

Motstand mot tinesalter og frostskader i betong (8 år)

Effekt av høyt innhold av flygeaske og slag

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 706



Tittel

Motstand mot tinesalter og frostska-der i betong (8 år)

Undertittel

Effekt av høyt innhold av flygeaske og slagg

Forfatter

Øyvind Bjøntegaard

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

16/99627

Rapportnummer

Nr. 706

Prosjektleder

Øyvind Bjøntegaard

Godkjent av

Eva Rodum

Emneord

Betong, flygeaske, slagg, frostmotstand, kloridmotstand, feltforsøk, laboratorieforsøk

Sammendrag

Bestandighetsmessige egenskaper er undersøkt for til sammen 10 betonger, hvorav syv har et masseforhold på 0,39 og tre har 0,44. Effekt av flygeaskemengde (17, 35 og 50%) er undersøkt i kombinasjon med AnlFA-sement. I tillegg er betonger med andre sementtyper (StdFA og Aal) tilsatt flygeaske til totalt 35% undersøkt, samt to betonger med slaggsementer (III/A med 48% slagg og III/B med 75% slagg). Resultater over 4 år fra laboratorie- og 8 år med feltforsøk er rapportert. Følgende egenskaper er bestemt: Trykkfasthet, spesifikk elektrisk motstand, motstand mot karbonatisering, kloridmotstand, frostmotstand og varmeutvikling i herdefasen. Økt kondisjoneringstid (økt karbonatiseringdybde) ga generelt økt frostavskallingen ved den akselererte frostprøvingen. Migrasjonsforsøk ved fire års alder viser lav kloridmigrasjonskoeffisient for alle betongene. Etter 8 års felteksponering ved saltet veg er det fortsatt ikke klare indikasjoner på frostska-der, og mengden inntrengte klorider er meget moderat.

Title

Resistance against deicing salt and frost damage in concrete (8 years)

Subtitle

Effect of high-volume flyash and slag

Author

Øyvind Bjøntegaard

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

16/99627

Report number

No. 706

Project manager

Øyvind Bjøntegaard

Approved by

Eva Rodum

Key words

Concrete, flyash, slag, frost resistance, chloride resistance, field test, laboratory tests

Summary

Durability properties are investigated for totally 10 concretes, of which seven have water-binder-ratio 0,39 and three have 0,44. Effect of flyash content (17, 35 and 50%) is investigated in combination with AnlFA-cement. In addition, two cement types (StdFA and Aal) with totally 35% fly-ash, and two slag cements (48% and 75% slag) are investigated. Results over four years from lab. and 8 years field exposure are reported. The following properties have been investigated: Compressive strength, specific electrical resistivity, resistance against: carbonation, chloride ingress and frost damage, as well as hydration heat evolution during the hardening phase. Increased pre-conditioning time (increased carbonation) generally gave increased frost-scaling in the accelerated frost tests. Migration tests at four years age showed low chloride migration coefficients for all concretes. After 8 years field exposure near winter-salted road there is still no clear indication of frost damage, and the ingress of chlorides are very moderate.

Forord

Rapporten er et resultat av et FoU-samarbeid mellom Statens vegvesen og RISE (tidligere CBI Betonginstituttet) i Borås, Sverige. Fra Statens vegvesen sin side ble prosjektets fire første år finansiert av FoU-programmet Varige Konstruksjoner (2012–2015), den gang tilhørende Trafikksikkerhet-, miljø- og teknologiavdelingen i Vegdirektoratet, og ledet av Tunnel og betongseksjonen. I dag ligger videre oppfølging av prosjektet (feltforsøket v/Rv40) hos seksjon Konstruksjonsteknikk, Myndighet og Regelverk. Se kapittel 1 for mer bakgrunn og informasjon. Sentrale folk ved RISE vedrørende planlegging og utførelse av laboratoriearbeidet, samt rapportering underveis, har vært Elisabeth Helsing, Peter Utgenannt, Ida Gabrielsson og Cathrine Ewertson.

Internt Statens vegvesen arkivnummer: 2014099264 og 16/99627

Innhold

FORORD.....	1
INNHold.....	2
1 BAKGRUNN OG ORGANISERING	4
2 DELRAPPORTER, VEDLEGG OG OPPBYGGING AV RAPPORTEN.....	5
2.1 KOMPLETT LISTE OVER RAPPORTER OG UTVALGTE VEDLEGG	5
2.2 OPPBYGGING AV RAPPORTEN	6
3 FELTSTASJONEN VED RV 40, BELIGGENHET OG KLIMA.....	7
4 BETONGER, PRØVINGSPROGRAM OG BLANDINGER.....	11
4.1 DELMATERIALER	11
4.2 BETONGSAMMENSETNING OG BETONGNAVN (KORTFORM).....	11
4.3 PRØVINGSPROGRAM OG BLANDINGER, LAB OG FELT	12
4.4 PROGRAM FOR FROSTFORSØKENE I LAB	15
5 PARALLELL PRØVNING BLANDING 1 OG 2 – SAMMENLIKNING	17
5.1 FELLES MÅLINGER.....	17
5.2 FERSK BETONG OG –LUFTINNHold	17
5.3 28–DØGNS TRYKKFASTHET	18
5.4 STANDARD FROSTPRØVNING	21
5.5 LEKKASJE UNDER FROSTPRØVNING	22
5.6 AVSTANDSFAKTOR OG SPESIFIKK OVERFLATE.....	23
6 RESULTATER, LABORATORIEPROGRAMMET (BLANDING 2).....	25
6.1 TRYKKFASTHET	25
6.2 VARMEUTVIKLING.....	26
6.3 NATURLIG KARBONATISERING	27
6.4 SALT–FROSTAVSKALLING; VED ULIK FORKONDISJONERING	28
6.4.1 Frostavskalling, alle resultater.....	28
6.4.2 Frostavskalling mot naturlig karbonatiseringsdybde.....	31
6.4.3 Karbonatisering og rissomfang før og etter frosteksponeering.....	32
6.5 KLORIDMIGRASJON	33
6.6 SPESIFIKK ELEKTRISK MOTSTAND	35
7 RESULTATER, FELTFORSØKET (BLANDING 1).....	37
7.1 VOLUMENDRING (YTRE FROSTSKADER)	37
7.2 ULTRALYDHASTIGHET (INDRE FROSTSKADER)	39

7.3	KARBONATISERING	40
7.4	FUKTPROFIL (RF)	42
7.5	KLORIDINNTRENGNING	43
7.6	FELTPRØVER, STATUS ETTER 8 ÅR.....	46
8	OPPSUMMERING.....	47
9	FROSTMOTSTAND – ANDRE STUDIER.....	51
9.1	GENERELT	51
9.2	ANDRE PROSJEKT, RISE–TRAFIKVERKET	51
10	REFERANSER.....	54

Vedlegg

VEDLEGG 1 Delmaterialer

VEDLEGG 2 Blandedatoer, lagring og prøvningsmetoder lab og felt

VEDLEGG 3 Oppfølging av trykkfasthetsresultatene

VEDLEGG 4 RISE sluttrapport etter 4 år

VEDLEGG 5 Rapport feltprøver etter 4 år

VEDLEGG 6 Frostprøvning (alternativ 5), inkl. figurer med alle frostresultatene

VEDLEGG 7 Tynnslip før og etter frostprøvning (alternativ 5), mikroskopi

VEDLEGG 8 XRD før frostprøvning (alternativ 5)

VEDLEGG 9 XRD etter frostprøvning (alternativ 5)

VEDLEGG 10 Tabeller med resultatene fra alle frostforsøkene i lab

VEDLEGG 11 RISE-rapport feltprøving etter 8 år

1 Bakgrunn og organisering

Rapporten gir alle resultater fra et 4-årig lab.program, samt et samtidig feltforsøk hvor det nå er rapportert 8-års feltresultater. De første 4 årene (oppstart i 2014) var organisert som et FoU-samarbeidet mellom Statens vegvesen og RISE (tidligere CBI Betonginstituttet) i Borås, Sverige. Samarbeidet gjaldt bestandighetsprøving i laboratorium og felt. I feltstasjonen ved Rv40 nær Borås er prøvene tinesalt- og frostekspontert i vinterhalvåret.

Undersøkelsene omfatter 10 betonger med ulik bindemiddelsammensetning. Betongenes bindemiddelsammensetning går utover grensene som er gitt i dagens regelverk med hensyn til mengde flygeaske (FA) og slagg. Økt innhold av slike (sement-)erstatningsmaterialer reduserer betongens CO₂-avtrykk pga. redusert mengde sementklinker. Økende avgifter på CO₂-utslipp og et generelt ønske om å lage miljøvennlige betongløsninger forventes å være drivere i retning økt bruk av erstatningsmaterialer framover.

Tidligere er følgende rapport med innledende resultater utgitt: [Statens vegvesen rapport nr. 515: Motstand mot tinesalter og frostskader i betong. Varige konstruksjoner, mai 2016.](#) En rapport med resultater fra lab. og felt etter 4 år ble utgitt i 2021 med rapportnr. 706. Denne versjonen er trukket tilbake og erstattet med herværende rapport hvor resultatene fra felt etter 8 års eksponering er innarbeidet.

Felteksponeeringen og -registrering i tiden etter 4 år utføres som betalte oppdrag. Det er nå gjort feltregistreringer etter 1, 4 og 8 år. Det som nå er igjen av feltprøvene tillater en siste framtidig registrering.

Hovedhensikten med undersøkelsene har vært både å få data fra akselererte bestandighetsforsøk i laboratoriet og med tiden etablere en relasjon mellom disse og virkelig oppførsel fra feltforsøk. Høye doseringer av FA og slagg er kjent å gi redusert frostmotstand i akselererte laboratorieforsøk, men for samme egenskap under naturlig nordisk klima i felt er det lite erfaring. For betonger med høye FA-doseringer gir akselerert klorideksponering i laboratoriet økt kloridinntrengning i tidlig fase fordi herde- og tetthetsutviklingen er langsom i starten. En vesentlig del av herdeprosessen skjer imidlertid på lengre sikt (måned/år). Naturlig klorid- og frosteksponeering i felt over flere år gir dermed kunnskap om de antatte gunstige langtidsegenskapene vil (over)kompensere for tidligegenskapene som lab.forsøk i større grad fanger opp. Motstanden mot klorider og frost er viktige egenskaper for betongens evne til å beskytte innstøpt armering og til å opprettholde sin homogenitet og fasthet. Hvor går smertegrensen for mengde av erstatningsmaterialer når det gjelder disse egenskapene i naturlig nordisk klima og ved saltet veg; dette er en viktig hovedproblemstilling.

Hver av de 10 betongene ble produsert i tre omganger, hhv. i november 2014 (støping av feltprøver), våren 2015 (støping av laboratorieprøver) og i perioden november 2015 – februar 2016 (dokumentasjon av varmeutvikling). På tross av nominelt identisk betongsammensetning ble det registrert forskjeller i trykkfasthetsresultatene mellom blanding 1 og blanding 2, noe som ga ekstra utfordringer ved vurdering av resultatene.

2 Delrapporter, vedlegg og oppbygging av rapporten

2.1 Komplette liste over rapporter og utvalgte vedlegg

Rapportering fra RISE er gjort etappevis etter hvert som undersøkelsene er utført. Nedenfor er en komplett liste med rapporter, og en del utvalgte er gitt som vedlegg i denne rapporten – som angitt i punktlisten nedenfor. Når det gjelder rapport nr. 5, 6 og 7 i punktlisten så omhandler disse ekstra undersøkelser som ble igangsatt av RISE for å undersøke observerte forskjeller i trykkfasthet mellom blanding 1 og 2. Rapport nr. 8 i listen (VEDLEGG 4) er RISEs sluttrapport etter FoU-samarbeidet de fire første årene. Rapport 17 (VEDLEGG 17) er RISEs rapport hvor feltresultatene til og med 8 år er samlet.

Resepter, blanding, utstøping, initialmålinger lab/felt, utsetting i felt:

1. CBI Uppdragsrapport 4P00511A: Provningsrapport A, Omgång 1, 2016-02-18
2. CBI Uppdragsrapport 4P00511B: Provningsrapport B, Omgång 2, 2016-01-26
3. CBI Uppdragsrapport 4P00511: Provningsrapport C, Omgång 3, 2017-06-28
4. CBI Uppdragsrapport 4P00511A: Rapport 1, 2015-05-13 (statusrapport: støping, initiell prøvning lab. og felt, og grunnlag for SVV-rapport nr. 515, mai 2016)

Gransking av ulik fasthet i blandeomgang 1 og 2:

5. CBI Uppdragsrapport 6P00109: Provningsrapport D Provningsresultat från tryckhållfasthet med olika lufthalt, 2017-10-31
6. CBI rapport 6P00109TnnsI: Tunnslianalys av prover på grund av hållfasthet, 2017-03-15
7. RISE rapport 6P00109-S: Uppföljning av tryckhållfasthetsresultat – Sluttrapport, 2019-02-14 (VEDLEGG 3)

4-årsrapportering og sluttrapport:

8. RISE rapport 4P00511 Rapport 2: Motstånd mot tösalter och frostsador i betong; fält och laboratorieförsök på 10 sammansättningar – Blandningsparametrarnas inverkan på egenskaperna vid provning och i fält (Sluttrapport etter 4 år), 2019-11-12 (VEDLEGG 4)
9. RISE rapport 4P00511-F: Provning av provkroppar – 4 års resultat, 2019-06-05
10. RISE rapport 4P00511-F: Provning av provkroppar från Rv 40 efter 4 vintrar (VEDLEGG 5)

Løpende rapportering underveis:

11. RISE rapport 4P00511B.1: Kompletterande resultat för saltfrostprovning, alternativ 5 (1 års forkondisjonering), 2017-12-04 (VEDLEGG 6; inneholder samlefigurer for alle frostforsøkene)
12. RISE rapport 4P00511: Provning av tryckhållfasthet och elektrisk motstånd – 2 års resultat, 2017-04-12
13. CBI rapport 6P00109TnnsI: Tynnslianalys av prover före och efter frostprovning (1 år forkondisjonering), 2017-04-10 (VEDLEGG 7)
14. CBI rapport/notat: XRD, 2016-11-08. Før frosteksponeering, etter 1 år forkondisjonering (VEDLEGG 8)
15. CBI rapport/notat: XRD, 2016-01-30. Etter frosteksponeering, etter 1 år forkondisjonering (VEDLEGG 9)
16. CBI Uppdragsrapport 4P00511B.2: Provningsrapport B Naturlig karbonatisering efter 1 år, 2017-05-15
17. RISE rapport P116351: Uppdrag provkroppar placerade vid Riksväg 40 Borås (8 år, VEDLEGG 11)

2.2 Oppbygging av rapporten

Rapporten søker å gi en samlet framstilling av undersøkelsene og resultatene. Det er gjort egne vurderinger av resultatene.

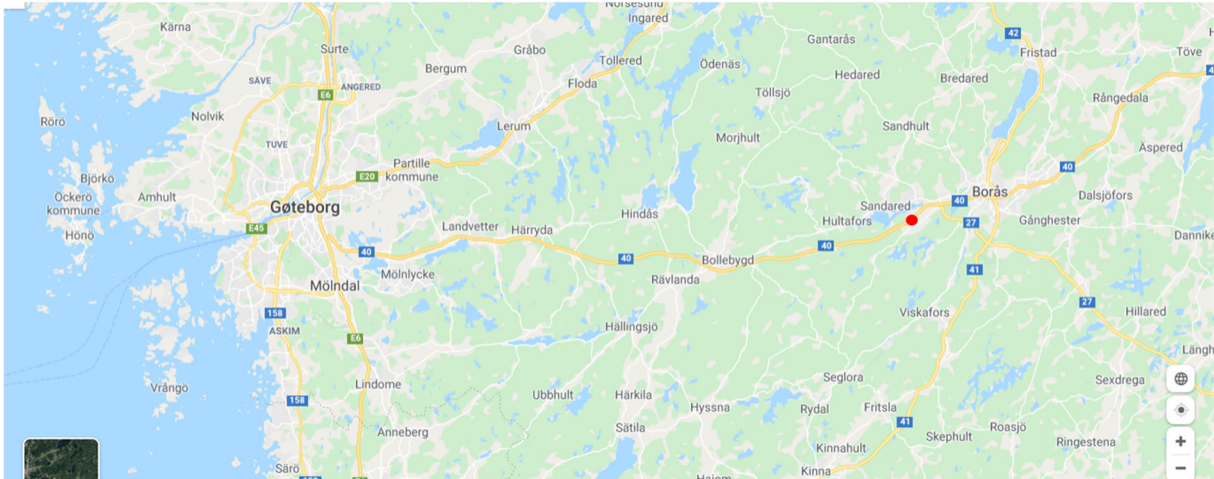
Innledningsvis presenteres feltstasjonen ved Rv40, samt værdata som ble mottatt fra det svenske Trafikverket i 2020, via RISE (kap. 3). Deretter gis en oversikt over betonger og prøvningsprogram for laboratorie- og feltprogrammet (kap. 4).

Presentasjonen av resultatene starter med en sammenlikning av resultater fra den parallelle lab.prøvingen som ble gjort på prøver fra de to nominelt identiske blandingsene (kalt blanding 1 og 2) for hver betong; dette spesielt med tanke på at det ble registrert til dels store avvik i fasthet (kap. 5).

Resultatene fra laboratorieundersøkelsene (fra blanding 2) er diskutert i kap. 6 og feltundersøkelsene (fra blanding 1) i kap.7, og det gis en oppsummering i kap. 8.

3 Feltstasjonen ved Rv 40, beliggenhet og klima

Den aktuelle feltstasjonen er benyttet av RISE i mer enn 20 år. Feltstasjonen ligger 7 km vest for Borås sentrum, se Figur 1. Avstanden fra RISE til feltstasjonen er 6 km. Rv40 er en 4-felts motorveg og feltprøvene ligger på utsiden av autovernet, se Figur 2 og Figur 3. Veien saltes om vinteren.



Figur 1 – Lokalisering av feltstasjonen ved Rv40 (rød sirkel). Kilde: www.google.se/maps



Figur 2 – Bilde av feltstasjonen fra veggside, fra avstand (øverst) og nærbilde (nederst). De store prøvestykkene er skjult av autovernet. Kilde: www.google.se/maps

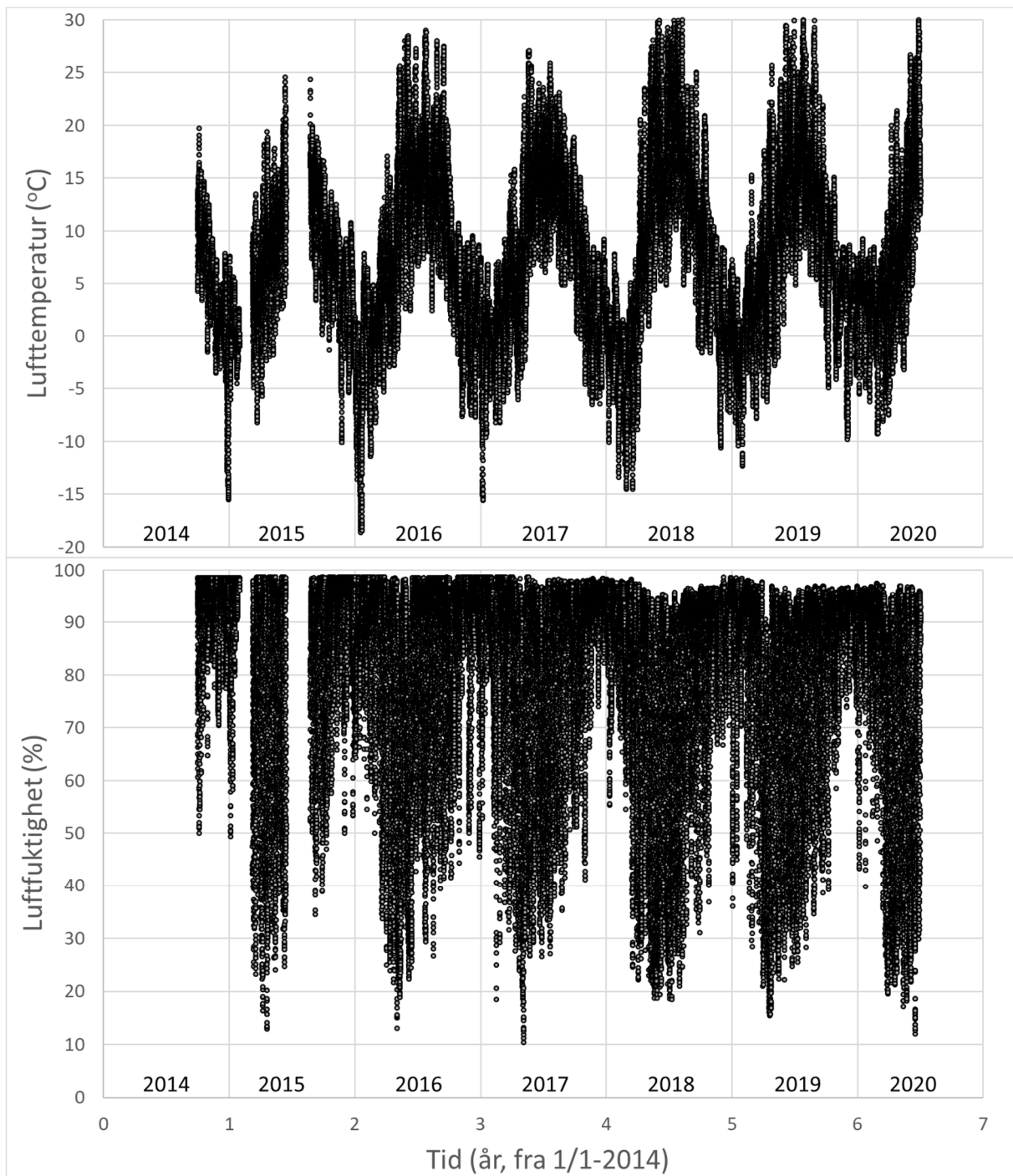


Figur 3 – Bilder fra utsettingen av de små (nærmest autovernet) og store feltprøvene. Foto: RISE

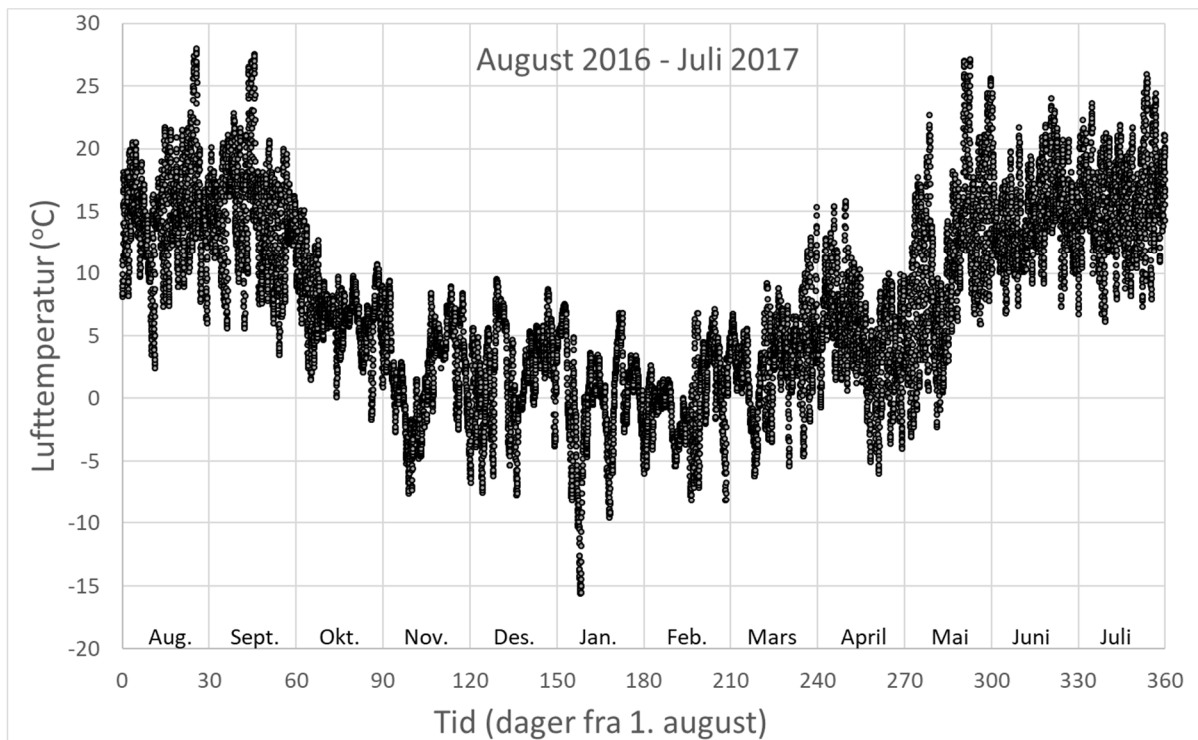
Det svenske Trafikverket foretar klimamålinger nær feltstasjonen og gjør en måling så ofte som hver halvtime hele året. Figur 4 viser mottatte data for lufttemperatur og luftfuktighet fra oktober 2014 til juli 2020. Figur 5 viser data kun for ett år, fra sommer 2015 til sommer 2016.

