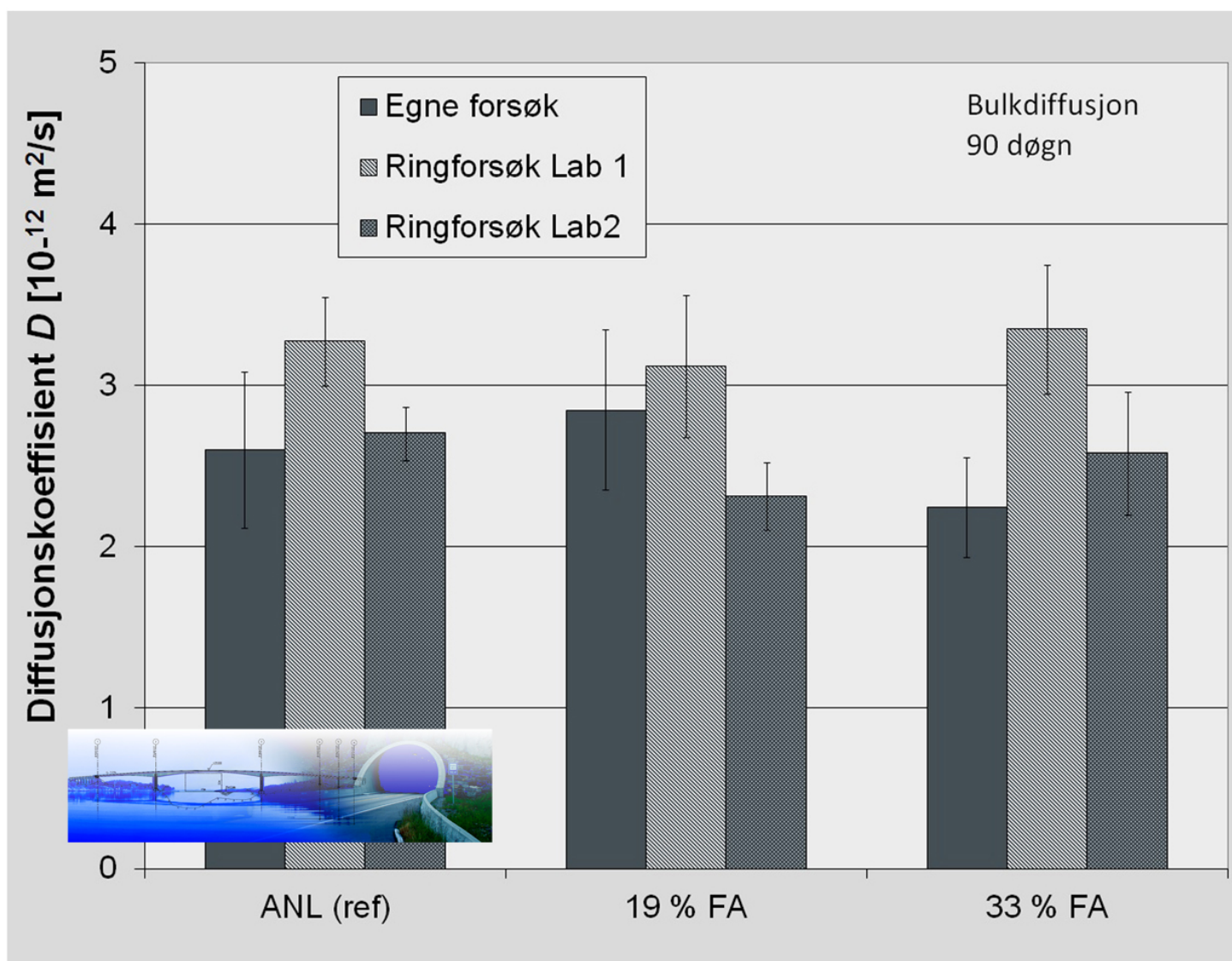


# Effekt av flygeaske på betongegenskaper

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  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -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  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -løsning
- 98 døgn: Nedlegging i  $\text{NaCl}$ -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 %  $\text{NaCl}$ -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.

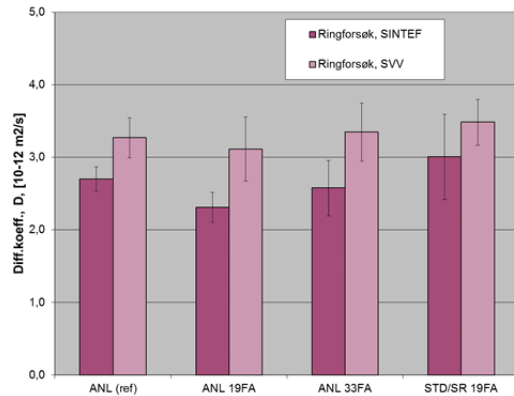
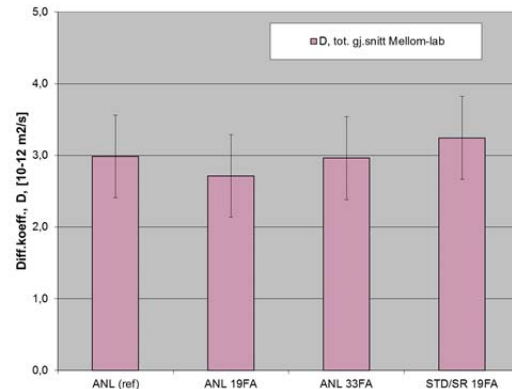
Resultatene er framstilt grafisk i Figur 2 som viser gjennomsnitt for alle prøvesettene enkeltvis med tilhørende Std.av. (repeterbarhet, dvs. innen-lab variasjon). Trenden er at gjennomsnittsresultatene fra SVV gir systematisk noe høyere  $D$  enn fra SINTEF for alle betongene, som nevnt over, men forskjellene 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 reproduserbarhets 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

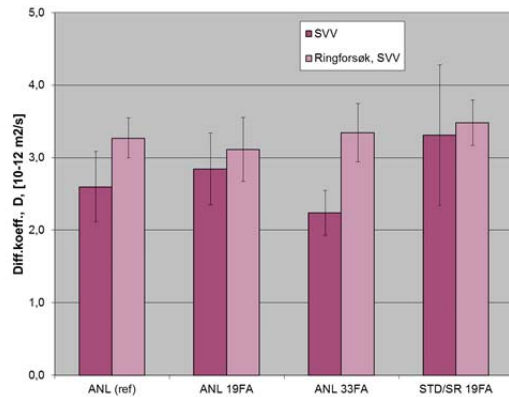
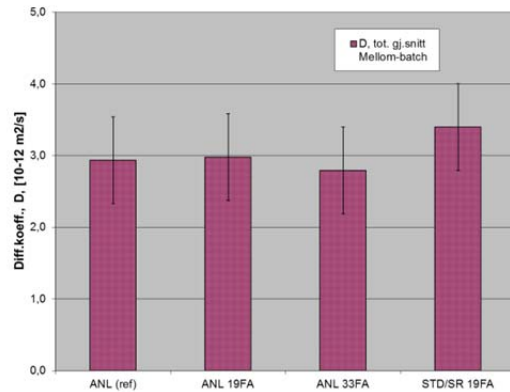
I Tabell 9 er resultater kun fra SVV sammenstilt (sammenstilling **b**), dvs. resultatene fra ringforsøket (betongen blandet ved SINTEF) og resultatene fra hovedserien («aktivitet A») på egne blandinger i SVV-lab. Hvis vi antar at mulige forskjeller i utstøping og herde-/lagringsbetingelser i de to seriene 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.

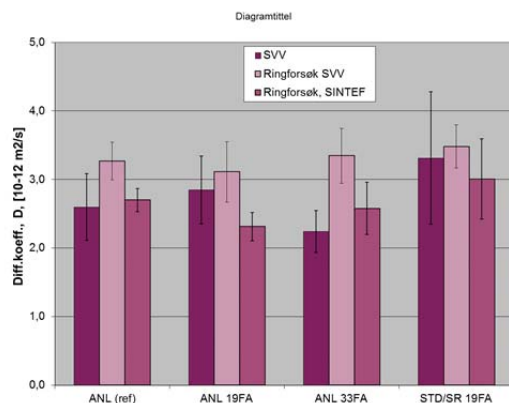
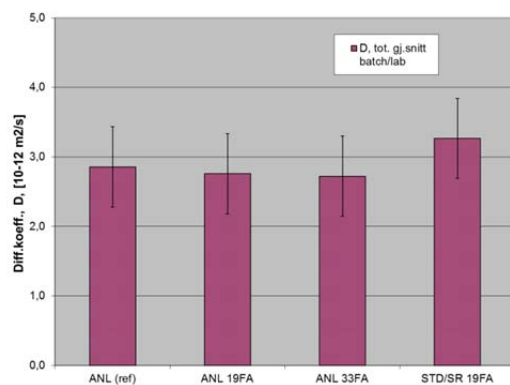
Resultatene er framstilt grafisk i Figur 4 og Figur 5. Vi kan slutte det samme her som for det rene ringforsøket diskutert tidligere; det er ingen klare effekter av betongtype og statistisk sett kunne alle resultatene ha kommet fra en og samme betong.

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.

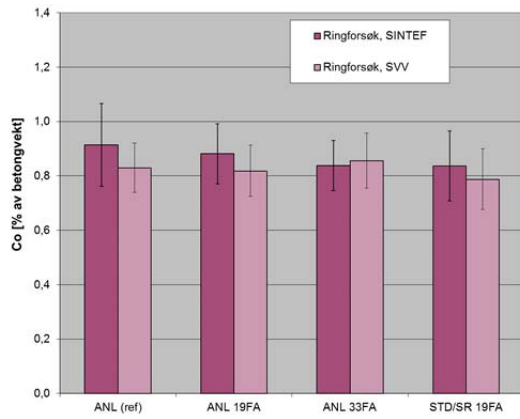
For alle individuelle prøvesett (innen-lab-variasjon) varierer  $C_0$  med et Std.av. fra 0,06 til 0,23 (COV fra 8,6% til 21,4%). Gjennomsnittlig Std.av. for hvert av de tre parallelle settene i sammenstillingene var 0,12 (COV 13,9%), 0,10 (12,1%) og 0,14 (COV 15,9%), for hhv. Ringforsøk Sintef, Ringforsøk 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**

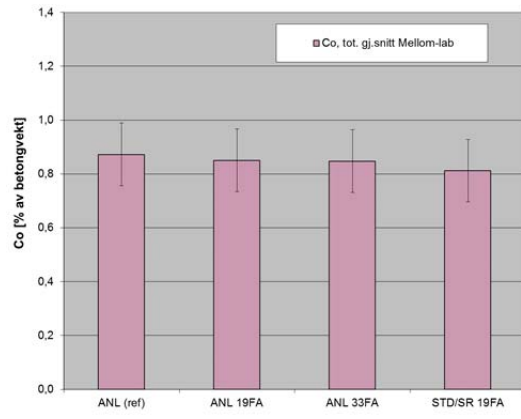
Betong	Ringforsøk, SINTEF			Ringforsøk, SVV			Co, tot. gj.snitt	Std..av.	COV
	Gj.snitt Co	Std.av.	COV	Gj.snitt Co	Std.av.	COV	Mellom-lab	Mellom-lab	Mellom-lab
ANL (ref)	0,91	0,15	16,6 %	0,83	0,09	10,9 %	0,87	0,06	6,9 %
ANL 19FA	0,88	0,11	12,5 %	0,82	0,09	11,5 %	0,85	0,04	5,2 %
ANL 33FA	0,84	0,09	11,0 %	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**

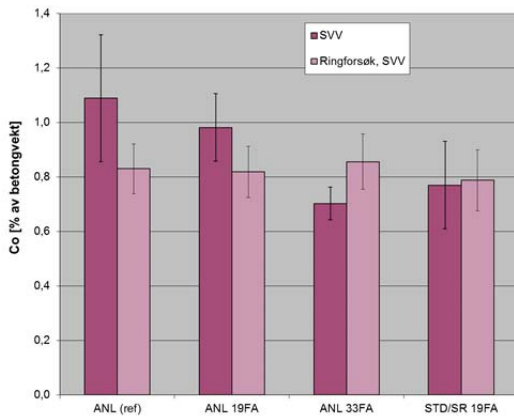
Betong	SVV			Ringforsøk, SVV			Co, tot. gj.snitt	St.dev.	COV
	Gj.snitt Co	Std.av.	COV	Gj.snitt Co	Std.av.	COV	Mellom-batch	Mellom-batch	Mellom-batch
ANL (ref)	1,09	0,23	21,4 %	0,83	0,09	10,9 %	0,96	0,18	19,1 %
ANL 19FA	0,98	0,12	12,7 %	0,82	0,09	11,5 %	0,90	0,12	12,8 %
ANL 33FA	0,70	0,06	8,6 %	0,86	0,10	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 %									



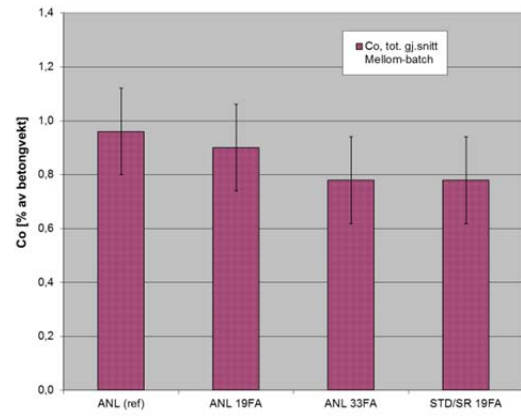
Figur 8 Ringforsøk (a): Gjennomsnittlig  $C_0$  for hver lab., med tilhørende  $\pm$  Std.av. anført som vertikal linje



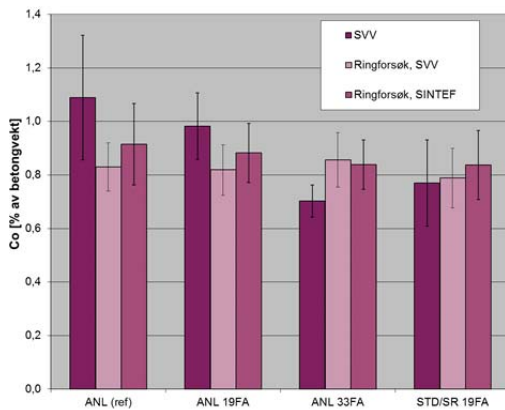
Figur 9 Ringforsøk (a): Samlet gjennomsnittlig  $C_0$  for begge laboratoriene, med  $\pm$  estimat på reproduserbarhets- Std.av. (mellom-lab-variasjon) anført som vertikal linje



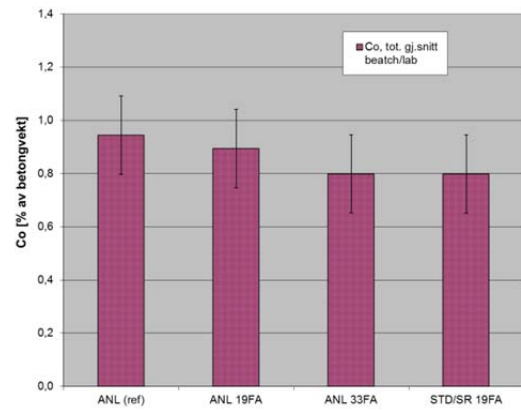
Figur 10 Batch-til-batch (b): Gjennomsnittlig  $C_0$  ved SVV for hver av de to blandingene, med tilhørende  $\pm$  Std.av. anført som vertikal linje



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).

