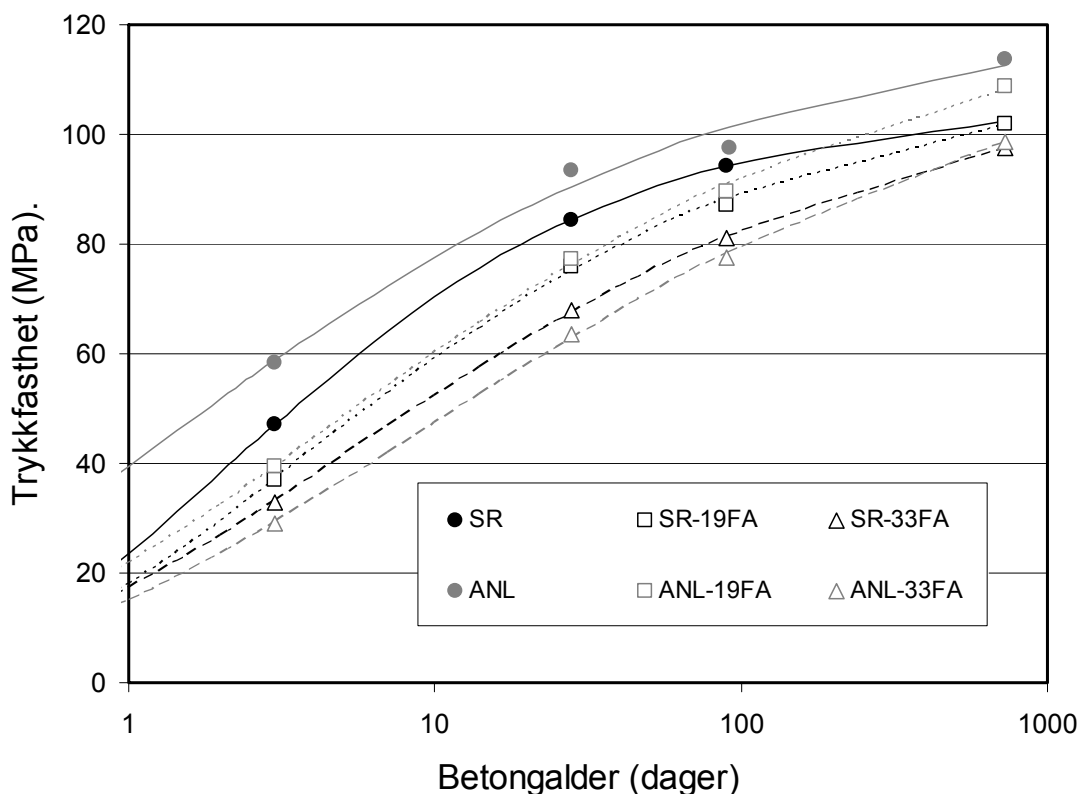
**Figur 37: Totalt mengde bundet vann i forhold til klinker+SF over tid, som viser økende vannbinding med økende mengde flygeaske.**



**Figur 38: Vekttap ved CH dekomponering i forhold til klinker+SF over tid, som viser betydelig redusert mengde CH for blandinger med 33 % FA etter 28 døgn herding.**



**Figur 39: Totalt mengde bundet vann i forhold til klinker+SF over tid, som viser samme mengde hydrat uavhengig av FA mengde.**



**Figur 40: Fasthetsresultater for samme bindemidlene med SR og ANL sement ved  $v/b = 0,4$  over tid på betong, som funksjon av mengde FA (presentasjon Ø. Bjøntegaard, 2009).**

#### 4.2.1 Forskjell i hydratasjonsprodukter

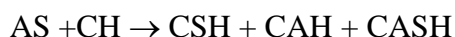
Kjemisk sett er sementene relativt like (se Tabell 1) med sammenliknbar mengde hovedelementer ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  og  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Tabell 2 viser mineralsammensetningen av klinkeren for ANL og SR beregnet med Bogue. SR inneholder mer  $\text{C}_3\text{S}$  og mindre  $\text{C}_2\text{S}$  enn ANL.  $\text{C}_3\text{S}$  reagerer raskere enn  $\text{C}_2\text{S}$ , men  $\text{C}_2\text{S}$  har større fasthetspotensial.

ANL sement inneholder imidlertid 4,1 % kalksteinsmel, SR ikke. Aluminatfasene endres når sementen inneholder kalksteinsmel.

Alkaliinnholdet påvirker reaktiviteten til flygeaske, men for disse to sementene er alkaliinnholdet relativt likt.

Forskjell i forbruk av CH hos flygeaske i SR og ANL sement kan skyldes dannelse av forskjellige hydratasjonsprodukter. Pozzolan-reaksjonen til FA kan forenklet bli skrevet som følgende:



Et høyere forbruk av CH i SR med 33 % FA i forhold til ANL med 33 % FA under forutsetning av lik mengde reagert FA kan i teorien skyldes et høyere Ca/Si forhold i CSH (men det er ingen forskjell som vist i Fig. 41) eller dannelse av andre hydratasjonsprodukter, f eks mer CAH eller CASH. En endring i CSH kan påvirke hydratasjonen sterkt siden det er hovedhydratasjonsproduktet i denne typen sement som er testet her.

En annen mulighet er at i SR sementen som inneholder 33 % FA, så har flygeasken reagert mer enn i ANL sementen med 33 % FA, og at CH mengden derfor er lavere.

For å sjekke om CSH-gelen endrer seg med varierende sement (ANL eller SR) eller FA-innhold ble Ca/Si og Al/Si forholdet i CSH bestemt ved bruk av EDS på pastaprøver herdet i 2 år. Resultatene er vist i Figur 41 og Figur 42. For alle testede sementer finnes det en trend at Ca/Si forholdet i CSH minsker med økende FA innhold. Al/Si forholdet i CSH derimot øker med økende FA innhold.

Mellom ANL og SR sement er det ikke noe vesentlig forskjell i Ca/Si og Al/Si forholdet i CSH (se Figur 41).

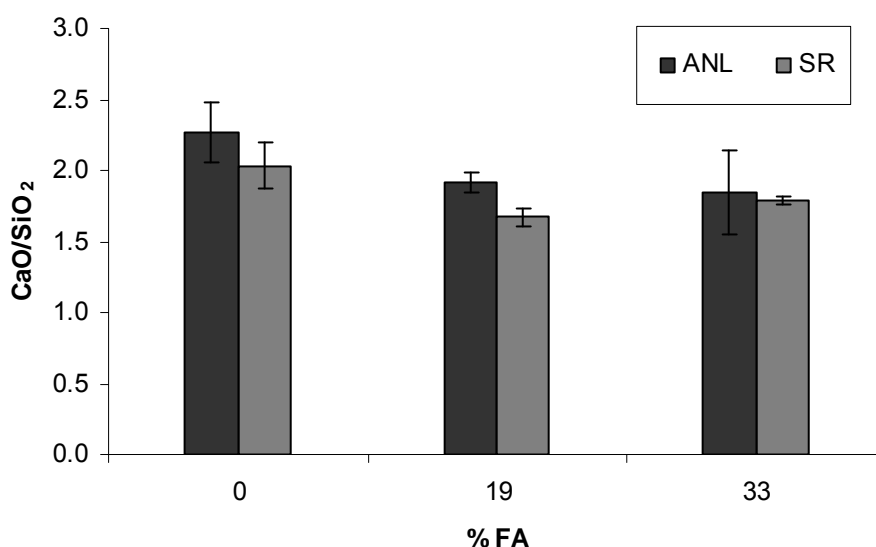
Når sementen erstattes med FA oppnås et lavere Ca/Si forhold i CSH, siden CSH fra pozzolanreaksjonen har lavere Ca/Si enn fra C<sub>3</sub>S hydratasjon. Al/Si forholdet øker med økende FA erstatning.

Resultatene av EDS analysene på aluminatrike faser er oppsummert i Tabell 22.

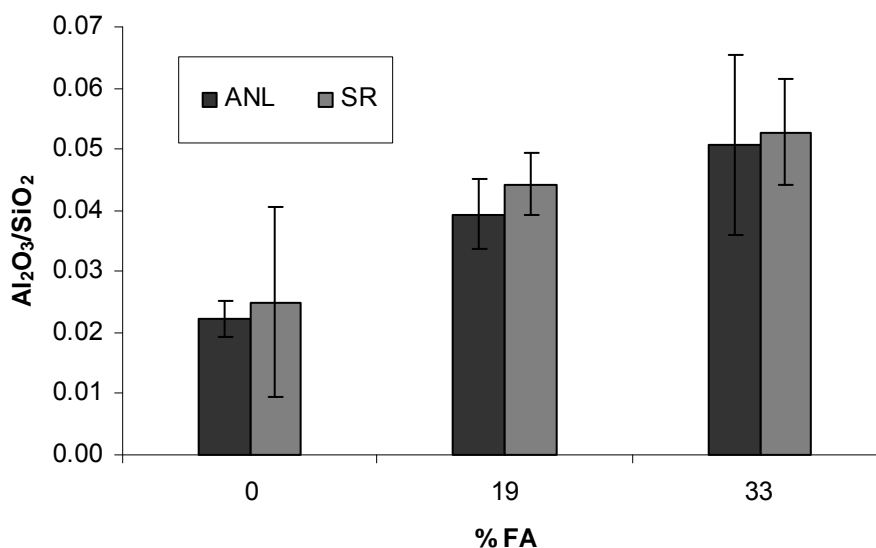
Det er vanskelig å skille mellom hydrogarnet ( $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$ ) og monokarbonat ( $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4$ ) fasen ved bruk av EDS siden forskjellen i  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  bare er 1 mellom dem og EDS kun er semi-kvantitativ. En bølglengdedispersiv analyse (WDS) ville vært et mer nøyaktig verktøy.

De blandingssementene som inneholder ANL-sement danner stort sett hydrogarnet/monokarbonat og ettringitt. I sementene som inneholder SR-sement finnes det ettringitt, monosulfat og strätlingitt. Forskjellen skyldes at ANL-sement inneholder kalksteinsmel, men ikke SR-sementen.

Ved tilsetning av kalksteinsmel (hovedsakelig  $\text{CaCO}_3$ ) blir monosulfat ustabil og monokarbonat dannes i stedet under frigivelse av sulfat som danner mer ettringitt i reaksjon med fortsatt eksisterende monosulfat (i.e. som ikke allerede har reagert med kalsiumkarbonat). Ettringitten er stabil i nærvær av  $\text{CaCO}_3$ . Ettringitt ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ) er mer vannrik enn monosulfat ( $\text{C}_4\text{ASH}_{12}$ ). Det vil si at de aluminatrike fasene i ANL sement er mer vannrike enn de i SR sementen. Flygeaske tilfører mer aluminater i systemet (se Tabell 1) derfor blir effekten av kalksteinsmelet forsterket ved økende mengde flygeaske. Dette kan muligens forklare forskjellen mellom Figur 37 og Figur 39 som viser at ANL sement binder mer vann med økende mengde flygeaske, mens det ikke er tilfelle for SR.



**Figur 41: CaO/SiO<sub>2</sub> forhold i CSH bestemt ved EDS analyse.**



**Figur 42: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> forhold i CSH bestemt ved EDS analyse.**

**Tabell 22: Oppsummering av EDX analyser av aluminatrike faser.**

	aluminatrike faser
95,2 % ANL + 4,8 % SF	hydrogarnet/monokarbonat/ettringitt
76,2 % ANL + 4,8 % SF + 19 % FA	hydrogarnet/monokarbonat/ettringitt
62,2 % ANL + 4,8 % SF + 33 % FA	hydrogarnet/monokarbonat/monosulfat
95,2 % SR + 4,8 % SF	strätlingitt/monosulfat/ettringitt
76,2 % SR + 4,8 % SF + 19 % FA	strätlingitt/monosulfat/ettringitt
62,2 % SR + 4,8 % SF + 33 % FA	strätlingitt/monosulfat/ettringitt
15,2 % STD + 61,0 % SR + 4,8 % SF + 19 % FA	monosulfat/ettringitt

#### 4.2.2 Forskjell i mikrostruktur

En spesiell type hulrom som kalles "Hadley grains" er avstengte hulrom som dannes ved rask hydratasjon av små sementkorn som går i oppløsning (Gartner 2002, Taylor 1997). De kan observeres ved bruk av SEM, men det er vanskelig å kartlegge ved hjelp av MIP eller BET.

Den største forskjellen i mikrostruktur mellom de to sementene (SR og ANL) var mengde "Hadley grains" som ble dannet. Finheten av sementen påvirker dannelsen av "Hadley grains". Grunnen til at denne type hulrom kan spille en viktig rolle når ANL og SR sement sammenlignes er at begge sementene har svært forskjellig finhet (se Tabell 1). En finere sement som SR kan danne mer "Hadley grains".

Under hydratasjonen av et fint sementkorn dannes det først en tykk ring rundt kornet og så diffunderer ionene gjennom ringen. Det fører til at ringen blir tettere. Mellom ringen og det hydratiserende sementkorn oppstår et hulrom. Den reagerende overflaten av sementkornet går innover og hullrommet mellom ringen og kornet vokser. Når sementkornet har fullstendig reagert, blir det igjen et hulrom der det opprinnelige sementkornet var. Innenfor ringen dannes det ikke hydratasjonsprodukter. For større sementkorn blir hullrommet mellom ringen og den hydratiserende overflaten fylt opp. Derfor oppnås det hydratasjonsprodukter innenfor denne ringen.