Måledataene viser at perioden med temperaturer under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ fra 2014–2020 begynner hver vinter i overgangen september/oktober og varer oftest til uti mai. Temperaturen passerer henholdsvis $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ved fallende temperatur) mange ganger hver vinter, se Tabell 1. Temperaturer under $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ måles normalt noen ganger hver vinter, og bare unntaksvik under $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

I tørre perioder, mest i sommerhalvåret, kommer luftfuktigheten ned til typisk rundt 20%.



Figur 4 - Målt lufttemperatur (øverst) og luftfuktighet (nederst) ved feltstasjonen fra 1. oktober 2014 til juli 2020 (kilde: Trafikverket)



Figur 5 - Målt lufttemperatur ved feltstasjonen 2015–2016 (kilde: Trafikverket)

Tabell 1 Nøkkeltall for hver vinter, basert på mottatte værdata

Vinter	Laveste temperatur (°C)	Antall ganger temperaturen sank under angitt nivå		
		0 °C	-5 °C	-10 °C
2014–2015 ^{*)}	-15,5	48	6	3
2015–2016	-18,6	52	25	12
2016–2017	-15,6	50	24	2
2017–2018	-14,5	40	29	9
2018–2019	-12,3	71	24	5
2019–2020	-9,8	52	22	0

^{*)} Data for februar mangler

4 Betonger, prøvingsprogram og blandinger

4.1 Delmaterialer

Følgende delmaterialer er benyttet i betongene (sementene er gitt kortnavn som angitt):

Norcem Anleggsement FA (CEM II/A-V 42,5 N), med 17 % FA – AnIFA

Norcem Standardsement FA (CEM II/B-M 42,5 R), med 18 % FA – StdFA

Aalborg Portland Rapidssement (CEM I 52,5 N) – Aal

Cemex CEM III/A, med 48% slagg – III/A

Cemex CEM III/B, med 75% slagg – III/B

Flygeaske NS-EN 450-1 kategori A

Elkem silikastøv 940U

Årdal 0-8 mm sand og 8-16 mm stein.

Mapeair 25: Luftinnførende tilsetningsstoff, uttynnet 1:9 før blanding

Dynamon SX-23: Superplastiserende tilsetningsstoff

Mer informasjon om delmaterialene er gitt i VEDLEGG 1.

4.2 Betongsammensetning og betongnavn (kortform)

Betongenes bindemiddelsammensetning er gitt i Tabell 2. Alle betongene har 4 vekt-% silikastøv av total bindemiddelmengde. Total flygeaske (FA)- eller slaggmengde er også oppgitt, og for de med FA er alle betongene, unntatt betong 1 «AnIFA», tilsatt FA under blanding. k_{FA} -faktor for tilsatt FA i blandeprosessen (k_{FA}) er 0,7, med delvis unntak for betong 5 «Aal35» hvor de første 20% FA (av totalt 35%) er gitt $k_{FA}=1,0$. Betongene er nummerert og gitt navn (kortform) etter sementtype og FA-innhold (der det er tilsatt ekstra flygeaske). Syv av betongene har et masseforhold på 0,39 og tre har 0,44, hvor sistnevnte i det etterfølgende er gitt tilleggsbenevnelsen «LV» (lavvarme).

Betongene har et proporsjonert pastavolum på 325 liter, og matriksvolum 347 liter. Tilsiktet luftinnhold i fersk betong var 4%. Blandereseptene er gitt i Tabell 3.

Tabell 2 Betongnavn (kortform) og bindemiddelsammensetning (% er vekt av tot. bindemiddelmengde)

Betong nr.	Betong- navn	Sement- type	Masse- forhold	Silika- støv	Total FA eller slagg
1	AnIFA	AnIFA	0,39	4 %	17 % FA
2	AnIFA35	AnIFA	0,39	4 %	35 % FA
3	AnIFA50	AnIFA	0,39	4 %	50 % FA
4	StdFA35	StdFA	0,39	4 %	35 % FA
5	Aal35	Aal.	0,39*)	4 %	35 % FA
6	IIIA	III/A	0,39	4 %	48% slagg
7	IIIB	III/B	0,39	4 %	75 % slagg
8	LV AnI50	AnIFA	0,44	4 %	50 % FA
9	LV IIIA	III/A	0,44	4 %	48% slagg
10	LV IIIB	III/B	0,44	4 %	75 % slagg

*) $k_{FA}=1,0$ opptil 20% FA, deretter $k_{FA}=0,7$ for videre tilsetning opp til 35%.

Tabell 3 Betongresepter

Nr	Betong- navn	Sementtype	Sement- mengde (kg/m ³)	Tilsetnings- materiale (kg/m ³)		Fritt vann (kg/m ³)	Tilslag, Årdal (kg/m ³)	
				Silika	Flygeaske		0/8 mm	8/16 mm
1	AnlFA	Norcem AnlFA ¹⁾ (CEM II/A-V 42,5 N)	414,3	17,3	-	175	907	807
2	AnlFA35	Norcem AnlFA (CEM II/A-V 42,5 N)	330,8	17,6	91,6	167,8	907	807
3	AnlFA50	Norcem AnlFA (CEM II/A-V 42,5 N)	258,6	17,9	170,7	161,4	907	807
4	StdFA35	Norcem StdFA ²⁾ (CEM II/B-M 42,5 R)	334,4	17,6	87,5	168,0	907	807
5	Aal35	Rap. Aalborg cement (CEM I 52,5 N)	276,9	17,7	147,8	169,1	907	807
6	IIIA	Cemex CEM III/A	414,7	17,3	-	175,2	907	807
7	IIIB	Cemex CEM III/B	411,7	17,2	-	174,0	907	807
8	LV Anl50	Norcem AnlFA (CEM II/A-V 42,5 N)	243,5	16,8	160,7	171,5	907	807
9	LV IIIA	Cemex CEM III/A	387,7	16,2	-	184,8	907	807
10	LV IIIB	Cemex CEM III/B	385,0	16,0	-	183,5	907	807

¹⁾AnlFA-sementen har et FA-innhold på 17%. ²⁾StdFA-sementen har et FA-innhold på 18%

4.3 Prøvningsprogram og blandinger, lab og felt

Det ble gjort tre blandinger av hver av de 10 betongene:

- Fra blanding 1 ble feltprøvene produsert (+ prøver for begrenset lab-program), satsvolum 160 l og blandet 3.-11. november 2014 (og utplassert desember 2014).
- Fra blanding 2 ble prøvene for laboratorieprogrammet produsert, satsvolum 130 l og blandet februar-april 2015.
- Fra blanding 3 ble det kun laget prøver for måling av varmeutvikling, satsvolum 20 l og blandet november 2015 - februar 2016.

Oversikt over prøvningsprogrammet er gitt i Tabell 4. Indeks 1, 2 og 3 angir henholdsvis blanding 1, 2 og 3. Blanding 1 og 2 var med luftinnførende tilsetningsstoff, mens blanding 3 var uten tilsatt luft. Ferske betongegenskaper ble i tillegg målt (konsistens, luftinnhold, densitet, temperatur). RISEs beskrivelse av prøvningsmetodene er gjengitt i VEDLEGG 2.

Som indikert av indeksene i Tabell 4 ble det gjort noe parallell lab.prøving fra blanding 1 og 2, dette gjelder trykkfasthet, luftporestrukturanalyse og standard frostprøving. En sammenlikning av disse resultatene er gjort i kapittel 5. Det ble observert til dels store avvik i trykkfasthetsresultatene mellom blanding 1 og 2 for noen av betongene. Sammenlikningen er utført i lys av dette.

Samtlige feltprøvestykker ble første døgnet lagret i sine respektive former på en trepall, dekket med plastfolie og i et klimastyrt rom med 20 ± 2 °C og 40 - 80 % RF. Alle prøvestykkene ble avformet etter ett døgn.

De store prøvestykkene ble så dekket med fuktig duk i 7 døgn, deretter i romklima fram til 28 døgn alder. Prøvestykkene ble da flyttet utendørs i påvente av utplassering ved Rv 40.

De små prøvestykkene (150 mm terninger) ble lagret i vann i 7 døgn, deretter i romklima fram til 28 døgn. De ble så sagt i to, til halve terninger, det ble gjort initialmålinger og senere utplassering ved Rv 40 samtidig med utplasseringen av de store prøvestykkene.

Fram til nå er registrering av feltprøvenes tilstand utført i henhold til Tabell 5, dvs. etter 1, 4 og 8 års felteksponeering (samt initialmålinger før utsetting). Detaljert program for frostprøvingen i lab gis i etterfølgende kapittel.

Tabell 4 Overordnet prøvningsprogram (indeks angir blandingsnr.)

Prøving / registrering	28 d	45 d	90 d	1 år	2 år	4 år	8 år	Går videre
Felteksponteerte prøver ved Rv40	X ₁			X ₁		X ₁	X ₁	X ₁
Trykkfasthet (inkl. densitet)	X ₁₊₂		X ₂		X ₂	X ₂		
Naturlig karbonatisering (ute, beskyttet mot regn)				X ₂		X ₂		
Elektrisk motstand	X ₂		X ₂		X ₂	X ₂		
Kloridmigrasjon (RCM)	X ₂		X ₂			X ₂		
Luftporestrukturanalyse	X ₁₊₂							
Frostprøving								
- Standard metode	X ^{*)} ₁₊₂	X ₂	X ^{*)} ₂	X ^{*)} ₂				
- Forlenget kondisjonering		X ₂	X ^{*)} ₂					
- Kondisjonering siste 7 d i 1% CO ₂		X ₂	X ^{*)} ₂					
Tynnslip/mikroskopi og XRD før og etter frostforsøket (5 betonger)				X ^{*)} ₂				
Varmeutvikling i herdefasen	X ^{**)} ₃							

*) Frostprøving: For termin 28 d er frysestart ved 31 døgn, for termin 90 d er frysestart ved 108 døgn, og for termin 1 år er frysestart ved 388 døgn.

**) Varmeutvikling er målt fra utstøping og i en uke

Tabell 5 Program for feltprøvene (blanding 1)

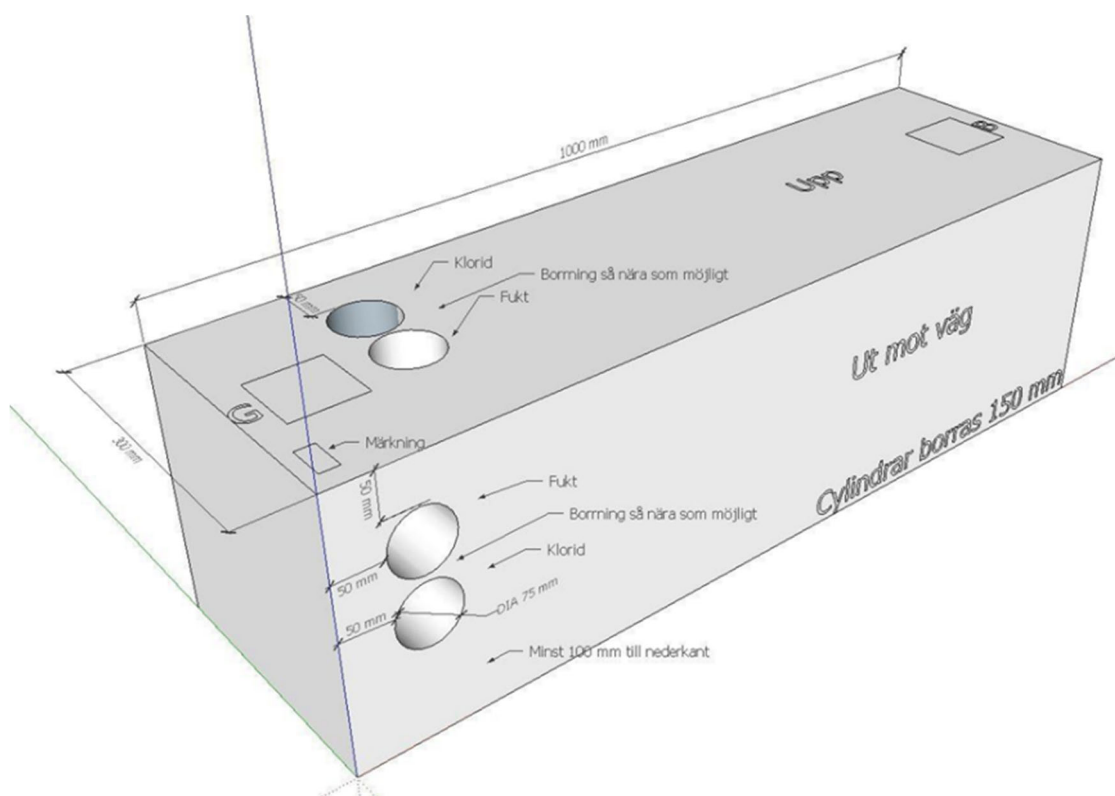
Tidslinje	Målinger
Før utplasering (høst 2014)	<u>Små prøvestykker (3 stk halve terninger, 75 x 150 x 150 mm):</u> Initialmåling: Ultralyd, volumbestemmelse, visuell vurdering
Etter 1 år ved Rv40 (2015)	<u>Store prøvestykker (1 stk 300 x 300 x 1000 mm):</u> Klorid- og fuktprofil <u>Små prøvestykker:</u> Indre og ytre frostskafer (ultralyd, volumbestemmelse, visuell vurdering)
Etter 2 og 3 år (2016 og 2017)	Ingen registrering
Etter 4 år (2018)	Tilsvarende som ved 1 år
Etter 5, 6 og 7 år (2019–2021)	Ingen registrering, årlig leie
Etter 8 år (2022)	<u>Store prøvestykker:</u> Kloridprofil og karbonatiseringsdybde (ikke fuktprofil) <u>Små prøvestykker:</u> Tilsvarende som ved 1 år
Fra 9 år (2023–)	Ingen registrering, årlig leie fram til siste feltregistrering

Tabell 6 Merking av feltprøvestykkene

Betong nr.	Bindemiddel	Merking	
		Store prøver riksväg 40 ¹⁾	Små prøver riksväg 40 ²⁾
1	AnlFA	N11VK1	N11VF1-3
2	AnlFA35	N12VK1	N12VF1-3
3	AnlFA50	N13VK1	N13VF1-3
4	StdFA35	N14VK1	N14VF1-3
5	Aal35	N15VK1	N15VF1-3
6	III/A	N16VK1	N16VF1-3
7	III/B	N17VK1	N17VF1-3
8	LV AnlFA50	N18VK1	N18VF1-3
9	LV III/A	N19VK1	N19VF1-3
10	LV III/B	N110VK1	N110VF1-3

1) Store prøvestykker (plyfaform) 300 x 300 x 1000 mm

2) Små prøvestykker (stålform) 150 x 150 x 150 mm (sagde halve terning benyttes i felt)



Figur 6 – Stort feltprøvestykke, med boreanvisning. Ved 8-årsterminen ble kjernen for fuktprofil i stedet brukt til måling av karbonatiseringsdybde

4.4 Program for frostforsøkene i lab

Prøvningsprogrammet for frostprøving i lab ble utarbeidet av RISE med henblikk på å undersøke effekten av lagring/forkondisjonering på den etterfølgende frostavskallingen. Prøvene ble kondisjonert på seks ulike måter/alternativer, se Tabell 7, alle med start forkondisjonering fra 21 døgns alder i klimarom med 20 ± 2 °C og 65 ± 2 % RF. Normert («Norm») prøvning er standardmetoden (med 7 døgns forkondisjonering), og denne ble gjennomført både for blanding 1 og 2 som nevnt tidligere. I alternativ 2 og 4 ble prøvestykkene lagret i kammer med høyt CO₂-innhold (1%) siste uka før oppstart frosteksponeering.

Tabell 7 Kondisjonering av prøvestykkene før salt-frosteeksponering (se VEDLEGG 4)

Kondisjoneringsalternativ		Forklaring ^{*)}
Blanding 1	Norm	I henhold til SS 137244. Saging etter 21 døgn, kondisjonering i 7 døgn fram til vanning og frysestart ved 31 døgn alder.
Blanding 2	Norm	I henhold til SS 137244. Saging etter 21 døgn, kondisjonering i 7 døgn fram til vanning og frysestart ved 31 døgn alder.
	Alt. 1, Kond 21 d	Saging etter 21 døgn, kondisjonering i 21 døgn fram til vanning og frysestart ved 45 døgn alder.
	Alt. 2, Kond 21 d (7d i 1% CO2)	Saging etter 21 døgn, kondisjonering i 21 døgn (siste 7 døgn i 1% CO2) fram til vanning og frysestart ved 45 døgn alder.
	Alt. 3, Kond 84 d	Saging etter 21 døgn, kondisjonering i 84 døgn fram til vanning og frysestart ved 108 døgn alder.
	Alt. 4, Kond 84 d (7d i 1% CO2)	Saging etter 21 døgn, kondisjonering i 84 døgn (siste 7 døgn i 1% CO2) fram til vanning og frysestart ved 108 døgn alder.
	Alt. 5, Kond 365 d	Saging etter 21 døgn, kondisjonering i 365 døgn fram til vanning og frysestart ved 388 døgn alder.

^{*)} SS 137244 er det som i dag er CEN/TS 12390-9, slab test

5 Parallell prøvning blanding 1 og 2 – sammenlikning

5.1 Felles målinger

Blanding 1 ble brukt til utstøping av feltprøvestykkene, som nevnt tidligere, men i tillegg ble det laget prøvestykker for et begrenset lab.program. Dette gir sammenliknbare målinger med lab.programmet fra blanding 2. Felles målinger var:

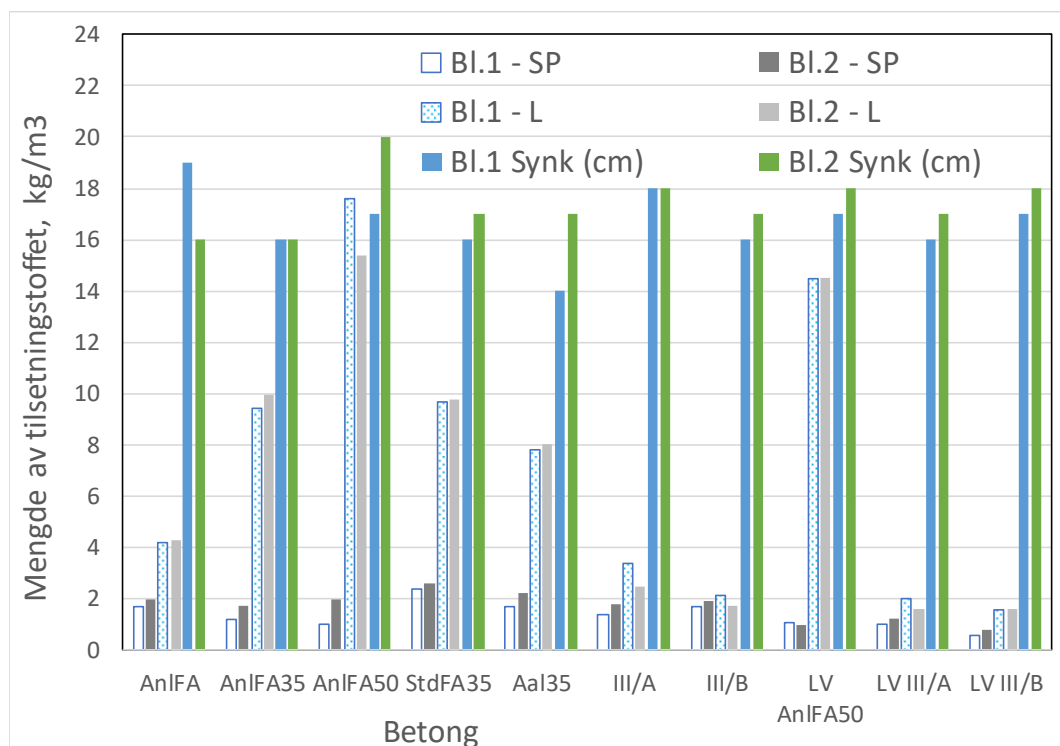
- fersk betong luftinnhold og densitet
- 28-døgns trykkfasthet
- tynnslip/luftporestrukturanalyse
- salt-frostforsøk etter standardmetoden

I det videre sammenliknes resultatene.