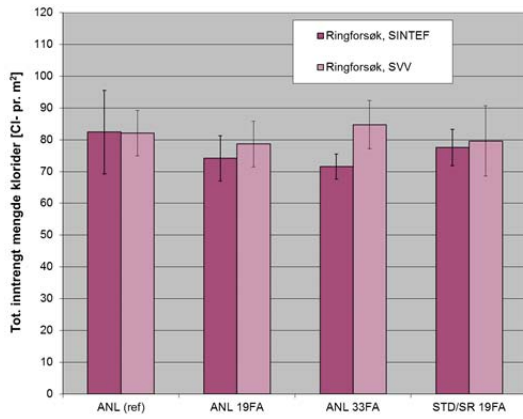
For individuelle prøvesett (innen-lab-variasjon) varierer *Cl* med et Std.av. fra 0,03 til 13,1 (COV fra 0,04 % til 15,9 %). Gjennomsnittlig Std.av. for de tre parallelle settene i a-c varierer fra 5,9 til 8,3 (COV fra 7,1 % til 10,2 %), mens beregnet reproduserbarhets Std.av. (mellom-lab-og-mellom-batch-variasjon) 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**

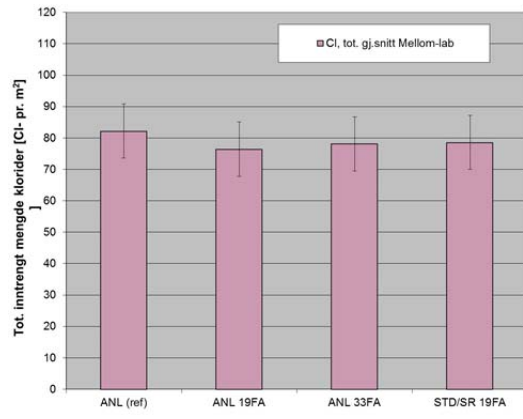
Betong	Ringforsøk, SINTEF			Ringforsøk, SVV			<i>Cl, tot. gj.snitt</i>	<i>Std..av.</i>	<i>COV</i>
	Gj.snitt Cl	Std.av.	COV	Gj.snitt Cl	Std.av.	COV	<i>Mellom-lab</i>	<i>Mellom-lab</i>	<i>Mellom-lab</i>
ANL (ref)	82,4	13,1	15,9 %	82,1	7,1	8,7 %	82,2	0,2	0,3 %
ANL 19FA	74,2	7,1	9,6 %	78,6	7,2	9,2 %	76,4	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**

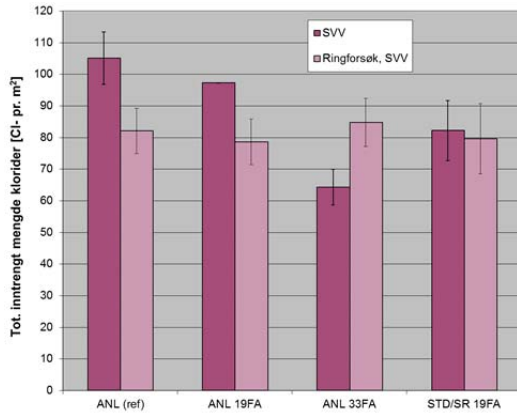
Betong	SVV			Ringforsøk, SVV			<i>Cl, tot. gj.snitt</i>	<i>St.dev.</i>	<i>COV</i>
	Gj.snitt Cl	Std.av.	COV	Gj.snitt Cl	Std.av.	COV	<i>Mellom-batch</i>	<i>Mellom-batch</i>	<i>Mellom-batch</i>
ANL (ref)	105,1	8,3	7,9 %	82,1	7,1	8,7 %	93,6	16,3	17,4 %
ANL 19FA	97,2	0,03	0,04 %	78,6	7,2	9,2 %	87,9	13,1	14,9 %
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 %		



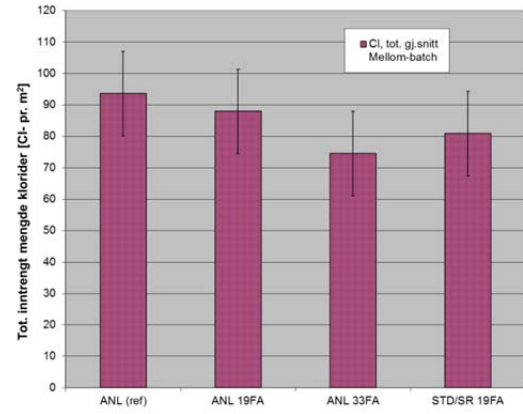
**Figur 14 Ringforsøk (a): Gjennomsnittlig tot. mengde inntrengte klorider for hver lab., med tilhørende ± Std.av. anført som vertikal linje**



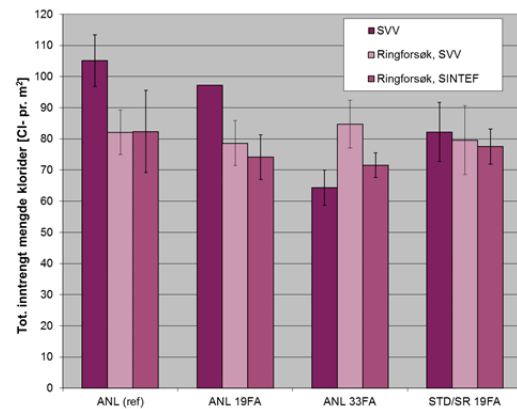
**Figur 15 Ringforsøk (a): Samlet gjennomsnittlig tot. mengde inntrengte klorider for begge laboratoriene, med ± estimat på reproduserbarhets- Std.av. (mellom-lab-variasjon) anført som vertikal linje**



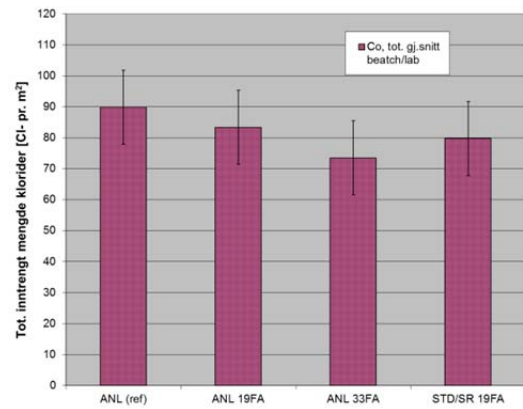
**Figur 16 Batch-til-batch (b): Gjennomsnittlig tot. mengde inntrengte klorider ved SVV for hver av de to blandingene, med tilhørende ± Std.av. anført som vertikal linje**



**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**

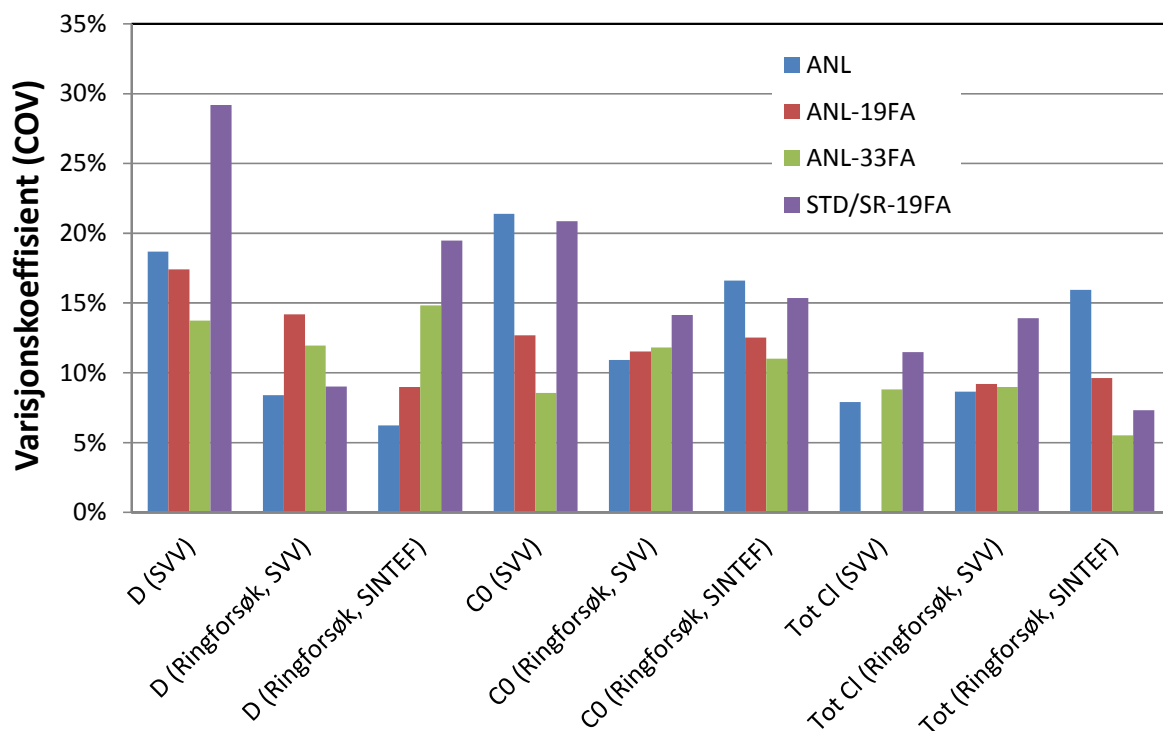
## 4.5 Oppsummering ringforsøk

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 [ltr/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 døgns 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.

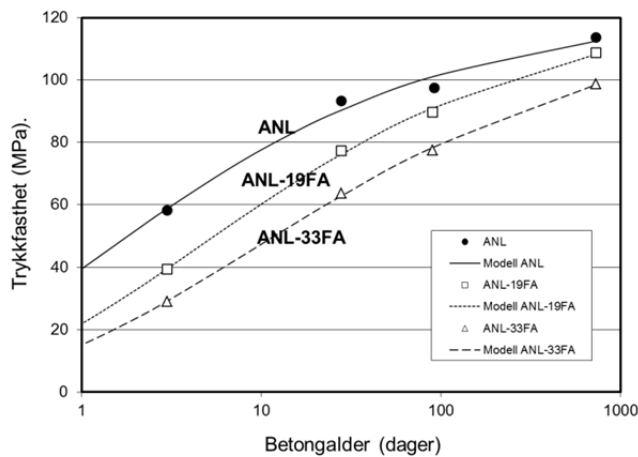
#### Effekt av klinkertype

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

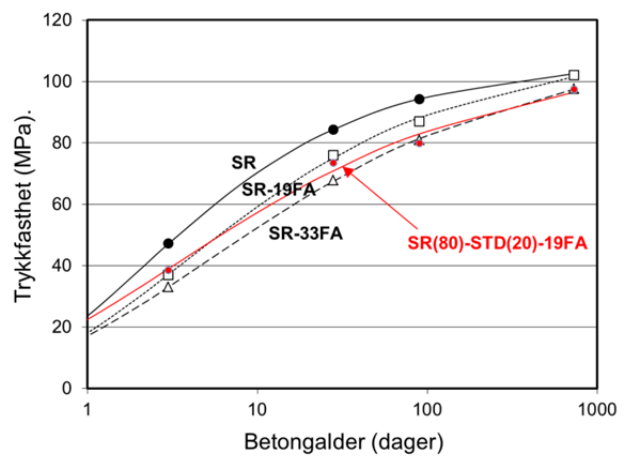
STD/SR består av 20% STD- og 80% SR-klinker. For 33% FA er bildet motsatt med høyere fasthet for SR-33FA for alle prøvningsaldre unntatt etter 2 år hvor de to blandingene (SR-33FA og ANL-33FA) har omtrent samme fasthet.

### Effekt av FA-innhold

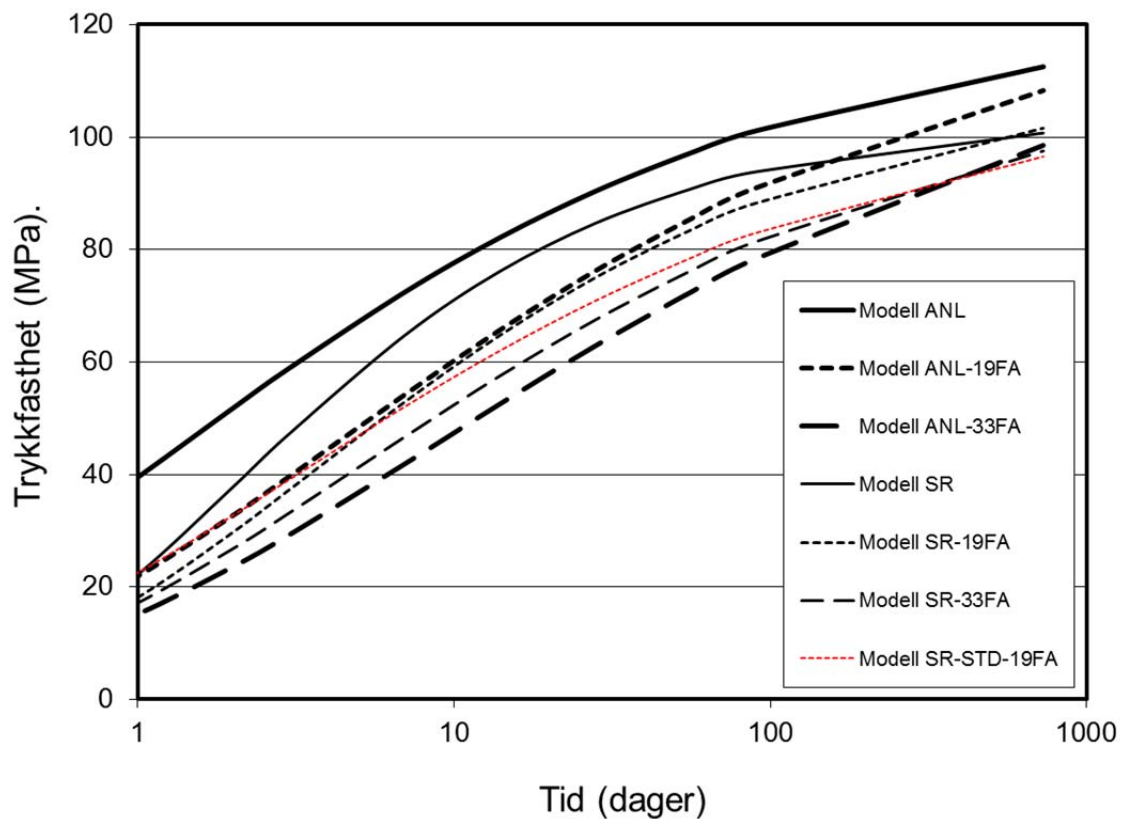
For ANL-serien reduseres fastheten med økende FA-dosering for alle aldre, men FA-betongene har større fasthetstilvekst over lang tid slik at fasthetsforskjellen avtar med tiden. Etter 2 år har ANL-19FA 4 % lavere fasthet enn ANL, mens ANL-33FA ligger 13% lavere. For SR-serien er effekten av FA mye det 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.