Figur 37 og Figur 39 viser mengde bundet vann av sementene. Ren SR sement binder mer vann enn ren ANL sement uavhengig av flygeaskeinnholdet. Figur 40 gir fasthetsresultatene for betong av sementene. Ren SR sement har lavere fasthet enn ren ANL sement.

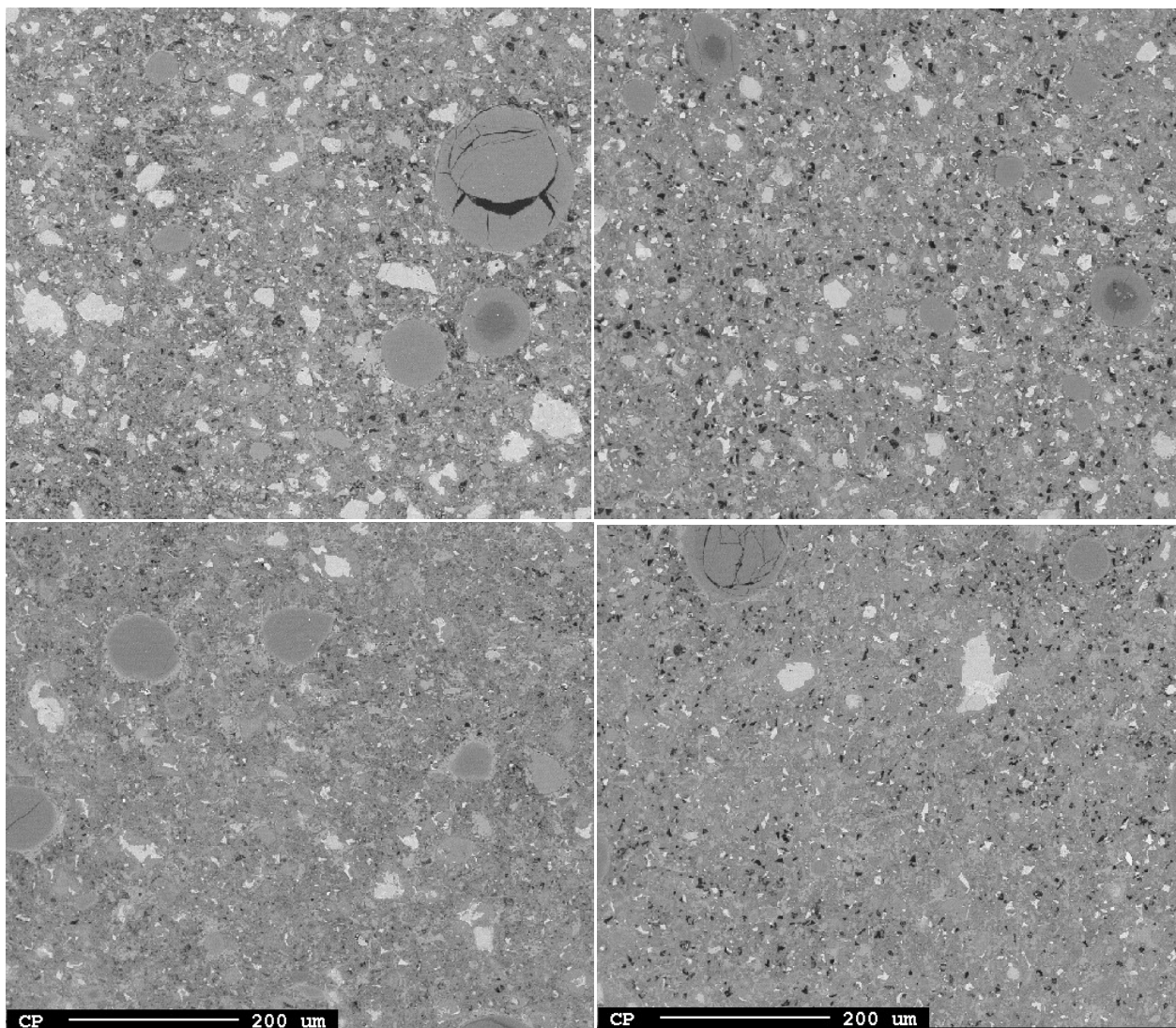
Man skulle forvente at en større mengde bundet vann førte til en høyere fasthet. Denne motsigelsen kan muligens bli forklart med forskjeller i mikrostrukturen.

Mikrostrukturen av ren ANL sement og SR sement blir sammenlignet i Figur 43. SR sementpastaen har flere hulrom enn i ANL pastaen både etter 28 døgn og 1 år herding. Økt hulrom kan føre til lavere fasthet. Lavere fasthet av SR sementen (se Figur 40) kan muligens forklares ved at bindemidlet inneholder flere "Hadley grains" på grunn av i utgangspunktet høyere innhold av fine sementkorn.

Hydrasjonsproduktene av flygeaske er kjent for å kunne fylle opp tilgjengelige hulrom etter hvert. Ved å tilsette flygeaske kan hulrom bli fylt opp og dermed føre til en tettere mikrostruktur over tid. Etter 28 døgn øker fastheten til sementene som inneholder flygeaske mer enn fastheten til de rene sementene (se Figur 40).

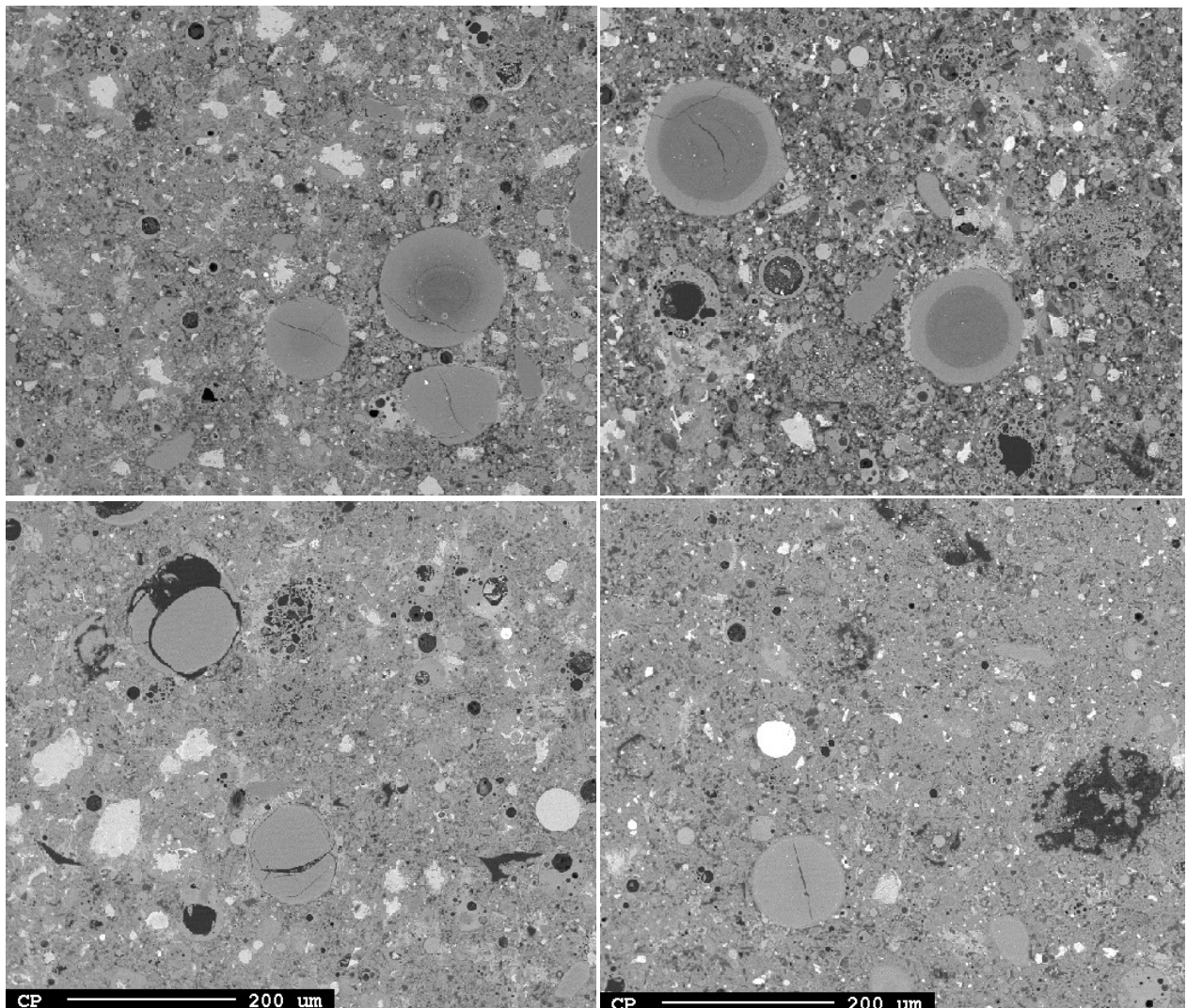
I Figur 44 blir mikrostrukturen til ANL sement med 33 % FA og SR sement med 33 % FA sammenlignet. Ut fra CH forbruket har mye mer FA reagert i SR enn i ANL.

Mengden "Hadley grains" i SR sementen med 33 % FA ser ut til å være lavere etter 1 år enn i ren SR sement. Det kan være på grunn av at porene blir fylt opp med reaksjonsproduktene av flygeaskens pozzolan-reaksjon etter hvert. Men når 33 % av SR sementen blir erstattet med FA, økes det effektive vann/klinker forholdet. Dette kan endre kinetikken til hydrasjonen. Høyere effektivt vann/klinker forhold fører til at det er mer plass for hydrasjonsproduktene til å felle ut/gro. I stedet for å danne en tett ring rundt sementkornet blir hydrasjonsproduktene mer spredd ut i matrisen, og det dannes færre avstengte hulrom i bindemidlet. Dette kan muligens forklare at SR sementen oppnår like høy fasthet som ANL sement når 19 % er erstattet med FA (se Figur 40). Når 33 % av sementen er erstattet med FA oppnår SR sementen høyere fasthet enn ANL.



**Figur 43: Venstre siden viser 100x forstørrelse av ANL sement (95,2 % ANL+4,8 % SF) etter 28 døgn (øvre) og etter 1 år (nedre) herding. Høyre siden viser det samme for SR sement (95,2 % SR+4,8 % SF).**





**Figur 44:** Venstre siden viser 100x forstørrelse av ANL sement med FA (62,2 % ANL+4,8 % SF+33 % FA) etter 28 døgn (øvre) og etter 1 år (nedre) herding. Høyre siden viser det samme for SR sement med FA (62,2 % SR+4,8 % SF+33 % FA).

## 5 Referanser

Bjøntegaard Ø. (2009) “Nye sementer med flygeaske: Erfaringer” Presentasjon Teknologidagene.

Gartner E.M. (2002) “Hydration of Portland cement”, Structure and Performance of Cements Second Edition Edited by J. Bensted and P. Barnes, Spon Press London, p.101.

Taylor H.F.W. (1997), “Cement Chemistry”, Thomas Telford London, p.196

## APPENDIX 9 Aktivitet B - Reaktivitet og mikrostruktur (artikkel)

Artikkelen som er gjengitt i det følgende omhandler resultater fra Avrop2 gitt i de to SINTEF-rapportene i APPENDIX 7 og APPENDIX 8.

### Reactivity and Microstructure of Ternary Cement Pastes

<sup>1</sup>Østnor T<sup>1\*</sup>, <sup>1</sup>De Weerd K; <sup>1</sup>Justnes H

<sup>1</sup>SINTEF Building and Infrastructure, Trondheim, Norway

<sup>4</sup>Bjøntegaard Ø,

<sup>4</sup>Norwegian Public Roads Administration, Trondheim, Norway

13th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, Madrid, 3 - 8 July 2011

#### Abstract

*The reactivity and microstructure of ternary cement pastes has been characterized by thermogravimetric analyses and scanning electron microscopy, respectively. The pastes were composed of cement, 4.8 silica fume and 0, 19 or 33% siliceous fly ash, all as replacement of cement. The cements were 2 different Portland cements, and the water/powder ratio was kept constant to 0.40. The 6 mixes were investigated after 1, 3, 7, 28 and 90 days, as well as 1 and 2 years, sealed curing with respect to reactivity, and the microstructure studied at 28 days, 1 year and 2 years sealed curing only.*

*The thermogravimetric analysis was used to determine total chemical water and calcium hydroxide content. For one of the cements with 35 % fly ash, the total pozzolanic reaction of silica fume and fly ash seemed to bind about the same amount of water as was inherent in the considerable amount of calcium hydroxide it consumed.. For the other cement more water was bound in the pozzolanic reaction products than the water inherent in the consumed calcium hydroxide, and only minor amounts of calcium hydroxide were consumed in the case of both 19 and 33% fly ash replacement. All mixes had sufficient calcium hydroxide left to protect rebars against corrosion when used in concrete.*

*The microstructure was investigated on plane polished cross-section of the pastes. One cement contained limestone, and examples of reacting limestone with rims indicating the original particle boundary could be seen. A number of calcium aluminate hydrate phases were observed in voids and hollow fly ash grains. There was a tendency of increasing abundance of calcium aluminate hydrates with increasing fly ash content as a result of its pozzolanic reaction. Furthermore, there was a tendency of decreasing Ca/Si ratio and increasing Al/Si ratio of the CSH gel with increasing amounts of fly ash.*

#### Originality

*Increased sustainability in construction is an important topic focused on in the later years. The short term answer for the concrete sector is blended cements or addition of supplementary cementing materials (SCMs) to the concrete mixer.*

*The present paper gives an important contribution to understanding the reactivity and microstructure of ternary cementitious binders based on industrial available components relevant for practical concreting in Norway.*

#### Chief contributions

*In Norway fly ash has recently been taken into use in large projects to make low-heat concretes in order to reduce thermal cracking in massive structures. The property development of such concretes is relatively slow, but experiences so far indicate that the durability properties turn out to be very good in the long run. The action between binder components is decisive for the durability of concrete. Increased understanding of the chemistry, solid phases and pore structure of such concretes is of great interest for public owners of infrastructures that often are exposed to very harsh environment.*

**Keywords:** Fly ash, Pozzolans, Silica fume, Thermal analysis, Ternary cement

---

<sup>1</sup> Corresponding author: Email: tone.ostnor@sintef.no, Tel +47 73594566

## Introduction

The cement industry world-wide is estimated to emit about 5% of the total global anthropogenic carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions (Hendricks et al. (1998). The general estimate is about 1 ton of CO<sub>2</sub> emission per ton clinker produced if fossil fuel is used and no measures to reduce it are taken. In addition to replace coal with waste having calorific value as fuel, the easiest way of further reducing CO<sub>2</sub> emissions on a short time basis is to replace part of the clinker with supplementary cementing materials (SCMs) in the mill (Justnes et al. (2009). Replacing cement with SCMs in the concrete mixer will of course be helpful in this respect.