5.2 Fersk betong og –luftinnhold

Forbruk av superplastiserende (SP) og luftinnførende (L) tilsetningsstoff samt oppnådd synkmål (i cm) fra blanding 1 og 2 er vist i Figur 7. Tilsiktet luftinnhold i fersk betong var 3,5–6,0%, og tilsiktet synkmål 15–18 cm.

Økt FA-mengde økte behovet for L-stoff, som forventet. For de to variantene av AnIFA50 (50% FA) var L-stoffbehovet svært høyt, hele 14–16 kg/m³. For de fire variantene med slaggsement (III) var L-stoffbehovet mye lavere (de fleste rundt 2 kg/m³). Tilsiktet synkmål ble oppnådd i alle tilfeller unntatt for AnIFA50 i bl.2 (20 cm) og Aal35 i bl.1 (14 cm).



Figur 7 – Blanding (Bl.) 1 og 2: Mengde tilsatt SP-stoff og L-stoff under blanding, samt oppnådd synkmål.

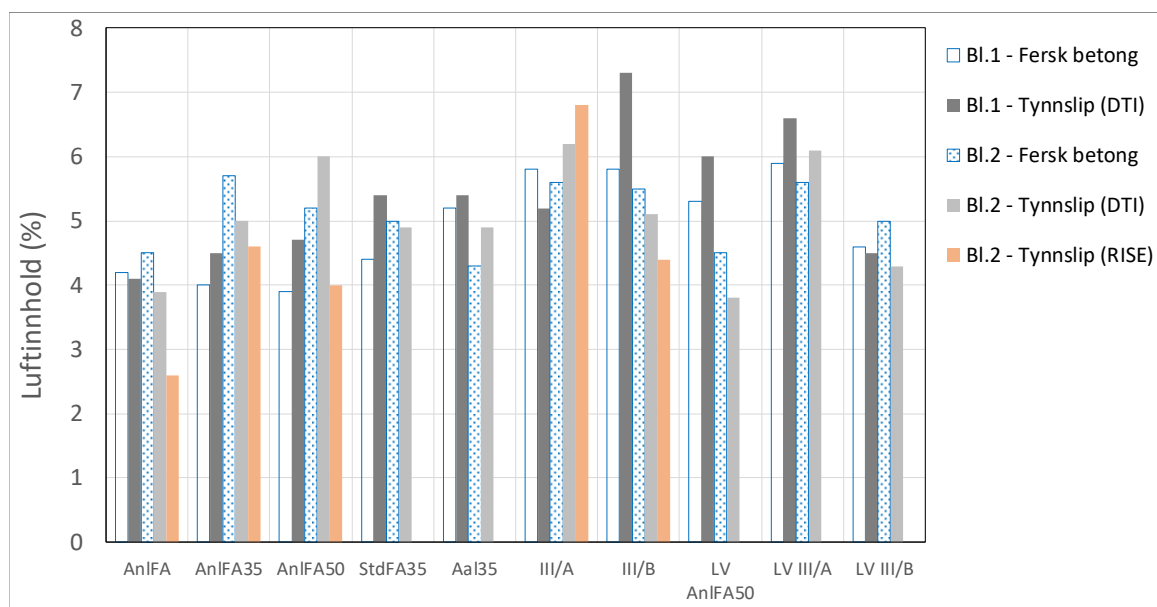
Målt luftinnhold i fersk betong (trykkmetoden), samt målt makro luftinnhold ved tynnslip (poretelling) er vist i Figur 8. Som diskutert i etterfølgende underkapitler antas det at fersk betongmålingene for blanding 1 viste for lave verdier.

For blanding 2 ble det i tillegg til de planlagte tynnslipene av alle betongene (utført ved DTI) gjort ekstra tynnslipsundersøkelser for 5 av betongene (utført ved RISE).

Ekstraundersøkelsen ble gjort i forbindelse med en tilleggsstudie av betongenes tilstand før og etter frostforsøk (diskutert i kapittel 6.4.3). Alder og lagring er noe forskjellig etter som DTI-analysene ble gjort en drøy måned etter støp, mens tynnslipene i RISE-analysene ble tildannet over ett år etter støping og etter at prøven (tiltenkt frostprøving) hadde vært lagret i 365 døgn i 65% RF. Tynnslipet fra frostprøven ble tatt normalt på den sagde flaten, langs sidekanten, og representerer en dybde inn fra sidekanten på anslagvis ca. 10 mm (areal ca. 55 x 75 mm²).

Målt luftinnhold i fersk betong varierte fra 2,5 til 5,8 % i blandeomgang 1, og fra 4,3 til 5,7 % i omgang 2. For blandeomgang 1 viser imidlertid tynnslipsanalysen jevnt over høyere luftinnhold enn ved fersk betongmålingen, i gjennomsnitt 0,7% høyere (varierer fra -0,1% til +2,0% for de ulike betongene). Tilsvarende sammenlikning for blandeomgang 2 viser ikke samme systematiske forskjell for de to målemetodene (varierer fra -0,7% til +0,8% for de ulike betongene), og gjennomsnittlig luftinnhold for alle betongene samlet var omtrent likt for de to metodene.

En plausibel forklaring på lav fasthet i blanding 1, spesielt for enkelte betonger, er derfor at det har vært høyere luftinnhold enn det som ble fastsatt og styrt etter ved blanding fra fersk betongmålingen. Temaet diskuteres mer inngående i etterfølgende kapittel.

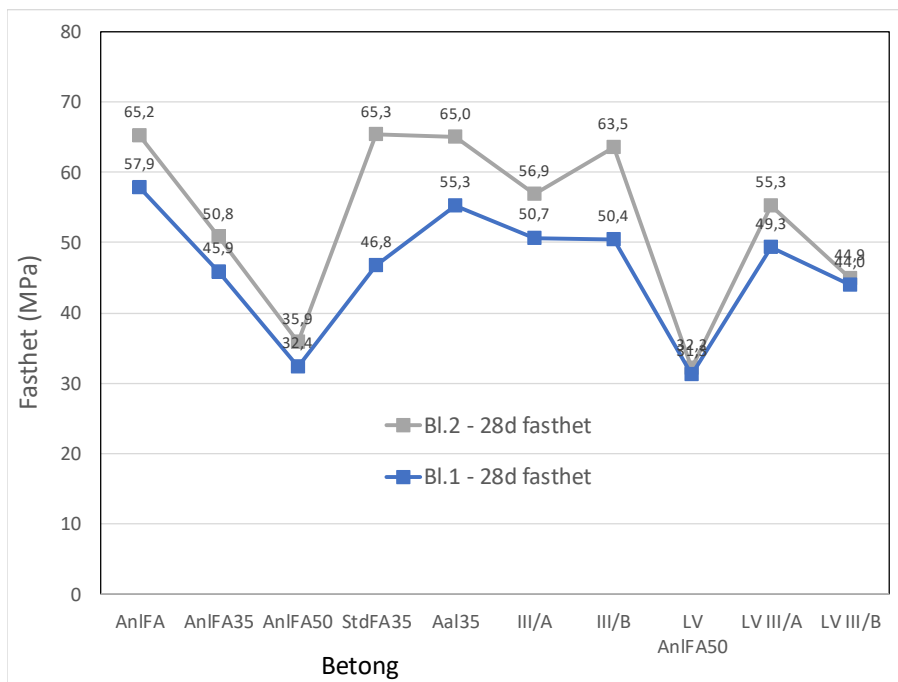


Figur 8 - Blanding (Bl.) 1 og 2: Luftinnhold målt i fersk betong og ved porestrukturanalyse fra tynnslip i herdet betong

5.3 28-døgns trykkfasthet

Målt trykkfasthet etter 28 døgn fra blandeomgang 1 og 2 er vist i Figur 9. Blanding 2 ga jevnt over høyere fasthet enn blanding 1. For betongene StdFA35, Aal35 og III/B er

forskjellen spesielt stor, henholdsvis 20,6, 12,0 og 13,8 MPa høyere fasthet i blanding 2 i forhold til blanding 1.



Figur 9 – Blanding (Bl.) 1 og 2: Målt 28-døgnsfasthet

RISE satte i gang egne undersøkelser for å lete etter årsaken til de store avvikene i fasthet; med hovedfokus på de tre betongene nevnt ovenfor, se VEDLEGG 3. Det ble sett på:

- støpeprotokollen (effekt av forbruk av tilsetningsstoff på faktisk v/b-forhold, fersk betong luftinnhold og densitet, lagringsforhold)
- densitet av terningene ved prøving av fasthet (og estimering av luftinnhold)
- resultatene fra tynnslip/mikroskopi NT BUILD 381 (luftinnhold, anslag på v/b-forhold, hydratiseringsgrad).
- i tillegg ble det gjort ekstrablandinger av betongen StdFA35 med fire forskjellige luftinnhold for å se på relasjonen luftinnhold og fasthet. Fasthetsresultatene viste at 1% økning i luft ga i gjennomsnitt 4 MPa reduksjon av fastheten, og at målte fastheter stemte godt med blandeomgang 2 ved tilsvarende målt fersk betong luftinnhold.

Hovedslutningen i RISEs rapport, gitt i VEDLEGG 3, er at luftmåleren har vært feil kalibrert og at luftinnholdet under blandeomgang 1 i stor grad har vært høyere enn i blandeomgang 2. I tillegg hevder rapporten at kraftigere vibrering under blandeomgang 2 også har bidratt. Det faktum at frostforsøkene for betongene StdFA35, Aal35 og III/B viste mindre avskalling i omgang 1 enn i omgang 2 (se etterfølgende kapittel) tas også til inntekt for at luftinnholdet i blanding 1 generelt har vært høyere enn i blanding 2.

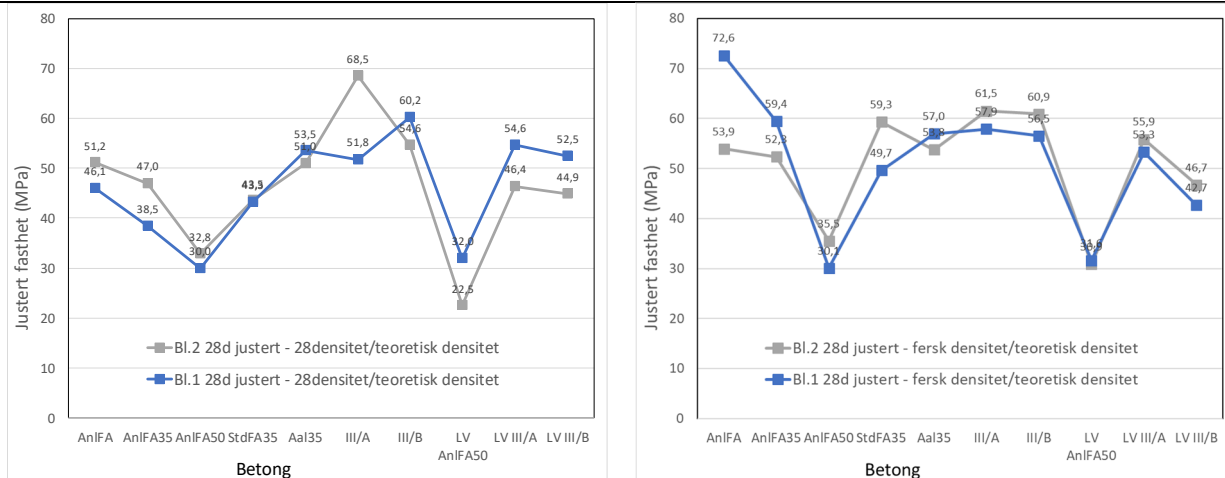
Det hevdes videre at alle avvik i fasthet mellom blandeomgang 1 og 2 ikke kan forklares med ulikt luftinnhold, spesielt nevnes betongen StdFA35. Ukjente faktorer som menneskelige feil (feil i oppveing av delmaterialer, utstøping) og ulike lagringsforutsetninger før/under prøvning nevnes som mulige årsaker.

Det er i det følgende gjort selvstendige vurderinger av fasthetsresultatene ved å justere for de ulike luftinnhold som er estimert. Et luftinnhold på 4% er satt som referanse, og alle fasthetsresultater er justert i henhold til betongens luftavvik fra 4%. Alle 10 betongene fra begge blandingene er vurdert samlet (ved regresjon) under forutsetningen at summen av alle individuelle fasthetsavvik mellom blanding 1 og 2 skal være null. Basert på dette fås følgende:

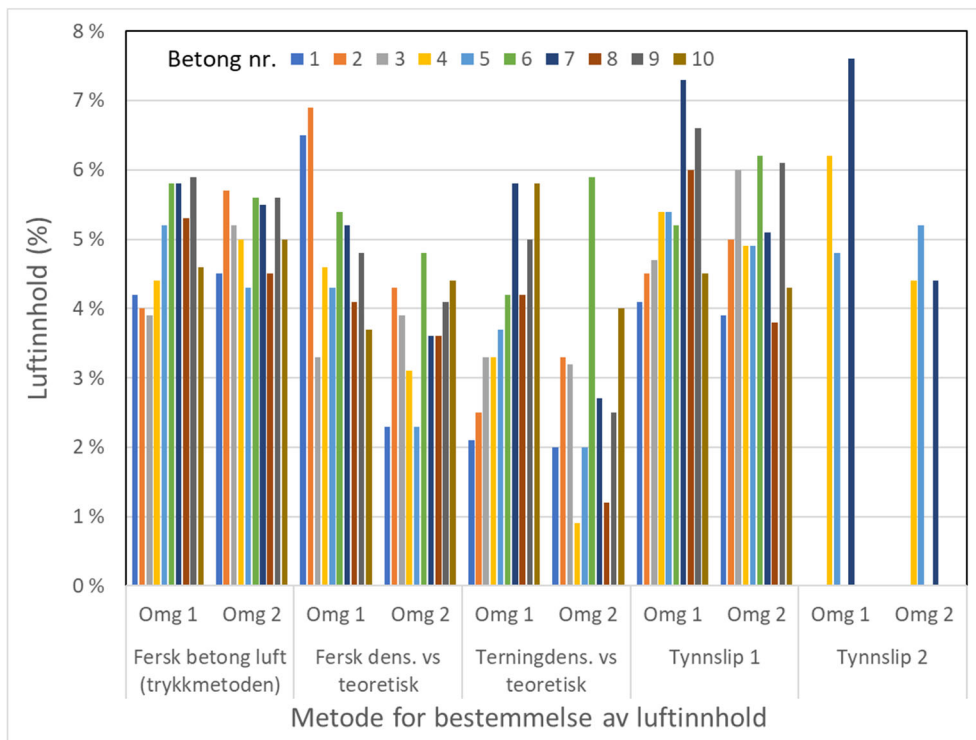
1. Målt fersk betong luftinnhold er ikke meningsfull å benytte (naturlig nok) ettersom de fleste betonger hadde lavest luft i blanding 1 og en justering av fasthet gjør at avvikene vil øke.
2. Luftinnhold estimert fra terningdensitet ved 28 døgn vs. teoretisk densitet (summen av vekten av alle delmaterialene i 1 m³ betong): Samlet avvik i (justert) fasthet mellom blanding 1 og 2 blir null når 1% økt luft reduserer fastheten med 10,8%, noe som i gjennomsnitt betyr 5,4 MPa reduksjon av fasthet pr % økt luftinnhold. Justerte fastheter er vist i Figur 10 (venstre figur).
3. Luftinnhold estimert fra fersk betong densitet vs. teoretisk densitet: Samme operasjon gir at 1% endring i luft gir 10,2% endring i fasthet (gj.snitt 5,1 MPa endring). Justerte fastheter er vist i Figur 10 (høyre figur).
4. Luftinnhold funnet ved tynnslip viser også at luftinnholdet i blanding 1 i gjennomsnitt var høyere enn i blanding 2, men enkeltresultater er slik at det ikke blir noen logikk ved fasthetsjustering basert på resultatene for alle betongene samlet.

Figur 10 viser at ved å kompensere for fasthet i henhold til luftinnhold som beskrevet (og pkt.2 og 3 i lista over) er det andre betonger enn betongene StdFA35, Aal35 og III/B som får betydelige avvik i (justert) fasthet; betong III/A i figuren til venstre og AnIFA i figuren til høyre. Og luftinnhold bestemt ved pore telling (pkt.4) fungerer ikke som forklaringsmodell for avvikene i fasthet. Figur 10 (høyre) må anses å representere en fasthetsfordeling mellom betongene som er mest å forvente.

Det må dermed kunne sies med en viss sikkerhet at feltprøvene støpt fra blandeomgang 1 for mange av betongene har et høyere luftinnhold (og generelt lavere fasthet) enn prøvene i laboratorieprogrammet fra blandeomgang 2. Forskjellen er, i gjennomsnitt, rundt 1% høyere luftinnhold i blanding 1 enn i blanding 2. Se også Figur 11 (basert på VEDLEGG 3).



Figur 10 – Blanding (Bl.) 1 og 2: Justert 28-døgnfasthet basert på estimert luftinnhold fra densitet av terninger ved 28 (venstre) og fra fersk betongdensitet (høyre), begge i forhold til teoretisk densitet av betongresepten (VEDLEGG 3). Referanse luftinnhold på 4% er valgt.



Figur 11 – Blanding 1 (Omg 1) og 2 (Omg 2): Luftinnhold bestemt/estimert ved ulike metoder. Ref. VEDLEGG 3

5.4 Standard frostprøving

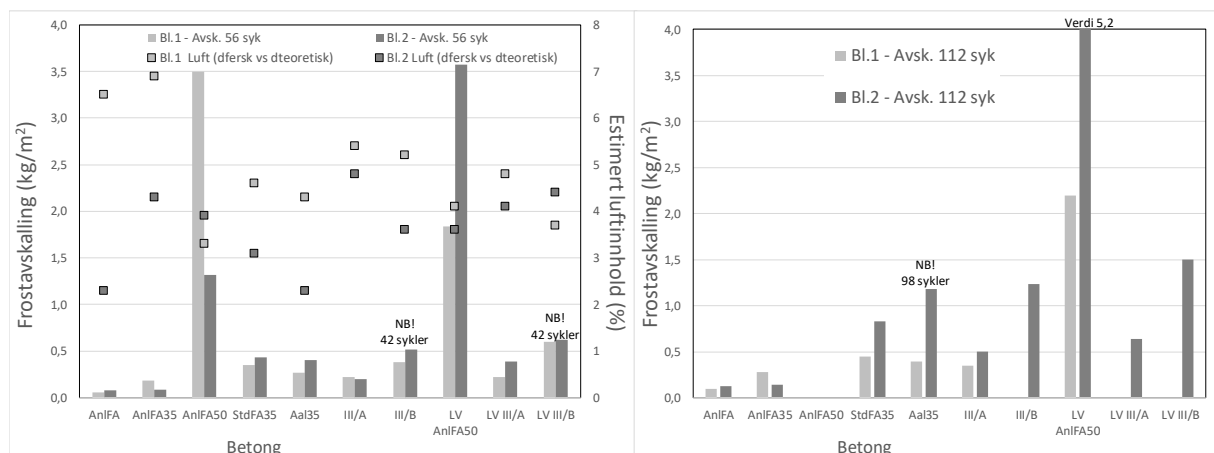
Standard/normert frostprøving med start frosteksponeering etter 31 døgn (benevnt «norm» i Tabell 7) med totalt 112 frostsykler ble gjort på prøver både fra blanding 1 (Bl. 1) og 2 (Bl.2). Resultatene etter henholdsvis 56 og 112 frostsykler er gitt i Figur 12. For to betonger er resultatene etter 42 sykler (og ikke 56) angitt pga. lekkasje fra prøvestykkenes overflate under frostforsøket for blanding 1. En betong er angitt med 98 sykler (og ikke 112) pga. lekkasje under forsøket for blanding 2. Der det ellers mangler søyler for 112 sykler i figuren skyldes dette lekkasje under forsøket på et tidspunkt hovedsakelig senere enn 56 sykler. Mer om lekkasje under forsøkene i etterfølgende kapittel.

Luftinnholdene som er oppgitt er estimert fra forskjellen mellom fersk betong densitet i forhold til teoretisk densitet fra blanderesepten. Som diskutert i foregående kapittel er det trolig at fersk betong luftmålingene i blandeomgang 1 ikke er korrekte og at luftinnholdet egentlig er høyere. Luftinnholdene som er oppgitte i Figur 12 er derfor fra en av de alternative estimatmetodene som sannsynligvis er mer representativ (oppgitt luft gjelder begge delfigurene, men bare angitt i venstre figur).

Etter 56 sykler (Figur 12, venstre) varierer forskjellen mellom blanding 1 og 2 avhengig av størrelsen på avskallingen. For de betongene med avskalling mellom 0 og 0,6 kg/m³ (dvs 8 av 10 betonger) gir blanding 1 i snitt 0,06 kg/m³ mindre avskalling enn blanding 2, og største forskjell er 0,17 kg/m³ for betongen III/A. For de to betongene med høy avskalling

(AnIFA50 og LV AnIFA50, begge med 50% FA) er forskjellen markant, og blanding 2 med mest avskalling i en av dem. For betonger med høy avskalling blir det antagelig mer tilfeldig hva resultatet blir fra forsøk til forsøk.

Etter 112 sykler (Figur 12, høyre) er det færre søyler pga. de omtalte lekkasjeproblemene, og kun 6 sett med parallell prøving kan sammenliknes (egentlig 5 sett ettersom betong 5 hadde lekkasje problemer før siste måling ved 112 sykler). Bildet ved 112 sykler er mye det samme; blanding 2 gir mest avskalling i 5 av 6 tilfeller (gjennomsnitt 0,24 kg/m³ høyere når betongen LV AnIFA50 utelates).



Figur 12 – Frostavskalling ved standard frostprøving etter 56 sykler (venstre) og etter 112 sykler (høyre) for blanding 1 og 2. Se tekst for angitte avvik i antall sykler samt angitte estimerte luftinnhold.

5.5 Lekkasje under frostprøvingen

Ved frostprøvingen skal det være et 3 mm lag med saltholdig vann på toppen av prøvestykket, dvs. oppå prøvestykkets sagde eksponeringsflate. Antall frostsykler er 56 i standardmetoden, men alle forsøk her ble forlenget til 112 sykler. Hvert frostforsøk er basert på fire parallelle prøvestykker (halve 150 mm terninger). Alle resultatene er gitt i VEDLEGG 10.

Lekkasje ble observert for en del prøvestykker; dette observeres når prøvestykkene tas ut av fryseskapet for registrering ved at vannlaget på toppen mangler og prøvestykket enten er bare fuktig eller helt tørt. Prøvestykker med lekkasje utgår i resultatbehandlingen. Det antas at lekkasjen skjer i eksponeringsflatens randsoner der en gummiduk/klave er festet, med lim og silikon, for å holde på plass vannsjiktet samt isolere sideflatene. For høye avskallingsnivåer er det rimelig å anta at faren for lekkasje øker ettersom avskalling i randsonen da vil ha økt evne til å påvirke vedheften mellom prøvestykke og klave. Dermed kan vann ha mulighet for å renne ned langs prøvestykkets sidekant.