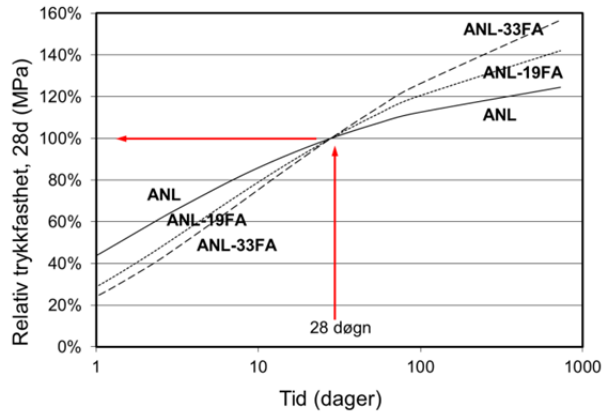
Figur 21 Fasthetsutvikling; ANL-serien



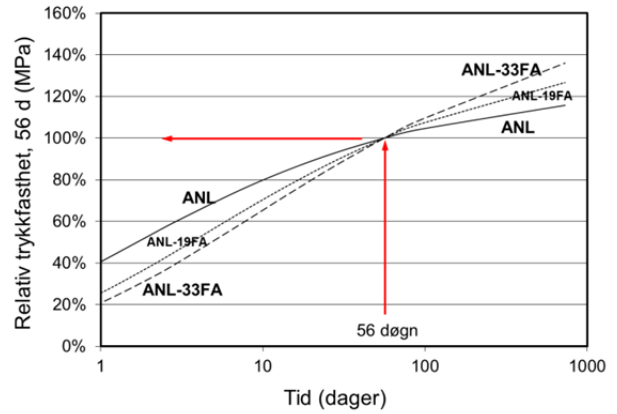
Figur 22 Fasthetsutvikling; SR-serien



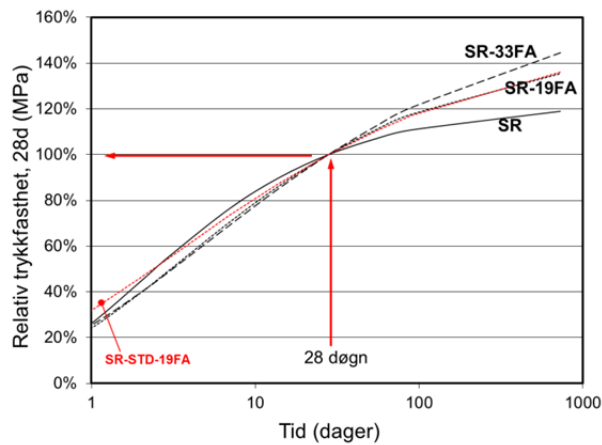
Figur 23 Fasthetsutvikling; Alle betongene (uttrykt med modellen)



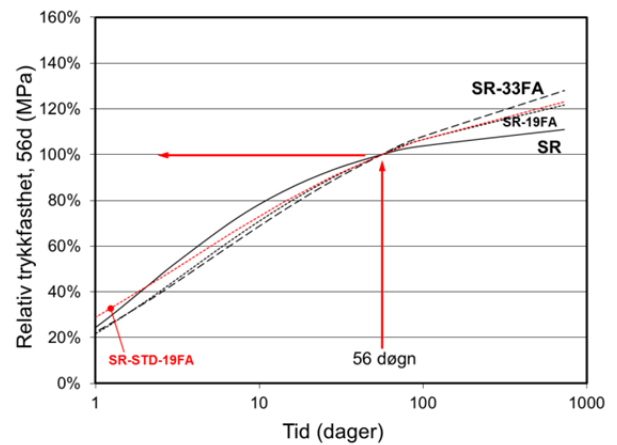
Figur 24 Fasthetsutvikling, relativ til 28-døgn; ANL-serien (uttrykt med modellen)



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)

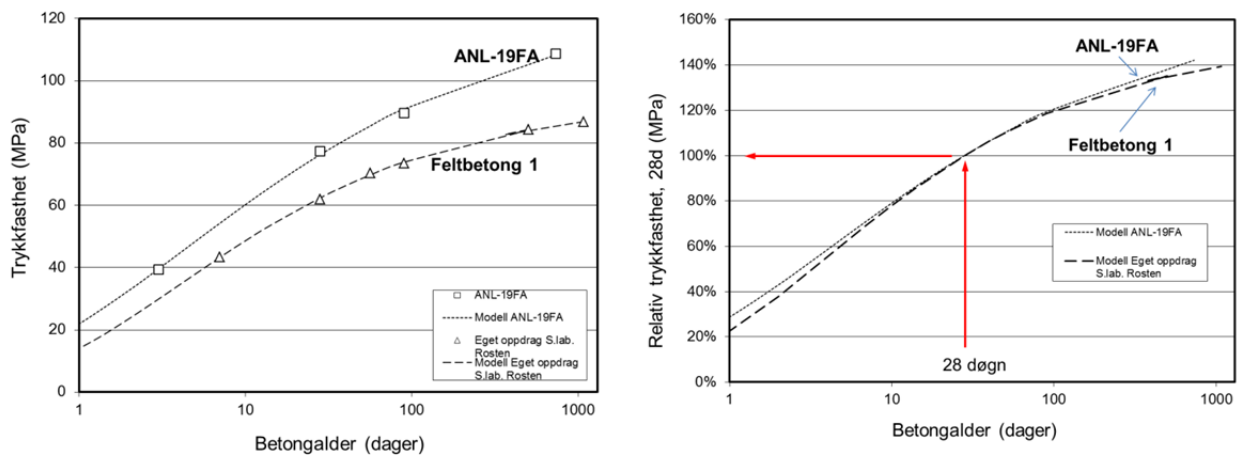
Sementen Anlegg FA kom på markedet i 2008, som erstatning for «ren» Anleggsement. Etter denne overgangen var det fra en del prosjekter i en periode meldt om problemer med å overholde kravet til 28-døgnsfasthet. Med bakgrunn i disse tilbakemeldingene, og som et supplement til det herværende prosjektet, 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), laboratoriebetonen 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.

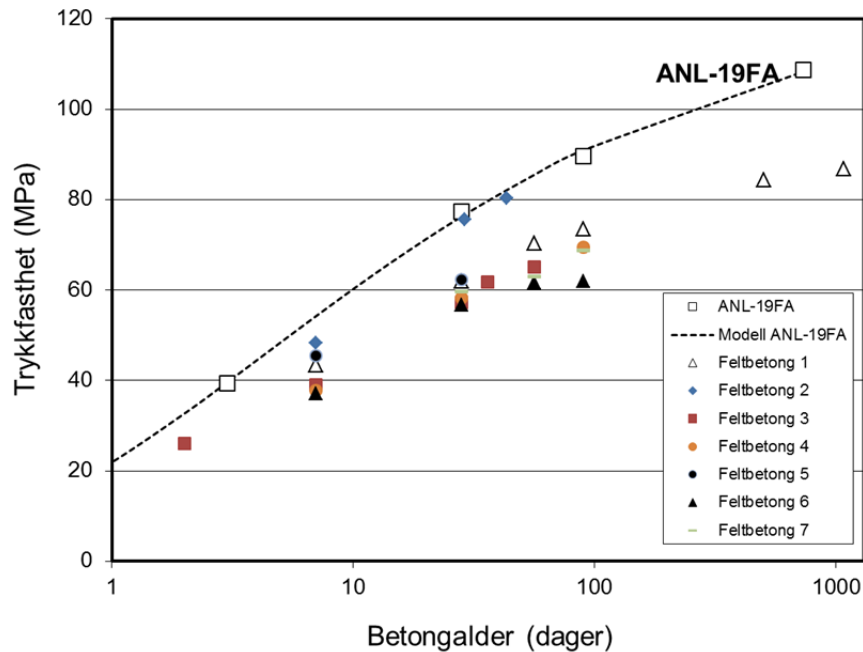
I Figur 29 er fasthetsdata fra også andre feltbetonger med Anlegg FA (Feltbetong 2 til 7), alle spesifisert som B45 SV40, gitt sammen med dataene for Feltbetong 1 og ANL-19FA. Alle feltbetongene her ble støpt i 2010 eller i 2011, feltbetongene 2-7 er også tilsatt luft, men luftinnholdet er ukjent. Mengden 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

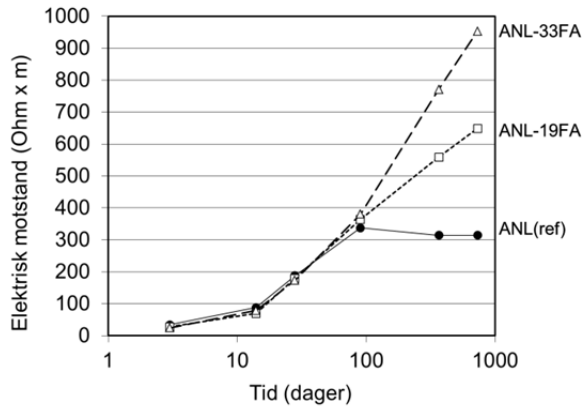
Alder	Gjennomsnittlig relativ fasthet, 28 døgn	Variasjonsområde
7 døgn	68 %	63 % - 73 %
28 døgn	100 %	-
56 døgn	111 %	105 % - 114 %
90 døgn	116 %	109 % - 119 %
1 år	133 %	(bare ett datasett)
1,4 år	137 %	136 % og 139 %
2 år	142 %	(bare ett datasett)
3 år	143 %	(bare ett datasett)

## 5.4 Spesifikk elektrisk motstand

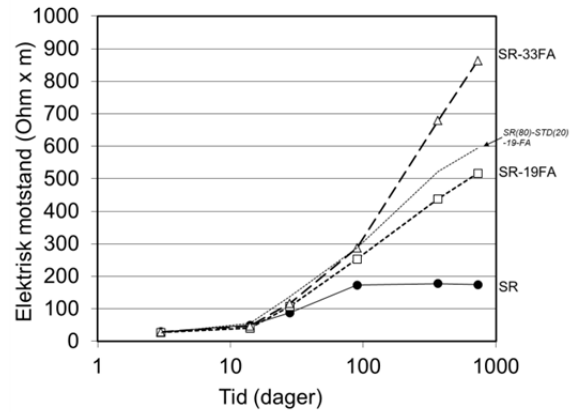
Resultatene for spesifikk elektrisk motstand fra 3 døgn til 2 år for ANL-serien er vist i Figur 30, for SR-serien i Figur 31, og for begge seriene samlet i Figur 32. Hvert punkt i figurene representerer gjennomsnittet av seks parallelle målinger (terninger), og i hvert sett måles det på de samme prøvene 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.

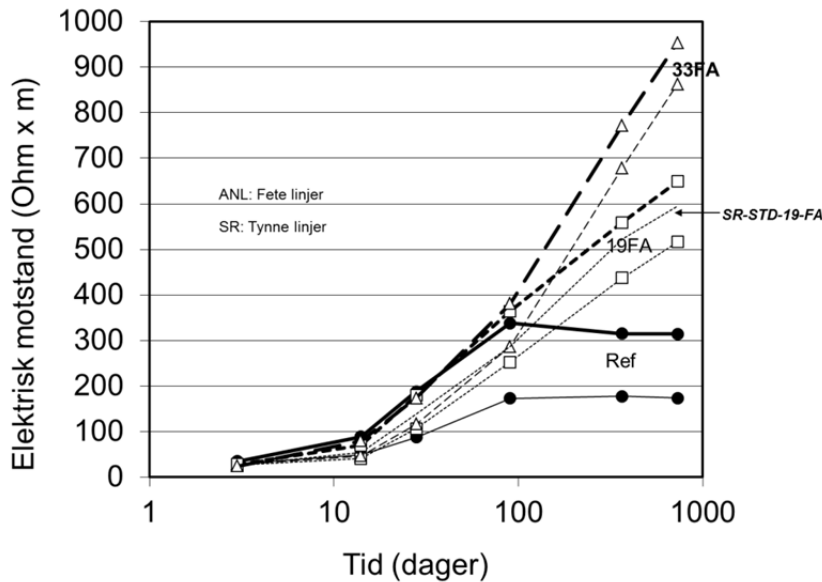
For alle tidspunkt etter 3 døgn har betongene i ANL-serien høyere elektrisk motstand enn for tilsvarende FA-mengde i SR-serien. Den relative forskjellen mellom ANL- og SR-serien avtar noe med tid og FA-dosering. Tallresultater for elektrisk motstand er gitt i APPENDIX 4



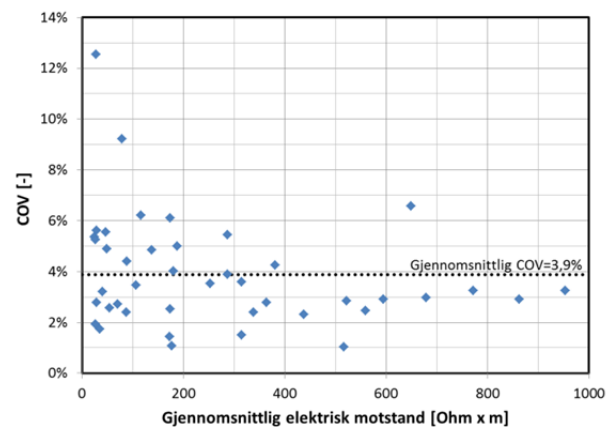
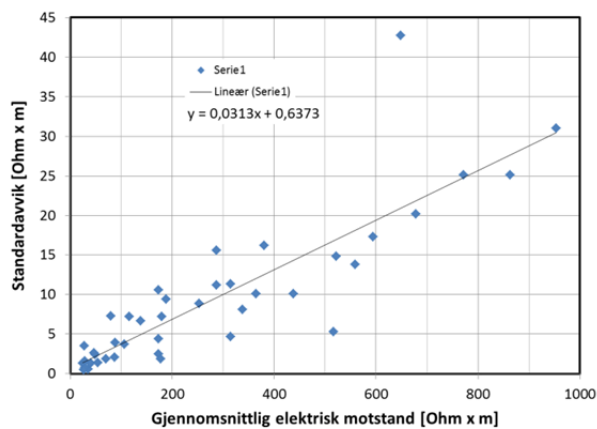
Figur 30 Spesifikk elektrisk motstand, ANL-serien



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)

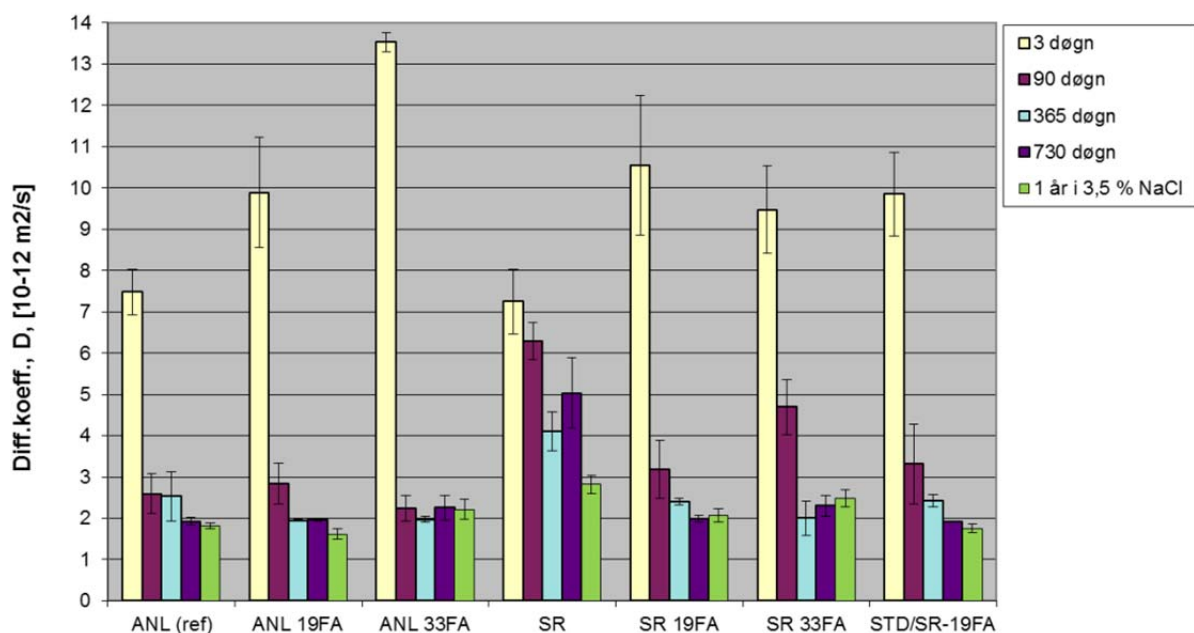
### 5.5.1 Diffusjonskoeffisient ( $D$ )

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.