The Norwegian cement industry is currently making cement blended with fly ash (about 20%) and research is performed to possibly increasing this amount to about 30%. At the same time, the Road Administration of Norway specifies the use of silica fume in the concrete of e.g. their bridge structures. The present paper is reporting on a study of the binder (cement paste) based on different cements with varying amount of fly ash (0, 19 and 33%) and constant silica fume dosage (i.e. 4.8%).

## Experimental

### Materials

A total of 6 cementitious binders were tested in this study. The 2 cements selected were Norcem “construction” cement (denoted ANL), a CEM I 52.5 LA according to NS-EN 197-1, and sulphate resistant cement from Norcem (denoted SR), a CEM I 42.5R SR LA NS-EN 197-1. The fly ash is imported by Norcem for their production and is of the ASTM type Class F. The silica fume was obtained from the ferrosilicon smelter Elkem Materials, Salten, Norway. The characterisations of the constituents are given in Tab. 1 as determined by EN 196-2.

**Table 1: Chemical composition and fineness of the different materials**

Component	ANL	SR	FA	SF
Loss on Ignition (%)	2.72	0.93	4.08	1.29
SiO <sub>2</sub> (%)	21.09	22.07	54.40	94.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.40	3.64	22.01	0.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.62	5.19	5.83	0.80
CaO (%)	63.95	63.82	4.80	0.28
MgO (%)	1.78	1.44	2.22	0.66
SO <sub>3</sub> (%)	3.22	2.30	0.52	0.21
Limestone (%)	4.10	-	-	-
Free lime (%)	1.57	0.97	-	-
K <sub>2</sub> O (%)	0.43	0.43	2.21	1.27
Na <sub>2</sub> O (%)	0.35	0.19	1.15	0.35
Na <sub>2</sub> Oeq (%)	0.63	0.47	-	1.21
Carbon (%)	-	-	3.64	0.94
Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	388	432	388	-
Density (kg/m <sup>3</sup> )	3,120	3,150	2,200	2,200
Particles +90µm (%)	9.60	0.20	5.40	-
Particles +64µm (%)	11.70	1.00	11.40	-
Particles -24µm (%)	60.40	82.70	66.30	-
Particles -30µm (%)	68.70	89.80	59.70	-

The 6 binders investigated consisted of the two cements denoted ANL or SR with either 0, 19 or 33% FA of cement mass. All of them contained 4.8% silica fume (SF) of cement mass. All pastes were made with a water-to-cementitious material ratio (w/cm) of 0.40 using distilled water. No plasticizer was used. A paste denoted SR-19 means then a paste based on the sulphate resistance cement with 19% FA and 4.8% SF with w/cm = 0.40.

### Sample preparation

The mixes were prepared in a MR5550CA high shear mixer of Braun. They were blended for half a minute, then the blender was opened and possible dry lumps were stirred in by hand, after that the paste was mixed once more for 1 minute. Of each mix, three batches of 300 ml were prepared. Several samples were taken of each mix and stored at 20 °C in glass vials sealed with plastic lids. Samples were taken shortly after mixing (reference) and after 1, 3, 7, 28, 90 days and, 1 and 2 year of curing. The hydration reactions were stopped by crushing them with a piston in a mortar and liquid replace free water with ethanol, followed by drying at 105 °C. It should be noted that this temperature hydration phases such as ettringite and CSH will have lost some chemically bound water (Tayler (1997)).

### Thermal analysis

The samples were analysed by thermogravimetric analysis and simultaneous differential thermal analyses (TGA/SDTA) with a Mettler Toledo TGA/SDTA 851. About 150 mg of the sample was weighed into alumina crucibles. The sample was heated from 30°C to 1100°C with a heating rate of 10°C/min. The purge gas was nitrogen (N<sub>2</sub>) with a flow of 50 ml/min.

The mass loss from 105-550°C was taken as chemical bound water, while the mass loss from 450-550°C was considered to be due to the thermal decomposition of calcium hydroxide (CH). The sample preparation gave rise a similar degree of carbonation for all the samples. The amount of carbonates (700 – 900 °C) were however not taken into account in the calculations as it is not clear which phases had carbonated.

### Scanning Electron Microscope (SEM)

The larger fragments of paste cured for 28 days, 1 year and 2 years were investigated by a JEOL JXA-8500F Electron Probe Micro Analyzer (EPMA), in order to characterize the microstructure. Interesting phases were analysed by an energy dispersive X-ray spectrometer (EDS).

### Results and discussion

The mass losses from 450 to 550°C for the pastes based on “ANL” and “SR” as a function of curing time are plotted in Fig. 1, while the corresponding mass losses between 105 and 550°C are plotted in Fig. 2.

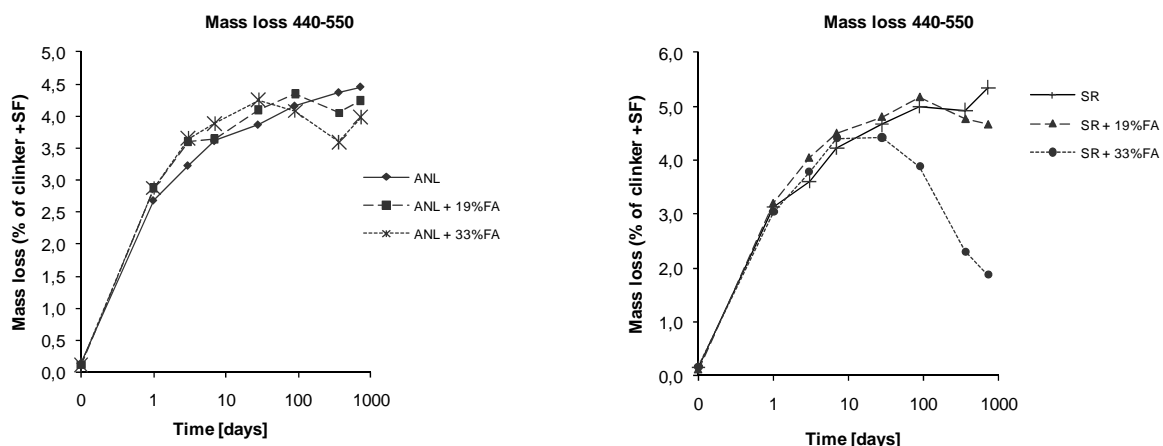


Figure 1: Mass loss of CH decomposition relative to cement+SF for ANL (left) and SR (right) cement over time.

The mass losses calculated by horizontal integration in Fig.1 represent the decomposition of calcium hydroxide (CH) and have to be multiplied with 74/18 to yield the amount of CH per cement+SF. For the ANL cement, the amount of CH is nearly independent of the amount of fly ash added (only

marginally reduced with increasing FA) after 90 days curing. The same is the case for SR cement for 19% FA replacement, while 33% FA drastically reduces the amount of CH after 28 days curing. The dip in CH at 1 year for ANL with FA compared to the 2 year results might be due to initial formation of calcium hemi-carboaluminate hydrate consuming CH, which is then again released when calcium hemi-carboaluminate hydrate is converted to mono-carboaluminate hydrate upon further reaction with calcium carbonate.

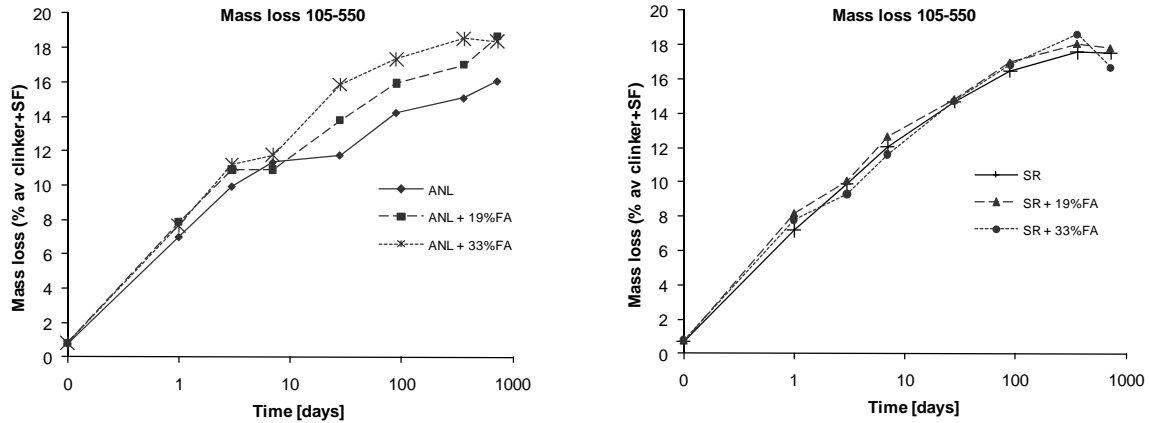


Figure 2: Chemical bound water relative to cement+SF for ANL (left) and SR (right) cement over time.

As seen from Fig. 2, after 7 days curing the paste based on ANL cement has an increased amount of chemical bound water with increasing FA content, while the chemical bound water for the paste based on SR cement is rather independent of the FA content. The latter means that for the SR cement, the hydration products from the pozzolanic reaction of FA does not bind more water than what is inherent in CH, in particular considering the high amount of CH consumed by 33% FA depicted in Fig. 1. The reason for the increased water with increased FA content for the ANL cement is probably its content of limestone filler leading to synergic reactions giving increased amounts of ettringite and calcium carboaluminate hydrates on the expense of monosulphate as pointed out by De Weerd et al. (2009, 2011) with increased amount of chemical bound water and higher compressive strength as an overall result. An evidence of a reacted limestone particle in the ANL-33 mix is shown in the backscattered electron image in Fig. 3 where the border of the original particle can be seen with a partly dissolved particle within. The energy dispersive spectrum (EDS) of this particle showed only Ca as expected for a limestone particle since C and O are too light to give meaningful analysis and their signal will appear anyway in this carbon sputtered (to make it conductive), oxide rich sample.

Another general feature of all the pastes was that the silica fume was not properly dispersed in spite of the use of a high shear mixer. Circular objects with reaction zones where calcium hydroxide have reacted by diffusion inwards could often be seen (example depicted in Figs. 4 and 5), and the water rich gel of the partly reacted lumps often formed typical drying shrinkage cracks under the vacuum of the SEM. In practical concrete the grinding action of aggregate together with plasticizing agents may help breaking down and dispersing these typical 100-200  $\mu\text{m}$  silica fume lumps.

It is important to notice that all the binders investigated had sufficient CH content to protect reinforcement steel in practice even though the reserve may be reduced (in particular for SR-33). The binders also appeared dense without microcracks, but the SR blends contained much more "Hadley grains" (e.g. Gartner, 2002), i.e. empty space after dissolved cement grains, than the ANL blends as visualized in Fig. 4. It can also be seen that the degree of hydration is higher (i.e. less light grey unreacted cement grains) and that the pastes appear denser at 1 year relative to 28 days as expected.

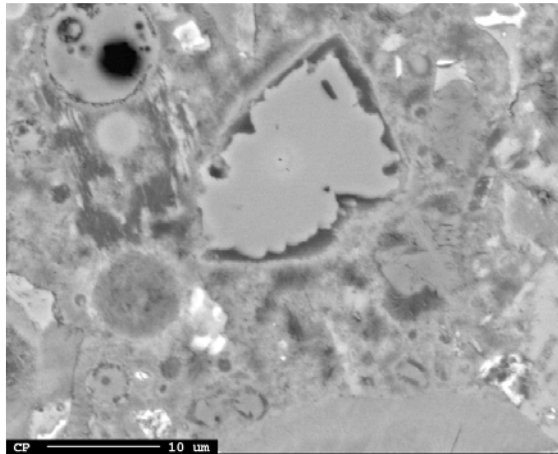


Figure 3: 2000x BSE of ANL-33 paste sealed cured for 2 years showing a partly reacted limestone particle (confirmed by EDS) in the middle. The original borders around the particle can be seen. The circular object in the upper left corner is a fly ash grain.