Standard/normert frostprøving ble gjennomført både for blanding 1 og 2 (dvs. fra to ulike «batcher»). Under forsøkene fra blanding 1 var det lekkasjeproblemer i 9 (23%) av totalt 40 prøvestykker (10 betonger á 4 prøvestykker) etter 56 frostsykler, og det var ingen klar sammenheng mellom avskallingsnivå og forekomst av lekkasje. Etter 112 sykler var det lekkasjeproblemer i 21 (53%) av de totalt 40 prøvestykkene (4 av disse hadde avskalling $> 1,5 \text{ kg/m}^2$). 15 av disse 21 prøvestykkene med lekkasjeproblemer etter 112 sykler tilhørte de fire betongene med slagg.

For blanding 2 ble det for slaggbetongene gjort ekstra tiltak for å hindre lekkasje ved at epoxy ble påført sideflatene like etter saging, før påliming av gummiduken som sørger for å holde vannlaget på plass på toppflaten. Tiltaket synes å ha bedret situasjonen ettersom det ikke var lekkasje i noen prøver ved standard prøvning og 56 sykler, mens etter 112 sykler var det observert lekkasje i 12 (30%) av de totalt 40 prøvestykkene (også her hadde 4 av disse avskalling $> 1,5 \text{ kg/m}^2$). Kun 1 av disse 12 med lekkasjeproblemer etter 112 sykler var fra slaggbetongene.

I hovedserien i blanding 2, der fem alternative forkondisjoneringsregimer ble undersøkt i tillegg til standardmetoden, var graden av lekkasje mye lavere. Antall prøvestykker totalt i hovedserien var 240 (10 betonger á 6 serier á 4 prøvestykker). Av disse var det 12 prøvestykker (5%) etter 56 sykler og 51 (21%) etter 112 sykler hvor det ble observert lekkasje. Hvis vi ser bort fra de resultatene hvor avskallingen passerer $1,5 \text{ kg/m}^2$ blir tilsvarende tall 3 prøvestykker (1%) med lekkasje etter 56 sykler og 19 (8%) etter 112 sykler. Med andre ord synes bruken av epoxy (på slaggbetongene) å ha hjulpet, samt at lekkasje i stor grad var forbundet med høy avskalling.

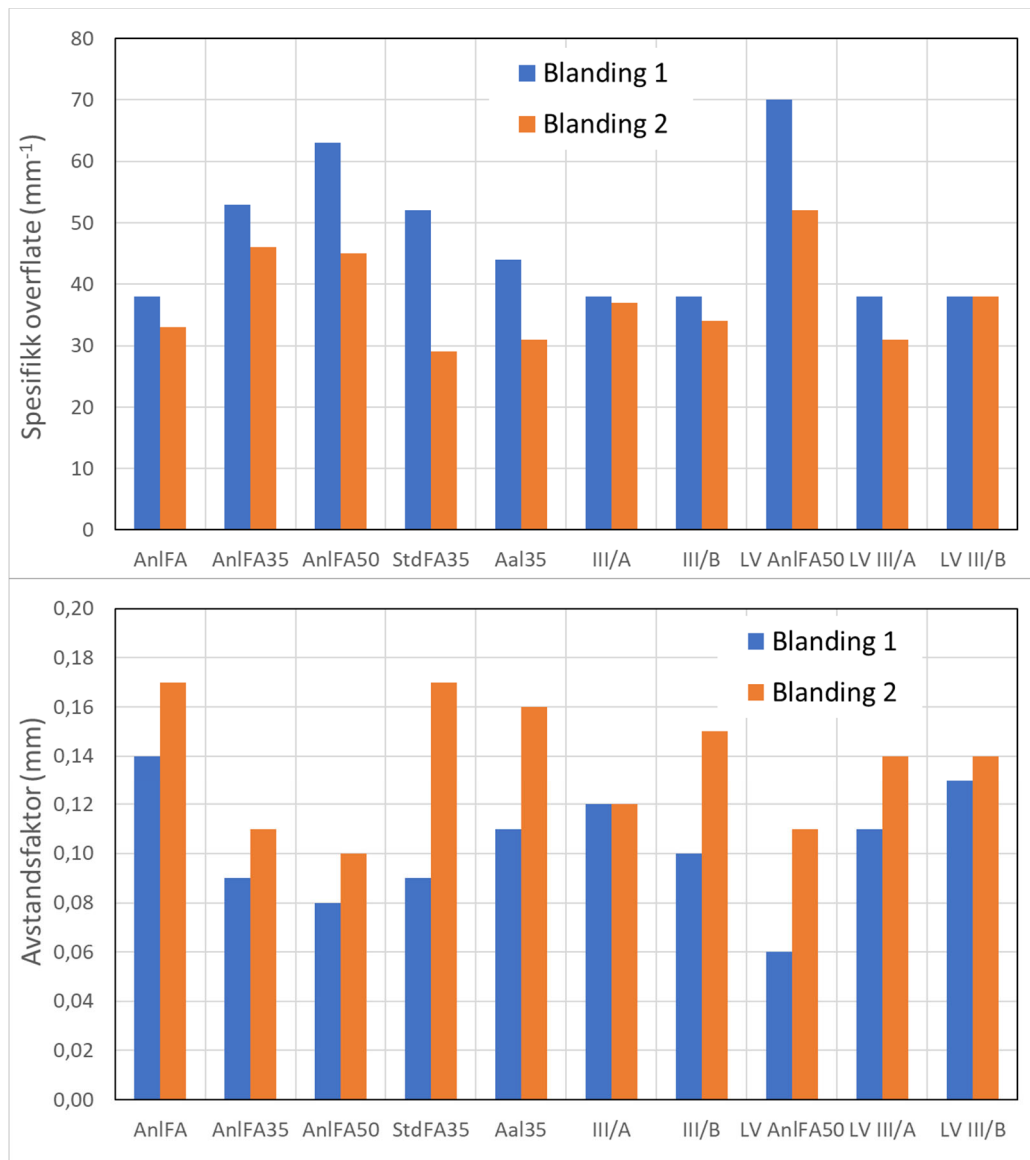
5.6 Avstandsfaktor og spesifikk overflate

Betongens luftporestruktur, og ikke bare det totale luftinnholdet, har tradisjonelt (for CEM I) vært antatt å ha direkte sammenheng med betongens frostbestandighet. Luftporestrukturen kan karakteriseres ved bestemmelse av parameterne avstandsfaktor og spesifikk overflate i tildannede slip. Tradisjonelt har en spesifikk overflate på luftporene $> 25 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ og en avstandsfaktor $< 0,25 \text{ mm}$ vært ansett å sikre frostbestandig betong, men dette var altså for ren portlandsement(CEM I)-basert betong. Våre betonger består alle av et bindemiddel bestående portlandsement i kombinasjon med enten flygeaske eller slagg.

Planslipanalysene fra henholdsvis blanding 1 og 2 er vist i Figur 13. For betongene fra blanding 1 (som sannsynligvis har hatt noe høyere luftinnhold enn betongene fra blanding 2, ref. diskusjonen i kap. 5.3) er det målt gjennomgående høyere spesifikk overflate og lavere avstandsfaktor enn i blanding 2 (faktorer som tradisjonelt indikerer bedre frostmotstand).

Denne forskjellen i porestruktur har muligens bidratt til at det for blanding 1 også generelt var noe lavere frostavskalling ved standard frostprøving (se kap. 5.4).

Vurdert i forhold til de tradisjonelle erfaringsverdiene for CEM I-baserte betonger, som nevnt ovenfor, har alle betongene her meget god luftporestruktur. Frostforsøkene vil imidlertid vise (kap. 6.4) at det ikke er samsvar mellom den gode luftporestrukturen vist her og frostavskalling ved akselerert prøving. Ved standard («normert») prøvning gjelder dette spesielt betongene med høyt flygeaskeinnhold (som har best luftporestruktur i hht resultatene i Figur 13!).



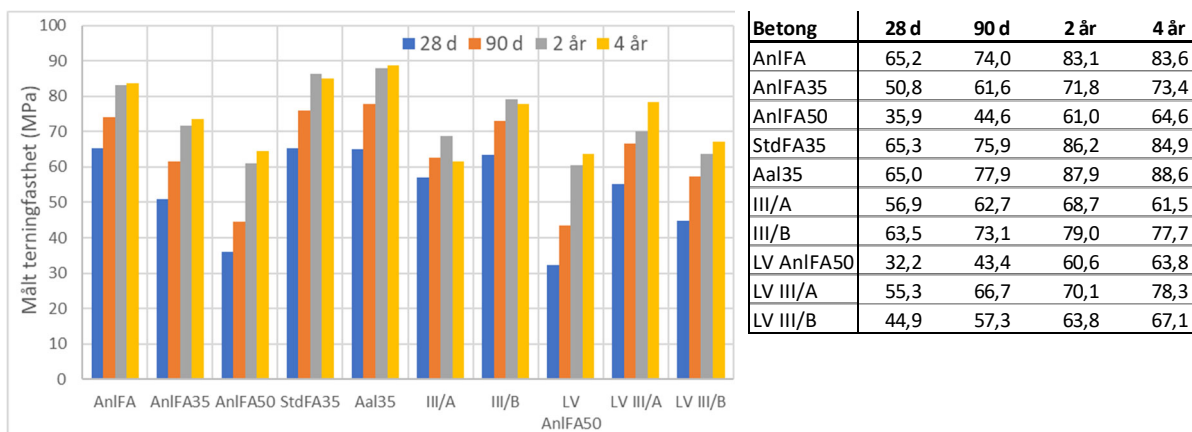
Figur 13 – Spesifikk overflate (øverst) og avstandsfaktor (nederst) målt fra blanding 1 og 2.

6 Resultater, laboratorieprogrammet (blanding 2)

6.1 Trykkfasthet

Trykkfasthet over tid er vist i Figur 14. Figuren viser målt trykkfasthet og resultatene er ikke justert for variasjoner i luftinnhold, som diskutert i kap. 5.3. Luftinnhold målt i fersk betong varierte fra 4,3–5,7% (estimerte luftinnhold varierte mer, se Figur 11). Økt FA-dosering (AnlFA, AnlFA35 og AnlFA50) gir redusert fasthet ved alle aldre. Som forventet avtar forskjellen med økende alder. StdFA35 og Aal35 har betydelig høyere fasthet enn AnlFA35 ved alle aldre. Det noe høyere luftinnholdet i ANLFA35 kan forklare noe (5,7 % mot 5 % og 4,3 % i de to andre), men en del må også skyldes andre forhold f.eks. sementklinkeren. Både III/A og III/B har lavere fasthet ved 4 år enn ved 2 år. Samme gjelder StdFA35. Grunnen til dette er ikke helt klar, men har nok med at fasthetstilveksten i realiteten er liten og naturlig spredning ved prøvning kan ha spilt inn.

Tabell 8 viser relativ fasthetsutvikling for hver betong i forhold til henholdsvis sin 28 og 90-døgns fasthet. Generelt gir økt FA-dosering økt fasthetstilvekst på lang sikt, og alle betongene har markant fasthetstilvekst etter 90 døgn.



Figur 14 - Målt terningtrykkfasthet

Tabell 8 Relativ trykkfasthet til 28 d (venstre) og 90 døgn (høyre)

Betong	28 d	90 d	2 år	4 år
AnlFA	1,00	1,13	1,27	1,28
AnlFA35	1,00	1,21	1,41	1,44
AnlFA50	1,00	1,24	1,70	1,80
StdFA35	1,00	1,16	1,32	1,30
Aal35	1,00	1,20	1,35	1,36
III/A	1,00	1,10	1,21	1,08
III/B	1,00	1,15	1,24	1,22
LV AnlFA50	1,00	1,35	1,88	1,98
LV III/A	1,00	1,21	1,27	1,42
LV III/B	1,00	1,28	1,42	1,49

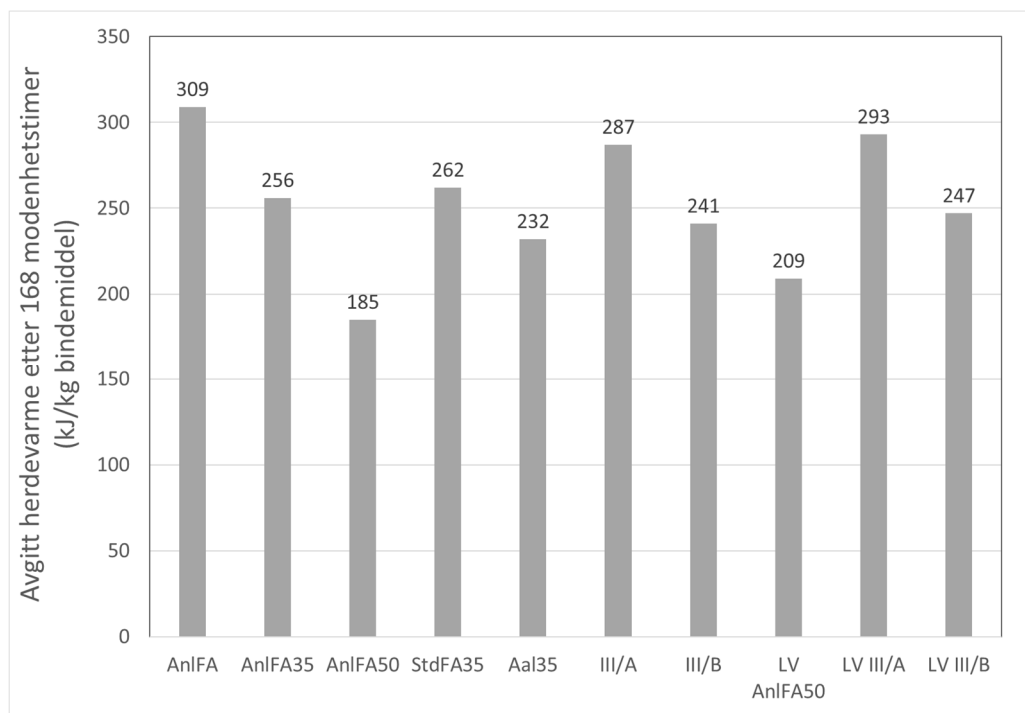
Betong	28 d	90 d	2 år	4 år
AnlFA	0,88	1,00	1,12	1,13
AnlFA35	0,82	1,00	1,17	1,19
AnlFA50	0,80	1,00	1,37	1,45
StdFA35	0,86	1,00	1,14	1,12
Aal35	0,83	1,00	1,13	1,14
III/A	0,91	1,00	1,10	0,98
III/B	0,87	1,00	1,08	1,06
LV AnlFA50	0,74	1,00	1,40	1,47
LV III/A	0,83	1,00	1,05	1,17
LV III/B	0,78	1,00	1,11	1,17

6.2 Varmeutvikling

Den «semi-adiabatiske metoden» som er benyttet er et kalorimeter hvor det måles avgitt herdevarme (Joule=J) og resultatet rapporteres som kJ/kg bindemiddel. Denne prøvningsmetoden benyttes normalt ikke i Norge, her brukes «herdekasse» hvor det måles temperaturutvikling som deretter konverteres til avgitt varme.

Resultatene etter 168 modenhetstimer (Q_{168}) er vist i Figur 15, se ellers VEDLEGG 4 for øvrige resultater. For betongene med masseforhold (m) = 0,39 gir økende FA redusert varmeutviklingen, som forventet. AnIFA (17% FA) avgir 309 kJ/kg bindemiddel, de tre betongene med 35% FA ligger i området 232–256 kJ/kg og AnIFa50 (50% FA) avgir 185 kJ/kg. Slaggbetongene på sin side avgir 287 og 241 kJ/kg for henholdsvis III/A og III/B.

Økning i m fra 0,39 til 0,44 (LV-variantene) gir for de bindemidlene det gjelder noe økning i avgitt varme pr. kg bindemiddel. Dette er forventet og relatert til høyere hydratiseringsgrad pga. mer tilgjengelig vann ved økt masseforhold. Selv om økt masseforhold gir noe økt varme pr. kg bindemiddel vil effekten være redusert herdetemperatur (temperaturer ikke rapportert her). Dette er fordi økt m innebærer lavere bindemiddelmengde, og i praksis vil bindemiddelmengden være enda lavere enn i denne undersøkelsen hvor alle betongene (både $m=0,39$ og $m=0,44$) ble proporsjonert med samme pastavolum. Adiabatisk temperaturøkning i betong er altså en konsekvens av herdevarmen (gitt som varme pr. kg bindemiddel som rapportert her) multiplisert med betongens totale bindemiddelmengde.

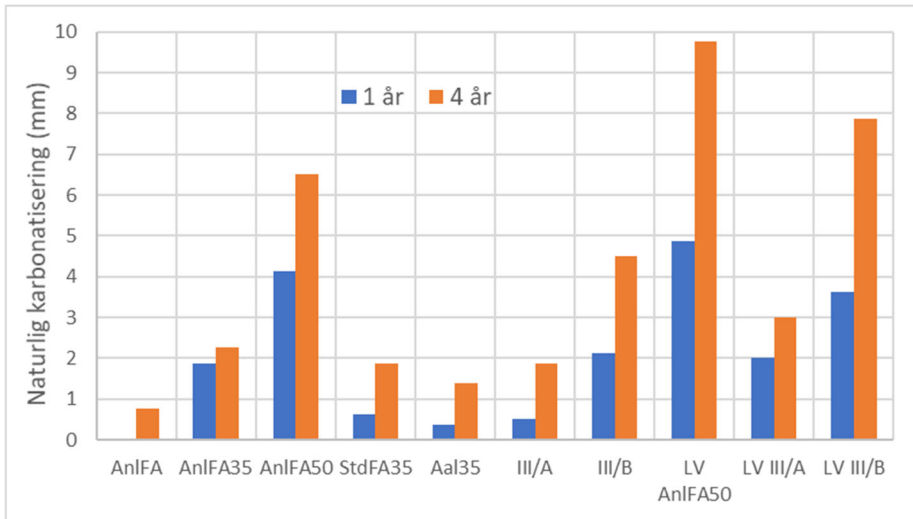


Figur 15 – Herdevarme pr. kg bindemiddel, etter 168 modenhetstimer

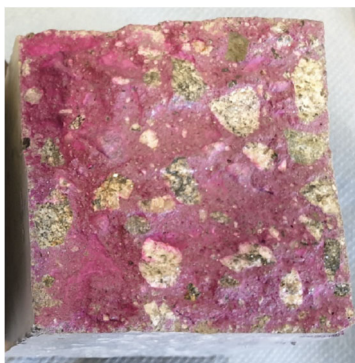
6.3 Naturlig karbonatisering

Naturlig karbonatisering (ute, beskyttet mot regn) etter 1 og 4 år er vist i Figur 16.

Resultatene viser, som forventet, at karbonatiseringsdybden øker med økende FA- og slagginnhold og med økende masseforhold. Bilder av prøvestykkene for AnIFA-variantene ved 4 år er vist i Figur 17.



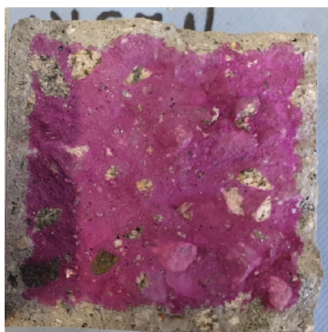
Figur 16 - Naturlig karbonatisering etter 1 og 4 år



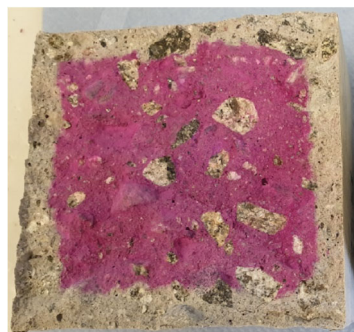
AnIFA (1 mm)



AnIFA35 (2 mm)



AnIFA50 (6,5 mm)



LV AnIFA50 (10 mm)

Figur 17 - Naturlig karbonatisering etter 4 år for AnIFA-variantene; bilder av bruddflater etter påføring av 1% fenoftealeinløsning

6.4 Salt–frostavskalling; ved ulik forkondisjonering

6.4.1 Frostavskalling, alle resultater

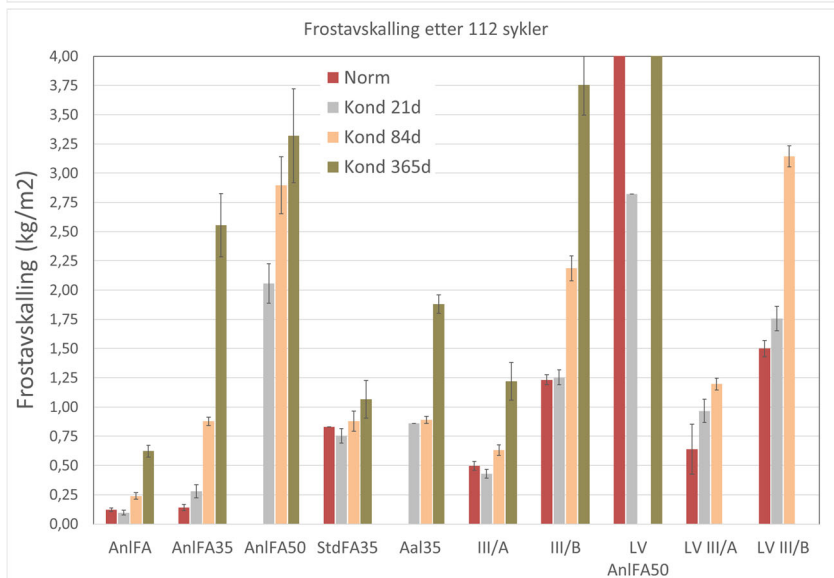
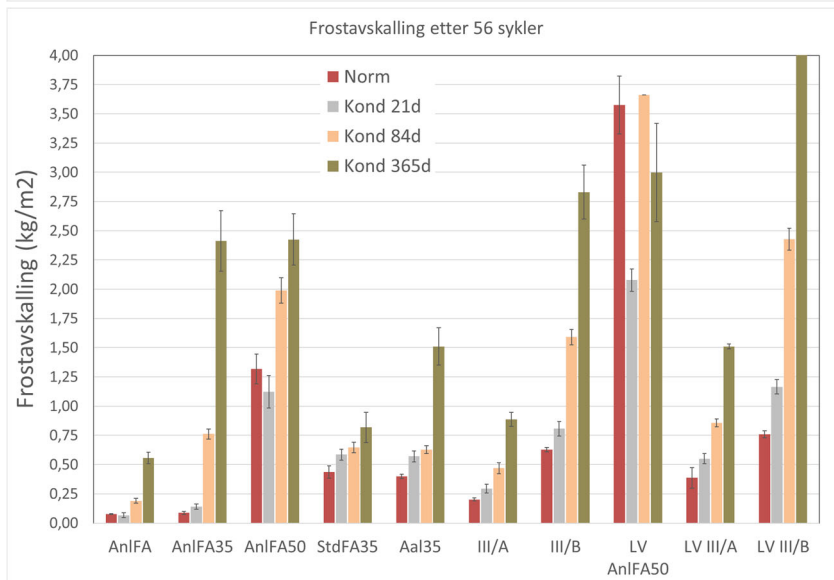
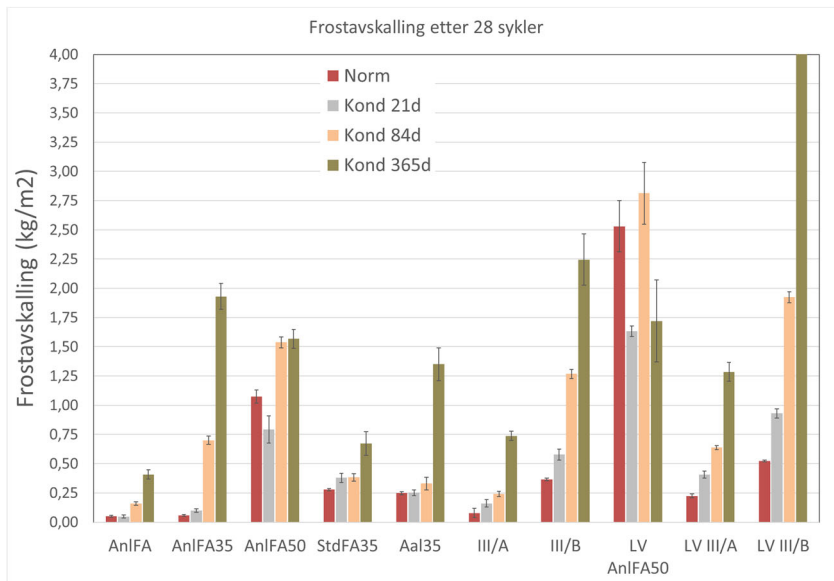
Frostforsøkene er utført med ulike varianter og varighet av forkondisjonering, før oppstart frosteksponering. Forkondisjoneringen (65% RF) starter ved 21 døgns alder i alle tilfeller. Vanlig/standard prosedyre (kalt «Norm») har 7 døgn forkondisjonering. Alternativene med lengre forkondisjonering (varighet 21, 84 og 365 døgn) er beskrevet i kapittel 4.4 Tabell 7. Økt forkondisjoneringstid vil medføre økt karbonatisering og uttørking før start frosteksponering, faktorer som antas å gi negativ effekt på frostmotstanden. I tillegg øker alderen/modenheten på betongen før selve frosteksponeringen, noe som tenkes å kunne gi en positiv effekt. Alle resultater er gitt i tabellform i VEDLEGG 10.