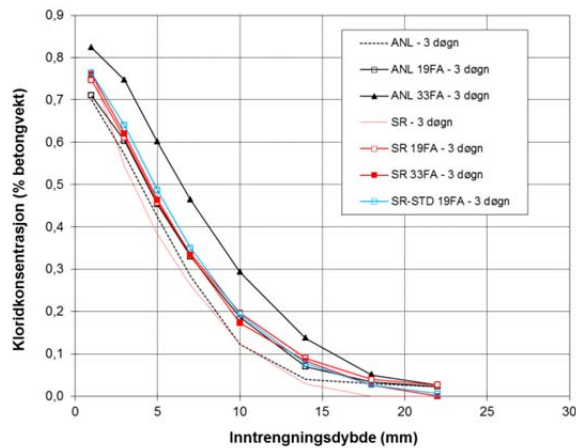
Resultatene viser at eksponering fra 3 døgn (gule søyler) skiller seg ut med høy  $D$ , og at  $D$  øker med økende FA-mengde. FA-effekten er systematisk i ANL-serien, men ikke i SR-serien. STD/SR-19FA-betongen for «3 døgn» har omtrent samme  $D$  som 19% FA i ANL- og SR-serien. Nedsenkning av prøvestykkene 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.

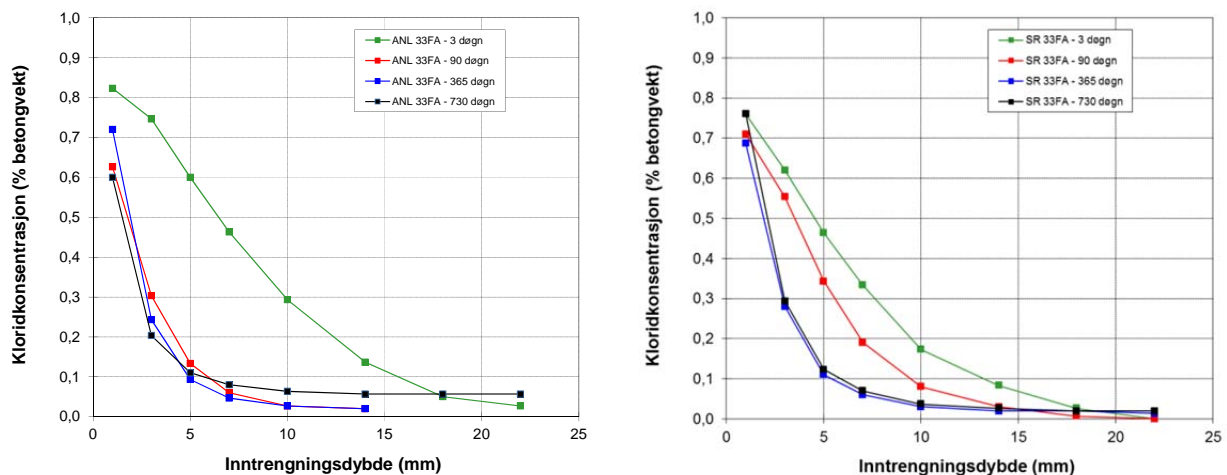
SR-serien skiller seg fra ANL-serien ved at SR (uten FA) viser lavere kloridmotstand for alle aldre, bortsett fra etter 3 døgn. Med FA (både 19 og 33 %) øker imidlertid kloridmotstanden i SR-serien betydelig, spesielt fra 1 års herdetid, hvor kloriddiffusjonskoeffisientene er på samme nivå som i ANL-serien.



**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.

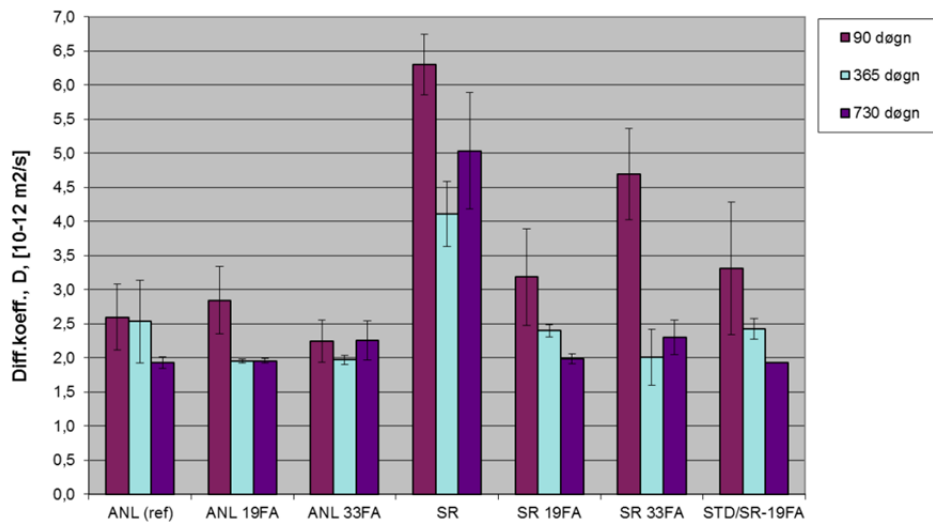
For eksponering etter 365 døgn skiller SR-betongen seg ut med høy  $D$ . Tendensen er ellers for SR at  $D$  avtar markant ved 19% FA-dosering. Ytterligere FA-dosering opp til 33% gir marginal reduksjon i  $D$ . I ANL-serien kan vi ved 365 døgn spore en liten gunstig effekt av 19% FA-dosering, men ytterligere



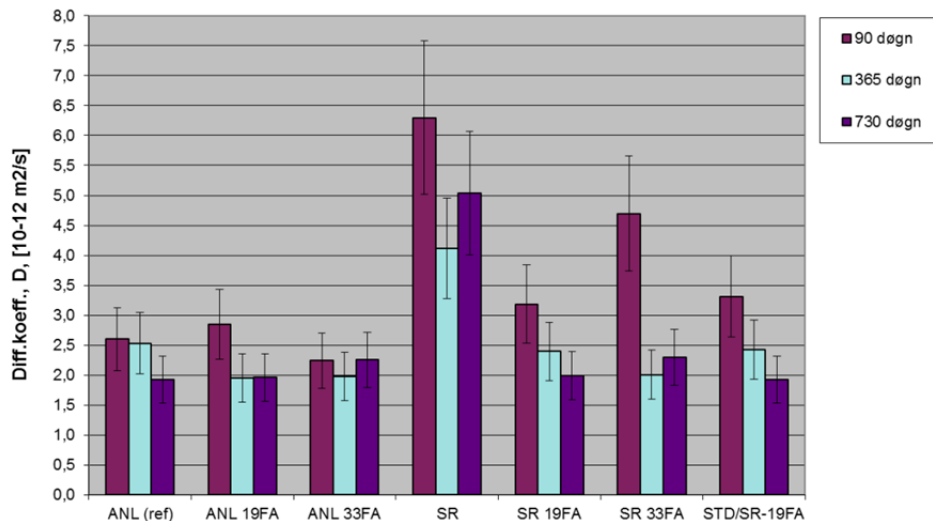
økning til 33% FA gir ingen effekt på  $D$ . Det er tvilsomt om endringene i  $D$  fra SR-19FA til SR-33FA og fra ANL til ANL-19FA er signifikante.

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

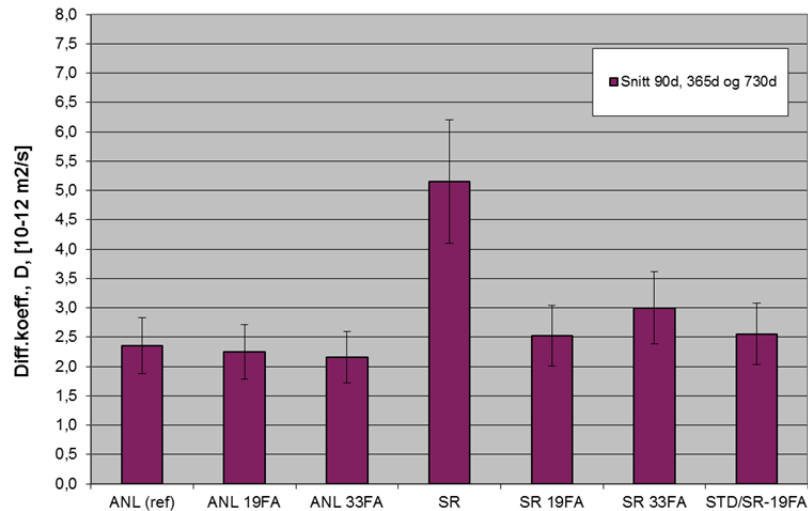
Gjennomsnittet av  $D$ , betong for betong, for 90, 365 og 730 døgn, se Figur 39, viser ingen signifikante forskjeller mellom betongene, unntatt for betongen SR som har omtrent dobbelt så høy  $D$  som de andre betongene. Trenden er imidlertid at  $D$  i SR-serien er marginalt høyere enn i ANL-serien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



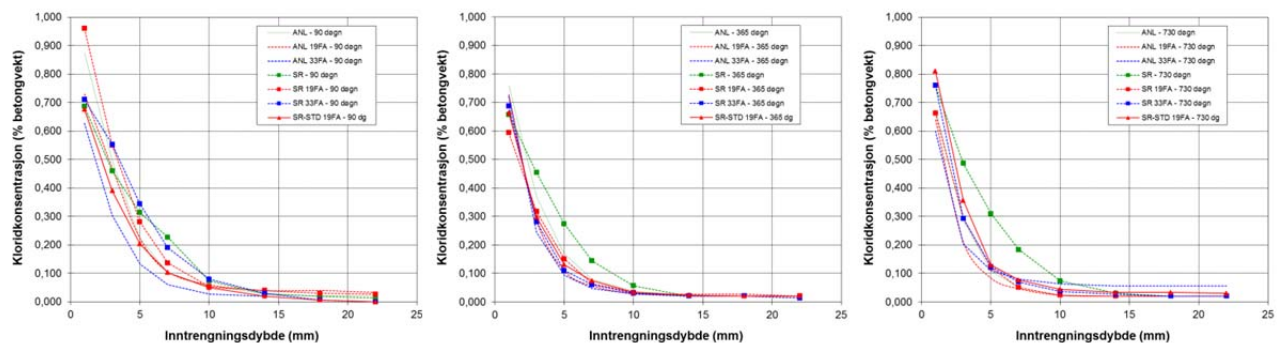
Figur 37 Samme data for  $D$  som i Figur 34, med 3 døgns eksponeringene utelatt. Std.av. ( $\pm$ ) innen hvert prøvesett er indikert



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.



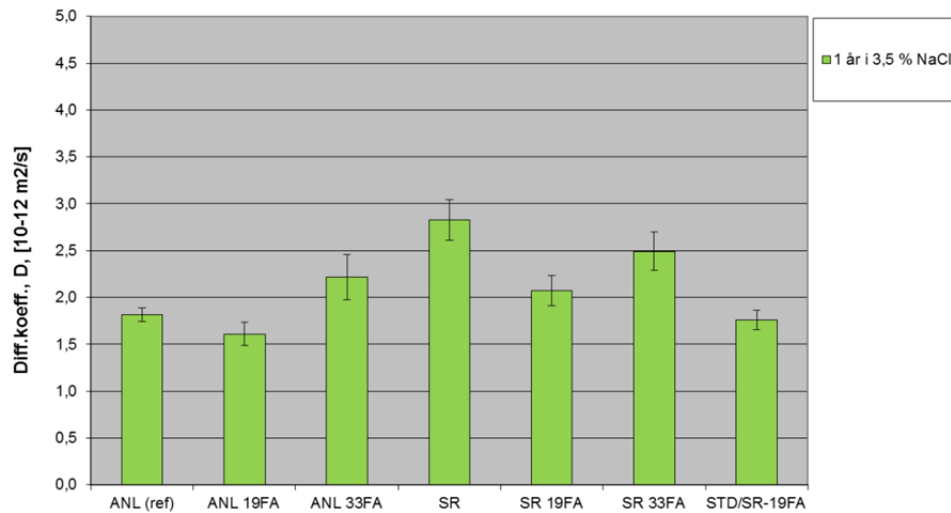
Figur 39 Gjennomsnittlig  $D$  for NT Build 443-eksponering ved 90d, 365d og 730d. Reproduserbarhets Std.av. (tilsvarende COV=20,4 %) fra kapittel 4 er indikert på alle søyler.



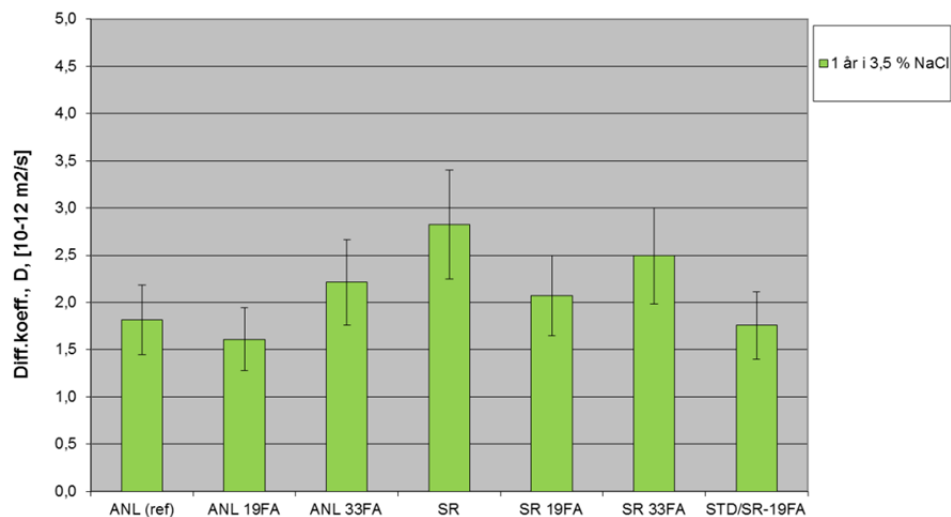
Figur 40 Målte kloridprofiler (middelverdier) etter NT Build 443 og eksponering etter 90 døgn (venstre), 365 døgn (midt) og 730 døgn (høyre)

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).