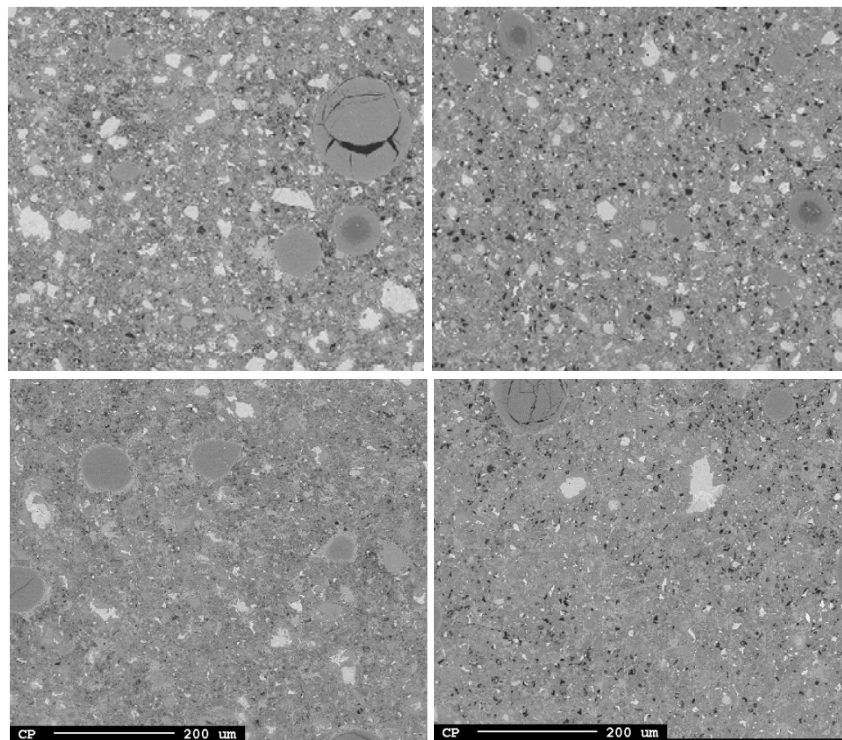


Figure 4: 100x BSE of ANL-0 (cement without FA, but with 4.8% SF) after 28 days (upper left) and 1 year (lower left) sealed curing, as well as of SR-0 after 28 days (upper right) and 1 year (lower right) sealed curing. Light grey particles are unreacted cement grains, while larger grey, circular features with brighter reaction rims are undispersed silica fume. "Hadley grains" appear as black spots.

In order to investigate the influence of FA on the composition of the CSH gel, all pastes cured for 2 years were investigated by EDS with slightly defocused beam on areas free of other phases. The observed trends were decreasing Ca/Si (see Fig. 5) and increasing Al/Si (see Fig. 6) with increasing FA replacing cement, as expected from alumina containing pozzolana low in calcium.

The alumina rich phases were also tried identified by EDS and is largely done by their Ca/Al atomic ratio and whether or not they contain sulphur or silicon. For instance ettringite would be identified by Ca/Al = 1.5 and S/Al = 3, and Strätlingite by Ca/Si = 2 and Ca/Al = 1. The difference between hydrogarnet and calcium monocarboaluminate hydrate, Ca/Al = 1.5 vs. 2.0, might be hard to tell with a semi-quantitative method like EDS and the more accurate WDS (wavelength dispersive spectrum) may be required.

The general trend was that the ANL pastes contained hydrogarnet, calcium monocarbonate hydrate and ettringite due to its content of limestone filler, while the alumina containing phases of the SR pastes without limestone consisted of Strätlingite, monosulphate and ettringite.

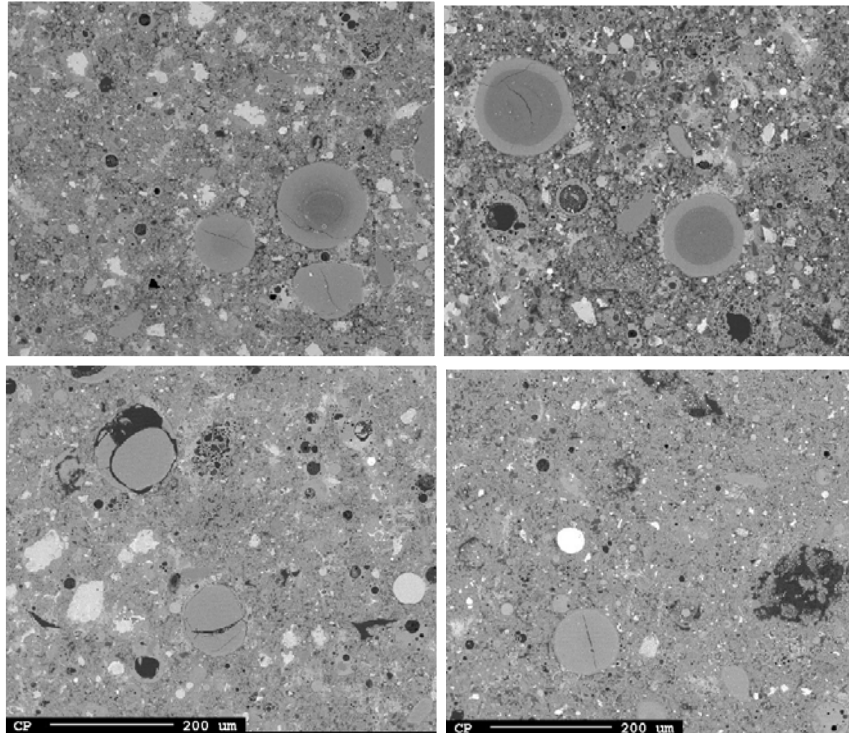


Figure 5: 100x BSE of ANL-33 (cement 33% FA and 4.8% SF) after 28 days (upper left) and 1 year (lower left) sealed curing, as well as of SR-33 after 28 days (upper right) and 1 year (lower right) sealed curing. Light grey particles are unreacted cement grains, while larger grey, circular features with brighter reaction rims are undispersed silica fume. Circular “shells” with black spots (i.e. pores) are FA particles.

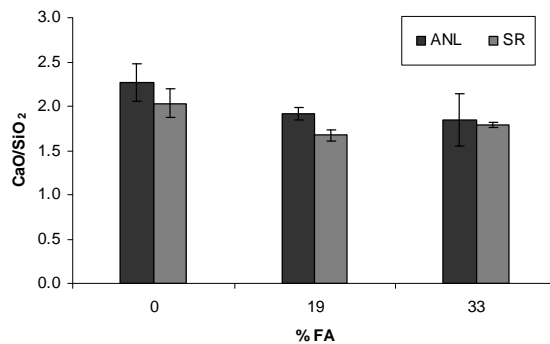


Figure 5: Ca/Si in CSH of different pastes as function of FA content as analysed by EDS.

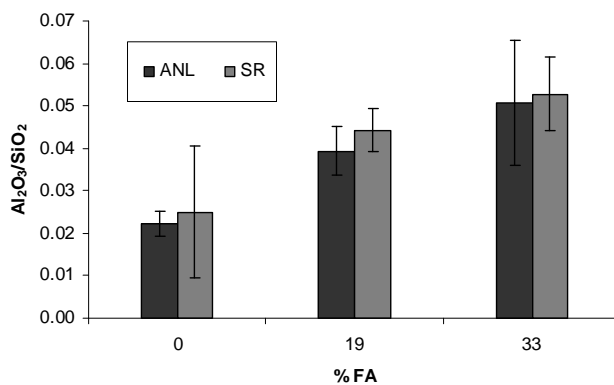


Figure 6: Al/Si in CSH of different pastes as function of FA content as analysed by EDS.

## Conclusions

Six cement pastes ( $w/cm = 0.40$ ) based on 2 cement types and 3 fly ash (FA) replacements (0, 19 and 33%) with a constant silica fume (SF) replacement of 4.8% have been investigated by thermogravimetry and SEM/EDS. One of the cements contained limestone filler.

For the cement without limestone filler, the chemical bound water versus time was independent of the FA content, while the chemical bound water increased with increasing FA for the cement with limestone filler. The reason for the latter is probably that the limestone filler leads to synergic reactions giving increased amounts of ettringite and calcium carboaluminate hydrates on the expense of monosulphate. The dissolution of limestone filler was documented by SEM.

One of the cements with 33% FA consumed considerable amounts of calcium hydroxide (CH) after 28 days sealed curing compared to the other with no apparent reason. However, all the 6 binders investigated contained sufficient CH to secure protection of rebars in any concrete made thereof, and the pastes appeared dense without microcracks.

The observed trends of the CSH of the binders were decreasing Ca/Si and increasing Al/Si with increasing FA replacing cement, as expected from alumina containing pozzolana low in calcium.

Another general trend was that the ANL pastes contained hydrogarnet, calcium monocarbonate hydrate and ettringite as alumina containing phases due to its content of limestone filler, while the alumina containing phases of the SR pastes without limestone consisted of strätlingite, monosulphate and ettringite.

## References

- De Weerd, K. and Justnes, H.;2009. Synergic Reactions in Triple Blended Cements, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> NCB International Seminar on Cement and Building Materials*, 17-20 November 2009, New Delhi, India, pp. 257-261.
- De Weerd K., Kjellsen K.O., Sellevold E. & Justnes H.;2011. Synergistic effect between fly ash and limestone powder in ternary cements, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, pp. 30-38.
- Gartner E.M.;2002. Hydration of Portland cement, *Structure and Performance of Cements*, 2<sup>nd</sup> ed. Edited by J. Bensted and P. Barnes, Spon Press London, p.101.
- Hendriks, C.A., Worrell, E., Price, L., Martin, N., Ozawa Meida, L., de Jager, D. and Riemer, P.;1998. Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Interlaken, Austria, August 30th - September 2nd,, IEA GHG R&D Programme, UK.
- Justnes, H., Engelsen, C.J. and Karstensen, K.H.;2009. Reducing CO<sub>2</sub> Emissions from Cement Making, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> NCB International Seminar on Cement and Building Materials*, 17-20 November 2009, New Delhi, India, pp. 401-405.
- Taylor, H.F.W.; 1997. *Cement Chemistry*. 2<sup>nd</sup> ed. London: Thomas Telford.



## APPENDIX 10 Aktivitet D – Betongresepter og fersk betong (studentoppgaven)

	<u>A - 0 %</u>		<u>B - 19 %</u>		<u>C - 33 %</u>	
Dato	12.02.2008		19.02.2008		26.02.2008	
Blandevolum	55 liter		55 liter		55 liter	
Tidspunkt for vanntilsetning	08.56		09.10		09.12	
Synkmål, mm	170		180		170	
Luft, %	3,6		2,6		2,3	
Densitet, kg/m <sup>3</sup>	2,37		2,39		2,37	
Prøvestykker	63		63		63	
Tidspunkt for utstøping	09.15		09.25		09.22	
	<b><u>Resept,</u></b> <b><u>kg/m<sup>3</sup></u></b>	<b><u>Oppveid</u></b> <b><u>mengde, kg</u></b>	<b><u>Resept,</u></b> <b><u>kg/m<sup>3</sup></u></b>	<b><u>Oppveid</u></b> <b><u>mengde, kg</u></b>	<b><u>Resept,</u></b> <b><u>kg/m<sup>3</sup></u></b>	<b><u>Oppveid</u></b> <b><u>mengde, kg</u></b>
Norcem Anlegg	360,2	19,811	282,4	15,53	228,7	12,581
Silikastøv	18	0,991	17,5	0,963	17,2	0,944
Flygeaske	0	0	66,4	3,65	112,1	6,165
Fritt vann	158,5	6,051	153,5	5,606	150,1	
Absorbent vann	12,1	0,668	12,1	0,668	12,1	6,039
Årdal vasket natursand 0- 8mm	751,4	42,698	751,4	42,913	751,4	42,938
Årdal vasket fillersand 0- 2mm	204,2	12,415	204,2	12,382	204,2	12,398
Årdal vasket 8- 11mm	585,1	32,182	585,1	32,182	585,1	32,182
Årdal vasket 11- 16mm	315,6	17,356	315,6	17,356	315,6	17,356
Sikament FB2	2,1	0,133	2,2	0,159	2,3	0,154

## APPENDIX 11 Aktivitet E (Avrop 4): SEM (fra studentoppgaven)

## VEDLEGG 11 Avrop 4

 <p><b>SINTEF</b></p> <p>SINTEF Byggforsk Betong- og natursteinlaboratoriene</p> <p>Postadresse: 7465 Trondheim Besøksadresse: Richard Birkelands vei 3 Telefon: 73 59 52 24 Telefaks: 73 59 71 38</p> <p>Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA</p> <p>Sertifisert prøvingslaboratorium U18</p> 		<b>PRØVINGSRAPPORT</b>	
		OFFDRAGSGIVER	
		Statens vegvesen Vegdirektoratet Abels gt. 5 7030 TRONDHEIM	
		BESTILLING / OFFDRAGSGIVERS REF Kontraksnummer 2010174185 / Eva Rodum	
ARKIVKODE		GRADERING	
		Fortrolig	
ELEKTRONISK ARKIVKODE I:\pro\3D0598\80145\80145 Rapport.doc		FAGLIG ANSVARLIG Harald Justnes	RAPPORTNUMMER 80145
PROSJEKTNR 3D0598.12	DATO 2011-11-12	SAKSBEARBEIDER Marit Haugen, Klaartje de Weerd og Tone Østnor	ANT SIDER/VEDLEGG 14

## 1 BAKGRUNN

Oppdragsgiver ønsker å få undersøkt effekten av hydrofobierende impregnering på betong, både ved å måle hvor dypt impregneringen har trengt inn i betongen og ved hjelp av mikroskopiteknikker. Det er av spesiell interesse å se om den tidlig påførte hydrofobierende impregneringen har påvirket hydrasjonsprosessen i betongen, og om dette har medført endringer i betongens struktur og redusert kvaliteten på betongens yttersjikt. Det søkes også svar på om det er mulig å detektere inntrengningsdybden av impregneringen ved hjelp av mikroskopanalyser.