Frostavskalling etter ulik forkondisjoneringstid er gitt i Figur 18. Avskallingen etter henholdsvis 28, 56 og 112 frostsykler er vist i hver sin delfigur. Øvre verdi for aksene for avskalling er satt til 4 kg/m². For figuren som viser avskalling etter 112 frostsykler betyr manglende søyler at det var problemer med lekkasje, som diskutert i kapittel 5.5

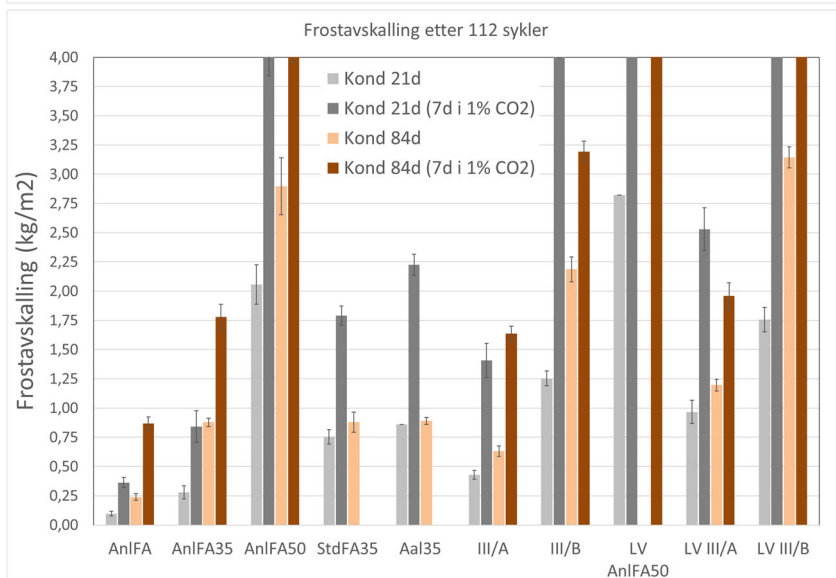
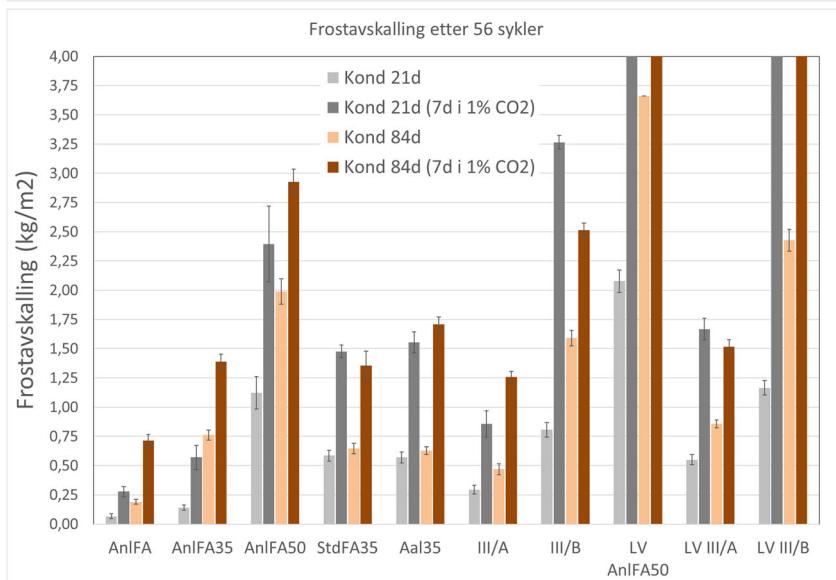
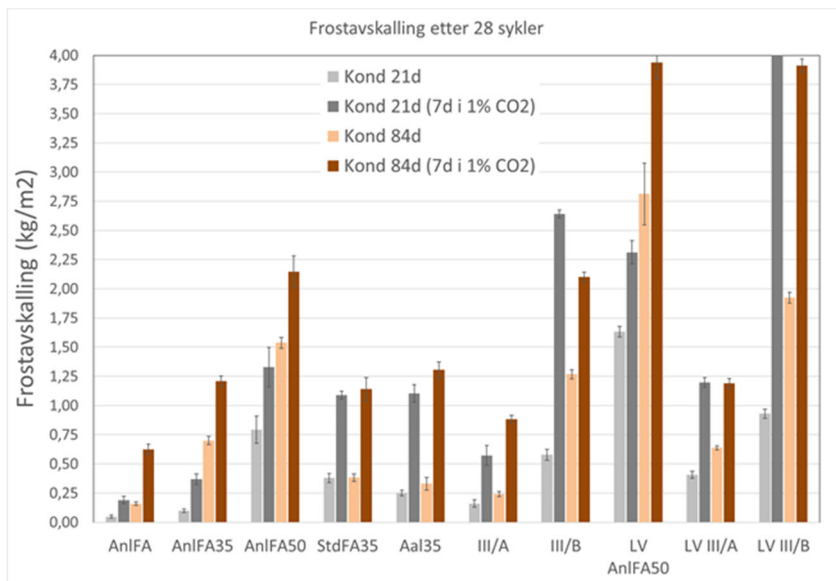
Det kan ses at en vesentlig del av frostavskallingen har skjedd allerede etter 28 frostsykler. Med få unntak gir økende kondisjoneringstid en systematisk økende avskalling.

Standard prosedyre (norm) og 56 frostsykler ga $\leq 0,75$ kg/m² avskalling for alle betongene, med unntak for de to AnI50–variantene. For 21 døgn kondisjonering er økningen i avskalling relativ marginal (med unntak av de to AnI50–variantene som har en reduksjon). For 84 døgn kondisjoneringstid og 56 frostsykler har de to AnIFA50–variantene samt de to III/B–variantene høy avskalling (fra 1,6 til 3,7 kg/m²), mens resten av betongene oppnår $< 0,9$ kg/m² avskalling. Forkondisjonering i 365 døgn og 56 frostsykler ga fortsatt $< 0,9$ kg/m² avskalling for betongene AnIFA, StdFA35 og III/A, mens resten av betongene hadde alle $> 1,5$ kg/m² avskalling

For de to forkondisjoneringstidene 21d og 84d ble det gjennomført en variant der prøvestykkene i de siste 7 døgnene av forkondisjoneringsperioden ble lagret i klima med forhøyet CO₂–konsentrasjon (1%). Figur 19 viser resultatene hvor frostavskalling etter 28, 56 og 112 frostsykler er gitt i hver sin delfigur. Resultatene er entydige på den måten at forkondisjonering med økt CO₂–konsentrasjon siste 7 døgn gir en markant økning i frostavskallingen for alle betongene.



Figur 18 - Avskalling etter ulik kondisjoneringstid (i 65 % RF) før frostekspnering. Antall frostsykler er angitt over hver delfigur.

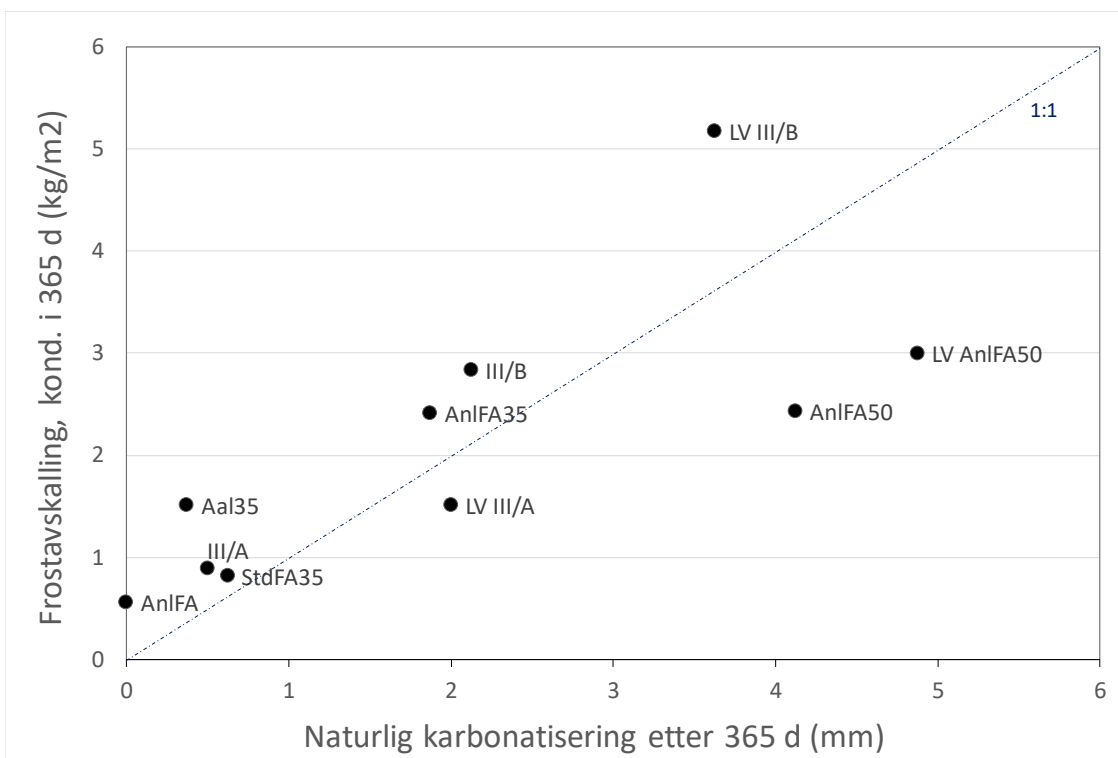


Figur 19 Avskalling etter 21 og 84 døgn kondisjoneringstid før frosteksposering, med og uten forhøyet CO₂-konsentrasjon siste 7 døgn. Antall frostsykler er angitt over hver delfigur.

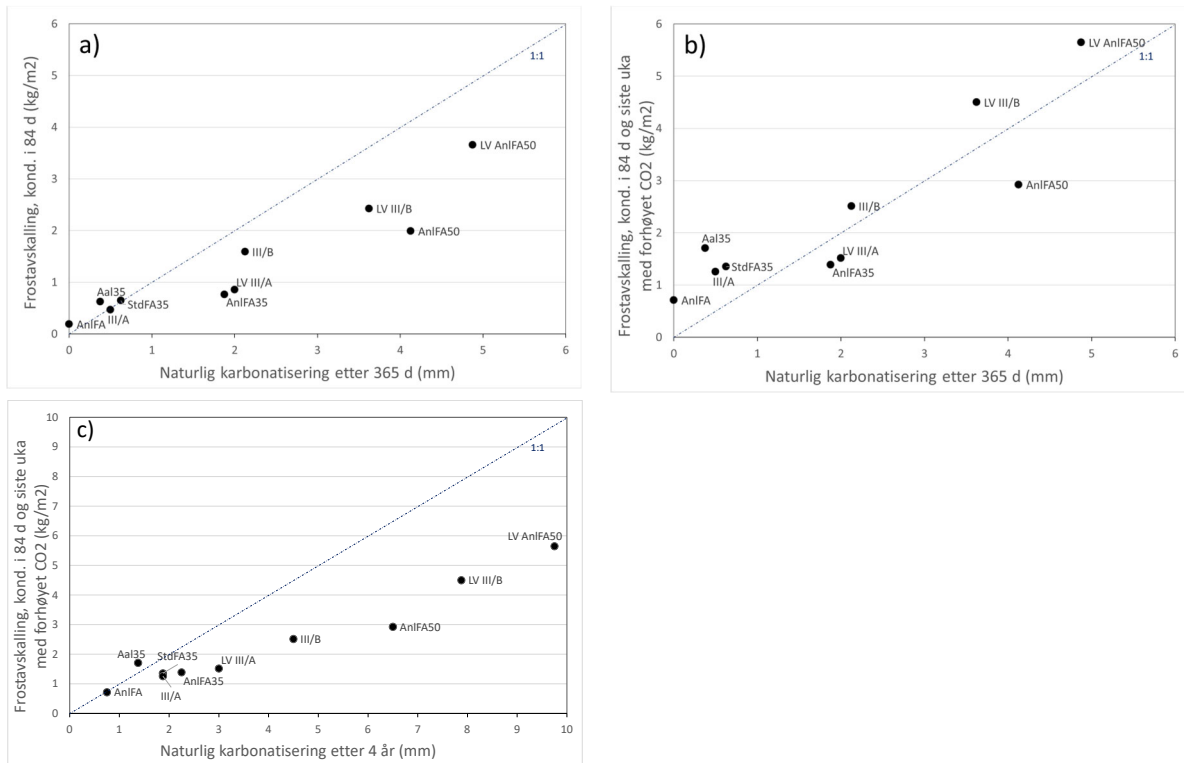
6.4.2 Frostavskalling mot naturlig karbonatiseringsdybde

Klimaet for karbonatisering ved kondisjonering av frostprøvene i lab. (20 °C, 65% RF og hhv. ca. 0,04 % og 1 % CO₂) og ved naturlig utendørs karbonatisering (varierende temperatur og fuktforhold, og ca. 0,04 % CO₂, se kap. 6.3) er ulik. Forskjeller i naturlig karbonatisering kan likevel være en indikasjon på karbonatiseringstilstanden for laboratorieprøvene. Hvis vi antar at avskalling ved frostforsøk i hovedsak skjer i sementpastaen vil en avskalling på 1 kg/m² tilsvare at sementpasta i en dybde av anslagsvis 1 mm er forsvunnet (ref. VEDLEGG 4). Etter som første måling av naturlig karbonatisering var etter 365 døgn er det foretatt en sammenstilling mellom naturlig karbonatisering ved dette tidspunktet og frostavskalling i laboratoriet etter 365 døgn forkondisjonering, se Figur 20. Trender at økt avskalling er forbundet med økt karbonatiseringsdybde. Som tidligere nevnt er imidlertid resultater med høy avskalling (>≈1,5–2,0 kg/m²) noe usikre på grunn av mulige heftproblemer/lekkasjer og avskalling langs prøvestykkenes sidekant.

Blant annet av nevnte grunn kan sammenhengen mellom frostavskalling i lab. og naturlig karbonatisering bli noe tilfeldig, og sammenhengen blir ikke mer gyldig dess flere plot man lager. Det er likevel gitt noen tilsvarende figurer for forkondisjonering i 84 døgn, se Figur 21.



Figur 20 – Frostavskalling (56 frostsyklus) etter 365 døgn forkondisjonering i lab. vs. naturlig karbonatisering utendørs i 365 døgn.



Figur 21 – Frostavskalling (56 frostsyklus) etter 84 døgn forkondisjonering i lab. vs. naturlig karbonatisering utendørs. a) 84 døgn vs. 365 døgn naturlig karbonatisering, b) 84 døgn med siste uka forhøyet CO₂ vs. 365 døgn naturlig karbonatisering, og c) 84 døgn med siste uka forhøyet CO₂ vs. 4 år naturlig karbonatisering

6.4.3 Karbonatisering og rissomfang før og etter frosteksponeering

Både rett før og etter frostprøving med 365 døgns forkondisjonering ble det tildannet tynnslip (i dybde 0–55 mm fra eksponeringsflaten) og utført mikroskopi og XRD-analyse på fem av betongene (se VEDLEGG 7–9). Fra disse undersøkelsene ble det blant annet observert/estimert karbonatiseringsdybder, se Tabell 9. Tabellen angir også mengden avskallet materiale etter frostprøvingen og i tillegg naturlig karbonatisering på prøvene som var lagret utendørs (se kap. 6.3).

Fra mikroskopiundersøkelsen er observert karbonatisering gitt som maks- og min-dybder. Mikroskopiobservasjonene fra «før frosteksponeering» viser likhetstrekk med resultatene fra naturlig karbonatisering og indikerer sånn sett at lab.kondisjonering i 65% RF og 20 °C er et klima som er relativt gunstig for karbonatisering. Under frosteksponeeringen skjer det avskalling og det er derfor logisk at det etter forsøket observeres reduserte karbonatiseringsdybder ved mikroskopundersøkelsen. Det er i ettertid beklagelig at karbonatiseringsdybder ikke ble målt på tradisjonelt vis (med fenoftealein påført bruddflate), men disse mikroskopiobservasjonene kan indikere at det er hele eller deler av det karbonatiserte laget som skaller av.

Mikroskopi viste i tillegg at det både før og etter frostprøving var riss med rissvidder hovedsakelig i området 0,01 mm. Frostprøvingen endret ikke rissviddene, men antall riss økte med unntak for betongen AnIFA hvor antall riss var omtrent uforandret.

Fra XRD ble karboniseringsdybde estimert fra forekomsten av kalsitt (CaCO_3). Estimatenes har grov skala, men indikerer en markant økning i karboniseringsdybden etter frosteksposering (og avskalling) for 4 av de 5 betongene. Dette er det motsatte av mikroskopiresultatene diskutert ovenfor. Årsaken til dette er uklar.

Tabell 9 Karboniseringsdybde (mm) før og etter frostforsøk (1 års forkond. og 112 frostsykler)

Betong	Mikroskopi: Observert karboniseringsdybde		XRD: Estimert karboniseringsdybde fra mengde CaCO_3		Frostavskalling, 1 års kondisjonering og etter 112 sykler, kg/m^2	Naturlig karbonisering etter 1 år (4 år)
	Før frosteksponering	Etter frosteksponering	Før frosteksponering	Etter frosteksponering		
AnIFA	0,8 – 2	0,2 – 2	< 5	< 5	0,6	0 (0,8)
AnIFA35	2 – 5,5	0,3 – 2	< 5	10-15	2,6	1,9 (2,3)
AnIFA50	8	6 – 7	5-10	10-15	3,3	4,1 (6,5)
III/A	0,1 – 2,2	0,3 – 2	< 5	10-15	1,2	0,5 (1,9)
III/B	1,5 – 3,5	0 – 0,3	< 5	10-15	3,8	2,1 (4,5)

6.5 Kloridmigrasjon

Kloridmigrasjon iht NT Build 492 ble målt etter 28 d (1 mnd), 90 d (3 mnd) og 4 år (48 mnd). Alle resultatene er vist i Figur 22, og 3 måneders- og 4 års-resultatene er vist i Figur 23.