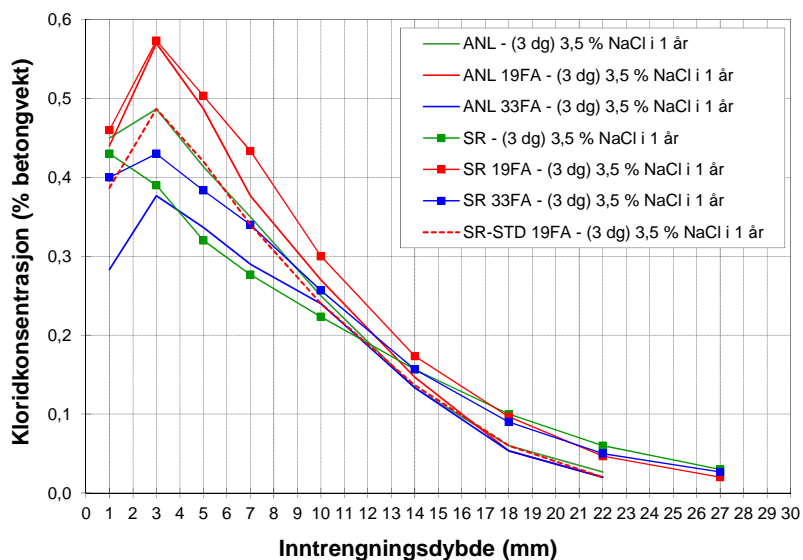
Tar man spredningen i  $D$  i betraktningen for «1 år i 3,5 % NaCl»-resultatene, så er det vanskelig å si noe entydig om  $D$  og effekten av klinkertype og FA-dosering. Av samme grunn kan det da konstateres at det ikke er noen signifikant negativ effekt av FA-dosering på  $D$  etter 1 års eksponering 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.



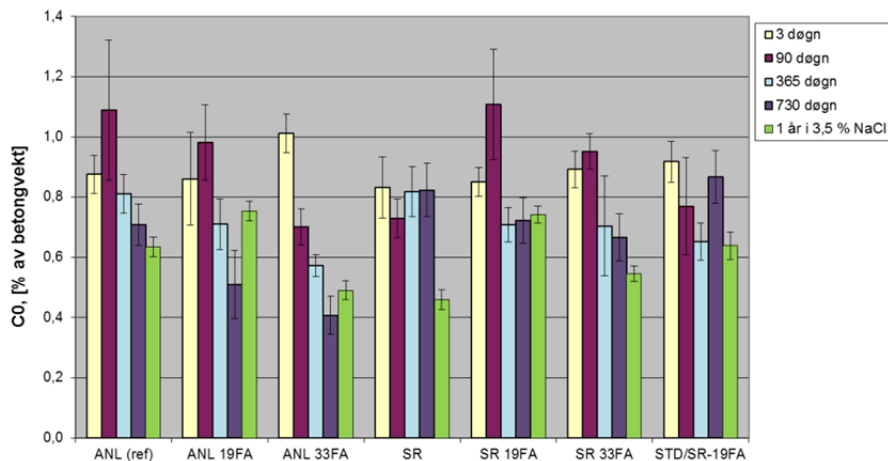
Figur 43 Målte kloridprofiler (middelverdier) etter 1 år i 3,5 % NaCl ved start eksponering etter 3 døgn

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

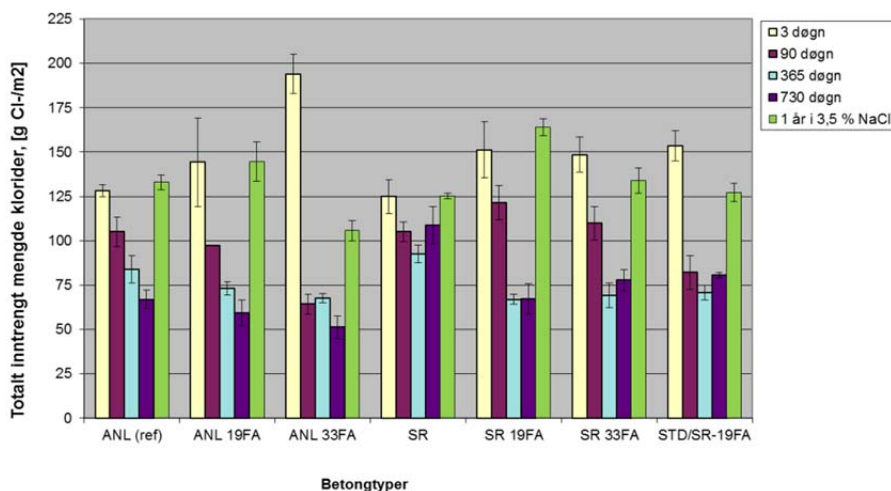
$C_0$  må betraktes delvis som en modellparameter ettersom en eller flere av kloridanalysene nærmest eksponeringsflaten utelates i regresjonsanalysen (se kap. 3.4). Gjennomsnittlig beregnet  $C_0$  (m/Std.av. for hvert prøvesett) er vist i Figur 44 og totalt inntrengt mengde klorider i Figur 45. For  $C_0$  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

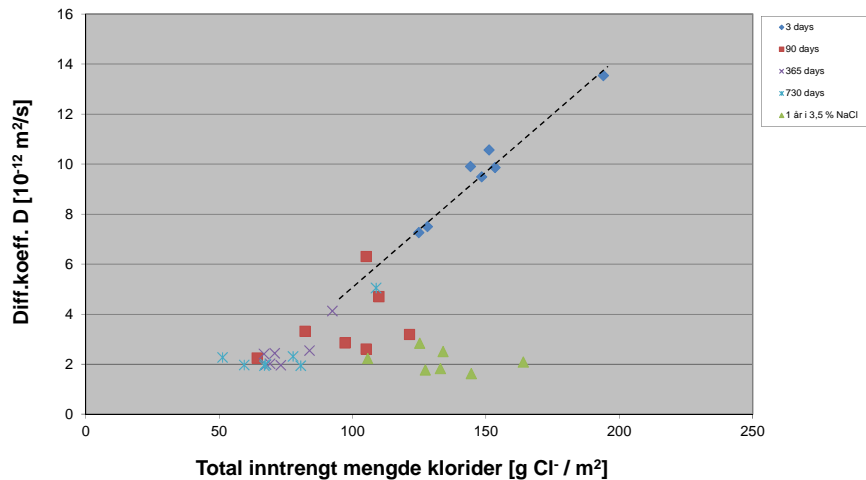
$C_0$  og totalt inntrengt mengde klorider viser ingen sammenheng innbyrdes, ei heller er det sammenheng mellom  $C_0$  og  $D$  (NT Build 443). Den eneste sammenhengen som kan spores er mellom totalt inntrengt mengde klorider og  $D$ , se Figur 46; dog bare for de betongene som har  $D$ -verdier større 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



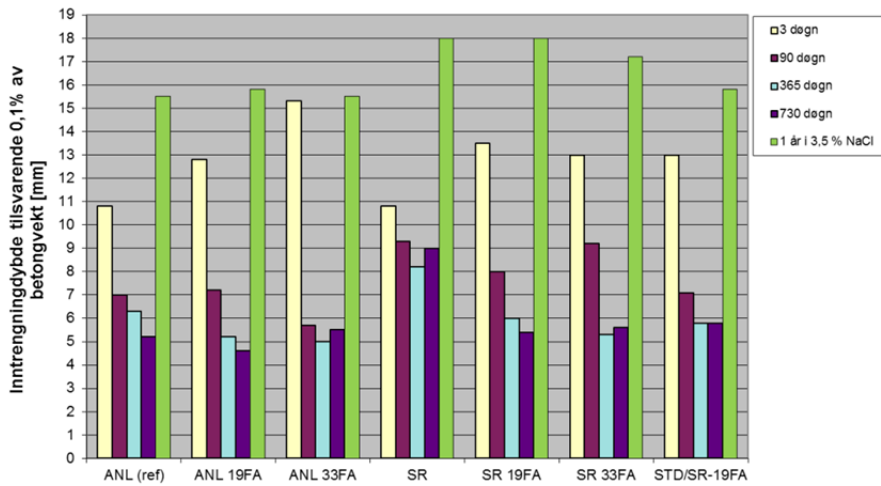
**Figur 46** Diffusjonskoeffisient  $D$  vs. total inntrengt mengde klorider for alle betongene og eksponeringstidspunkt. Stiplet trendlinje for NT Build 443-resultatene for data med  $D > 4 \times 10^{-12}$  er tegnet inn for hånd.

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

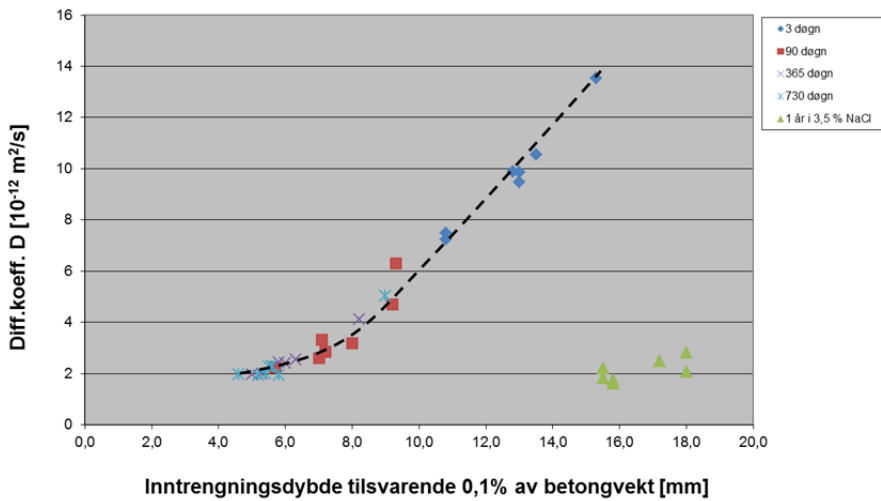
Dybden av kloridfronten, fra betongoverflaten, med en Cl<sup>-</sup>-konsentrasjon på 0,1 % av betongvekt er vist i Figur 47. Nivået 0,1 % Cl<sup>-</sup>-konsentrasjon er en valgt verdi, men er et grovt anslag på kritisk Cl<sup>-</sup>-konsentrasjon for initiering av armeringskorrosjon. For NT Build 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.

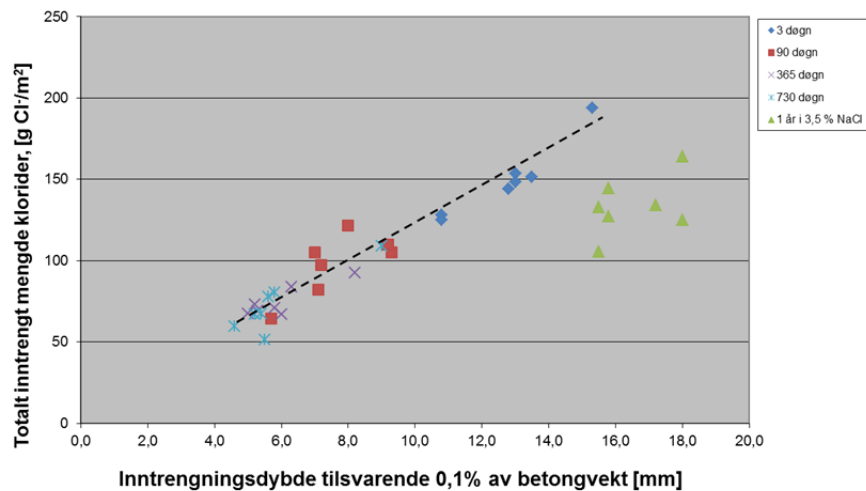
Når det gjelder sammenhenger mellom inntrengningsdybde og de andre parameterne så synes det å være en klar sammenheng med  $D$  (se Figur 48) og med totalt inntrengt mengde klorider (se Figur 49). Dette gjelder for NT Build 443-proseduren. Resultatene for prosedyren «1 år i 3,5% NaCl», med mye lengre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



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



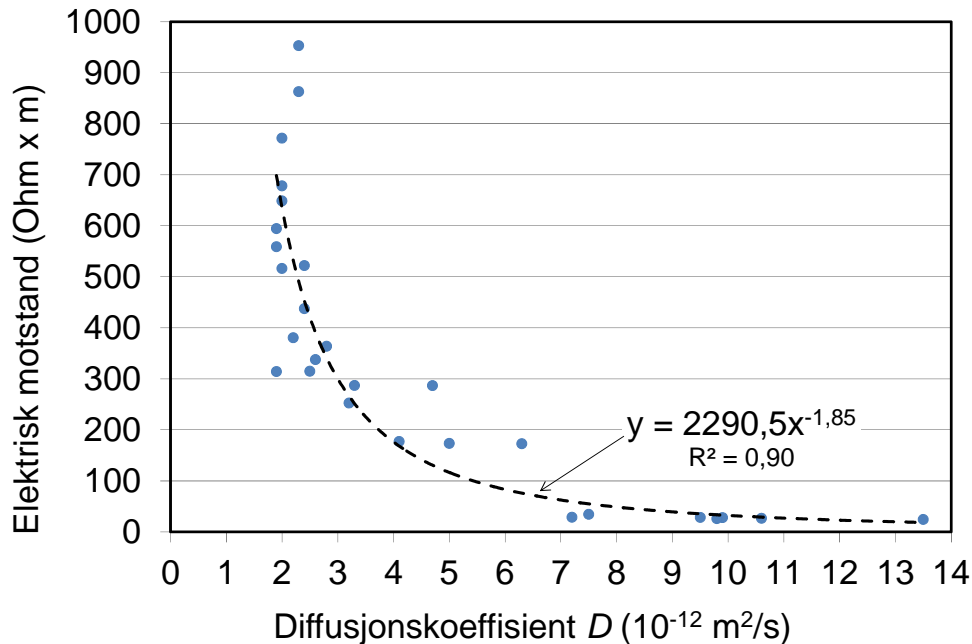
Figur 48 Diffusjonskoeffisient  $D$  vs. inntrengningsdybde. Stiplet trendlinje for NT Build 443-resultatene er tegnet inn for hånd.



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: Prøvede 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).

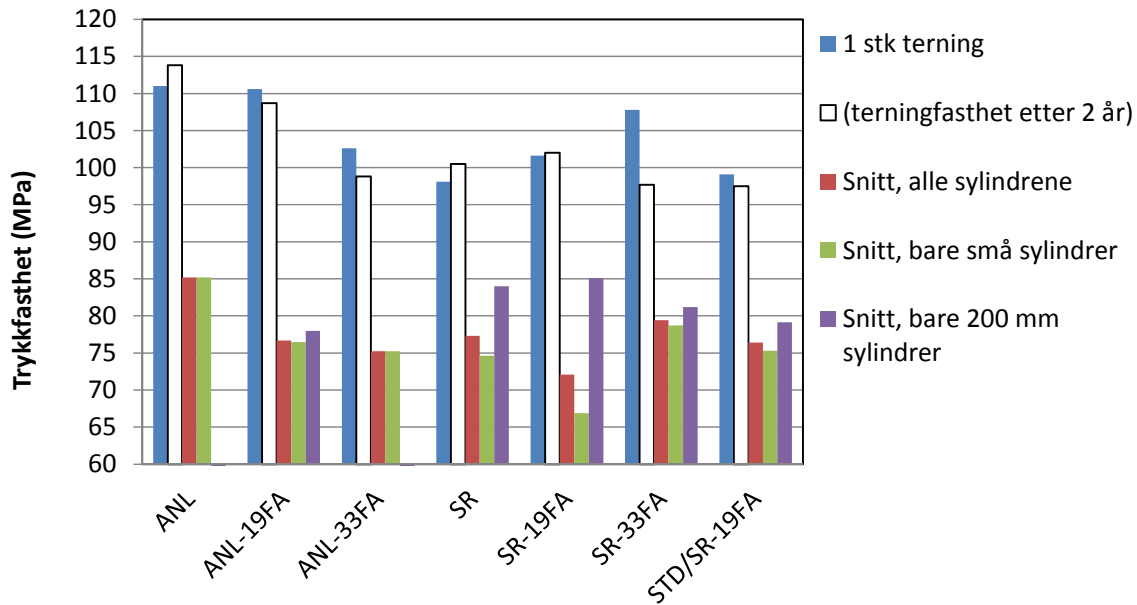
**Tabell 19 Trykkfasthet etter 6 år, enkeltresultater**

	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

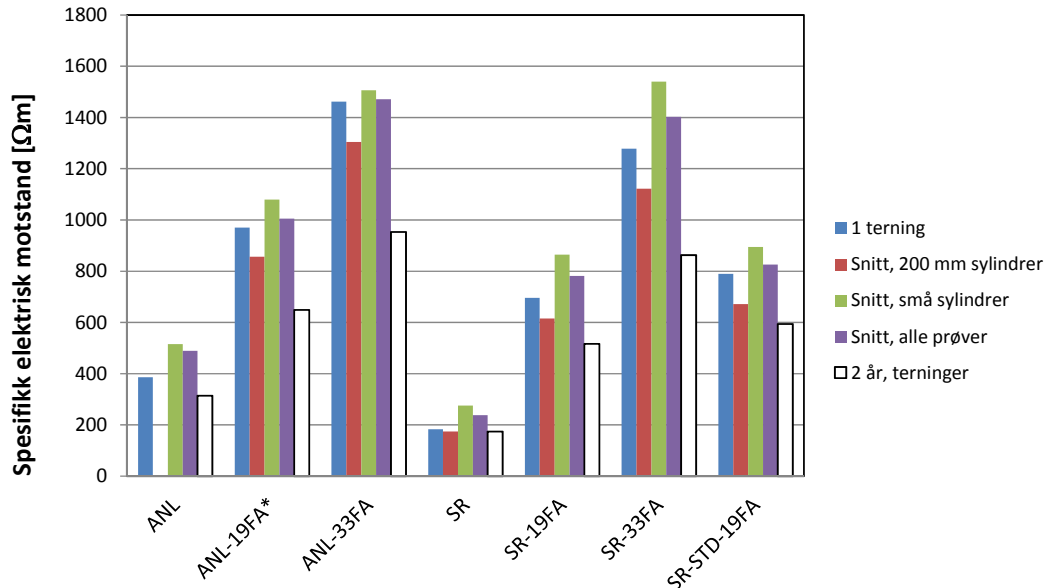
Resultatene for spesifikk elektrisk motstand er gitt i Tabell 21 og Tabell 22, samt Figur 52. Det er etter 6 år samme trend som tidligere vist for resultatene ved 2 år (kap. 5.4). Økende FA-innhold gir markant økning i spesifikk elektrisk motstand; dette gjelder både for gjennomsnittet for alle restprøvene 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** 
$$k = \frac{Q_{kap}}{\sqrt{t_{kap}}}$$

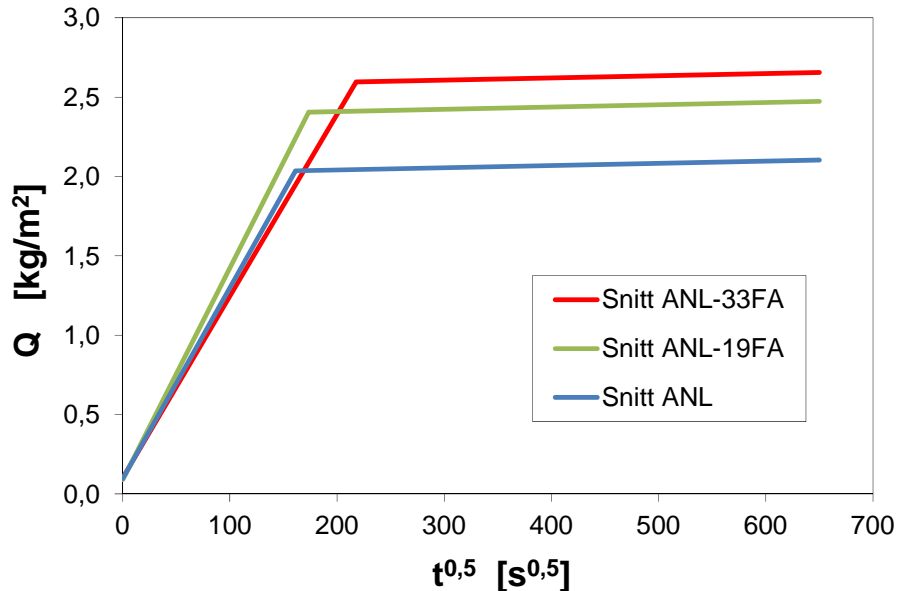
**Likning 7** 
$$m = \frac{t_{kap}}{h^2}$$

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).

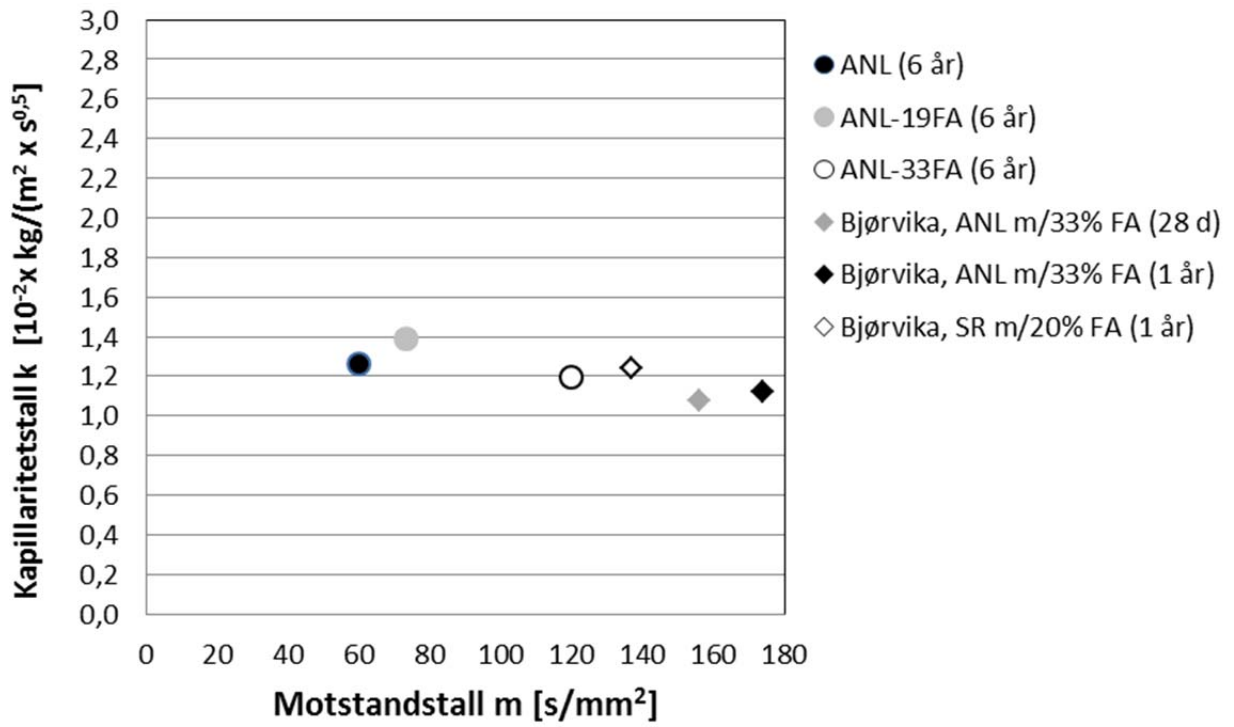


Figur 53 Gjennomsnittresultater kapillær sugeshastighet og porøsitet (6 års betongalder)

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 prøvebehandling. 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+silikastøv 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.

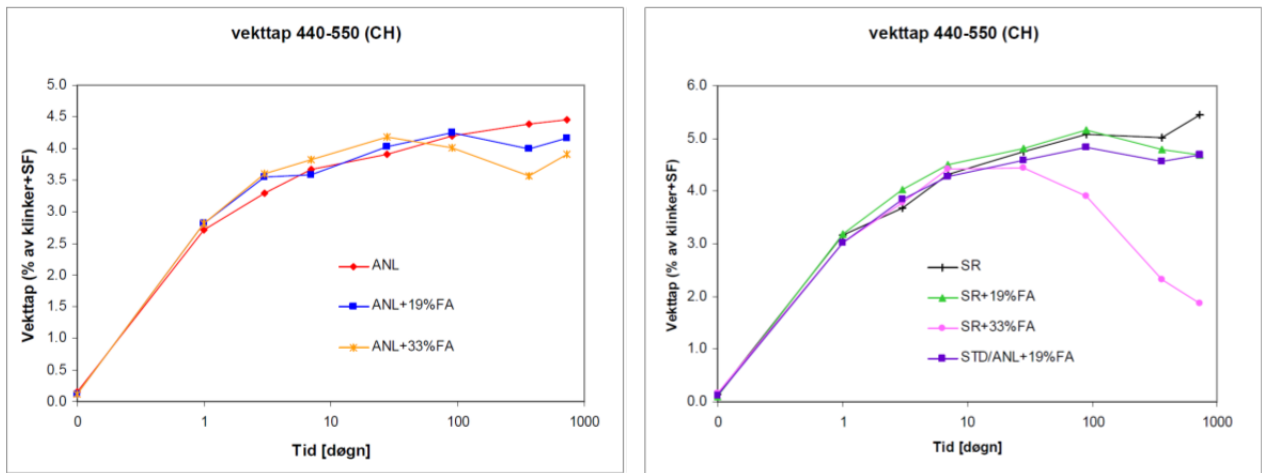
For pastaene i ANL-serien viser resultatene at mengden CH (som % av klinker+silika) kun er marginalt påvirket av FA-dosering fram til ca. 90 døgn (Figur 55 og Tabell 24). Fra 90 døgn til 2 år er det imidlertid en moderat reduksjon av CH-mengden i FA-betongene sammenliknet med ANL. For ANL-19FA og ANL-33FA-blandingene 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.

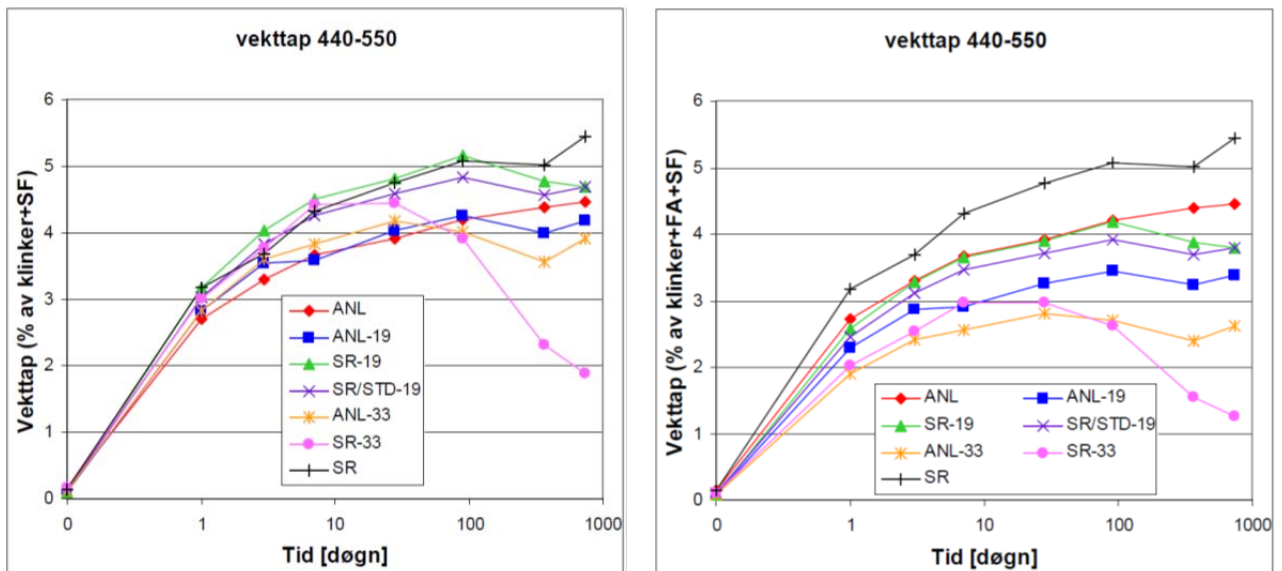
Hvis vi betrakter mengden CH relatert til hele bindemidlet, dvs. til summen av klinker+silikastøv+flygeaske, får vi naturlig nok noe større reduksjoner prosentvis enn de tallene som ble diskutert ovenfor ettersom økt FA «tynner ut» sementen og dermed reduserer mengden produsert CH, se Figur 57.

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 %

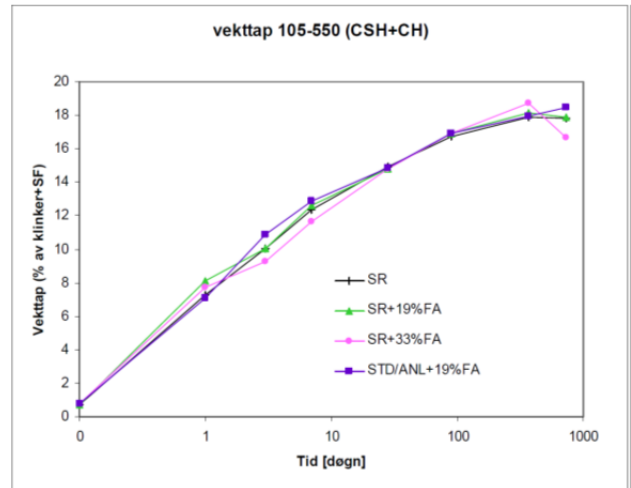
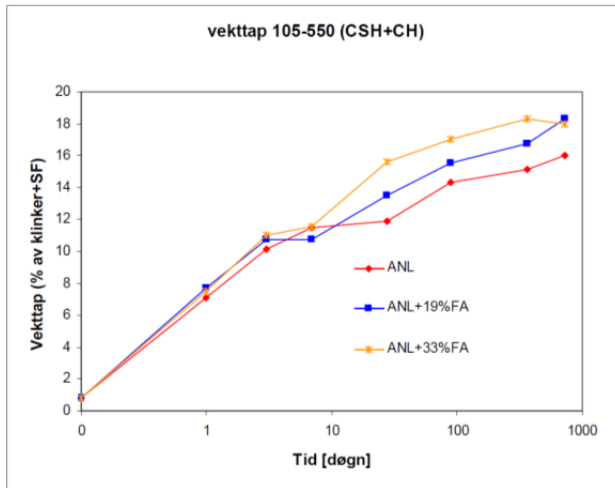
(\*) Anmerkning: På det tidspunktet forsøkene ble gjort (2007-2009) innebar prosedyren for prøvepreparering at de nedknuste pastaprøvene i en periode ble eksponert for luft før innsetting i termogravimetri-instrumentet, og det skjer dermed en viss karbonatisering av prøvene i denne perioden. Det har 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

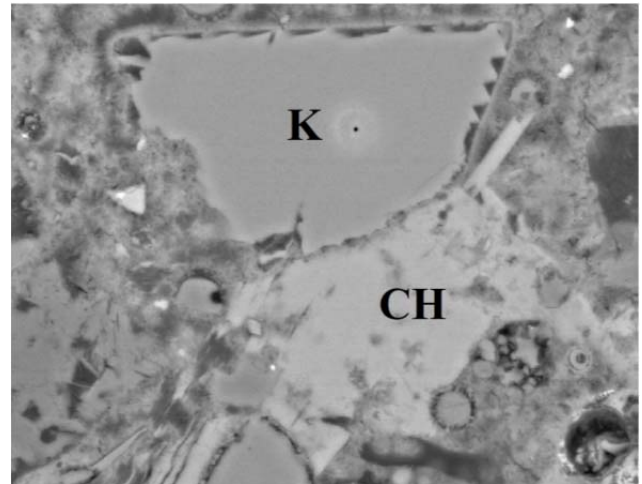
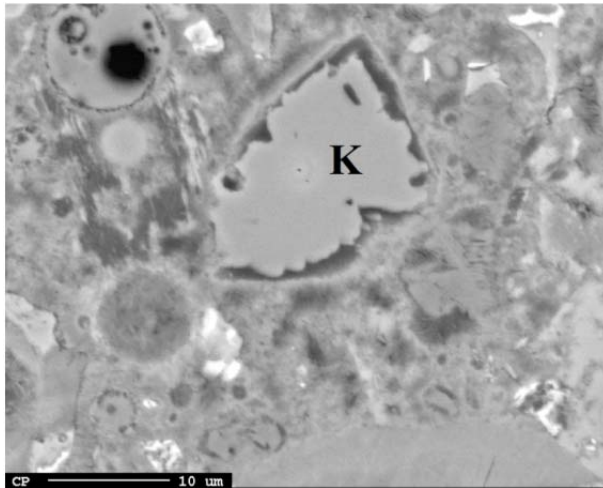
For pastaene i ANL-serien viser resultatene økende mengde kjemisk bundet vann i tiden etter 7 døgn med økende FA-innhold (Figur 58), mens kjemisk bundet vann i SR-serien synes upåvirket av FA-dosering. For SR-serien betyr dette at hydrasjonsproduktene fra FA sin pozzolanreaksjon ikke binder vann utover 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).

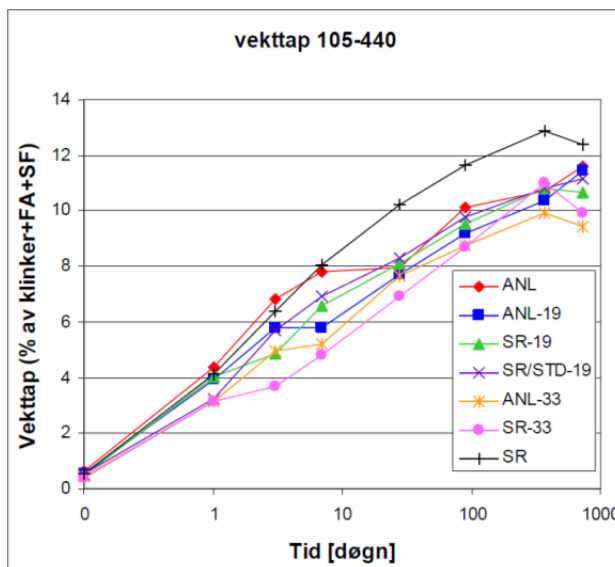




Figur 58 Kjemisk bundet vann relatert til vekttap i % av klinker+silikastøv(SF) mellom 105 °C og 550 °C i ANL-serien (venstre) og SR-serien (høyre). Vekttapet reflekterer mengden kjemisk bundet vann, dvs. mengden dannede hydrater. Merk at riktig benevnelse på blandingen med kvadratisk markør i høyre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

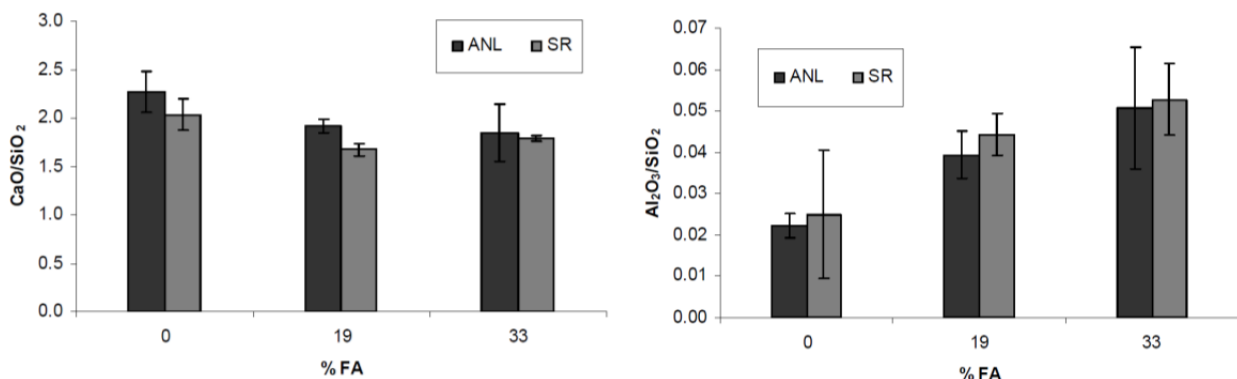
Det forklares i prøvningsrapporten at når sement erstattes med FA er det en trend at Ca/Si-forholdet i CSH-gelen avtar. Samme trend kan ses fra vår undersøkelse fra EDS-analyse etter 2 år, se Figur 61. Avtagende Ca/Si-forhold skjer samtidig med at det er en økning i Al/Si-forholdet i CSH-gelen med FA-dosering. 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 ( $C_3AH_6$ ) / monokarbonat ( $C_4A\bar{C}H_{11}$ ) / ettringitt ( $C_4AS_3H_{32}$ )
ANL+19% FA	Hydrogarnet / monokarbonat / ettringitt
ANL+33%FA	Hydrogarnet / monokarbonat / monosulfat ( $C_4AS\bar{H}_{12}$ ).
SR	Strätlingitt ( $C_2ASH_8$ ) / 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)

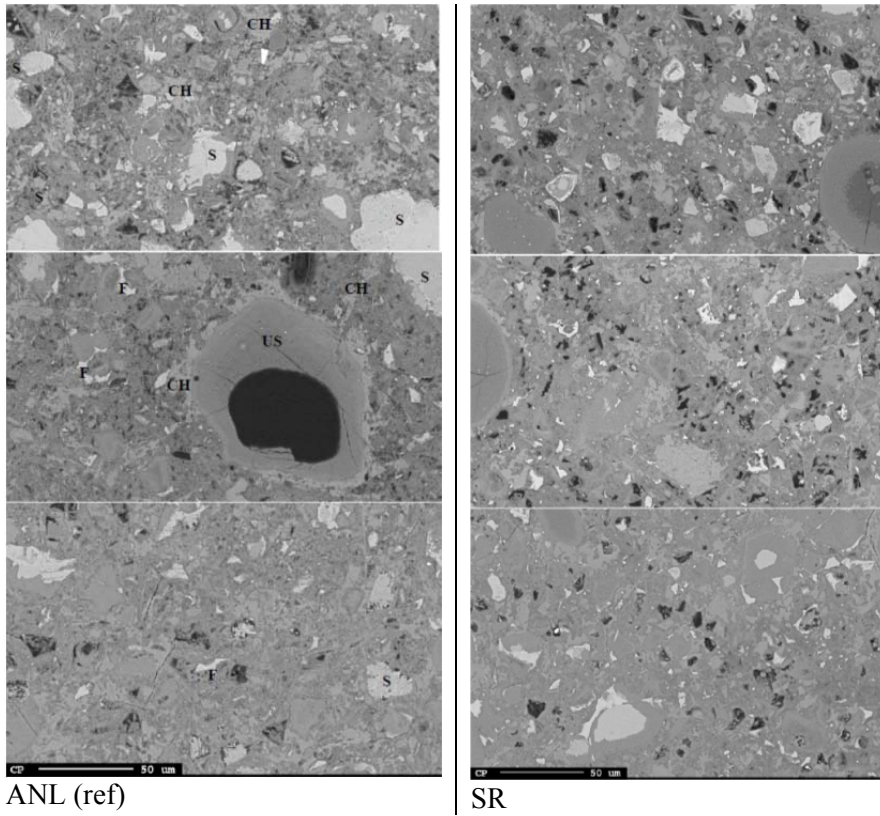
Prøvningsrapporten består av flere bilder med ulike forstørrelser. I figurene nedenfor (Figur 62 - Figur 64) er bilder for samme FA-dosering satt ved siden av hverandre. Prøvenes porøsitet vises som svarte områder på bildene (porøse områder reflekterer lite lys, tette områder reflekterer mye lys), og 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 ( $C_4AF$ ). Bindemidlet CSH er jevnt grå, og sort er porer.

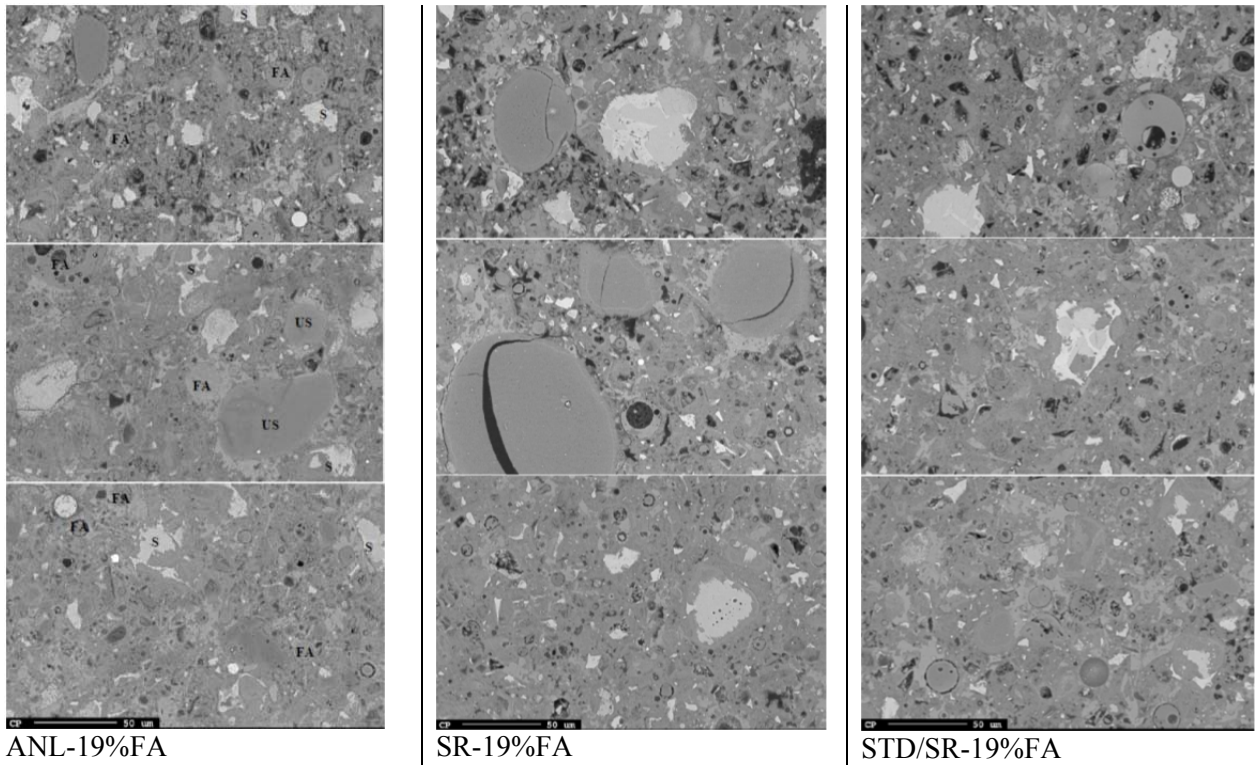
For alle pastaene kan ses en fortetning med økt herdetid, som forventet. Som tidligere nevnt består alle pastaene av udispergert silikastøv som kan ses som runde/ovale områder, gjerne oppsprukket, og noen av dem er delvis hule. Det udispergerte silikastøvet får etter hvert en krans av reagert silika. 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).

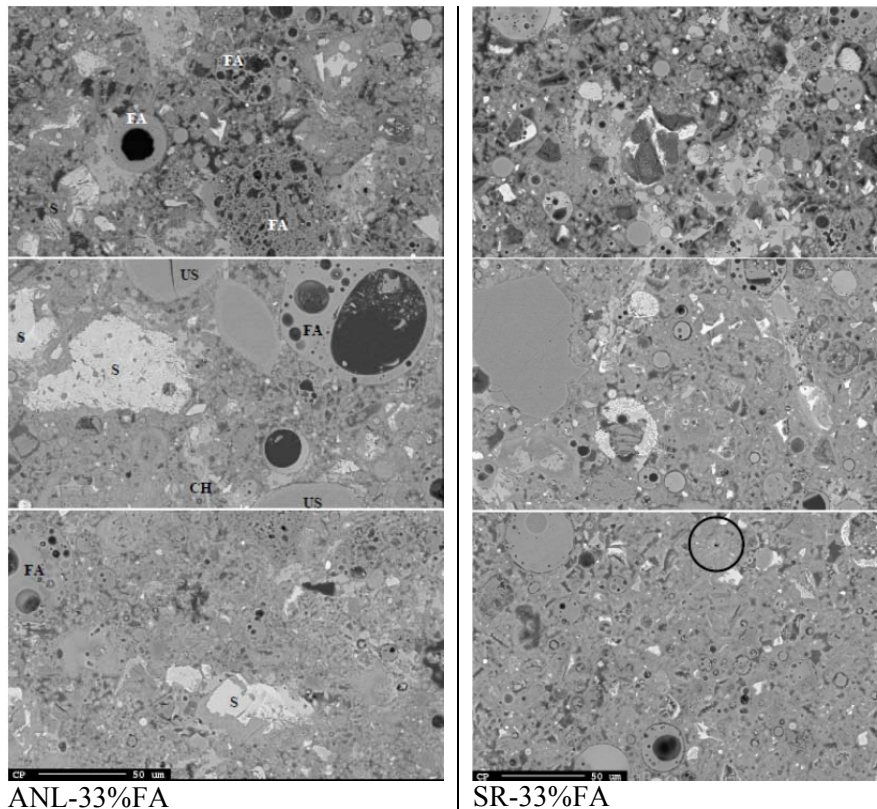
I SR-pastaen (uten FA) er det vesentlige flere Hadley-grains enn de andre pastaene, dette kan ses som irregulære sorte hull. Dette er porer fra små sementkorn som er oppløst ved diffusjon og reaksjon ut i den omkringliggende pastaen. Generelt synes det som alle pastaene som inneholder SR har noe større 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 reaktiv 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 selvtettingsevne 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

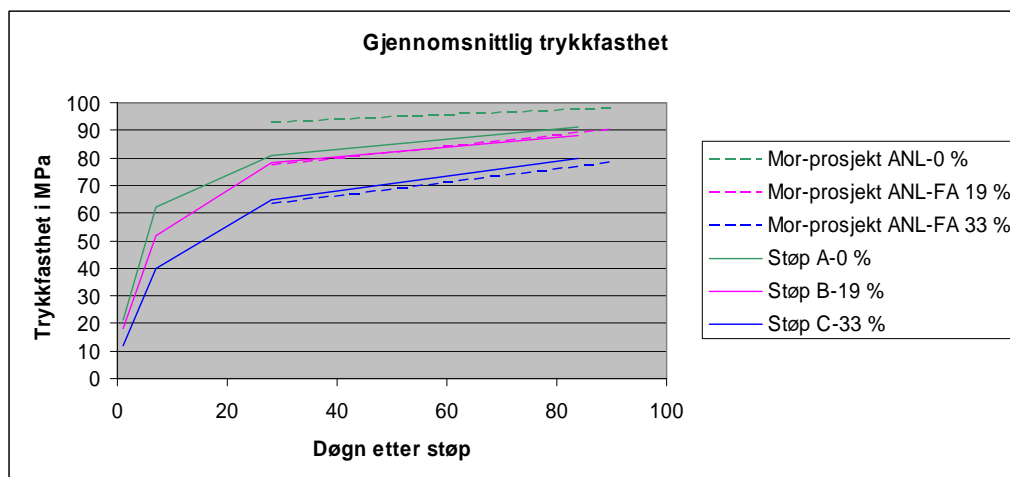
Hovedresultater fra studentoppgaven [2] er gjengitt her. Studentoppgaven sprang ut fra arbeidene i «aktivitet A» og ble samkjørt på den måten at de tre betongreseptene som ble benyttet (ANL, ANL-19FA og ANL-33FA) er de samme. Betongresepter og fersk betongmålinger fra studentoppgaven er gitt i APPENDIX 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.



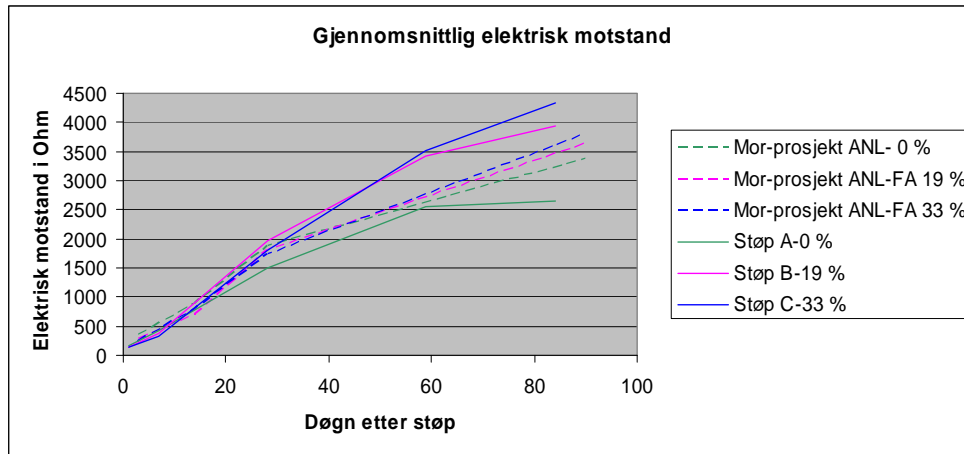
Figur 65: Trykkfasthet, resultater fra studentoppgave («støp») og fra Mor-prosjektet på de samme tre betongene.

### 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

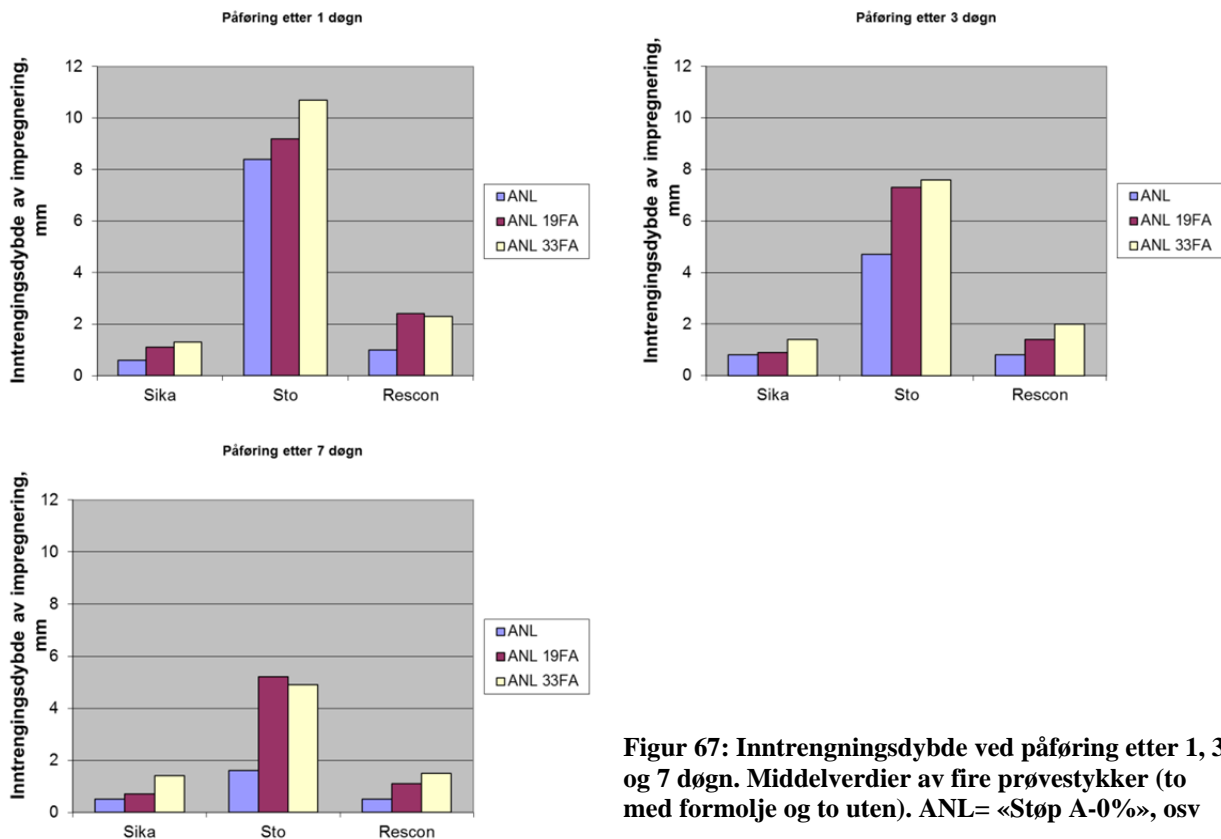
Påføring av hydrofobierende impregnering i tidlig alder kan være fordelaktig med tanke på å oppnå god inntrenging av impregneringen. Ved eventuell bruk av olje i forskalingen kan det imidlertid tenkes at det dannes en «oljefilm» på betongoverflata som reduserer muligheten for inntrenging. For å undersøke 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 halvdeler, påføring av vann på bruddflata og måling av tykkelsen på impregneret/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. Middelerverdi 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 saltpåsprøytingskammeret. Ubehandlede prøvestykker ble eksponert parallelt med de impregnerte prøvestykkene med start eksponering ved 3 døgn 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:

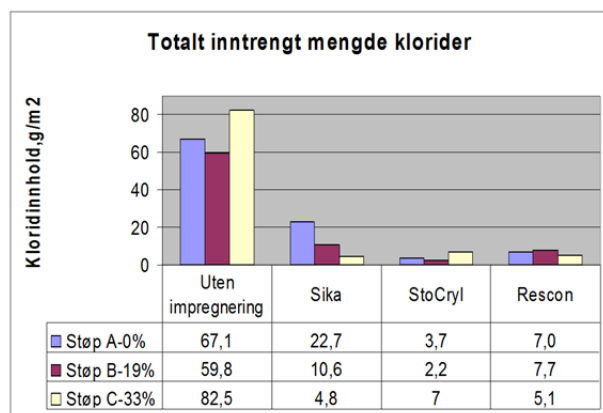
$m_{Cl \text{ tot impregnert}}$  = total inntrengt mengde klorider i impregnerte prøver (middel av tre prøvestykker)

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

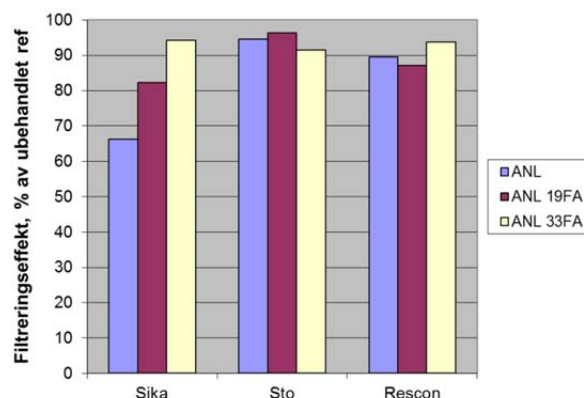
Total mengde inntrengte klorider er vist i Figur 68 og filtreringseffekten i Figur 69. For referansene «uten impregnering» i førstnevnte figur ser vi ingen systematisk effekt av FA-dosering. For NT Build 443-forsøkene (kloriddiffusjon), fra kapittel 5.5.2, var trenden systematisk økt inntrengning med 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

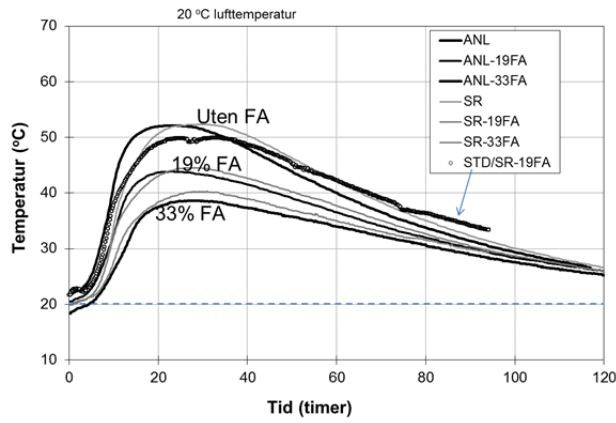
Det ble for hver betong gjort forsøk i to parallelle herdekasser; den ene herdekassa ble lagret ved 20 °C lufttemperatur og den andre ved 38 °C. Lagring ved forhøyet lufttemperatur er en måleteknisk fordel spesielt for betonger med langsom varmeutvikling; varmetapet til omgivelsen reduseres og mer av 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.

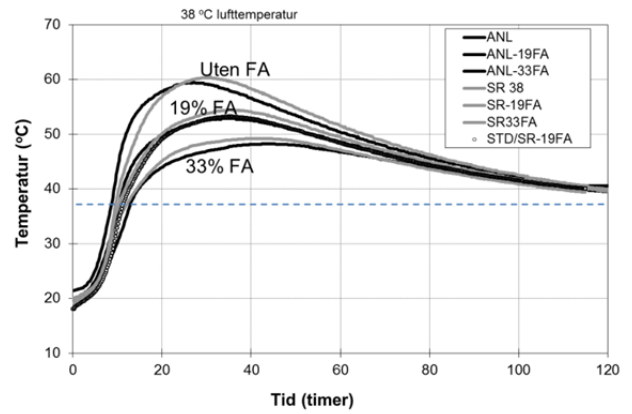
Fra resultatene ser vi at økende FA-dosering ikke overraskende gir mer langsom varmeutvikling og redusert sluttvarme. I gjennomsnitt (Tabell 26) viser resultatene at 19 % og 33 % FA, for både ANL og SR, reduserer adiabatisk temperaturøkning etter 48 timer med henholdsvis ca. 15 % og ca. 30 %, og isoterm 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 ( $Q_{iso,150Mh}$ )

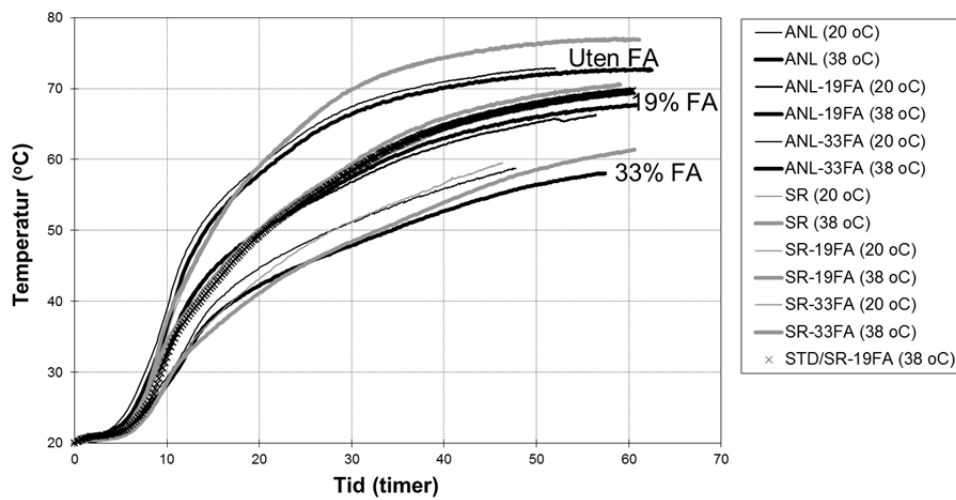
Blanding	Temperatur (°C)		Relativ til uten FA	Varme (kJ/kg)		Relativ til uten FA
	$\Delta T_{ad,48h}$	Snitt		$Q_{iso,150 Mh}$	Snitt	
<b>ANL (20 oC)</b>	52,4	52,0	100 %	323,7	322,2	100 %
<b>ANL (38 oC)</b>	51,6			320,6		
<b>ANL-19FA (20 oC)</b>	44,7	45,1	87 %	288,7	291,3	90 %
<b>ANL-19FA (38 oC)</b>	45,5			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 %



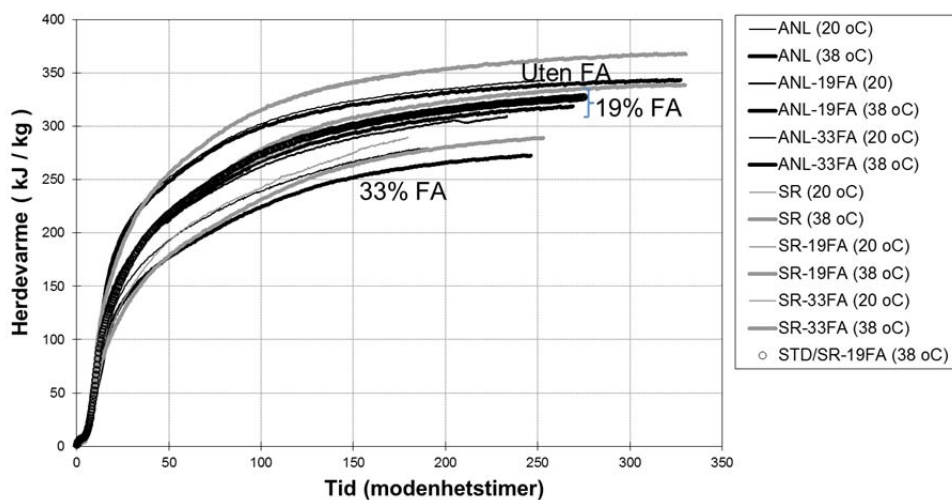
Figur 70 Målt temperaturutvikling i Norcem herdekasseforsøk, 20 °C lufttemperatur



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 døgneseksponeringen. 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



Statens vegvesen  
Vegdirektoratet  
Publikasjonsekspedisjonen  
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO  
Tlf: (+47 915) 02030  
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

**Trygt fram sammen**