## 2 PROVEMATERIALET

SINTEF Byggforsk mottok 2011-09-12 1 stk halvterning av betong fra oppdragsgiver. Halvterningen var delt i to deler, og total prøvedimensjon var 100 x 100 x 50 mm<sup>3</sup>. Prøven var merket "Eva Rodum, C-33 %, S1-2b". De to delene av halvterningen hadde én impregnert flate, mens de øvrige flatene var belagt med epoksy.

I følge oppdragsgiver ble halvterningens bunnflate (med støpehud) i 2008 påført hydrofobierende impregnering (StoCryl HG 200, silanbasert gel) ved 1 døgns alder. De andre flatene var forseglet med epoksy under påføringen. Betongen inneholder videre flygeaske (33 % av sement-famengden). Betongen inneholder 5 % silikastøv og masseforholdet er 0,43.

Prøvningsresultatene refererer seg kun til de innsendte prøver.  
Utdragsvis eller forkortet gjengivelse samt eventuell oversettelse av rapporten skal godkjennes av SINTEF.  
Prøvematerialet kan kastes 1 måned etter rapportdato dersom ikke annet er avtalt skriftlig.

### 3 UTFØRTE UNDERSØKELSER

Det er utført følgende analyser av den innsendte halvterningen av betong:

- \* Måling av inntrengningsdybde for hydrofoberende impregnering (SINTEF metodebeskrivelse MB 71 127)
- \* Mikroanalyse av tynnslip undersøkt i polarisasjonsmikroskop påmontert UV-filtre
- \* Sveipeelektronmikroskopi (SEM-analyse) koblet med en elementanalysator. SEM-analysen er utført på de samme tynnslipene som ble benyttet til tynnslipanalysen

### 4 RESULTATER

#### 4.1 Måling av inntrengningsdybde

Tabell 1 viser resultatet av målingen av impregneringens inntrengningsdybde.

**Tabell1. Måling av impregneringens inntrengningsdybde**

Prøvestykke	Splittet halvterning
Minimum vanninntrengning, mm	10
Maksimum vanninntrengning, mm	11
Midlere vanninntrengning, mm	10,5



Foto nr 1. Foto av impregnert betong. Den impregnerte sonen er lysegrå, mens den ikke-impregnerte betongen er mørkere.

#### 4.2 Tynnslipanalyse

En bruddflate av den impregnerte betongen ble påført fenolftalein for måling av en eventuell karboniseringsdybde. Fenolftalein får et fargeomslag ved pH 9,5, og undersøkelsen viser at nøytraliseringsdybden langs den impregnerte flaten er 0.



Foto nr 2. Den impregnerte flaten er øverst på bildet. Karbonatiseringsdybden er lik 0.

4 stk fluorescensimpregnerte, polerte tynnslip ble tildannet i halvterningbitene. Tynnslipenes størrelse er 48 mm x 24 mm, og foto nr 3 viser deres plassering i betongen. Resultatene fra tynnslipobservasjonene er presentert i Tabell 2 og 3, samt i foto nr 4-11.

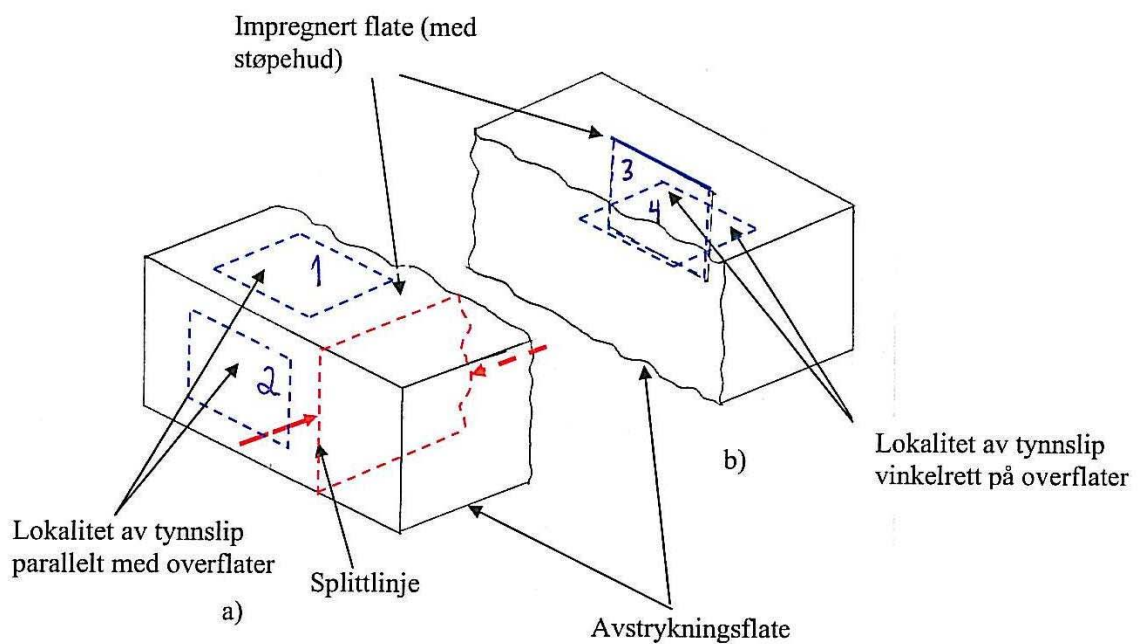


Foto nr 3. Plassering av tynnslip.

**Tabell 2 Observasjoner i tynnslip**

Tynnslip	1 (foto nr 1)	2 (foto nr 2)
Generelt	Tynnslipet ligger i sin helhet i impregnert sone, i et plan 2 mm under impregnert flate og sentrisk plassert i flaten. Betongen er påvirket av impregneringen	Tynnslipet ligger i sin helhet under epoksybelagt forskalingsflate, sentrisk plassert i flaten, 2 mm under overflaten. Betongen er upåvirket av impregneringen
Observasjoner	Undersøkelse i fluorescerende lys viser at kapillærporøsiteten i betongen i det impregnerte området er lavere enn kapillærporøsiteten hos betongen i tynnslip 2 som ikke er impregnert. Betongen synes med andre ord å være tettere i impregnert sone  Homogen porøsitet	Undersøkelse i fluorescerende lys viser at kapillærporøsiteten i betongen i det ikke-impregnerte området er høyere enn kapillærporøsiteten hos betongen i tynnslip 1 som er impregnert. Betongen synes med andre ord å være mer åpen i ikke-impregnert sone  Homogen porøsitet

**Tabell 3 Observasjoner i tynnslip**

Tynnslip	3 (foto nr 6-8)	4 (foto nr 9-11)
Generelt	Tynnslipet ligger vinkelrett på impregnert flate, med toppen i impregneringsflaten og sentrisk plassert i flaten. Tynnslipet vil derfor danne et profil fra impregneringsflaten og ned i ikke-impregnert betong	Tynnslipet ligger i ikke-impregnert betong, med den ene sidekanten (lengdeaksen) plassert i epoksyflaten. Betongen er upåvirket av impregneringen
Observasjoner	Undersøkelse i fluorescerende lys viser at betongen har et uregelmessig tynt sjikt i overflaten med lavere kapillærporøsitet enn den øvrige betongen i tynnslipet. Sjiktets dybde varierer, men maksimal dybde er ca 0,4 mm. I tillegg kan det anes at kapillærporøsiteten i betongen i de øverste ca 5 mm mot impregneringsflaten er en nyanse lavere enn kapillærporøsiteten hos betongen videre nedover i profilet	Undersøkelse i fluorescerende lys viser at kapillærporøsiteten i betongen i det ikke-impregnerte området er høyere enn kapillærporøsiteten hos betongen i de ytterste ca 5 mm i tynnslip 3. Kapillærporøsiteten i betongen i tynnslip 4 synes å være litt høyere enn kapillærporøsiteten i nedre del av tynnslip 3 (i dybde fra ca 5 mm og nedover) og i tynnslip 2  Betongen har overflateparallell opprissing i de ytterste ca 3 mm  Homogen porøsitet

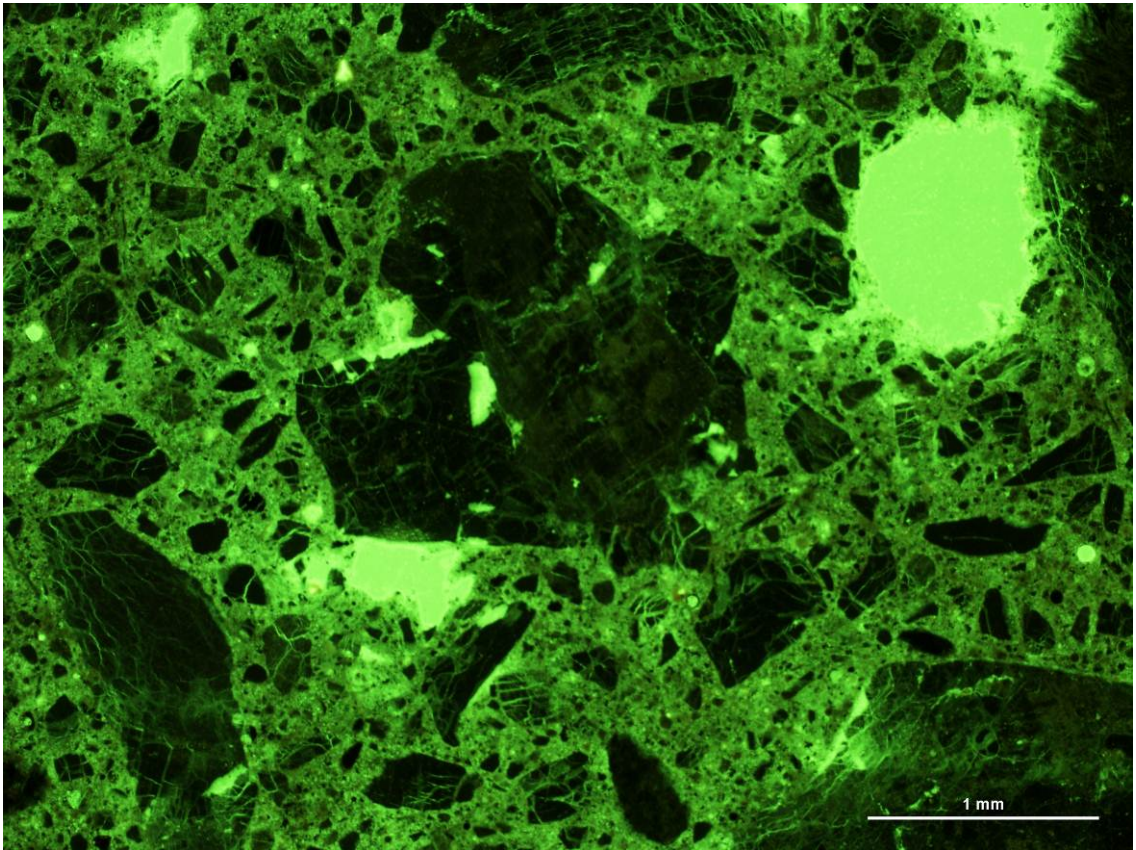


Foto nr 4. Tynnslip 1 (i impregnert sone) fotografert i fluorescerende lys. Bildet viser at betongen i dette området er tettere (mørkere) enn betongen i tynnslip 2 (ikke-impregnert betong, foto nr 5).

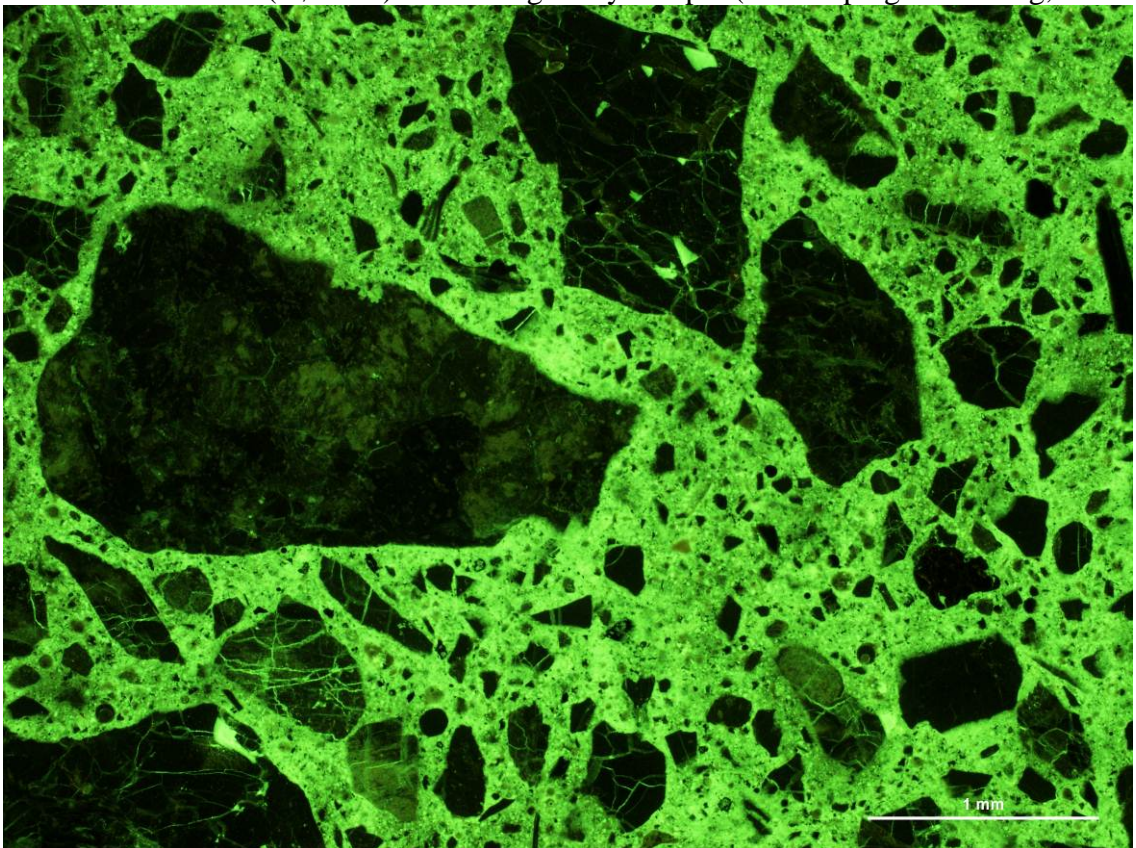


Foto nr 5. Tynnslip 2 (i ikke-impregnert sone) fotografert i fluorescerende lys. Bildet viser at betongen i dette området er åpnere (lysere) enn betongen i tynnslip 1.

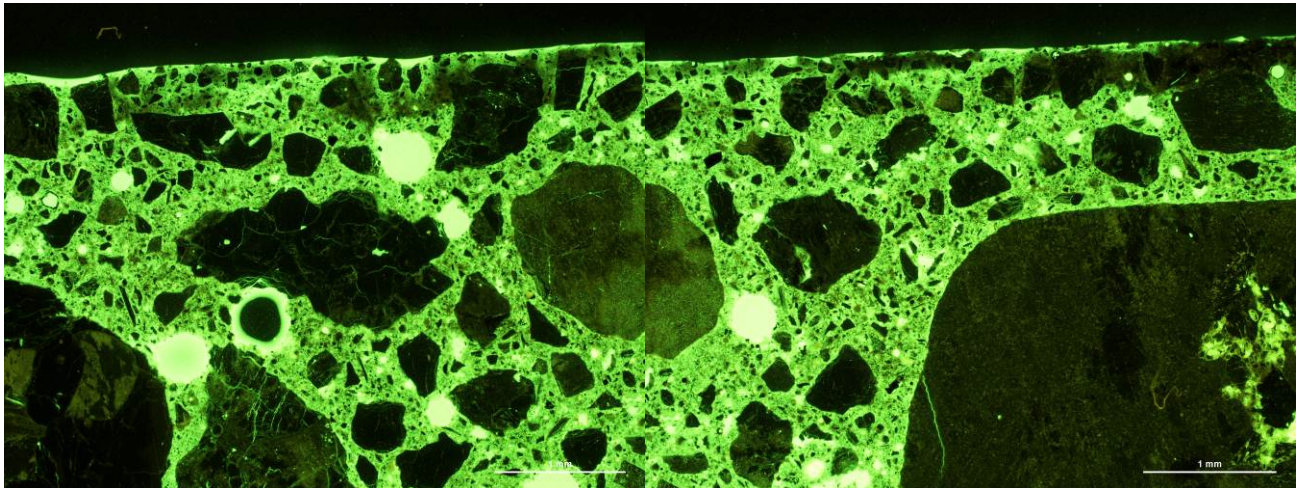


Foto nr 6 og 7. Tynnslip 3 fotografert i fluorescerende lys (overflaten øverst på bildet). Bildet viser at betongen nær overflaten har et tynt sjikt (mørk grønt) med lavere kapillærporøsitet enn betongen forøvrig.

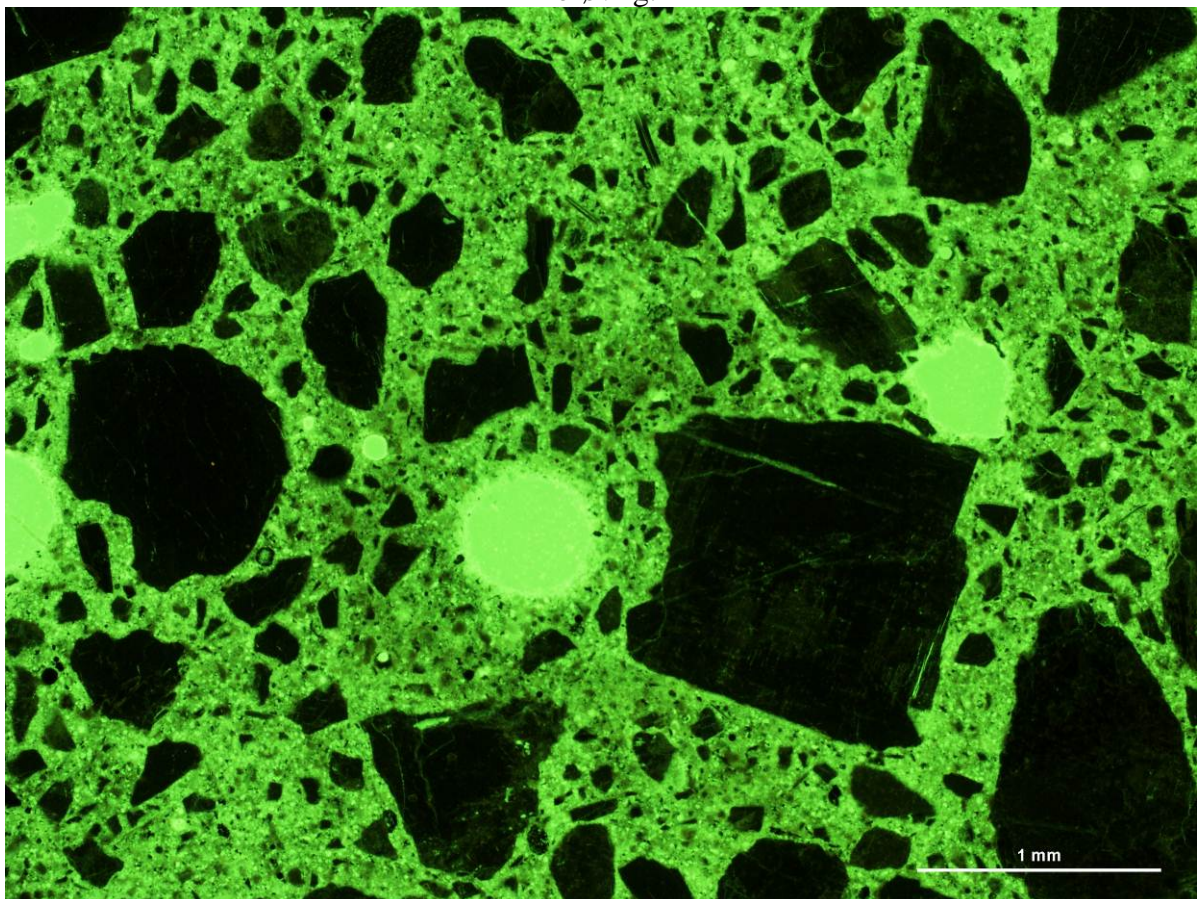


Foto nr 8. Tynnslip 3 fotografert i fluorescerende lys ca 20 mm inn fra impregnert flate. Betongen her er i realiteten en anelse mer porøs enn betongen i foto nr 6 og 7, men nyansene er så små at dette ikke går fram av bildene.

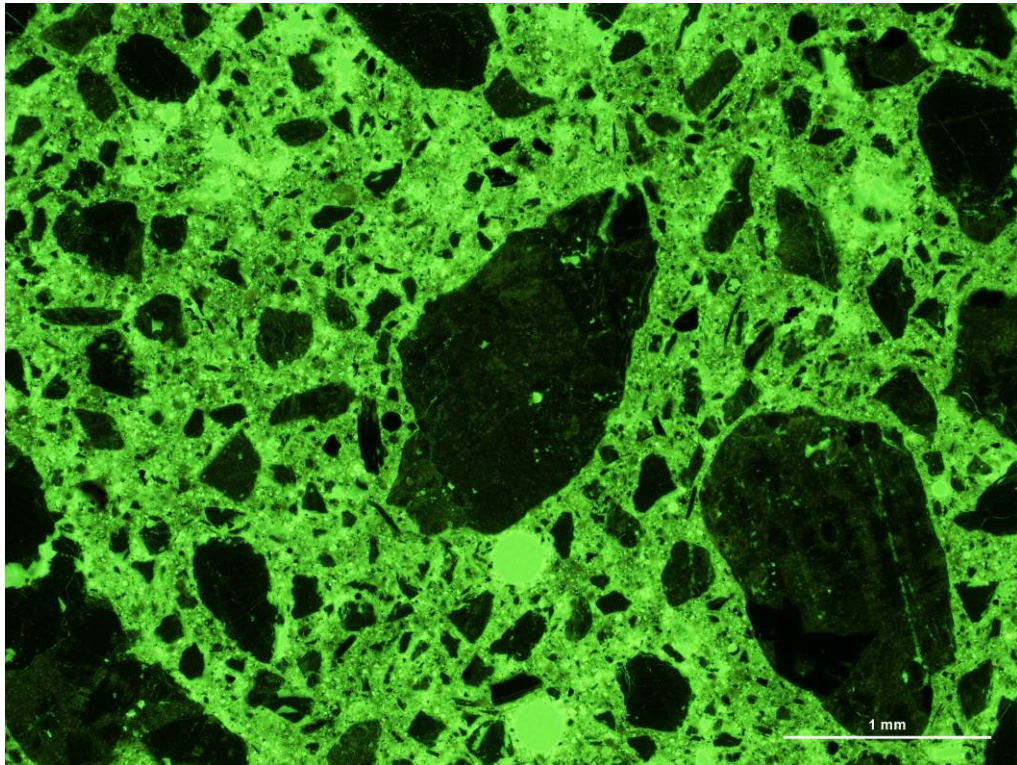


Foto nr 9. Tynnslip 4 fotografert i fluorescerende lys. Kapillærporøsiteten her er en anelse høyere enn kapillærporøsiteten til betongen i tynnslip 3 (under de øvre ca 5 mm) og i tynnslip 2.

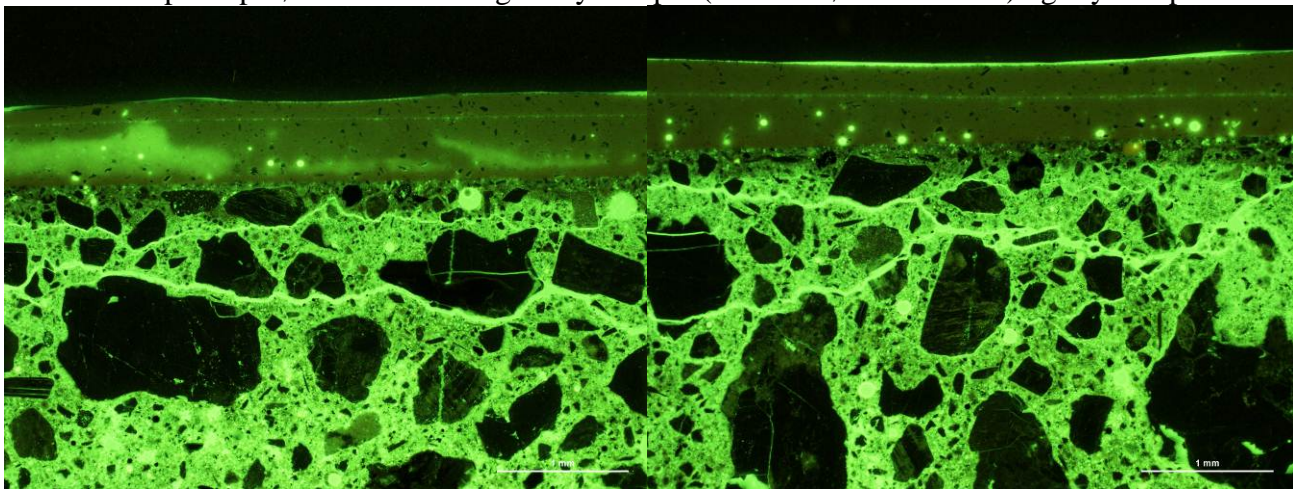


Foto nr 10 og 11. Delen av tynnslip 4 mot epoksyflaten fotografert i fluorescerende lys. Merk overflateparallell opprissing mot epoksyflaten.



### 4.3 Sveipeelektronmikroskopi (SEM-analyse)

Før SEM-analysene ble tynnslipene pådampet et lag karbon for å gjøre dem elektrisk ledende. Deretter ble de plassert i sveipeelektronmikroskopet og undersøkt i en modus kalt tilbakespredte elektroner (BSE). Dette er en modus der detektoren fanger opp hvor mange elektroner som spretter tilbake fra den innkommende elektronstrålen. Hvis en strukturell detalj har høy tetthet eller består av atomer med høyt atomnummer, vil mange elektroner sprette tilbake og detaljen oppfattes som lys. Motsatt, hvis en strukturell detalj har lav tetthet eller består av atomer med lavt atomnummer, vil få elektroner sprette tilbake og detaljen oppfattes som mørk. På denne måten vil et BSE-bilde bestå av detaljer med ulike gråverdier. For eksempel vil en pore som er fylt med epoksy fremstå som svart. Sementmineralet  $C_4AF$ , som inneholder jern (høyt atomnummer), vil fremstå som hvitt når det er ureagert. De øvrige fasene vil ha gråtoneverdier et sted imellom, og kan identifiseres basert på erfaring og i tvilstilfeller verifiseres ved hjelp av energidisperse spektra (EDS), noe som gir en semi-kvantitativ kjemisk analyse.

Energidisperse spektra (EDS) er basert på at den innkommende elektronstrålen "sparker" noen av elektronene i de enkelte atomer opp i en høyere energibane rundt kjernen. Når disse elektronene faller tilbake til sin opprinnelige bane sender de ut en røntgenstråle med bølgelengde og energi som er karakteristisk for hvert atom. Detektoren klarer å skille ut hver stråle med ulik energi og deres intensitet, noe som er proporsjonalt med mengden av hver type atom. På denne måten kan man generere et spektrum hvor hvert atom er representert med ulike topper ved ulike energier av ulik intensitet. Dette kan også omregnes til en tabulert semi-kvantitativ sammensetning.

Tynnslip 1 er plassert 2 mm fra den impregnerte overflaten, parallelt med overflaten. SEM-bildene (Foto nr 12-14) tatt fra dette tynnslipet gjenspeiler mikrostrukturen til den impregnerte betongen. Bildene viser at det fortsatt er mye uhydratisert sement igjen. Mange av sementkornene har reagert litt, og det har derfor blitt dannet en porøs (mørk) kant rundt dem. Dette er spesielt tydelig på Foto nr 14. Det at sementkornene ikke klarer å reagere fullt ut kan skyldes impregneringen, da impregneringen kan hindre vann i å komme fram til sementkornene. En lavere hydratasjonsgrad ved overflaten kan også delvis skyldes uttørking av overflaten, noe som kan begrense den nødvendige vanntilgangen for hydratasjon av sementen.

Tynnslip 2 og tynnslip 4 er begge plassert i ikke-impregnert sone i betongen. Bildene fra disse tynnslipene (Foto nr 15-17 og Foto nr 20-22) viser færre uhydratiserte sementkorn enn i bildene fra tynnslip 1 fra den impregnerte sonen (Foto nr 12-14). Likevel kunne det også i disse tynnslipene observeres noen uhydratiserte sementkorn, eksempelvis demonstrert i Foto nr 15. Dette bildet viser et seint reagerende belitt-reir (kuleformede belitt-korn) som holdes sammen av den lysere smeltefasen ( $C_4AF$ ). Et spesielt fenomen som er tydelig i SEM-BSE-bildene fra tynnslipene 2 og 4 er forekomsten av mørke, kantete hulrom som omslutes av tette reaksjonsprodukter. Disse hulrommene kalles "Hadley grains" og de dannes når små sementkorn løses opp og det dannes hydratasjonsprodukter utenfor de opprinnelige grensene til sementkornet. Følgen av dette er at det etterlates et hulrom som har samme form som det opprinnelige sementkornet. Disse "hullene" har sannsynligvis ikke særlig negativ innflytelse på permeabiliteten, da de ligger innkapslet i et tett bindemiddel.

Tynnslip 3 er lagt vinkelrett på den behandlede overflaten, slik at tynnslipet inkluderer både impregnert og ikke-impregnert betong. I dette tynnslipet kan endringene i betongens mikrostruktur fra den impregnerte overflaten ned i ikke-impregnert betong undersøkes. Legg merke til at forstørrelsen til SEM-BSE-bildene av tynnslip 3 er mindre enn forstørrelsen til bildene fra de øvrige tynnslipene. Foto nr 18 er tatt 0,8 mm fra den impregnerte overflaten, mens Foto nr 19 er tatt 5,5 mm fra impregneringsflaten. Foto nr 18 viser flere uhydratiserte sementkorn

og færre "Hadley grains" enn i Foto nr 19, noe som samsvarer med observasjonene i tynnslip 1, 2 og 4. Samtidig kan det observeres at bindemidlet i Foto nr 18 generelt er mørkere (mer porøst) enn bindemidlet i Foto nr 19. Det mer porøse inntrykket av Foto nr 18 kan skyldes lavere hydratasjonsgrad og mer jevnt fordelte hydratasjonsprodukter, sammenlignet med mer konsentrert porøsitet (Hadley grains) innkapslet i tette hydratasjonsprodukter i Foto nr 19. Det viste seg imidlertid at det ikke var mulig å identifisere en tydelig grense for hvor dypt impregneringsmidlet hadde trengt inn i terningen ved hjelp av SEM-BSE.

**Tabell 4 EDS-resultater for tynnslip 1, 2 og 4: Normalisert molar% for elementene i bindemidlet**

Tynnslip		Al	Na	Cl	Fe	Si	Mg	S	K	Ca
1	gjennomsnitt	3.5	0.6	0.5	1.8	40.2	1.7	2.4	0.6	48.8
	standardavvik	1.0	0.1	0.4	0.4	4.5	0.6	0.9	0.2	3.8
2	gjennomsnitt	4.5	0.3	0.4	2.4	39.4	2.2	1.7	0.4	48.8
	standardavvik	1.4	0.1	0.2	1.1	6.5	2.2	0.6	0.4	6.8
4	gjennomsnitt	3.7	0.3	0.3	1.8	41.3	1.7	1.6	0.4	49.1
	standardavvik	1.1	0.2	0.1	0.4	3.7	1.0	0.7	0.3	3.8

For å evaluere om kartlegging av elementer kunne gi informasjon om inntrengingsdybden til impregneringsmidlet ble det utført EDS-analyser i 10 punkter i hvert tynnslip, unntatt i tynnslip 3. Punktene ble valgt i bindemidlet, og målet var å analysere sammensetningen til C-S-H-gelen som utgjør mesteparten (60-70%) av hydratasjonsproduktene. Aluminatrike faser som ettringitt og monosulfat ble unngått. Motivasjonen for å analysere C-S-H-gelen var for å se om impregneringen hadde påvirket gelens kjemiske sammensetning. Tabell 4 viser EDS-resultatene for tynnslip 1 (plassert i den impregnerte sonen) og for tynnslip 2 og 4 (plassert i ikke-impregnert betong). Resultatene tyder ikke på at det er noen tydelig forskjell i sammensetning av C-S-H-gelen i impregnert og ikke-impregnert sone. Dette tyder på at kartlegging av elementer ikke er en velegnet teknikk for å bestemme inntrengingsdybden for dette impregneringsmidlet.

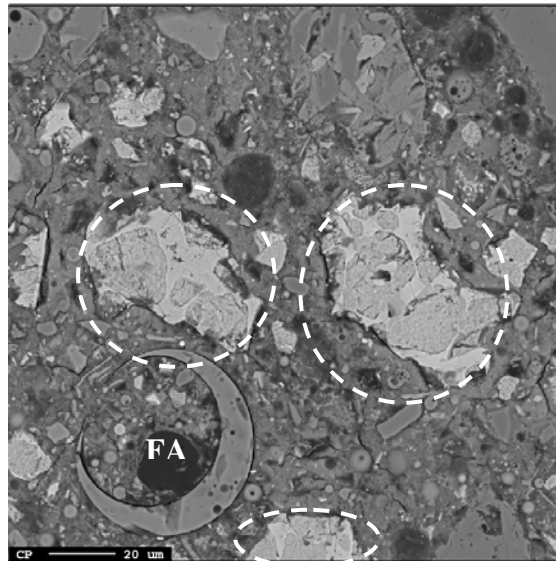


Foto nr 12. Tynnslip 1. SEM-BSE-bildet viser delvis reagerte sementkorn (angitt med sirkler) og flygeaskepartikler (FA) i impregnert sone.

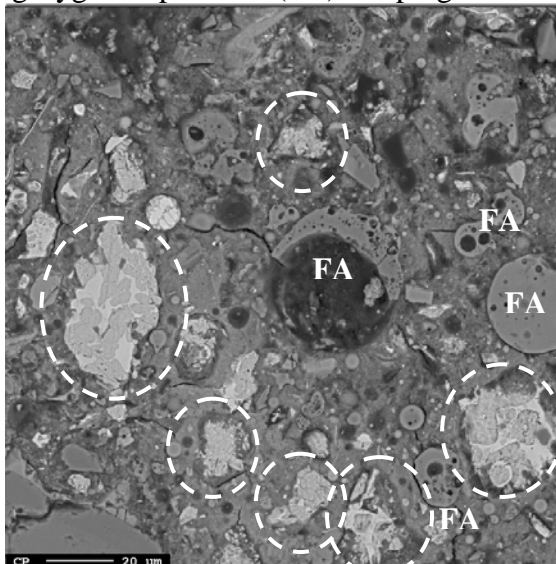


Foto nr 13. Tynnslip 1. SEM-BSE-bildet viser delvis reagerte sementkorn (angitt med sirkler) og flygeaskepartikler (FA) i impregnert sone.

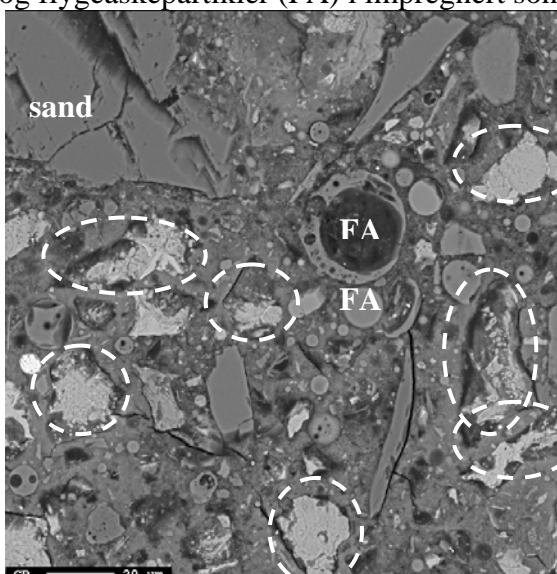


Foto nr 14. Tynnslip 1. SEM-BSE-bildet viser delvis reagerte sementkorn (angitt med sirkler) og flygeaskepartikler (FA) i impregnert sone.

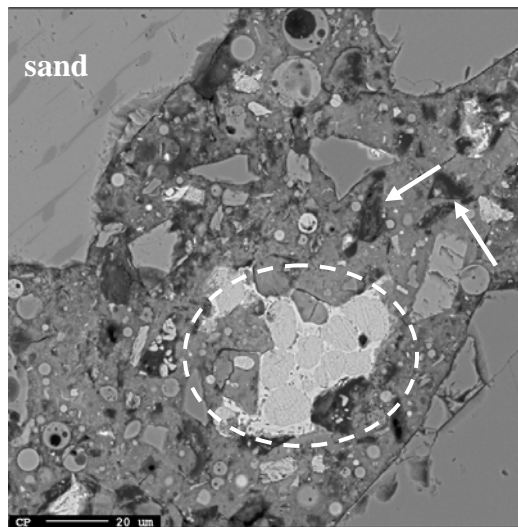


Foto nr 15. Tynnslip 2. SEM-BSE-bildet viser et ureagert sementkorn (belitt-reir) og "Hadley grains" (angitt med piler) i ikke-impregnert betong.

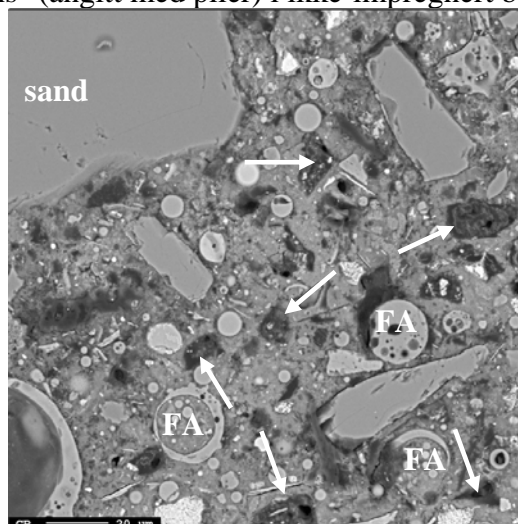


Foto nr 16. Tynnslip 2. SEM-BSE-bildet viser runde flygeaskepartikler (FA) og "Hadley grains" (angitt med piler) i ikke-impregnert betong.

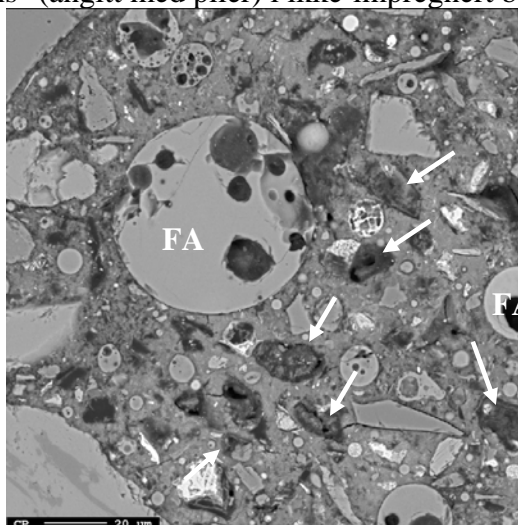


Foto nr 17. Tynnslip 2. SEM-BSE-bildet viser runde flygeaskepartikler (FA) og "Hadley grains" (angitt med piler) i ikke-impregnert betong.

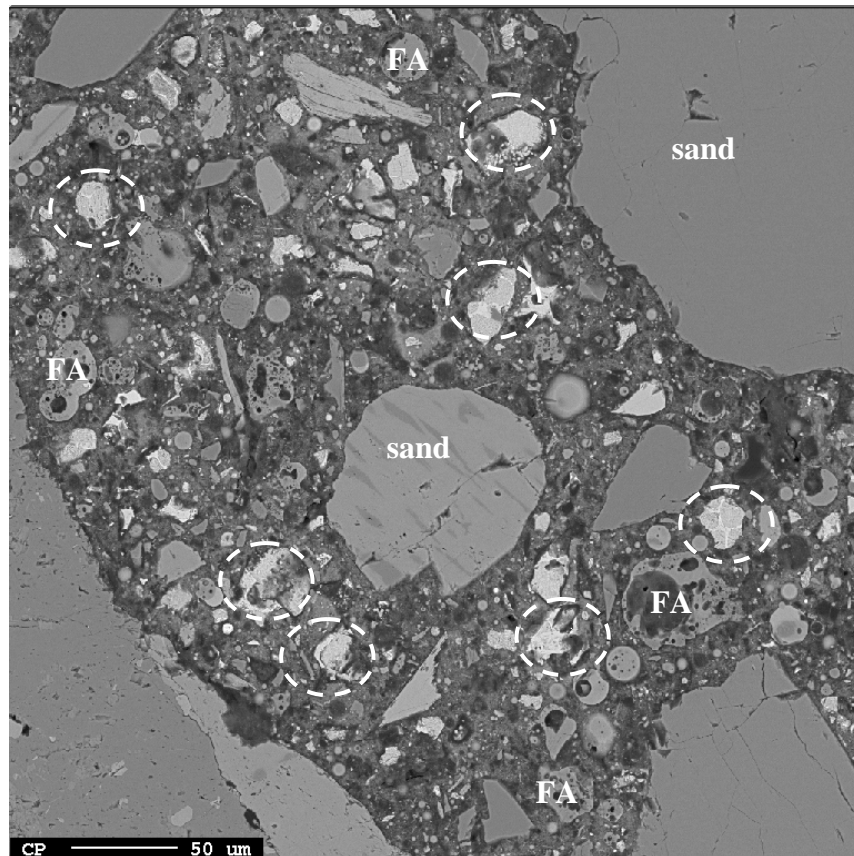


Foto nr 18. Tynnslip 3. SEM-BSE-bildet viser delvis reagerte sementkorn (angitt med sirkler) i impregnert sone 0,8 mm fra overflaten.

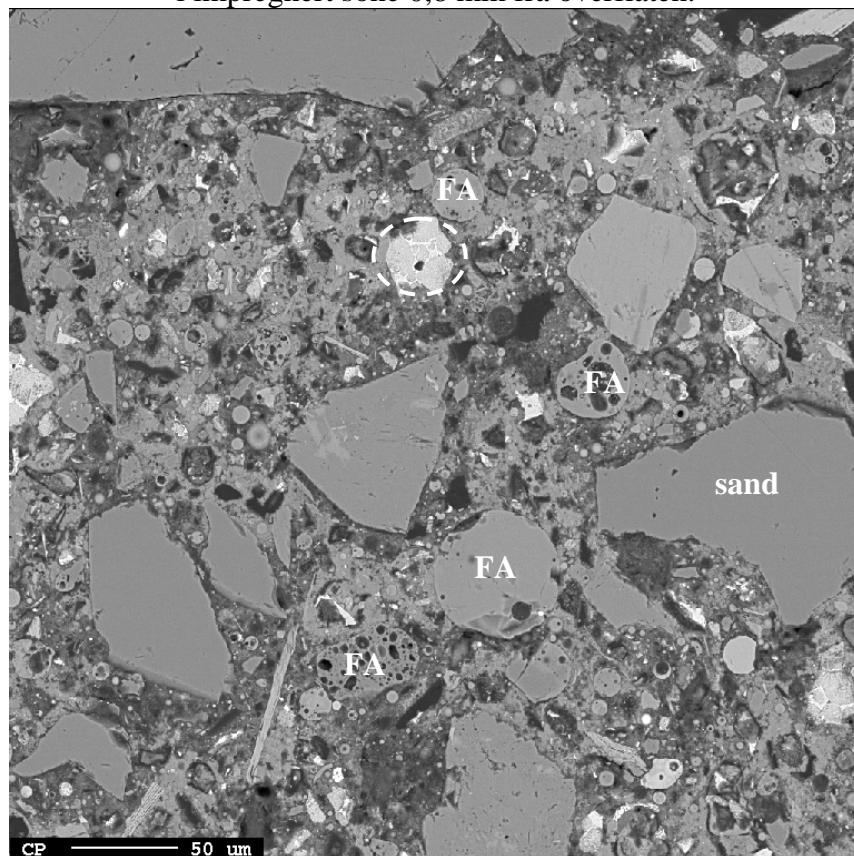


Foto nr 19. Tynnslip 3. SEM-BSE-bilde tatt 5,5 mm fra den impregnerte overflaten. Bildet viser at det er få ikke-reagerte sementkorn.

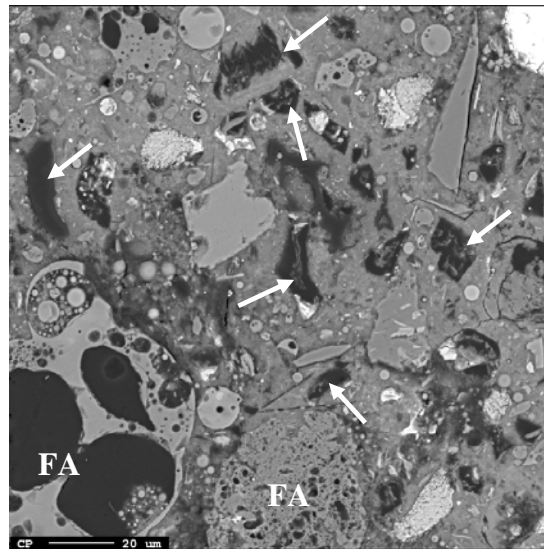


Foto nr 20. Tynnslip 4. SEM-BSE-bildet viser runde og irregulære flygeaskepartikler (FA) og "Hadley grains" (angitt med piler) i ikke-impregnert betong.

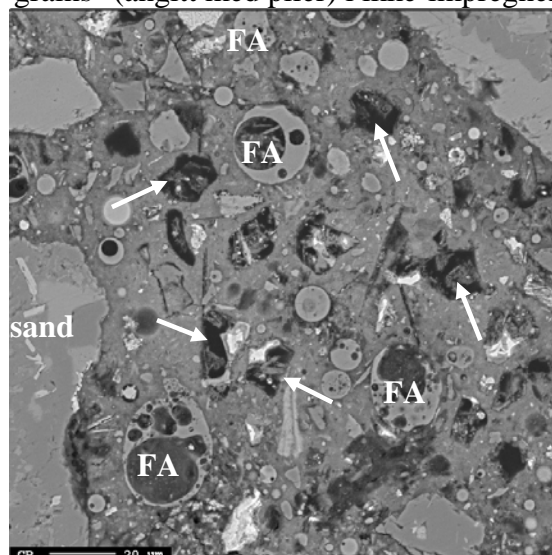


Foto nr 21. Tynnslip 4. SEM-BSE-bildet viser runde flygeaskepartikler (FA) og "Hadley grains" (angitt med piler) i ikke-impregnert betong.

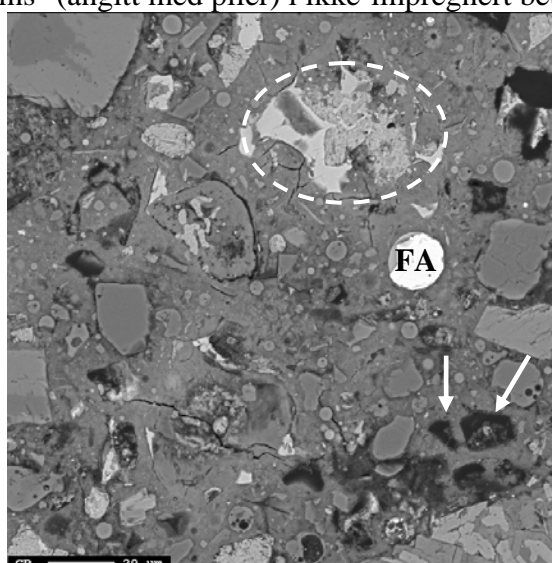


Foto nr 22. Tynnslip 4. SEM-BSE-bildet viser en lys jernrik flygeaskepartikkel (FA), noen "Hadley grains" (angitt med piler) og et delvis reagert sementkorn (angitt med sirkel) i ikke-impregnert betong.

## 5 VURDERING AV RESULTATER

Midlere impregneringsdybde er målt til 10,5 mm ved hjelp av fargeforskjell ved vannfukting.

I polarisasjonsmikroskop synes betongen i tynnslip 2 og 4 (ikke-impregnert sone) å være mer åpen (høyere kapillærporøsitet) enn betongen i tynnslip 1 (impregnert sone). I tynnslip 3 (profil fra impregnert sone) kan en ane at de øverste ca 5 mm (i impregnert sone) er en anelse tettere (lavere kapillærporøsitet) enn betongen lenger ned. Dette gir en indikasjon på at betongen i impregnert område er mindre åpen enn betongen i ikke-impregnert område. Det kan ikke ut fra undersøkelser i polarisasjonsmikroskop observeres en svekkelse/kvalitetsreduksjon av betongen i det impregnerte yttersjiktet, det synes heller å være tettere.

Å måle eksakt impregneringsdybde i polarisasjonsmikroskop er ikke mulig, men variasjoner i kapillærporøsitet antyder en impregneringsdybde på ca 5 mm.

Det er heller ikke mulig å detektere en tydelig impregneringsdybde ved hjelp av elektronmikroskopet. EDS-resultatene viser at det ikke er noen tydelig forskjell i sammensetningen av C-S-H-gelen i impregnert og ikke-impregnert sone, derfor er heller ikke kartlegging av elementer en egnet metode for å bestemme impregneringsdybden.

BSE-bildene tatt med elektronmikroskopet viste derimot en tydelig tendens. I impregneringssonen fantes det flere delvis reagerte sementkorn enn i ikke-impregnert betong. Dette kan muligens skyldes at impregneringen hindrer vann i å komme fram til sementkornene og dermed begrenser hydratasjonen. I ikke-impregnert sone er sementen velhydratisert, og mange Hadley grains ble observert. Denne forskjellen i hydratasjonsgrad skulle tyde på at porøsiteten i den impregnerte sonen er høyere enn i den ikke impregnerte sonen, men polarisasjonsmikroskopet indikerer det motsatte. Dette tilsynelatende misforholdet mellom undersøkelsenene i polarisasjonsmikroskop og sveipeelektronmikroskop kan muligens skyldes forekomsten av Hadley grains. I den velhydratiserte betongen i ikke-impregnert sone kan Hadley grains fungere som lyskastere i polarisasjonsmikroskopet og dermed gi et mer porøst inntrykk enn hos betongen i den impregnerte sone med færre Hadley grains.

## 6 KONKLUSJON

Undersøkelser i polarisasjonsmikroskop viser at betongen i impregnert sone er tettere (har lavere kapillærporøsitet) enn betongen i ikke-impregnert sone. Dette er spesielt tydelig ved sammenligning av tynnslip som i sin helhet ligger i henholdsvis impregnert og ikke-impregnert sone.

SEM-analyser viser at sementkornene i impregnert sone har merkbart lavere hydratiseringsgrad enn sementkornene i ikke-impregnert sone.

Det er ikke mulig å "lese av" eksakt impregneringsdybde ved hjelp av de to mikroskopi-teknikkene teknikkene men undersøkelser i polarisasjonsmikroskop antyder en impregneringsdybde på ca 5 mm.

Det virker som fargeforskjell ved oppfukting på et makronivå er den beste måten å angi det funksjonelle hydrofoberende sjikt på.



Statens vegvesen  
Vegdirektoratet  
Publikasjonsekspedisjonen  
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO  
Tlf: (+47 915) 02030  
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

**Trygt fram sammen**