Ved 28 døgn er det store forskjeller i målt migrasjonskoeffisient, fra 1 til $25 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. AnIFA-variantene har de høyeste verdiene, økende med økende FA-innhold og masseforhold. Etter 90 døgn ses en tydelig reduksjon i migrasjonskoeffisienten for alle betongene, og med unntak av de to AnIFA50-variantene ligger migrasjonskoeffisientene under $3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Etter 4 år har alle betongene migrasjonskoeffisienter under $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

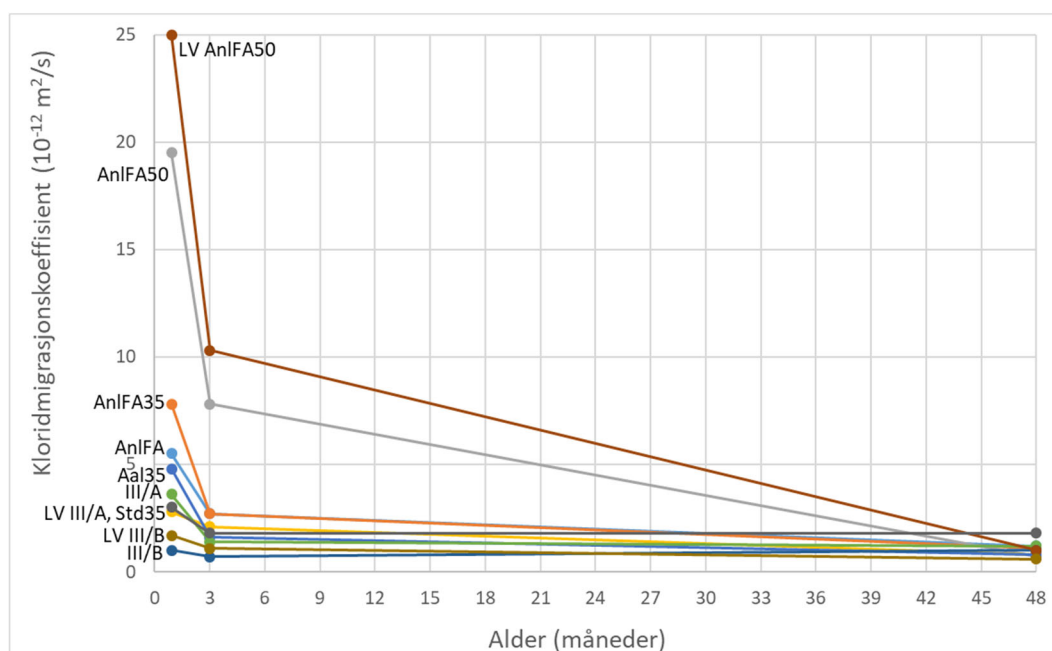
I Norge er diffusjonsmetoder (beskrevet i NT Build 443 eller NA til NS-EN 206) de desidert mest brukte ved akselerert prøving av kloridmotstand. Migrasjonsmetoden NT Build 492 har imidlertid vist god overensstemmelse med resultater fra NT Build 443 for betonger uten flygeaske og masseforhold 0,4–0,5, prøvd ved 2 mnd alder [6]. I forsøk utført i Varige konstruksjoner [7] ble migrasjonsmetoden (NT Build 492) benyttet for bestemmelse av kloridmotstand over tid (fra 2 døgn til 3 års alder) for mørtler med ulike bindemidler (Aalborg rapid + 5 % silikastøv, AnIFA + 5 % silikastøv, én slaggsement med ca. 50 % slagg og to slaggsementer med slagginnhold > 65%) og masseforhold 0,40. Ved prøving ved 28 døgn alder hadde alle mørtlene migrasjonskoeffisienter $< 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, etter drøye 4

måneder $<2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ og etter 1 år $<1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Det ble ikke observert signifikant endring i migrasjonskoeffisienten fra 1 til 3 års alder.

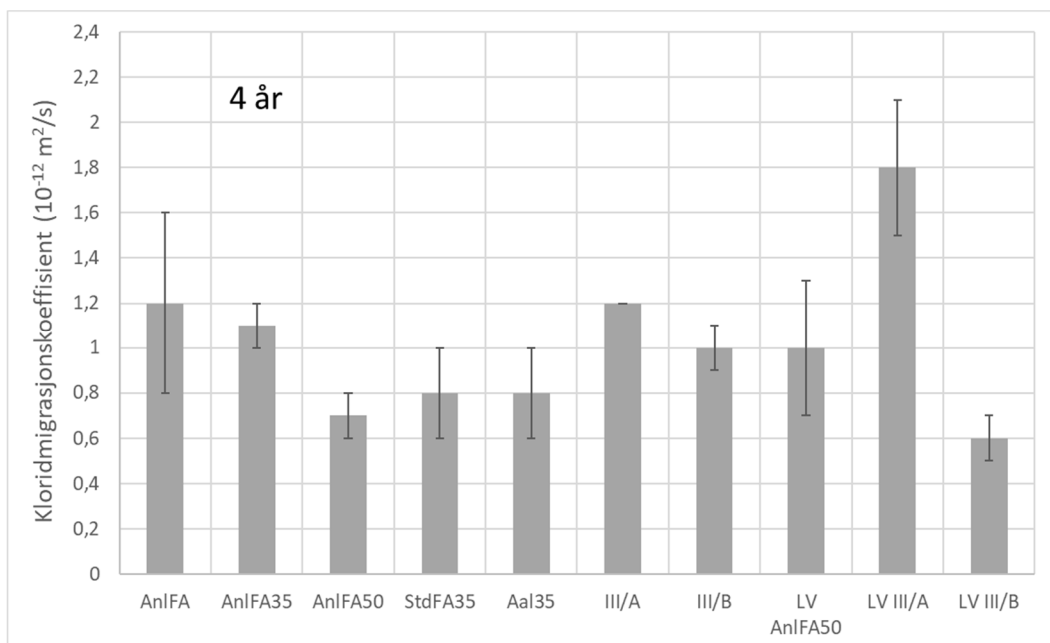
Tidligere bulkdiffusjonsforsøk [1][2] på betonger med 20–50% FA viste at forskjeller i diffusjonskoeffisientene i tidlig alder (fram til 90 d) i stor grad var utlignet etter ca. 6 mnd. Med bakgrunn i disse erfaringene og resultatene fra ovennevnte mørtelforsøk /b/kan det være grunn til å tro at de relativt like migrasjonskoeffisientene vi ser her etter 4 år i Figur 22 er en situasjon som ble oppnådd vesentlig tidligere; kanskje allerede så tidlig som etter 6–12 mnd.

Det er imidlertid en svakhet med migrasjonsforsøk at resultatet i stor grad er direkte påvirket av betongens elektriske motstand. Når elektrisk motstand blir svært stor (som den blir ved svært høye FA-innhold, over $2500 \Omega\text{m}$ for AnlFA50-betongen etter 4 år – se Figur 25, kan vi ikke lenger stole på at det er en pålitelig relasjon mellom migrasjon og diffusjon. Det anses derfor som noe usikkert om de to betongene med 50 % flygeaske faktisk utvikler så god kloridmotstand som 4-års migrasjonsresultatene indikerer.

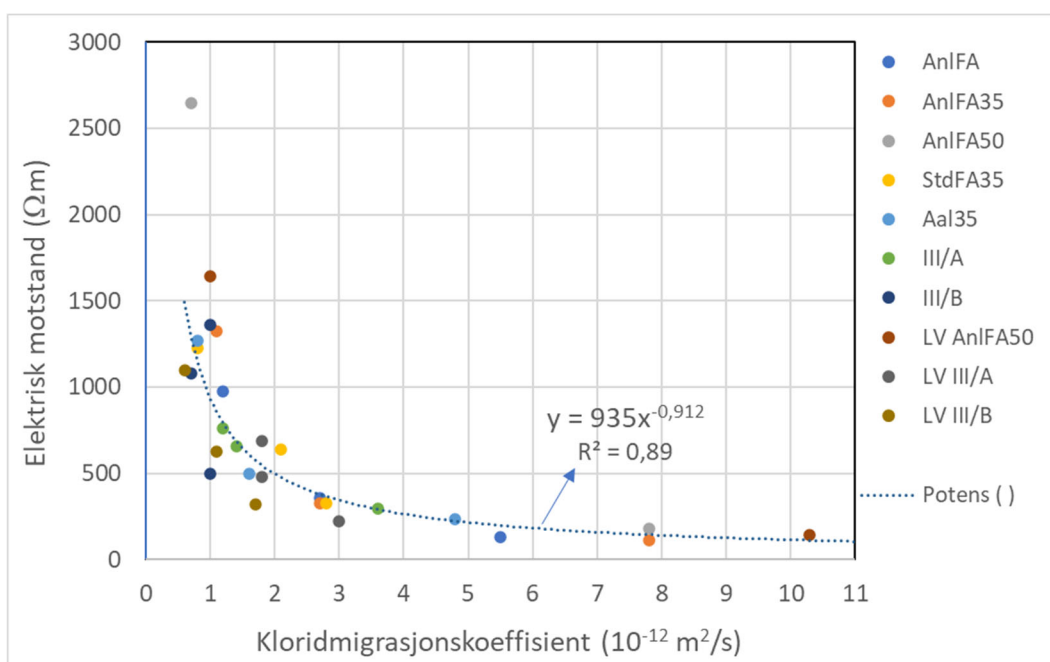
Elektrisk motstand (diskutert i etterfølgende kapittel) ble målt ved de samme terminene som i migrasjonsforsøkene. I Figur 24 er elektrisk motstand plottet mot tilhørende kloridmigrasjonskoeffisienter. En trendlinje for alle dataene samlet er også angitt. De to høyeste migrasjonskoeffisientene (hhv. $19,5$ og 25×10^{-12} , begge med tilhørende svært lave elektrisk motstand) målt etter 28 d for de to betongene med 50% FA er ikke vist i figuren, men trendlinjen inkluderer også disse. Vi kan se at avtagende migrasjonskoeffisient (økt herdetid) gir økt variasjon i målt elektrisk motstand for de ulike betongene. Spesielt framtrede blir dette for koeffisienter ned mot 1.



Figur 22 – Kloridmigrasjonskoeffisient ved 28 d, 90 d og 4 års alder (etter vannlagring)



Figur 23 – Kloridmigrasjonskoeffisient (med standardavvik) ved 4 års alder (etter vannlagring)



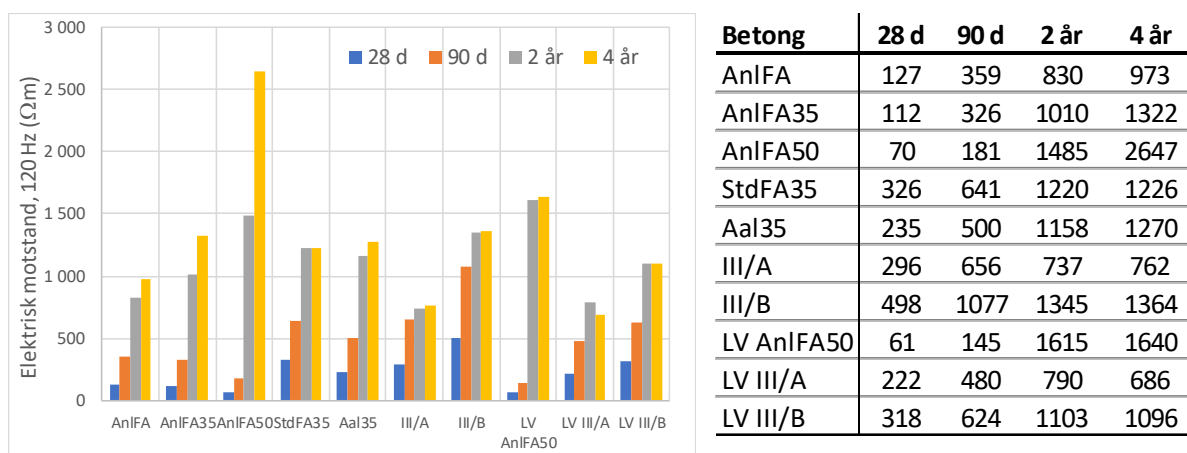
Figur 24 – Målt elektrisk motstand mot kloridmigrasjonskoeffisient

6.6 Spesifikk elektrisk motstand

Spesifikk elektrisk motstand ble bestemt ved både 120 Hz og 1000 Hz etter 28 d, 90 d, 2 år og 4 år. Alle målinger er utført på vannlagrede terninger ved $20 \pm 2^\circ \text{C}$. Målingene med de to frekvensene ga veldig like resultater, se VEDLEGG 4. Figur 25 viser 120 Hz-resultatene. Serien AnlFA, AnlFA35 og AnlFA50 viser at økende FA-dosering gir lavere elektrisk motstand i ung alder, men svært høy elektrisk motstand etter 4 år (2650 Ωm for AnlFA50). Det er

uklart hvorfor LV AnlFA50 ikke har særlig utvikling fra 2 til 4 år slik som AnlFA50 har. De tre betongene med 35% FA (AnlFA35, StdFA35 og Aal35) ender alle opp på rundt 1300 Ω m etter 4 år. For slaggbetongene er det minst utvikling av elektrisk motstand i tiden etter 90 døgn, og de ender etter 4 år opp på rundt 700 Ω m for III/A-betongene og 1100–1350 Ω m for III/B-betongene.

Tabell 10 viser resultatene som relativ utvikling i forhold til hver betongs spesifikke elektriske motstand ved henholdsvis 28 døgn og 90 døgn.



Figur 25 – Målt spesifikk elektrisk motstand, vannlagrede prøver, 120 Hz.

Tabell 10 Relativ utvikling av elektrisk motstand i forhold til 28 døgn (venstre) og 90 døgn (høyre)

Betong	28 d	90 d	2 år	4 år	Betong	28 d	90 d	2 år	4 år
AnlFA	1,00	2,82	6,53	7,65	AnlFA	0,35	1,00	2,31	2,71
AnlFA35	1,00	2,92	9,05	11,84	AnlFA35	0,34	1,00	3,10	4,05
AnlFA50	1,00	2,57	21,15	37,71	AnlFA50	0,39	1,00	8,22	14,66
StdFA35	1,00	1,96	3,74	3,76	StdFA35	0,51	1,00	1,90	1,91
Aal35	1,00	2,13	4,94	5,41	Aal35	0,47	1,00	2,32	2,54
III/A	1,00	2,21	2,49	2,57	III/A	0,45	1,00	1,12	1,16
III/B	1,00	2,16	2,70	2,74	III/B	0,46	1,00	1,25	1,27
LV AnlFA50	1,00	2,36	26,29	26,71	LV AnlFA50	0,42	1,00	11,17	11,34
LV III/A	1,00	2,16	3,55	3,08	LV III/A	0,46	1,00	1,65	1,43
LV III/B	1,00	1,96	3,47	3,45	LV III/B	0,51	1,00	1,77	1,76

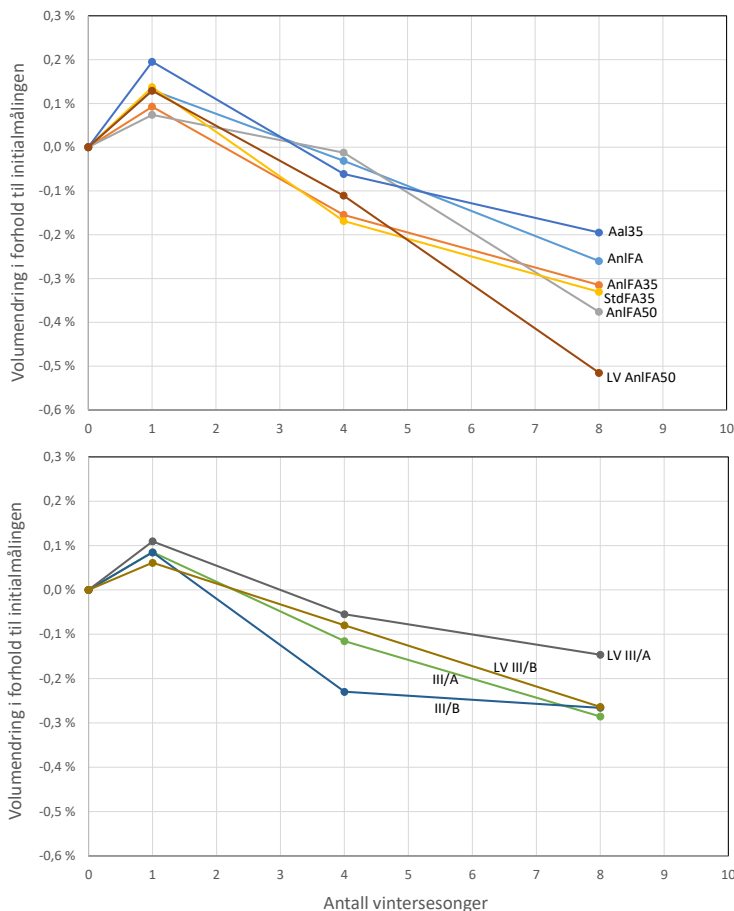
7 Resultater, feltforsøket (blanding 1)

7.1 Volumendring (ytre frostskafer)

Endring i volum for de små feltprøvestykkene (75 x 150 x 150 mm) etter 1, 4 og 8 års eksponering er vist i Figur 26 og Figur 27. Volum registreres som prøvens vekt i luft og i vann (etter 2 døgn vannlagring før registrering). Eventuelt avskallet materiale på grunn av frost registreres som en reduksjon i prøvens volum (negativ verdi). Faktorer som også kan spille inn på registrert volum er endringer i prøvens fukttilstand og eventuelt begroing på overflatene. Hvis prøven tar opp fukt i feltstasjonen vil begge disse to faktorene bidra til økt vekt og at registrert volum dermed øker – som er tilfellet mellom 0 og 1 år.

Hvert av de små prøvestykkene (halv terning) har et utgangsvolum på ca. 1,6 liter og veier ca. 3,7 kg. En volumendring på 0,1 % tilsvarer dermed 3,7 gram vektendring ved måling; dette antas å representere omtrent metodens måleusikkerhet.

Volumforandringene er fremstilt på to måter. Figur 26 viser alle resultatene med initialtilstanden før utplassering i feltstasjonen ved 0 år som referanse. Her er det som tidligere nevnt volumøkning første året. Figur 27 viser volumendringene med 1-årsmålingen som referanse.

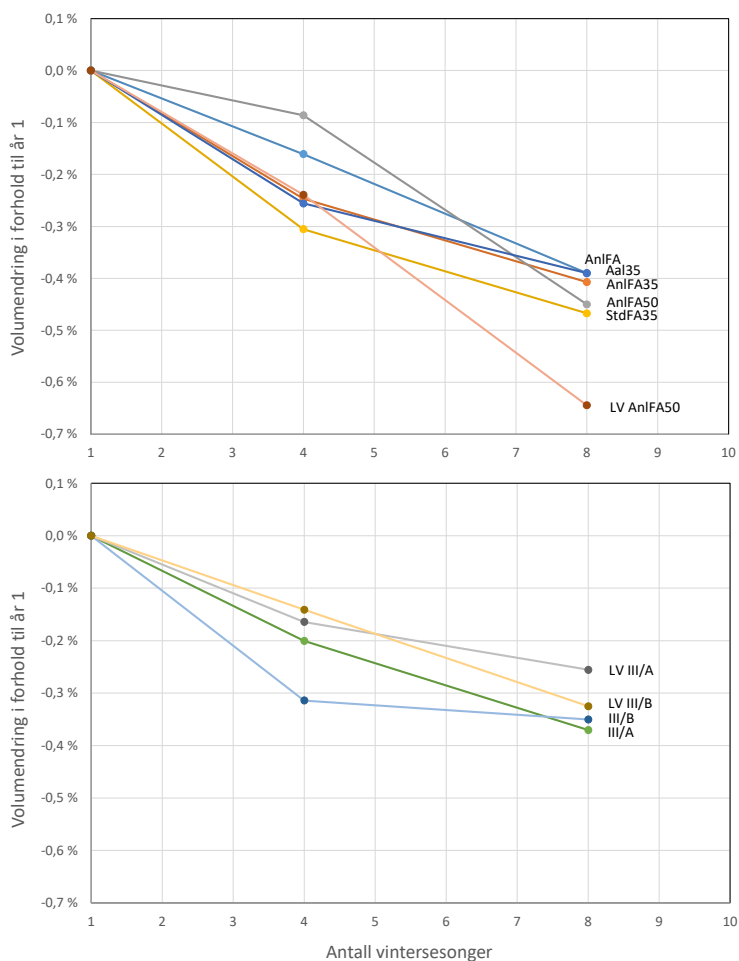


Figur 26 – Volumendring i forhold til initialtilstanden ved 0 år, små feltprøvestykker.

I henhold til tidligere undersøkelser ved samme feltstasjon ved Rv40/Borås [4] er en volumreduksjon på 2–3 % vurdert som en akseptgrense etter lang eksponeringstid (>10–20 år). I vår undersøkelse ligger volumreduksjonen i stor grad under 0,5 % etter 8 år, dvs. foreløpig langt under denne akseptgrensen.

I tiden etter 1 år er det registrert volumreduksjon for alle betongene. Det ble etter 4 år konkludert med at forandringene var for små til å dra noen konklusjoner med hensyn til ytre frostska-der. Mellom 1 og 4 år er det også registrert økning i ultralydhastigheten (dynamisk E-modul) noe som indikerer at det ikke er indre frostska-der, se etterfølgende kapittel.

Mellom 4 og 8 år har volumreduksjonen utviklet seg videre for alle betongene, men forskjellene er fortsatt små og muligens fortsatt påvirket av måleusikkerheten. Skal vi likevel tolke tallverdiene for volumreduksjon fra 1 til 8 år (Figur 27) så ligger betongen LV AnlFA50 på rundt 0,6 %, de andre FA-betongene på rundt 0,45 %, og alle slaggbetongene ligger rundt 0,3 %. Det er ikke mulig å si noe om videre utvikling naturligvis, men noen av betongene viser tegn til utflating og andre ikke. Mellom 4 og 8 år er det registrert moderat reduksjon i ultralydhastigheten, noe som kan være en indikasjon på at indre frostska-der er under utvikling, se etterfølgende kapittel.



Figur 27 - Volumendring fra år 1, små feltprøvestykker.

7.2 Ultralydhastighet (indre frostskader)

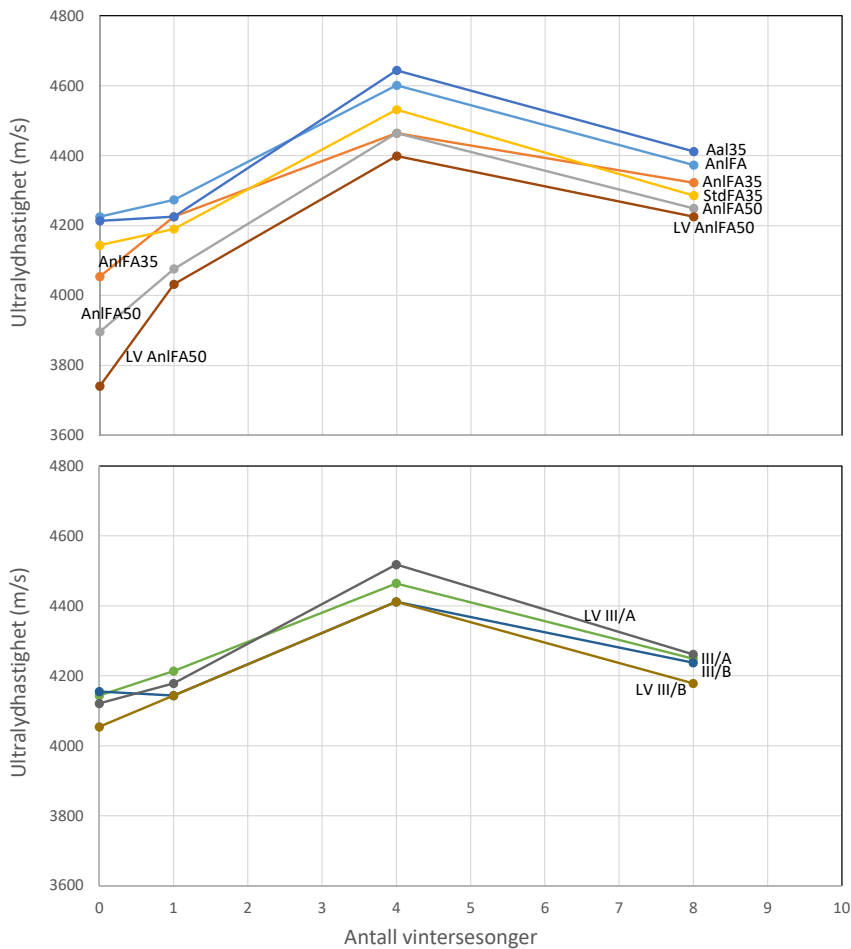
Målte ultralydhastigheter på de samme små feltprøvestykkene (som diskutert i forrige kapittel) etter 0, 1, 4 og 8 vintersesonger er vist i Figur 28. Initialmålingen (her ved tid=0) ble gjort etter ca. 28 døgns alder. Lagringsforholdene fram til 28 døgn var først 7 døgns vannlagring som hele terninger, så lagring i romklima i perioden 7–28 døgn, deretter saging ved 28 døgn til halve terninger og initialmåling.

Ultralydhastigheten øker for alle betongene de første 4 årene. Dette er i utgangspunktet et mål på kontinuerlig hydratasjon og fortetting av bindemidlet, og at (den dynamiske) E-modulen øker – som er en forventet utvikling for homogen, uskadet betong.

Fra 4 til 8 år er det imidlertid en reduksjon i ultralydhastigheten, fra 3 til 6% for de ulike betongene. Om dette skyldes indre nedbrytning eller har med måleusikkerhet å gjøre er usikkert ifølge RISEs 8-årsrapportering, se VEDLEGG 11. Ultralydhastigheten ved 8 år er for alle betongene fortsatt høyere enn verdien etter 1 år.

Ser man på relativ utvikling for ultralydhastighet fra hhv. 1 år eller 4 år; fram til 8 år, er det ingen klar trend hva gjelder effekten av FA eller slagg.

Målt ultralydhastighet er avhengig av prøvenes fukttilstand der økt fuktinnhold bidrar til økt ultralydhastighet. Med andre ord vil endret fukttilstand fra initialmålingen og videre under lagring i felt påvirke måleresultatet. Som del av lab.programmet (blanding 2) ble ultralyd målt de første månedene på hele terninger. Sammenliknet med initialmålingene vist her for feltprøvene (blanding 1), ble det i lab.programmet (blanding 2) registrert ca. 10% høyere ultralydhastighet for betongene med masseforhold 0,39 og ca. 25% høyere for betongene med masseforhold 0,44. Dette forklares med høyere fuktinnhold i de hele terningene i laboratorieprogrammet (blanding 2), ref. VEDLEGG 4.



Figur 28 – Ultralydhastighet, små feltprøvestykker. Gjennomsnitt av tre prøver.

7.3 Karbonatisering

Karbonatisering på feltprøvene er kun målt ved 8-årsterminen. En kjerne ble tatt ut fra den vertikale flaten. I lab. ble kjernen spaltet på langs og karbonatiseringsdybden ble målt ved hjelp av 1 % fenolftaleinløsning, se VEDLEGG 2 for mer om prøvningsmetoden.

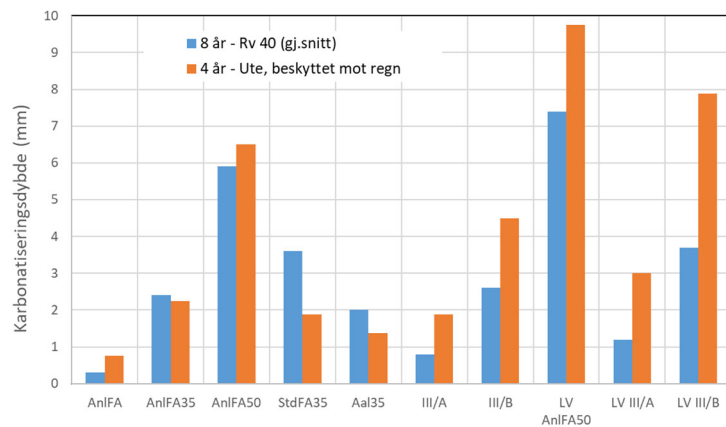
Målte karbonatiseringsdybder er vist i Tabell 11, hhv. maksimumsverdi og gjennomsnitt. I Figur 29 er målt gjennomsnittsverdi plottet sammen med siste måling fra lab.programmet etter naturlig karbonatisering i 4 år (ute, beskyttet mot regn, se kapittel 6.3).

Vi kan se at karbonatiseringsdybden etter 8 år ved Rv 40 øker med økende FA- og slaggdosering, og med økende masseforhold – slik tilfellet også var i lab.programmet. 8 års karbonatisering ved Rv 40 gir omtrent samme eller mindre karbonatiseringsdybde sammenliknet med naturlig karbonatisering etter 4 år, med unntak for betongene StdFA35 og Aal35.

Figur 30 viser bilder av prøvestykker etter påføring av fenolftaleinløsning for de fire betongene som hadde mest karbonatisering.

Tabell 11 Karbonatiseringsdybder etter 8 år i felt, vertikal flate

Betong	Gj.snitt (mm)	Maks.verdi (mm)
AnlFA	0,3	0,8
AnlFA35	2,4	4,4
AnlFA50	5,9	9,4
StdFA35	3,6	6,3
Aal35	2	4,2
III/A	0,8	1,9
III/B	2,6	5,4
LV AnlFA50	7,4	16,9
LV III/A	1,2	2,8
LV III/B	3,7	6,2



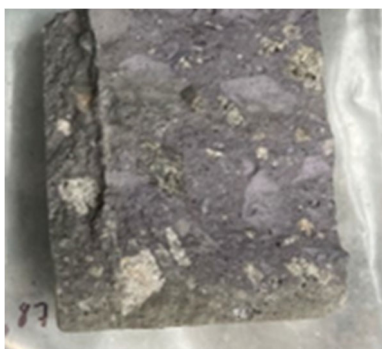
Figur 29 - Karbonatisering etter 8 år ved Rv 40, samt etter 4 år ute beskyttet mot regn.



AnlFA50



StdFA35



LV Anl50



LV III/B

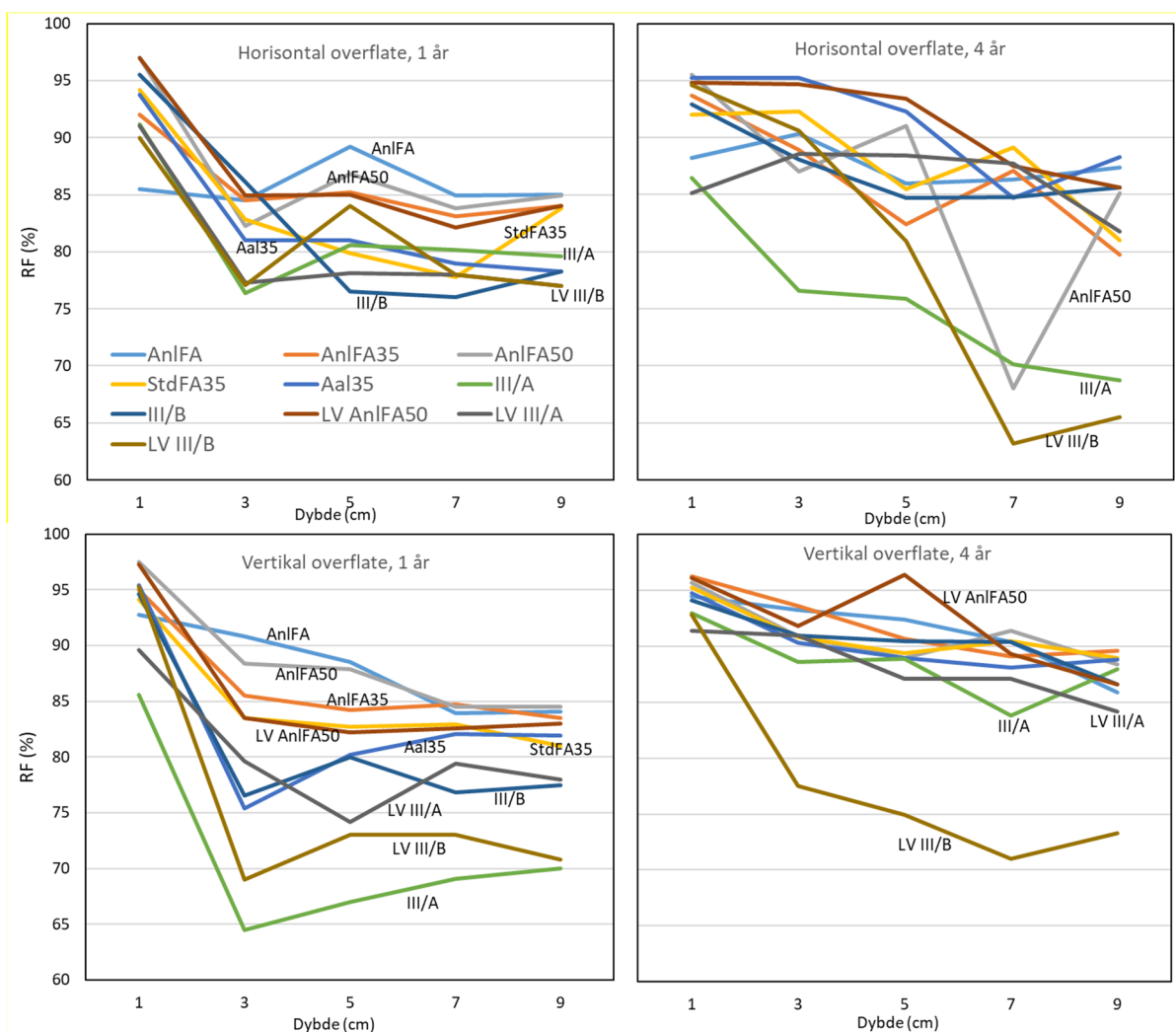
Figur 30 - Karbonatisering etter 8 år i felt, utborede kjerner. Bildene viser den ene halvparten av kjernen etter spalting og påføring av fenolftaleinløsning, for fire av betongene. Karbonisert sone framstår som fargeløs betong nederst på bildene.

7.4 Fuktprofil (RF)

Fuktprofil ble målt kun etter 1 og 4 år. Målte fuktprofiler (RF) er vist i Figur 31. Kjerner med diameter 75 mm, en kjerne horisontalt og en vertikalt, ble boret ut for hver betong (store prøvestykker). Kjernene ble sagd i skiver med tykkelse 2 cm fra overflaten og innover, dvs. 0–2 cm, 2–4 cm, osv, inntil innerste 8–10 cm. Hver skive ble deretter knust, større tilslagskorn ble fjernet. Betongpastabitene ble lagt i prøverør og forseglet med kork. Fuktprofil ble bestemt ved Chalmers, hvor prøvene først ble satt i klimarom ($20\pm 1^\circ\text{C}$) i 48 timer hvorefter en VAISALA RF-måler ble installert. 24 timer senere ble RF avlest. Angitte dybder i figuren nedenfor angir hver skives midlere dybde.

Fuktnivået i ytterste sjikt er i stor grad høyere enn lengre inn i betongen. Fuktnivåene lengre inn er mer konstante med noen unntak, og også med noen uregelmessige resultater over dybden. At fuktnivået øker mellom 1 og 4 år er en klar tendens. Fra resultatene fra horisontal overflate synker imidlertid fuktnivået mellom 1 og 4 år for betongene III/A og LV III/B. De samme to betongenes fuktnivå ligger også generelt lavest; enkeltverdier ligger under 70% RF noe som er et tvilsomt resultat for en utendørs «konstruksjon» utsatt for regn/fukt. Betongens selvuttørking (pga. kjemisk svinn) kan i seg selv ikke bringe RF ned til så lave verdier. Ser vi bort i fra betongene III/A og LV III/B så ligger RF etter 4 år for dybde 3–9 cm i området 83–90 % for horisontal overflate og i området 87–91 % for vertikal overflate.

For betong III/A spekuleres det i VEDLEGG 5 om kjernene fra horisontal og vertikal overflate har blitt forvekslet. Det poengteres også samme sted at fuktmålinger har en vesentlig måleusikkerhet. Andre faktorer som kan påvirke kan være tilførsel av fukt ved utboring av kjernene, eventuelt tap/opptak av fukt under saging og håndtering, og de små betongprøvene som benyttes til RF-måling vil kunne få utilsiktet uttørking hvis man ikke forsegler raskt. Alle disse faktorene kan forklare uregelmessig RF over dybden for en del av betongene.



Figur 31 - Fuktprofil (RF) etter 1 og 4 år, store feltprøvestykker. Horisontale overflater øverst, og vertikale overflater nederst. Hvert enkeltresultat er fra en skive.

7.5 Kloridinntrengning

Fra de utborede kjernene, en kjerne horisontalt og en vertikalt for hver betong, ble det frest ut betongstøv i sjikt og kloridinnholdet i hvert sjikt (kloridprofilen) ble bestemt ved potensiometrisk titrering. Sjiktene var 0–2 mm, 2–4 mm, 4–6 mm, 6–10 mm, 10–15 mm, 15–20 mm og 20–25 mm. For slaggbetongene ble sjiktet 25–30 mm frest i tillegg etter 8 år. Dette var motsatt av det som var beskrevet, nemlig at alle øvrige betonger skulle fresas til sjiktet 25–30 mm. For betongene AnlFA35 og AnlFA50 er ikke kloridnivået kommet ned til bakgrunnsnivået i sjiktet 20–25 mm, og resultatet viser sånn sett at sjiktet 25–30 mm burde vært frest. Betongenes bakgrunns kloridnivå (innerste sjikt) synes å ligge på ca. 0,02% av betongvekt.

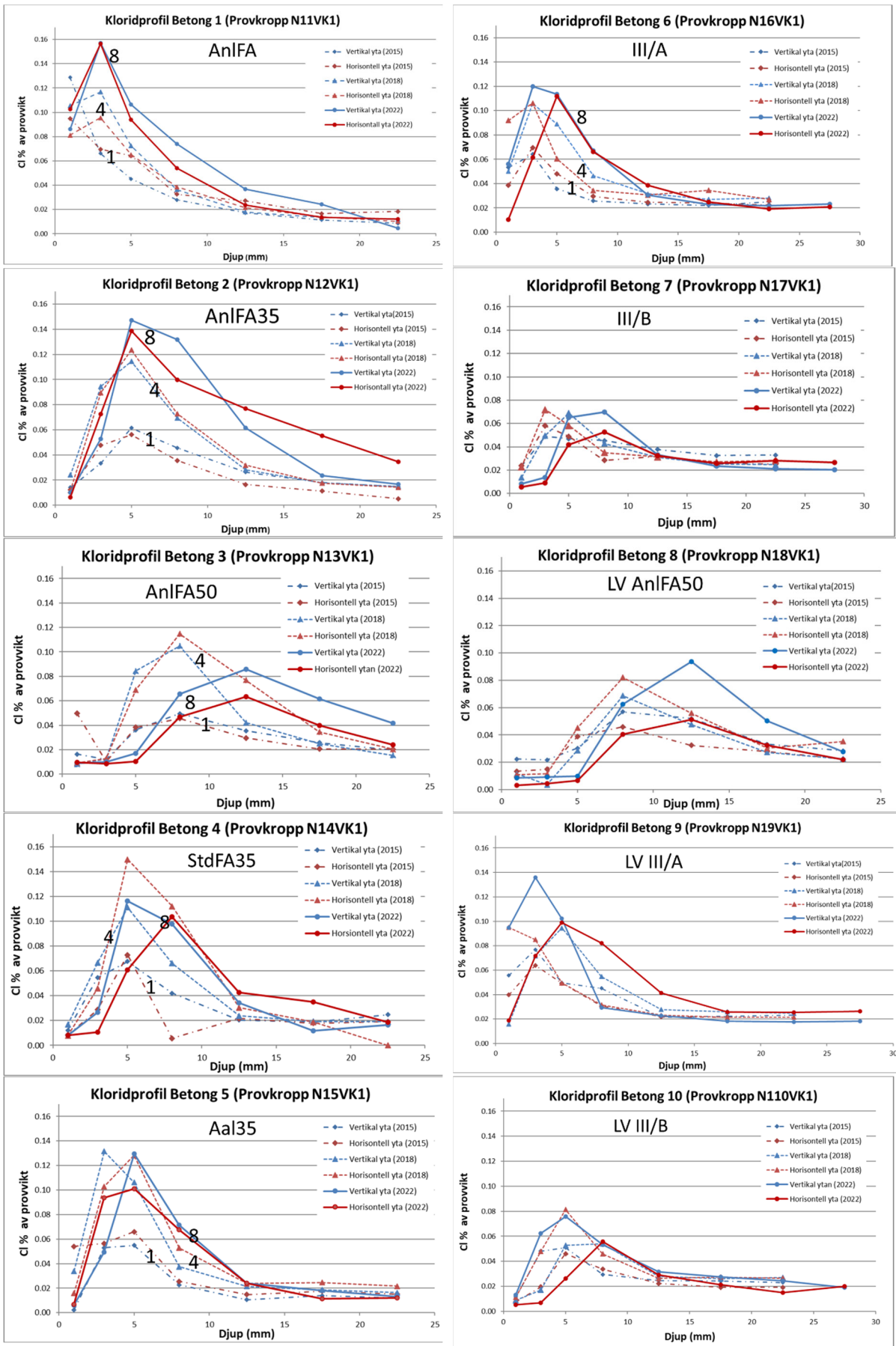
Alle kloridprofiler etter 1, 4 og 8 år er vist i Figur 32. Angitte dybder i figuren angir midlere dybde for hvert sjikt. Tabell 12 angir maksimum kloridnivå og tilhørende dybde. Det er etter 8 år i stor grad den vertikale flaten som har høyest kloridinntrengning. Dette er ikke like tydelig etter 1 og 4 år, men med de generelt meget lave kloridinnholdene som er målt har antagelig nøyaktigheten ved målemetoden påvirket bildet noe.

Kloridene trenger inn med tiden, som forventet, men kloridnivåene er generelt lave selv etter 8 års eksponering. Kloridprofilene anses ikke egnet til beregning av diffusjonskoeffisienter. Sammenliknet med målinger vi har fra andre konstruksjoner nær veg (1 år i feltstasjon Espa, Askimporten tunnel etter 5 og 10 år, og etter 6 år fra kantdragere på ulike bruer) synes klorideksponeringen ved Rv40 å være relativt moderat.

Kloridnivåene i ytterste sjikt er veldig lave, men unntak for AnIFA, III/A og LV III/A. Maksimum kloridnivå avtar med økende FA-dosering, mens dybden hvor maksimumspunktet inntreffer øker. Økt karbonatisering (og utluting) ved økende FA-dosering har sannsynligvis bidratt til dette (se karbonatiseringsdybdene i Figur 29). Forskjeller i kloridbindingskapasitet og kapillære effekter kan også spille inn. Karbonatisering reduserer pH og det frigis kjemisk bundne klorider som delvis vil diffundere innover samt bli tilgjengelig for utvasking fra overflaten. Det samme kan sies om økt slagginnhold (III/A vs. III/B) der økt slagginnhold også gir redusert maksimum kloridnivå, men økt dybde hvor maksimumspunktet inntreffer.

Tabell 12 Maksimum kloridnivå etter 8 års eksponering

Betong	Maksimum kloridnivå	
	Kloridinnhold (% av bet.vekt)	Dybde (mm)
AnIFA	0,16	3
AnIFA35	0,15	5
AnIFA50	0,08	12,5
StdFA35	0,12	5
Aal35	0,13	5
III/A	0,12	3
III/B	0,07	8
LV AnIFA50	0,09	12,5
LV III/A	0,14	3
LV III/B	0,08	5



Figur 32 - Alle kloridprofiler målt på kjerner tatt fra vertikal og horisontal overflate etter hhv 1, 4 og 8 år. Antall år er angitt i de delfigurene der det er hensiktsmessig.

7.6 Feltprøver, status etter 8 år

De små prøvestykkene (indre og ytre frostskafer) er utplassert ved Rv 40, umodifisert, for videre oppfølging i framtiden. De store prøvestykkene (kloridinntrengning, karbonatisering) ble etter 8 års-registreringen saget i mindre lengder, og er nå uten borhull fra tidligere prøving, før de ble satt tilbake i feltstasjonen. Størrelsen er vurdert slik at det kan gjøres en runde til med registrering, se Figur 33.



Figur 33 – Store feltprøvestykker etter kjerneuttak ved 8 år og etter saging (nederst) før de ble satt tilbake i feltstasjonen

8 Oppsummering

Bestandighetsmessige egenskaper er undersøkt for til sammen 10 betonger, hvorav syv har et masseforhold på 0,39 og tre har 0,44. Alle betongene har 4 vekt% silikastøv av total bindemiddelmengde, og alle har et proporsjonert pastavolum på 325 liter. Tilsiktet luftinnhold i fersk betong var 4 %. Effekt av flygeaskemengde (17, 35 og 50 vekt%) er undersøkt i kombinasjon med AnFA-sementen. I tillegg er betonger med andre sementtyper (StdFA og Aal) tilsatt flygeaske til totalt 35 vekt% undersøkt, samt to betonger med slaggsementer (III/A med 48% slagg og III/B med 75% slagg). De to slaggsementene samt AnFA med totalt 50 vekt% FA er undersøkt med masseforhold både 0,39 og 0,44. Betongene er støpt ut i tre omganger, hhv. i november 2014 (støping av feltprøver), våren 2015 (støping av laboratorieprøver) og sent 2015/tidlig 2016 (dokumentasjon av varmeutvikling).

Følgende egenskaper er bestemt: Trykkfasthet, spesifikk elektrisk motstand, motstand mot karbonatisering, kloridmotstand, frostmotstand og varmeutvikling i herdefasen.

Laboratorieforsøket (blanding 2) gikk over 4 år, mens felteksponeringen (blanding 1) ved RISEs feltstasjon ved Rv40, Borås, så langt har gått i 8 år. Rv40 saltes om vinteren og rapporterte klimadata viser at det er mange frostsykler hver vinter.

Forbruk av tilsetningsstoff ved blanding: Økt FA-innhold ga vesentlig økt behov for luftinnførende tilsetningsstoff, mens slaggsementene ga lavt behov for luftinnførende tilsetningsstoff. Denne trenden er erfart tidligere, og forventet. Behovet for superplastiserende tilsetningsstoff varierte ikke veldig mye for betongene.

Sammenliknende lab.prøving fra blanding 1 og blanding 2 (nominelt identiske blandinger):

- *Betongenes luftinnhold:* På grunn av en sannsynlig feil ved målingen av luft i fersk betong ble luftinnholdet i blandningene som ble brukt til feltprogrammet (blanding 1) trolig jevnt over høyere enn i blandningene brukt til laboratorieprogrammet (blanding 2). Estimer av luft ved å sammenlikne densiteter (proporsjonert densitet, målt fersk betongdensitet, målt herdet betongdensitet) antyder at luftinnholdet ble i gjennomsnitt ca. 1% høyere i blanding 1 enn i blanding 2. Det ulike luftinnholdet forklarer sannsynligvis mye av ulikhetene i måleresultater fra parallell prøving av betong fra blanding 1 og 2, se etterfølgende punkter:
- *28-døgns trykkfasthet:* Fra blanding 1 ble det målt generelt lavere fasthet enn i blanding 2, spesielt gjelder dette betongene StdFA35, Aal35 og III/B hvor forskjellen var fra 12 til 21 MPa ved 28 dogn.
- *Frostprøving:* Standard frostprøving etter 56 sykler ga generelt moderat lavere avskalling i prøvestykkene fra blanding 1 enn fra blanding 2. Etter 112 sykler var forskjellen noe større.

- Luftporestrukturanalyse: Tynnslipsanalyser viste gjennomgående høyere spesifikk overflate og lavere avstandsfaktor i blanding 1 sammenliknet med blanding 2. Uansett blanding indikerer resultatene meget god luftporestruktur i alle betongene, i alle fall etter tradisjonelle vurderingskriterier for CEM I-baserte betonger. Disse resultatene korrelerer dårlig med målt frostavskalling ved den akselererte frostprøvingen.

Lekkasje under frostprøvingen: For betongene fra blanding 1 og standard frostprøving ble det registrert mye problemer med lekkasje, som gir bortfall av prøveresultater for de prøvestykkene det gjaldt – i stor grad var dette slaggbetongene, men i liten grad knyttet til avskallingsnivå. Problemene med lekkasje ble redusert betraktelig i det omfattende frostprøvningsprogrammet som ble gjort etterpå fra blanding 2. Her ble det for slaggbetongene utført ekstra epoxy-behandling av prøvestykkenes sideflater som en del av prepareringen.

Resultater, laboratorieprogrammet (blanding 2):

- Fasthetsutvikling: Fastheten reduseres med økende FA-dosering både på kort og lang sikt (4 år). Fastheten til slaggbetongene er på nivå med betongene med 35% FA (når det er justert for antatte/estimerte variasjoner i luftinnhold). Økt FA gir stor fasthetstilvekst i tiden etter 90 døgn og fram til 4 år, i størrelsesorden 15% økning for betongene med 35% FA og 45% økning for betongene med 50% FA. Slaggbetongene har i området 10–17% fasthetstilvekst i samme periode.
- Herdevarme: Økt FA-dosering reduserer systematisk mengden herdevarme. Betongen AnIFA avga 309 kJ/kg bindemiddel etter 168 modenhetstimer. Tilsvarende tall for de tre betongene med 35% FA var fra 232 til 256 kJ/kg bindemiddel, for slaggbetongene fra 241 til 287 kJ/kg, og for betongene med 50% FA rundt 200 kJ/kg.
- Naturlig karbonatisering: Økt FA-dosering og slagginnhold gir økt karbonatiseringsdybde. Betongene med masseforhold = 0,39 og 35% FA eller 48 % slagg hadde etter 4 år en karbonatiseringsdybde i området 1,5–2 mm. Betongen med $m = 0,39$ og 50% FA hadde 6,5 mm, og den med 75 % slagg hadde 4,5 mm. Økt masseforhold til 0,44 («LV»-variantene) ga økt karbonatiseringsdybde, og etter 4 år var dybden nær 10 mm for betongen med 50% FA, 3 mm for den med 48 % slagg og nær 8 mm for LV-betongen med 75 % slagg. Karbonatiseringsmålinger på feltprøvene etter 8 år er i stor grad i tråd med resultatene/diskusjonen ovenfor.
- Frostavskalling etter 56 frostsykler og ulik forkondisjonering:
 - o Økt forkondisjoneringstid utover standard 7 døgn ga generelt høyere avskalling, med unntak for de to betongene med 50% FA hvor avskallingen i alle tilfeller var høy (og måleresultatene usikre pga. lekkasjer). Betongen AnIFA har lav/moderat avskalling uansett forkondisjoneringstid.

- Det som omtales som standard prosedyre (7 dager forkondisjonering) ga $\leq 0,75 \text{ kg/m}^2$ avskalling etter 56 sykler for alle betongene, med unntak av de to med 50% FA. Det kan nevnes at kravet til frostbestandig betong i hht. NS-EN 206+NA:2020 er avskalling $\leq 0,50 \text{ kg/m}^2$.
- Ved forkondisjonering i 21 døgn var økningen i avskallingen ikke dramatisk. Ser vi fortsatt bort i fra de to betongene med 50% FA var økningen i gjennomsnitt 40% i forhold til standard prosedyre.
- For 84 døgn forkondisjonering øker avskallingen betraktelig for de to betongene med 75% slagg. Generelt for betonger med slagginnhold $\geq 35\%$ krever NS-EN 206+NA:2020 forkondisjonering i 14 uker (98 døgn), dvs. noe lenger enn de 84 døgnene benyttet her. Ser vi bort i fra de to nevnte betongene samt de to med 50% FA er avskallingen $\leq 0,9 \text{ kg/m}^2$ for de øvrige.
- Ved økt forkondisjoneringstid fra 84 til 365 døgn øker avskallingen markant for flere av betongene, men betongene med AnIFA, StdFA35 og den med 48% slagg og masseforhold 0,39 oppnådde fortsatt $\leq 0,9 \text{ kg/m}^2$ avskalling ($0,6\text{--}0,9 \text{ kg/m}^2$).
- Økt CO_2 -konsentrasjon siste uka ved kondisjonering i henholdsvis 21 og 84 døgn ga markant økning i avskallingen sammenliknet med vanlig kondisjoneringsklima i hele perioden. Ser vi bort fra de betongene med avskalling $\geq 2 \text{ kg/m}^2$ (de to med 50% FA og de to med III/B), så økte avskallingen i området 2 til 4 ganger for begge kondisjoneringstidene.
- I mikroskopiundersøkelser av frostprøvene ble det sett riss med rissvidder ca. 0,01 mm både før og etter frostprøving, men antall riss hadde økt etter frostprøvingen. Dette gjelder alle betongene unntatt betongen med AnIFA som også hadde lavest avskalling. Undersøkelsene indikerer også at det er hele eller deler av det karbonatiserte sjiktet som skaller av under frostprøvingen.
- XRD-undersøkelser før og etter frostprøving, og estimerer av CaCO_3 -innhold, indikerer at karboniseringsdybden øker markant etter frostprøvingen. Dette er det motsatte av resultatet fra mikroskopiundersøkelsen nevnt ovenfor. Grunnen til dette er uklar.
- Økt naturlig karbonatisering viser en viss korrelasjon til økt frostavskalling registrert i lab. ved forlenget kondisjonering, men dette gjelder først og fremst for betongene med høy avskalling $> 2 \text{ kg/m}^2$.
- Kloridmigrasjon: AnIFA-variantene har de høyeste kloridmigrasjonskoeffisientene ved 28 døgns alder; økende med økende FA-innhold og masseforhold. Fram til 90 døgns alder reduseres migrasjonskoeffisientene for alle betongene, men de to AnIFA50-variantene har fortsatt høye migrasjonskoeffisienter ($8\text{--}10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). Etter 4 år har alle betongene migrasjonskoeffisienter i området $0,6\text{--}1,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, med unntak for betongen med 75% slagg som oppnådde $1,8 \text{ m}^2/\text{s}$. Betongene med 35% FA oppnådde $0,8\text{--}1,1 \text{ m}^2/\text{s}$ etter 4 år. Det er en viss usikkert knyttet til relasjonen mellom kloridmigrasjon og kloriddiffusjon,

spesielt for betonger med svært høy spesifikk elektrisk motstand.

Kloridmigrasjonskoeffisienten målt på de to AnI50-variantene, etter 4 år, anses derfor som noe usikker fordi den spesifikke elektriske motstanden var svært høy.

- Elektrisk motstand: Økt FA-dosering gir redusert spesifikk elektrisk motstand ved 90 døgn, men stor økning i tiden etter – og gir høyest elektrisk motstand etter 2 år og markant høyere etter 4 år. Betongen AnIFA50 med 50% FA har etter 4 år en elektrisk motstand på 2650 Ω m. De tre betongene med 35% FA ligger i området 1300 Ω m etter 4 år. Slaggbetongene har minst utvikling over tid og ligger etter 4 år rundt 700 Ω m for betongene med 48 % slagg (III/A) og 1000–1300 Ω m for betongene med 75 % slagg (III/B).

Resultater, felteksponering ved Rv40 (blanding 1):

- Volumendringer (små prøvestykker), etter 8 år: Eventuelt tap av volum over tid er et mål på ytre frostskafer. Fra 0 til 1 år er det registrert en liten volumøkning (målt som vektøkning); dette skyldes sannsynligvis fuktopptak i prøvene. Fra 1 til 8 år er det registrert volumreduksjon på 0,3 – 0,6 % for de ulike betongene. Dette er foreløpig langt under de 2 – 3 % som av RISE er vurdert som akseptgrense etter lang eksponeringstid (>10–20 år).
- Ultraløyd hastighet (små prøvestykker), etter 8 år: Fra 0 til 4 år er det målt økt ultraløyd hastighet for alle betongene, noe som indikerer normal herding og at prøvene er homogene og uten indre frostskafer. Fra 4 til 8 år er det imidlertid målt reduksjon i ultraløyd hastigheten, fra 3 – 6 % for de ulike betongene. Om dette skyldes indre nedbrytning eller har med måleusikkerhet å gjøre er usikkert ifølge RISE. Ultraløyd hastigheten ved 8 år er for alle betongene fortsatt høyere enn verdien etter 1 år.
- Fuktprofil (store prøvestykker), etter 4 år: Det er målt høyest fuktnivå (RF) i ytterste sjikt, i området 90–95% RF. Lenger inn fra overflaten (3 – 9 cm) ligger fuktnivået noe lavere; i området 83–90% for horisontale overflater og 87–91% for vertikale overflater. Unntaket er betongene III/A og LV III/B hvor fuktnivået ligger ned mot 70 %, noe som er bemerkelsesverdig lavt.
- Kloridinntrenging (store prøvestykker), etter 8 år: Det er målt generelt lave kloridnivåer. Sammenliknet med egne erfaringer for felteksponerte konstruksjoner nær veg kan det tyde på at klorideksponeringen ved Rv40 ikke er spesielt hard. Maksimum kloridnivå avtar med økende FA- og slaggdosering, mens dybden hvor maksimumspunktet inntreffer øker.

9 Frostmotstand – andre studier

9.1 Generelt

Målt frostmotstand i betong i lab. påvirkes av endringer i prøveprosedyren, som vi bla. har sett i denne rapporten hvor forkondisjonering har vært en variabel. Ulike målemetoder er i bruk i andre land hvor både forkondisjonering, frosteksponeeringen og frysemediet kan variere. Høye doseringer av flygeaske og slagg er generelt observert å gi dårligere frostbestandighet, først og fremst i laboratorieforsøk, men det er også visse indikasjoner fra felt. For «Boråsmetoden» (CEN/TS 12390–9, slab test) har effekten av forkondisjonering og karbonatisering vært studieobjekter i flere undersøkelser, se bla. [3][4] og etterfølgende avsnitt. Sementer og tilsetningsmaterialer er i dag i endring og relasjonen mellom frostegenskaper i naturlig miljø i felt og akselererte lab.metoder har derfor stor oppmerksomhet. I 2016 ble det gjort en omfattende gjennomgang av litteratur på bestandighet generelt for betong med slagg og flygeaske [5], bla. basert på en nordisk workshop [8]. Når det gjelder frostbestandighet nevnes spesielt Sverige, Canada, USA og Nederland hvor det er rapportert erfaringer fra både lab. og felt.

9.2 Andre prosjekt, RISE–Trafikverket

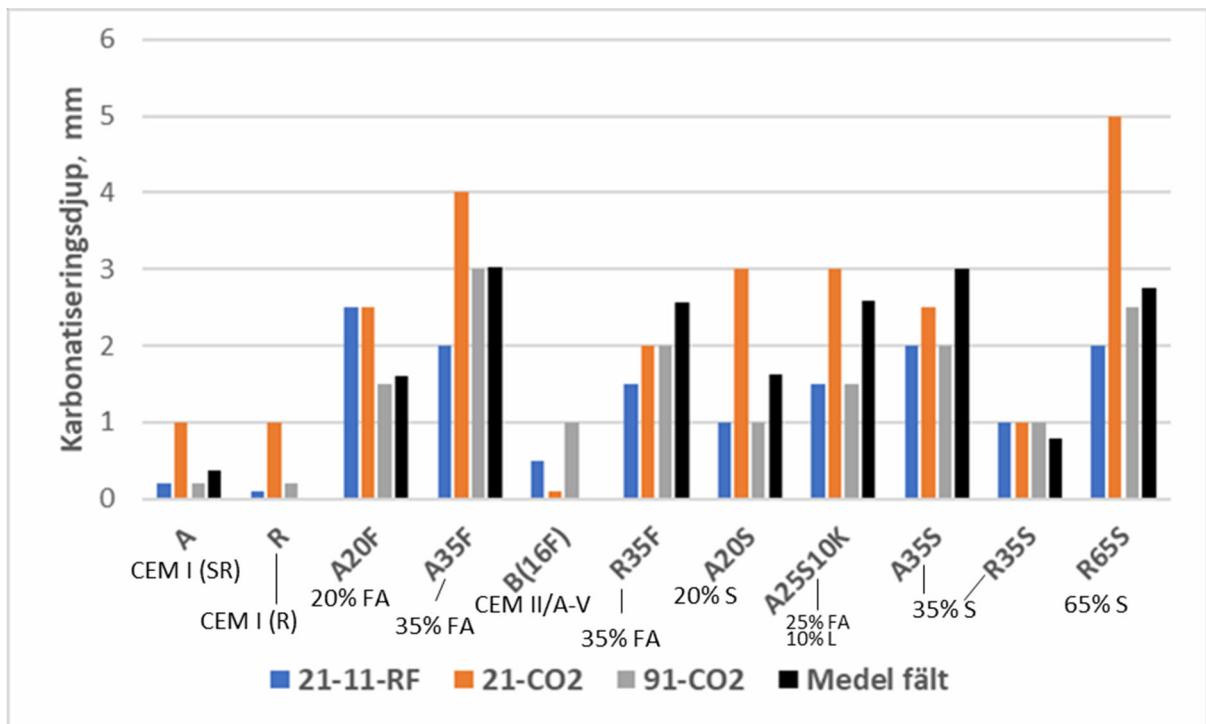
Det er flere pågående prosjekter ved RISE hvor frostmotstand er bestemt i lab. og hvor de samme betongene er utplassert ved Rv40 for langsiktig naturlig frosteksponeering. Her omtales ett spesifikt prosjekt som går relativt parallelt med vårt prosjekt. Dette er et prosjekt RISE har utført sammen med Trafikverket. Prosjektet hadde oppstart i 2013, og 11 betonger er undersøkt i lab. og ved feltstasjonen ved Rv40 [9][10]. Fire års feltresultater er rapportert pr. i dag, i tillegg til lab.resultatene. I [11] gis en oppsummering av laboratorieforskene hvor resultater fra også andre studier er inkludert i resultatdiskusjonen. Hovedmålet i prosjektet er å undersøke frostmotstand ved akselerert lab.prøving etter forskjellig forkondisjonering samt ved naturlig frosteksponeering i felt. Programmet er ikke identisk med herværende undersøkelse, men har klare paralleller bla. er det brukt høye doseringer av flygeaske og slagg. Angående kondisjoneringsvariantene som er benyttet se figurteksten til Figur 34, i tillegg ble standardmetoden benyttet (7 døgn kondisjonering i 65% RF fra 21 døgn alder). Betongene hadde vann/bindemiddelforhold 0,45 (virkningsfaktor 1,0 for alle tilsetningsmaterialer). Det ble med ulike CEM I-sementer som basis tilsatt ved blanding enten FA (20 og 35% av bindemiddelmengden) eller slagg (20, 35 og 65%), samt en betong med 25% slagg og 10% kalksteinsmel. I noen forsøk ble betongene ikke tilsatt luftinnførende tilsetningsstoff (0%, 20% slagg, 20% FA); disse diskuteres ikke her. Noen utvalgte resultater er omtalt i det følgende.

Felteksponeering ved Rv40:

- Det konkluderes med at 4 års felteksponeering ikke er lang nok tid til å konkludere med hensyn til feltoppførsel (i tråd med vår undersøkelse). Det ble i starten brukt egenfrekvensmålinger på både lab. og feltprøvestykkene (ikke brukt i vår undersøkelse). Metoden involverer banking med hammer, den ga til dels høy intern spredning og ble vurdert som ikke optimal og ikke videreført etter 1-årsmålingen. Metoden ble da erstattet med ultralydmåling, både på felt- og lab.-prøvestykkene (brukt på feltprøvestykkene i vår undersøkelse). Ultralydmålingen indikerte indre nedbrytning for noen av betongene.

Akselererte frostforsøk:

- Effekter på porestruktur, kjemisk- og fysisk bundet vann ved forkondisjonering i en uke i 1% CO₂ og ved lang kondisjonering i 65% RF ble studert. Forskjeller i eksponeringsbetingelser i lab. og felt er bla. diskutert [11] samt utlekking fra feltprøvenes eksponeringsflate basert på målinger med μ -XRF [10].
- De ulike kondisjoneringalternativene, som alle gir økt karbonatisering i forhold til standardmetoden, ga økt frostavskalling for alle betongene sammenliknet med standardmetoden, men betongene med bare CEM I ga lav frostavskalling uansett kondisjonering.
- Opptil 20% FA eller slagg påvirker frostavskallingen i liten grad, og god/akseptabel frostmotstand ble oppnådd for alle variantene av forkondisjonering.
- 35% slagg viste god/akseptabel frostmotstand for alle variantene av forkondisjonering unntatt etter saging ved 21 døgn og kondisjonering i en uke med 1% CO₂.
- 35% FA og 65% slagg ga høy avskalling for nær alle kondisjoneringsvariantene.
- Basert på karbonatiseringsmålinger anslås det i [9] at for å oppnå minst samme karbonatiseringsdybde før frostprøving som etter 4-5 års naturlig karbonatisering i vegmiljø så tilsvarer dette anslagsvis saging etter 50-60 døgn og deretter akselerert karbonatisering i en uke i 1% CO₂, se Figur 34. Videre diskuteres at 4-5 år er kort tid sammenliknet med ønsket levetid for en konstruksjon og at akselerert karbonatisering fra 21 døgns alder i lab. sann sett kanskje ikke er en urimelig forkondisjonering (for å provosere fram en karbonatiseringsdybde tilsvarende for en konstruksjon etter mange år).
- Ved saging etter 21 døgn og deretter 11 uker kondisjonering i 65% RF ble det i de fleste tilfellene oppnådd noe lavere karbonatiseringsdybde enn etter 4-5 års naturlig karbonatisering, se Figur 34.



Figur 34 – Karbonatiseringsdybde for ulike betonger etter ulik kondisjonering i lab., og etter 4 år ved Rv40 (medel fält). Kondisjonering «21-11-RF» er saging ved 21 døgn og 11 uker i 65% RF, «21-CO2» er saging ved 21 døgn og først 1 uke i 65% RF så 1 uke i 1% CO2, og «91-CO2» er saging ved 91 døgn og først 1 uke i 65% RF så 1 uke i 1% CO2. S=slag, FA=flygeaske og K(=L)=kalsteinsmel. [10]

10 Referanser

- [1] Bjøntegaard Ø. (2015) Møllenberg betongtunnel – FoU Bestandighet. Statens vegvesen rapport nr. 415, p.103
- [2] Bjøntegaard Ø. og Rodum E. (2014) Effekt av flygeaske på betongegenskaper. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012–2015. Statens vegvesen rapport nr. 275, p.60
- [3] Löfgren I., Esping O. & Lindvall A. (2016) The influence of carbonation and age on salt frost scaling of concrete with mineral additions. Proc. Int. RILEM Conf. segment on frost action in concrete, TU Denmark, 22.–24. Aug. 2016.
- [4] Utgenannt, P. and Petersson, P.E. (2012) Frost resistance of concrete containing secondary cementitious materials – Experience from field and laboratory investigations. Workshop proceeding from the Nordic mini-seminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 83–101.
- [5] Pedersen B. (2016) Sementer med flygeaske og slagg: Lab- og felterfaringer. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012–2015. Statens vegvesen rapport nr. 517, p.158
- [6] Tang, L. og Sørensen, H.E.: “Prediction of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete”, Materials and Structures, Vol. 34, October 2001, pp 479–485
- [7] Polder, R.B og Nijland, T.G.: «3 years of durability research on slag based mortars. Final report”, Statens vegvesen rapport nr. 599, 2018
- [8] Proceedings Nordic workshop, Nordic Concrete Research (2012) Durability aspects of fly ash and slag in concrete. Pedersen B., Larsen C.K. & Bager D.H. (ed.), Oslo, February 15.–16, 2012, p.206
- [9] Helsing E. (2017) Salt-frostprovning av betong med slagg och flygaska. CBI-rapport 2017:4, RISE, Borås, 2017
- [10] Helsing E. (2020) Nedbrytning hos betong med slagg och flygaska efter fyra vintersäsonger vid RV40. RISE-rapport 2020:40, ISBN: 978-91-89167-22-3, p. 65
- [11] Helsing E. og Utgenannt P. (2020) Salt-frost scaling of concrete with slag and fly ash – Influence of carbonation and prolonged conditioning on test results. Nordic Concrete Research, Publ. No. NCR 63, Issue 2/2020, pp. 89–108

Vedlegg

VEDLEGG 1 Delmaterialer

VEDLEGG 2 Blandedatoer, lagring og prøvningsmetoder lab og felt

VEDLEGG 3 Oppfølging av trykkfasthetsresultatene

VEDLEGG 4 RISE/CBIs sluttrapport etter 4 år

VEDLEGG 5 Rapport feltprøver etter 4 år

VEDLEGG 6 Frostprøvning (alternativ 5), inkl. figurer med alle frostresultatene

VEDLEGG 7 Tynnslip før og etter frostprøvning (alternativ 5), mikroskopi

VEDLEGG 8 XRD før frostprøvning (alternativ 5)

VEDLEGG 9 XRD etter frostprøvning (alternativ 5)

VEDLEGG 10 Tabeller med resultatene fra alle frostforsøkene i lab

VEDLEGG 11 Rapport feltprøver etter 8 år

Vedleggene er gitt i egen fil



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf:
firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag