

Beständighetsegenskaper hos anläggningsbetong med stenkolsflygaska

SBUF-projekt 12382



Fotot på framsidan visar frysytan hos en provkropp tillverkad av betong med 25 % flygaska av CEM I och $v_{ct_{ekv}}=0,45$ ($k=0,4$). Provning utförd enligt SS 13 72 44 procedur IA (dvs. kubsågad yta med 3,0-procentig NaCl-lösning som frysmedium). Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar = $0,031 \text{ kg/m}^2$, dvs. mycket god frostbeständighet enligt SS 13 72 44 (ackumulerad avskalning efter 56 fryscyklar mindre än $0,10 \text{ kg/m}^2$).

Förord

I detta projekt har egenskaperna hos betonger med blandade en kombination av Portlandcement och olika mängder flygaska undersökts och dokumenterats. Bakgrunden till det projektet är att det av betongtekniska och ekonomiska skäl finns ett intresse av att använda betonger blandade med Portlandcement och olika mängder flygaska i konstruktioner som byggs i stränga miljöer, t.ex. längs tösaltade vägar eller i marina miljöer (exponeringsklasser XS 1-3, XD 1-3 samt XF 2 och XF 4). I gällande regelverk begränsningar av tillsatser av flygaska, där SS 13 70 03 tillåter maximala tillsatser av 25 vikt-% - 50 vikt-% flygaska (av CEM I), beroende på exponeringsklass, medan AMA Anläggning 2010 begränsat mängden tillsatt flygaska till 6 vikt-% (av cement) i exponeringsklass XF 4 och 11 vikt-% i övriga exponeringsklasser (vid nybyggnad av bro).

I projektet har det undersökts om egenskaperna hos betonger blandade med kombinationer av Portlandcement och stenkolsflygaska blir likvärdiga med egenskaper hos betong blandade med endast Portlandcement. Projektet har genomförts som laboratorie- och litteraturstudie. Resultaten visar att betonger med stenkolsflygaska (som uppfyller de krav som finns definierade i SS-EN 450-1 och enligt de doseringar som anges i SS 13 70 03, dvs. minst 25 vikt-% av CEM I) får minst likvärdiga egenskaper som motsvarande Portlandcementbetonger.

Arbetet har utförts av Anders Lindvall, Thomas Concrete Group Centrala laboratorium i Göteborg.

Projektets referensgrupp har varit sammansatt av:

- Hans Hedlund & Thomas Johansson, Skanska Sverige AB.
- Elisabeth Helsing, Trafikverket.
- Ola Johansson, Thomas Cement AB.
- Tang Luping, Chalmers tekniska högskola.
- Mats Karlsson, AB Färdig Betong.
- Ingemar Löfgren, Thomas Concrete Group C.lab.
- Jonas Magnusson, NCC Teknik AB.
- Bo Persson & Viktor Sundberg, Swerock AB.
- Markus Steiner & Olof Östberg, Bilfinger Berger.

Projektet har finansierats SBUF, Färdig Betong, Thomas Cement, Bilfinger Berger, NCC, Trafikverket, Swerock samt Skanska.

Ett tack framförs till projektets finansiärer samt referensgruppens medlemmar.

Göteborg, December 2011.

Anders Lindvall, projektledare. Thomas Concrete Group C.lab.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och avgränsningar	1
1.3	Metod.....	2
2	Betong med stenkolsflygaska.....	3
2.1	Inledning.....	3
2.2	Stenkolsflygaska.....	4
2.2.1	Allmänt.....	4
2.2.2	Kemisk sammansättning	5
2.2.3	Fysikaliska egenskaper.....	7
2.2.4	Krav på flygaskans egenskaper enligt SS-EN 450.....	7
2.3	Inverkan av stenkolsflygaska på betongens egenskaper.....	10
2.3.1	Allmänt.....	10
2.3.2	Reaktioner med Portlandcement	10
2.3.3	Färsk betong	11
2.3.4	Ung betong	12
2.3.5	Härtnad betong	12
2.4	Krav på betong med stenkolsflygaska enligt gällande regelverk	15
2.4.1	Allmänt.....	15
2.4.2	Betong med flygaska enligt SS-EN 206 och SS 13 70 03	16
2.4.3	Betong med flygaska enligt AMA Anläggning 10.....	18
2.4.4	Krav på betong med stenkolsflygaska – sammanställning.....	19
3	Beständighet hos betong med flygaska	20
3.1	Allmänt	20
3.2	Armeringskorrosion.....	21
3.2.1	Initiering av karbonatisering	21
3.2.2	Initiering av kloridinträngning	25
3.2.3	Aktiv korrosion	32
3.2.4	Sammanfattning – armeringskorrosion	35
3.3	Frostbeständighet.....	36
3.3.1	Frostangrepp.....	38
3.3.2	Saltfrostangrepp	41
3.3.3	Sammanfattning – frostbeständighet.....	45
3.4	Kemiska angrepp	45
3.4.1	Sulfatangrepp	46

3.4.2	Ballastangrepp	47
3.4.3	Sammanfattning – kemiska angrepp	48
4	Laboratorieundersökningar utförda av Knutsson (2010)	50
4.1	Betongsammansättningar	50
4.2	Genomförda provningar	53
4.3	Resultat från provningar	53
4.3.1	Skumindextest	53
4.3.2	Egenskaper hos den färska betongen	54
4.3.3	Tryckhållfasthet	55
4.3.4	Frostbeständighet	56
4.3.5	Analys av luftporsystem	60
4.3.6	Motstånd mot kloridinträngning	61
4.4	Avslutande kommentarer från undersökning av Knutsson (2010)	63
5	Laboratorieundersökningar genomförda i SBUF-projekt 12382	66
5.1	Betongsammansättningar	66
5.2	Provning på färsk betong	68
5.3	Provning av tryckhållfasthet	71
5.4	Provning av frostbeständighet	74
5.4.1	Medelvärden på uppmätta avflagningar	76
5.4.2	Avflagningar uppmätt för enstaka provkroppar	80
5.5	Motstånd mot kloridinträngning	82
6	Analys och kommentarer	86
6.1	Allmänt	86
6.2	Tryckhållfasthet	86
6.3	Frostbeständighet	88
6.4	Motstånd mot kloridinträngning	95
7	Avslutande kommentarer och rekommendationer	97
7.1	Avslutande kommentarer	97
7.2	Rekommendationer	98
8	Referenser	99

Bilagor

- A. Resultat från bestämning tryckhållfasthet enligt SS-EN 12390-3.
- B. Resultat från bestämning av frostbeständighet enligt SS 13 72 44.
- C. Foton på provkroppar efter avslutad provning av frostbeständighet.
- D. Resultat från bestämning av motstånd mot kloridinträngning enligt NT Build 492.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Under det senaste decenniet har det kommit en hel del nymodigheter inom betongbranschen, bland annat har den nya betongstandarden SS-EN 206 introducerats i Sverige. I och med introduktionen av SS-EN 206 finns en ökad möjlighet att använda alternativa bindemedel vid betongtillverkning och riktlinjer ges för dessa produkter och hur de skall användas i betong. Detta överensstämmer också väl med utvecklingen inom cement- och betongindustrin där minskad energianvändning och miljöpåverkan från tillverkningsprocessen av speciellt cement är prioriterade områden. Ett av de mest effektiva sätten att minska energianvändning och miljöpåverkan är att tillverka betong med en blandning av Portlandcement och alternativa bindemedel, t.ex. stenkolsflygaska (i övrig text benämnt flygaska). Förutom de positiva effekterna av minskad energianvändning och miljöpåverkan har användning flygaska i betongen också andra positiva effekter jämfört med användning av enbart Portlandcement, som exempelvis förbättrad beständighet och arbetbarhet samt lägre värmeutveckling under hårdnandet.

Stenkolsflygaska är en biprodukt från förbränning av stenkol. Flygaskan skiljs ut från rökgaserna med elektrostatisk eller mekanisk rening och kan i vissa fall processeras vidare för att uppnå önskade egenskaper. Användning av flygaska i betong kan antingen göras genom att använda flygaskecement (CEM II), där flygaskan har satts till eller malts tillsammans med Portlandcementklinker vid cementfabriken, eller genom att flygaska satts till vid betongstationen i samband med blandning av betongen. Den senare metoden ger en betydligt större flexibilitet i att välja betongsammansättning och att styra dess egenskaper än om ett flygaskecement används. I det aktuella projektet har endast betonger där flygaska satts till vid betongstationen studerats.

Bakgrunden till det aktuella projektet är att det av betongtekniska och ekonomiska skäl finns ett intresse av att använda betonger blandade med Portlandcement och olika mängder flygaska i konstruktioner som byggs i stränga miljöer, t.ex. längs tösaltade vägar eller i marina miljöer (exponeringsklasser XS 1-3, XD 1-3 samt XF 2 och XF 4). I Sverige används vanligtvis Cements Degerhamn Anläggningscement (CEM I 42.5 N MH/SR/LA) för denna typ av konstruktioner, på senare tid även Slite Anläggningscement. Enligt SS 13 70 03, som reglerar användandet av SS-EN 206-1, SIS (2001), i Sverige, är det tillåtet att använda betonger blandade med Portlandcement och flygaska (med en maximal tillsats av 25 vikt-% - 50 vikt-% flygaska av CEM I, beroende på exponeringsklass). Normalt hänvisas till AMA Anläggning 2010 vad gäller sammansättningar av betong för anläggningskonstruktioner, t.ex. av Trafikverket, där ytterligare restriktioner rörande användning av flygaska i betong introduceras. Exempelvis vid nybyggnad av bro (avsnitt EBE.111 i AMA Anläggning 2010) begränsas mängden tillsatt flygaska till 6 vikt-% (av cement) i exponeringsklass XF 4 och 11 vikt-% i övriga exponeringsklasser.

Således finns det oklarheter kring användningen av flygaska i betongen, där mängden flygaska som tillåts blandas i betong är lägre i AMA Anläggning 2010 än i SS 13 70 03.

1.2 Syfte och avgränsningar

Syftet med SBUF-projekt 12382 ”Beständighetsegenskaper hos anläggningsbetong med stenkolsflygaska” är att undersöka och dokumentera egenskaperna hos betonger blandade med kombinationer av Portlandcement och olika mängder stenkolsflygaska. I projektet har det

undersökts om egenskaperna hos betonger blandade med kombinationer av Portlandcement och stenkolsflygaska blir likvärdiga med egenskaper hos betong blandade med endast Portlandcement.

Projektet har avgränsats till att undersöka egenskaperna hos betonger blandade med en kombination av Portlandcement (CEM I cement) och olika mängder flygaska (upp till vad som tillåts enligt SS 13 70 03). Egenskaper hos betonger blandade med flygaskecement (CEM II cement) har inte undersökts i det aktuella projektet. Fokus i det aktuella projektet har varit på att undersöka beständighetsegenskaper, huvudsakligen frostbeständighet och motstånd mot kloridinträngning, samt hållfasthet.

1.3 Metod

Projektet har genomförts i fyra steg: (i) inledande litteraturstudie, (ii) genomförande av laboratorieundersökningar, (iii) utvärdering och analys av resultaten från laboratorieundersökningar samt (iv) sammanställning av resultaten i en rapport. I den inledande litteraturstudien har information om betonger blandade med Portlandcement och olika mängder stenkolsflygaska tagits fram. De laboratorieundersökningar som har genomförts i projektet har varit fokuserade på att undersöka beständighetsegenskaperna hos betonger blandade med olika mängder stenkolsflygaska.

2 Betong med stenkolsflygaska

2.1 Inledning

Det finns tre principiella typer av bindemedel som används i betong:

- **Hydrauliska material**, är material som binder och hårdnar efter tillsats av vatten, och detta både i såväl luft som vatten. Ett exempel ett hydrauliskt material är Portlandcement.
- **Latent hydrauliska material**, är ett material som för bindning och hårdnande utöver vatten erfordrar en tillsats av mindre kvantiteter av en alkalisk aktivator (som kan vara annat än kalciumhydroxid, Ca(OH)_2). CaO -halten i dessa material är tillräcklig för att kalciumsilikathydrater (C-S-H) bildas när reaktionerna har satts igång. Ett exempel på ett latent hydrauliskt material är mald granulerad masugnsslagg.
- **Puzzolana material**, är ett material som binder och hårdnar endast i närvaro av vatten och löslig Ca(OH)_2 , vilken bildas t.ex. vid hydratationen av portlandcement. Exempel på puzzolana material är kiselstoft, flygaska och naturliga puzzolaner (t.ex. vulkanisk aska).

Flygaska (och andra bindemedel) kan tillföras betongen på två olika sätt:

- Genom att flygaska ersätter en viss mängd Portlandcement i ett blandcement (ett CEM II Portland-flygaskecement). Sammansättningen hos CEM II-cement är reglerad i standarden SS-EN 197-1, SIS (2011a). I dagsläget (november 2011) finns det inte något CEM II Portland-flygaskecement tillgängligt i Sverige.
- Flygaska kan tillföras betongen som ett tillsatsmaterial vid betongtillverkningen.

Betong med flygaska eller material som liknar flygaska är inget nytt utan har använts under flera tusen år. Det finns exempel från det antika Rom där byggnader har uppförts med kalksten blandat med vulkanisk aska, som påminner om flygaska, t.ex. Pantheon och Colosseum. Den första moderna användningen av flygaska i betong var under 1930-talet då McMillan och Powers (1934) undersökte om flygaska kunde användas som ett bindemedel och i större projekt under 1940-talet, t.ex. vid uppförandet av Hungry Horse Dam i USA, där US Bureau of Reclamation valde att använda flygaska som ett bindemedel. Dock var det först under 1970-talet som användning av flygaska ökade nämnvärt, vilket kan förklaras med att priserna för energi, t.ex. olja, ökade kraftigt och därmed ökade intresset för andra energikällor, t.ex. stenkol. Dessutom blev kostnaderna för cement högre vilket medförde ett ökat intresse för användning av andra typer av bindemedel i betong. Ett exempel är Danmark där oljeeldade kraftverk ersattes av koleldade verk under 1970-talet och där den flygaska som bildades användes för betongtillverkning, COWI (2009). Motsvarande trend fanns även i andra länder, t.ex. Tyskland och USA, där andelen stenkolseldade kraftverk ökade under 1970-talet.

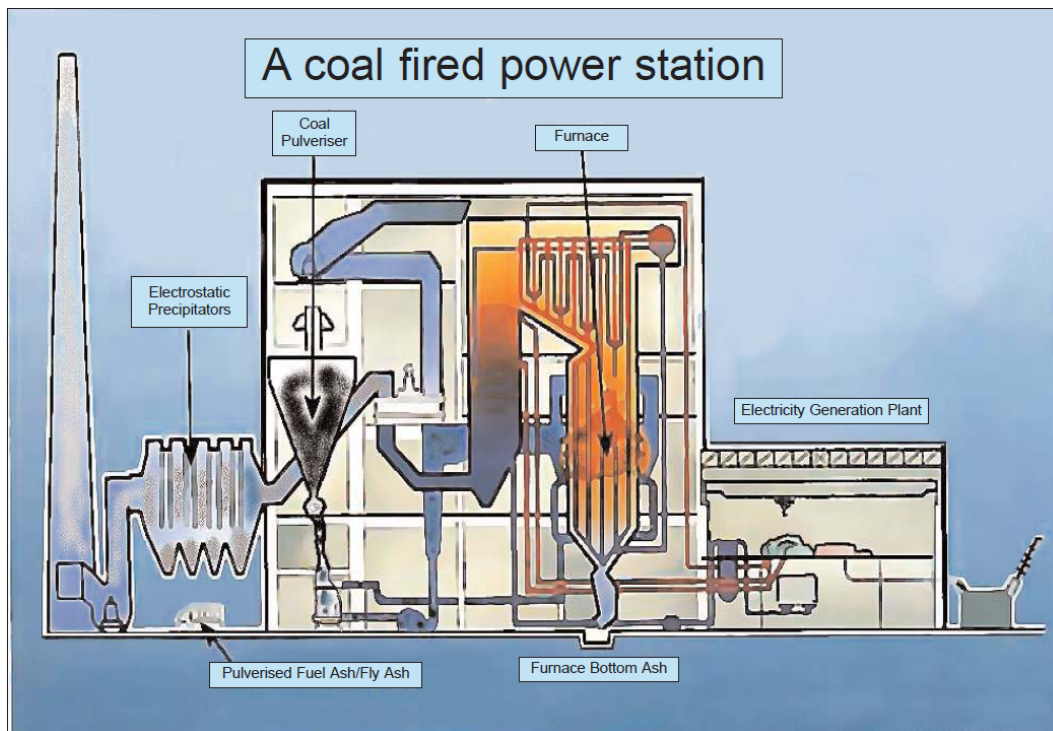
En väsentlig faktor vid inblandning av flygaska i betong är kvaliteten hos flygaskan (kemisk sammansättning och fysikaliska egenskaper), där kvaliteten bör vara god och jämn vid inblandning i betong, för att få goda egenskaper hos betongen. Om flygaska med varierande kvalitet används för inblandning i betong blir också betongens egenskaper varierande, t.ex. beständigheten. Fram till mitten av 1990-talet reglerades sammansättningen och användningen av flygaska i betong med nationella regler men under slutet av 1990-talet introducera-

des de europeiska standarderna EN 206 och EN 450. EN 450 specificerar krav på flygaska för användning i betong och EN 206 reglerar användningen av flygaska i betong allmänt. För användning av flygaska i betong i Sverige ges dessutom kompletterande regler i SS 13 70 03.

2.2 Stenkolsflygaska

2.2.1 Allmänt

Stenkolsflygaska är en restprodukt från stenkolseldade kraftverk och består av den mineraliska, icke förbränningsbara, delen av stenkålet. När stenkål skall förbrännas i ett kraftverk mals det först ner till ett fint pulver och blåses sedan in i förbränningsugnen. Den principiella processen vid ett stenkoleldat kraftverk redovisas i Figur 1. Vid förbränningen konsumeras kolet och kvar blir kolets mineraliska föroreningar (bestående av t.ex. lera, fältspat, kvarts, skiffer), dessa smälter samman och följer med rökgaserna ut och efter hand svalnar de och övergår till fast form (stelnar) som sfäriska, glasiga partiklar. Partiklarna avskiljs slutligen från rökgasen med hjälp av elektrostatiske filter, den vänstra delen i kraftverket i Figur 1. Det uppstår även andra typer av askor vid förbränning av stenkål, t.ex. bottenaskan i förbränningsugnen. Dessa askor används dock inte i någon större utsträckning för betongtillverkning.



Figur 1. Den principiella processen i ett stenkolseldat kraftverk. Flygaskan avskiljs i elektrostatiske filter som finns i den vänstra delen av figuren. Figur från UK Quality Ash Association (2010).

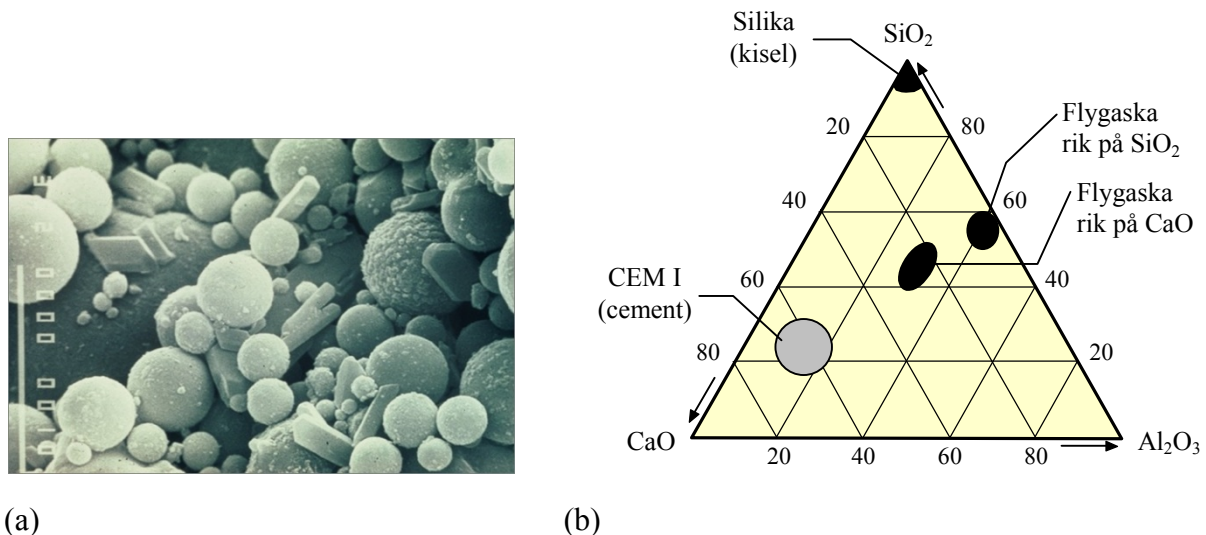
Flygaska består huvudsakligen av sfäriska glasiga (amorfa) partiklar, ca 60-90 vikt-%, samt olika former av kristallina partiklar, ACI (1996). De amorfa partiklarna bildas när resterna av det förbrända kolet kyls av i snabbt rökgasfiltren. Sammansättningen hos de amorfa partiklarna beror på kolets sammansättning, vid vilken temperatur kolet har förbränts vid samt hur effektiv förbränningsprocessen och rökgasreningen är. De amorfa och kristallina partiklarna är inte separerade från varandra, vilket medför att flygaska normalt får en komplicerad sam-

mansättning. Viktiga faktorer som styr flygaskans egenskaper är glashalten, restkolhalten, finheten, och den specifika ytan. ACI (1996)

2.2.2 Kemisk sammansättning

Den kemiska sammansättningen hos stenkolsflygaska följer av kolets mineraliska sammansättning samt förbränningsprocessen och rökgasreningen i kraftverket. Den stenkolsflygaska som används i Sverige består huvudsakligen av kiseloxider (SiO_2 – ca 60 vikt-%) och aluminiumoxider (Al_2O_3 – ca 40 vikt-%), där speciellt innehållet av SiO_2 är viktigt för flygaskans användbarhet som bindemedel i betong. Förutom huvudkomponenterna innehåller stenkolsflygaska också andra mineral (Fe_2O_3 , MgO och K_2O), kalciumoxid (CaO) samt mycket små mängder av en del tungmetaller. Huvuddelen av tungmetallerna är hårt bundna och endast en liten del av löslig och kan eventuellt lakas ur betongen. ACI (1996)

Den kemiska sammansättningen för några vanliga bindemedel i betong redovisas i Figur 2 (b), där innehållet av huvudkomponenterna kalciumoxid, aluminiumoxid samt kiseldioxid redovisas. Dessutom visas ett på flygaskepartiklar taget i ett elektronmikroskop i Figur 2 (a).

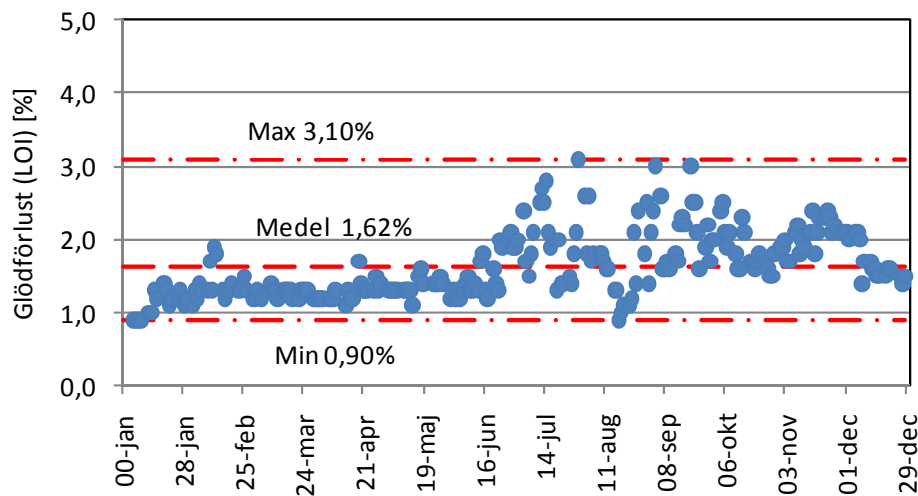


Figur 2. Foto från elektronmikroskop på flygaskepartiklar (a) och kemisk sammansättning hos några vanliga bindemedel i betong i ett trefasdiagram (b). Foto från UK Quality Ash Association (2010) samt figur baserad på Taylor (1997).

I Figur 2 framgår att det finns två typer av flygaska, rik på kiseldioxid eller rik på kalciumoxid. Den flygaska som används i Sverige är rik på kiseldioxid och därför har endast denna typ av aska studerats i det aktuella projektet.

Alla flygaskor består av en del obränt kol, som följer med genom förbränningsugnen. Höga halter av obränt kol i flygaska kan innebära problem vid betongblandning, t.ex. att doseringar av tillsatsmedel måste ökas för att få önskad effekt jämfört med en betong utan tillsats av flygaska (speciellt luftporbildande tillsatsmedel, där doseringarna ibland har fått ökas relativt mycket för att uppnå önskade lufthalter) eller den färska betongens egenskaper (variationer i

konsistens). Exempel på hur glödförlusten för en flygaska från ett modernt kolkraftverk visas i Figur 3. Andel obränt kol i flygaska kan bestämmas genom att glödförlusten¹ mäts upp.



Figur 3. Variation i glödförlust för en modern flygaska under ett år (2009) för Kraftwerk Rostock. Data från Thomas Cement.

Glödförlusterna som presenteras i Figur 3 är båda låga och har liten variation. I standarden SS-EN 450-1, som definierar flygaskan fysikaliska och kemiska sammansättning, finns gränsvärdena för glödförluster och värdena i Figur 3 är betydligt lägre än dessa, jfr

¹ LOI – Loss On Ignition på engelska. Vid bestämning av glödförlust hettas ett materialprov upp till +975 °C. Provets massa bestäms före och efter upphettning och den relativa viktnskningen, benämnd glödförlust, kan beräknas.

Tabell 1. Således är denna flygaska av hög kvalitet.

2.2.3 Fysikaliska egenskaper

De viktigaste fysikaliska egenskaperna hos flygaska är dess kornform, finhet, partikelstorleksfördelning och densitet. Vilka egenskaper som flygaskan får beror på kolets sammansättning och förbränningsprocessen. I följande stycken görs en sammanställning över relevanta fysikaliska egenskaper hos flygaska och vad som påverkar dem, baserat på ACI (1996):

- **Storlek och form på flygaskepartiklar**, beror på källan och homogeniteten hos kolet, hur väl kolet är pulveriserat före det förbränns, förhållandena i förbränningsugnen (temperatur och tillgång på syre), jämnhet vid förbränningen samt typen av uppsamlingsystem som används (mekaniska avskiljare, slangfilter eller elektrofilter). Huvuddelen av flygaskepartiklar från förbränning av stenkolk är glasiga sfäriska partiklar som är antingen massiva eller ihåliga.
- **Finhet på flygaskepartiklar**, där storleken (diametern) hos enskilda partiklar av flygaska varierar mellan 1 μm upp till över 1 mm. Modern flygaska har dock normalt små partiklar, där maximal diameter är ca 0,1 mm. Ju finare flygaskepartiklarna är desto större specifik yta och högre reaktivitet har de. Vilken storlek flygaskepartiklarna får beror i stor utsträckning på vilken typ av rökgasrening som finns i kolkraftverket där askan utvinns, där flygaskepartiklarna inte får vara för stora.
- **Densitet hos flygaskepartiklar**, där kompaktdensiteten (ρ_k) hos massiva flygaskepartiklar normalt varierar mellan 1970 kg/m^3 till 3020 kg/m^3 . Dock kan kompaktdensiteten variera mycket där det till och med finns vissa flygaskepartiklar som flyter på vatten (dvs. $\rho_k < 1000 \text{ kg/m}^3$). En hög kompaktdensitet är ofta ett tecken på finare partiklar. Skrymdensiteten hos flygaskepartiklar är ca 800-1200 kg/m^3 , vilket är lägre än exempelvis Portlandcement som har en skrymdensitet som är ca 1250-1350 kg/m^3 .

Speciellt finheten hos flygaskan har stor inverkan på betongens egenskaper både i färskt och hårdnat tillstånd. Ju finare en flygaska är desto mer reaktiv är flygaskan, eftersom partiklarnas specifika yta ökar med ökande finhet. Förutom en högre reaktivitet medför också en ökad finhet hos flygaskan en förbättrad packning av cementpastan.

En annan fysikalisk egenskap hos flygaska som kan vara av intresse är askans färg, som varierar beroende på kolets sammansättning (t.ex. innehåll av kol och järn) och förbränningsprocessen. Variationer i flygaskans färg kan uppstå mellan olika kraftverk, men även inom ett verk om kol från olika källor används. Flygaskans färg är normalt inget problem, men om färgens ändras hos flygaska från en viss källa, kan detta vara en indikation på förändringar av kolets sammansättning och/eller förbränningsprocessen. ACI (1996)

2.2.4 Krav på flygaskans egenskaper enligt SS-EN 450

Sammansättningen av flygaska för användning som tillsatsmaterial i betong regleras i standarden SS-EN 450. I denna standard anges gränser för flygaskornas fysikaliska och kemiska sammansättning för askor som skall användas för blandning av betong. Arbetet med att ta fram EN 450 påbörjades 1987 och den första upplagan av standarden accepterades 1994-1995, Dhir et al (1998). I Sverige trädde den första upplagan av SS-EN 450 i kraft i slutet av 1994. Det har skett en utveckling av SS-EN 450 och i dagsläget definieras flygaska för användning i betong av standarderna SS-EN 450-1 "Flygaska för betong - Definition, specifika-

tion och kriterier för överensstämmelse”, SIS (2005a), och SS-EN 450-2 ”Flygaska för betong - Utvärdering av överensstämmelse”, SIS (2005b). Dessa standarder publicerades första gången i mars 2005 och trädde i kraft i Sverige 2005-09-01.

I SS-EN 450-1 definieras vad som menas med flygaska (kapitel 3.2):

Flygaska är ett fint pulver, huvudsakligen bestående av sfäriska, glasiga partiklar, som har sitt ursprung från förbränning av pulveriserad kol (med eller utan samförbränning) och vilket har puzzolana egenskaper primärt bestående av SiO_2 och Al_2O_3 . Andelen reaktiv SiO_2 , så som den är definierad och beskriven i EN 197-1, skall vara minst 25 % av massan. Flygaska fås antingen genom elektrostatisk- eller mekanisk-utfällning (precipitation) av dammliknande partiklar från rökgaserna. Att notera är att aska som kommer från förbränning av kommunalt- och industriellt avfall inte uppfyller de ställda kraven.

I SS-EN 450-1 ställs krav på en stor mängd fysikaliska och kemiska egenskaper hos flygaskan. Dock är det i stort sett endast stenkolsflygaska som uppfyller de uppställda kraven. De viktigaste kraven på flygaska som finns redovisade i SS-EN 450-1 redovisas i

Tabell 1.

Tabell 1. Krav på fysikaliska och kemiska egenskaper på flygaska enligt SS-EN 450-1 (2005).

Egenskap	Tillåtna värden enligt SS-EN 450-1	enhet
Glödförlust	< 5,0 Kategori A 2,0-7,0 Kategori B 4,0-9,0 Kategori C	vikt-%
Finhet $\geq 45 \mu\text{m}$	< 40 Kategori N < 12 Kategori S	vikt-%
Fri CaO	< 2,5	vikt-%
Reaktiv CaO	< 10,0	
Reaktiv SiO ₂	> 25,0	
SO ₃	< 3,0	vikt-%
Cl	< 0,10	vikt-%
Ekvivalent Na ₂ O	< 5,0	vikt-%
Korndensitet (variation)	± 200 från deklarerat värde.	kg/m ³
Aktivitetsindex	> 75 % (28 d) > 85 % (90 d)	

I SS-EN 450-1 finns det förutom krav på fysikaliska och kemiska egenskaper hos flygaskan också krav på flygaskans sammansättning så att en betong som blandas med den blir beständig (och uppfyller krav ställda i SS-EN 206-1). Hur kraven på flygaska som finns angivna i SS-EN 450-1 skall utvärderas beskrivs i SS-EN 450-2

2.3 Inverkan av stenkolsflygaska på betongens egenskaper

2.3.1 Allmänt

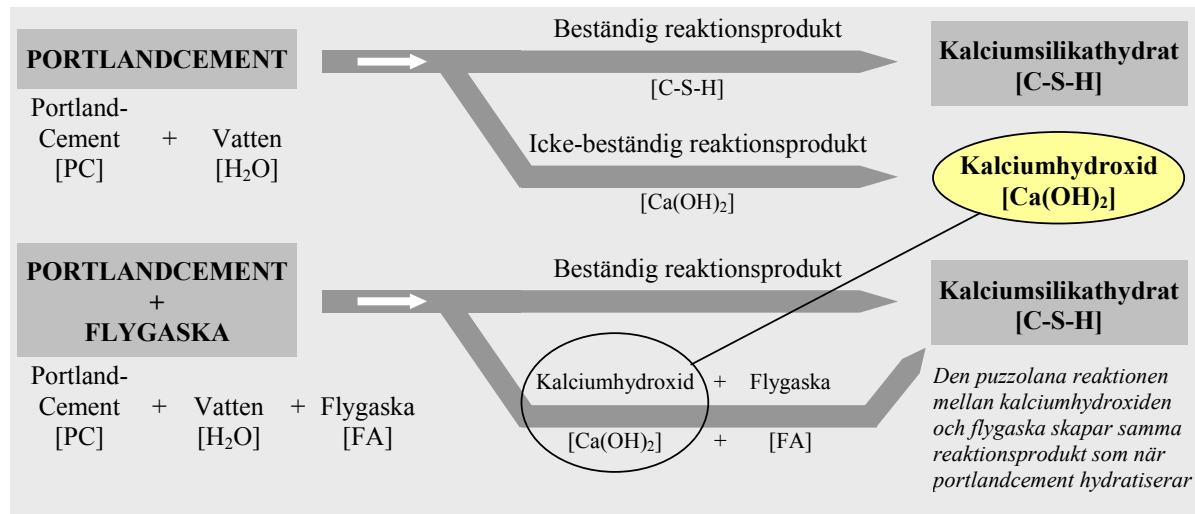
Flygaska har en stor inverkan på egenskaperna hos både färsk och hårdnad betong och i många fall kan dess egenskaper förbättras. Stenkolsflygaska består av små sfäriska och gladsiga partiklar, vilket ger effekter på arbetbarhet hos den färska betongen, och som på ett effektivt sätt fyller ut utrymmena mellan de finare ballastkornen samt reagerar med cementet, vilket ökar tätheten hos hårdnad betong. Detta medför att betonger med flygaska har många positiva egenskaper jämfört med betonger med enbart Portlandcement. I följande kapitel görs en mer detaljerad genomgång av egenskaperna hos betong blandad med flygaska.

2.3.2 Reaktionen med Portlandcement

När flygaska blandas med cement och vatten uppstår så småningom en puzzolan reaktion med den kalciumhydroxid Ca(OH)_2 som frigörs vid cementhydratationen. Reaktionsprodukten är samma typ av bindemedel (kalciumsilikathydrat, C-S-H) som bildas när cement reagerar. I Figur 4 redovisas en principiell skiss över reaktioner hos Portlandcement och Portlandcement blandat med flygaska. För att all tillsatt flygaska skall kunna reagera finns det teoretiskt endast kalciumhydroxid till en inblandning av ungefär 25 vikt-% flygaska av cement (som ersätter Portlandcement). Dock reagerar inte all flygaska vid en tillsättning av 25 vikt-% flygaska av cement utan för att få en så stor andel flygaska att reagera som möjligt har det visat sig att en inblandning av 30-40 vikt-% flygaska av cement är optimalt.

Fördelen med den puzzolana reaktionen hos stenkolsflygaska är att den inte bara minskar mängden av den mindre beständiga reaktionsprodukten kalciumhydroxid (Ca(OH)_2) utan att denna dessutom omvandlas till kalciumsilikathydrat (C-S-H), som är cementpastans mest be-

ständiga komponent. Stenkolsflygaska bidrar även positivt till betongens arbetbarhet, kemiska motståndskraft och till minskad miljöbelastning (eftersom cementet delvis ersätts).



Figur 4. Principiell bild över de kemiska reaktionerna som uppstår när Portlandcement och Portlandcement blandat med stenkolsflygaskan blandas med vatten. Figur baserad på Head-water Resources (2010).

Hydratation hos en blandning av Portlandcement och stenkolsflygaska skiljer sig från ett rent Portlandcement genom att: (i) hydratationshastigheten hos klinkermineralerna är lägre; (ii) mängden Ca(OH)₂ minskar, dels genom att cementet är "utspädd" med flygaska och ytterligare genom den puzzolana reaktionen; (iii) sammansättningen av klinkermineralernas hydratationsprodukter ändras; och (iv) flygaskans hydratationsprodukter som tillkommer. De två sistnämnda kan inte separeras helt.

2.3.3 Färsk betong

Den största effekten som flygaska har på den färska betongens egenskaper är på arbetbarheten där den minskar vattenbehovet (vid likvärdig konsistens) eller ger en lösare konsistens (vid oförändrat vattenbehov). För en betong med samma *vbt* (vattenbindemedelstal) leder flygaska till ett minskat vattenbehov som kan variera från 5 till 15 % (för likvärdig konsistens), effekten är vanligtvis större vid höga *vbt*. En betong där flygaska ersätter cement (ersättning med motsvarande vikt) får en ökad kohesivitet (sammanhållning) och har en minskad blödning vilket medför att stabilitet och pumpbarhet förbättras. Detta är ett resultat av att flygaskepartiklarna har en rund form, vilket underlättar rörelser mellan partiklarna, samt att flygaska har en lägre skrymdensitet än Portlandcement, vilket medför att bindemedelsvolymen och mängden cementpasta i betongen ökar. En ökande mängd cementpasta innebär att betongens konsistens blir lösare. ACI (1996)

En betong blandad med flygaska får också ett långsammare tillstyvnade samt en lägre värmeutveckling jämfört med motsvarande Portlandcementbetong. Detta är ett resultat av flygaskans puzzolana reaktion samt att en tillsättning av flygaska i betongen delvis retarderar de tidiga cementreaktionerna (C₃S-reaktionerna). Vilken effekt en tillsats av flygaska får på betongens tillstyvnande beror en mängd faktorer, t.ex. temperatur hos omgivningen och betongen, cementets egenskaper, doseringen av tillsatsmedel, mängd flygaska samt flygaskans dosering. ACI (1996)

Användning av flygaska i betong påverkar också inblandningen av luft i betongen. Normalt måste doseringen av luftporbildande medel ökas för att önskad lufthalt skall uppnås i en flygaskebetong jämfört med en Portlandcementbetong. I vissa fall påverkas också effekten av superplasticerande tillsatsmedel, där doseringen måste förändras för att önskad arbetbarhet skall uppnås, Park et al (2005). Orsaken är att det finns rester av obränt kol på flygaskepartiklarna som absorberar luftporbildare (och superplasticerare) och på detta sätt minskar dess effekt. Hur mycket extra luftporbildande tillsatsmedel som behöver sättas till kan beror på mängden obränt kol och dess specifika yta. Kompatibiliteten mellan en viss flygaska och luftporbildande tillsatsmedel kan undersökas med det s.k. skumindex-testet (Foam Index Test – FIT), Dodson (1990) och Kúlatos et al (2003). Med FIT går det att bestämma hur mycket extra luftporbildare som måste sättas till betongen för att ett stabilt luftporsystem skall uppnås. Det bör dock påpekas att svårigheter med dosering av luftporbildande tillsatsmedel inte är något unikt för flygaskebetonger utan kan även förekomma hos Portlandcementbetonger.

2.3.4 Ung betong

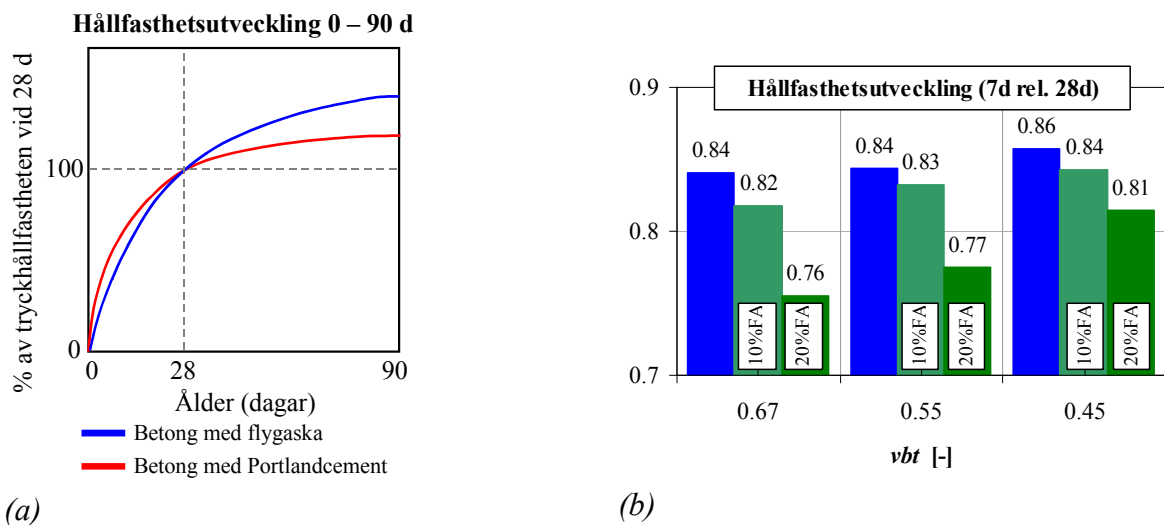
För den unga betongen (den tidiga hållfasthetstillväxten) är den primära effekten av flygaska en retardation och minskad värmeutveckling, se t.ex. Langan et al (2002). Hållfasthetstillväxten sker således långsammare i en betong med flygaska men den är också mer temperaturberoende och sker betydligt långsammare vid låga temperaturer – detta är en följd av att glaset i flygaskan måste lösas upp för att en reaktion skall ske och lösligheten är extremt temperaturberoende. Hållfasthetstillväxten beror på ett antal faktorer som, förutom temperaturen, är: typ av cement och dess alkalitet; typ av flygaska (kemisk sammansättning, finhet och dess reaktivitet); andelen flygaska i förhållande till cement; och *vbt*.

2.3.5 Hårdnad betong

Inblandning av flygaska påverkar den hårdnande betongens egenskaper både vad gäller hållfasthetsutveckling samt beständighet. I följande stycken ges några exempel på hur egenskaperna hos hårdnad betong med flygaska blir.

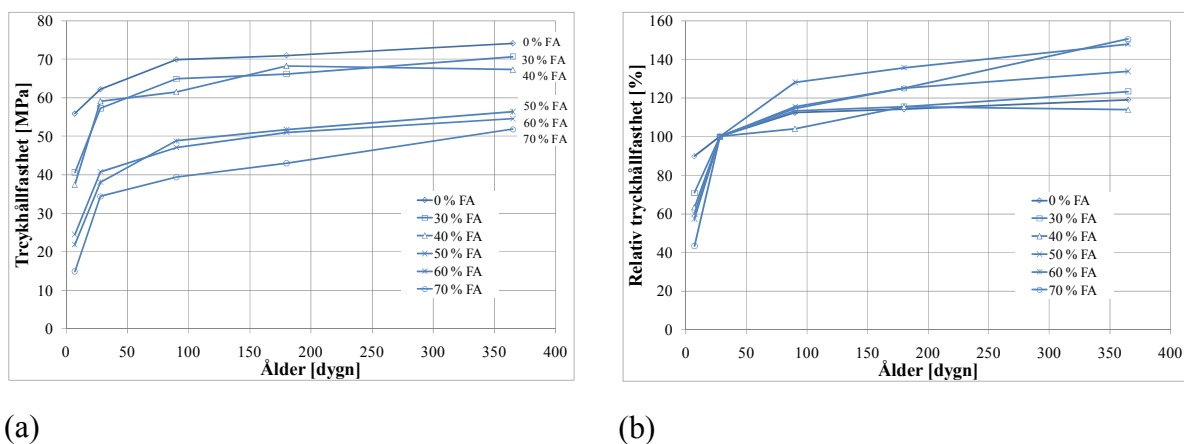
Hållfasthet

Betong där flygaska ersätter cement får en långsammare hållfasthetstillväxt upp till 28 dygn men för en likvärdig hållfasthet kommer betong med flygaska att ha en större hållfasthetstillväxt efter 28 dygn, se Figur 5 (a). Förhållandet mellan hållfastheterna vid 7 dygn respektive 28 dygn är normalt 0,75-0,85. För betong med flygaska förhållandet något lägre och det minskar dessutom med ökande tillsats av flygaska i betongen, se Figur 5 (b). Dessutom påverkar cementets och flygaskans egenskaper, hur flygaskan har satts till betongen samt vilken effektivitetsfaktor, *k*, som har tillämpats. Effektivitetsfaktorerna är satta så att en betong med flygaska får samma hållfasthet efter 28 dygn som motsvarande Portlandcementbetongen, se vidare nedan.



Figur 5. Hållfasthetsutveckling: (a) schematisk för perioden 0 – 90 dygn och (b) uppmätt förhållande mellan hållfastheten vid 7 och 28 dygn (för CEM II/A-LL, Byggcement Skövde).

Hållfastheten hos betonger blandade med olika tillsatser av flygaska har undersökts av Sahmaran et al (2009). I undersökningen som redovisas i Sahmaran et al (2009) har bindemedels-halten samt vattenhalten varit konstanta (500 kg/m^3 respektive 175 kg/m^3) och $v_{bt}=0,35$. Uppmätta tryckhållfastheter redovisas i Figur 6 (uppmätta värden i (a) och relaterade till 28-dygnshållfastheten i (b)).



Figur 6. Tryckhållfastheter uppmätta i betonger med olika tillsatser av flygaska (vikt-% av total bindemedelshalt). Bindemedelshalt samt vattenhalt har varit konstant för samtliga blandningar (500 kg/m^3 respektive 175 kg/m^3) och $v_{bt}=0,35$. I (a) redovisas uppmätta tryckhållfastheter och i (b) redovisas tryckhållfastheter i relation till 28-dygnshållfastheten. Figurer baserade på data från Sahmaran et al (2009)

Flygaskans hållfasthetsbidragande effekt beror på ett antal faktorer men för att all tillsatt flygaska skall kunna reagera finns det teoretiskt endast kalciumhydroxid till en ersättning av ungefär 25 vikts-% (enligt de reaktioner som beskrivs i Figur 4). Dock reagerar inte all flygaska vid en tillsättning av 25 vikt-% flygaska av cement utan det har visat sig finnas ett optimum för den mängd flygaska som kan ersätta cement, för att så mycket flygaska som möjligt skall reagera. Lawrence et al. (2005) fann ett optimum vid en dosering av 35 till 40 vikt-% av cement. Oner et al. (2005) fann liknande värden med ett optimum vid ungefär 40

vikt-% av cement och Neville (2000) rekommenderar en maximal dosering på ungefär 30 vikt-% av cement baserat på flygaskans effekt på tryckhållfasthet och vattenbehov.

För att en betong med flygaska skall uppnå sin potentiella hållfasthet behöver den hårdas på ett lämpligt sätt. Generellt så behöver en betong med flygaska en längre period med vattenhärdning i jämförelse med en konventionell betong och ett minimum är ungefär 3 dagar. Att betong med flygaska kräver vattenhärdning beror på att den puzzolana reaktionen behöver, förutom kalciumhydroxid, tillgång till vatten.

En viktig faktor som beskriver en flygaskas egenskaper är effektivitetsfaktorn (k), som beskriver hur stor del av Portlandcementet som kan ersättas med flygaska för att uppnå samma tryckhållfasthet vid 28 dygn. Effektivitetsfaktorn beräknas med hjälp av den uppmätta tryckhållfastheten enligt den princip som redovisas i Figur 7. Vilken effektivitetsfaktor som skall användas är reglerat i standarder och enligt SS-EN 206-1 skall k -faktorn för flygaska som är godkänd enligt SS-EN 450-1 sättas till 0,2-0,4 (beroende på vilken typ av cement som används), se vidare i kapitel 2.4.

Bestämning av flygaskans effektivitetsfaktor

I en beräkning används följande parametrar:

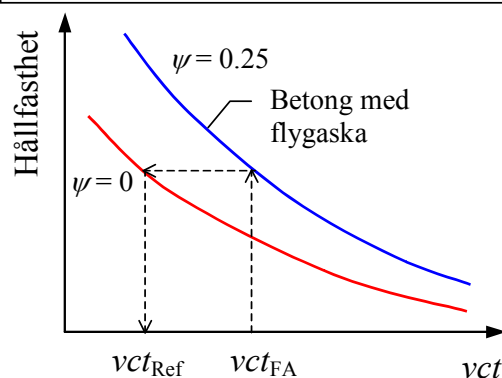
k = effektivitetsfaktor

vct_{FA} = förhållandet [vatten / (cement med flygaska)]

vct_{Ref} = förhållandet [vatten / (cement utan flygaska)]

ψ = viktsförhållandet [flygaska / cement]

$$vct_{Ref} = \frac{vct_{FA}}{1 + k \cdot \psi} \quad \text{Detta innebär att:} \quad k = \frac{vct_{FA}/vct_{Ref} - 1}{\psi}$$

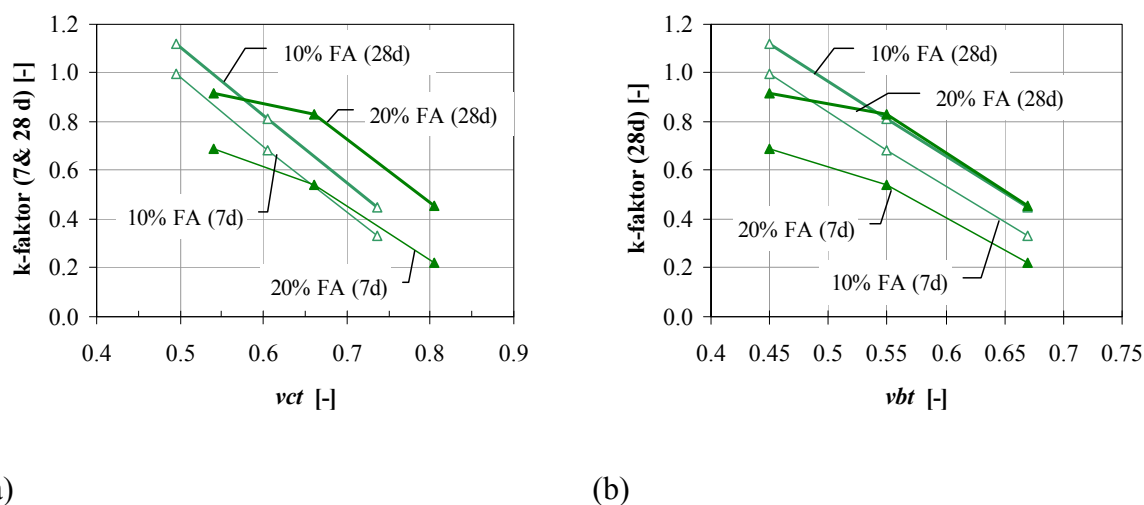


Det effektiva vatten-cementtalet beräknas som:

$$vct_{eff} = vbt_{eff} = \frac{W}{C + k \cdot FA}$$

Figur 7. Principen för hur effektivitetsfaktorn för en flygaska kan bestämmas baserat på förhållandet mellan uppmätt tryckhållfasthet och vct.

Exempel på verkliga effektivitetsfaktorer beräknade från tryckhållfastheter uppmätta vid 7 och 28 dygn redovisas i Figur 8.



Figur 8. Beräknad effektiv k -faktor vid 7 dygn och 28 dygn, redovisad som en funktion av v_{ct} (a) och v_{bt} (b), för CEM II/A-LL.

I Figur 8 framgår att den verkliga k -faktorn normalt är högre än den som föreskrivs i SS-EN 206-1. En förklaring är att den k -faktor som föreskrivs i SS-EN 206-1 är vald på den säkra sidan. Det går också att observera att k -faktorn inte är konstant, utan att den påverkas av åldern (lägre vid 7 dygn än vad den är vid 28 dygn) och betongens v_{ct} (eller v_{bt}).

Beständighet

Normalt får betong blandad med flygaska bättre beständighet än motsvarande betong blandad med endast Portlandcement. Detta är ett resultat av att en betong med flygaska normalt blir tätare så länge som Portlandcementen ersätts av en större mängd flygaska. Förklaringen till att betong med flygaska får en tätare struktur går att finna i den puzzolana reaktionen som leder till minskad permeabilitet och en sänkning av halten av kalciumhydroxid. Dock kommer permeabiliteten att vara större till en början, en följd av den relativt långsamma puzzolana reaktionen, men allteftersom flygaskans reaktion fortskrider minskar permeabiliteten. För att säkerställa att en betong med flygaska får en låg permeabilitet är det viktigt att denna härdas på ett lämpligt sätt – en betong med flygaska behöver en längre period med vattenhärdning jämfört med en konventionell betong. Ett visst frågetecken är frostbeständigheten, där det finns vissa resultat som visar att denna kan vara sämre för flygaskebetonger, men relativt få av dessa har genomförts enligt svensk praxis.

Mer utförlig information om beständighet hos betong blandad med flygaska ges i kapitel 3.

2.4 Krav på betong med stenkolsflygaska enligt gällande regelverk

2.4.1 Allmänt

Inom det regelverk som styr betongtillverkning finns det vissa föreskrifter som är relaterade till flygaska. Av dessa är det främst i den Europeiska betongstandarden, SS-EN 206-1, som det finns krav och rekommendationer rörande användning av flygaska i betong. Dessutom finns krav rörande användning av flygaska i betong i SS 13 70 03. Det finns också för vissa typer av konstruktioner, t.ex. anläggningskonstruktioner, specifika nationella tilläggsregler som ytterligare reglerar användandet av flygaska i betong. Ett exempel är de regleringar som

finns i AMA Anläggning 10, till vilket bl.a. Trafikverket hänvisar till vid krav på betong-sammansättning.

2.4.2 Betong med flygaska enligt SS-EN 206 och SS 13 70 03

SS-EN 206-1 är den standard som reglerar materialet betong och dess sammansättning. I regelverket finns vissa krav på delmaterial, men huvudsakligen hänvisas till andra delmaterial-standarder. Det finns också en nationell standard, SS 13 70 03, SIS (2008), som definierar hur SS-EN 206-1 skall användas i Sverige. Endast delmaterial med påvisad lämplighet för den avsedda användningen i betong får användas. För flygaskor görs detta i SS-EN 450.

I SS-EN 206-1 görs en indelning i tillsatsmaterial av Typ I (inerta tillsatsmaterial) och Typ II (puzzolana eller latent hydrauliska tillsatsmaterial). Det är endast tillsatsmaterial av Typ II som kan inräknas i bindemedelshalten (cement+tillsatsmaterial) och i det ekvivalenta vattencementtalet vct_{ekv} om lämpligheten är påvisad. Effektivitetsfaktorn k reglerar hur stor del av den tillsatta mängden tillsatsmaterial som får tillgodoräknas vid beräkning av det ekvivalenta vattencementtalet, enligt följande uttryck:

$$vct_{ekv} = \frac{W}{C + k \cdot (\text{vikt tillsatsmaterial})}$$

Det avgör även hur stor del som får tillgodoräknas vid beräkning av den ekvivalenta cementmängden:

$$C_{ekv} = C + k \cdot (\text{vikt tillsatsmaterial})$$

Den största mängd flygaska som får medräknas med effektivitetsfaktorn k för vattencementtalet och cementhalten ges av villkoret:

- Användning av CEM I. Största mängd flygaska bestäms av flygaska/cement $\leq 0,33$ (efter vikt) – där vikten cement avser mängden CEM I.
- Användning av CEM II eller CEM III. Största mängd flygaska bestäms av flygaska/cement $\leq 0,33 \times 1,05^{\text{II}}$ x mängd cementklinker i det aktuella cementet (efter vikt) – där vikten cement avser mängden CEM II eller CEM III.

Om en större mängd flygaska används får den överskjutande mängden inte tas med vid beräkning av vatten/(cement + $k \times$ flygaska)-talet och lägsta cementhalten.

Följande värden för faktorn k är tillåtna för betong med cement av typ CEM I överensstämmande med SS-EN 197-1:

- CEM I 32,5 $k = 0,2$
- CEM I 42,5 och högre $k = 0,4$

^{II} 80 % multipliceras med 1,05 för att kompensera för att upp till 5 % mindre beståndsdelar tillåts i CEM II. Enligt SS-EN 197-1 får ett CEM I-cement innehålla upp 95-100 % klinker, dvs. i "sämsta" fall kan endast 95 % av cementet bestå av klinker. I SS 13 70 03 avsnitt 5.2.5 finns därför en skrivning där cementhalten kan multipliceras med 1,05 för att kompensera för andra beståndsdelar än cementklinker.

Den krävda lägsta cementhalten för tillämplig exponeringsklass (se avsnitt 5.3.2 i SS-EN 206-1) får minskas med högst mängden $k \times (\text{lägsta cementhalt} - 200) \text{ kg/m}^3$ och därtill får mängden av (cement + flygaska) inte vara mindre än den krävda lägsta cementhalten enligt avsnitt 5.3.2 (i SS-EN 206-1).

Gränsvärden och krav på betongsammansättningar

Vid användning av flygaska i betong får den totala mängden flygaska per CEM I inte överstiga 25 vikt-% respektive 50 vikt-% beroende på exponeringsklass (se Tabell 2). I SS 13 70 03 anges den lägsta cementhalten för respektive exponeringsklass (se Tabell 2), tillsatsmaterial av typ II får tillgodoräknas i det som kallas ekvivalent cementmängd (C_{ekv}) som $k \times$ tillsatsmaterial (dock högst en mängd som motsvarar $0,33 \times$ klinkerhalten). Den lägsta cementhalten och mängden flygaska kan då beräknas med hjälp av följande ekvation (om CEM II eller CEM III cement används kan cementhalten, C , multipliceras med 1,05 för att kompensera för eventuella andra beståndsdelar än cementklinker):

$$C + k \cdot 0,33 \cdot C = C_{ekv, \min}$$

Vid användning av tillsatsmaterial tillsammans med cement av typerna CEM II och CEM III skall den totala mängden av respektive tillsatsmaterial av typ II (t.ex. flygaska), inklusive det som eventuellt ingår som en komponent i cementet, per mängd cementklinker inte överstiga det som anges i tabell 5.3.2a (se Tabell 2) för tillsatsmaterialet i fråga i respektive exponeringsklass. Detta blir t.ex. aktuellt när flygaska kombineras med ett Portland-flygaskement (ett CEM II/A-V).

Exempelvis för exponeringsklass XC 2 innebär detta att för ett Byggcement (CEM II/A-LL), med en lägsta klinkerhalt av 80 % (cementmängden kan multipliceras med $0,80 \times 1,05$) och en stenkolsflygaska med en k -faktor av 0,4, blir lägsta cementhalt:

$$C + k \cdot 0,33 \cdot 80\% \cdot 1,05 \cdot C = 200 \Leftrightarrow C = \frac{200}{1 + 0,4 \cdot 0,33 \cdot 80\% \cdot 1,05} = 180 \text{ kg/m}^3$$

och mängden flygaska som får tillgodoräknas i C_{ekv} och $(vct)_{ekv}$ blir:

$$FA = 0,33 \cdot 80\% \cdot 1,05 \cdot 180 = 49,9 \text{ kg/m}^3$$

Men den maximalt tillåtna mängden flygaska som får tillsättas är:

$$FA_{\max} = 0,50 \cdot 181 = 90,0 \text{ kg/m}^3$$

För exponeringsklass XC 3 & 4 finns en begränsning att mängden flygaska får maximalt vara 25 vikt-% av cement och maximalt får $0,33 \times$ klinkerhalten tillgodoräknas. Det vill säga att följande begränsningar finns:

$$FA \leq 0,25 \cdot C$$

$$FA \leq 0,33 \cdot \text{klinkerhalten}$$

Detta innebär för ett Byggcement (CEM II/A-LL) med en lägsta klinkerhalt av 80 %:

$$FA \leq 0,33 \cdot 80\% \cdot 1,05 \cdot C = 27,7\% \cdot C \text{ vilket är mer än } FA \leq 25\% \cdot C \text{ som då gäller.}$$

Följaktligen blir lägsta cementhalt:

$$C + k \cdot 25\% \cdot 1,05 \cdot C = 200 \Leftrightarrow C = \frac{200}{1 + 0,4 \cdot 25\% \cdot 1,05} = 181 \text{ kg/m}^3$$

och mängden flygaska som får tillgodoräknas i C_{ekv} och $(vct)_{ekv}$ och som även är den maximalt tillåtna mängden flygaska blir:

$$FA_{max} = 0,25 \cdot 1,05 \cdot 181 = 47,5 \text{ kg/m}^3$$

Tabell 2. Gränsvärden och krav på betongsammansättning med avseende på beständighet i olika exponeringsklasser (Tabell 5.3.2a i SS 13 70 03).

Kravelement	Exponeringsklasser																	
	Ingen risk för korrosion eller angrepp	Korrosion föranledd av karbonatisering				Korrosion föranledd av klorider						Angrepp av frysning/upptining				Kemiskt angrepp		
							Från havsvatten			Andra än från havsvatten								
	X0	XC 1 ¹⁾	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2	XF 3	XF 4	XA 1	XA 2	XA 3
Högsta vct_{ekv}	–	0,90	0,60	0,55	0,55	0,45	0,45	0,40	0,45	0,45	0,40	0,60	0,45	0,55	0,45	0,50	0,45	0,40
Lägsta bindemedels-halt ⁷⁾ C_{ekv} kg/m ³	–	–	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Cement enligt SS-EN 197-1 som är beprövade i respektive exponeringsklass	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S	II/A-S
	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S	II/B-S
	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D	II/A-D
	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V	II/A-V
	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V	II/B-V
	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL	II/A-LL
	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M	II/A-M
	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾	II/B-M ⁸⁾
	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A	II/A
II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	II/B	
Hållfasthetsklass	≥ 32,5	≥ 32,5	≥ 32,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5
Största mängd tillsattematerial per mängd CEM I ^{4), 6)}	Silika	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,06	0,06	0,11	0,11
	Flygaska	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50 ⁹⁾	0,25	0,50	0,50 ¹⁾
	Slagg	2,30	1,50	1,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50 ⁹⁾	0,25	2,30	0,50 ¹⁾
Totalt	2,30	1,50	1,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,50 ⁹⁾	0,25	2,30	0,50	0,50
Frostresistent ballast	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	ja	ja	ja	ja	–	–	–
Provning av betongs frostresistens	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	ja	–	–	–
Lägsta lufthalt eller provning av frostresistens	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	ja	ja	–	–	–	–

¹⁾ Tillsats av 150 – 400 vikt-% slagg till ett icke sulfatresistent CEM I kan användas för att uppnå ett sulfatresistent bindemedel

²⁾ Bestäms i varje enskilt fall

³⁾ Sulfatresistent cement enligt SS 13 42 04

⁴⁾ Vid användning av andra cementtyper, se 5.3.2

⁵⁾ Konstruktionen ska utföras i minst hållfasthetsklass C12/15 respektive LC12/13

⁶⁾ Största mängd som får tillsättas

⁷⁾ Angivet lägsta C_{ekv} utgör en gräns för att erhålla en homogen betong. Erforderlig C_{ekv} styrs av krav beträffande vct_{ekv}

⁸⁾ Max 20 % LL (Kalksten)

⁹⁾ Högsta vct_{ekv} 0,45 vid ständigt hög fuktbelastning, t ex delar av vattenkraftanl.

¹⁰⁾ Max 5 % D (Silika)

2.4.3 Betong med flygaska enligt AMA Anläggning 10

AMA Anläggning 10 innehåller krav på det mesta som rör anläggningskonstruktioner. Delmaterial (betong, stål, ytbehandlingar etc.), konstruktionsutformning, utförande och detaljer är några exempel på saker som behandlas av AMA Anläggning. Den används som underlag vid upphandling av byggande och förbättring av broar. För varje bro kompletteras kraven i AMA Anläggning med krav som är specifika för respektive brolägg. Bland annat hänvisar Trafikverket till AMA Anläggning i sitt regelverk för utformning av brokonstruktioner, TK/TR Bro vad gäller betongsammansättningar.

I AMA Anläggning 10 hänvisas till SS-EN 206-1 och SS 13 70 03 vad gäller användning av flygaska i betong, se avsnitt 2.4.2. Dock finns det en del begränsningar vad gäller användan-

det av flygaska (utöver de i SS 13 70 03). Exempelvis vid nybyggnad av bro (avsnitt EBE.111 i AMA Anläggning 2010) begränsas mängden tillsatt flygaska till 6 vikt-% (av cement) i exponeringsklass XF 4 och 11 vikt-% i övriga exponeringsklasser, men ingen motivering till dessa begränsningar anges.

2.4.4 Krav på betong med stenkolsflygaska – sammanställning

Av sammanställning ovan framgår att flygaska som skall användas i betong måste uppfylla de krav som finns definierade i SS-EN 450. Den maximala mängd flygaska som får blandas in i betongen är olika mellan SS 13 70 03 AMA Anläggning 10 (t.ex. vid nybyggnad av bro), se Tabell 3. Det bör observeras att mängden flygaska är beskrivs olika, där SS 13 70 03 refererar till mängden CEM I, medan AMA Anläggning 10 refererar till cementhalten.

Tabell 3. Maximala mängder flygaska som får blandas in i betong enligt SS 13 70 03 samt AMA Anläggning 10 i olika exponeringsklasser (vid nybyggnad av bro).

Exponeringsklass	Maximal tillåten mängd flygaska	
	SS 13 70 03 [vikt-% av CEM I]	AMA Anläggning 10 [vikt-% av cement]
X 0, XC 1-XC 4, XS 1-XS 2, XD 1-XD 2, XF 1-XF 3, XA 1-XA 2	50	11
XS 3, XD 3	25	11
XF 4	25	6
XA 3	*	11

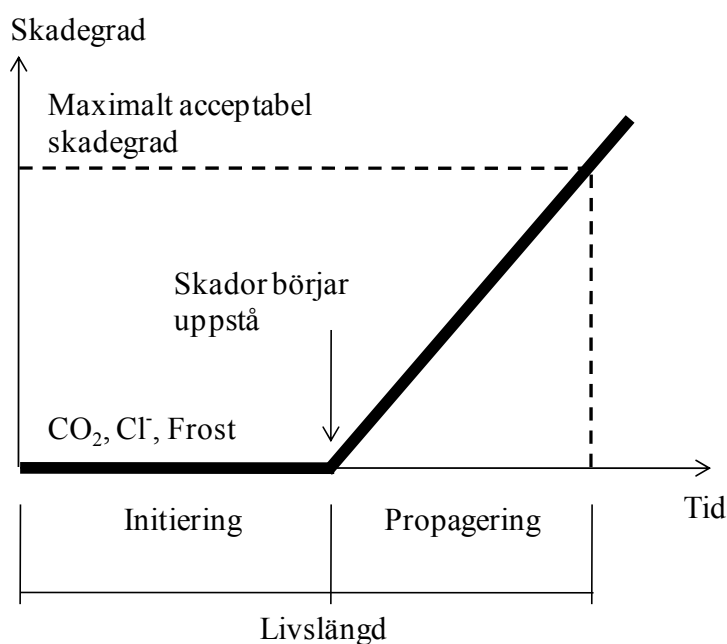
* Bestäms i varje enskilt fall.

3 Beständighet hos betong med flygaska

I följande kapitel görs en genomgång av beständigheten hos betongkonstruktioner, där de vanligaste förekommande nedbrytningsprocesserna beskrivs. Det görs också en beskrivning av hur beständighetsegenskaperna hos betonger med tillsatser av flygaska blir, baserat på uppgifter från litteraturen.

3.1 Allmänt

Nedbrytning av armerad betong kan ske med en ett antal olika kemiska, fysikaliska och eller elektrokemiska nedbrytningsprocesser. De vanligaste nedbrytningsprocesserna i Sverige är armeringskorrosion, initierad av karbonatisering eller kloridinträngning, frostangrepp samt olika typer av kemiska angrepp, t.ex. orsakade av sulfater eller alkali-ballast reaktioner. För många nedbrytningsprocesser kan nedbrytningen delas in i två perioder över tiden (dvs. under en konstruktions livslängd), en initieringsperiod när skador initieras men ingen nedbrytning av betongen eller påverkan på konstruktionens funktion uppstår, samt en propageringsperiod när skador propagerar med nedbrytning av betong och påverkan på konstruktionens funktion som följd. I Figur 9 visas en schematisk modell på hur nedbrytningen och livslängden hos en betongkonstruktion kan beskrivas med initierings- och propageringsperioder. Konstruktionens livslängd är slut när maximalt acceptabel skadegrad har nåtts.



Figur 9. Schematisk modell på hur nedbrytningen och livslängden hos en betongkonstruktion kan beskrivas med initierings- och propageringsperioder. Baserat på en modell presenterad i Tuutti (1982).

Ett vanligt exempel på en nedbrytningsprocess som kan delas in i två perioder är armeringskorrosion. Under initieringsperioden tränger koldioxid eller klorider in i betongen och påverkar miljön i betongen så att armeringskorrosion kan initieras. Propageringsperioden börjar när karbonatiseringsfronten har nått armeringen eller kloridhalten i betongen vid armeringen överskrider ett visst kritiskt värde varvid armeringen börjar korrodera, jfr Figur 9.

I följande kapitel görs en genomgång av de vanligaste nedbrytningsmekanismerna som begränsar livslängden för svenska betongkonstruktioner. Speciellt fokus är på beständigheten hos betonger med flygaska jämfört med Portlandcementbetonger.

3.2 Armeringskorrosion

Den vanligaste nedbrytningsprocessen som begränsar livslängden hos armerade betongkonstruktioner i anläggningskonstruktioner är armeringskorrosion. Armeringskorrosion har två negativa effekter på en betongkonstruktion: (i) armeringens tvärsnittsarea reduceras, vilket påverkar konstruktionens lastupptagningsförmåga, samt (ii) korrosionsprodukterna som bildas har en större volym än det ursprungliga stålet, vilket ger upphov till ett inre tryck i betongen som så småningom leder till att betongen spricker längs armeringen. Vid svåra angrepp kan hela konstruktionens täckskikt spjälkas loss och frilägga underliggande armering.

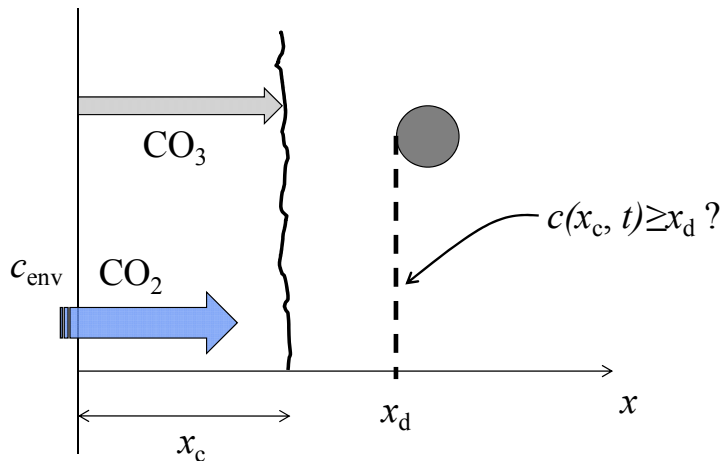
Armeringsstål som är väl ingjutna i betong befinner sig normalt i ett s.k. passivt tillstånd orsakat av den höga alkalinitet ($\text{pH} > 12,5$) som råder i betong. När armeringen befinner sig i passivt tillstånd korroderar den inte, eftersom dess yta är täckt med ett lager och lösliga och olösliga järnoxider samt reaktionsprodukter från cementet. Det passiva lagret som bildas på armeringen kan dock brytas ned om miljön i betongen förändras, dvs. om pH runt armeringen sänks, varvid armeringskorrosion initieras. De vanligaste mekanismerna som orsakar en pH -sänkning runt armeringen är karbonatisering och kloridinträngning. Normalt kan livslängden hos en betongkonstruktion som är utsatt för armeringskorrosion delas in i en initieringsperiod, när skadliga ämnen tränger in i betongen och initierar korrosion, och en propageringsperiod, när armeringen korroderar aktivt, jfr Figur 9.

3.2.1 Initiering av karbonatisering

Allmänt

Armeringskorrosion initierad av karbonatisering orsakas av koldioxid som tränger in i betongen och reagerar med kalciumhydroxid i cementpastan. Denna reaktion resulterar i att betongens alkalinitet minskar från $\text{pH} > 12,5$ till $\text{pH} < 9,0$. Karbonatisering fortskrider som en front in i betongen, som skiljer karbonatiserad från icke karbonatiserad betong. När karbonatiseringsfronten når armeringen minskar betongens alkalinitet så pass mycket att armeringen inte längre är passiverad utan korrosion initieras. Karbonatiseringen beror i princip på koncentrationen av koldioxid vid betongens yta (drivande potential) och hastigheten med vilken koldioxid transporteras i karbonatiserad betong.

I Figur 10 visas en schematisk bild på karbonatiseringsprocessen i betong där x_c är karbonatiseringsdjupet och x_d är tjockleken på täckande betongskikt. Korrosion initieras när karbonatiseringsfronten når armeringen, dvs. $x_c > x_d$.



Figur 10. Schematisk bild på karbonatiseringsprocessen i betong. Karbonatiseringen fortskrider som en front i betongen och när fronten når armeringen kan korrosion initieras.

Karbonatisering är en relativt enkel process att beskriva, eftersom det är en gas (koldioxid) som tränger in i betongen och reagerar med kalciumhydroxid. Transporten av koldioxid uppstår på grund av koncentrationsskillnader mellan betongens yta och karbonatiseringsfronten. Koldioxiden transporteras i betongens porsystem och så länge betongen inte är fuktmatad (vilket medför att det inte finns någon öppen transportväg för koldioxiden) kan transporten fortgå. Karbonatiseringshastigheten påverkas i huvudsak av tre faktorer, Neville (1995): (i) Exponeringsmiljön (koncentrationen av koldioxid i luften som finns vid betongens yta), (ii) Transporthastigheten för koldioxid i betongen samt (iii) Bindningskapacitet för koldioxid i betongen.

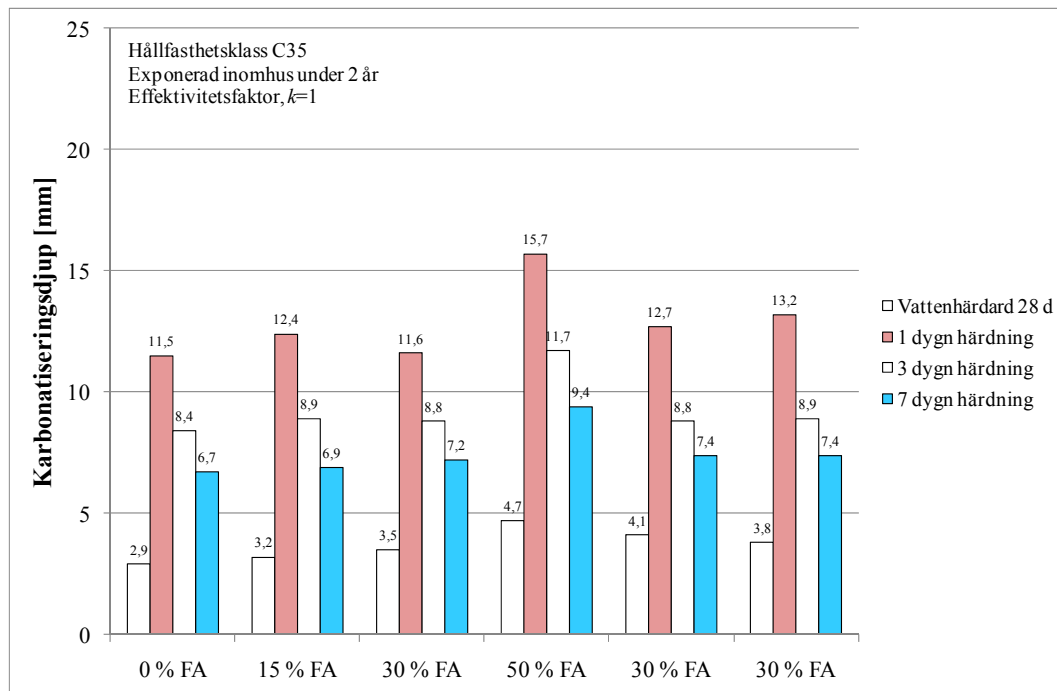
Egenskaper hos betong med stenkolsflygaska med avseende på karbonatisering

Beständigheten hos en betong med flygaska jämfört med motsvarande Portlandcementbetong med avseende på karbonatisering är något oklara. Å ena sidan blir strukturen hos en betong med flygaska tätare än en Portlandcementbetong, vilket ger en långsammare transport av koldioxid, men å andra sidan minskar mängden karbonatiserbart material (dvs. kalciumhydroxid) som ett resultat av de puzzolana reaktionerna mellan flygaskan och Portlandcementet. Den sammantagna effekten är dock normalt att karbonatisering i betongen med flygaska går långsammare, och att initieringsperioden således blir längre, än i motsvarande Portlandcementbetong.

Karbonatisering i betong med flygaska har studerats av exempelvis Thomas & Matthews (1992), Thomas & Matthews (1994), Gehlen (2000), Khunthongkeaw et al (2006) och Baert et al (2008).

I Thomas & Matthews (1992 & 1994) presenteras undersökningar av egenskaper hos betonger med olika mängder flygaska (0-50 vikt-% av cement, $k=1,0$), där betongerna har varit exponerade i naturliga förhållanden samt med accelererade metoder. Resultaten från exponering i naturliga förhållanden visar att karbonatiseringshastigheten ökar något för betonger med upp till 30 vikt-% flygaska jämfört med motsvarande Portlandcementbetong. Om däremot mängden flygaska är 50 vikt-% visade sig karbonatiseringshastigheten öka signifikant jämfört med motsvarande Portlandcementbetong. Några exempel på uppmätta karbonatiseringsdjup som presenteras i Thomas & Matthews (1992) redovisas i Figur 11, där mätningar har gjorts efter

2 års exponering inomhus på en C35-betong (vilket motsvarar en betong med hållfasthetsklass C35/45).



Figur 11. Karbonatiseringsdjup uppmätta i betonger med olika mängder flygaska (0-50 vikt-% av cement, $k=1,0$) och härdningsförhållanden. Mätningar gjorda på C35-betong exponerad inomhus under 2 år. Data från Thomas & Matthews (1992).

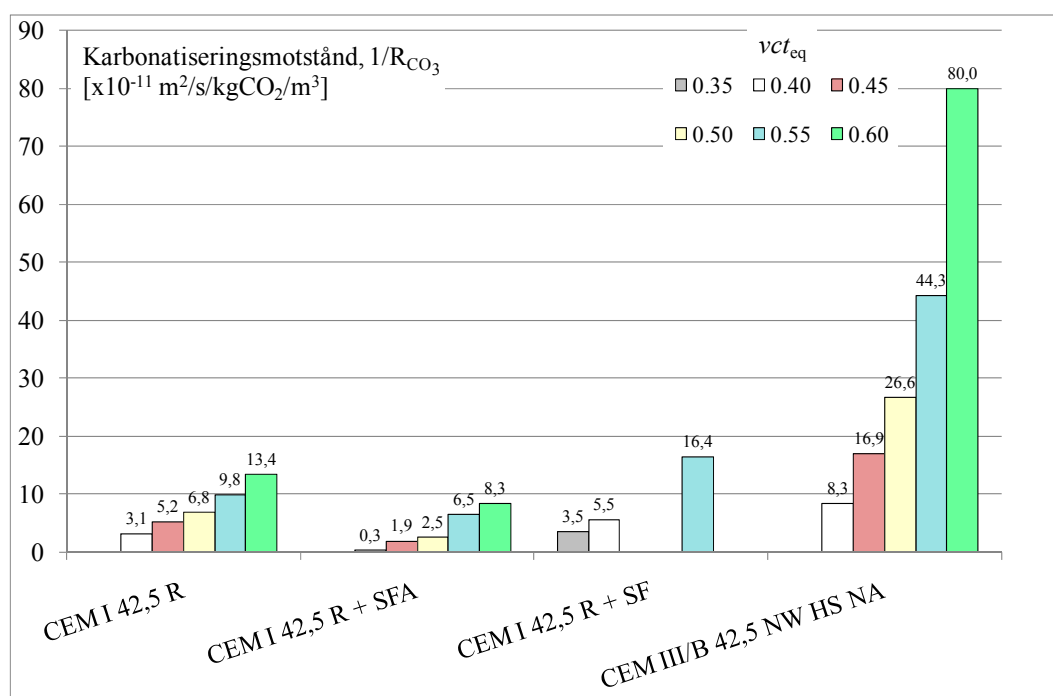
I Figur 11 kan inverkan av inblandning av flygaska på karbonatisering observeras, där karbonatiseringsdjupet ökar med ökande mängd flygaska i betongen. Dock har Portlandcement ersatts av samma mängd flygaska ($k=1,0$) och detta kan förklara den snabbare karbonatiseringen hos betongerna med flygaska. Detta eftersom flygaskans effektivitet är lägre än Portlandcement vad gäller motstånd mot karbonatisering. Skillnaden i karbonatisering mellan betonger med och utan flygaska hade varit mindre om en lägre effektivitetsfaktor hade tillämpats, eller om jämförelsen gjorts på betonger med likvärdig tryckhållfasthet.

Uppmätta karbonatiseringsdjup i Figur 11 visar också att härdningsförhållandena har stor inverkan på karbonatiseringen, där en förlängd härdningstid leder till reducerad karbonatisering. Den mest gynnsamma härdningen med avseende på låg karbonatiseringshastighet är härdning i vatten under 28 dygn. Förklaringar till resultaten i Figur 11 är att betongerna som har korta härdningstider i vatten blir exponerade för koldioxid vid lägre ålder (1-7 dygn beroende på härdningsförhållanden), när betongens inte är så tät, samt att en längre härdningstid ger en tätare struktur hos betongen.

Resultaten från accelererande provningar (där betongerna exponeras för förhöjda koncentrationer av koldioxid), som redovisas i Thomas & Matthews (1994), visar att härdningen har stor inverkan på karbonatiseringen, speciellt för betonger med stora mängder flygaska. Den slutsats som dras i Thomas & Matthews (1992 & 1994) är att "Egenskaperna hos en betong med flygaska relativt motsvarande Portlandcementbetong beror till stor del på mängden flygaska, men också på härdningsförhållanden, betongkvalitet samt exponeringsmiljön. Generellt karbonatiserar en betong flygaska snabbare än en Portlandcementbetong med samma hållfasthetsklass, där skillnaden ökar med ökande mängd flygaska. Dock är skillnaden mellan

betong med flygaska och Portlandcementbetong liten vid tillsatser av flygaska upp till 30 %.” Betongerna som Thomas & Matthews (1994) har satts samman så att de har samma hållfasthetsklass, dvs. en k -faktor har tillämpats (dock finns det inte angivet vilket värde k har haft).

Gehlen (2000) har undersökt egenskaperna hos betonger med olika sammansättning, bl.a. med avseende på motstånd mot karbonatisering. Motståndet mot karbonatisering har mätts med en accelererad metod där betongen har exponerats för förhöjd koldioxidkoncentration (2 volym-%) under 28 dygn, karbonatiseringsdjupet har mätts upp och slutligen motståndet utvärderats. Resultaten från undersökningen redovisas i Figur 12, där karbonatiseringsmotstånd^{III} för betonger^{IV} blandade med Portlandcement (CEM I), flygaska (SFA – ca 22 % av cementvikten, $k=0,5$), kiselstoft (SF – ca 5 % av cementvikten, $k=2,0$) samt Slaggcement (CEM III) jämförs. Provkropparna har varit lagrade i vattenbad (+20 °C) i 7 dygn och därefter i klimatrum (+20 °C och 65 % RF) fram tills provning vid 28 dygns ålder.



Figur 12. Motstånd mot karbonatisering (medelvärde) uppmätt på 18 olika betongsammansättningar, uppmätt med en snabbmetod. SFA är flygaska (inblandning ca 22 % av cementvikten) och SF är kiselstoft (inblandning ca 5 % av cementvikten). Effektivitetsfaktorn vid användning av flygaska respektive kiselstoft har varit $k=0,5$ och $k=2,0$. Data från Gehlen (2000).

I Figur 12 går det att observera att motståndet mot karbonatisering beror på betongens vct_{ekv} , där motståndet minskar med ökande vct_{ekv} (inversen av motståndet mot karbonatisering redovisas i figuren). Ett ökande motstånd mot karbonatisering innebär att karbonatiseringen går långsammare och vice versa. Det går också att observera att det största motståndet mot karbo-

^{III} Karbonatiseringsmotståndet bestäms som inversen på diffusionskoefficienten med avseende på karbonatisering. Detta betyder att en låg diffusionskoefficient motsvarar ett högt motstånd mot karbonatisering och vice versa.

^{IV} Total ekvivalent cementshalt med hänsyn tagen till effektivitetsfaktorer har valts till 320 kg/m³. I betongerna med flygaska respektive kiselstoft har 64 kg/m³ flygaska (cementshalt=288 kg/m³) och 15 kg/m³ kiselstoft (cementshalt=291 kg/m³) blandats in.

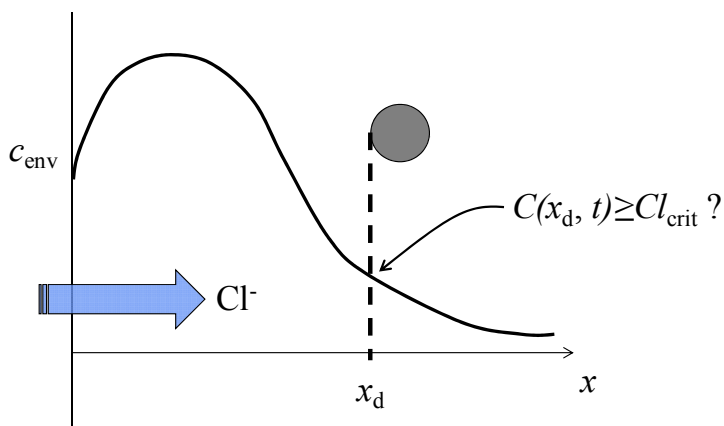
natisering uppnås i betongen med flygaska. Gehlen (2000) drar därför slutsatsen att effektivitetsfaktorn för flygaska (och kiselstoft, $k=2$) är för låg när beständigheten skall beskrivas.

Beart et al (2008) har undersökt beständigheten hos betonger med olika mängd flygaska (upp till 60 vikt-%, $k=1,0$). Motståndet mot karbonatisering har bestämts med en snabbmetod, där betongerna har exponerats för en atmosfär med koncentration av koldioxid på 10 %. Resultaten visar att motståndet mot karbonatisering minskar med ökande mängd flygaska i betongen där den det lägsta motståndet har mätts upp i betongen med 60 vikt-% flygaska. Motsvarande resultat rapporteras i Khunthongkeaw et al (2006), där karbonatiseringen går fortare i betonger med flygaska än i motsvarande Portlandcementbetonger.

3.2.2 Initiering av kloridinträngning

Allmänt

Armeringskorrosion initierad av kloridinträngning uppstår när klorider tränger in i betongen och når armering i så hög halt att denna överstiger det s.k. kloridtröskelvärde. När kloridtröskelvärde överskrids bryts passiveringen av armeringen och aktiv korrosion kan initieras. I princip finns det två faktorer som inverkar på risken för initiering av armeringskorrosion från kloridinträngning; Page et al (1986): (i) förhållandet mellan koncentrationerna av klorid- och hydroxyljoner samt (ii) diffusiviteten för kloridjoner i betongen. I Figur 13 redovisas en schematisk bild över kloridinträngning i betong (kloridhalten på olika djup från betongens yta) där c_{env} är kloridkoncentration vid betongens yta, $C(x_d, t)$ är kloridhalten i betongen vid armeringen och Cl_{crit} kloridtröskelvärde.



Figur 13. Schematisk bild på kloridinträngning i betong. Kloridinträngning resulterar normalt i att en profil, liknande den som visas i figuren, där kloridhalten på olika djup från betongens yta redovisas, uppstår. När kloridhalten i höjd med armeringen överskrider kloridtröskelvärde kan korrosion initieras.

Kloridinträngning i betong är en mer komplicerad process än karbonatisering, eftersom klorider transporteras i form av joner, som endast kan transporteras i vätskefas. Detta betyder att klorider endast kan transporteras i betongens porsystem om detta är minst delvis fyllt med fukt. Fukttillståndet i betongen har stor inverkan på transport av kloridjoner, där transporten helt eller delvis avstannar om betongen torkar. Kloridhalten kan också öka lokalt och klorider kan t.o.m. fällas ut i betongens porsystem om betongen torkar ut. Dessutom inverkar transport av andra joner på den hastighet med vilken kloridjoner transporteras. Kloridjoner är negativt laddade, vilket innebär att transporten av klorider också påverkas av andra joner som finns i betongens porsystem, huvudsakligen hydroxid-, kalium- och natriumjoner.

Transport av klorider sker med tre principiella transportmekanismer, Basheer et al (2001): (i) Konvektion av saltlösning, (ii) kapillärtransport samt (iii) diffusion av fria kloridjoner. Alla dessa tre transportmekanismer förekommer samtidigt i betongen och samtliga kräver att betongens porsystem innehåller en viss mängd fukt. Hastigheten med vilken klorider transporteras i betongen påverkas av i huvudsak tre faktorer, Neville (1995): (i) Koncentrationen av klorider vid betongens yta (drivande potential), (ii) Transportegenskaperna i betongen för klorider samt (iii) Kloridbindningskapaciteten i betongen.

Det som komplicerar beskrivningen av kloridinträngning i betong är kloridbindning. Klorider i betongen kan vara fria i betongens porsystem eller bundna fysikaliskt eller kemiskt i cementpastan. Det är endast de fria kloriderna som kan transporteras i betongen och initiera armeringskorrosion och således har kloridbindningen en stor inverkan på risken för initiering av armeringskorrosion. Kloridbindningen påverkas av ett flertal faktorer, t.ex. vct, bindemedels-halt, alkalinitet, typen av bindemedel samt temperaturförhållanden, Tang (1996) och Glass & Buenfeld (2000). Om förhållandena i betongen förändras, t.ex. genom urlakning eller karbonatisering, kan detta leda till att kloridbindningen förändras. Det vanligaste är att bundna klorider frigörs och därefter kan transporteras i betongen och delta i initiering av armeringskorrosion.

En faktor som har avgörande inverkan på initiering av armeringskorrosion är kloridtröskelvärdet. Vilken nivå kloridtröskelvärdet har är för närvarande inte riktigt utrett, eftersom det påverkas av en mängd faktorer. Exempel på de viktigaste inverkanse faktorerna är betongens sammansättning samt exponeringsmiljön. De kloridtröskelvärden som finns redovisade i litteraturen är troligen på säkra sidan vilket betyder att risken för initiering av armeringskorrosion ofta överskattas. För närvarande pågår det forskning för att bättre definiera nivån på kloridtröskelvärdet.

Egenskaper hos betong med stenkolsflygaska med avseende på kloridin-trängning

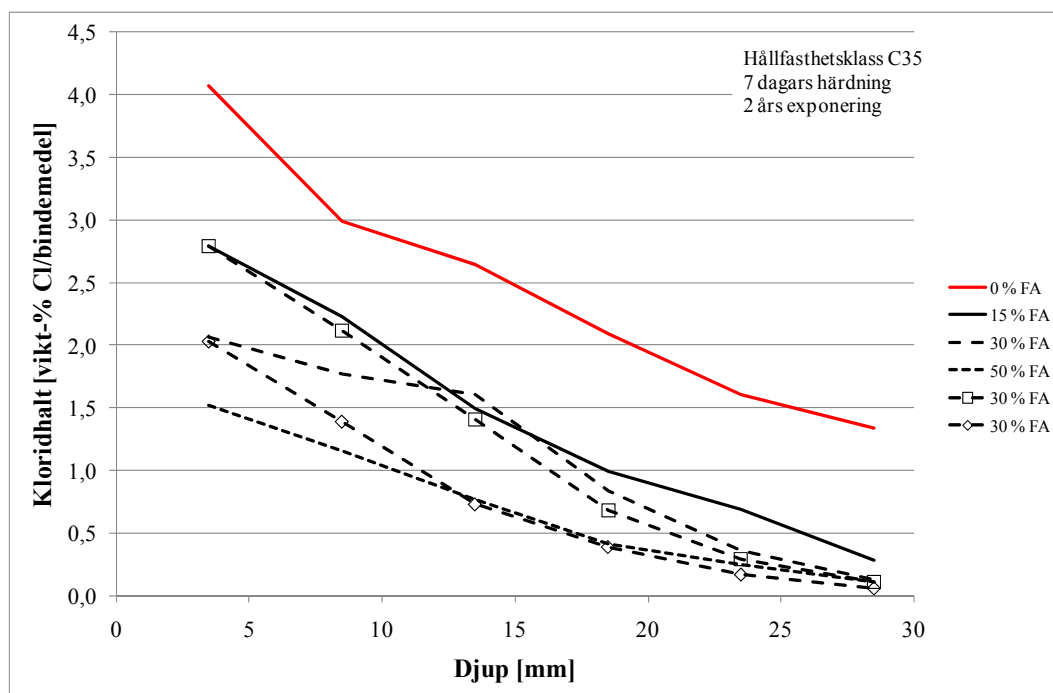
Beständigheten med avseende på kloridinträngning blir förbättrad, dvs. kloridinträngningen går långsammare, hos en betong med flygaska jämfört med motsvarande Portlandcementbetong. Detta eftersom en betong med flygaska får en tätare struktur, främst genom att den totala halten bindemedel i betongen ökar (om k -faktorer används), men också genom de puzzolana reaktionerna mellan flygaskan och Portlandcement. En tätare struktur medför att transporten av skadliga ämnen går långsammare. Dessutom har en betong med flygaska större kloridbindning vilket också bidrar till att transporten av klorider går långsammare, eftersom andelen fria klorider minskar. Dock blir kloridtröskelvärdet lägre i en betong med flygaska än i motsvarande Portlandcementbetong, vilket betyder att armeringskorrosion kan initieras vid lägre kloridhalter.

Kloridinträngning i betong med flygaska har studerats av ett flertal forskare, t.ex. Page et al (1986), Hedegård (1990), Dhir & Byars (1993), Thomas & Matthews (1994), Schiessl & Wiens (1995), Thomas (1996), Dhir & Jones (1999), Bouzoubaâ et al (2000), Gehlen (2000), Bouzoubaâ et al (2001), Schiessl et al (2001), Mohammed & Hamada (2003), ConLife (2004), Chalee et al (2007), Thomas & Matthews (2004), Baert et al (2008) samt Cheewaket et al (2010). Resultaten från samtliga dessa undersökningar visar att betong med flygaska får ett större motstånd mot kloridinträngning än motsvarande Portlandcementbetong. Nedan ges några exempel på resultat från litteraturen där resultat från undersökningar av beständigheten hos betonger med flygaska med avseende på kloridinträngning finns rapporterade.

I Page et al (1986) presenteras undersökningar av hur olika bindemedel inverkar på risken för kloridinitierad armeringskorrosion i armerad betong. Undersökningarna har gjorts på provkroppar av cementpasta blandade med olika bindemedel. Resultaten från undersökning visar att betonger med flygaska och masugnsslagg får minst lika god beständighet som motsvarande Portlandcementbetong.

Hedegård (1990) har studerat proportionering och beständighet hos betong med flygaska, med speciellt fokus på kloridinitierad armeringskorrosion. Resultaten rörande beständighet visar att denna till stor del beror på vilka delmaterial betongen blandats med, där typen av bindemedel är det viktigaste. Den viktigaste slutsatsen som dras i Hedegård (1990) är att initieringsperioden med avseende på kloridinträngning kan förlängas signifikant om tillräckligt stora mängder flygaska sätts till betongen. I Hedegård (1990) har effektivitetsfaktorn $k=1$ använts, dvs. cement har ersatts med motsvarande mängd flygaska.

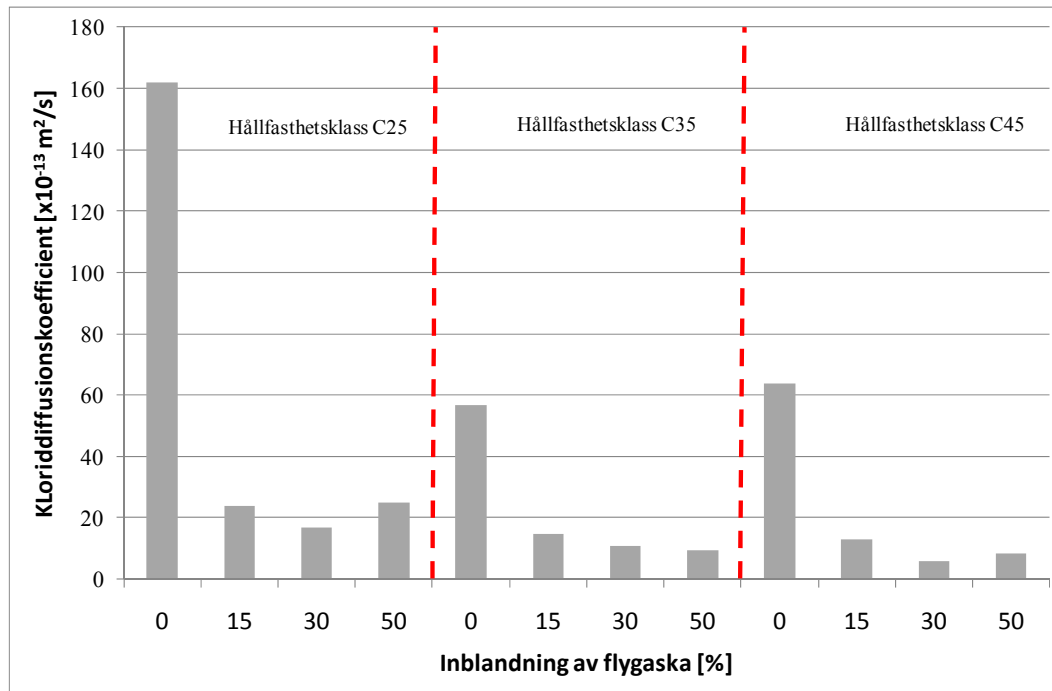
Thomas & Matthews (1994) & 2004) har studerat kloridinträngning i betong med olika mängder flygaska (upp till 50 vikt-% av cement, $k=1,0$). Resultaten visar att kloridinträngningen minskar med ökande mängd flygaska, jämfört med motsvarande Portlandcementbetong. Resultaten visar också att hårdningen av betongen har begränsad effekt på omfattningen av kloridinträngningen. I Figur 14 redovisas ett exempel på kloridinträngning (kloridinträngningsprofiler, där kloridhalten på olika djup från betongens yta presenteras) uppmätt på betonger med olika mängd flygaska (0-50 vikt-% av cement) exponerade i marina tidvattenzonen under 2 års tid.



Figur 14. Exempel på kloridinträngningsprofiler uppmätta i betonger med olika mängder flygaska (0-50 vikt-% av cement, $k=1,0$) exponerade i marina tidvattenzonen under 2 års tid. Baserat på data från Thomas & Matthews (1994).

I Figur 14 går det att observera en tydlig effekt av inblandning av flygaska, där kloridinträngningen blir signifikant lägre i betonger med flygaska jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger. Kloriddiffusionskoefficienter, D_e , har utvärderats från de uppmätta kloridinträngningsprofilerna för att få ett mått på hastigheten med vilken kloriderna transporteras. De

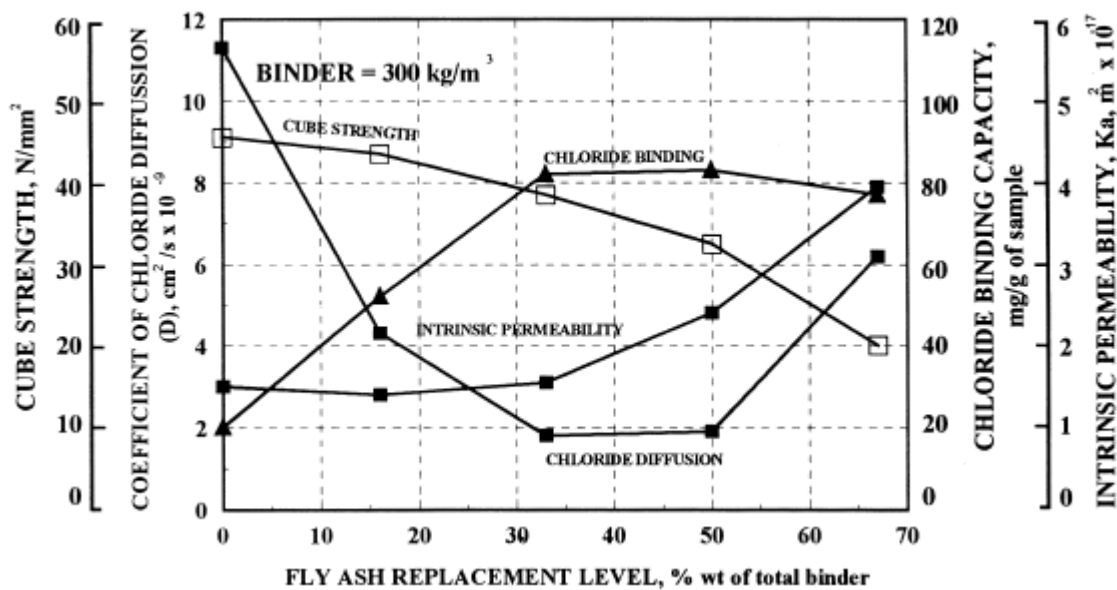
utvärderade kloriddiffusionskoefficienterna redovisas i Figur 15 (betonger med hållfasthetsklass C25, C30 samt C35 (motsvarande betonger med hållfasthetsklasser C25/30, C30/37 samt C35/45) exponerade i marina tidvattenzonen under 4 års tid).



Figur 15. Exempel av kloriddiffusionskoefficienter (D_e) utvärderade från uppmätta kloridinträngningsprofiler efter exponering i marina tidvattenzonen under 4 års tid. Betonger med olika mängder flygaska (0-50 vikt-% av cement, $k=1,0$). Baserat på data från Thomas & Matthews (2004).

De utvärderade D_e som redovisas i Figur 15 demonstrerar tydligt hur den hastighet med vilken klorider tränger in i betongen minskar med ökande mängd flygaska som har blandats i betongen (D_e är proportionell mot inträngningshastigheten). Störst effekt från inblandning av flygaska fås på betongen med lägst hållfasthetsklass (hållfasthetsklass C25).

I Dhir & Byars (1993), Dhir et al (1997) samt Dhir & Jones (1999) presenteras undersökningar på egenskaperna hos betong blandad med flygaska med avseende på kloridinträngning. De har undersökt betonger med olika mängd flygaska (0-66,7 vikt-% av cement, $k=1,0$) genom att bestämma: kloridmigration (uppmätt med en snabbmetod, dvs. ingen hänsyn till kloridbindning), kloridbindning och gaspermeabilitet samt tryckhållfasthet. Dhir & Byars (1993) samt Dhir et al (1997) drar slutsatsen att användning av flygaska bidrar till att signifikant öka betongens motstånd mot kloridinträngning, där motståndet ökar med ökande mängd flygaska. Resultaten från studierna i Dhir et al (1997) samt Dhir & Jones (1999) sammanfattas i Figur 16.



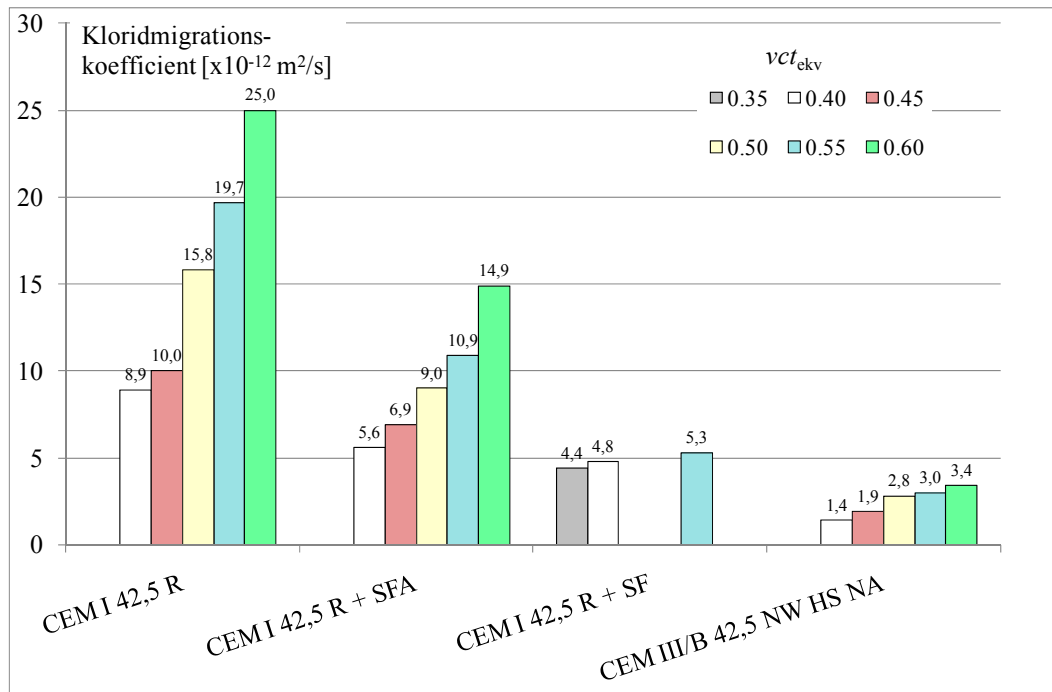
Figur 16. Kloridmigration (uppmätt med en snabbmetod, dvs. ingen hänsyn till kloridbindning), kloridbindning och gaspermeabilitet samt tryckhållfasthet uppmätt på betonger med olika mängd flygaska (0-66,7 vikt-% av cement, $k=1,0$). Dhir & Jones (1999).

I Figur 16 framgår att beständigheten hos betong med flygaska förbättras med ökande tillsats av flygaska (upp till ca 33 vikt-% av cement). Exempelvis ökas kloridbindningskapaciteten med en faktor 4 och kloridmigrationskoefficienten minskar med en faktor 6 när halten av flygaska är 33 vikt-%, jämfört med en motsvarande Portlandcementbetong (0 % flygaska). När halten flygaska i betongen överskrider ca 33 vikt-% sker ingen fortsatt förbättring av beständigheten hos betongen. Dhir & Jones (1999) visar också att betongens beständighet kan förbättras ytterligare om flygaskan blandas med kiselstoft och/eller om processerad flygaska används. Motsvarande resultat, där en optimal inblandning av flygaska med avseende på beständighet har identifierats, presenteras i Justnes (1998) samt Beart et al (2008). I Justnes (1998) presenteras en undersökning av kloridbindning i betong med olika mängder flygaska, där resultaten visar att kloridbindningen ökar i en betong med flygaska, jämfört med Portlandcementbetong. Baert et al (2008) har studerat kloriddiffusionskoefficienten hos betong med flygaska (0 vikt-% - 60 vikt-%, $k=1,0$) och resultaten visar att betong med upp 40 vikt-% flygaska får en signifikant lägre kloriddiffusionskoefficient än motsvarande Portlandcementbetong.

Bouzoubaâ et al (2000 och 2001) har studerat motståndet mot kloridinträngning i betong med stora tillsatser av flygaska (55 vikt-% av den totala bindemedelshalten, $k=1,0$). Undersökningarna har gjorts med en snabbmetod, där kloridinträngning accelereras genom att en elektrisk potential läggs över betongprovkroppen. Flygaskan har tillförts betongen antingen genom användning av flygaskecement eller genom tillsättning i samband med betongblandningen. Resultaten visar att motståndet mot kloridinträngning i betong med flygaska blir betydligt större än för motsvarande Portlandcementbetong, oberoende om flygaskecement används eller om flygaskan tillsätts i samband med betongblandningen. Störst motstånd mot kloridinträngning uppmättes i betongen blandad med flygaskecement, dvs. där Portlandcementklinker och flygaska har sammalts.

Gehlen (2000) har undersökt egenskaperna hos betonger med olika sammansättning, bland annat med avseende på motstånd mot kloridinträngning. Motstånd mot kloridinträngning har

mätts upp med NT Build 492. Resultaten från undersökningen redovisas i Figur 17, där kloridmigrationskoefficienten för betonger^V blandade med Portlandcement (CEM I), flygaska (SFA – ca 22 % av cementvikten, $k=0,5$), kiselstoft (SF – ca 5 % av cementvikten, $k=2,0$) samt Slaggcement (CEM III) jämförs. Provkropparna har varit lagrade i ett kloridfritt vattenbad (+20 °C) fram tills provning vid 28 dygns ålder.



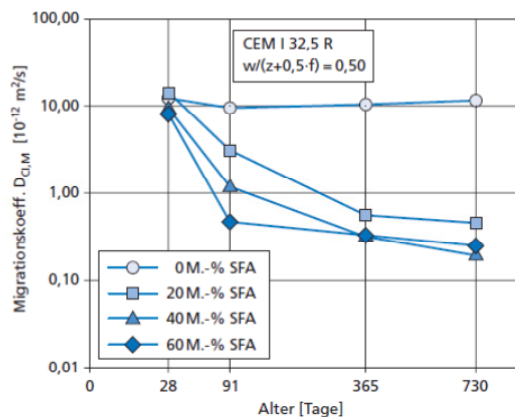
Figur 17. Motstånd mot kloridinträngning (kloridmigrationskoefficient, D_{RCM}) uppmätt på 18 olika betongsammansättningar, uppmätt med NT Build 492 (vilket är en snabbmetod, dvs. ingen hänsyn tas till kloridbindning). SFA är flygaska (inblandning ca 22 % av cementvikten, $k=0,5$) och SF är kiselstoft (inblandning ca 5 % av cementvikten, $k=2,0$). Data från Gehlen (2000).

I Figur 17 framgår hur betong blandad med tillsatsmedel generellt får en lägre D_{RCM} jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger. Störst effekt har användning av slaggcement, dvs. CEM III. Gehlen (2000) drar två slutsatser av resultaten i Figur 17: (i) effektivitetsfaktorn för flygaska ($k=0,5$) och kiselstoft ($k=2$) är för låga när beständigheten skall beskrivas och (ii) D_{RCM} påverkas i stor utsträckning av vct_{ekv} , där en ökning av vct_{ekv} från 0,4 till 0,6 medför att D_{RCM} ökar med en faktor 2,5.

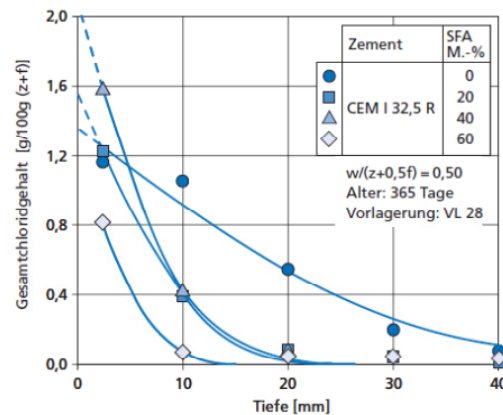
Schiessl et al (2001) har studerat kloridinträngning i betong med olika mängder flygaska (upp till 60 % av cementvikten, $k=0,5$), med accelererade och naturliga metoder (migrations- respektive diffusionsförsök). Resultaten från mätningar med accelererade metoder visar att D_{RCM} minskar med ökande tillsats av flygaska (SFA), se Figur 18. Det finns också ett tydligt tidsberoende hos D_{RCM} (bestämd enligt NT Build 492) för betongerna med flygaska, där D_{RCM} minskar med ökande exponeringstid (upp till 2 år), se Figur 18 (a). För motsvarande Portlandcementbetong är D_{RCM} konstant över tiden. Resultaten från mätningar med naturliga metoder

^V Total ekvivalent cementhalt med hänsyn tagen till effektivitetsfaktorer har valts till 320 kg/m³. I betongerna med flygaska respektive kiselstoft har 64 kg/m³ flygaska (cementhalt=288 kg/m³) och 15 kg/m³ kiselstoft (cementhalt=291 kg/m³) blandats in.

visar att kloridinträngningen blir betydligt mindre i betonger med flygaska jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger, se Figur 18 (b).



(a)



(b)

Figur 18. Kloridmigrationskoefficienter (D_{RCM}) uppmätta i betonger med olika mängd flygaska vid olika åldrar (Alter=ålder) (a). Kloridinträngningsprofiler uppmätta i betonger med olika mängd flygaska efter 365 dagars exponering i kloridlösning (b) (Tiefe=djup). SFA=flygaska ($k=0,5$). Schiessl et al (2001)

Resultaten från Schiessl et al (2001) som presenteras i Figur 18 visar att betonger med flygaska får betydligt högre motstånd mot kloridinträngning än motsvarande Portlandcementbetong, dvs. lägre D_{RCM} . Dessutom blir kloridhalterna i betongen lägre vid samma djup.

Chalee et al (2007) har studerat beständigheten hos betong med flygaska exponerad i marin miljö. Resultaten visar att betong med flygaska får en bättre beständighet med avseende på kloridinträngning än motsvarande Portlandcementbetong. Vid samma $v_{ct_{ekv}}$ minskar kloriddiffusionskoefficienten så pass mycket att täckande betongskikt kan minskas hos en betong med flygaska med upp till 40 % jämfört med motsvarande Portlandcementbetong. Resultaten visar också att kloridtröskelvärdet, dvs. den kloridhalt vid vilken armeringskorrosion initieras, minskar med ökande tillsats av flygaska.

Det finns också en tidsberoende hos betongens motstånd mot kloridinträngning, D_e (samt i viss utsträckning D_{RCM}), där D_e minskar med ökande exponeringstid. Typen av bindemedel som betongen har blandats med har stor inverkan på hur tidsberoendet ser ut. I Schiessl & Wiens (1995) presenteras en undersökning av hur tidsberoendet hos motståndet mot kloridinträngning mäts med en snabbmetod (motsvarande metoden för att mäta D_{RCM}) för cementbruk med olika mängder flygaska (0-60 vikt-% flygaska av cement, $k=1,0$) upp till en ålder av 365 dagar. Resultaten visar att motståndet mot kloridinträngning är relativt konstant över tiden för bruk blandat med Portlandcement medan motståndet ökar över tiden för bruk blandat med Portlandcement och olika mängder flygaska. Ökningen i motstånd mot kloridinträngning för bruk blandat med Portlandcement och flygaska fortsatte fram tills 365 dagars ålder. Dessa resultat förklaras med att det sker en kontinuerlig förtätning av bruket med Portlandcement och flygaska som ett resultat av flygaskans puzzolana reaktioner. Motsvarande observation görs i Thomas & Bamforth (1999) där det konstateras att inblandning av flygaska (och slagg) har liten inverkan på transportegenskaper på ung betong (upp till 28 dygns ålder), medan inverkan efter längre tid är stor.

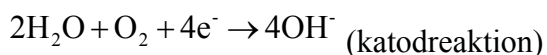
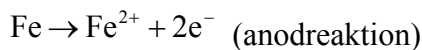
En annan viktig faktor som inverkar på kloridinträngning i betong är kloridbindningen, eftersom det endast är fria klorider som transporteras i betongen och kan initiera armeringskorrosion. Kloridbindning i betong med flygaska har studerats av t.ex. Dhir & Jones (1999), Mohammed & Hamada (2003) samt Cheewaket et al (2010). Dhir & Jones (1999) har undersökt kloridbindning i betong med flygaska (mängd flygaska upp till 67 vikt-% av cement, $k=1,0$) och resultaten presenteras i Figur 16. Mohammed & Hamada (2003) har undersökt kloridbindning hos betonger med olika bindemedel och resultaten visar att betong med flygaska har högre kloridbindning än motsvarande Portlandcementbetong. I Cheewaket et al (2010) har kloridbindningen över tiden i betong med olika mängder flygaska undersökts. Resultaten visar att kloridbindningen ökar med ökande inblandning av flygaska (upp till 50 vikt-% av cement, $k=1,0$).

En faktor som har avgörande inverkan för initiering av armeringskorrosion är kloridtröskelvärde. Thomas (1996) har undersökt kloridtröskelvärde hos betonger med olika mängder flygaska, genom mäta kloridhalten i betongen vid armeringsjärnet och bestämma eventuell viktminskning orsakad av korrosion. Resultaten visar att kloridtröskelvärde minskar med ökande tillsats av flygaska (t.ex. om halten flygaska är 50 vikt-% av cement är kloridtröskelvärde ca 30 % av det för motsvarande Portlandcementbetong, $k=1,0$). Motsvarande resultat presenteras i Bijen (1996) där det konstateras att inblandning av flygaska minskar kloridtröskelvärde. Dock finns det inga uppgifter om hur stor den observerade minskningen är.

3.2.3 Aktiv korrosion

Allmänt

När korrosion väl har initierats uppstår anoder och katoder på armeringsjärnet. Vid anoden sker själva korrosion, där järn löses upp, och vid katoden reduceras syre, se nedan.



Beroende på förhållandet mellan ytorna hos anod och katod sker korrosionen olika snabbt, där en liten anod relativt katoden medför en snabb korrosion (s.k. gropfrätning) medan lika stora anoder och katoder medför en långsammare korrosion (s.k. generell korrosion). Gropfrätning är extra allvarlig eftersom denna typ av korrosion kan fortgå utan att det blir några synliga tecken på korrosion (sprickbildning och/eller rostfläckar) på betongens yta.

När väl aktiv korrosion har initierats styrs hastigheten med vilken korrosionen propagerar av fukt- och temperaturförhållanden samt tillgängligheten på syre i betongen. Dessutom har betongens täthet en stor inverkan på korrosionshastigheten. Om korrosionen har initierats av karbonatisering uppstår en generell korrosion, dvs. anoder och katoder är ungefär lika stora, medan korrosion initierad av klorider sker som gropfrätning, dvs. anoder är mindre än katoder.

Aktiv korrosion medför i princip två negativa konsekvenser för armerade betongkonstruktioner, Svenska Betongföreningen (2006):

- Bildande av korrosionsprodukter med större volym än de ursprungliga armeringsjärnen. Detta resulterar i att ett expansivt tryck uppstår i betongen som i sin tur kan medföra att det täckande betongskiktet spricker eller spjälkar. Uppsprickning och

spjälkning av det täckande betongskiktet kan medföra skador på människor och egendom samt ge ett dåligt estetiskt utseende på konstruktionen. Dessutom ger korroderande armering konsekvenser för den strukturella funktionen hos konstruktionen orsakat av:

- Reduktion av vidhäftningen mellan armeringsjärn och omgivande betong. Hur vidhäftningen mellan armering och betong påverkas beror på en mängd faktorer, t.ex. typ av armering, förekomst av byglar, diameter på armeringsjärn, täckande betongskikt samt betongsammansättning. När vidhäftningen reduceras medför detta ökande deformationer hos konstruktionen. Om armeringen korroderar nära fogar och/eller upplag finns det även risk för vidhäftningsbrott.
- Om betongen spjälkar på den tryckta sidan, reduceras den inre hävarmen vilket medför att momentkapaciteten minskar.
- Reduktion av tvärsnittsarean på armeringsjärnen, som i sin tur reducerar armeringens (och betongens) lastbärande förmåga.

En avgörande faktor för korrosionshastigheten är fuktillståndet i betongen, där betongen varken får vara för torr eller fuktig om korrosion skall kunna fortgå. Beroende på om korrosionen har initierats av karbonatisering eller klorider har fuktillståndet olika inverkan på korrosionshastigheten. Om klorider är närvarande kan armeringen korrodera vid lägre fuktillstånd än om inga klorider är närvarande.

Egenskaper hos betong med stenkolsflygaska med avseende på aktiv korrosion

Beständigheten med avseende på aktiv korrosion blir normalt förbättrad hos en betong med flygaska jämfört med motsvarande Portlandcementbetong. Detta är ett resultat av att betong med flygaska får en tätare struktur, vilket medför att betongens resistivitet ökar samt att transporten av syre (för katodreaktionen) minskar. Detta medför att hastigheten med vilken armeringen korroderar blir lägre.

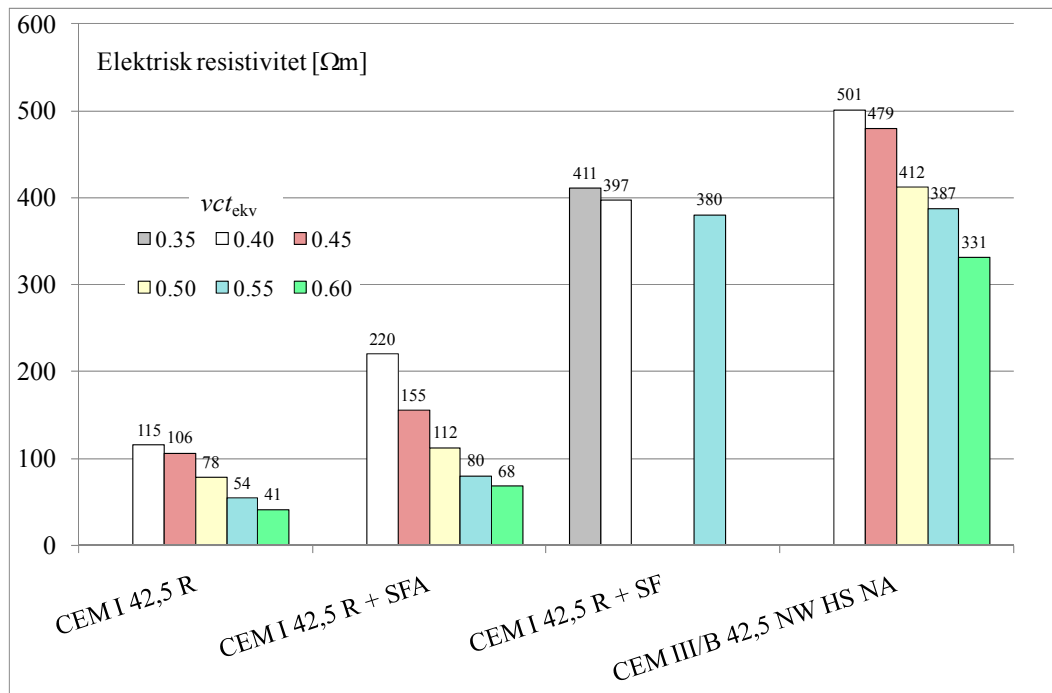
Propagering av armeringskorrosion i betong med flygaska har studerats av bl.a. Page et al (1986), Gehlen (2000), Schiessl et al (2001) och Choi et al (2006).

Page et al (1986) har undersökt med vilken hastighet armering korroderar i cementpasta blandade med olika typer av bindemedel. Uppmätta korrosionshastigheter visar att armering i betong blandad med flygaska (30 vikt-% av cement) korroderar långsammast av de undersökta betongerna. Högst korrosionshastighet mättes upp provkroppen som var tillverkad med sulfatresistent Portlandcement.

Gehlen (2000) har undersökt resistiviteten hos betonger med olika bindemedel, bl.a. Portlandcement och flygaska. Mätningarna har gjorts med Wennermetoden, där resistiviteten mäts upp med en mätsensor som placeras på betongens yta. Resultaten från undersökningen redovisas i Figur 19, där elektrisk resistivitet för betonger^{VI} blandade med Portlandcement (CEM I), flygaska (SFA – ca 22 % av cementvikten, $k=0,5$), kiselstoft (SF – ca 5 % av cementvikten, $k=2,0$) samt Slaggcement (CEM III) jämförs. Provkropparna har varit lagrade i ett kloridfritt

^{VI} Total ekvivalent cementhalt med hänsyn tagen till effektivitetsfaktorer har valts till 320 kg/m³. I betongerna med flygaska respektive kiselstoft har 64 kg/m³ flygaska (cementhalt=288 kg/m³) och 15 kg/m³ kiselstoft (cementhalt=291 kg/m³) blandats in.

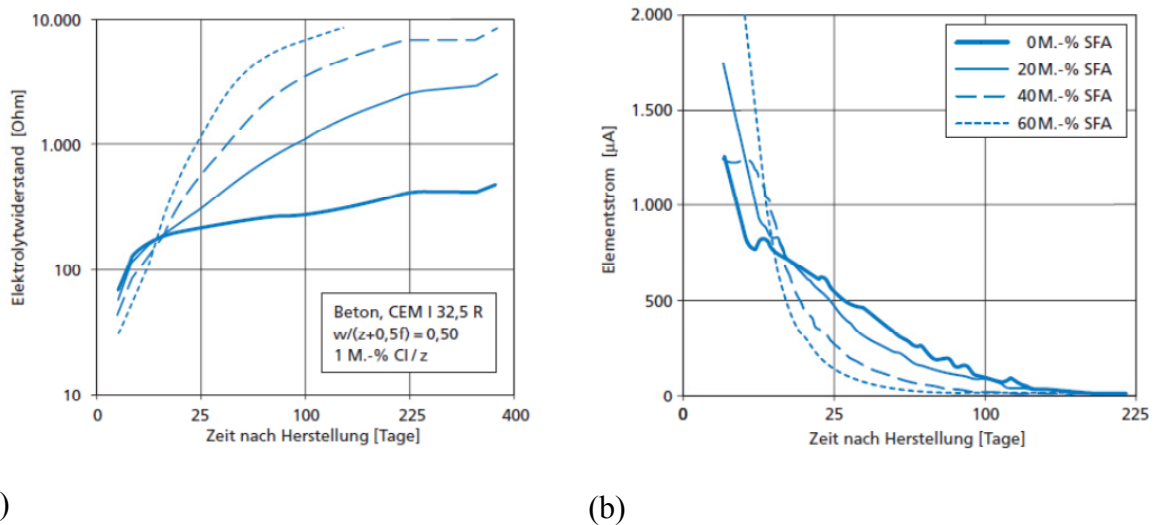
vattenbad (+20 °C) fram tills provning vid 28 dygns ålder, för att undvika eventuella effekter från karbonatisering, kloridinträngning samt fukt- och temperaturgradienter.



Figur 19. Elektrisk resistivitet uppmätt på 18 olika betongsammansättningar, uppmätt med Wennermetoden. SFA är flygaska (inblandning ca 22 % av cementvikten) och SF är kiselstoft (inblandning ca 5 % av cementvikten). Effektivitetsfaktorn vid användning av flygaska respektive kiselstoft har varit $k=0,5$ och $k=2,0$. Data från Gehlen (2000).

I Figur 19 framgår tydligt den positiva effekten från andra bindemedel än Portlandcement, där resistiviteten blir betydligt högre än motsvarande Portlandcementbetonger. Speciellt betonger blandade med slaggcement (CEM III), men även betong med flygaska (SFA), får högre elektrisk resistivitet, vilket innebär att eventuell armeringskorrosion går långsamt.

Schiessl et al (2001) har undersökt elektrisk resistivitet och korrosionshastighet hos armering i betonger blandade med flygaska (upp till 60 vikt-% av cement, $k=0,5$) upp till 1 års ålder. Resultaten visar att resistiviteten ökar och korrosionshastigheten minskar med ökande tillsats av flygaska (SFA) och ålder hos betongen, se Figur 20.



Figur 20. Elektrisk resistivitet och korrosionshastighet uppmätt i betonger med olika mängder flygaska upp till 365 dagars ålder (Zeit nach Herstellung) (a) respektive 220 dagars ålder (b). SFA=flygaska ($k=0,5$). Schiessl et al (2001)

I Figur 20 framgår att inblandning av flygaska medför att betongens resistivitet ökar och korrosionshastigheten minskar, när betongens ålder överstiger ca 10 dagar. Effekten ökar med ökande tillsats av flygaska, där högst resistivitet och lägst korrosionshastighet mättes upp i betongen med 60 vikt-% flygaska.

I Choi et al (2006) presenteras en undersökning av armeringskorrosion i betonger utan och med flygaska som har varit exponerade för NaCl-lösning (3,5 vikt-%). Resultaten visar att betong blandad med flygaska får högre elektriskt motstånd och armeringen korroderar med lägre hastighet jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger. Dessa observationer förklaras med att inblandning av flygaska ger en tätare struktur hos betongen.

3.2.4 Sammanfattning – armeringskorrosion

Egenskaperna hos betong blandad med flygaska med avseende på initiering och propagering av armeringskorrosion kan sammanfattas med följande (jämfört med motsvarande Portlandcementbetong):

- **Sammansättning hos flygaskan**, där denna måste uppfylla de krav som finns definierade i EN 450-1, för att säkerställa att flygaskan har jämn och hög kvalitet. På detta sätt får också betongen jämn och hög kvalitet. Om flygaskor som inte uppfyller kraven i EN 450-1 används riskerar betongen att få ojämn och varierande kvalitet.
- **Härdningsförhållanden**, där god härdning är viktigare vid tillsatser av flygaska än för betonger utan flygaska (minst 3 dagars vattenhärdning rekommenderas). Detta eftersom flygaskans puzzolana reaktioner kräver tillgång till vatten.
- **Initiering genom karbonatisering**, där inverkan av flygaska är något oklar. Å en sidan medför tillsatser av flygaska att betongens struktur blir tätare, vilket minskar karbonatiseringshastigheten, medan å andra sidan att mängden karbonatiserbart material (kalciumhydroxid) minskar som en följd av de puzzolana reaktionerna, vilket ökar

karbonatiseringshastigheten. Dock visar undersökningar att karbonatiseringshastigheten i betong med flygaska är något lägre än för motsvarande Portlandcementbetong, om betongerna har samma hållfastheter, dvs. att konceptet med effektivitetsfaktorer har tillämpats. Dessa resultat tyder på att den ökande tätheten överväger över den minskande mängden karboniserbart material i betonger med flygaska. Således blir inte beständigheten med avseende på karbonatisering sämre om flygaska sätts till betongen (åtminstone om konceptet med k-faktorer har tillämpats).

- **Initiering genom kloridinträngning**, där tillsatser av flygaska minskar inträngningshastigheten för klorider. Detta är ett resultat av att betongens struktur blir tätare och att kloridbindningen ökar. Lägst inträngningshastighet får vid en tillsats av flygaska på ca 33 vikt-% av cement. Detta är också den gräns, som definieras i SS 13 70 03, upp till vilken tillsatser av flygaska får räknas med vid beräkning av vct_{ekv} (överskjutande del får inte räknas med). Kloridtröskelvärdet minskar vid tillsatser av flygaska, vilket betyder att armeringskorrosion kan initieras vid lägre kloridhalt än för motsvarande Portlandcementbetong. Dock är den sammantagna effekten från tillsatser av flygaska att kloridinträngningen minskar jämfört med motsvarande Portlandcementbetong. Således blir beständigheten med avseende på kloridinträngning bättre om flygaska sätts till betongen (även om konceptet med k-faktorer inte har tillämpats).
- **Propagering av armeringskorrosion**, där tillsatser av flygaska medför att korrosionshastigheten minskar. Detta är huvudsakligen ett resultat av att betongens struktur blir tätare, vilket medför att den elektriska resistiviteten (som är omvänt proportionell mot korrosionshastigheten) ökar. Den elektriska resistiviteten minskar med ökande tillsatser av flygaska (även för tillsatser på över 50 vikt-% av CEM I). Således blir beständigheten med avseende på propagering av armeringskorrosion bättre om flygaska sätts till betongen (även om konceptet med k-faktorer inte har tillämpats).

3.3 Frostbeständighet

Frostnedbrytning i betongkonstruktioner kan orsakas av två principiella nedbrytningsmekanismer, Betonghandboken – Material (1994):

- **Frostangrepp**. De skador som uppstår är att sprickbildning uppstår i de inre delarna av betongen, medan ytan är relativt oskadad. Sprickorna uppstår som ett resultat av kombinationen frysning och hög vattenhalt i betongen. Sprickbildningen resulterar i att betongen blir mer permeabel samt dess mekaniska egenskaper (hållfasthet, E-modul etc.) blir nedsatta. Risken för intern frostnedbrytning kan kontrolleras genom att extra luft med vissa egenskaper sätts till betongen, genom tillställning av luftporbildande tillsatsmedel, och/eller genom att använda en tät betong (dvs. en betong med lågt vct). Dock är det i praktiken svårt att få en frostbeständig betong genom att endast använda en tät betong, eftersom det alltid finns defekter i betongen, t.ex. mikrosprickor, som kan underlätta sönderfrysning, Betonghandboken – Högpresterande Betong (2000). Således uppnås bäst skydd mot intern frostnedbrytning i en betong där luftporbildande tillsatsmedel har satts till.

- **Saltfrostangrepp.** Den här typen av skador uppstår vid en kombination av frysning och hög vattenhalt i betongens ytskikt. Erfarenheter från verkliga konstruktioner och laboratorieförsök visar att skadorna blir betydligt mer allvarliga när betongen har exponerats för olika typer av saltlösningar. De skador som uppstår är att ytan på betongen fryser sönder och delvis skalas av medan de inre delarna av betongen förblir oskadade. Ytavflagning är huvudsakligen ett estetiskt problem, men vid omfattande avflagning kan även betongen hållfasthet och/eller beständighet påverkas negativt. Risken för ytavflagning kan kontrolleras genom att skapa ett luftporsystem med vissa egenskaper (genom att sätta till luftporbildande tillsatsmedel till betongen) samt använda en tät betong (lågt *vct*).

De mekanismer som ligger bakom interna frostsador och ytavflagning antas vara samma, där skador uppstår när betongen fryser samtidigt som vattenhalten i betongen överskrider ett visst kritiskt värde. Dock är det inte helt klarlagt hur exponering för avisningsmedel påverkar förekomsten av ytavflagning. En möjlig förklaring är att när temperaturen hos sötvatten blir lägre än 0°C omvandlas allt vatten till is, medan när temperaturen hos en saltlösning blir lägre än 0°C förblir en del vatten ofryst ned till den eutektiska temperaturen. Det betyder att betongen kan absorbera vatten under längre tid när frysmidiet innehåller salt jämfört med sötvatten och således också få en högre vattenhalt med följd att risken för frostsador ökar.

Mekanismer som orsakar interna frostsador och ytavflagning är, Betonghandboken – Material (1994):

- **Frysning utan vattentransport.** Ingen vattentransport sker till eller från den plats där frysning sker. Volymökningen som uppstår när vatten fryser (9 %), måste härbärgeras runt den bildade iskroppen. Om det inte finns tillräckligt med ledigt utrymme i materialet kommer det att utsättas för så stora dragspänningar att det sprängs sönder. Genom att skapa ett tillräckligt stort utrymme i betongen för iskroppen kan denna typ av skador undvikas. Detta utrymme skapas genom att sätta till luft till betongen, minst 9 % av det frysbara vattnets volym.
- **Hydrauliskt tryck.** Erfarenheter visar att det behövs betydligt mer luft än vad som krävs för att undvika frysning utan vattentransport för att undvika frysskador i betong. Orsaken är att vatten måste transporteras från den plats där isbildning sker till något luftfyllt utrymme. Denna vattentransport sker genom ett trångt och delvis isfyllt por-system, vilket medför att mycket höga vätsketryck, s.k. hydrauliska tryck kan uppstå. Dessa tryck fortplantar sig till porväggarna och om trycket blir för högt brister betongen. Det hydrauliska trycket ökar vid ökande transportavstånd och därför existerar det ett visst kritiskt luftporavstånd för varje betong.
- **Iskristalltillväxt.** I en betong, som vid en viss temperatur innehåller iskroppar i de grövre porerna samt ofruset vatten i de finare porerna, kan en nedbrytning liknande tjällyftning i mark förekomma. Denna orsakas av att underkyllt vatten vid minustemperaturer alltid har ett lägre energiinnehåll än is vid samma temperatur. Iskropparna kommer därför att dra till sig ofruset vatten och det uppstår en vattentransport i riktning mot iskropparna. Iskropparna kommer att dra till sig ofruset vatten, växa till varvid iskropparna och porväggarna utsätts för tryck. Detta resulterar i att isens energiin-

nehåll ökar samtidigt som det ofrusna vattnets energiinnehåll minskar p.g.a. fukttransporten. Så länge det finns en skillnad i energiinnehåll mellan is och ofrusat vatten kommer iskropparna att växa till. Trycket från iskropparna orsakar dragspänningar i betongen som kan resultera i att den brister. Liknande som för hydrauliskt tryck finns det ett visst kritiskt luftporavstånd för varje betong.

I följande kapitel görs en genomgång av intern frostnedbrytning och ytavflagnings och hur egenskaperna för en betong med flygaska blir jämfört med en Portlandcementbetong.

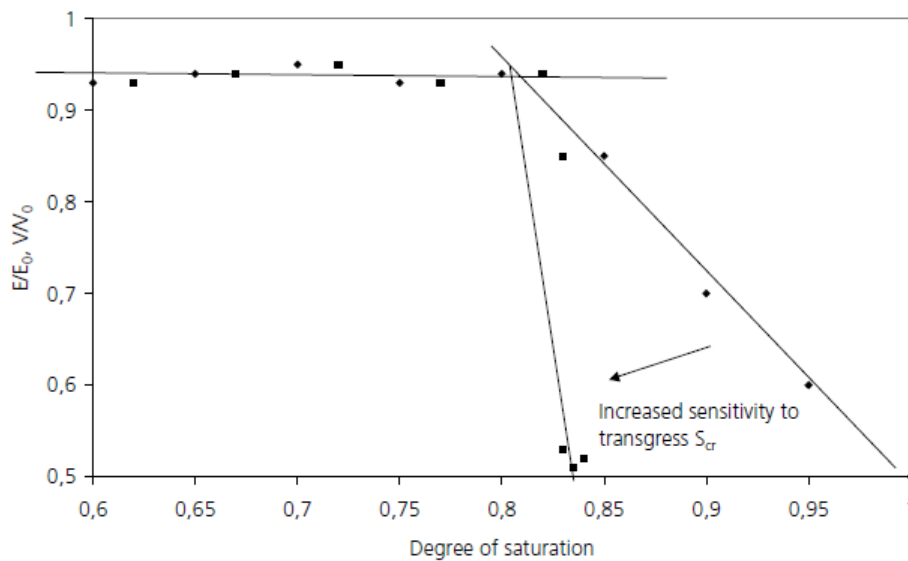
3.3.1 Frostangrepp

Allmänt

Interna frostskador uppstår när fukt i betongens porsystem expanderar när det fryser. Fukt i betong är olika hårt bundet till porväggarna vilket medför att det inte är tillgängligt för frysning förrän temperaturen understiger ett visst kritiskt värde. Vissa delar av vattnet är så hårt bundet att det endast kan frysa vid mycket låga temperaturer. Den fukt som är tillgänglig för frysning betecknas frysbart vatten och det är när detta vatten fryser som en expansion uppstår i betongen. Expansionen ger i sin tur upphov till en ökning av porvattentryck vilket i sin tur kan leda till sprickbildning i betongen. En avgörande faktor är hur stor del av betongens porsystem som är fylld med fukt, vilket beskrivs av den kapillära mättnadsgraden S_{cap} , som ger relationen mellan fuktinnehållet i betongen, w_f , och tillgänglig utrymme porsystem, $w_f + \text{luftinnehållet } l$), se nedan.

$$S_{\text{cap}} = \frac{w_f}{w_f + l}$$

För varje betong finns det ett visst kritiskt fuktinnehåll vid vilket betongen riskerar att frysa sönder. Detta kritiska fuktinnehåll betecknas kritisk kapillär mättnadsgrad, $S_{\text{cap,crit}}$. Detta är en materialegenskap och kan bestämmas genom laboratorieprovning. Den är dock inte helt konstant utan det finns ett temperaturberoende där $S_{\text{cap,crit}}$ minskar med minskande temperatur. I Figur 21 redovisas resultaten från en sådan laboratorieprovning där $S_{\text{cap,crit}}$ har bestämts genom att studera hur betongens dynamiska E-modul varierar vid frysning vid olika kapillär vattenmättnadsgrad. I figuren är den dynamiska E-modulen, E , uttryckt i relation till den dynamiska E-modulen för oskadad betong, E_0 . När kvoten E/E_0 börjar minska har $S_{\text{cap,crit}}$ överskridits. $S_{\text{cap,crit}}$ för den betong som har provats i Figur 21 är ca 0,82.



Figur 21. Resultat från laboratorieförsök för bestämning av $S_{cap,crit}$, där uppkomst av interna skador har detekterats genom bestämning av dynamisk E-modul, E (uttryckt i relation till den dynamiska E-modulen för oskadad betong, E_0). $S_{cap,crit}$ för aktuell betong är ca 0,82. Principiell bild från Fagerlund (1977).

Risken för interna frostsador beror inte bara på kritiskt vattenmättnadsgrad utan också på hur kapillär insugning av vatten sker i betongen, som resulterar i en viss kapillär mättnadsgrad betecknad med $S_{cap,act}$. Förloppet med vilket kapillär insugning av vatten i en viss betong sker, bestäms också genom laboratorieförsök.

Ett sätt att minska risken för interna frostsador är att introducera luftporer i betongen, med en viss storlek och med visst avstånd mellan porerna. Avståndet mellan luftporerna beskrivs med avståndsfaktorn och det finns en viss kritisk avståndsfaktor som inte får överskridas för att risken för skador skall vara låg. Vid frysning i sötvatten är den kritiska avståndsfaktorn 0,20-0,30 mm, Betonghandboken – Material (1994).

Egenskaper hos betong med stenkolsflygaska med avseende på frostangrepp

Egenskaperna hos betong med flygaska med avseende på frostangrepp har undersökts av t.ex. Larson (1964), Virtanen (1983), Yuan & Cook (1983), Gebler (1986), Fagerlund (1988), Malhotra (1990), Jepsen (2001), Bouzoubaâ (2001) samt Peng et al (2007). I allmänhet visar resultaten från dessa undersökningar att beständigheten hos betong med flygaska är motsvarande den för Portlandcementbetong. Den faktor som är avgörande för om en betong med flygaska blir beständig med avseende på interna frostsador är att betongen får ett lämpligt luftporsystem (adekvat lufthalt och avståndsfaktor). De puzzolana reaktionerna mellan flygaska och Portlandcement bidrar också till att betongens struktur blir tätare, vilket i sin tur bidrar till en förbättrad beständighet med avseende på interna frostsador, Vargas (2007).

Larsson (1964) har undersökt beständigheten hos betonger med olika tillsatser av flygaska samt Portlandcementbetonger med avseende på frostangrepp. Resultaten visar att beständigheten inte påverkas negativt av inblandning av flygaska under förutsättning att betongerna har samma hållfasthet (dvs. att någon form av k -faktor används) samt samma lufthalt. Larson (1964) drar följande slutsats: "Inblandning av flygaska har ingen negativ effekt på luftporer i

betong, under förutsättning att en tillräckligt stor luftvolym har tillförts betongen". Motsvarande resultat rapporteras i Virtanen (1983) där följande slutsatser dras: (i) Lufthalten är den enskilda faktor som har störst inverkan på frostbeständigheten hos betonger, (ii) Inblandning av flygaska har ingen större effekt på frostbeständigheten hos betong om hållfasthet och lufthalt hålls konstanta samt (iii) Stora tillsatser av flygaska kan ha negativa effekter på frostbeständigheten. Virtanen (1983) noterar också att större tillsatser av luftporbildande tillsatsmedel krävdes för att få samma lufthalt i betong med flygaska jämfört med motsvarande Portlandcementbetong.

I Gebler (1986) har beständigheten för betonger med upp till 33 vikt-% flygaska av den totala bindmedelshalten ($k=0,67$ respektive $k=1,0$) undersökts. Resultaten från undersökningen visar att beständigheten för betongerna med flygaska blir motsvarande den för Portlandcementbetong, för tillsatser av flygaska upp till 25 vikt-% av den totala bindmedelshalten. Gebler (1986) har också undersökt vilken effekt härdningstemperaturen och resultaten visar att härdning vid låg temperatur har mer negativ inverkan på beständigheten hos betong med flygaska än hos motsvarande Portlandcementbetonger efter samma härdningstid. Detta förklaras med att hållfasthetsutvecklingen går långsammare i betong med flygaska när dessa härdas vid låga temperaturer.

Fagerlund (1988) har undersökt beständigheten hos betonger ($vct=0,60$) blandade med Portlandcement och flygaskecement (5 vikt-% flygaska) utan lufttillsats (lufthalter ca 2 %) provade i sötvatten. Resultaten visar att betonger med flygaskecement fryser sönder medan motsvarande Portlandcementbetonger förblir relativt oskadade. Förklaringar till dessa resultat är att betongerna har haft relativt höga vct ($vct=0,60$) samt att ingen extra luft har satts till betongerna. Detta innebär att det finns en förhöjd potentiell risk att betongerna kan frysa sönder. Samma betonger har också provats vid frysning i saltvatten och då visade det sig frostbeständigheten vara likvärdig för både betongerna.

Malhotra (1990) har studerat beständigheten hos betonger med stora tillsatser av flygaska (ca 58 vikt-% flygaska av den totala bindmedelshalten, $k=1,0$). Samtliga undersökta betonger hade extra lufttillsats genom inblandning av luftporbildande tillsatsmedel. Resultaten visar att beständigheten blev god men att det skedde en viss ytavflagning på vissa av provkropparna.

I Tange-Jepsen (2001) har beständigheten för betonger med 11 vikt-% samt 40 vikt-% flygaska av den totala bindmedelshalten ($k=0,4$). Förutom flygaska har också kiselstoft blandats i betongen (5 vikt-%, $k=2,0$). Resultaten visar att beständigheten hos betong med flygaska blir god som med en tillsats av 11 vikt-% flygaska men inte för en tillsats av 40 vikt-% flygaska. Luftporsystemen i betongerna har undersökts och det visade sig att betongen med 40 vikt-% flygaska av den totala bindmedelshalten hade större avståndsfaktor än kritisk avståndsfaktor (0,33 mm respektive 0,20 mm), vilket Tange-Jepsen (2001) menar kan förklara den sämre beständigheten.

Bouzoubaâ et al (2001) har undersökt beständigheten hos betong med stora tillsatser av flygaska (55 vikt-% av den totala bindmedelshalten, $k=1,0$). Den flygaska som har använts har varit relativt grovkornig och därför inte uppfyllt de krav som finns i den nordamerikanska standarden för flygaska, ASTM C 618. Både flygaskecement och flygaska tillsatt i samband med betongblandningen har använts. Resultaten visar att beständigheten för betonger med flygaska blir likvärdig som för motsvarande Portlandcementbetong. Luftporbildande tillsatsmedel har satts till samtliga undersökta betonger, där målsättningen har varit att uppnå en lufthalt på 5-7 %. För att uppnå denna lufthalt i betongerna med flygaska krävdes en dosering

av luftporbildande tillsatsmedel som var ca fyra gånger högre än för motsvarande Portlandcementbetong.

I Peng et al (2007) presenteras en undersökning av bland annat frostbeständighet hos betonger ($v_{ct}=0,32$) med tillsatser av flygaska (ca 4-8 vikt-% av den totala bindemedelshalten, $k=1,0$) och kiselstoft (ca 4 vikt-% av den totala bindemedelshalten, $k=1,0$). Samtliga betonger med tillsats av flygaska hade extra luft tillsatt genom inblandning av luftporbildande tillsatsmedel. Resultaten visar att samtliga undersökta betonger hade god frostbeständighet.

3.3.2 Saltfrostangrepp

Allmänt

I miljöer där avisningsmedel finns närvarande, dvs. marina miljöer och längs tösaltade vägar, kan ytavflagning uppträda på betongkonstruktioner. De mekanismer som ligger bakom ytavflagning är samma som för interna frostsador, med den skillnaden att avisningsmedel är närvarande vid frysning. Hur närvaron av avisningsmedel vid frysning påverkar är inte helt känt, men det antas att i och med att vätskan vid betongens yta fryser vid lägre temperatur än sötvatten kan vätska absorberas i betongen under längre tid jämfört med vid frysning i sötvatten. Resultatet blir att betongen kan absorbera mer vatten vilken i sin tur medför att risken för att skador kan uppkomma i betongen.

På samma sätt som för interna frostsador finns det en kritisk kapillär mättnadsgrad även för ytavflagning, som kan bestämmas på liknande sätt som för frostangrepp. Det finns också en kritisk avståndsfaktor med avseende på frysning när avisningsmedel är närvarande. Den kritiska avståndsfaktorn vid frysning med avisningsmedel närvarande är mindre än vid frysning i sötvatten, eftersom fryspåkänningen ökar. I Betonghandboken – Material (1994) anges att den kritiska avståndsfaktorn vid frysning med avisningsmedel närvarande är 0,16-0,20 mm. I många standarder anges en kritisk avståndsfaktor på 0,20-0,25 mm, t.ex. de danska och kanadensiska betongstandarderna, eftersom frysning normalt kan ske både med sötvatten och när avisningsmedel. Dessutom finns det också krav på lägsta lufthalt i den hårdnande betongen. Ett alternativ är att istället prova om en betong har tillräckligt god frostbeständighet med en laboratorieprovning. Ett exempel på detta är hur frostbeständighet behandlas i Sverige, där detta normalt görs genom provning enligt SS 13 72 44.

Egenskaper hos betong med stenkolsflygaska med avseende på saltfrostangrepp

Egenskaperna hos betong med stenkolsflygaska med avseende på frostangrepp har undersökts av t.ex. Fagerlund (1988), Pigeon et al (1996), Thomas (1997), Schnell (2000), Bouzoubaâ et al (2001), Rønning (2001), Schiessl et al (2001), Tange Jepsen et al (2001), ConLife (2004), Boyd & Hooton (2007), Baert et al (2008), Färdig Betong (2009), Li (2009) samt Bortz (2010). I allmänhet visar resultat från dessa undersökningar att beständigheten med avseende på saltfrostangrepp är god för tillsatser av upp till ca 30 vikt-% flygaska av cement under förutsättning att extra luft har satts till betongen.

Den största farhågan rörande beständigheten som redovisas i litteraturen är att luftporbildande tillsatsmedel som satts till betongen absorberas på flygaskepartiklarna, till stor del som ett resultat av det restkol som finns i flygaska. Absorption av luftporbildande tillsatsmedel på flygaskepartiklar och efterföljande variationer i lufthalter har studerats av bl.a. Kulatos et al (2003), Pedersen et al (2008), Ley et al (2008) och Spörel et al (2008). Den faktor som avgör

hur mycket luftporbildande tillsatsmedel som absorberas på flygaskepartiklarna är den specifika ytan hos partiklarna, där absorptionen ökar med ökande specifik yta, Ley et al (2008) samt Spörel et al (2008). Flygaskans specifika yta påverkas i stor utsträckning av restkolhalten, där den specifika ytan ökar med ökande restkolhalt. Dessutom inverkar flygaskans kemiska sammansättning, Pedersen et al (2008).

Det finns metoder att undersöka kompatibiliteten mellan luftporbildande tillsatsmedel och flygaska, t.ex. ”skumindextestet”, se t.ex. Kulatos et al (2003) samt Spörel et al (2008). I ”skumindextestet” blandas en viss mängd vatten, cement och flygaska i en behållare. Luftporbildande tillsatsmedel tillsätts droppvis till blandning, behållaren skakas ca 15 s efter varje droppe och får därefter stå i ca 45 s. När ett stabilt luftporsystem bildas avslutas provningen och antalet droppar luftporbildande tillsatsmedel som måste tillsättas blandningen noteras. ”Skumindextestet” är ingen standardiserad metod, vilket betyder att resultat uppmätta av olika utförare inte kan jämföras. Dock ger testet en snabb bild över kompatibiliteten mellan en viss flygaska och luftporbildande tillsatsmedel.

Fagerlund (1988) har undersökt beständigheten hos betonger ($v_{ct}=0,50$) blandade med Portlandcement och flygaskecement (5 vikt-% och 23 vikt-% flygaska av cement). I samtliga betonger har extra luft satts till genom inblandning av luftporbildande tillsatsmedel. Resultaten visar att beständigheten med avseende på saltfrostangrepp är likvärdig för Portlandcementbetong och betong med flygaska. Samma betonger har också provats vid frysning i sötvatten och då visade det sig att frostbeständigheten var sämre för betongen blandade med flygaskecement.

Pigeon et al (1996) redovisar en sammanställning av resultat från undersökningar av beständighet med avseende på saltfrostangrepp hos betonger med tillsats av flygaska och extra luft tillsatt genom inblandning av luftporbildande tillsatsmedel. Resultaten från dessa studier visar att beständigheten i vissa fall har blivit dålig, med stor ytaflagning trots att de undersökta betongerna har haft extra luft tillsatt. Orsaken till dessa resultat är enligt Pigeon et al (1996) oklar, men en trolig förklaring är att flygaskor med dålig kvalitet (hög restkolhalt) har undersökts varvid olämpliga luftporsystem har skapats speciellt vid stora tillsatser av flygaska. I Pigeon et al (1996) rekommenderas därför att begränsa mängden flygaska till ca 20 vikt-% av den totala bindemedelshalten när det finns risk för saltfrostangrepp.

I Thomas (1997) presenteras resultaten från undersökningar av beständigheten hos betonger med olika tillsatser av flygaska (0-50 vikt-% av cement, $k=1,0$). Undersökningarna har både gjorts genom laboratorieprovningar (enligt den metod som finns beskriven i ASTM C 672^{VII}) och fältexponering i upp till 20 år. Resultaten visar att betonger med flygaska har god beständighet vid fältexponering men att de i vissa fall har fått sämre resultat vid laboratorieprovningar. Därför dras slutsatsen att resultat från laboratorieprovningar skall användas med viss försiktighet när beständigheten med avseende på saltfrostangrepp skall utvärderas. Motsvarande resultat rapporteras av Boyd & Hooton (2007), som har studerat beständigheten hos betonger med upp till 15 vikt-% flygaska av cement ($k=1,0$) i både fält och laboratorium. Resultaten visar att beständigheten blir något sämre för betonger med flygaska jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger samt att laboratorieprovningen visade på sämre frostbeständighet än vad fältexponeringen visade.

^{VII} Provning enligt ASTM C 672 görs genom att placera provkroppar exponerade för kalciumkloridlösning omväxlande i fryskammen (-18 °C) och inneklimate (+23 °C). Provningen görs i åtminstone 50 dygn (1 dygn=1 fryscykel).

Schnell (2000) har studerat beständigheten hos betonger med olika tillsatser av flygaska (0-25 % av cementvikten, $vct_{ekv}=0,45$, $k=0,12-0,40$) med den tyska CDF-metoden^{VIII}. Samtliga undersökta betonger har haft extra lufttillsats genom inblandning av luftporbildande tillsatsmedel (lufthalter i den färska betongen 5,3-7,6 volym-%). Resultaten visar att beständigheten för betonger med flygaska blir något sämre än för motsvarande Portlandcementbetonger, men att betonger med flygaska med god marginal uppfyller de krav för en beständig betong som finns uppställda i beskrivningen för CDF-metoden. Beständigheten för betonger med flygaska visade sig också förbättras något när betongen karbonatiserade.

I Rønning (2001) presenteras en undersökning av beständigheten hos betonger blandad med Portlandcement och flygaskecement (norsk standard flygaskecement, CEM II/A-V med 20 % flygaska). De undersökta betongerna har haft något olika vct , där Portlandcementbetongen hade $vct=0,45$ medan betong med flygaska hade $vct=0,47$. Provningarna har utförts enligt SS 13 72 44 och resultaten visar att beständigheten var något sämre för betong med flygaska än för Portlandcementbetongen (avflagningen var något högre för betong med flygaska än för Portlandcementbetongen). Den något sämre beständigheten hos betong med flygaska förklaras med att de puzzolana reaktioner mellan flygaska och Portlandcement går relativt långsamt och att provningen har genomförts på betonger som har varit 28 dygn gamla. En ytterligare förklaring är att betong med flygaska hade något högre vct (0,47 jämfört med 0,45)

Bouzoubaâ et al (2001) har undersökt egenskaperna, bl.a. frostbeständighet, hos betonger med flygaska, där flygaskan både har satts till i betongblandaren och som flygaskecement. Den flygaska som har använts har inte uppfyllt de krav vad gäller finhet som finns definierade i den Nordamerikanska standarden för flygaska, ASTM C 618, men i övrigt uppfylls kraven. Mängden Portlandcement och flygaska har varit 45 vikt-% respektive 55 vikt-% av den totala bindemedelshalten, dvs. halten flygaska är 120 vikt-% av cement ($vct_{ekv}=0,32$, $k=1,0$). Båda undersökta betonger har haft extra luft tillsatt med lufthalter på 7,2-8,5 volym-% (flygaska tillsatt vid betongblandningen) samt 5,7-7,1 % (flygaska tillsatt med flygaskecement). Resultaten från undersökningen visade att beständigheten med avseende saltfrostangrepp inte blev acceptabel för de undersökta betongerna.

I Schiessl et al (2001) presenteras undersökningar av betonger med 30 vikt-% flygaska av cement ($vct_{ekv}=0,30$, $k=1,0$) samt Portlandcementbetonger ($vct=0,30$). Ingen av de undersökta betongerna har haft tillsatser av luftporbildande tillsatsmedel, dvs. betongerna har endast innehållit naturlig luft (lufthalter i den färska betongen 2,5-3,0 volym-%). Provningarna har utförts med den tyska CDF-metoden och resultaten visar att beständigheten med avseende på saltfrostangrepp blir något sämre för betong med flygaska jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger. Dock är beständigheten god för samtliga undersökta betonger (maximalt acceptabel avflagnings som finns angiven för CDF-metoden, 1500 g/m² efter 28 fryscyklar, överskrids inte).

Tange-Jepsen et al (2001) har studerat beständigheten med avseende på saltfrostangrepp för betonger med 0-40 vikt-% flygaska av den totala bindemedelshalten ($k=0,4$). Förutom flygaska har också kiselstoft blandats i betongen (5 vikt-%, $k=2,0$). Provningarna har utförts enligt SS

^{VIII} CDF-metoden, DIN-EN 12390-9, motsvarar ungefär SS 13 72 44 (Boråsmetoden för bestämning av frostbeständighet). En del skillnader är att den exponerade ytan är vänd nedåt (uppåt i SS 13 72 44), fryscykeln är 12 timmar (24 timmar i SS 13 72 44) samt att avflagnat material avlägsnas med ultraljud (för hand i SS 13 72 44). Provning enligt CDF-metoden pågår 28 fryscyklar och därefter bedöms frostbeständigheten genom att studera mängden avflagnat material. Normalt är CDF-metoden strängare än SS 13 72 44, vilket betyder att om en betong blir accepterad enligt CDF bör den också bli accepterad enligt SS 13 72 44.

13 72 44 och resultaten visar att beständigheten hos betong med stenkolsflygaska blir god som med en tillsats av 11 vikt-% flygaska men inte för en tillsats av 40 vikt-% flygaska. En förklaring till att betongen med en tillsats av 40 % flygaska får en mindre god beständighet är att avståndsfaktorn blev något för hög, se kapitel 3.3.1.

I EU-projektet ConLife har bland annat beständigheten med avseende på saltfrostangrepp studerats för betonger med tillsatser av flygaska (20 vikt-% av cement, $k=1,0$) och kiselstoft (7 vikt-% av cement, $k=1,0$) med mycket låga vct (ned till $vct_{ekv}=0,30$). Betongerna har inte haft extra luft tillsatt. Provningsarna har genomförts både med SS 13 72 44 och det tyska CDF-testet. Resultaten visar att beständigheten för de undersökta betongerna varierar. Vid låga vct_{ekv} ($vct_{ekv}=0,30$) är beständigheten god för samtliga undersökta betonger oavsett om flygaska har satt till eller inte. Vid högre vct_{ekv} ($vct_{ekv}=0,42$) var däremot beständigheten hos betong med flygaska sämre än för motsvarande Portlandcementbetonger. Motsvarande resultat har också mätts upp vid fältexponering. Dessa resultat förklaras med att flygaska reagerar långsammare än Portlandcement vilket medför att betongen har en lägre mognadsgrad när den blir exponerad för frost för första gången. Därför rekommenderas att betonger med flygaska skall tillåtas härda under en längre period än motsvarande Portlandcementbetonger innan de exponeras för frost för första gången så att de får tillräcklig god beständighet.

I Baert et al (2008) presenteras en undersökning om beständigheten hos betonger med olika mängd flygaska (10-60 vikt-% av cement, $k=1,0$). Resultaten visar att beständigheten är likvärdig för samtliga undersökta betonger oberoende av mängden flygaska. Samtliga undersökta betonger har haft extra luft tillsatt genom tillsatser av luftporbildande tillsatsmedel.

Färdig Betong har gjort en del undersökning på beständigheten med avseende på saltfrostangrepp för betonger med flygaska (tillsatser upp till 10 vikt-% flygaska av cement, $k=0,4$), Färdig Betong (2009). Provningsarna har gjorts enligt SS 13 72 44 och resultaten visar att beständigheten är mycket god enligt de acceptanskriterier som finns uppställda i SS 13 72 44. Samtliga undersökta betonger har haft extra luft tillsatt genom tillsatser av luftporbildande tillsatsmedel.

Li (2009) har undersökt beständigheten hos betonger med flygaska (25 vikt-% av cement, $k=1,0$, $vct_{ekv}=0,35$ samt $vct_{ekv}=0,40$). Betonger med flygaska jämfördes med Portlandcementbetonger med samma vct . Samtliga betonger hade extra luft tillsatt (lufthalter 6,4 volym-% respektive 8,2 volym-% för Portlandcementbetonger, $vct=0,35$ och 0,40, samt 3,0 volym-% respektive 6,0 volym-% för betonger med flygaska, $vct_{ekv}=0,35$ och $vct_{ekv}=0,40$). Betonger med flygaska härdades 90 dygn i vattenbad medan Portlandcementbetongerna härdades 21 dygn i vattenbad före provning. Provningsarna har utförts enligt SS 13 72 44 och resultaten visar att beständigheten för betonger med flygaska blir god. Dock blir beständigheten ännu bättre för motsvarande Portlandcementbetonger. Samtliga undersökta betonger har haft extra luft tillsatt genom tillsatser av luftporbildande tillsatsmedel.

Bortz (2010) har studerat beständigheten hos betonger med stora tillsatser av flygaska (67 vikt-% av cement, $k=1,0$). Den flygaska som Bortz har använt har kommit från olika tillverkare, för att kunna studera effekten av olika flygaskor. Samtliga undersökta betonger har också haft extra luft tillsatt ($6 \% \pm 1$ volym-%). Resultaten visar att för att uppnå önskad lufthalt i betongen krävdes olika mängder luftporbildande tillsatsmedel beroende på vilken flygaska som användes. Detta förklaras med att de olika flygaskorna har olika innehåll av restkol, där ett större innehåll av restkol innebär att mer luftporbildande tillsatsmedel måste sättas till och vice versa. Provningsarna av beständigheten med avseende på saltfrostangrepp har gjorts med den metod som finns beskriven i ASTM C 672, där graden av skador bedöms

genom att visuellt avflagningen från betongen. Resultaten från provningarna visar att samtliga betonger inte var beständiga med avseende på saltfrostangrepp.

3.3.3 Sammanfattning – frostbeständighet

Frostbeständigheten hos betong blandad med flygaska kan sammanfattas med följande (jämfört med motsvarande Portlandcementbetong):

- **Sammansättning hos flygaskan**, där denna måste uppfylla de krav som finns definierade i EN 450-1, för att säkerställa att flygaskan har jämn och hög kvalitet. På detta sätt får också betongen jämn och hög kvalitet. Om flygaskor som inte uppfyller kraven i EN 450-1 används riskerar betongen att få ojämn och varierande kvalitet.
- **Härdningsförhållanden**, där god härdning är viktigare vid tillsatser av flygaska än för betonger utan flygaska (minst 3 dagars vattenhärdning rekommenderas). Detta eftersom flygaskans puzzolana reaktioner kräver tillgång till vatten.
- **Frostbeständigheten** hos betonger med tillsatser av flygaska blir samma eller något försämrad (både vid frysning i sötvatten och saltvatten). Detta förutsätter dock att extra luft har satts till betongerna genom tillsatser av luftporbildande tillsatsmedel.
- **Dosering av luftporbildande tillsatsmedel**, där betonger med tillsatser av flygaska har visat sig i vissa fall kräva högre doseringar av luftporbildande tillsatsmedel för att uppnå önskade lufthalter jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger. Detta är ett resultat av att flygaskan absorberar en del av det luftporbildande tillsatsmedlet i samband med att det sätts till vid blandning.

3.4 Kemiska angrepp

Betong påverkas i olika grad av kemiska reaktioner, som kan ske antingen som reaktioner mellan betongens beståndsdelar (interna angrepp) eller därför att betongen kommer i kontakt och reagerar med gas- eller vätskeformiga ämnen i dess omgivning (externa angrepp). Några av dessa reaktioner har positiv inverkan på betongens egenskaper, t.ex. öka vidhäftning mellan ballast och cementpasta, medan andra reaktioner bryter ned betongen i olika grad. Exempel på nedbrytning är att betongen kan lösas upp och/eller att expansiva reaktionsprodukter kan bildas vilket kan medföra att betongen spricker.

Motstånd mot interna angrepp hos en betong kan uppnås antingen genom att undvika potentiellt reaktiva delmaterial och/eller att ändra förhållandena utanför och i betongen så att reaktioner inte kan uppstå. Betong kan motstå externa angrepp dels genom sin kemiska uppbyggnad och dels genom sin fysikaliska struktur. Den kemiska uppbyggnaden bestämmer vilka ämnen som kan vara potentiellt skadliga och den fysikaliska strukturen bestämmer hur snabbt skadliga ämnen kan tränga in i betongen. Den kemiska uppbyggnaden följer till stor del av vilka bindemedel som betongen har blandats med och den fysikaliska strukturen påverkas huvudsakligen av vattencementtal men också till viss del av vilka bindemedel som har använts.

De vanligaste kemiska angreppen på betong är sådana som uppstår när betongen är i kontakt med vatten eller vattenlösningar samt reaktioner mellan cementpastan och reaktiva delmaterial. Vad gäller betong som är i kontakt med vatten eller vattenlösningar är den kemiska sammansättningen hos vätskan av stor betydelse. Beroende på den kemiska sammansättningen hos lösningen har den olika påverkan på betong. Rent mjukt vatten har upplösande verkan på

betong, där kalk i cementpastan lakas ur när vatten tränger genom betongen. Denna nedbrytning kan dock undvikas genom att använda en tät betong, med låg permeabilitet, som hindrar vattnet från att transporteras in i betongen. Normalt innehåller vatten olika typer av lösta ämnen som påverkar betong negativt, t.ex. sura beståndsdelar och lösta salter. Vatten med sura beståndsdelar angriper cementpastafasen, där speciellt kalcium lakas ur och lämnar ett skelett av kisel syra kvar. Denna nedbrytning sker som en diffusionsprocess från ytan och inåt i betongen och nedbrytningshastigheten beror på tätheten hos betongen. Således kan angreppshastigheten minskas genom att använda en tät betong. Salter lösta i betongen kan också ha en nedbrytande effekt på betongen, både genom att salterna reagerar med ämnen som finns i betongen (som antingen bryter ned strukturen eller bildar expanderade reaktionsprodukter) eller genom att salt fälls ut och bildar saltkristaller (som ger upphov till sprängande krafter). Exempel på angrepp av vatten med lösta salter är sulfatangrepp som behandlas i kapitel 3.4.1.

Normalt har betong med flygaska bättre beständighet än Portlandcementbetong med avseende på angrepp av mjukt vatten eller vatten med sura beståndsdelar. Detta eftersom en betong med flygaska normalt får en tätare struktur samt mindre mängd fri kalcium (kalciumhydroxid) än motsvarande Portlandcementbetong, så länge Portlandcementen ersätts med en större mängd flygaska. Dock är strukturen till en början mindre tät hos en betong med flygaska, eftersom puzzolana reaktionen är relativt långsam, men allteftersom reaktionen fortskrider minskar tätheten. Vidare binder de puzzolana reaktionerna upp beståndsdelar i cementpastan som kan vara potentiellt reaktiva, vilket medför att risken för skadliga reaktioner orsakade av inträngande ämnen minskar.

De kemiska angrepp som normalt ger allvarligast skador är sulfatangrepp samt alkali-ballast reaktioner. Dessa angrepp behandlas mer utförligt i följande kapitel.

3.4.1 Sulfatangrepp

Sulfatangrepp är den typ av saltangrepp som ger upphov till de allvarligaste skadorna hos betong. Angreppen är inte vanliga i Sverige, men förekommer på många håll i andra länder. Sulfater kan reagera med komponenter i cementpastan, t.ex. aluminater eller kalciumhydroxid, och bl.a. ettringit kan bildas. Ettringit är ett starkt hygroskopiskt salt som kan absorbera stora mängder vatten om fukt finns närvarande varvid en volymökning uppstår. Reaktionerna kan uppstå både i färsk och i hårdnad betong, men det är främst i hårdnad betong som skador kan uppstå på betongen. I hårdnad betong kan volymökningen hos ettringiten medföra att sprickor bildas i betongen med nedsatt hållfasthet som följd. Tiden det tar för skadliga angrepp att uppstå varierar, där skador i vissa fall kan uppstå efter lång tid.

Sulfater kan tillföras betong både från externa och interna källor. Vid externa sulfatangrepp tillförs betongen sulfater genom exponering för sulfathaltigt vatten (t.ex. havsvatten eller vissa grundvatten) som sedan kan reagera med komponenter i cementpastan. Vad gäller interna angrepp finns det två typer av angrepp, ballatangrepp och försenad ettringitbildning. Vid båda dessa angrepp bildas ettringit i betongen som i sin tur kan orsaka sprickbildning.

Generellt har betonger med flygaska god beständighet med avseende på sulfatangrepp. Detta är främst ett resultat att de puzzolana reaktioner mellan flygaska och cement som ger en minskad permeabilitet hos betongen vilket minskar inträngningen av sulfater. Undersökningar av betong med flygaska som har varit exponerade för sulfathaltigt vatten eller havsvatten visar att en tillsats av 10-30 vikt-% flygaska av cement ger en betong med tillräcklig god beständighet, Skalny et al (2002). Motsvarande resultat rapporteras också från Nordamerika, där risken för sulfatangrepp elimineras om mer än 25 vikt-% flygaska av cement sätts till en be-

tong, Stephens & Caraspuillo (2000). Detta reflekteras också i standarder och rekommendationer, t.ex. i Storbritannien där BRE, BRE (2005), rekommenderar att flygaska skall användas i betong exponerad i miljöer där det finns risk för sulfatangrepp.

Dock finns det några motstridiga resultat i litteraturen kring effekten av tillsatser av flygaska. Ett exempel är en undersökning av Stark (1989), där beständigheten hos betong med flygaska exponerad i fält har undersökts. Resultaten visar att det bästa sättet att öka beständigheten med avseende på sulfatangrepp är att minska *vct*. Vidare visar resultaten att tillsatser av flygaska inte förbättrar beständigheten med avseende på sulfatangrepp jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger. I Ferraris et al (2006) redovisas en undersökning av beständigheten med avseende på sulfatangrepp för olika cementbruk med tillsatser av flygaska (både rik på kalcium eller kisel). Resultaten visar att beständigheten förbättras vid tillsatser av kiselrik flygaska, vilket är den flygaska som används i Sverige, medan den försämras vid tillsatser av kalciumrik flygaska.

Relativt nyligen har thaumasitangrepp rapporteras i litteraturen. Det finns några undersökningar på hur beständigheten blir hos betonger med tillsatsmaterial med avseende på thaumasitangrepp. I Mulenga et al (2003) redovisas en undersökning där TSA (Thaumasite Sulfate Attack) har studerats i provkroppar, av betong och cementbruk med tillsatser av flygaska, som har exponerats för sulfathaltiga vattenlösningar. Resultaten visar att TSA kan uppträda efter bara några månaders exponering och att effekten av tillsatser av flygaska är oklar. Författarna har därför dragit slutsatsen att även om en betong har tillsatser av flygaska kan TSA uppträda. I Clark (2002) presenteras resultaten från ett flertal studier av beständigheten hos betonger med flygaska med avseende på sulfatangrepp. Resultaten visar att betonger med flygaska har god beständighet med avseende på TSA och att beständigheten förbättras med ökande tillsatser av flygaska (upp till ca 30 vikt-% av cement). Motsvarande resultat rapporteras av Crammond et al (2003) och Skaropoulou et al (2009). I Skaropoulou et al (2009) redovisas en undersökning av beständigheten över lång tid för provkroppar av cementbruk med Portlandkalkcement (CEM II) och tillsatser av flygaska och slagg. Resultaten visar att tillsatser av flygaska minskar risken för TSA jämfört med om bara Portlandkalkcement används. Bäst beständighet med avseende på TSA uppnåddes dock med tillsatser av slagg. Exempelvis i Bellmann & Stark (2007) rekommenderas det att använda tillsatsmaterial i betongen, t.ex. slagg eller flygaska, för att minska risken för TSA.

3.4.2 Ballatangrepp

Allmänt

Den vanligaste formen av ballatangrepp är alkali-ballast reaktioner, där det finns två principiella typer: (i) alkali-kisel reaktioner (ASR) samt (ii) alkali-karbonat reaktioner (ACR). Både ASR och ACR resulterar i svällande reaktionsprodukter, som i sin tur kan orsaka skador på betongen. Dessutom förekommer material som i sig själva kan svälla eller krympa, t.ex. vissa leror. ASR orsakas av reaktioner mellan kisel i ballasten (icke-kristallin) och alkali från cementet. Reaktionen resulterar i att en gel bildas, vilken kan absorbera vatten expandera och medföra att betongen spricker varvid betongens lastbärande förmåga kan reduceras. Uppsprickningen kan både vara skadlig i sig själv och underlätta inträngning av skadliga ämnen i betongen. Kisel är lösligt i vatten när alkali är tillgängligt och pH överstiger 10. Nästan all ballast i Sverige innehåller kisel, men normalt i en kristallin form som måste brytas ned innan kisel finns tillgängligt för reaktioner. Nedbrytningen av den kristallina formen kräver mycket energi (dvs. höga temperaturer), vilket medför att vid normala temperaturer är mängden kisel

inte tillgängligt för reaktioner och ASR uppstår inte. Om ASR skall uppstå måste kisel vara tillgängligt i en icke-kristallin form eller i skadade kristaller. Normalt är ASR i sig själv relativt svag och leder inte till några skador på betongen på grund av reducerad lastbärande förmåga. Istället kan den sprickbildning som orsakas av ASR skapa gångar för skadliga ämnen som i sin tur kan skada betongen, t.ex. koldioxid och klorider. Betonghandboken – Material (1994)

Tre villkor måste vara uppfyllda samtidigt för att ASR skall kunna uppstå (s.k. ”pessimala förhållanden): (i) hög alkalinitet ($\text{pH} > 13,5$), (ii) alkali-reaktiv ballast och (iii) tillräckligt högt fuktillstånd ($\text{RF} > 85\%$). Om ett av dessa villkor inte är uppfyllt, dvs. ”pessimala” förhållanden inte råder, kommer inte ASR att uppstå. Normalt är det enklaste att ta bort de två första av villkoren genom att använda en lågalkalisk cement och icke-reaktiv ballast, för få en betong som är ”immun” med ASR. Normalt baseras valet av lågalkalisk cement och icke-reaktiv ballast på tidigare erfarenheter, men om nya delmaterial används måste dessa undersökas före användning. Exempelvis finns det metoder för att undersöka om ballast är potentiellt reaktiv med avseende på ASR. Betonghandboken – Material (1994)

Generellt får betonger med flygaska bättre beständighet med avseende på ballastreaktioner än motsvarande Portlandcementbetonger. Detta är huvudsakligen ett resultat av att alkaliinnehållet i betongen minskar på grund av de puzzolana reaktionerna mellan flygaska och kalciumhydroxid, se t.ex. Shayan et al (1996). Dessa reaktioner ger upphov till CSH, där kvoten mellan kalcium och kisel (Ca/Si) är betydligt lägre än den CSH som bildas när Portlandcement hydratiserar. Effekten av dessa reaktioner ökar med ökande tillsats av flygaska. Exempelvis i Thomas et al (2011) rekommenderas att tillsatsen av flygaska bör vara minst 25 % av cementvikten om skadliga alkali-kisel reaktioner skall undvikas vid användning av måttligt alkalireaktiv ballast – vid mer reaktiv alkalireaktiv ballast krävs högre tillsatser av flygaska för att undvika skadlig expansion. De betonger som Thomas et al (2011) har undersökt har varit blandade med flygaskor som uppfyller kraven i SS-EN 450-1.

I många europeiska regelverk föreskrivs att betonger som riskerar att drabbas av ASR skall ha en tillsats av flygaska, som uppfyller kraven i SS-EN 450-1, som är minst 25 vikt-% av cementhalten, se t.ex. CEN (1995), BRE (2004) samt CUR (2008).

3.4.3 Sammanfattning – kemiska angrepp

Egenskaperna hos betong blandad med flygaska med avseende på kemiska angrepp kan sammanfattas med följande (jämfört med motsvarande Portlandcementbetong):

- **Sammansättning hos flygaskan**, där denna måste uppfylla de krav som finns definierade i EN 450-1, för att säkerställa att flygaskan har jämn och hög kvalitet. På detta sätt får också betongen jämn och hög kvalitet. Om flygaskor som inte uppfyller kraven i EN 450-1 används riskerar betongen att få ojämn och varierande kvalitet.
- **Härdningsförhållanden**, där god hårdning är viktigare vid tillsatser av flygaska än Beständigheten med avseende på kemiska angrepp förbättras vid tillsatser av flygaska. Detta är resultat av att betongens struktur blir tätare, vilket minskar inträngningss hastigheten för skadliga ämnen, samt att mängden reaktiva ämnen i betongen minskar, som ett resultat av puzzolana reaktioner.

- **Tillsatser av flygaska.** I internationella regelverk och rekommendationer finns angivet erforderliga tillsatser av flygaska för att undvika skadliga kemiska angrepp.

Några exempel är:

- Risken för sulfatangrepp kan i princip elimineras om en tillsats på mer än 25 vikt-% flygaska användas i betong.
- Risken för alkali-ballast reaktioner kan i princip elimineras om en tillsats på mer än 25 vikt-% flygaska användas i betong.

4 Laboratorieundersökningar utförda av Knutsson (2010)

Thomas Concrete Group har i samarbete med Chalmers tekniska högskola genomfört ett examensarbete, där syftet har varit att klargöra hur beständigheten blir för betonger blandade med flygaska, se Knutsson (2010). Speciellt fokus har varit på att undersöka frostbeständigheten hos betong med olika tillsatser av flygaska (upp till 20 vikt-% flygaska av cement). Dessutom har tryckhållfastheten och beständigheten med avseende på kloridinträngning undersökts. Ett ytterligare syfte har varit att undersöka om skillnaderna i tillåtna tillsatser av flygaska i betonger exponerade i exponeringsklass XF 4 som anges i SS 13 70 03 (25 vikt-% flygaska av CEM I) respektive AMA Anläggning 10 (6 vikt-% flygaska av cement vid nybyggnad av bro), jfr Tabell 3. Detta examensarbete har fungerat som en förstudie till det aktuella projektet.

Examensarbetet har huvudsakligen genomförts som en laboratoriestudie där tryckhållfasthet samt beständighet med avseende saltfrostangrepp och kloridinträngning har undersökts för betonger med olika tillsatser av flygaska. I följande kapitel görs en sammanfattning av resultaten från de provningar som har gjorts i examensarbetet.

4.1 Betongsammansättningar

Betongsammansättningarna har utformats så att de uppfyller kraven i exponeringsklass XF 4 i SS 13 70 03, dvs. frostangrepp med avisningsmedel när betongen har hög vattenmättnad. Totalt har åtta olika betongblandningar ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, som överensstämmer med kraven för exponeringsklass XF 4 i SS 13 70 03) undersökts i Knutsson (2010), med olika tillsatser av flygaska och effektivitetsfaktorer, k , se Tabell 4:

- Fyra blandningar med 20 vikt-% flygaska av CEM I och $k=0,4$.
- En blandning med 20 vikt-% flygaska av CEM I och $k=1,0$.
- Två blandningar utan tillsats av flygaska (referensbetonger).
- En blandning med 6 vikt-% flygaska av CEM I och $k=0,4$.

Samtliga betongblandningar har haft tillsatser av superplasticerande och luftporbildande tillsatsmedel. Tio kuber ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$) och fyra cylindrar ($200 \times 100 \text{ mm}$) har tillverkats från varje blandning. Kuberna har använts för att bestämma tryckhållfastheten samt frostbeständigheten medan cylindrarna har använts för att bestämma motståndet mot kloridinträngning hos betongblandningarna. Betongens egenskaper har provats vid 7 dygns, 28 dygns, 56 dygns samt 90 dygns ålder.

Betongerna har varit sammansatta av följande delmaterial:

- **Cement.** Cementa Degerhamn Anläggningscement (CEM I 42,5 N MH/SR/LA) har använts.
- **Flygaska.** Flygaskan som har använts har varit Warnow Füller från Rostock som med god marginal uppfyller de krav som finns i SS-EN 450-1 (den använda flygaskan uppfyller de krav som finns specificerade i kategori A och N i SS-EN 450-1, se

- Tabell 1).
- **Fin ballast.** Två typer av fin ballast har använts, Sjösand (0-4 mm) samt Holsand (0-8 mm).
- **Grov ballast.** Två typer av grov ballast har använts, Tagene (5-8 mm) samt Tagene (8-16).
- **Tillsatsmedel.** Samtliga betonger har blandats med superplasticerande tillsatsmedel, VR, (SIKA Sikament 56/50) och luftporbildande tillsatsmedel, AEA, (SIKA SikaAer-S 1:10).

Sammansättningen av samtliga blandningar redovisas i Tabell 4.

Tabell 4. Sammansättning hos de undersökta betongblandningarna.

Blandning	1-4	5	6	7	8
% flygaska (av CEM I)	20	20	0	0	6
k	0,4	1,0	-	-	0,4
vct	0,49	0,54	0,45	0,45	0,46
vct_{ekv}	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Cement [kg/m ³] ^{a)}	355	335	375	400	380
Flygaska [kg/m ³] ^{b)}	71,0	67,0	0,0	0,0	22,8
Ballast [kg/m ³]					
Fin (0-4 mm) ^{c)}	424,0	424,1	443,7	431,0	431,8
Fin (0-8 mm) ^{d)}	341,8	341,9	357,6	347,4	348,1
Grov (5-8 mm) ^{e)}	170,3	170,3	178,1	173,1	173,4
Grov (8-16 mm) ^{e)}	766,2	766,3	801,7	778,8	780,2
Vatten [kg/m ³]	172,5	180,9	168,8	180,0	175,1
AEA [kg/m ³] ^{f)}	1,42	1,34	0,38	0,40	0,38
VR [kg/m ³] ^{g)}	1,42	1,34	1,50	1,60	1,52

^{a)} CEM I 42,5 N MH/SR/LA (Anl. Degerhamn).

^{b)} Warnow Füller.

^{c)} Sjösand.

^{d)} Holsand.

^{e)} Tagene kross.

^{f)} SIKA SikaAer-S 1:10

^{g)} SIKA Sikament 56/50

Blandning 1-4 samt 8 har en effektivitetsfaktor $k=0,4$ (vilket också föreskrivs i SS-EN 206-1). Blandning 5 har en effektivitetsfaktor $k=1,0$, vilket betyder att mängden flygaska som har blandats i betongen motsvarar den mängd cement som har tagits bort. I blandning 8 har 6 % flygaska blandats i betongen ($k=0,4$), vilket motsvarar vad som föreskrivs i AMA Anläggning 10 vid nybyggnad av bro. Blandning 6-7 har ingen tillsats av flygaska och har fungerat som referenser.

Eftersom frostbeständigheten hos betong är beroende av betongens lufthalt har målsättningen varit att ha en lufthalt i den färska betongen på $4,5\pm 0,5$ %. Doseringen av luftporbildande tillsatsmedel har anpassats så att den färska betongen har haft en lufthalt inom detta spann. Mängden luftporbildande tillsatsmedel som krävts har varierat mellan de olika blandningarna, där blandningarna med 20 % flygaska av cementvikten har krävt större tillsatser än referensblandningarna och blandningen med 6 % flygaska av cementvikten, se Tabell 4.

Samtliga betonger har tillsatser av superplasticerande tillsatsmedel, där det speciellt för blandningarna med 20 % flygaska av cementvikten var en förutsättning för att det luftporbildande tillsatsmedlet skulle få avsedd effekt. Försök gjordes med att blanda betonger med flygaska utan tillsats av superplasticerande tillsatsmedel, men i dessa fall krävdes mycket höga doseringar av luftporbildande tillsatsmedel för att uppnå önskade lufthalter (betydligt högre doseringar än vad som rekommenderades av tillverkaren). Detta antas bero på att flygaskan absorberar det luftporbildande tillsatsmedlet, vilket medför att mängden luftporbildande tillsatsmedel som är tillgängligt för att bilda luftporer i betongen.

Samtliga betongerna har härdats 1 dygn i form, avformats och därefter härdats i vattenbad fram tills provning. Provningar har utförts vid olika åldrar på betongen (7, 28, 42, 56 samt 90 dygn) och efter härdning i vattenbad med olika temperaturer (+20°C samt +55°C), för att ta möjliggöra att flygaskans puzzolana reaktioner fortskrider i tillräcklig omfattning före provningen inleds. Syftet med att använda olika härdningsförhållanden har varit att de olika betongerna skulle få samma mognadsgrad som en Portlandcementbetong härdad i +20°C under 28 dygn.

Vattenbad med två temperaturer har använts för härdning, enligt standard (+20°C) samt förhöjd temperatur (+55°C). Syftet med härdning vid förhöjd temperatur var att snabba på härdningen för att uppnå samma mognadsgrad som vid härdning i +20°C vid 56 och 90 dygns ålder. Samtliga provkroppar har lagrats 1 dygn i form och efter avformning i vattenbad (+20°C) fram tills provning (tryckhållfasthet och motstånd mot kloridinträngning). De provkroppar som har lagrats i förhöjd temperatur har härdats i vattenbad med +20°C fram tills 7 dygns ålder och därefter flyttats till vattenbad med +55°C. Tiden provkropparna har lagrats i +55°C har bedömts genom beräkna mognadsgraden (M) enligt följande uttryck (t=härdningstiden och T=härdningstemperaturen):

$$M = \sum t \times (T + 10)$$

$$(56 \text{ d})(20 + 10) = (7 \text{ d})(20 + 10) + t_{x,56}(55 + 10) \Leftrightarrow t_{x,56} = 22.6 \text{ d}$$

$$(90 \text{ d})(20 + 10) = (7 \text{ d})(20 + 10) + t_{x,90}(55 + 10) \Leftrightarrow t_{x,90} = 38.3 \text{ d}$$

Härdningsförhållandena som har tillämpats för provkroppar som har använts för frostprovning har varit något annorlunda jämfört med övriga provkroppar, härdningsförhållanden för dessa provkroppar redovisas i Tabell 5.

Tabell 5. Härdningsförhållanden som har tillämpats för de olika betongblandningarna (provkroppar använda för frostprovning)

Bland.	% FA	k	Härdningsförhållanden	I form	Vatten +20°C	Vatten +55°C	Klimatrum	Vatten	Totalt
1	20	0,4	+55°C, 28 d	1 d	6 d	21 d	7 d	3 d	38 d
2	20	0,4	+55°C, 42 d	1 d	6 d	35 d	7 d	3 d	52 d
3	20	0,4	+20°C, 56 d	1 d	54 d	-	6,5 d	2,5 d	64 d
			+20°C, 90 d	1 d	89 d	-	7 d	3 d	100 d
4	20	0,4	Standard	1 d	19 d	-	7 d	3 d	30 d
5	20	1,0	+20°C, 56 d	1 d	62 d	-	7 d	3 d	73 d
			+20°C, 90 d	1 d	90 d	-	7 d	3 d	101 d
			+55°C, 28 d	1 d	6 d	21 d	7 d	3 d	38 d

6	0	-	Standard	1 d	20 d	-	7 d	3 d	31 d
7	0	-	Standard	1 d	19 d	-	7 d	3 d	30 d
8	6	0,4	Standard	1 d	19 d	-	7 d	3 d	30 d

Standard. +20°C, 28 d

4.2 Genomförda provningar

Ett antal provningar har genomförts för att bestämma egenskaperna hos de olika betongsammansättningarna:

- **Skumindextest.** Bestämning av kompatibilitet mellan flygaska och luftporbildande tillsatsmedel, i princip enligt den metod som finns beskriven i Külaots et al (2003).
- **Färsk betong.** Bestämning av lufthalt och konsistens (sättningsmått) hos den färska betongen, enligt SS-EN 12350-2, SIS (2009a), samt SS-EN 12350-7, SIS (2009b).
- **Tryckhållfasthet.** Bestämning av tryckhållfasthet hos den hårdnade betongen, enligt SS-EN 12390-3, SIS (2011b). Betongerna har provats efter 7, 28, 56 samt 90 dygns ålder efter vattenhärdning i +20°C respektive +55°C. Dessutom har betongerna med flygaska haft olika effektivitetsfaktorer, k (=0,4 respektive 1,0).
- **Motstånd mot kloridinträngning,** bestämd som kloridmigrationskoefficienten, D_{RCM} . D_{RCM} bestäms med NT Build 492 på betonger med 28 och 56 dygns ålder efter vattenhärdning i +20°C respektive +55°C. Dessutom har betongerna med flygaska haft olika effektivitetsfaktorer, k (=0,4 respektive 1,0).
- **Frostbeständighet.** Bestämning genom provning enligt SS 13 72 44, procedur IA (dvs. kubsågad yta med 3,0-procentig NaCl-lösning), på betonger med 28, 56 och 90 dygns ålder efter vattenhärdning i +20°C respektive +55°C. Avflagningen har bestämts i intervall om 7 fryscyklar fram tills 112 fryscyklar då provningen har avslutats.
- **Analys av luftporsystemet.** Bestämning av utseende hos luftporsystemet i den hårdnade betongen genom analys av planslip enligt SS-EN 480-11, SIS (2005d).

4.3 Resultat från provningar

4.3.1 Skumindextest

I skumindextestet undersöks kompatibiliteten mellan en viss flygaska och ett visst luftporbildande tillsatsmedel, i princip enligt den metod som finns beskriven i Külaots et al (2003). I det aktuella projektet har 2 g flygaska, 8 g cement och 25 ml avjoniserat vatten blandats i en cylindrisk behållare. Luftporbildande tillsatsmedel droppas i lösningen, behållaren skakas om och skummet som bildas studeras. Proceduren upprepas tills ett stabilt skum bildas i behållaren. Mängden luftporbildande tillsatsmedel som har satts till lösningen är skumindexet (ml luftporbildande tillsatsmedel per 2 g flygaska). Resultaten från genomförda undersökningar redovisas i Tabell 6.

Tabell 6. Resultat från undersökningar av kompatibiliteten mellan använd flygaska och använt luftporbildande tillsatsmedel med skumindextestet.

Lösning	Skumindex [ml/2 g flygaska]
Med flygaska	0,05

Utan flygaska (referens)	0,04
--------------------------	------

Från resultaten som redovisas i Tabell 6 framgår att mängden luftporbildande tillsatsmedel som måste droppas i lösningen är nästan samma för lösningarna med och utan flygaska. Enligt dessa resultat behöver doseringen av luftporbildande tillsatsmedel ökas med ca 20 % i blandningar med flygaska. Dock har högre doseringar av luftporbildande tillsatsmedel krävts i blandningar med flygaska för att uppnå önskade lufthalter, se Tabell 4 och Tabell 8.

4.3.2 Egenskaper hos den färska betongen

Egenskaperna hos den färska betongen har bestämts som sättmått, enligt SS-EN 12350-7, samt lufthalt, enligt SS-EN 12350-2. För att uppnå önskad lufthalt ($4,5 \% \pm 0,5 \%$) visade det sig inte räcka med att enbart sätta till luftporbildande tillsatsmedel (AEA) utan det krävdes också att superplasticerande tillsatsmedel (VR) blandades i betongen. Försök gjordes med att blanda betonger med tillsatser av enbart AEA, men för att uppnå önskade lufthalter krävdes höga doseringar (betydligt högre än tillverkarens rekommendationer). Däremot om VR också sattes till betongen krävdes mer rimliga doseringar av AEA (inom tillverkarens rekommendationer) för att uppnå önskade lufthalter. En förklaring till dessa resultat kan vara att VR-partiklar liksom AEA-partiklar absorberas på oförbränt kol på flygaskan. Det antas att partiklar med oförbränt kol delvis blockeras av VR-partiklar och att detta bidrar till att det därför finns flera fria AEA-partiklar som kan bilda ett stabilt luftporsystem. Resultaten från genomförda undersökningar redovisas i Tabell 7.

Tabell 7. Resultat från bestämning av lufthalt i färsk betong och sättmått enligt SS-EN 12350-2 respektive SS-EN 12350-7.

Blandning	Lufthalt [%]	Sättmått [mm]	Sättmåttsklass
1 (20 % FA)	4,5	ej uppmätt	bedömt S2
2 (20 % FA)	4,8	85	S2
3 (20 % FA)	4,8	110	S3
4 (20 % FA)	4,6	120	S3
5 (20 % FA)	4,2	160	S4
6 (0 % FA)	4,6	30	S1
7 (0 % FA)	4,8	110	S3
8 (6 % FA)	4,3	65	S2

Av resultaten i Tabell 7 framgår att samtliga betonger fick önskade lufthalter. Dock har mängden AEA, som krävts för att uppnå önskade lufthalter, varierat mellan de olika blandningarna. I Tabell 8 redovisas doseringarna av AEA i de olika betongblandningarna, uttryckta i relation till mängden cement samt mängd cement och flygaska med och utan effektivitetsfaktor ($k=0,4$). I samtliga betonger har också superplasticerande tillsatsmedel satts till, se Tabell 4.

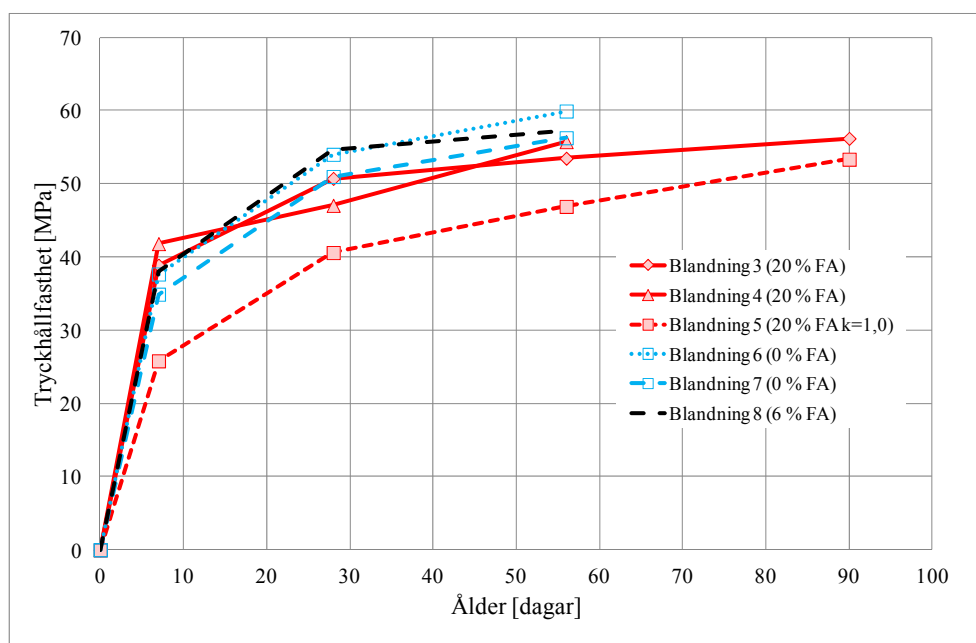
Tabell 8. Doseringar av AEA i de olika betongblandningarna, uttryckta i relation till mängden cement samt mängde cement och flygaska med och utan effektivitetsfaktor, för att uppnå önskad lufthalt. Utryckt i vikt-% av CEM I (C), vikt cement och flygaska utan och med effektivitetsfaktor (C+FA) respektive (C+0,4FA).

Blandning	1-4	5	6	7	8
AEA/C	0,40	0,40	0,10	0,10	0,10
AEA/(C+FA)	0,33	0,33	0,10	0,10	0,09
AEA/(C+0,4FA)	0,37	0,37	0,10	0,10	0,10

I Tabell 8 framgår att mängden AEA som krävs för att uppnå önskade lufthalter är fyra gånger så hög för blandning 1-4 (20 vikt-% flygaska av CEM I) jämfört med blandning 5-8 (0-6 vikt-% flygaska av cement). Detta innebär att VR-partiklarna inte blockerar all oförbränd kol på flygaska utan att det fortfarande sker en relativt stor absorption av AEA. Dock är doseringen av AEA inom den dosering som rekommenderas av tillverkaren (0,3-0,5 % av cementvikten). Skumindextestet visade dock andra resultat, jfr Tabell 6, där doseringen av AEA fick ökas ca 25 % vid tillsats av flygaska. Vad orsaken är till skillnaden mellan resultaten från skumindextestet och verkliga doseringar av luftporbildande tillsatsmedel är inte känd.

4.3.3 Tryckhållfasthet

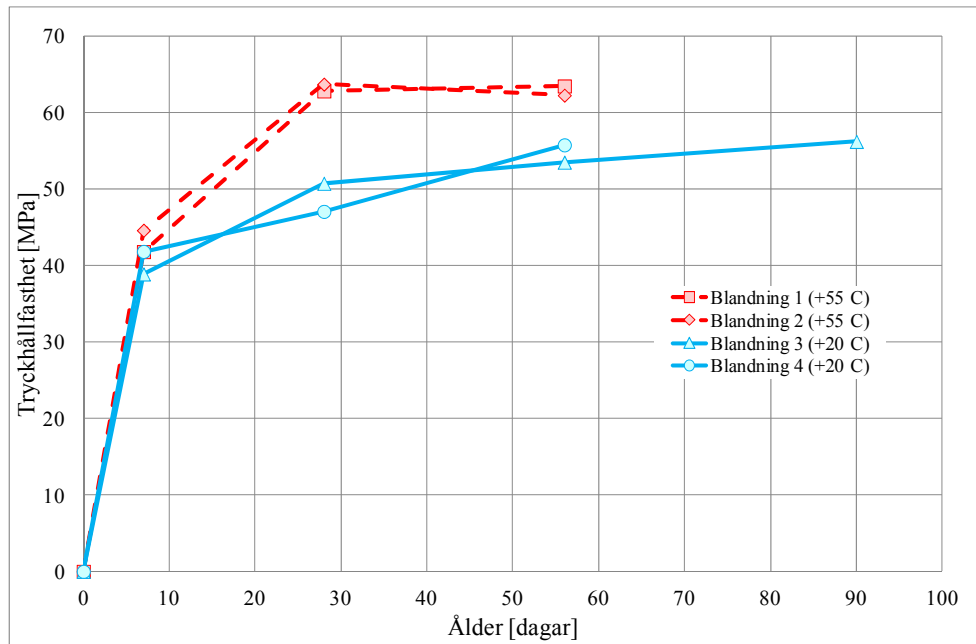
Resultaten från bestämning av tryckhållfasthet för blandning 3-8 (betonger med 0-20 vikt-% flygaska av CEM I, $k=0,4$ och $k=1,0$, lagrade i $+20^{\circ}\text{C}$) redovisas i Figur 22. Provningar har utförts efter 7, 28, 56 och 90 dygn härdning i vattenbad enligt SS-EN 12390-3.



Figur 22. Tryckhållfasthet bestämd för blandning 3-8 (betonger med 0-20 vikt-% flygaska av CEM I, $k=0,4$ och $k=1,0$, härdade vid $+20^{\circ}\text{C}$). Provningar utförda efter 7, 28, 56 och 90 dygn härdning i vattenbad enligt SS-EN 12390-3.

I Figur 22 framgår att blandning 3 och 4 (20 vikt-% flygaska av CEM I, $k=0,4$) hade något högre hållfasthet än blandning 6-8 efter 7 dygn, trots att blandning 3 och 4 borde ha något lägre hållfasthet efter 7 dygn. En förklaring kan vara att härdningstemperaturen var förhöjd under ca 24 timmar under den första veckan (ca $+75^{\circ}\text{C}$ istället för $+20^{\circ}\text{C}$) för blandning 3 och 4 medan övriga blandningar har härdats enligt standard. Det går också att observera att blandning 5 (20 vikt-% flygaska av cement, $k=1,0$), har lägre hållfasthet än övriga blandningar, vilket kan förklaras av den höga effektivitetsfaktorn.

Betongerna har lagrats vid två olika temperaturer, $+20^{\circ}\text{C}$ samt $+55^{\circ}\text{C}$ (där syftet med den högre temperaturen var att snabba på härdningen för att uppnå samma mognadsgrad som vid härdning i $+20^{\circ}\text{C}$). Provningar har utförts efter 7, 28, 56 och 90 dygn härdning i vattenbad ($+20^{\circ}\text{C}$) enligt SS-EN 12390-3. Resultaten från provningarna redovisas i Figur 23.



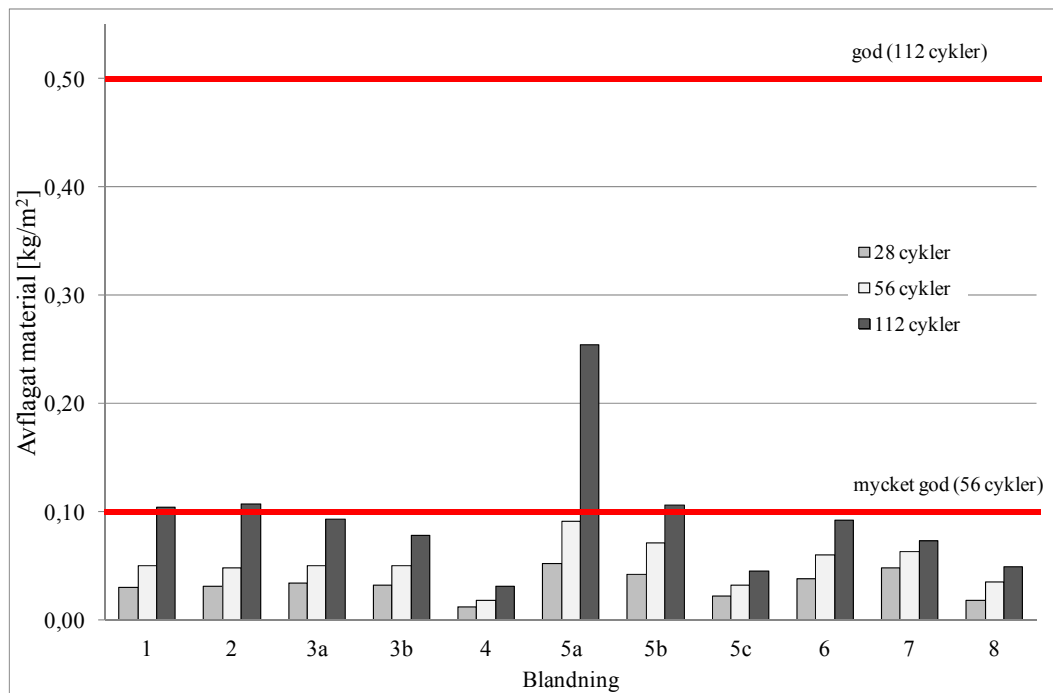
Figur 23. Tryckhållfasthet bestämd för blandning 1-4 (betonger med 20 vikt-% flygaska av CEM I, $k=0,4$, härdade vid $+20^{\circ}\text{C}$ och $+55^{\circ}\text{C}$). Provningar utförda vid 7, 28, 56 och 90 dygns ålder efter härdning i vattenbad enligt SS-EN 12390-3.

Resultaten i Figur 23 visar att härdning vid förhöjd temperatur har en positiv inverkan på hållfasthetsutvecklingen. Efter 28 dygns härdning är tryckhållfastheten ca 10 MPa högre för provkroppar lagrade i $+55^{\circ}\text{C}$ jämfört med de som har lagrats i $+20^{\circ}\text{C}$. Dessa resultat är förväntade eftersom betongerna som har lagrats i $+55^{\circ}\text{C}$ har högre mognadsgrad än de som har lagrats i $+20^{\circ}\text{C}$ och således får en tätare och starkare struktur och en högre tryckhållfasthet.

4.3.4 Frostbeständighet

Frostbeständigheten har bestämts enligt SS 13 72 44, procedur IA (dvs. kubsågad yta med 3,0-procentig NaCl-lösning). Resultaten för samtliga undersökta betonger redovisas i Figur 24 (avflagnings uppmätt efter 28, 56 samt 112 fryscykler). Beteckningarna på respektive betong är följande (antal dygn härdning före provning, härdningstemperatur, mängd flygaska samt effektivitetsfaktor):

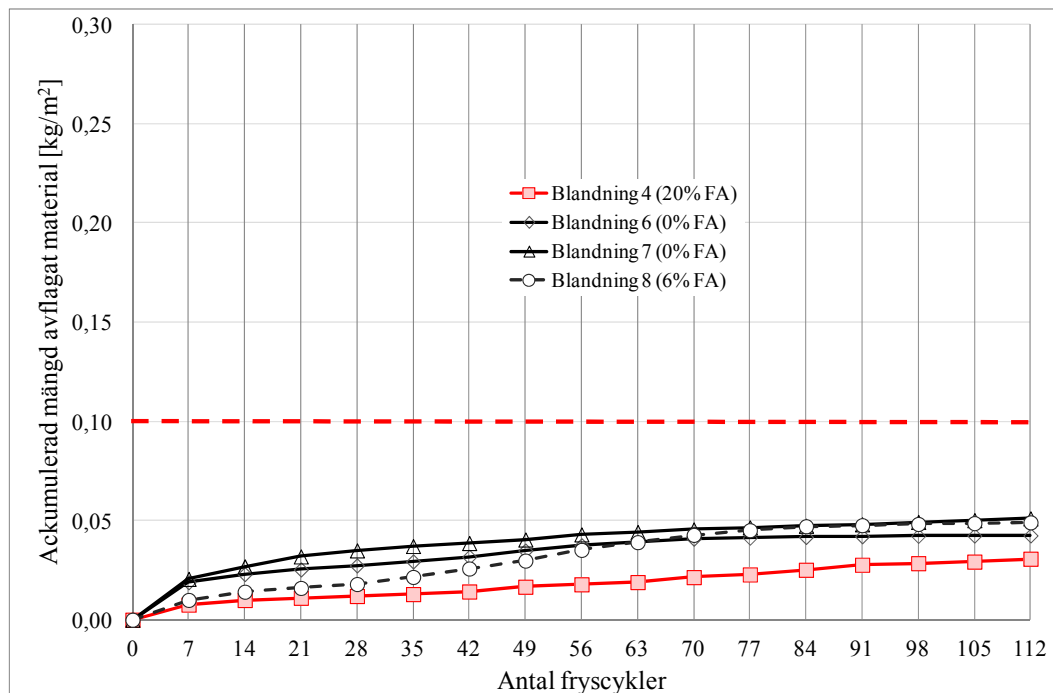
1. 38 dygn, $+55^{\circ}\text{C}$, 20 vikt-% av cement ($k=0,4$).
2. 52 dygn, $+55^{\circ}\text{C}$, 20 vikt-% av cement ($k=0,4$).
- 3a. 64 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$, 20 vikt-% av cement ($k=0,4$).
- 3b. 100 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$, 20 vikt-% av cement ($k=0,4$).
4. 30 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$, 20 vikt-% av cement ($k=0,4$).
- 5a. 73 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$, 20 vikt-% av cement ($k=1,0$).
- 5b. 101 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$, 20 vikt-% av cement ($k=1,0$).
- 5c. 38 dygn, $+55^{\circ}\text{C}$, 20 vikt-% av cement ($k=1,0$).
6. 31 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$, 0 %.
7. 30 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$, 0 %.
8. 30 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$, 6 vikt-% av cement ($k=0,4$).



Figur 24. Frostbeständighet för samtliga undersökta betonger. Avflagningsmaterial uppmätt efter 28, 56 samt 112 fryscyklar efter provning enligt SS 13 72 44, procedur 1A.

För samtliga undersökta betongblandningar var avflagningsmaterialen efter 56 fryscyklar lägre än 0,1 kg/m², vilket betyder att frostbeständigheten är mycket god enligt SS 13 72 44. Dessa resultat visar att god frostbeständighet går att uppnå även hos betonger under förutsättning att ett bra luftporsystem skapas i betongerna.

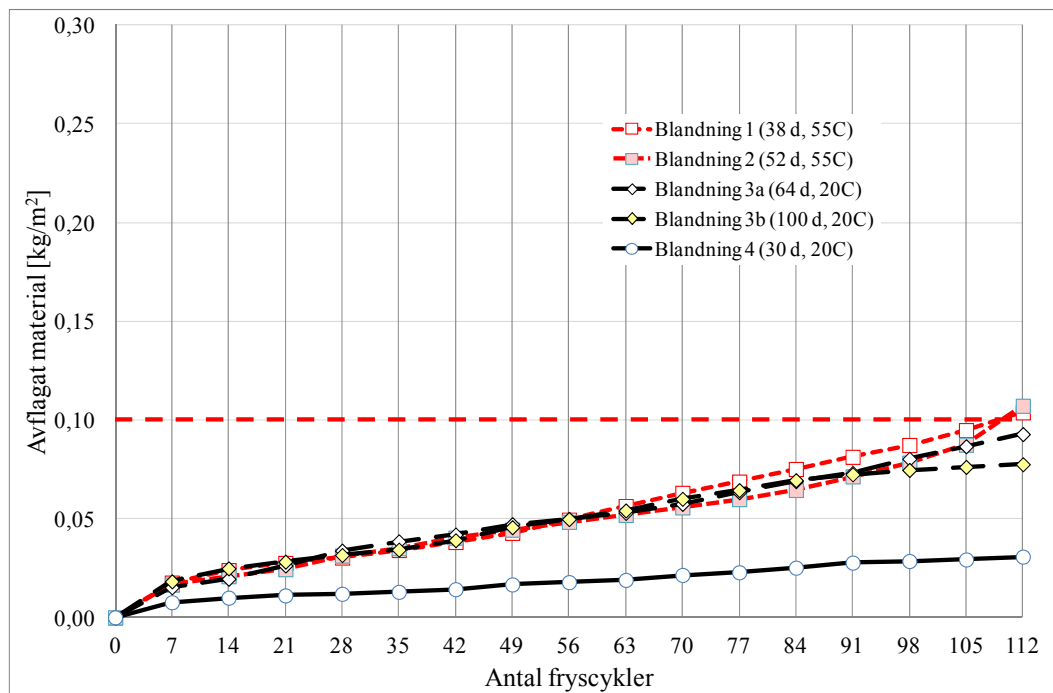
För att illustrera frostbeständigheten hos betonger med olika tillsatser av flygaska och lagrade vid olika förhållanden redovisas förloppen hos uppmätta ackumulerade avflagningsmaterial i Figur 25-Figur 27. I Figur 25 redovisas avflagningsmaterial som har mätts upp för provkroppar med 0-20 vikt-% flygaska av CEM I. Provning av samtliga provkroppar har startats vid 30-31 dygns ålder. Medelvärden från provning av tre respektive provkroppar redovisas i figuren. En provkropp från vardera blandning 6 och 7 (0 % flygaska) fick större avflagningsmaterial än övriga tre provkroppar från respektive blandning, på grund av att ballastkorn frös sönder. Resultaten från dessa provkroppar har utlämnats i Figur 25.



Figur 25. Frostbeständighet för betonger med 0-20 vikt-% flygaska av CEM I. Provning inledd vid 30-31 dygns ålder. Provning enligt SS 13 72 44, procedur 1A.

Från resultaten som presenteras i Figur 25 framgår att samtliga blandningar har mycket god frostbeständighet enligt SS 13 72 44 (ackumulerad avflagnings efter 56 fryscyklar är mindre än 0,10 kg/m²). Även om resultaten från de provkroppar där ballastkorn frös sönder, dvs. med 0 % flygaska, tas med blir frostbeständigheten mycket god för dessa betonger.

Effekten av olika härdningsförhållanden (förhöjd temperatur och/eller förlängd härdningstid) på frostbeständigheten hos betonger med 20 % flygaska av cementvikten redovisas i Figur 26.



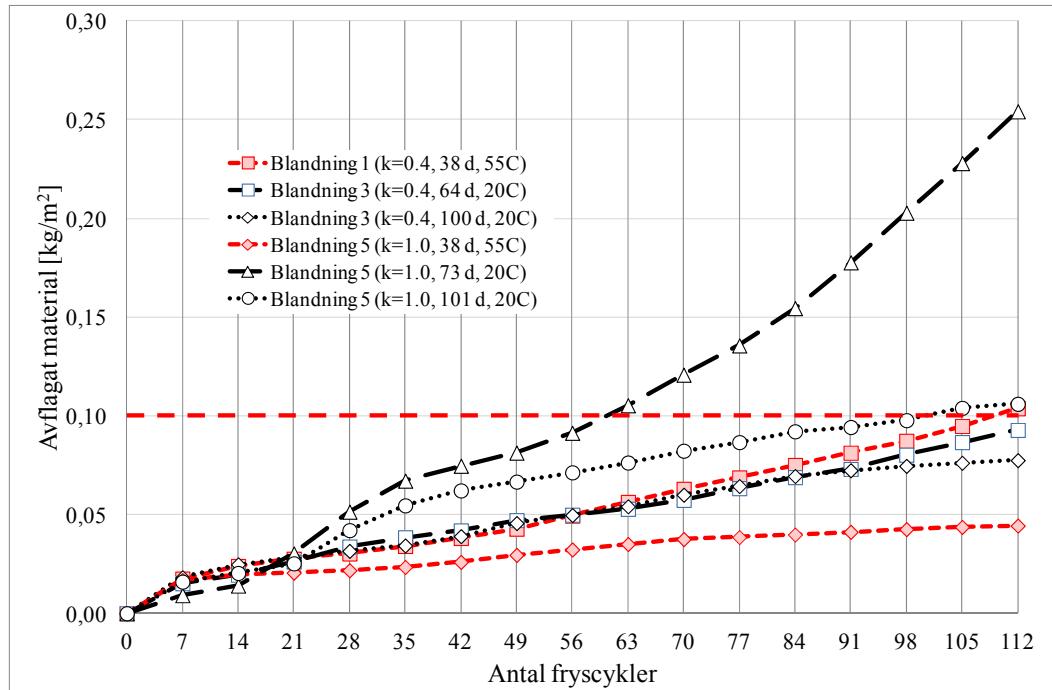
Figur 26. Frostbeständighet för blandningar med 20 vikt-% flygaska av CEM I med olika härdningsförhållanden ($k=0,4$). Resultaten från följande blandningar presenteras (härdningstid och -temperatur): 1 (38 dygn, $+55^{\circ}\text{C}$), 2 (52 dygn, $+55^{\circ}\text{C}$), 3a (64 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$), 3b (100 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$) samt 4 (30 dygn, $+20^{\circ}\text{C}$). Provning enligt SS 13 72 44, procedur 1A. Åldern på respektive betong vid inledning av provning samt härdningstemperatur anges.

I Figur 26 framgår att avflagningen ökar något för betongblandningar där härdningstiden förlängs eller härdningstemperaturen höjs, jämfört med betongblandningar som har härdats i ca 28 dygn och vid $+20^{\circ}\text{C}$. Samtliga undersökta betonger har dock en mycket god frostbeständighet enligt SS 13 72 44 (ackumulerad avflagning efter 56 fryscyklar är mindre än $0,10 \text{ kg/m}^2$). Dessa resultat kan delvis förklaras med att härdning vid förhöjd temperatur kan ge upphov till mikrosprickor i betongen, som i sin tur kan medföra försämrade frostbeständighet. Den något försämrade frostbeständigheten vid förlängd härdningstid kan dock inte förklaras med denna hypotes. En annan förklaring är att förlängd härdningstid eller förhöjd härdningstemperatur medför att betongen får högre mognadsgrad, vilket i sin tur ger en tätare struktur. Dock påverkas varken storlek på eller avståndet mellan de luftporer som har skapats av det luftporbildande tillsatsmedlet. Däremot påverkas finheten på de kapillärporer som förbinder luftporerna, där porsystemet blir finare, vilket leder till att högre hydrauliska tryck bildas i samband med vätsketransport vid frysning vilket i sin tur medför att större spänningar som vill spränga sönder porstrukturen byggs upp. En förlängd härdningstid i vatten kan också innebära att betongen har en högre vattenmättnadsgrad när frysprovningen inleds, vilket kan medföra ökad risk för sönderfrysning.

Betonger med olika effektivitetsfaktorer för flygaskan ($k=0,4$ respektive $k=1,0$) har undersökts. Effekten av en högre effektivitetsfaktor blir att den totala mängden bindemedel blir mindre, vilket i sin tur ger en mindre tät porstruktur. Detta medför å ena sidan att de hydrauliska trycken som uppstår blir lägre, vilket ger en förbättrad beständighet, men å andra sidan att mängden frysbart vatten ökar samt att betongens hållfasthet blir lägre, vilket ger en för-

sämrad beständighet. Således är den förväntade effekten av högre effektivitetsfaktor något oklar.

I Figur 27 redovisas frostbeständigheten för betonger med olika effektivitetsfaktorer härdade under olika förhållanden. Det bör noteras att provningarna har gjorts på 2-4 provkroppar per serie, vilket medför att resultaten kan ha relativt stora osäkerheter.



Figur 27. Frostbeständighet för blandningar med 20 vikt-% flygaska av CEM I med olika härdningsförhållanden och effektivitetsfaktorer. Resultaten från följande blandningar presenteras: 1 ($k=0,4$), 3 ($k=0,4$) samt 5 ($k=1,0$). Provning enligt SS 13 72 44, procedur 1A. Åldern på respektive betong vid inledning av provning samt härdningstemperatur anges.

Bäst och sämst frostbeständighet i Figur 27 har provkroppar från blandning 5 (lagrade 38 dygn i $+55^{\circ}\text{C}$) respektive blandning 5 (lagrade 73 dygn i $+20^{\circ}\text{C}$). Dock bör det noteras att samtliga provkroppar har en mycket god frostbeständighet enligt SS 13 72 44 (avflagnings efter 56 fryscyklar är mindre än $0,10 \text{ kg/m}^2$). Resterande provkroppar från blandning 5 (lagrade 101 dygn i $+20^{\circ}\text{C}$) samt provkroppar från blandning 1 och 3 ($k=0,4$) har avflagnings som är lägre än $0,11 \text{ kg/m}^2$ efter 112 fryscyklar.

Resultaten i Figur 27 kan förklaras med resonemanget ovan där inverkan av total bindemedelshalt samt täthet hos porstrukturen diskuteras. Det finns troligen optimala härdningsförhållanden (temperatur och tid) där förhållandet mellan täthet hos porstrukturen, mängden frysbart vatten samt hållfastheten blir sådana att en extra god frostbeständighet uppnås. I Figur 27 är det blandning 5 (härdning i 38 dygn i $+55^{\circ}\text{C}$) som är närmast dessa optimala förhållanden.

4.3.5 Analys av luftporsystem

För att ytterligare förklara resultaten från provningar av frostbeständighet har strukturen hos luftporsystemen i den hårdnade betongen undersökts hos fyra olika blandningar. Undersökningarna har gjorts enligt den procedur som finns beskriven i SS-EN 480-11 och har gett

information om luftinnehåll, specifik yta hos luftporer samt avståndsfaktor. Resultaten från genomförda undersökningar redovisas i Tabell 9.

Tabell 9. Resultat från undersökning av luftporstrukturen hos den hårdnade betongen enligt SS-EN 480-11.

		Blandning			
	Mätosäkerhet	3 ^c	4 ^d	5 ^e	7 ^f
Lufthalt [volym-%]	±0,7	5,1	4,0	2,9	5,9
Specifik yta hos luftporer ^a [mm ⁻¹]	±3	27	32	30	21
Avståndsfaktor ^b [mm]	±0,015	0,19	0,18	0,22	0,22
Antaget pastainnehåll [volym-%]	-	31,6	31,6	31,6	31,6

^{a)} (omslutningsyta hos luftporer)/(volym hos luftporer).

^{b)} avstånd mellan luftporer.

^{c)} 20 % flygaska, $k=0,4$, härdad 64 dygn i +20°C.

^{d)} 20 % flygaska, $k=0,4$, härdad 30 dygn i +20°C.

^{e)} 20 % flygaska, $k=1,0$, härdad 73 dygn i +20°C.

^{f)} 0 % flygaska, härdad 30 dygn i +20°C.

Resultaten som presenteras i Tabell 9 visar att samtliga undersökta provkroppar har ett acceptabelt luftporsystem^{IX}. Dock är lufthalten i provkroppen från blandning 5 något låg, men avståndsfaktorn är acceptabel (<0,23 mm).

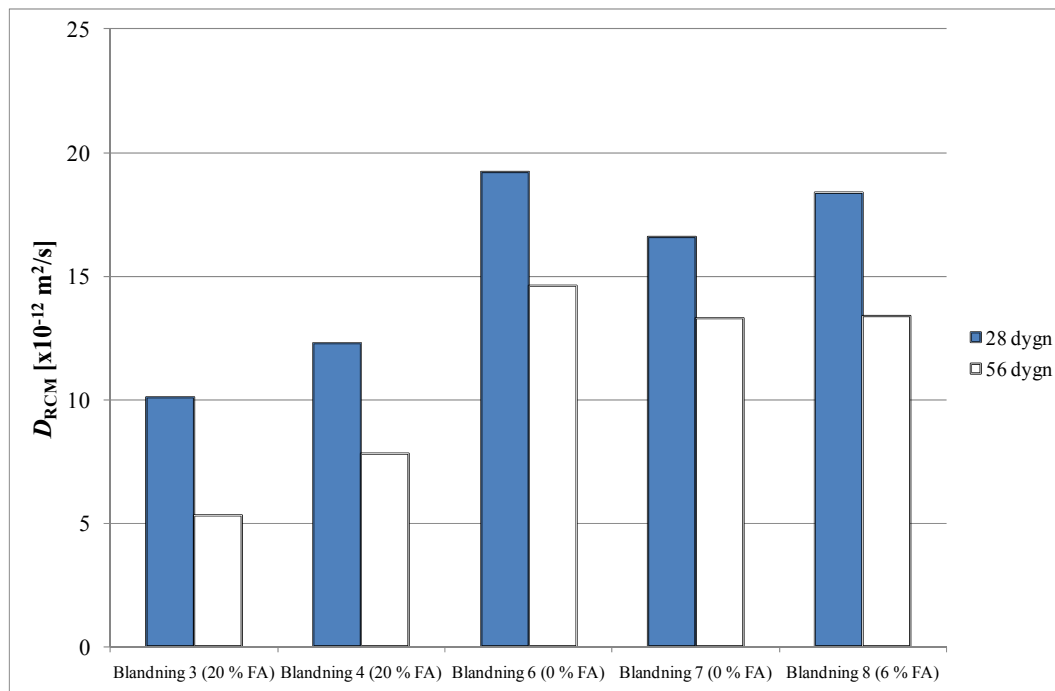
Avståndsfaktorerna för blandning 3 och 4 är likvärdig, se Tabell 9. Medan frostbeständigheten är något sämre för blandning 3 jämfört med blandning 4, se Figur 26. Dessa resultat styrker hypotesen om att högre mognadsgrad hos betongen ger ett tätare porsystem, vilket i sin tur medför att högra hydrauliska tryck kan bildas och att frostbeständigheten blir försämrade.

Lufthalten som har mätts upp i provkroppen från blandning 5 är lägre än den lufthalt som mättes upp i den färskas betongen (4,2 %), se Tabell 7. Detta kan förklaras med att blandning 5 hade relativt högt sättmått (160 mm), vilket medför att delar av den inblandade luften kan försvinna i samband med gjutning och i början av härdningen. Dessutom kan den relativt låga lufthalten medföra att provkroppar från blandning 5 har blivit mer känsliga för härdningsförhållanden, vilket kan delvis förklara den något låga frostbeständigheten som rapporteras i Figur 24.

4.3.6 Motstånd mot kloridinträngning

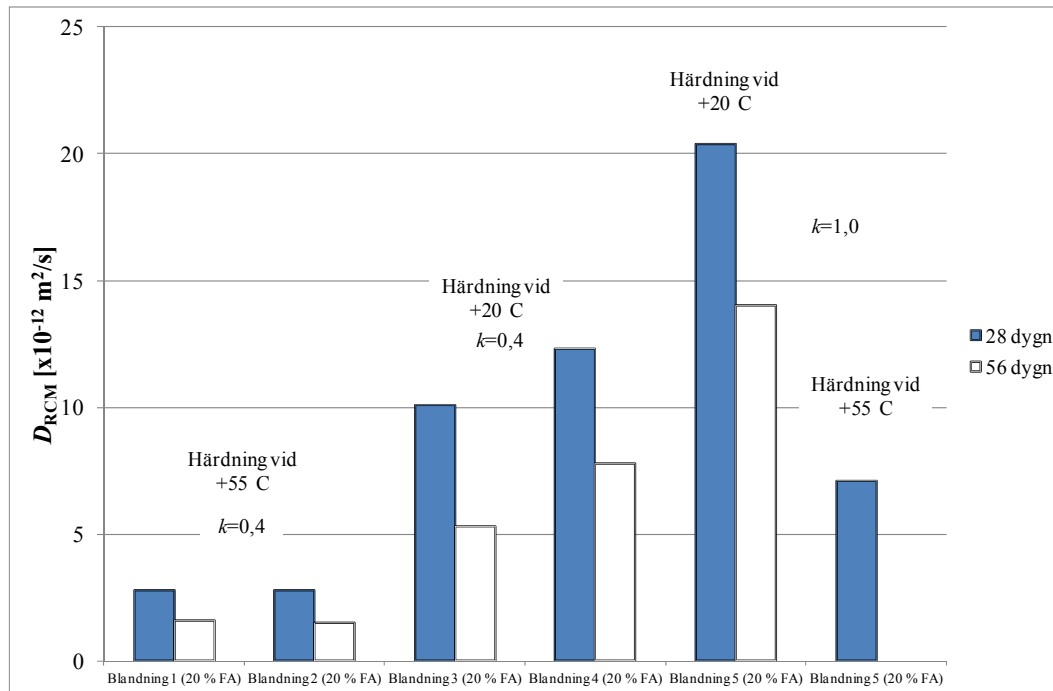
Motståndet mot kloridinträngning hos betongen har mätts upp som en kloridmigrationskoefficient, D_{RCM} , enligt den procedur som finns beskriven i NT Build 492. Resultaten från genomförda provningarna redovisas i Figur 28 (härdning i +20°C under 28 respektive 56 dygn) - Figur 29 (effekt av härdning i +55°C samt $k=1,0$).

^{IX} Gränsvärden för ett acceptabelt utseende på luftporsystemet hos en betong finns beskrivet i olika tekniska standarder eller anges av beställare i betongspecifikationer. Ett exempel är den kanadensiska standarden för betongkonstruktioner, A23.1-04, där det anges att ett luftporsystem i hårdnad betong ($v_{ct}>0,36$) anses tillfredsställande om medelvärdet på avståndsfaktorn inte överstiger 0,23 mm (och inget enskilt värde överstiger 0,26 mm) samt att lufthalten är minst 3,0 %.



Figur 28. Kloridmigrationskoefficienten, D_{RCM} , uppmätt för betonger med 0-20 vikt-% flygaska av CEM I, enligt NT Build 492. Mätningar utförda efter härdning i 28 dygn och 56 dygn i $+20^\circ\text{C}$.

I Figur 28 framgår att inblandning av flygaska ökar betongens motstånd mot kloridinträngning, åtminstone för en tillsats av upp till 20 vikt-% flygaska av CEM I. Vid inblandning av 6 vikt-% flygaska av CEM I fås endast en marginell effekt av flygaskan. Vidare ger en förlängd härdningstid en minskning av D_{RCM} , där minskningen är tydligare för blandning 3 och 4 (20 vikt-% flygaska av CEM I) jämfört med blandning 6 och 7 (med ingen flygaska). Dessa resultat överensstämmer med vad som rapporteras i litteraturen, där tillsatser på upp till 50 vikt-% flygaska av cementmängden har visat sig öka motståndet mot kloridinträngning, se vidare i kapitel 2.3.5.



Figur 29. Kloridmigrationskoefficienten, D_{RCM} , uppmätt för blandning 1 och 2 (20 vikt-% flygaska av CEM I, härdning i +55°C, $k=0,4$) samt blandning 3 och 4 (20 vikt-% flygaska av CEM I, härdning i +20°C, $k=0,4$) samt blandning 5 (20 vikt-% flygaska av CEM I, härdning i +20°C och +55°C, $k=0,4$ och $1,0$), enligt NT Build 492. Mätningar utförda efter härdning i 28 dygn och 56 dygn.

Från resultaten i Figur 29 framgår att härdning vid förhöjd temperatur (+55°C) har positiv inverkan på motståndet mot kloridinträngning, där D_{RCM} blir betydligt lägre jämfört vid härdning i +20°C. Dessa resultat är förväntade eftersom betongerna som har härdats i +55°C har högre mognadsgrad än de som har härdats i +20°C och således får en tätare struktur och ett större motstånd mot kloridinträngning.

Resultaten i Figur 29 visar också att effektivitetsfaktorn har stor inverkan på motståndet mot kloridinträngning, där betonger med $k=1,0$ får betydligt lägre motstånd mot kloridinträngning än betonger med $k=0,4$. Om resultaten som presenteras i Figur 28 och Figur 29 jämförs går det att observera att D_{RCM} för betonger utan flygaska blir samma för betonger med flygaska där $k=1,0$.

Den positiva effekten av flygaska på motstånd mot kloridinträngning är tudelad, där flygaskan dels bidrar till att mängden finmaterial i betongen ökar samt dels flygaskans puzzolana reaktioner. En stor mängd finmaterial bidrar till att betongens struktur blir tätare, vilket speciellt är fallet när $k < 1,0$ då cement ersätts med en större mängd flygaska. Flygaskans puzzolana reaktioner bidrar till att kalciumhydroxid omvandlas till CSH, som är samma reaktionsprodukt som bildas när Portlandcement hydratiserar.

4.4 Avslutande kommentarer från undersökning av Knutsson (2010)

Följande slutsatser har dragits från den genomförda studien som presenteras i Knutsson (2010):

- **Allmänt.** Genomförda undersökningar visar att betonger med tillsatser av flygaska på upp till 20 vikt-% av CEM I, $k=0,4$, får minst likvärdiga egenskaper jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger. Om $k=1,0$ fås dock något sämre egenskaper jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger. Härdning under längre tid eller vid förhöjd temperatur har en varierande effekt på egenskaperna hos en betong med flygaska.
- **Frostbeständighet hos betonger med flygaska.** Beständigheten med avseende på saltfrostavflagnings för betonger med eller utan tillsatser av flygaska är mycket god (åtminstone för tillsatser upp till 20 vikt-% flygaska av CEM I, $k=0,4$). Detta förutsätter dock att ett bra luftporsystem har skapats i betongen, oavsett om flygaska har satts till betongen eller inte. Samtliga undersökta betongblandningar har haft tillsatser av luftporbildande tillsatsmedel så att luftporsystemen har fått acceptabla utseenden (med avseende på lufthalter och avståndsfaktorer).
 - **Tillsats av luftporbildande tillsatsmedel i betong med flygaska.** För att få acceptabla lufthalter i betonger med flygaska med doseringar av luftporbildande tillsatsmedel enligt tillverkarens rekommendationer, krävdes också att superplasticerande tillsatsmedel sätts till betongen vid blandning. Försök gjordes att enbart sätta till luftporbildande tillsatsmedel till betonger med flygaska, men då krävdes doseringar som var betydligt högre än vad tillverkaren rekommenderar.
 - **Inverkan av förlängd härdningstid på frostbeständigheten.** Härdning under längre tid (42, 56 eller 90 dygn) och vid förhöjd temperatur ($+55^{\circ}\text{C}$) resulterade i en något försämrade frostbeständighet för betonger med 20 vikt-% flygaska av CEM I och $k=0,4$ jämfört med härdning under 28 dygn i $+20^{\circ}\text{C}$. Detta förklaras med att betongernas struktur blev tätare vilket medför att de hydrauliska tryck som uppstår i betongen ökade med ökad risk för sönderfrysning som följd.
 - **Inverkan av effektivitetsfaktor på frostbeständigheten.** Betonger med tillsats av flygaska där $k=1,0$ fick sämre beständighet med avseende på saltfrostavflagnings om förlängda härdningstider (56 och 90 dygn) tillämpades jämfört med Portlandcementbetong och betong med flygaska ($k=0,4$). Om härdningen skedde vid förhöjd temperatur ($+55^{\circ}\text{C}$) blev dock beständigheten med avseende på saltfrostavflagnings bättre jämfört med Portlandcementbetong och betong med flygaska ($k=0,4$) härdade under 28 dygn i $+20^{\circ}\text{C}$.
- **Motstånd mot kloridinträngning.** Beständigheten med avseende på kloridinträngning är bättre för betonger med tillsatser av flygaska (för tillsatser upp till 20 vikt-% flygaska av CEM I), jämfört med motsvarande Portlandcementbetonger. Härdning under längre tid eller vid förhöjd temperatur medförde att motståndet mot kloridinträngning ökade ytterligare för betong med flygaska ($k=0,4$). För betonger med flygaska ($k=1,0$) blev motståndet mot kloridinträngning ungefär samma som för motsvarande Portlandcementbetong.
- **Beständighet hos betonger med måttliga tillsatser av flygaska** (6 vikt-% av CEM I). Det finns inte någon nämnvärd skillnad i beständighet med avseende på kloridinträngning och saltfrostavflagnings observerade mellan betonger med en tillsats av 6

vikt-% flygaska av CEM I respektive Portlandcementbetonger. Således har en inblandning av 6 vikt-% av CEM I igen märkbar effekt jämfört med motsvarande Portlandcementbetong.

5 Laboratorieundersökningar genomförda i SBUF-projekt 12382

Huvuddelen av SBUF-projekt 12382 har varit att undersöka egenskaper hos betonger blandade med olika mängder flygaska genom laboratorieundersökningar. Fokus vid dessa undersökningar har varit på att undersöka frostbeständigheten hos betongerna. I följande kapitel görs en genomgång av vilka betongsammansättningar som har provats, vilka provningar som har genomförts samt resultaten från provningarna. Resultaten .

5.1 Betongsammansättningar

Betongsammansättningarna har utformats så att de uppfyller kraven i exponeringsklass XF 4 i SS 13 70 03, dvs. frostangrepp med avisningsmedel när betongen har hög vattenmättnad. Enligt SS 13 70 03 är då maximal $vct_{ekv}=0,45$ samt maximal tillsats av flygaska 25 vikt-% av CEM I. En blandning har också utformats så att den uppfyller kraven i exponeringsklass XD 3 i SS 13 70 03, dvs. korrosion orsakad av klorider från annat än havsvatten när betongen är cykliskt våt och torr. Enligt SS 13 70 03 är då maximal $vct_{ekv}=0,40$ samt maximal tillsats av flygaska 25 vikt-% av CEM I. Dessutom har betonger med $vct_{ekv}=0,45$ och tillsatser av flygaska på 6 %, 11 %, 18 % samt 33 % av cementvikten samt betonger med $vct_{ekv}=0,50$ och tillsatser av flygaska på 0 %, 11 % samt 25 % av cementvikten inkluderats i undersökningen. Eftersom samtliga betongblandning skall vara beständiga med avseende på saltfrostangrepp har luftporbildande tillsatsmedel blandats i. Målsättningen har varit att lufthalten i den färska betongen skulle vara 5,5 % $\pm 0,5$ %.

Samtliga betongblandningar har haft tillsatser av superplasticerande och luftporbildande tillsatsmedel. Tio kuber (150x150x150 mm³) och fyra cylindrar (200x100 mm) har tillverkats från varje blandning. Kuberna har använts för att bestämma tryckhållfastheten samt frostbeständigheten medan cylindrarna har använts för att bestämma motståndet mot kloridinträngning hos de betongerna. Betongens egenskaper har provats vid 7 dygns, 28 dygns samt 56 dygns ålder.

Betongerna har varit sammansatta enligt följande:

- **Cement.** I tolv blandningar har Cementa Degerhamn Anläggningscement (CEM I 42,5 N MH/SR/LA) använts. I tre av blandningarna har också Cementa Byggcement Skövde (CEM II/A-LL 42,5 R) använts.
- **Flygaska.** Flygaskan som har använts har varit Warnow Füller från Rostock som med god marginal uppfyller de krav som finns i SS-EN 450-1, se vidare i

- **Tabell 1.**
- **Fin ballast.** Två typer av fin ballast har använts, Sjösand (0-4 mm) samt Holsand (0-8 mm).
- **Grov ballast.** Två typer av grov ballast har använts, Tagene (5-8 mm) samt Tagene (8-16).
- **Tillsatsmedel.** Samtliga betonger har blandats med superplasticerande tillsatsmedel, VR, (SIKA Sikament 56/50) och luftporbildande tillsatsmedel, AEA, (SIKA SikaAer-S 1:10).

Totalt har 15 olika betongblandningar undersökts i projektet, betecknade blandning 1-15. Sammansättningen av samtliga blandningar redovisas i Tabell 10 (blandning 1-5), Tabell 11 (blandning 6-10) samt Tabell 12 (blandning 11-15). Skillnaderna mellan blandningarna är mängden flygaska som satts till (0-33 vikt-% av cementmängden) samt vilket cement som har använts (Cementa Anläggningscement, CEM I 42,5 N MH/SR/LA i blandning 1-12, samt Cementa Byggcement, CEM II/A-LL 42,5 R i blandning 13-15).

Tabell 10. Sammansättning hos blandning 1-5.

Blandning	1	2	3	4	5
% flygaska/cement	0	0	0	6	11
% flygaska/CEM I	0	0	0	6	11
k	-	-	-	0,4	0,4
vct	0,40	0,45	0,50	0,46	0,42
vct _{ekv}	0,40	0,45	0,50	0,45	0,40
Cement [kg/m ³]	400 ^{a)}	400 ^{a)}	400 ^{a)}	395 ^{a)}	380 ^{a)}
Flygaska [kg/m ³] ^{b)}	0	0	0	23,7	41,8
Ballast [kg/m ³]					
Fin (0-4 mm) ^{c)}	444,2	431,0	417,8	423,6	436,9
Fin (0-8 mm) ^{d)}	358,1	347,4	336,8	341,4	352,2
Grov (5-8 mm) ^{e)}	178,4	173,1	167,8	170,1	175,4
Grov (8-16 mm) ^{e)}	802,6	778,8	754,9	765,4	789,4
Vatten [kg/m ³]	160	180	200	182	158,7
AEA [kg/m ³] ^{f)}	0,40	1,20	0,40	1,19	0,76
VR [kg/m ³] ^{g)}	2,00	1,60	1,60	1,58	1,52

^{a)} CEM I 42,5 N MH/SR/LA (Anl. Degerhamn).

^{b)} Warnow Füller.

^{c)} Sjösand, ^{d)} Holsand.

^{e)} Tagene kross.

^{f)} SIKA SikaAer-S 1:10

^{g)} SIKA Sikament 56/50

Tabell 11. Sammansättning hos blandning 6-10.

Blandning	6	7	8	9	10
% flygaska/cement	11	11	18	25	25
% flygaska/CEM I	11	11	18	25	25
k	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
vct	0,47	0,52	0,48	0,44	0,50
vct _{ekv}	0,45	0,50	0,45	0,40	0,45
Cement [kg/m ³]	380 ^{a)}	380 ^{a)}	365 ^{a)}	360 ^{a)}	350 ^{a)}
Flygaska [kg/m ³] ^{b)}	41,8	41,8	65,7	90	87,5

Ballast [kg/m ³]					
Fin (0-4 mm) ^{c)}	423,8	410,7	421,4	427,0	420,1
Fin (0-8 mm) ^{d)}	341,6	331,0	339,6	344,2	338,6
Grov (5-8 mm) ^{e)}	170,2	164,9	169,2	171,5	168,7
Grov (8-16 mm) ^{e)}	765,7	742,1	761,3	771,5	759,0
Vatten [kg/m ³]	178,5	198,4	176,1	158,4	173,3
AEA [kg/m ³] ^{f)}	0,76	1,90	1,10	1,08	1,05
VR [kg/m ³] ^{g)}	1,52	1,52	1,46	1,44	1,40

a) CEM I 42,5 N MH/SR/LA (Anl. Degerhamn).

b) Warnow Füller.

c) Sjösand, ^{d)} Holsand.

^{e)} Tagene kross.

^{f)} SIKA SikaAer-S 1:10

^{g)} SIKA Sikament 56/50

Tabell 12. Sammansättning hos blandning 11-15.

Blandning	11	12	13	14	15
% flygaska/cement	25	33	0	11	25
% flygaska/CEM I	25	33	0	13	30
k	0,4	0,4	-	0,4	0,4
vct	0,55	0,51	0,45	0,47	0,50
vct _{ekv}	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45
Cement [kg/m ³] ^{a)}	335	350	410 ^{h)}	390 ^{h)X}	360 ^{h)XI}
Flygaska [kg/m ³] ^{b)}	83,8	115,5	0	42,9	90,0
Ballast [kg/m ³]					
Fin (0-4 mm) ^{c)}	417,0	178,3	426,7	418,3	413,7
Fin (0-8 mm) ^{d)}	336,2	408,6	344,0	337,1	333,5
Grov (5-8 mm) ^{e)}	167,5	164,1	171,3	167,9	166,1
Grov (8-16 mm) ^{e)}	753,5	738,2	771,0	755,7	747,5
Vatten [kg/m ³]	184,3	178,3	184,5	183,2	178,2
AEA [kg/m ³] ^{f)}	1,51	1,23	1,23	1,17	1,44
VR [kg/m ³] ^{g)}	1,34	1,40	2,05	1,56	1,44

a) CEM I 42,5 N MH/SR/LA (Anl. Degerhamn).

b) Warnow Füller.

c) Sjösand. ^{d)} Holsand.

^{e)} Tagene kross.

^{f)} SIKA SikaAer-S 1:10

^{g)} SIKA Sikament 56/50

^{h)} CEM II/A-LL 42,5 R (Byggcement Skövde).

5.2 Provning på färsk betong

I färskt tillstånd har betongens lufthalt och konsistens (sättningsmått) bestämts, enligt SS-EN 12350-2 samt SS-EN 12350-7. Resultaten från dessa provningar redovisas i

^X Motsvarar 327,6 kg/m³ CEM I (390x0,8x1,05=327,6 kg/m³).

^{XI} Motsvarar 302,4 kg/m³ CEM I (360x0,8x1,05=302,4 kg/m³).

Tabell 13.

Tabell 13. Resultat från bestämning av sättmått och lufthalt enligt SS-EN 12350-2 samt SS-EN 12350-7. Dessutom redovisas mängden luftporbildande tillsatsmedel. Blandning 1-15.

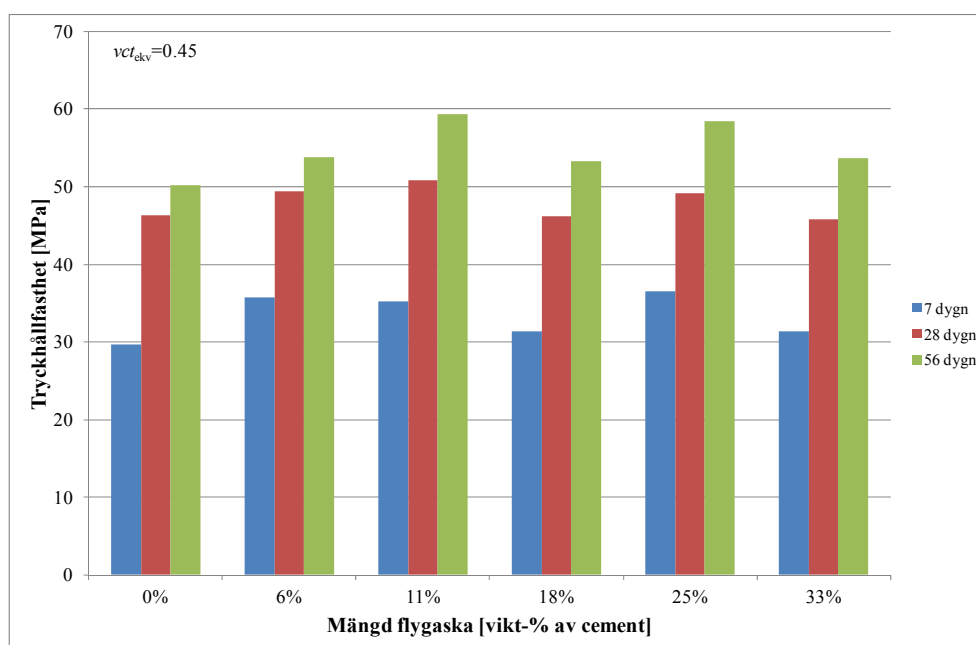
Blandning	$v_{ct_{ekv}}$ [-]	Mängd FA	Sättmått	Lufthalt [%]	Mängd AEA/cement
1	0,40	0 %	50 mm	5,4	0,10 %
2	0,45	0 %	200 mm	5,2	0,30 %
3	0,50	0 %	210 mm	5,5	0,10 %
4	0,45	6 %	120 mm	5,0	0,30 %
5	0,40	11 %	155 mm	5,4	0,20 %
6	0,45	11 %	140 mm	5,9	0,20 %
7	0,50	11 %	175 mm	5,0	0,50 %
8	0,45	18 %	140 mm	5,0	0,30 %
9	0,40	25 %	50 mm	5,9	0,30 %
10	0,45	25 %	90 mm	5,0	0,30 %
11	0,50	25 %	230 mm	4,8	0,45 %
12	0,45	33 %	190 mm	4,8	0,35 %
13	0,45	0 %	40 mm	4,8	0,30 %
14	0,45	11 %	145 mm	4,8	0,30 %
15	0,45	25 %	100 mm	4,8	0,40 %

Resultaten som presenteras i

Tabell 13 visar att konsistensen hos de olika blandningarna varierar mellan 40 mm och 210 mm, dvs. konsistensklass S1-S4. Lufthalterna i den färska betongen varierar mellan 4,8 % och 5,9 %. Målsättningen var att lufthalten i den färska betongen skulle vara $5,5 \% \pm 0,5 \%$ och således uppfyller samtliga blandningar i princip detta.

5.3 Provning av tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten hos den hårdnade betongen har bestämts enligt SS-EN 12390-3. Betongerna har provats vid 7, 28 och 56 dygns ålder efter vattenhärdning i $+20^{\circ}\text{C}$. Resultaten från bestämning av tryckhållfasthet redovisas i Figur 30 (betonger med $vct_{ekv}=0,45$ och olika tillsatser av flygaska, $k=0,4$), Figur 31 (betonger med $vct_{ekv}=0,45$, olika tillsatser av flygaska och med antingen CEM I eller CEM II) samt Figur 32 (betonger med $vct_{ekv}=0,40-0,50$ och olika tillsatser av flygaska, 0-33 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Samtliga tryckhållfastheter som redovisas i Figur 30-Figur 32 är medelvärden från 2-3 provkroppar förutom för 7 dygnsvärden där i vissa fall endast 1 provkropp har använts för provning. Rådata från provningarna av tryckhållfasthet redovisas i bilaga A.

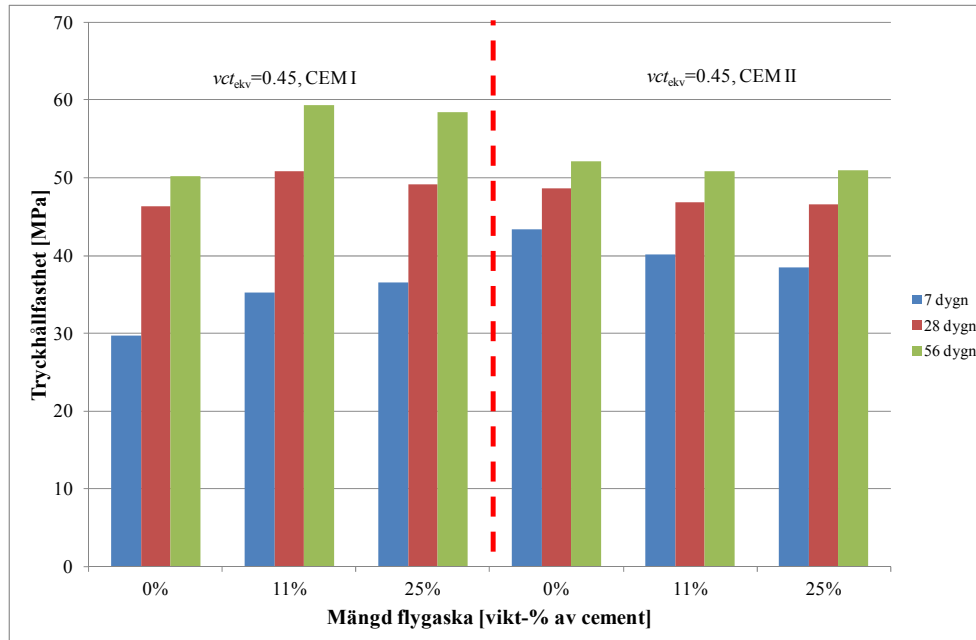


Figur 30. Tryckhållfastheter uppmätta hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$ och olika tillsatser av flygaska (0-33 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Provningen är utförd vid 7 dygn, 28 dygn samt 56 dygns ålder.

I Figur 30 framgår att tryckhållfastheten efter 28 dygn varierar mellan 46,2 MPa och 50,8 MPa. Högst respektive lägst tryckhållfastheter har mätts upp för betongblandning 6 med 11 vikt-% av cementmängden respektive betongblandning 2 utan flygaska. Skillnaderna i uppmätta tryckhållfastheter vid olika tillsatser av flygaska är något stora och kan inte enbart förklaras med askans inverkan. Exempel på andra inverkanse faktorer är variationer i lufthalt mellan blandningarna, se

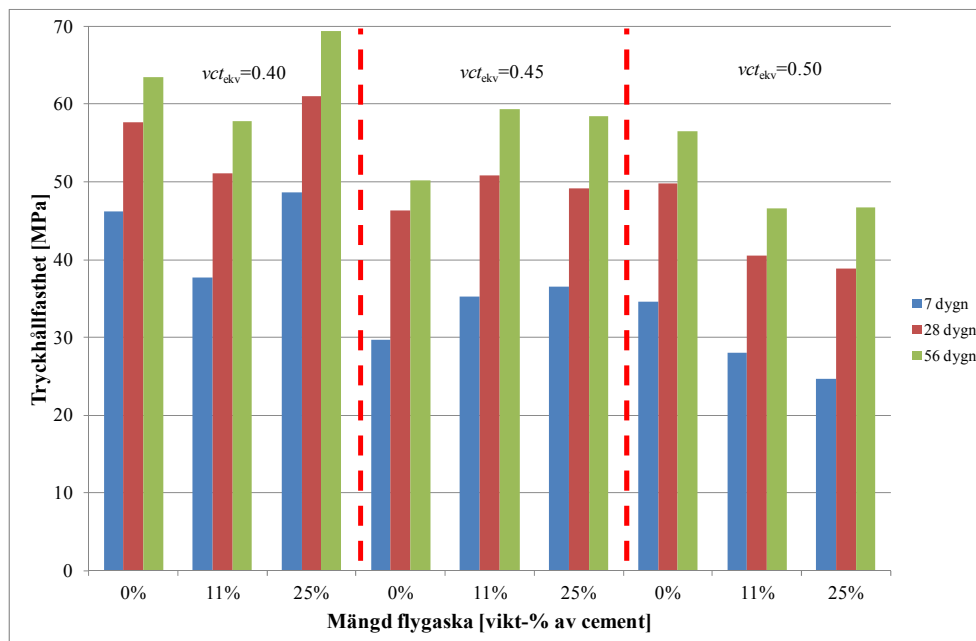
Tabell 13, och/eller variationer i grusfukten.

Hållfasthetstillväxten över tiden är ungefär samma för samtliga betonger fram till 28 dygn. Tryckhållfastheten efter 56 dygn är något högre för betonger med flygaska jämfört med betongen utan flygaska. Detta kan förklaras med att flygaskan fortsätter att reagera även efter 28 dygn i större utsträckning än Portlandcement.



Figur 31. Tryckhållfastheter uppmätta hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$, olika tillsatser av flygaska (0-25 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$) blandade med CEM I- respektive CEM II-cement. Provningsen är utförd vid 7 dygn, 28 dygn samt 56 dygns ålder.

I Figur 31 framgår att uppmätta tryckhållfastheter efter 28 dygn varierar mellan 46,3-50,8 MPa för betonger blandad med CEM I-cement och 46,6-48,6 MPa för betonger blandade med CEM II-cement. Ökningen i hållfasthet över tiden är något lägre för betonger blandade med CEM II-cement än för de betonger som är blandade med CEM I-cement, även för betonger med flygaska.



Figur 32. Tryckhållfastheter uppmätta hos betonger med $vct_{ekv}=0,45-0,50$ och olika tillsatser av flygaska (0-25 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Provningsen är utförd vid 7 dygn, 28 dygn samt 56 dygns ålder.

Tryckhållfastheterna efter 28 dygn som redovisas i Figur 32 varierar mellan 51,1-61,0 MPa för betong med $vct=0,40$, 46,3-50,8 MPa för betong med $vct=0,45$ och 38,8-49,8 MPa för betong med $vct=0,50$.

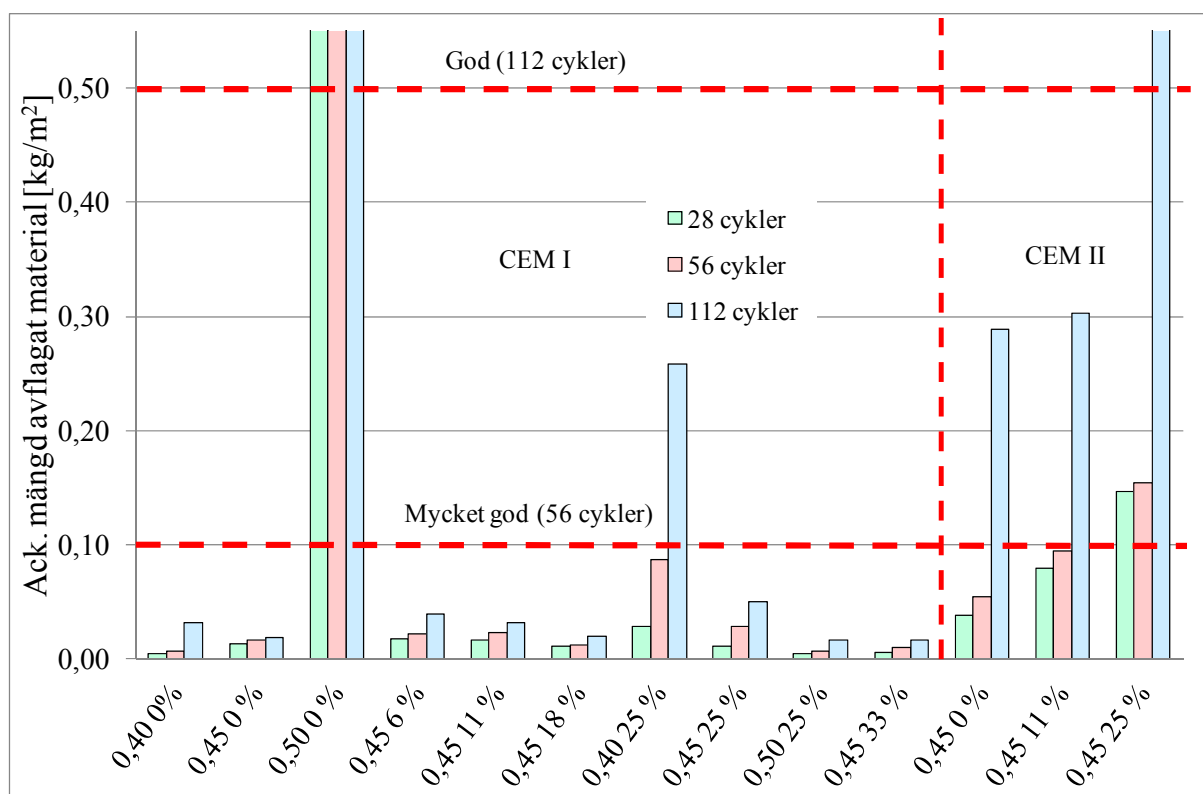
Det kan tyckas något märkligt att hållfastheten efter 28 dygn är högre för blandning 3 (0 % flygaska, $vct_{ekv}=0,50$) än för blandning 2 (0 % flygaska, $vct_{ekv}=0,45$). En möjlig förklaring till detta resultat är att luftporsystem för blandning 3 inte har fått önskat utseende, t.ex. att lufthalten har blivit för låg vilket i sin tur medför en högre hållfasthet. Vid bestämning av lufthalten i den färska betongen noterades inget anmärkningsvärt, se

Tabell 13, men resultaten från provningar med avseende på saltfrostavflagnings visar på inte acceptabel beständighet, se Figur 37. Detta beror förmodligen på att betongens luftporsystem inte har fått avsett utseende, t.ex. att lufthalten har blivit för låg.

5.4 Provning av frostbeständighet

Frostbeständigheten har bestämt enligt SS 13 72 44, procedur IA (dvs. kubsågad yta med 3,0-procentig NaCl-lösning som frysmedium). Betongerna har provats vid 28 och 56 dygns ålder efter vattenhärdning i +20°C. Avflagnings har mätts vad sjunde dag fram tills 112 fryscyklar, för att bättre kunna följa förloppet och identifiera när eventuella frostsador uppstår. Rådata från provning av frostbeständighet redovisas i bilaga B. Foton på provkroppar efter avslutade provning redovisas i bilaga C.

Resultaten för samtliga undersökta betonger redovisas i Figur 33 och Figur 34 (avflagnings uppmätt efter 28, 56 samt 112 fryscyklar, provning inledd vid 28 dygns ålder respektive 56 dygns ålder). Index visar vct_{ekv} samt mängden flygaska (% av cementvikten).

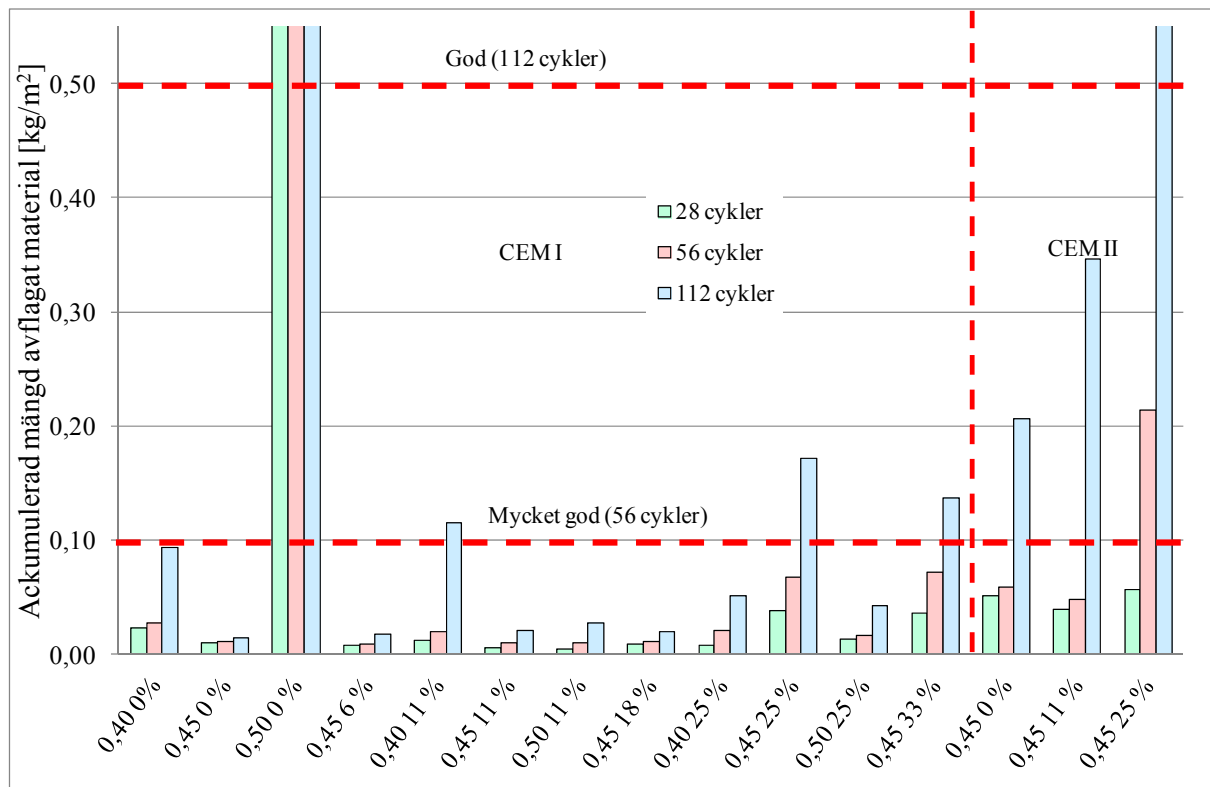


Figur 33. Frostbeständighet för samtliga undersökta betonger. Avflagnings uppmätt efter 28, 56 samt 112 fryscyklar efter provning enligt 13 72 44, procedur IA. Provning inledd vid 28 dygns ålder. De horisontella streckade linjerna illustrerar gränserna för mycket god frostbeständighet (maximal avflagnings 0,10 kg/m² efter 56 fryscyklar) samt god frostbeständighet (maximal avflagnings 0,50 kg/m² efter 112 fryscyklar).

Resultaten som presenteras i Figur 33 visar att frostbeständigheten är mycket god (maximal avflagnings 0,10 kg/m² efter 56 fryscyklar) för samtliga undersökta betonger förutom blandning 3 ($vct_{ekv}=0,50$, 0 % flygaska, CEM I-cement) och blandning 15 ($vct_{ekv}=0,45$, 25 % flygaska, CEM II-cement). Frostbeständigheten för blandning 3 är ej acceptabel och detta kan

troligen förklaras med att luftporsystemet i denna betong inte har fått önskat utseende, trots att mätningar av lufthalten i den färska betongen visade att lufthalten var tillräckligt hög (5,5 %).

I Figur 33 saknas resultat från blandning 5 ($v_{ct_{ekv}}=0,40$, 11 % flygaska, CEM I-cement) och blandning 7 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 11 % flygaska, CEM I-cement). Detta på grund av att provningen av misstag inleddes vid en ålder av 56 dygn istället för vid 28 dygn, vilket medförde att dessa betonger inte provades. Dock är troligen frostbeständigheten för dessa betonger mycket god (maximal avflagnings 0,10 kg/m² efter 56 fryscyklar), jfr resultaten i Figur 34 där provningen är inledd vid 56 dygns ålder.



Figur 34. Frostbeständighet för samtliga undersökta betonger. Avflagnings uppmätt efter 28, 56 samt 112 fryscyklar efter provning enligt 13 72 44, procedur IA. Provning inledd vid 56 dygns ålder. De horisontella streckade linjerna illustrerar gränserna för mycket god frostbeständighet (maximal avflagnings 0,10 kg/m² efter 56 fryscyklar) samt god frostbeständighet (maximal avflagnings 0,50 kg/m² efter 112 fryscyklar).

Resultaten som presenteras i Figur 34 visar att frostbeständigheten är mycket god (maximal avflagnings 0,10 kg/m² efter 56 fryscyklar) för samtliga undersökta betonger förutom blandning 3 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 0 % flygaska, CEM I-cement) och blandning 15 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 25 % flygaska, CEM II-cement). Frostbeständigheten för blandning 3 är ej acceptabel och detta kan förklaras med att luftporsystemet i denna betong inte har fått önskat utseende, trots att mätningar av lufthalten i den färska betongen visade halten var tillräckligt hög (5,5 %).

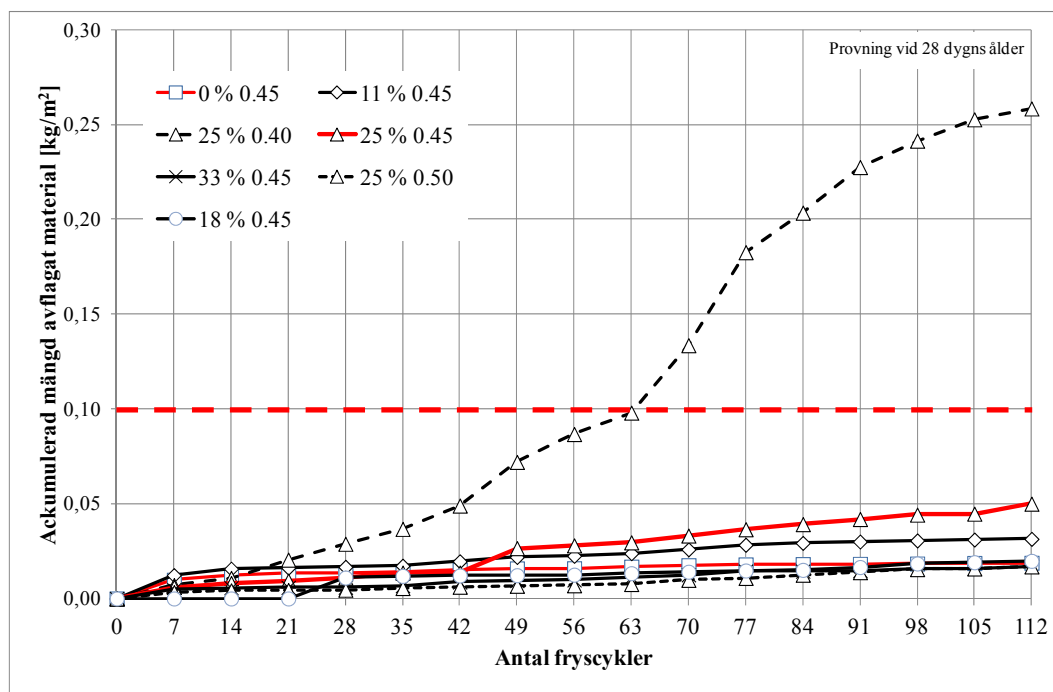
I både Figur 33 och Figur 34 från blandning 15 något sämre frostbeständighet jämfört med övriga blandningar, dock är den acceptabel (avflagnings efter 112 fryscyklar är mindre än 1,00 kg/m²). Även blandning 13 och 14 har något sämre frostbeständighet än motsvarande betonger blandade med CEM I-cement, dock är den fortfarande mycket god. En förklaring till den något sämre frostbeständigheten hos blandning 13-15 är att det är svårare att skapa ett bra

luftporsystem i betong blandad med CEM II-A/LL cement (Byggcement Skövde). Detta beror på att den luftporbildare som har använts i första hand är utvecklad för CEM I (eftersom denna typ av cement normalt används för konstruktioner i exponeringsklass XF 4, se t.ex. AMA Anläggning 10). Det finns också skillnader mellan CEM I och CEM II, t.ex. skillnader i specifika ytor och kemisk sammansättning, som påverkar hur väl luftporbildaren fungerar. Dessutom innehåller Byggcement porös kalksten, där luftporbildaren kan absorberas och därmed inte vara aktivt i betongen.

Dessa resultat visar att den primära faktorn för att uppnå en god frostbeständighet är om ett bra luftporsystem har skapats i betongen. Eventuella tillsatser av flygaska har alltså underordnad inverkan, åtminstone för de doseringar som har använts i det aktuella projektet (upp till 33 % av CEM I-vikten). Erfarenheter från det aktuella projektet visar dock att en högre dosering av luftporbildande tillsatsmedel måste användas i betonger med tillsats av flygaska och dessutom kombinerat med tillsats av superplasticerande tillsatsmedel.

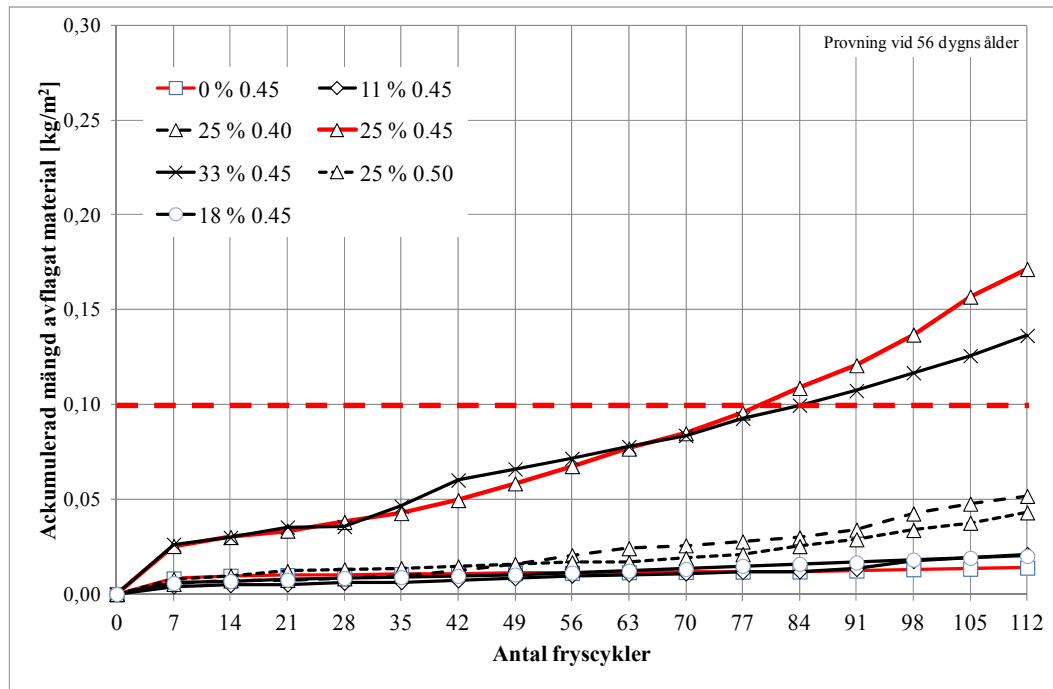
5.4.1 Medelvärden på uppmätta avflagningar

Förloppen av ackumulerad mängd avflagat material för några av de undersökta betongerna redovisas i Figur 35-Figur 36 (betonger med $vct_{ekv}=0,45$ och olika tillsatser av flygaska, blandning 2, 6 samt 8-12), Figur 37 (betonger med $vct=0,45$, olika tillsatser av flygaska och med antingen CEM I- eller CEM II-cement, blandning 1, 3, 4-5, 7 samt 13-15). Beteckningarna på respektive provkropp är mängd flygaska och vct_{ekv} . Den horisontella streckade linjen i respektive figur illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagning $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).



Figur 35. Ackumulerad avflagningsmängd uppmätt hos betonger med $vct_{ekv}=0,45-0,50$ och olika tillsatser av flygaska (0-33 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Provningsen inledd vid 28 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur IA. Medelvärden från 2-4 provkroppar. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagningsmängd $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).

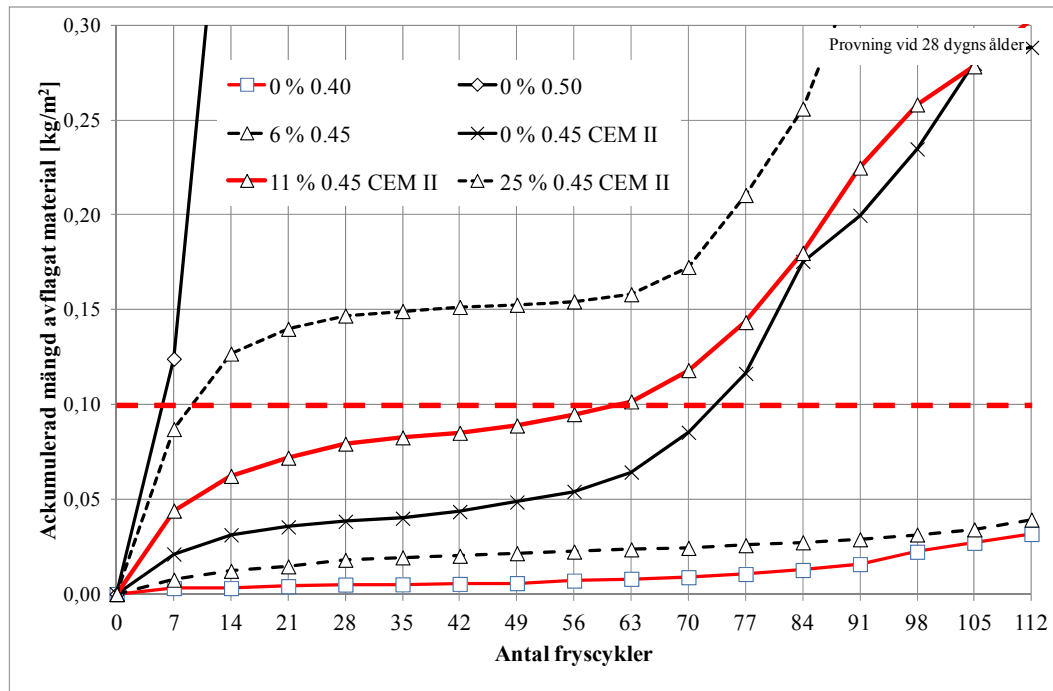
Från resultaten i Figur 35 framgår att samtliga undersökta betongblandningar har en mycket god frostbeständighet (avflagningsmängd efter 56 fryscyklar är mindre än $0,10 \text{ kg/m}^2$). Avflagningsmängden efter 112 fryscyklar är också lägre än $0,10 \text{ kg/m}^2$, för samtliga blandningar förutom för blandning 9 ($vct_{ekv}=0,40$, 25 % flygaska av cementvikten). En förklaring till den något sämre frostbeständigheten hos blandning 9 ($vct_{ekv}=0,40$, 25 % flygaska av cementvikten) kan vara så kallad "porblockering" som kan uppträda hos betonger med inblandning av flygaska, se vidare i kapitel 6.3. När provningen inleds vid 56 dygns ålder uppvisar blandning 9 avflagningsmängd som är lägre än $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 112 fryscyklar, se Figur 36.



Figur 36. Ackumulerad avflagningsmängd uppmätt hos betonger med $vct_{ekv}=0,45-0,50$ och olika tillsatser av flygaska (0-33 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Provningen inledd vid 56 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur IA. Medelvärden från 2-4 provkroppar. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagningsmängd $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).

Från resultaten i Figur 36 framgår att samtliga undersökta betongblandningar har en mycket god frostbeständighet (avflagningsmängd efter 56 fryscyklar är mindre än $0,10 \text{ kg/m}^2$). Avflagningsmängden efter 112 fryscyklar är också lägre än $0,10 \text{ kg/m}^2$ för samtliga blandningar utom för blandning 10 ($vct_{ekv}=0,45$, 25 % flygaska av cementvikten) och blandning 12 ($vct_{ekv}=0,45$, 33 % flygaska av cementvikten).

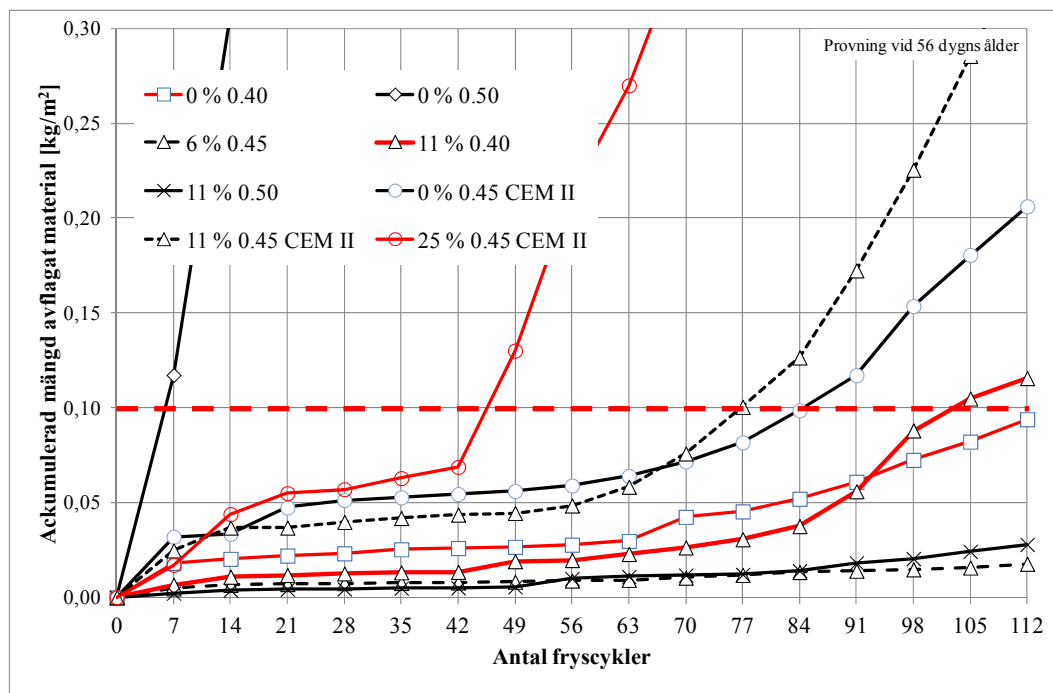
Avflagningsmängderna som presenteras i Figur 36 (provning inledd vid 56 dygns ålder) är något högre än de som presenteras i Figur 35 (provning inledd vid 28 dygns ålder), se också Figur 49. Vad dessa resultat kan vara orsakade av diskuteras vidare i kapitel 6.3.



Figur 37. Akkumulerad avflagningsmängd hos betonger med $v_{ct}=0,40-0,50$, olika tillsatser av flygaska (0-25 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Provningsinledningen vid 28 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur IA. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagningsmängd $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).

I Figur 37 framgår att samtliga betonger utom blandning 15 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 25 % flygaska av cementvikten, CEM II-cement) och blandning 3 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 0 % flygaska) och blandning 3 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 0 % flygaska) har mycket god frostbeständighet (avflagningsmängd efter 56 fryscyklar är mindre än $0,10 \text{ kg/m}^2$). Blandning 15 har däremot god frostbeständighet (avflagningsmängd efter 56 fryscyklar är mindre än $0,20 \text{ kg/m}^2$). Provkroppar från blandning 3 frös sönder innan provningsperioden var slut och därför avslutades provningen efter 63 fryscyklar. Luftporsystemet i blandning 3 har uppenbarligen inte fått önskade egenskaper, trots att luftporbildande tillsatser har blandats i betongen och att mätningar av lufthalten i den färska betongen visade på acceptabla värden (5,5 %), se

Tabell 13. Blandning 15 har dock acceptabel frostbeständighet (avflagnings efter 112 fryscyklar är mindre än 1,00 kg/m²).



Figur 38. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger med $v_{ct}=0,40-0,50$, olika tillsatser av flygaska (0-25 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Provningsperioden inledd vid 56 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur 1A. Blandning 1, 3, 4-5, 7 samt 13-15. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagnings 0,10 kg/m²).

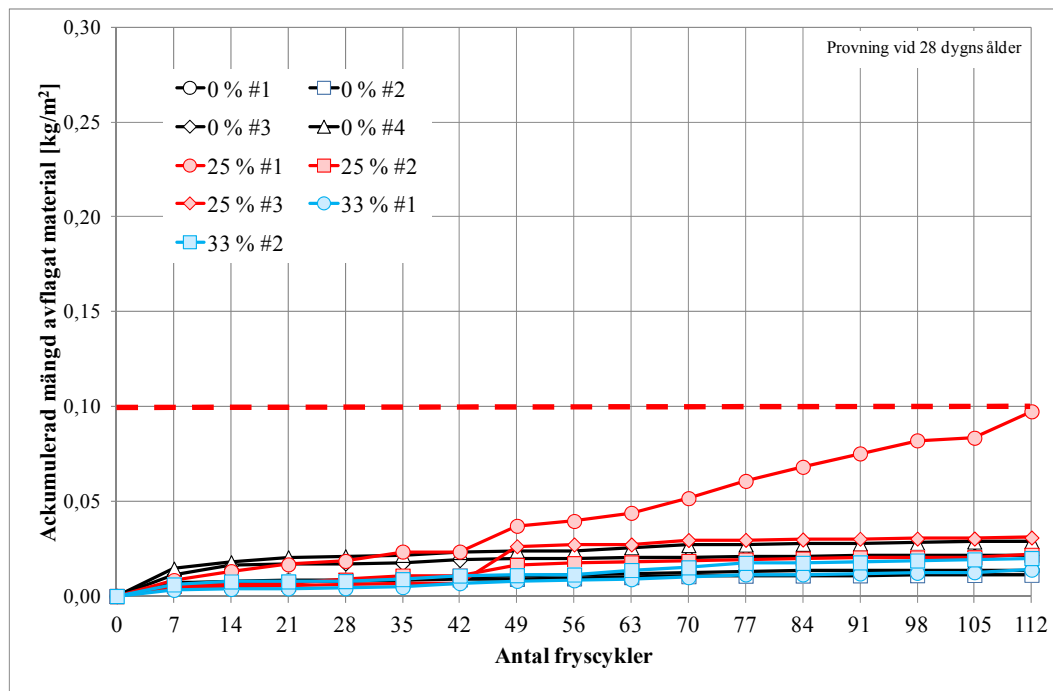
Resultaten i Figur 38 visar att samtliga betonger förutom blandning 3 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 0 % FA) och blandning 15 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 25 % flygaska av cementvikten, CEM II-cement) har mycket frostbeständighet (avflagnings efter 56 fryscyklar är mindre än 0,10 kg/m²). Blandning 15 har däremot acceptabel frostbeständighet (avflagnings efter 112 fryscyklar är mindre än 1,00 kg/m²). Provkroppar från blandning 3 frös sönder innan provningsperioden var slut och därför avslutades provningen efter 42 fryscyklar.

Provkroppar från blandning 3 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 0 % FA) frös sönder innan provningsperioden var slut och därför avslutades provningen efter 42 fryscyklar. Den ackumulerade avflagnings för provkroppar från blandning 3 överstiger 1,0 kg/m² efter 42 fryscyklar^{xii}, vilket vida överstiger gränsen för icke acceptabel frostbeständighet (1,0 kg/m² efter 56 respektive 112 fryscyklar).

5.4.2 Avflagnings uppmätt för enskilda provkroppar

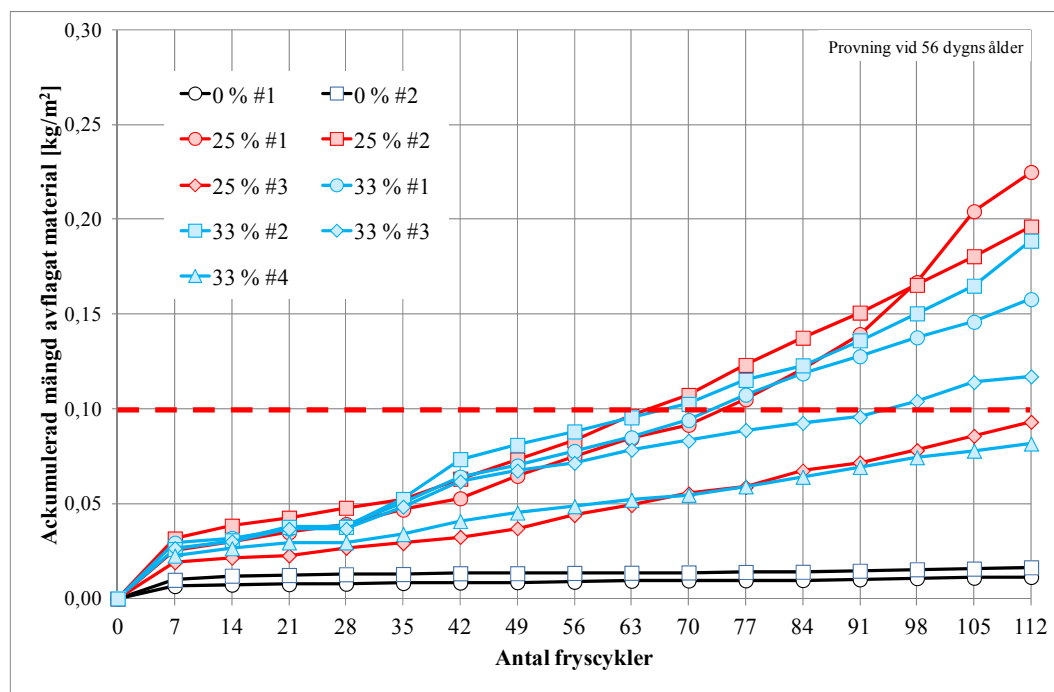
För att förtydliga resultaten som presenteras i Figur 35-Figur 36 visas avflagnings uppmätta för enskilda provkroppar från betonger med 0-33 vikt-% flygaska i Figur 39 (28 dygns härdning, $v_{ct_{ekv}}=0,45$, 0-33 vikt-% flygaska av cement) och Figur 40 (56 dygns härdning, 0 %-33 % flygaska av cementvikten).

^{xii} Avflagnings för en av provkropparna från blandning 3 var ca 0,28 kg/m² efter 42 fryscyklar. Dock läckte denna provkropp frysvätska med följd att frysytan delvis torkade ut vilket resulterar i att betongen heller inte frös sönder. Om detta läckage inte hade uppstått hade avflagnings blivit betydligt större.



Figur 39. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$ och olika tillsatser av flygaska (0-33 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Provnings inledd vid 28 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur IA. Blandning 2, 10 samt 12. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagnings $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).

Från resultaten som presenteras i Figur 39 framgår att samtliga undersökta provkroppar har en avflagnings som är lägre än $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 112 fryscyklar (och 56 fryscyklar).



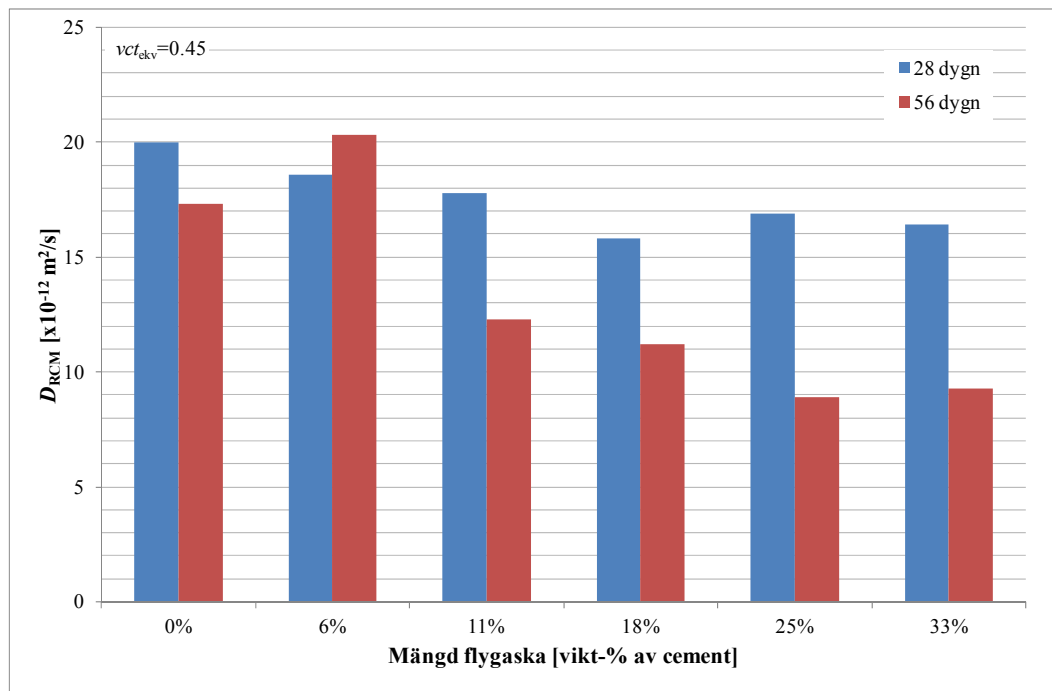
Figur 40. Ackumulerad avflagningsmängd uppmätt hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$ och olika tillsatser av flygaska (0-33 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Provningen inledd vid 56 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur 1A. Blandning 2, 10 samt 12. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagningsmängd 0,10 kg/m² efter 56 fryscyklar).

Resultaten i Figur 40 visar att samtliga undersökta provkroppar har en avflagningsmängd som är lägre än 0,10 kg/m² efter 56 fryscyklar, vilket betyder att frostbeständigheten är mycket god.

5.5 Motstånd mot kloridinträngning

Beständighet med avseende på kloridinitierad armeringskorrosion har bestämts genom att mäta kloridmigrationskoefficienten, D_{RCM} , enligt NT Build 492. Kloridmigrationskoefficienten ger ett mått på betongens motstånd mot kloridinträngning, där motståndet ökar med minskande värden på D_{RCM} .

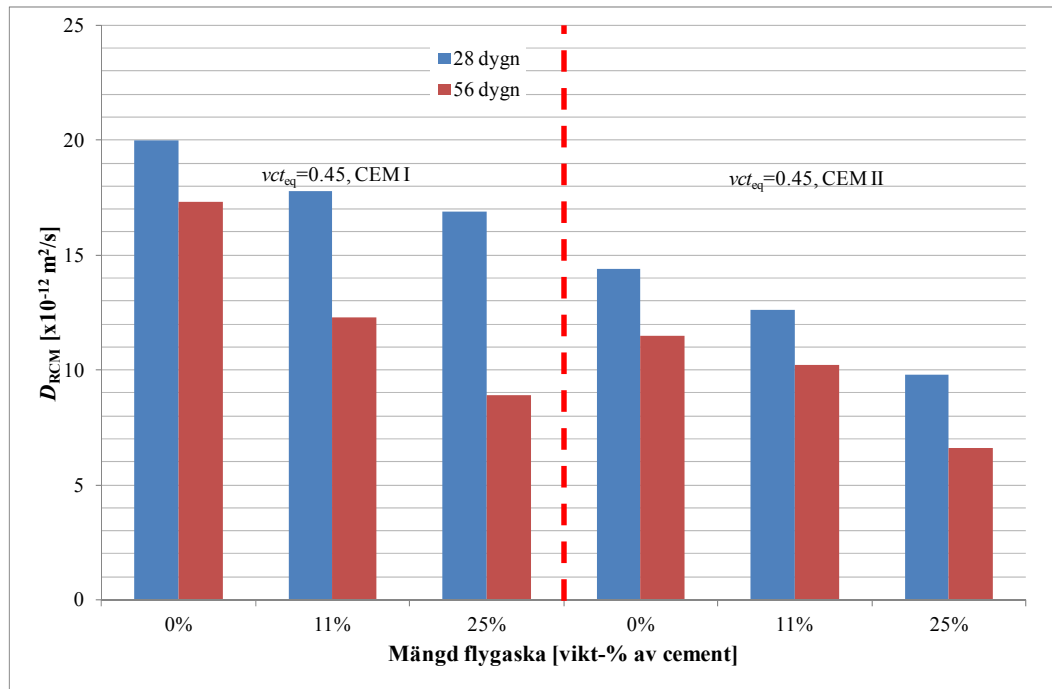
Betongerna har provats vid 28 och 56 dygns ålder efter vattenhärdning i +20°C. Resultaten från bestämning av kloridmigrationskoefficienten redovisas i Figur 41 (betonger med $vct=0,45$ och olika tillsatser av flygaska, 0-33 vikt-% av cementmängden), Figur 42 (betonger med $vct=0,45$, olika tillsatser av flygaska och blandade med antingen CEM I eller CEM II) samt Figur 43 (betonger med $vct=0,40-0,50$ och olika tillsatser av flygaska, 0-33 vikt-% flygaska av cement). Samtliga kloridmigrationskoefficienter som redovisas i Figur 41-Figur 43 är medelvärden från provning av 3 provkroppar. Resultaten är omräknade så att de gäller för provning som är utförd vid 28 dygns samt 56 dygns ålder enligt ekvation (5.3.1:1) i Nils-son et al (1997). Parametrarna i ekvation (5.3.1:1) är framtagna för Portlandcementbetong, vilket betyder att ekvationen inte direkt går att tillämpa för flygaskebetonger. Eftersom data för flygaskebetonger saknas har dock ekvationen med föreslagna parametrar använts, vilket i sin tur troligen medför att beräknade värden är något för höga för flygaskebetonger. Rådata från provningarna redovisas i bilaga D.



Figur 41. D_{RCM} uppmätt hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$ och olika tillsatser av flygaska (0-33 vikt-% av cementmängden, $k=0,4$). Resultat omräknade så att de gäller för provning som är utförd vid 28 dygns samt 56 dygns ålder.

I Figur 41 framgår tydligt att en inblandning av flygaska minskar D_{RCM} . Dessutom framgår en tydlig effekt av betongens ålder, förutom för blandning 4 (6 vikt-% flygaska av cement). Effekten av inblandning av flygaska är speciellt tydlig när provningen har utförts vid 56 dygns ålder, där speciellt betongerna med 25 % respektive 33 % flygaska av cementvikten (blandning 10 och 12) får låga D_{RCM} , jämfört med övriga betongblandningar. Skillnaden mellan D_{RCM} uppmätt vid 56 dygn respektive 28 dygn är upp till ca 45 %, där störst skillnad har mätts upp hos blandning 10 (25 % flygaska av cementvikten) och 12 (33 % flygaska av cementvikten). Detta är huvudsakligen ett resultat av flygaskans reaktioner och att dessa fortskrider mer än Portlandcement även efter 28 dygn.

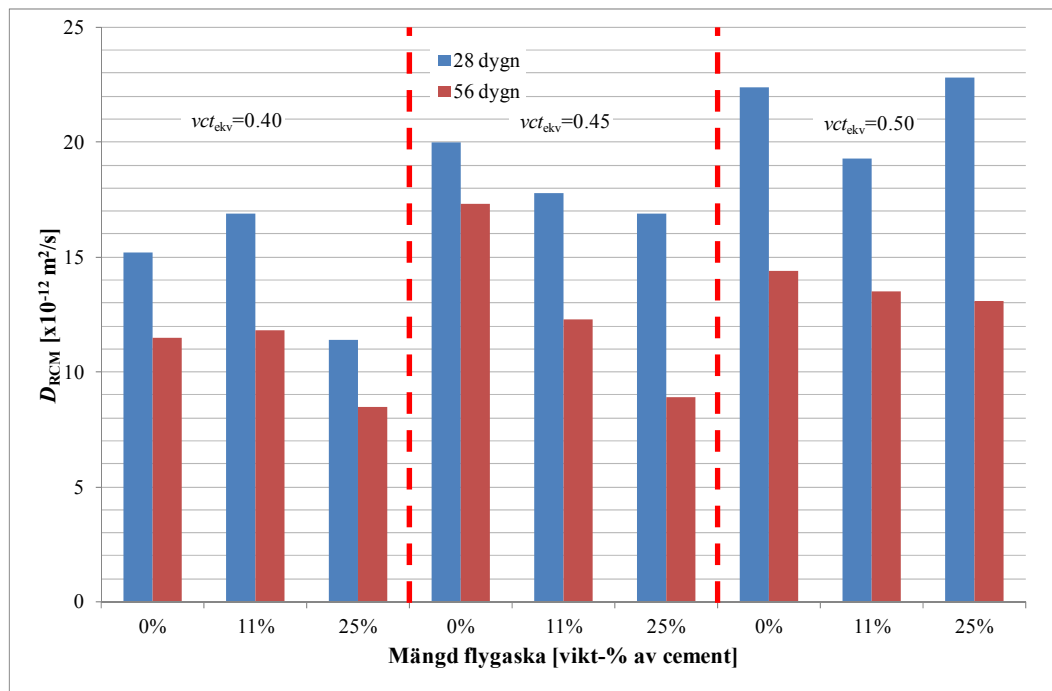
Ett något märkligt resultat är att betongen med 6 vikt-% flygaska av cement (blandning 4) får högre D_{RCM} vid provning vid 56 dygns ålder än vid 28 dygns ålder. Orsaken till detta resultat är inte känd.



Figur 42. D_{RCM} uppmätt hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$, olika tillsatser av flygaska (0-25 vikt-% av cementmängden) blandade med CEM I- respektive CEM II-cement. Resultat omräknade så att de gäller för provning som är utförd vid 28 dygns samt 56 dygns ålder.

Från resultaten som presenteras i Figur 42 framgår att D_{RCM} minskar med ökande tillsats av flygaska och vid ökande ålder. Den positiva effekten av flygaska är speciellt tydlig när provningen har utförts vid 56 dygns ålder. Dessutom har lägre D_{RCM} mätts upp för betonger blandade med CEM II-cement än för motsvarande betonger blandade med CEM I-cement, även för blandning 13 utan tillsats av flygaska.

Skillnaden mellan D_{RCM} uppmätt vid 56 dygn respektive 28 dygn är upp till ca 45 %, där störst skillnad har mätts upp hos blandning 10 (25 % flygaska av cementvikten med CEM I-cement). Skillnaderna mellan D_{RCM} vid 56 dygn respektive 28 dygn är lägre för betonger blandade med CEM II-cement jämfört med betonger blandade med CEM I-cement.



Figur 43. D_{RCM} uppmätt hos betonger med $vct_{ekv}=0,40-0,50$ och olika tillsatser av flygaska (0-25 vikt-% av cementmängden). Resultat omräknade så att de gäller för provning som är utförd vid 28 dygns samt 56 dygns ålder.

Uppmätta D_{RCM} som redovisas i Figur 43 visar på effekten av vct_{ekv} och inblandning av flygaska. Högst och lägst D_{RCM} har mätts upp för betonger med $vct_{ekv}=0,50$ respektive 0,40 och utan respektive med tillsats av flygaska. Vid provning vid 56 dygns ålder fås generellt lägre D_{RCM} än om provningen utförs vid 28 dygns ålder. Detta är huvudsakligen ett resultat av att både Portlandcementen men speciellt flygaskan fortsätter att reagera även efter 28 dygn.

6 Analys och kommentarer

6.1 Allmänt

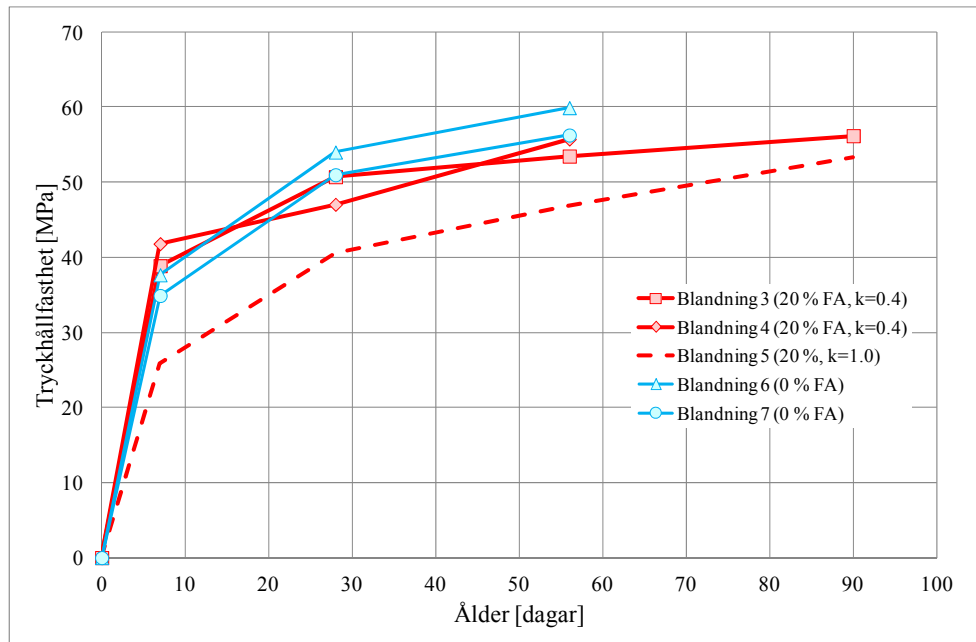
Syftet med SBUF-projekt 12382 ”Beständighetsegenskaper hos anläggningsbetong med stenkolsflygaska” är att undersöka och dokumentera egenskaperna hos betonger blandade med kombinationer av Portlandcement och olika mängder flygaska. I projektet har det undersökts om egenskaperna hos betonger blandade med kombinationer av Portlandcement och flygaska blir likvärdiga med egenskaper hos betong blandade med endast Portlandcement. Den genomförda litteraturstudien och de undersökningar som har genomförts i Knutsson (2010) och i det aktuella projektet visar att så är fallet och att i vissa fall kan en betong med inblandning av flygaska även få bättre egenskaper än motsvarande Portlandcementbetong.

I följande kapitel analyseras och kommenteras resultaten från laboratoriestudien som har genomförts i det aktuella SBUF-projektet samt de undersökningar som presenteras i Knutsson (2010).

6.2 Tryckhållfasthet

Uppmätta tryckhållfastheter som redovisas i kapitel 4.3.3 samt 5.3 visar att det finns skillnader mellan de olika betongerna, både vad gäller nivåer på hållfastheter och hållfasthetstillväxt. Inblandning av flygaska påverkar hållfastheten där hållfasthetstillväxten påverkas av flygaskans reaktioner eftersom denna är långsammare än reaktionen hos Portlandcement (det krävs tillgång till kalciumhydroxid för att flygaskan skall kunna reagera). Detta innebär att betonger med flygaska normalt får en långsammare hållfasthetstillväxt fram till 28 dygn men att hållfastheten fortsätter att öka även efter 28 dygn. Dessutom bidrar flygaska mindre till hållfastheten än Portlandcement, vilket betyder att mängden flygaska som blandas i en betong måste vara större än den mängd Portlandcement den ersätter. Tillsatsen av flygaska styrs av effektivitetsfaktorn, k , där $k=0,4$ (vilket också är vad som föreskrivs i SS-EN 206-1) har tillämpats i SBUF-projekt 12382.

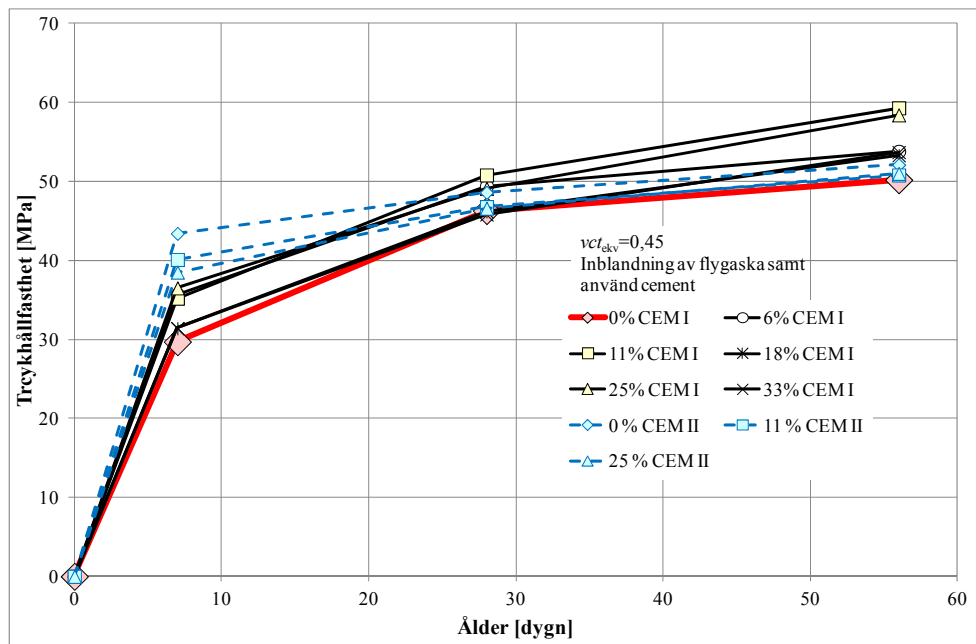
Effekten av olika effektivitetsfaktorer har studerats i Knutsson (2010), där $k=0,4$ samt $k=1,0$ har tillämpats. I Figur 44 redovisas tryckhållfastheter som har mätts upp för betonger med tillsatser av 0 vikt-% respektive 20 vikt-% flygaska av cementmängden, där också olika k -faktorer har tillämpats.



Figur 44. Tryckhållfastheter uppmätta hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$, olika tillsatser av flygaska (0 & 20 vikt-% av cementmängden) och olika k -faktorer ($k=0,4$ samt $k=1,0$). Provningsen är utförd vid 7 dygn, 28 dygn, 56 dygn samt 90 dygn. Data från Knutsson (2010).

I Figur 44 framgår tydligt att om $k=1,0$ (streckad linje) blir tryckhållfastheten också lägre, speciellt i tidig ålder. Detta är ett resultat av att flygaskan har lägre reaktivitet än Portlandcement, som just k -faktorerna används för att kompensera för. Inverkan av vct_{ekv} på tryckhållfastheten är uppenbar, se Figur 32, där hållfastheten ökar med minskande vct_{ekv} . Inverkan av mängden flygaska som har satts till betongen framgår av Figur 30-Figur 31, där betonger med tillsatser av flygaska får en något långsammare hållfasthetstillväxt än betonger utan flygaska. Hållfastheten efter 28 dygn är på samma nivå för samtliga undersökta betonger, vilket kan förklaras med att effektivitetsfaktorer ($k=0,4$) har använts vid inblandning av flygaska. Effektivitetsfaktorerna är satta så att en betong med flygaska skall få samma hållfasthet som motsvarande Portlandcementbetong. Det finns också en skillnad mellan betongerna beroende på om CEM I- eller CEM II-cement använts, där hållfasthetstillväxten är snabbare medan slut-hållfastheten är lägre om CEM II-cement använts.

Resultaten i Figur 30-Figur 31 förtydligas i Figur 45. Samtliga betonger har $vct_{ekv}=0,45$. Betongen blandad med CEM I-cement och utan tillsats av flygaska (referens) är markerad med en heldragen röd linje.



Figur 45. Tryckhållfastheter uppmätta hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$ och olika tillsatser av flygaska (0-33 vikt-% av cementmängden). Den röda heldragna linjen indikerar betongen blandad med CEM I och utan tillsats av flygaska (referens). Provningsen är utförd vid 7 dygn, 28 dygn samt 56 dygn.

I Figur 45 framgår det att tryckhållfastheten efter 28 dygn är ungefär samma för samtliga undersökta betonger, medan speciellt tryckhållfastheten efter 56 dygn är högre för betonger med flygaska. Skillnaden i tryckhållfasthet mellan betonger med och utan flygaska efter 56 dygn är större ju större tillsats av flygaska som har använts.

Som tidigare noterats har betongerna blandade med CEM II-cement högre hållfasthet vid 7 dygn än betongerna blandade med CEM I-cement. Vid 28 dygn är hållfastheterna ungefär samma oberoende av typen av cement medan vid 56 dygn är hållfastheten högre för betongerna blandade med CEM I-cement. Detta kan förklaras med att det CEM II-cement, Cementa Byggcement (CEM II/A-LL 42,5 R), som använts är ett snabbhårdnande cement (indikerat med R), medan det CEM I-cement, Cementa Anläggningscement (CEM I 42,5 N MH/SR/LA) som använts, är ett normalhårdnande cement. Således skall hållfasthetsutvecklingen också bli snabbare i betonger blandade med Cementa Byggcement jämfört med om Cementa Anläggningscement har använts.

6.3 Frostbeständighet

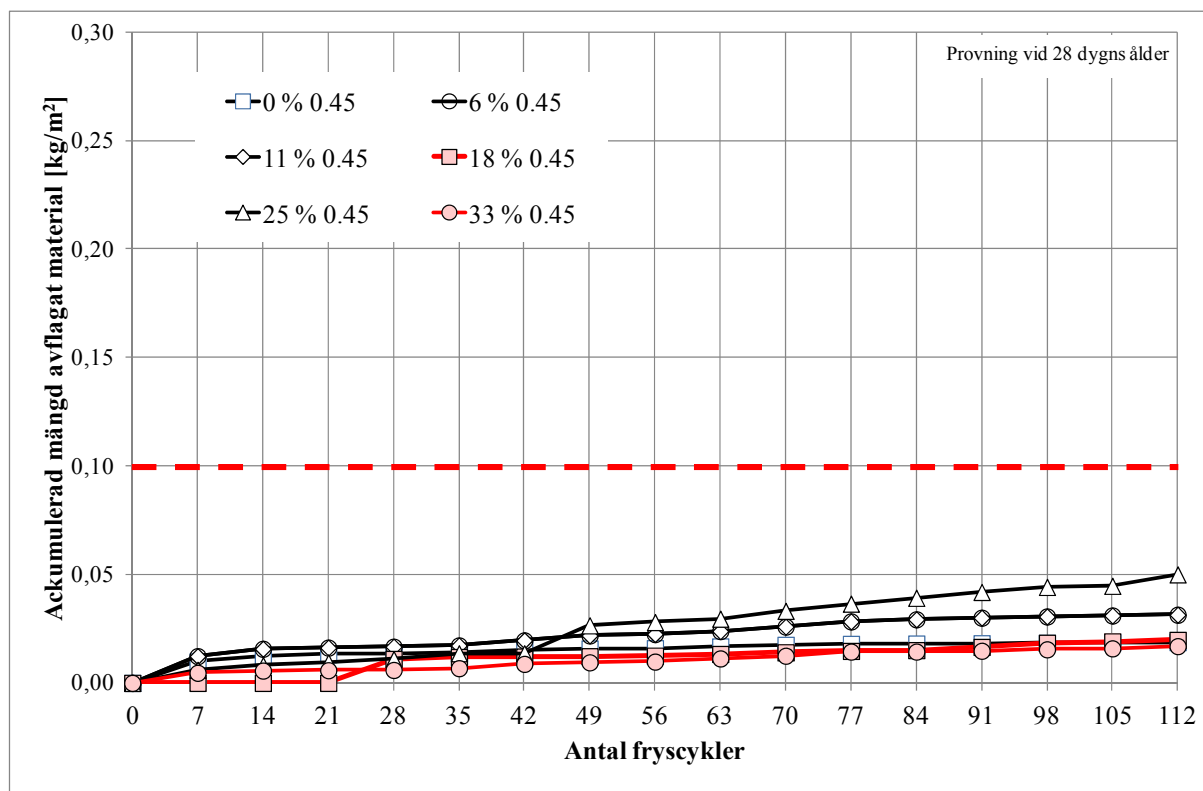
Från resultaten som presenteras i kapitel 5 framgår att för de flesta undersökta betongerna är frostbeständigheten mycket god. Det bör noteras att samtliga betonger har haft tillsatser av extra luft, där luftporbildande tillsatsmedel har använts. Lufthalten i den färska betongen har kontrollerats och om lufthalten i den färska betongen visade sig vara för låg har extra luftporbildande tillsatsmedel satts till. Detta har fått göras både på betonger med och utan flygaska för att uppnå önskade lufthalter. Således är inte flygaskan i sig själv något problem för att skapa en betong med god frostbeständig utan doseringen av luftporbildande tillsatsmedel.

Normalt krävs högre doseringar av luftporbildande tillsatsmedel om flygaska satts till betongen, vilket kan förklaras med att flygaskan absorberar delar av tillsatsmedlet, se kapitel

3.3.2. Det är speciellt halten av restkol i flygaska som avgör hur stor absorbtionen kan bli, dvs. hur många ”absorbtionspunkter” som finns tillgängliga för eventuella tillsatsmedel att absorberas på. Det visade sig också att för att få ett bra luftporsystem i betongerna flygaska var det inte tillräckligt att bara sätta till luftporbildande tillsatsmedel (AEA) utan det krävdes också tillsats av superplasticerande tillsatsmedel (VR). Försök gjordes att endast använda AEA, men för att uppnå önskade lufthalter krävdes mycket höga doseringar (betydligt högre än vad tillverkaren rekommenderar). Om även tillsatser av VR användes krävdes mer rimliga doseringar av AEA (inom de gränser som tillverkaren rekommenderar). En trolig förklaring till detta är att det VR som använts till stor del blockerar de ”absorbtionspunkter” som finns på flygaska så att det AEA inte absorberas utan finns tillgängligt för att skapa luftporer i betongen. Dessutom finns det en samverkan mellan AEA och VR (polykarboxilatbaserat) som har använts, där effekten av AEA katalyseras av polykarboxilat, vilket medför att lägre doseringar av AEA krävs för att uppnå önskade lufthalter.

Några betonger har fått något sämre frostbeständighet vilket troligen kan förklaras med att luftporsystemet har blivit dåligt. En av betongerna (blandning 3, CEM I, $v_{ct_{ekv}}=0,50$, 0 % FA) frös sönder innan provningsperioden var slut och därför avslutades provningen i förtid. Denna betong hade uppenbarligen ett dåligt luftporsystem trots att lufthalten i den färska betongen var acceptabel (5,5 %). Övriga betonger som har fått något sämre frostbeständighet är de som blandats med CEM II, speciellt vid högre doseringar av flygaska. Denna skillnad mellan CEM II/A-LL och CEM I kan delvis förklaras med att det luftporbildande tillsatsmedel som har använts i projektet främst är utvecklat för att fungera med CEM I (eftersom denna typ av cement normalt används för konstruktioner i exponeringsklass XF 4, se t.ex. AMA Anläggning 10). Det finns också skillnader mellan de CEM I- och CEM II-cement som har använts, t.ex. skillnader i specifika ytor och kemisk sammansättning, som påverkar hur väl luftporbildaren fungerar och kapillär vattenmättnadsgrad (aktuell och kritisk).

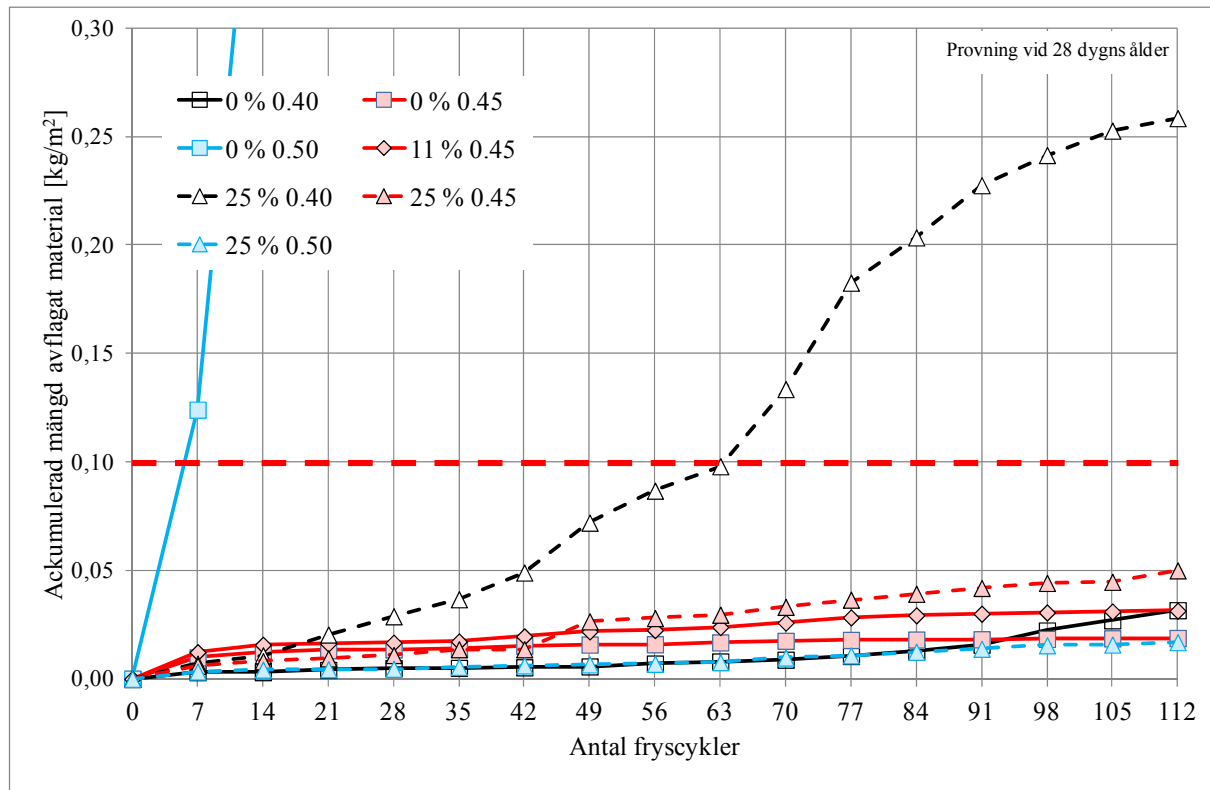
Enligt SS 13 70 03 är maximalt tillåten mängd flygaska som tillåts i betong i exponeringsklass XF 4 är 25 vikt-% av CEM I. I projektet har betonger med doseringar av flygaska på upp till 33 vikt-% av CEM I undersökts. I Figur 46 visas ackumulerad mängd avflagat material för betonger blandade med CEM I, $v_{ct_{ekv}}=0,45$ med 0-33 vikt-% flygaska av CEM I. Den horisontella streckade linjen visar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagning $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).



Figur 46. Ackumulerad avflagningsmängd hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$ med 0-33 vikt-% flygaska av cementmängden. Provningsinledningen vid 28 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur IA. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagningsmängd $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).

Resultaten i Figur 46 visar att samtliga betonger med $vct_{ekv}=0,45$ (som uppfyller de krav som ställs i exponeringsklass XF 4) har en mycket god frostbeständighet (maximal avflagningsmängd $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar). Samtliga betonger har också haft extra lufttillsats. Det är till och med så att den betong där minst mängd material har flagnat av är den betong som har högst tillsats av flygaska (33 vikt-% av cementmängden). Det går alltså att uppnå en mycket god frostbeständighet i betonger även med högre doseringar av flygaska än vad som föreskrivs i SS 13 70 03 (max 25 vikt-% flygaska av CEM I). En förutsättning är dock att extra luft har satts till, vilket normalt är ett krav för alla betonger, oavsett om flygaska har blandats i eller inte.

I Figur 47 redovisas ackumulerad mängd avflagnat material för betonger med olika vct_{ekv} (0,40-0,50) och tillsatser av flygaska (0-25 vikt-% av cementmängden) där provningen har inletts vid 28 dygns ålder. Den horisontella streckade linjen visar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagningsmängd $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).



Figur 47. Ackumulerad avflagningsmängd hos betonger med $vct_{ekv}=0,40-0,50$ med 0-25 vikt-% flygaska av cement. Provningsstart vid 28 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur IA. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagningsmängd $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).

Från Figur 47 framgår att frostbeständigheten är mycket god för de flesta av de undersökta betongerna (maximal avflagningsmängd $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar). Betong från blandning 9 med $vct_{ekv}=0,40$ och 25 vikt-% flygaska av cementmängden får något högre avflagningsmängd än övriga undersökta betonger, men frostbeständigheten är trots allt mycket god även för denna betong.

Det är något oväntat att just betongen med $vct_{ekv}=0,40$ och 25 vikt-% flygaska av cementmängden får något högre avflagningsmängd eftersom normalt blir avflagningsmängden mindre ju lägre vct_{ekv} en betong har. En förklaring kan vara så kallad porblockering^{XIII}, vilket orsakas av att betongens porsystem är finporigt, som kan uppträda i betonger med tillsatser av bl.a. flygaska, se t.ex. Marsh (1984). Betongen med lägst vct_{ekv} och högst tillsats av flygaska får också störst totala mängd bindemedel, vilket också bidrar till att betongens porsystem blir finare. En motsvarande observation går att göra när betonger med flygaska får härda under längre tid och/eller förhöjd temperatur innan provning, där avflagningsmängden blir högre för dessa betonger, jämför Figur 27. Detta antas bero på att porsystemen i betongerna har blivit finare som ett

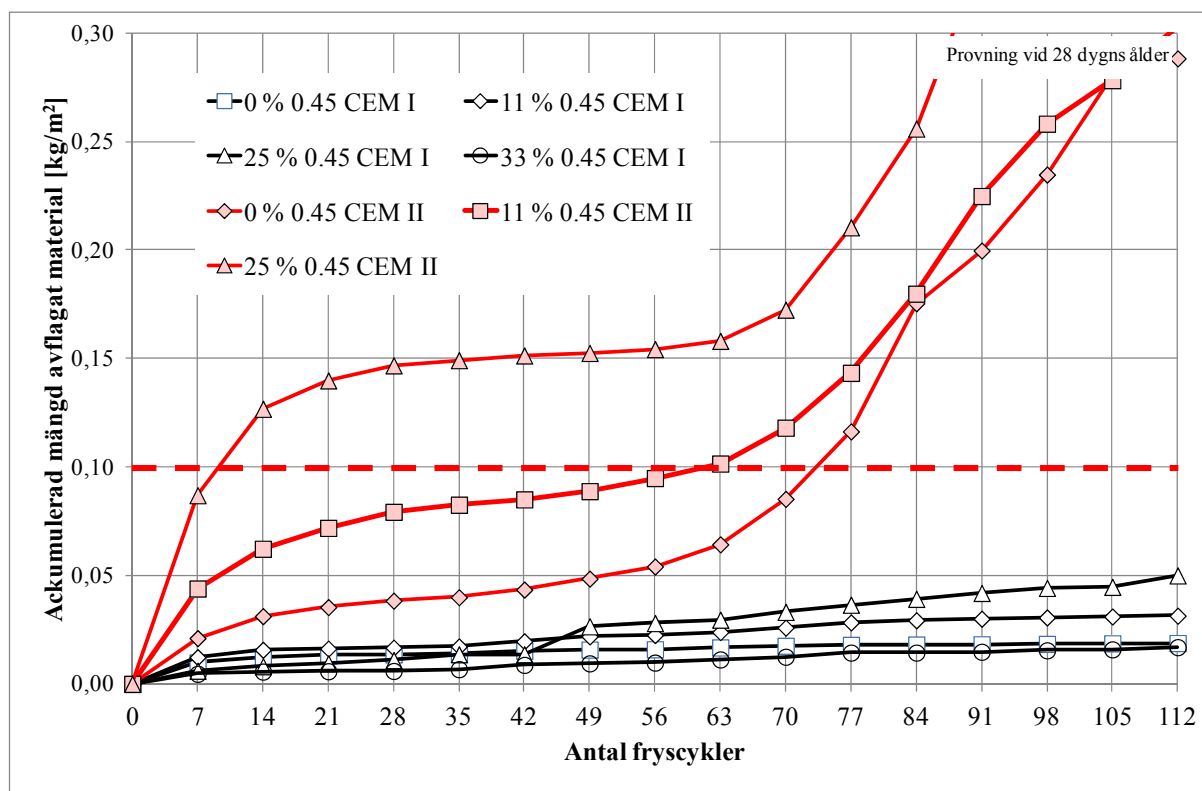
^{XIII} Porblockering innebär kortfattat att porsystemet i betong blir diskontinuerligt vid tillsatser av flygaska (och slag). Detta är huvudsakligen ett resultat av de extra hydrationsprodukter som bildas vid de pozzolana reaktionerna mellan flygaska och Portlandcement, som gör att porsystemet blir finare. Dessutom blir den totala mängden bindemedel större vid tillsatser av flygaska om $k < 1,0$. Ett finare porsystem bidrar i sin tur till att högre hydrauliska tryck kan byggas upp i samband med frysning, vilket också ökar risken för att betongen kan frysa sönder.

resultat av härdningen (medan lufthalten är oförändrad), vilket i sin tur medför att högre hydrauliska tryck kan byggas upp vid frysning med ökad risk för sönderfrysning.

Det är endast en betong som har ej acceptabel frostbeständighet, blandning 3 med $vct_{ekv}=0,50$ utan flygaska, där provkropparna frös sönder innan provningsperioden var slut. Detta är orsakat av att luftporsystemet i betongen inte har fått ett sådant utseende att betongen blev frostbeständig, trots att mätningar av lufthalten i den färska betongen visade att lufthalten var acceptabel, jfr

Tabell 13.

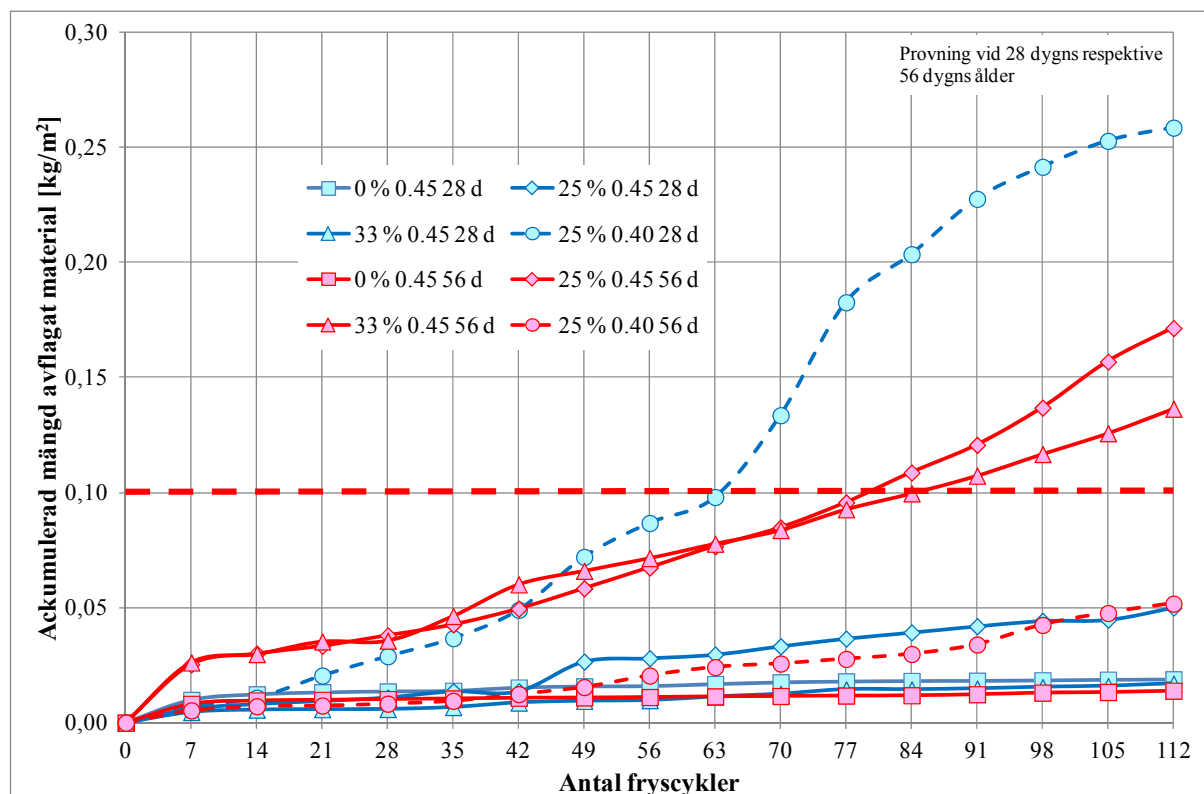
Frostbeständigheten hos betonger blandade med Cementa Anläggningscement (CEM I 42,5 N MH/SR/LA) och Cementa Byggcement (CEM II/A-LL 42,5 R). Betongerna har $v_{ct_{ekv}}=0,45$ och tillsatser av flygaska på 0 %, 11 % respektive 25 % av cementvikten. I Figur 48 redovisas ackumulerad mängd avflagt material för dessa betonger där provningen har inletts vid 28 dygns ålder. Den horisontella streckade linjen visar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagning $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).



Figur 48. Ackumulerad avflagning uppmätt hos betonger med $v_{ct_{ekv}}=0,45$ med 0-33 vikt- % flygaska av cementmängden (blandade med antingen CEM I eller CEM II). Provningsen inledd vid 28 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur IA. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagning $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).

Resultaten i Figur 48 visar att betongerna blandade med CEM II-cement har något sämre frostbeständighet än de som är blandade med CEM I-cement, oberoende av tillsatsen av flygaska. Flygaska förefaller alltså ha större negativ effekter när den blandas med CEM II-cement där bäst frostbeständighet uppnås i blandning 13 (0 % flygaska av cementvikten; mycket god frostbeständighet) och sämst frostbeständighet uppnås i blandning 15 (25 % flygaska av cementvikten, god frostbeständighet).

Effekten av förlängd härdningstid före provning illustreras i Figur 49, där avflagning uppmätt på samma betonger ($v_{ct_{ekv}}=0,45$ med 0 vikt-%, 25 vikt-% och 33 vikt-% flygaska av cement samt $v_{ct_{ekv}}=0,40$ med 25 vikt-% flygaska) där provningen inletts vid 28 dygns respektive 56 dygns ålder. Den horisontella streckade linjen visar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagning $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).



Figur 49. Ackumulerad avflagningsmängd uppmätt hos betonger med $vct_{ekv}=0,45$ med 0-33 vikt-% flygaska av cementmängden. Provningsen är inledd vid antingen 28 dygns eller 56 dygns ålder enligt SS 13 72 44, procedur 1A. Den horisontella streckade linjen illustrerar gränsen för mycket god frostbeständighet (maximal avflagningsmängd $0,10 \text{ kg/m}^2$ efter 56 fryscyklar).

Den något högre avflagningsmängden när provningen inleds vid 56 dygns ålder är speciellt tydlig för betonger med flygaska. Motsvarande observationer har gjorts i Knutsson (2000), där härdning under längre tid och/eller förhöjd temperatur resulterade i något högre avflagningsmängd, jfr Figur 26. Detta förklaras med att en förlängd härdningstid medför att betongens porsystem förtätas vilket i sin tur medför att högre hydrauliska tryck kan byggas upp i samband med frysning, se vidare i kapitel 4.3.4. Således är en förlängd härdningstid inte alltid fördelaktigt för betonger med flygaska för att förbättra frostbeständigheten.

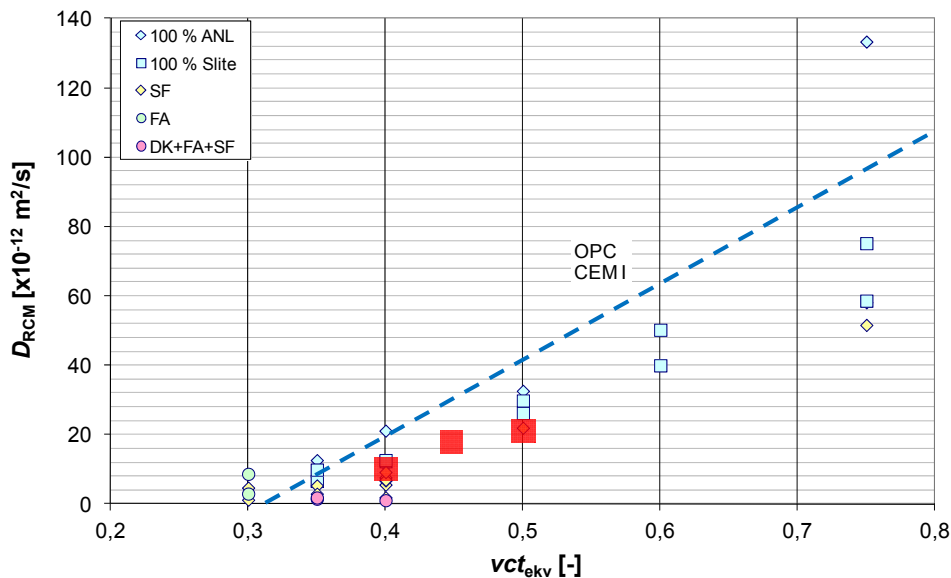
Resultaten som presenteras i Figur 46-Figur 48 visar att frostbeständigheten inte är något problem för betonger med flygaska i exponeringsklass XF 4, även vid relativt höga doseringar (även högre än de som föreskrivs i SS 13 70 03). Således är det möjligt att tillverka betonger med mycket god frostbeständighet med tillsatser av flygaska enligt vad som föreskrivs i SS 13 70 03 (dvs. maximalt tillåten tillsats i XF 4 är 25 vikt-% flygaska av CEM I). Dock förutsätter en god frostbeständighet att ett bra luftporsystem har skapats i betongen, vilket är ett generellt krav för betong och beror inte på om flygaska har blandats i eller inte. Ett bra luftporsystem har skapats genom att luftporbildande tillsatser har använts i samtliga betonger. Lufthalten i den färska betongen har också kontrollerats och vid behov har extra luftporbildande tillsatsmedel fått sättas till. Det visade sig att superplasticerande tillsatsmedel också fick användas för att få rimliga doseringar av det luftporbildande tillsatsmedlet.

6.4 Motstånd mot kloridinträngning

Resultaten visar generellt att betonger med tillsatser av flygaska får betydligt högre motstånd mot kloridinträngning än motsvarande betonger utan flygaska, se resultat som presenteras i Figur 41-Figur 43. Vid tillsatser av flygaska som överstiger 10-15 vikt-% av cementvikten minskar D_{RCM} med ca 20 % respektive 50 % jämfört med motsvarande Portlandcementbetong (vid 28 dygns respektive 56 dygns ålder). Detta är huvudsakligen ett resultat av flygaskans reaktioner samt att den totala mängden bindemedel blir större i betonger med flygaska (delvis eftersom $k=0,4$, så att mängden flygaska som blandas i betongen är större än mängden cement den ersätter). Detta betyder att effektivitetsfaktorn, för flygaska ($k=0,4$) är för låg om endast motstånd mot kloridinträngning studeras.

D_{RCM} minskar med ökande ålder, vilket är ett resultat av att både cement och flygaska fortsätter att reagera även efter 28 dygns ålder. Detta medför att betongens struktur blir tätare med tiden vilket i sin tur ökar motståndet mot inträngning av skadliga ämnen, t.ex. klorider. Ålderseffekten är speciellt tydlig för betonger med flygaska där ökande halt flygaska också ger större effekt. Detta är huvudsakligen ett resultat av att cementets men speciellt att flygaskans reaktioner fortskrider även efter 28 dygns ålder i större omfattning än för Portlandcement. Vidare kan den porblockering som antas uppstå bidra till att betongens täthet ökar och därmed också motståndet mot kloridinträngning.

Det finns en del mätningar av D_{RCM} rapporterade i litteraturen, se t.ex. i Tang (2003). I Figur 50 redovisas hur D_{RCM} som finns rapporterad i Tang (2003) varierar beroende vct_{ekv} (D_{RCM} omräknade till 28 dygns ålder), där också de D_{RCM} som har mätts upp i det aktuella projektet har lagts till (markerade med röda punkter, $vct_{ekv}=0,40-0,50$). De D_{RCM} som finns redovisade i Tang (2003) har mätts upp vid 180 dygns ålder och har räknats om till 28 dygns ålder enligt ekvation (5.3.1:1) i Nilsson et al (1997). Även de D_{RCM} som har mätts upp i detta projekt vid andra tider än 28 dygn har räknats om så att de gäller vid 28 dygn. En trendlinje har lagts till för att illustrera hur D_{RCM} varierar beroende på vct för betonger blandade med CEM I-cement.



Figur 50. Jämförelse mellan D_{RCM} rapporterade i litteraturen och uppmätta i det aktuella projektet (markerade med röda punkter, $vct_{ekv}=0,40-0,50$). Samtliga D_{RCM} är omräknade för att gälla vid 28 dygns ålder. Litteratordata från Tang (2003).

Från resultaten i Figur 50 framgår att D_{RCM} uppmätta i det aktuella projektet är i nivå med de resultat för betonger med flygaska som finns rapporterade i Tang (2003). Om en jämförelse görs med de data som finns rapporterade i Gehlen (2000), jfr Figur 17, framgår det dock att D_{RCM} uppmätta i det aktuella projektet är högre. Det finns flera troliga orsaker till detta, exempelvis har det cement som Gehlen använt, CEM I 42,5 R, andra egenskaper än de cement som har använts i det aktuella projektet.

Uppmätta D_{RCM} visar att betonger med inblandning av flygaska ökar betongens motstånd mot kloridinträngning markant. Motståndet mot kloridinträngning blir också större med ökande tillsatser av flygaska (upp till 33 vikt-% flygaska av cementmängden har undersökts i detta projekt) och vid längre härdningstider innan provning. Detta betyder att de maximalt tillåtna tillsatserna av flygaska i SS 13 70 03 (25 vikt-% flygaska av CEM I för betong i XD 1-3 samt XS 1-3) är något konservativa. Resultaten från detta projekt visar att högre tillsatser av flygaska i alla fall kan användas i konstruktioner exponerade för klorider för att förbättra beständigheten (upp till 33 vikt-% av CEM I). Vidare är det fördelaktigt ju längre tid betongen får härda innan den exponeras för klorider för första gången, speciellt för betonger med flygaska.

7 Avslutande kommentarer och rekommendationer

Mineraliska tillsatsmaterial har länge använts för att påverka och i vissa avseenden förbättra betongens egenskaper men med ökande krav på beständighet och minskad miljöbelastning så har intresset för och användningen av dessa produkter ökat, särskilt internationellt. De påverkar både värme- och hållfasthetsutvecklingen samt betongens täthet/permeabilitet varvid betongens förmåga att motstå sulfater ökar och transporten av klorider sker långsammare.

Syftet med SBUF-projekt 12382 ”Beständighetsegenskaper hos anläggningsbetong med stenkolsflygaska” har varit att undersöka och dokumentera egenskaperna hos betonger blandade med kombinationer av Portlandcement och olika mängder stenkolsflygaska. I projektet har det undersökts om egenskaperna hos betonger blandade med kombinationer av Portlandcement och stenkolsflygaska blir likvärdiga med egenskaper hos betong blandade med endast Portlandcement.

Den genomförda litteraturstudien och de undersökningar som har genomförts i Knutsson (2010) och i det aktuella projektet visar att **betonger med stenkolsflygaska** (som uppfyller de krav som finns definierade i SS-EN 450-1 och enligt de doseringar som anges i SS-EN 206-1 samt SS 13 70 03) **får likvärdiga egenskaper som motsvarande Portlandcementbetonger**. I vissa fall får betonger med inblandning av stenkolsflygaska även bättre egenskaper än motsvarande Portlandcementbetong.

7.1 Avslutande kommentarer

Följande avslutande kommentarer kan ges baserat på de resultat, med speciellt fokus på den genomförda laboratorieundersökningen, som presenteras i denna rapport:

- **Tryckhållfasthet.**
 - Tryckhållfastheten vid 28 dygns ålder är normalt ungefär samma för betonger med och utan tillsatser av flygaska om effektivitetsfaktorer (*k*-faktorer) har tillämpats. Effektivitetsfaktorerna är satta så att betonger med flygaska får samma hållfasthet efter 28 dygn som motsvarande Portlandcementbetonger.
 - Hållfasthetsutvecklingen upp till 28 dygn är normalt långsammare hos betonger med flygaska än för motsvarande Portlandcementbetonger. Efter 28 dygn är däremot hållfasthetsutvecklingen högre för betonger med flygaska än för motsvarande Portlandcementbetonger. Detta kan förklaras med att det tar ett tag innan flygaskans puzzolana reaktioner startar men att när reaktionerna väl har kommit igång fortskrider de även efter 28 dygns ålder i större utsträckning än för Portlandcement.
- **Frostbeständighet.**
 - Frostbeständigheten hos betonger med flygaska är normalt samma som för motsvarande Portlandcementbetonger, om SS-EN 206-1 och SS 13 70 03 följs (dvs. maximalt tillåten tillsats av flygaska är 25 vikt-% av CEM I för betong i exponeringsklass XF 4).
 - Den faktor som är avgörande för hur frostbeständigheten blir hos betong, oavsett om betongen innehåller flygaska eller inte, är luftporsystemets utseende

(storlek och fördelning hos luftporerna). Ett bra luftporsystem skapas normalt genom att luftporbildande tillsatsmedel sätts till vid blandning.

- För att skapa ett bra luftporsystem i betonger med flygaska visade det sig att det också krävdes tillsättning av superplasticerande tillsatsmedel för att uppnå önskade lufthalter med rimliga doseringar av luftporbildande tillsatsmedel. Försök gjordes att enbart använda luftporbildande tillsatsmedel i betonger med flygaska men då krävdes doseringar som var betydligt högre än de som tillverkaren rekommenderar.
- En förlängd härdningstid medför inte alltid en ökad frostbeständighet. Exempelvis visade det sig att betonger med flygaska som härdats under 56 dygn får något högre avflagning än de som härdats 28 dygn (dock fortfarande mycket god). Detta förklaras med att en förlängd härdning ger en förtätning av betongens porsystem som i sin tur medför att högre hydrauliska tryck kan bygga upp i samband med frysning och att risken för sönderfrysning också kan öka.
- **Motstånd mot kloridinträngning.**
 - Motståndet mot kloridinträngning är generellt högre för betonger med flygaska än för motsvarande Portlandcementbetonger. Maximalt tillåtna tillsatserna av flygaska i SS 13 70 03 (25 vikt-% flygaska av CEM I för betong i XD 1-3 samt XS 1-3) är något konservativa. Resultaten från detta projekt visar att högre tillsatser av flygaska (än 25 vikt-% av CEM I) kan användas i konstruktioner exponerade för klorider för att uppnå god beständighet (upp till 33 vikt-%).
 - En förlängd härdningstid medför att motståndet mot kloridinträngning ökar. Denna effekt är speciellt tydlig för betonger med flygaska, där motståndet ökar med upp till 45 % om härdningstiden ökar från 28 dygn till 56 dygn.

7.2 Rekommendationer

Baserat på de resultat som erhållits i detta projekt och det som finns redovisat i litteraturen anses att de mängder som tillåts i SS 13 70 03 är rimliga fast i vissa exponeringsklasser är de föreskrivna max-doseringarna konservativa. De begränsningar som anges i AMA Anläggning 10 anses dock vara alldeles för konservativa och de motverkar dessutom de gynnsamma effekter som fås vid inblandning av flygaska för begränsning av temperatursprickor och minskad miljöbelastning. Därför anses det angeläget att dessa regler ses över och att de harmoniserar med SS 13 70 03.

8 Referenser

ACI (1996), Use of Fly Ash in Concrete, ACI 232.2R-96, reported by ACI committee 232, American Concrete Institute, Farmington Hills, 1996.

AMA Anläggning 07 – Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten (2007), Svensk Byggtjänst, Stockholm, 2007. 742 sid.

AMA Anläggning 10 – Allmän material- och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten (2010), Svensk Byggtjänst, Stockholm, 2010. 780 sid.

ASTM (2005), ASTM C 618-05, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, 2005, 3 sid.

Beart, G., Poppe, A.-M. & de Belie, N. (2008), Strength and durability of high-volume fly ash concrete, *Structural Concrete*, Vol. 9, No. 2, sid. 101-108, 2008.

Bellmann, F. & Stark, J. (2007), Prevention of thaumasite formation in concrete exposed to sulphate attack, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, sid. 1215-1222, 2007.

Betonghandbok – Material (1994), utgåva 2, red. C. Ljungkrantz, G. Möller & N. Petersons, Svensk Byggtjänst, Stockholm, 1994. 1127 sid.

Bijen, J. (1996), Benefits of slag and fly ash, *Construction and Building Materials*, Vol. 10, sid. 309-314, 1996.

Bortz, B.S. (2010), Salt-scaling durability of fly ash concrete, Examensarbete, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2010.

Bouzoubaâ, N., Zhang, M.H. & Malhotra, V.M. (2000), Laboratory-produced high-volume fly ash blended cements. Compressive strength and resistance to the chloride-ion penetration of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, sid. 1037-1046, 2000.

Bouzoubaâ, N., Zhang, M.H. & Malhotra, V.M. (2001), Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, sid. 1393-1402, 2001.

Boyd, A.J. & Hooton, R.D. (2007), Long-Term Scaling Performance of Concretes Containing Supplementary Cementing Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, pp. 820-825.

BRE (2004), Alkali-silica reaction in concrete – Simplified guidance for new construction using normal reactivity aggregates, *BRE Digest 330*, Building Research Establishment (BRE), Watford, 2004.

BRE (2005), Concrete in aggressive ground, *BRE Special Digest 1:2005*, Building Research Establishment (BRE), Watford, 2005.

CEN (1995), Regional Specifications and Recommendations for the avoidance of damaging alkali silica reaction in concrete, CEN report CR 1904:1995, European Committee for

Standardization (CEN), Bryssel, 1995.

Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripahichgorn, A. & Jaturapitakkul, C. (2007), Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 965-971, 2007.

Cheekwaket, T., Jaturapitakkul, C. & Chalee, W. (2010), Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, sid. 1352-1357, 2010.

Cheekwaket, T., Jaturapitakkul, C. & Chalee, W. (2010), Long time performance of chloride binding capacity in a marine environment, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, sid. 1352-1357, 2010.

Choi, Y.-S., Kim, J.-G. & Lee, K.-M. (2006), Corrosion behaviour of steel bar embedded in fly ash concrete, *Corrosion Science*, Vol. 48, sid. 1733-1745, 2006.

Clark, L.A. (editor) (2002), Thaumasite Expert Group Report: Review after three years experiences, *The Thaumasite Expert Group*, Department of the Environment, Transport and the Regions, London, 2002.

COWI & Eminent (2009), Fly ash in production of high performance concrete in Denmark, Report, COWI AS, 2009.

Crammond, N.J., Collet, G.W. & Longworth, T.I. (2003), Thaumasite field trial at Shipston on Stour: three-year preliminary assessment of buried concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, sid. 1035-1043, 2003.

CUR (2008), Measures to prevent damage to concrete by alkali-silica reaction (ASR), CUR-Recommendation 89, CUR, Gouda, 2008.

Dhir, R.K. & Jones, M.R. (1999), Development of chloride-resisting concrete using fly ash, *Fuel*, Vol. 78, sid. 137-142, 1999.

Dhir, R.K., El-Mohr, M.A.K. & Dyer, T.D. (1997), Developing chloride resisting concrete using PFA, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, sid. 1633-1639, 1997.

Dhir, R.K., McCarthy, M.J. & Magee, B.J. (1998), Impact of BS EN 450 PFA on concrete construction in the UK, *Construction and Building Materials*, Vol. 12, sid. 59-74, 1998.

Dodson, V.H. (1990), Concrete admixtures, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

DuraCrete (2000), Statistical Quantification of the Variable in the Limit State Functions, Document BE95-1347/R9, The European Union – Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda, 2000.

Fagerlund, G. (1997), Internal frost attack – State of the art, i proceedings från RILEM Workshop om *Resistance of concrete to freezing and thawing with or without de-icing chemicals*, redigerad av. Setzer M.J. and Auberg R., Essen, 1997

Färdig Betong (2009), Opublicerade data med resultat från provning av frostbeständighet enligt SS 13 72 44.

Ferraris, C.F., Stutzman, P.E. & Snyder, K.A. (2006), Sulfate Resistance of Concrete: A New

Approach, *PCA R&D Serial No. 2496*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2006.

Gai-Fei Peng, Quing Ma,,Hong-Mei Hu, Ri Gao, Qian-Feng Yao & Ye-Feng Liu (2007), The effect of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50-60 Mpa grade concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, sid. 1034-1039, 2007.

Gehlen, C. (2000), Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion (Probabilistisk livslängdsdimensionering av armerade betongkonstruktioner – studier av tillförlitlighet för att undvika uppkomst av armeringskorrosion), Heft 510, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Berlin, 2000, 106 sid. (på tyska).

Glass, G.K. & Buenfeld, N.R. (2000), The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete, *Corrosion Science*, Vol. 42, sid. 329-344, 2000.

Headwaters Resources (2010), Fly Ash for Concrete, Informationsbroschyr om flygaska i betong som finns tillgänglig elektroniskt på www.flyash.com.

Hicks, J.K.P.E., Riley, M., Schumacher, G., Patel, R. & Sampson, P. (2009), Utilization of Recovered Materials for High Quality Cements and Products, i proceedings från 2009 *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Lexington, 2009.

Ji, G. (2008), Cracking risk of concrete structures in the hardening phase: Experiments, material modelling and finite element analysis, Doctoral Thesis, Department of Structural Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2008.

Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S. & Leelawat, T. (2006), A study on carbonation depth perdition for fly as concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 20, sid. 744-753, 2006.

Knutsson, A. (2010), Freeze/Thaw Durability of Concrete with Fly Ash, Master's Thesis 2010:154, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Building Technology/Building Materials, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2010.

Külaots, I., Hsu, A., Hurt, R.H. & Solberg, E.M. (2003), Adsorption of surfactants on unburned carbon in fly ash and development of a standardized foam index test, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, sid. 2091-2099, 2003.

Langan, B.W., Weng, K. & Ward, M.A. (2002), Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland Cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, sid. 1045-1051, 2002.

Larson, T.D. (1964), Air entrainment and durability aspects of fly ash concrete, *Proceedings of the American Society for Testing and Materials*, Vol. 64, sid. 866-886, 1964.

Lawrence, P., Cyr, M., and Ringot, E. (2005), Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength, *Cement and Concrete Research*, Vol 35 (2005) sid. 1092–1105.

Ley, M.T., Harris, N.J., Folliard, K.J. & Hover, K.C. (2008), Investigation of Air-Entraining Admixture Dosage in Fly Ash Concrete, *ACI Material Journal*, September-October, sid. 494-

498, 2008.

Li, B. (2009), Chloride Transport in Concrete under the Frost Action – An Experimental Study, Lic 2009:4, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2009.

Malhotra, V.M. & Ramezaniapour, A.A. (1994), Fly ash in concrete, second edition *CAN-MET*, Natural Resources Canada, Ottawa, 1994.

Malhotra, V.M. (1990), Durability of concrete incorporating high-volume low-calcium (ASTM class F) fly ash, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 12, sid. 271-277, 1990.

Marsh, B.K. (1984), Relationships between engineering properties and microstructural characteristics of hardened cement paste containing pulverized-fuel ash as a partial cement replacement, PhD-thesis, The Hatfield Polytechnic, Hatfield, 1984.

Mohammed, T.U. & Hamada, H. (2003), Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, sid. 1487-1490, 2003.

Mulenga, D.M., Stark, J. & Nobst, P. (2003), Thaumasite formation in concrete and mortars containing fly ash, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, sid. 907-912, 2003.

Neville, A.M. (2000), Properties of Concrete, fourth edition. Pearson Education Limited.

Nilsson, L.-O., Poulsen, E., Sandberg, P., Sørensen, H.E. & Klinghoffer, O. (1996), Chloride Penetration into concrete – State of the Art – Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models, HETEK report No. 53, Vejdirektoratet, København, 1996. 150 sid.

Nilsson, L.-O., Sandberg, P., Poulsen, E., Tang, L., Andersen, A & Frederiksen, J.M. (1997), A System for estimation of Chloride ingress into Concrete – Theoretical background, HETEK report No. 83, Vejdirektoratet, København, 1997.

Oner, A., Akyuz, S., and Yildiz, R. (2005), An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) sid. 1165–1171.

Page, C.L., Short, N.R. & Holden, W.R. (1986), The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel, *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, sid. 79-86, 1986.

Park, C.K., Noh, M.H. & Park, T.H. (2005), Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, sid. 842-849, 2005.

Pedersen, K.H., Jensen, A.D., Skjøth-Rusmussen, M.S. & Dam-Johansen, K. (2008), A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete, *Progress in energy and combustion science*, Vol. 34, sid. 135-154, 2008.

Pigeon, M., Marchand, J. & Pleau, R. (1996), Frost resistant concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 10, sid. 339-348, 1996.

Rønning, T.F. (2001), Freeze-Thaw Resistance of Concrete. Effect of: Curing Conditions, Moisture Exchange and Materials, *PhD-thesis*, Division of Structural Engineering – Concrete

Section, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 2001.

Sahmaran, M., Yaman, I.Ö. & Tokay, M. (2009), Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, sid. 99-106, 2009.

SBUF (2009), Egenskaper för självkompakterande betong med flygaska, *SBUF Informerar 09:29*, SBUF, Stockholm, 2009.

Schiessl, P., Wiens, U., Schröder, P & Müller, C. (2001), Neue Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Beton mit Steinkohlenflugasche (Nya rön rörande egenskaperna hos betong blandad med stenkolsflygaska), *Beton*, Vol. 1-2, 2001.

Schnell, A. (2000), Einfluss der Carbonatisierung auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton mit mineralischen Zusatzstoffen (Inverkan från karbonatisering på beständigheten med avseende på saltfrostan grepp hos betong med mineraliska tillsatsmaterial), Examensarbete, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität, Weimar, 2000.

Shayan, A., Diggins, R. & Ivanusec, I. (1996), Effectiveness of fly ash in preventing deleterious expansion due to alkali-aggregate reaction in normal and steam-cured concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 26, sid. 153-164, 1996.

SIS (1995), Betongprovning - Hårdnad betong - Betongkuber för frysprovning, Svensk standard SS 13 72 45, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 1995.

SIS (2001), Betong - Del 1: Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse, Svensk standard SS-EN 206-1, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 2005.

SIS (2005a), Flygaska för betong – Del 1: Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse, Svensk standard SS-EN 450-1, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 2005.

SIS (2005b), Flygaska för betong - Del 2: Utvärdering av överensstämmelse, Svensk standard SS-EN 450-2,

SIS (2005c), Betongprovning - Hårdnad betong - Avflagning vid frysning, Svensk standard SS 13 72 44, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 2005.

SIS (2005d), Tillsatsmedel till betong, bruk och injekteringsbruk - Provning - Del 11: Luftporkarakteristika i hårdnad betong, Svensk standard SS-EN 480-11, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 2005.

SIS (2008), Betong - Användning av EN 206-1 i Sverige, Svensk standard SS 13 70 03, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 2008.

SIS (2009a), Provning av färsk betong - Del 2: Sättningsmetoder, Svensk standard SS-EN 12350-2, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 2009.

SIS (2009b), Provning av färsk betong - Del 7: Lufthalt - Tryckmetoder, Svensk standard SS-EN 12350-7, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 2009.

SIS (2011a), Cement - Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement, Svensk standard SS-EN 197-1, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 2011.

SIS (2011b), Provning av hårdnad betong - Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar, Svensk standard SS-EN 12390-3, SIS – Svenska standardiseringsinstitutet, Stockholm, 2011.

Skalny, J., Marchand, J. & Odler, I. (2002), Sulfate Attack on Concrete, *Modern Concrete Technology Series*, Spon Press, New York, 2002.

Skarapoulou, A., Tsivilis, S., Kakali, G., Sharp, J.H. & Swamy, R.N. (2009), Thaumasite form of sulphate attack in limestone cement mortars: A study on long term efficiency of mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, sid. 2338-2345, 2009.

Spörel, F., Uebachs, S. & Brameshuber, W. (2009), Investigations on the influence of fly ash on the formatino and stability of artificially entrained air voids in concrete, *Materials and Structures*, Vol. 42, sid. 227-240, 2009.

Stark, D. (1989), Durability of Concrete in Sulfate-Rich Soils, *Research and Development Bulletin RD097.01T*, Portland Cement Association, Skokie Illinois, 1989.

Stephens, J.B. & Caraspuillo, R.L. (2000), Evaluating performance based test and specifications for sulphate resistance in concrete, Research Project 0-1706, Center for Transpsortation Research, University of Texas in Austin, 2000.

Svenska Betongföreningen (2006), Vägledning för livslängdsdimensionering av betongkonstruktioner, Betongrapport 12, Svenska Betongföreningen, Stockholm, 2006.

Tang, L. (1996), Chloride Transport in Concrete – Measurements and Prediction, Publication P-96:6, Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, 1996.

Tang, L. (2003), Chloride Ingress in Concrete Exposed to Marine Environment – Field data up to 10 years exposure, SP REPORT 2003:16, Sveriges forsknings- och provningsinstitut, SP, Borås, 2003.

Tange Jepsen, M., Munch-Petersen, C. & Bager, D. (2001), Durability of Resource Saving "Green" Types of Concrete, i proceedings från *fib-symposium om Concrete and Environment*, Berlin, 2001.

Taylor, H.F.W. (1997), Cement Chemistry, Andra upplagan, Thomas Telford, London, 1997.

Thomas, M. (1996), Chloride thresholds in marine concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 26, sid. 513-519, 1996.

Thomas, M., Dunster, A., Nixon, P. & Blackwell, B. (2011), Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction – Exposure site studies, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, sid. 359-367, 2011.

Thomas, M.D.A. & Bamforth, P.B. (1999), Modelling chloride diffusion in concrete – Effect of fly ash and slag, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, sid. 487-495. 1999.

Thomas, M.D.A. & Matthews, J.D. (1992), Carbonation of fly ash concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 44, sid. 218-228, 1992.

Thomas, M.D.A. & Matthews, J.D. (1994), Durability of pfa concrete, *BRE Report*, Building Research Establishment (BRE), Watford, 1994.

Thomas, M.D.A. & Matthews, J.D. (2004), Performance of pfa concrete in a marine envi-

ronment – 10-year results, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, sid. 5-20, 2004.

Thomas, M.D.A. (1997), Laboratory and field studies of salt scaling in fly ash concrete, i proceedings från *International RILEM workshop on Frost Resistance of Concrete* (eds. M.J. Setzer & R. Auberg), Essen, sid. 21-30, 1997.

Tuutti, K. (1982), Corrosion of steel in concrete, fo 4.82, CBI (Cement och Betonginstitutet), Stockholm, 1982.

UK Quality Ash Association (2010), The Power behind PFA, Informationsbroschyr nedladdad från www.ukqaa.org.uk.

Utsi, S. (2008), Performance Based Concrete Mix-Design – Aggregate and Micro Mortar Optimization Applied on Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash, Doctoral thesis 2008:49, Division of Structural Engineering, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, 2008.

Vargas, J.A. (2007), Practical Design: A Supplement to Academics. A Designer's View of Fly Ash Concrete – A summary of benefits and precautions, *Concrete International*, February, sid. 43-46, 2007.

Virtanen, J. (1983), Freeze-thaw resistance of concrete containing blast-furnace slag, fly ash or condensed silica fume, i proceedings från *1st international Conference on the Use of Fly Ash, Silica fume, and Other Mineral By-products in Concrete*, redigerad av V.M. Malhotra, Montebello, sid. 923-942, 1983.

Bilaga A. Resultat från bestämning tryckhållfasthet enligt SS-EN 12390-3

Bilaga A. Resultat från provning av tryckhållfasthet enligt SS-EN 12390-3

Provning utförd vid 7 dygns ålder

I Tabell 1 presenteras resultaten från provning av tryckhållfasthet enligt SS-EN 12390-3 utförd vid 7 dygns ålder. Provning utförd på 1-2 provkroppar per blandning.

Tabell 1. Resultat från provning av tryckhållfasthet. Provning utförd vid 7 dygns ålder.

Blandning/ provkropp	vct [-]	FA [%]	Vikt [g]	Kraft [kN]	Densitet [kg/m ³]	Hållfasthet [MPa]
1#1	0,40	0	7865	1047,0	2330,4	46,5
1#2	0,40	0	7914	1032,0	2344,9	45,9
2	0,45	0	7675	671,9	2263,3	29,7
3#1	0,50	0	7876	794,7	2341,3	35,1
3#2	0,50	0	7945	775,7	2336,8	34,1
4#1	0,45	6	7787	807,4	2293,7	35,3
4#2	0,45	6	7729	817,5	2288,0	36,0
5#1	0,50	11	7769	652,9	2279,6	28,4
5#2	0,50	11	7886	632,9	2196,0	27,6
6	0,45	11	7672	795,0	2267,1	35,2
7#1	0,40	11	7633	855,0	2254,9	37,6
7#2	0,40	11	7815	869,7	2263,9	37,7
8#1	0,45	18	7734	723,9	2280,1	31,5
8#2	0,45	18	7759	716,0	2270,0	31,4
9	0,40	25	7874	1105,0	2311,1	48,6
10	0,45	25	7768	823,7	2287,4	36,5
11	0,50	25	7671	555,1	2266,2	24,6
12#1	0,45	33	7674	708,5	2277,2	31,3
12#2	0,45	33	7679	708,4	2282,7	31,5
13#1	0,45	0	7828	956,1	2278,9	41,8
13#2	0,45	0	7773	1014,0	2297,7	45,0
14#1	0,45	11	7746	895,2	2277,6	39,2
14#2	0,45	11	7763	929,6	2286,6	40,9
15#1	0,45	25	7751	872,2	2279,0	38,0
15#2	0,45	25	7791	890,7	2284,1	39,1

Provning utförd vid 28 dygns ålder

I Tabell 2 presenteras resultaten från provning av tryckhållfasthet enligt SS-EN 12390-3 utförd vid 28 dygns ålder. Provning utförd på 2-3 provkroppar per blandning.

Tabell 2. Resultat från provning av tryckhållfasthet. Provning utförd vid 28 dygns ålder.

Blandning/ provkropp	vct [-]	FA [%]	Vikt [g]	Kraft [kN]	Densitet [kg/m ³]	Hållfasthet [MPa]
1#1	0,40	0	7930	1344,0	2320,1	58,7
1#2	0,40	0	8019	1308,0	2321,7	57,6
1#3	0,40	0	7858	1284,0	2316,6	56,8
2#1	0,45	0	7838	1060,0	2288,5	46,3
2#2	0,45	0	7831	1063,0	2285,1	46,2
3#1	0,50	0	8018	1107,0	2349,9	48,5
3#2	0,50	0	7952	1132,0	2346,4	49,8
3#3	0,50	0	7952	1165,0	2344,3	51,3
4#1	0,45	6	7812	1130,0	2298,3	49,6
4#2	0,45	6	7755	1133,0	2292,3	50,0
4#3	0,45	6	7786	1135,0	2299,5	50,0
5#1	0,50	11	7815	920,6	2263,2	39,9
5#2	0,50	11	7746	921,9	2276,2	40,3
5#3	0,50	11	7857	947,8	2266,2	41,3
6#1	0,45	11	7778	1170,0	2275,6	51,1
6#2	0,45	11	7730	1219,0	2289,7	53,5
6#3	0,45	11	7708	1081,0	2266,4	47,9
7#1	0,40	11	7771	1166,0	2268,9	50,9
7#2	0,40	11	7844	1179,0	2267,1	51,2
7#3	0,40	11	7780	1172,0	2272,2	51,2
8#1	0,45	18	7739	1040,0	2265,3	45,7
8#2	0,45	18	7745	1073,0	2264,6	47,1
8#3	0,45	18	7810	1053,0	2268,7	45,9
9#1	0,40	25	7985	1431,0	2338,2	62,2
9#2	0,40	25	7917	1336,0	2310,9	58,3
9#3	0,40	25	7983	1436,0	2313,2	62,4
10#1	0,45	25	7820	1129,0	2292,6	49,2
10#2	0,45	25	7789	1091,0	2299,0	47,9
10#3	0,45	25	7747	1122,0	2300,9	50,1
11#1	0,50	25	7726	876,0	2272,4	38,6
11#2	0,50	25	7651	873,6	2265,6	38,4
11#3	0,50	25	7693	894,0	2280,1	39,3
12#1	0,45	33	7744	1067,0	2289,8	46,8
12#2	0,45	33	7749	1038,0	2277,8	45,1
12#3	0,45	33	7697	1034,0	2313,5	45,6
13#1	0,45	0	7887	1086,0	2300,8	47,3
13#2	0,45	0	7836	1117,0	2306,7	49,1
13#3	0,45	0	7914	1137,0	2305,3	49,5
14#1	0,45	11	7764	1048,0	2283,5	46,1

Blandning/ provkropp	vct [-]	FA [%]	Vikt [g]	Kraft [kN]	Densitet [kg/m³]	Hållfasthet [MPa]
14#2	0,45	11	7769	1097,0	2289,0	48,3
14#3	0,45	11	7782	1047,0	2288,2	46,0
15#1	0,45	25	7813	1047,0	2302,0	46,1
15#2	0,45	25	7799	1066,0	2297,9	46,9
15#3	0,45	25	7812	1067,0	2294,3	46,7

Provning utförd vid 56 dygns ålder

I Tabell 3 presenteras resultaten från provning av tryckhållfasthet enligt SS-EN 12390-3 utförd vid 56 dygns ålder. Provning utförd på 2-3 provkroppar per blandning.

Tabell 3. Resultat från provning av tryckhållfasthet. Provning utförd vid 56 dygns ålder.

Blandning/ provkropp	vct [-]	FA [%]	Vikt [g]	Kraft [kN]	Densitet [kg/m ³]	Hållfasthet [MPa]
1#1	0,40	0	7976	1441,0	2324,0	63,2
1#2	0,40	0	7924	1452,0	2328,5	63,8
2#1	0,45	0	7877	1188,0	2287,8	51,2
2#2	0,45	0	7848	1134,0	2283,4	49,5
2#3	0,45	0	7779	1135,0	2271,2	49,8
3#1	0,50	0	7960	1266,0	2343,2	55,5
3#2	0,50	0	7932	1305,0	2353,7	57,5
4#1	0,45	6	7816	1184,0	2286,0	51,9
4#2	0,45	6	7776	1229,0	2293,8	54,6
5#1	0,50	11	7771	1306,0	2262,3	56,8
5#2	0,50	11	7751	1331,0	2281,7	58,8
6#1	0,45	11	7800	1348,0	2285,4	59,0
6#2	0,45	11	7813	1366,0	2283,8	59,6
7#1	0,40	11	7764	1073,0	2276,8	46,9
7#2	0,40	11	7829	1064,0	2279,2	46,2
8#1	0,45	18	7750	1205,0	2282,1	52,6
8#2	0,45	18	7746	1203,0	2286,3	53,4
8#3	0,45	18	7747	1212,0	2280,5	53,9
9#1	0,40	25	7922	1626,0	2320,4	71,1
9#2	0,40	25	7949	1545,0	2314,8	67,8
10#1	0,45	25	7794	1329,0	2306,6	58,6
10#2	0,45	25	7807	1329,0	2298,2	58,3
11#1	0,50	25	7704	1047,0	2280,0	46,4
11#2	0,50	25	7762	1057,0	2286,3	47,0
12#1	0,45	33	7714	1216,0	2281,6	53,5
12#2	0,45	33	7692	1215,0	2278,4	53,6
12#3	0,45	33	7734	1228,0	2288,8	54,0
13#1	0,45	0	7786	1129,0	2284,0	49,3
13#2	0,45	0	7865	1245,0	2295,0	54,8
14#1	0,45	11	7776	1163,0	2283,0	51,2
14#2	0,45	11	7826	1147,0	2287,0	50,5
15#1	0,45	25	7818	1155,0	2296,0	50,4
15#2	0,45	25	7823	1170,0	2294,8	51,5

Bilaga B. Resultat från bestämning av frostbeständighet enligt SS 13 72 44

Bilaga B. Resultat från provning av frostbeständighet enligt SS 13 72 44

Provning inledd vid 28 dygns ålder

I Tabell 1-Tabell 13 presenteras resultaten från provning av frostbeständighet provad enligt SS 13 72 44, procedur IA. Provning inledd vid 28 dygns ålder. Resultat från blandning 5 ($v_{ct_{ekv}}=0,40$, 11 % flygaska, CEM I-cement) och blandning 7 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 11 % flygaska, CEM I-cement) föreligger ej. Detta på grund av att provningen av misstag inleddes vid en ålder av 56 dygn istället för vid 28 dygn, vilket medförde att dessa betonger inte provades. Dock är troligen frostbeständigheten för dessa betonger mycket god (maximal avflagning 0,10 kg/m² efter 56 fryscykler).

Tabell 1. Ackumulerad avflagning uppmätt hos betonger från blandning 1 ($v_{ct_{ekv}}=0,40$, 0 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,004	0,004	0,005	0,006	0,006	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010	0,012	0,014	0,017	0,023	0,026	0,029		
II	0,000	0,002	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,006	0,007	0,007	0,009	0,011	0,014	0,021	0,028	0,034		
Medelvärde	0,000	0,003	0,003	0,004	0,005	0,005	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,011	0,013	0,016	0,022	0,027	0,032	1,415	3,947
Standardavvikelse		0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,004		
COV [%]		45,8	45,8	22,8	21,5	22,8	22,4	19,7	18,3	23,1	23,5	15,8	17,4	13,4	6,3	2,8	11,6		

Tabell 2. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 2 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 0 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,007	0,008	0,008	0,008	0,009	0,010	0,011	0,011	0,012	0,012	0,013	0,013	0,013	0,013	0,014	0,014		
II	0,000	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009	0,010	0,010	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011		
III	0,000	0,011	0,016	0,017	0,017	0,017	0,019	0,020	0,020	0,020	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022		
IV	0,000	0,014	0,018	0,020	0,021	0,022	0,023	0,024	0,024	0,026	0,027	0,027	0,027	0,028	0,028	0,029	0,029		
Medelvärde	0,000	0,010	0,012	0,013	0,014	0,014	0,015	0,016	0,016	0,017	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,019	0,019	1,173	1,121
Standardavvikelse		0,004	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008		
COV [%]		37,5	43,9	48,1	47,7	47,8	45,4	44,8	43,7	44,0	43,3	41,9	42,0	41,8	42,2	42,9	43,0		

Tabell 3. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 3 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 0 % flygaska, CEM I-cement). Provning avslutad efter 63 fryscykler eftersom provkropparna då var sönderfrysta. Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}^a	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,124	0,440	1,035	1,519	2,000	2,621	2,866	3,175	3,274	3,274	3,274	3,274	3,274	3,274	3,274	3,274		
II	0,000	0,125	0,430	0,922	1,362	1,812	2,299	2,339	2,472	2,563	2,563	2,563	2,563	2,563	2,563	2,563	2,563		
Medelvärde	0,000	0,124	0,435	0,978	1,441	1,906	2,460	2,602	2,824	2,918	2,918	2,918	2,918	2,918	2,918	2,918	2,918	1,960	1,000
Standardavvikelse		0,001	0,008	0,080	0,111	0,133	0,228	0,373	0,497	0,502	0,502	0,502	0,502	0,502	0,502	0,502	0,502		
COV [%]		0,6	1,7	8,1	7,7	7,0	9,3	14,3	17,6	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2		

a. Provningen avslutades efter 63 fryscykler eftersom provkropparna då var sönderfrysta och läckte frysvätska.

Tabell 4. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 4 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 6 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,008	0,010	0,013	0,015	0,016	0,017	0,018	0,018	0,019	0,020	0,021	0,021	0,022	0,024	0,026	0,029		
II	0,000	0,008	0,014	0,017	0,021	0,023	0,024	0,025	0,026	0,028	0,029	0,031	0,033	0,036	0,039	0,042	0,049		
Medelvärde	0,000	0,008	0,012	0,015	0,018	0,019	0,020	0,022	0,022	0,024	0,024	0,026	0,027	0,029	0,031	0,034	0,039	1,239	1,667
Standardavvikelse		0,000	0,003	0,003	0,004	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,009	0,010	0,011	0,011	0,014		
COV [%]		0,4	25,7	19,2	24,6	25,9	24,4	24,3	26,3	25,1	26,9	28,3	32,1	34,5	33,8	31,8	35,6		

Tabell 5. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 6 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 11 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,015	0,020	0,020	0,020	0,021	0,022	0,023	0,024	0,025	0,026	0,027	0,028	0,028	0,028	0,028	0,029		
II	0,000	0,007	0,009	0,009	0,010	0,011	0,014	0,018	0,019	0,020	0,023	0,026	0,027	0,027	0,028	0,028	0,029		
III	0,000	0,006	0,007	0,008	0,008	0,009	0,012	0,014	0,015	0,017	0,021	0,025	0,027	0,028	0,029	0,029	0,029		
IV	0,000	0,021	0,027	0,028	0,028	0,029	0,030	0,032	0,032	0,033	0,035	0,036	0,036	0,037	0,038	0,038	0,039		
Medelvärde	0,000	0,012	0,016	0,016	0,017	0,017	0,020	0,022	0,023	0,024	0,026	0,028	0,029	0,030	0,031	0,031	0,031	1,348	1,316
Standardavvikelse		0,007	0,010	0,009	0,009	0,009	0,008	0,008	0,007	0,007	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005		
COV [%]		59,4	61,1	57,3	56,2	52,7	42,3	34,9	32,7	29,2	23,7	17,4	16,3	16,1	15,0	15,4	16,5		

Tabell 6. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 8 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 18 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,010	0,010	0,010	0,010	0,012	0,013	0,014	0,014	0,017	0,020	0,021	0,022		
II	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,014	0,014	0,014	0,015	0,015	0,015	0,016	0,016	0,016	0,017	0,017	0,018		
Medelvärde	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,012	0,012	0,012	0,013	0,013	0,014	0,015	0,015	0,017	0,018	0,019	0,020	1,139	1,488
Standardavvikelse		0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003		
COV [%]	-	-	-	-	27,9	23,2	22,8	22,8	23,8	16,5	11,8	7,2	6,0	3,4	12,1	12,5	12,8		

Tabell 7. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 9 ($v_{ct_{ekv}}=0,40$, 25 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,007	0,012	0,020	0,025	0,034	0,043	0,046	0,063	0,079	0,127	0,173	0,194	0,222	0,231	0,241	0,244		
II	0,000	0,007	0,009	0,020	0,030	0,039	0,057	0,084	0,095	0,103	0,128	0,172	0,198	0,231	0,250	0,271	0,281		
III	0,000	0,006	0,009	0,019	0,032	0,040	0,053	0,092	0,108	0,121	0,164	0,233	0,257	0,278	0,293	0,301	0,307		
IV	0,000	0,009	0,014	0,023	0,028	0,034	0,044	0,066	0,081	0,088	0,115	0,152	0,165	0,179	0,192	0,198	0,202		
Medelvärde	0,000	0,007	0,011	0,020	0,029	0,037	0,049	0,072	0,087	0,098	0,134	0,183	0,204	0,228	0,241	0,253	0,259	3,005	2,637
Standardavvikelse		0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,007	0,020	0,019	0,019	0,021	0,035	0,039	0,040	0,042	0,044	0,046		
COV [%]		20,8	21,8	9,7	9,7	8,4	14,1	28,4	22,4	18,9	15,8	19,1	19,0	17,8	17,3	17,2	17,8		

Tabell 8. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 10 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 25 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,008	0,013	0,017	0,018	0,023	0,023	0,037	0,040	0,044	0,052	0,061	0,068	0,075	0,082	0,083	0,097		
II	0,000	0,005	0,006	0,006	0,009	0,011	0,011	0,016	0,017	0,018	0,018	0,019	0,020	0,020	0,020	0,020	0,022		
III	0,000	0,004	0,005	0,005	0,006	0,007	0,007	0,026	0,027	0,027	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,031		
Medelvärde	0,000	0,006	0,008	0,009	0,011	0,014	0,014	0,027	0,028	0,030	0,033	0,037	0,039	0,042	0,044	0,045	0,050	2,552	1,689
Standardavvikelse		0,002	0,004	0,006	0,007	0,009	0,009	0,010	0,011	0,013	0,017	0,022	0,026	0,029	0,033	0,034	0,041		
COV [%]		35,0	53,1	66,1	60,6	63,8	63,8	39,0	39,8	44,7	50,9	59,2	65,1	69,8	74,9	75,8	82,6		

Tabell 9. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 11 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 25 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,007	0,007		
II	0,000	0,008	0,011	0,011	0,012	0,014	0,016	0,017	0,017	0,019	0,023	0,025	0,030	0,034	0,039	0,039	0,042		
III	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,006	0,006	0,007	0,007	0,008	0,009	0,010		
IV	0,000	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,006	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,009		
Medelvärde	0,000	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,008	0,010	0,011	0,013	0,014	0,016	0,016	0,017	1,500	2,212
Standardavvikelse		0,003	0,004	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,008	0,009	0,009	0,012	0,013	0,015	0,016	0,017		
COV [%]		100,3	104,0	102,4	103,0	105,0	102,0	103,0	99,2	99,8	90,0	86,5	92,7	95,7	99,3	98,4	97,9		

Tabell 10. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 12 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 33 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,007	0,008	0,008	0,009	0,010	0,011	0,011	0,012	0,012	0,013	0,014		
II	0,000	0,006	0,008	0,008	0,008	0,009	0,011	0,011	0,011	0,014	0,015	0,017	0,017	0,018	0,019	0,019	0,020		
Medelvärde	0,000	0,005	0,006	0,006	0,006	0,007	0,009	0,009	0,010	0,011	0,013	0,014	0,014	0,015	0,015	0,016	0,017	1,646	1,503
Standardavvikelse		0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,004		
COV [%]		44,0	49,4	44,6	44,3	44,0	32,3	22,6	22,1	30,4	29,4	29,9	29,9	28,0	29,7	30,0	25,6		

Tabell 11. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 13 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 0 % flygaska, CEM II-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,022	0,031	0,034	0,036	0,038	0,043	0,049	0,057	0,067	0,091	0,119	0,174	0,211	0,267	0,274	0,289		
II	0,000	0,020	0,031	0,037	0,040	0,042	0,044	0,048	0,051	0,062	0,080	0,114	0,177	0,189	0,203	0,285	0,288		
Medelvärde	0,000	0,021	0,031	0,035	0,038	0,040	0,043	0,049	0,054	0,064	0,085	0,116	0,175	0,200	0,235	0,280	0,288	1,411	4,482
Standardavvikelse		0,002	0,000	0,002	0,003	0,003	0,001	0,000	0,004	0,004	0,008	0,003	0,002	0,016	0,045	0,008	0,001		
COV [%]		8,8	0,1	5,2	7,5	8,3	1,7	0,3	7,0	6,0	9,1	2,8	1,1	7,8	19,2	2,8	0,2		

Tabell 12. Ackumulerad avflagning uppmätt hos betonger från blandning 14 ($vct_{ekv}=0,45$, 11 % flygaska, CEM II-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,038	0,056	0,060	0,063	0,066	0,067	0,069	0,071	0,074	0,085	0,102	0,132	0,174	0,195	0,203	0,212		
II	0,000	0,050	0,068	0,084	0,095	0,100	0,103	0,109	0,118	0,129	0,151	0,185	0,228	0,276	0,321	0,353	0,394		
Medelvärde	0,000	0,044	0,062	0,072	0,079	0,083	0,085	0,089	0,095	0,102	0,118	0,143	0,180	0,225	0,258	0,278	0,303	1,196	2,985
Standardavvikelse		0,008	0,009	0,016	0,023	0,024	0,025	0,028	0,033	0,038	0,047	0,059	0,068	0,073	0,089	0,106	0,129		
COV [%]		18,1	13,9	22,8	28,6	29,0	29,6	31,9	35,0	37,7	39,6	41,1	38,0	32,3	34,5	38,1	42,5		

Tabell 13. Ackumulerad avflagning uppmätt hos betonger från blandning 15 ($vct_{ekv}=0,45$, 25 % flygaska, CEM II-cement). Provning inledd vid 28 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,081	0,122	0,137	0,146	0,150	0,153	0,155	0,157	0,161	0,182	0,232	0,289	0,379	0,487	0,592	0,709		
II	0,000	0,093	0,131	0,142	0,147	0,148	0,149	0,150	0,152	0,155	0,163	0,189	0,223	0,291	0,355	0,419	0,520		
Medelvärde	0,000	0,087	0,127	0,140	0,147	0,149	0,151	0,153	0,154	0,158	0,173	0,210	0,256	0,335	0,421	0,506	0,615	1,051	3,888
Standardavvikelse		0,009	0,006	0,003	0,001	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005	0,014	0,030	0,047	0,062	0,093	0,123	0,134		
COV [%]		10,5	4,9	2,4	0,4	1,0	1,9	2,0	2,3	2,9	7,9	14,2	18,4	18,6	22,0	24,3	21,8		

Provning inledd vid 56 dygns ålder

I Tabell 14-Tabell 28 presenteras resultaten från provning av frostbeständighet provad enligt SS 13 72 44, procedur IA. Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Tabell 14. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 1 ($v_{ct_{ekv}}=0,40$, 0 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,020	0,022	0,024	0,025	0,029	0,029	0,030	0,031	0,033	0,035	0,037	0,043	0,050	0,060	0,067	0,076		
II	0,000	0,016	0,018	0,020	0,021	0,022	0,022	0,023	0,024	0,026	0,050	0,053	0,061	0,072	0,085	0,097	0,112		
Medelvärde	0,000	0,018	0,020	0,022	0,023	0,025	0,026	0,027	0,028	0,030	0,042	0,045	0,052	0,061	0,072	0,082	0,094	1,197	3,385
Standardavvikelse		0,003	0,003	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,011	0,011	0,013	0,015	0,018	0,021	0,025		
COV [%]		16,4	13,3	10,9	10,4	19,5	18,9	19,3	17,2	15,9	25,0	24,4	25,0	24,9	25,3	25,5	26,7		

Tabell 15. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 2 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 0 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009	0,009	0,010	0,010	0,010	0,011	0,011	0,011		
II	0,000	0,010	0,012	0,012	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,014	0,014	0,014	0,014	0,015	0,015	0,016	0,016		
Medelvärde	0,000	0,008	0,010	0,010	0,010	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,012	0,012	0,012	0,012	0,013	0,013	0,014	1,084	1,248
Standardavvikelse		0,002	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004		
COV [%]		28,4	34,5	34,5	34,3	32,0	31,9	30,7	29,6	26,1	26,0	26,7	26,2	25,9	25,3	25,5	26,0		

Tabell 16. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 3 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 0 % flygaska, CEM I-cement). Provning avslutad efter 42 fryscykler eftersom provkropparna var sönderfrysta. Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,067	0,172	0,253	0,270	0,270	0,279	0,279	0,279	0,279	0,279	0,279	0,279	0,279	0,279	0,279	0,279		
II	0,000	0,168	0,439	0,676	0,896	1,013	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080		
Medelvärde	0,000	0,117	0,305	0,464	0,583	0,642	0,680	0,680	0,680	0,680	0,680	0,680	0,680	0,680	0,680	0,680	0,680	1,167	1,000
Standardavvikelse		0,072	0,188	0,299	0,443	0,525	0,567	0,567	0,567	0,567	0,567	0,567	0,567	0,567	0,567	0,567	0,567		
COV [%]		61,1	61,7	64,4	76,0	81,9	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3	83,3		

Tabell 17. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 4 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 6 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,003	0,004	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007	0,008	0,010	0,010	0,011	0,011	0,011	0,012		
II	0,000	0,006	0,009	0,009	0,010	0,010	0,010	0,010	0,011	0,012	0,012	0,014	0,016	0,017	0,018	0,020	0,024		
Medelvärde	0,000	0,005	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,010	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,018	1,183	2,013
Standardavvikelse		0,002	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,005	0,006	0,009		
COV [%]		48,5	45,5	43,5	48,3	47,4	46,6	39,2	39,0	37,3	27,3	26,4	30,7	35,0	36,0	40,5	48,2		

Tabell 18. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 5 ($v_{ct_{ekv}}=0,40$, 11 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,006	0,011	0,012	0,013	0,013	0,013	0,014	0,014	0,017	0,019	0,023	0,027	0,042	0,056	0,068	0,078		
II	0,000	0,007	0,011	0,012	0,012	0,013	0,014	0,024	0,025	0,029	0,034	0,038	0,048	0,070	0,120	0,141	0,154		
Medelvärde	0,000	0,007	0,011	0,012	0,013	0,013	0,013	0,019	0,020	0,023	0,026	0,031	0,038	0,056	0,088	0,105	0,116	1,562	5,885
Standardavvikelse		0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,008	0,009	0,011	0,011	0,015	0,020	0,045	0,052	0,054		
COV [%]		11,5	0,6	2,1	1,0	3,3	2,3	38,8	39,7	39,1	40,5	36,5	39,0	36,0	51,4	49,3	46,5		

Tabell 19. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 6 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 11 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,008	0,010	0,011	0,012	0,012	0,013	0,013	0,015	0,018	0,020	0,022		
II	0,000	0,003	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,009	0,010	0,010	0,012	0,017	0,018	0,020		
Medelvärde	0,000	0,004	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007	0,008	0,010	0,010	0,011	0,012	0,012	0,013	0,017	0,019	0,021	1,667	2,186
Standardavvikelse		0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002		
COV [%]		35,4	29,6	25,5	24,4	25,3	18,1	22,5	23,1	21,9	21,3	18,7	19,1	15,5	6,5	6,6	7,6		

Tabell 20. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 7 ($v_{ct_{ekv}}=0,50$, 11 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,004	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,010	0,012	0,015	0,017	0,021		
II	0,000	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,012	0,014	0,015	0,016	0,018	0,024	0,026	0,031	0,035		
Medelvärde	0,000	0,002	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,010	0,011	0,012	0,012	0,014	0,018	0,020	0,024	0,028	2,236	2,818
Standardavvikelse		0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,005	0,006	0,008	0,008	0,010	0,010		
COV [%]		103,9	60,4	56,6	51,9	51,5	50,5	54,7	29,6	36,2	40,7	41,7	43,8	45,6	38,5	42,2	35,4		

Tabell 21. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 8 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 18 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,005	0,006	0,006	0,007	0,008	0,008	0,009	0,010	0,012	0,013	0,016	0,018	0,019	0,022	0,024	0,025		
II	0,000	0,007	0,008	0,009	0,010	0,010	0,011	0,012	0,012	0,013	0,013	0,014	0,014	0,014	0,014	0,015	0,015		
Medelvärde	0,000	0,006	0,007	0,008	0,008	0,009	0,010	0,010	0,011	0,012	0,013	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	1,334	1,777
Standardavvikelse		0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,002	0,003	0,003	0,005	0,006	0,007		
COV [%]		22,8	23,9	21,3	21,6	21,6	21,4	19,6	9,8	7,9	1,4	11,4	15,8	20,0	28,8	33,3	36,9		

Tabell 22. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 9 ($v_{ct_{ekv}}=0,40$, 25 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,007	0,008	0,008	0,009	0,009	0,012	0,013	0,014	0,016	0,017	0,017	0,018	0,021	0,028	0,031	0,034		
II	0,000	0,004	0,006	0,007	0,008	0,010	0,013	0,018	0,027	0,033	0,035	0,038	0,042	0,047	0,057	0,064	0,069		
Medelvärde	0,000	0,005	0,007	0,007	0,008	0,009	0,012	0,015	0,020	0,024	0,026	0,028	0,030	0,034	0,042	0,048	0,052	2,482	2,527
Standardavvikelse		0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,004	0,009	0,012	0,013	0,015	0,017	0,019	0,021	0,023	0,025		
COV [%]		46,0	12,8	11,9	6,5	0,3	8,6	25,6	43,1	49,5	50,2	54,3	58,0	54,8	49,2	48,0	48,3		

Tabell 23. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 10 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 25 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,025	0,030	0,035	0,039	0,047	0,053	0,065	0,075	0,084	0,092	0,105	0,121	0,139	0,167	0,204	0,225		
II	0,000	0,032	0,038	0,043	0,048	0,052	0,063	0,073	0,083	0,096	0,107	0,123	0,138	0,151	0,165	0,181	0,196		
III	0,000	0,019	0,022	0,023	0,027	0,029	0,032	0,037	0,044	0,049	0,055	0,059	0,067	0,072	0,078	0,086	0,093		
Medelvärde	0,000	0,025	0,030	0,033	0,038	0,043	0,050	0,058	0,067	0,077	0,085	0,096	0,109	0,121	0,137	0,157	0,171	1,776	2,543
Standardavvikelse		0,006	0,008	0,010	0,011	0,012	0,016	0,019	0,021	0,024	0,027	0,033	0,037	0,043	0,051	0,063	0,069		
COV [%]		24,8	28,1	30,1	28,0	28,1	31,6	32,5	30,7	31,9	31,4	34,7	33,7	35,4	37,1	40,0	40,4		

Tabell 24. Ackumulerad avflagning uppmätt hos betonger från blandning 11 ($vct_{ekv}=0,50$, 25 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,007	0,009	0,009	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,014	0,014	0,015	0,017	0,018	0,021	0,025	0,036		
II	0,000	0,010	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,019	0,021	0,021	0,027	0,032	0,041	0,050	0,058	0,064	0,069		
III	0,000	0,007	0,007	0,013	0,014	0,014	0,015	0,015	0,015	0,015	0,016	0,016	0,018	0,019	0,022	0,024	0,024		
Medelvärde	0,000	0,008	0,010	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,017	0,019	0,021	0,025	0,029	0,034	0,038	0,043	1,291	2,567
Standardavvikelse		0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	0,004	0,004	0,007	0,010	0,014	0,018	0,021	0,023	0,023		
COV [%]		19,2	28,4	21,7	20,4	18,7	14,4	16,9	23,3	23,3	36,4	45,5	53,6	63,7	62,4	59,9	53,8		

Tabell 25. Ackumulerad avflagning uppmätt hos betonger från blandning 12 ($vct_{ekv}=0,45$, 33 % flygaska, CEM I-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,029	0,032	0,037	0,038	0,050	0,064	0,070	0,078	0,085	0,094	0,108	0,119	0,128	0,138	0,146	0,158		
II	0,000	0,026	0,031	0,038	0,038	0,052	0,074	0,081	0,088	0,096	0,103	0,115	0,123	0,136	0,150	0,165	0,189		
III	0,000	0,027	0,030	0,037	0,037	0,048	0,062	0,067	0,072	0,078	0,083	0,089	0,093	0,096	0,104	0,114	0,117		
IV	0,000	0,023	0,026	0,030	0,030	0,034	0,041	0,045	0,049	0,052	0,055	0,059	0,064	0,069	0,074	0,078	0,082		
Medelvärde	0,000	0,026	0,030	0,035	0,036	0,046	0,060	0,066	0,072	0,078	0,084	0,093	0,100	0,107	0,117	0,126	0,136	2,007	1,907
Standardavvikelse		0,003	0,002	0,004	0,004	0,008	0,014	0,015	0,017	0,019	0,021	0,025	0,027	0,031	0,034	0,038	0,047		
COV [%]		10,7	7,8	10,8	11,4	18,1	23,0	22,7	23,3	23,8	25,0	27,0	27,3	28,6	29,3	30,3	34,3		

Tabell 26. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 13 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 0 % flygaska, CEM II-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,018	0,019	0,025	0,026	0,027	0,028	0,029	0,030	0,034	0,039	0,044	0,055	0,069	0,092	0,118	0,139		
II	0,000	0,046	0,048	0,070	0,077	0,079	0,081	0,083	0,088	0,094	0,104	0,119	0,143	0,166	0,215	0,244	0,274		
Medelvärde	0,000	0,032	0,034	0,047	0,051	0,053	0,054	0,056	0,059	0,064	0,072	0,082	0,099	0,117	0,154	0,181	0,206	1,149	3,498
Standardavvikelse		0,020	0,021	0,032	0,036	0,037	0,037	0,038	0,041	0,042	0,046	0,053	0,062	0,069	0,087	0,089	0,095		
COV [%]		61,6	61,6	67,9	70,7	69,7	68,4	68,3	68,7	65,5	64,6	64,6	63,0	58,5	56,6	49,3	46,2		

Tabell 27. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 14 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 11 % flygaska, CEM II-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m ₀	m ₇	m ₁₄	m ₂₁	m ₂₈	m ₃₅	m ₄₂	m ₄₉	m ₅₆	m ₆₃	m ₇₀	m ₇₇	m ₈₄	m ₉₁	m ₉₈	m ₁₀₅	m ₁₁₂	m ₅₆ /m ₂₈	m ₁₁₂ /m ₅₆
I	0,000	0,020	0,030	0,030	0,034	0,037	0,040	0,041	0,044	0,053	0,065	0,092	0,122	0,169	0,222	0,278	0,361		
II	0,000	0,029	0,044	0,044	0,046	0,047	0,047	0,048	0,053	0,063	0,087	0,109	0,131	0,176	0,229	0,293	0,331		
Medelvärde	0,000	0,025	0,037	0,037	0,040	0,042	0,044	0,044	0,048	0,058	0,076	0,100	0,127	0,172	0,226	0,286	0,346	1,217	7,147
Standardavvikelse		0,006	0,010	0,010	0,008	0,007	0,005	0,005	0,007	0,007	0,016	0,012	0,007	0,005	0,005	0,011	0,022		
COV [%]		24,2	26,7	26,7	21,3	16,6	11,9	10,6	13,5	11,7	20,5	11,9	5,5	3,2	2,2	3,7	6,2		

Tabell 28. Ackumulerad avflagnings uppmätt hos betonger från blandning 15 ($v_{ct_{ekv}}=0,45$, 25 % flygaska, CEM II-cement). Provning inledd vid 56 dygns ålder.

Provkropp	m_0	m_7	m_{14}	m_{21}	m_{28}	m_{35}	m_{42}	m_{49}	m_{56}	m_{63}	m_{70}	m_{77}	m_{84}	m_{91}	m_{98}	m_{105}	m_{112}	m_{56}/m_{28}	m_{112}/m_{56}
I	0,000	0,017	0,043	0,053	0,055	0,060	0,060	0,104	0,175	0,223	0,282	0,315	0,337	0,374	0,413	0,491	0,530		
II	0,000	0,018	0,045	0,057	0,059	0,066	0,078	0,157	0,252	0,317	0,416	0,452	0,490	0,548	0,590	0,657	0,754		
Medelvärde	0,017	0,044	0,055	0,057	0,063	0,069	0,130	0,214	0,270	0,349	0,384	0,414	0,461	0,501	0,574	0,642	0,017	3,748	3,006
Standardavvikelse	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005	0,012	0,037	0,054	0,066	0,095	0,097	0,108	0,123	0,125	0,118	0,158	0,001		
COV [%]	3,7	3,7	4,2	5,8	7,3	18,0	28,7	25,4	24,6	27,1	25,3	26,2	26,8	25,0	20,5	24,6	3,7		

Bilaga C. Foton på provkroppar efter avslutad provning av frostbeständighet

Foton på avslutade fryspröver – 28 dygn

0 % flygaska, vct=0,40 (Blandning 1)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,4 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,029 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar=0,034 kg/m².

0 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 2)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,2 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,014 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,011 kg/m².



Prov 3. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,022 \text{ kg/m}^2$.



Prov 4. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,029 \text{ kg/m}^2$.

0 % flygaska, vct=0,50 (Blandning 3)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,5 %.

Provning avslutad efter 63 fryscyklar eftersom provet hade omfattande avskalning och läckte.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 63 fryscyklar= $3,274 \text{ kg/m}^2$. Avslutad efter 63 fryscyklar.



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 63 fryscyklar= $2,563 \text{ kg/m}^2$. Avslutad efter 63 fryscyklar.

6 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 4)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,0 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,029 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,049 kg/m².

11 % flygaska, vct=0,40 (Blandning 5)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,4 %.



Prov 1. Avskalning har ej mätts upp på grund av misstag i samband med provning. Dock framgår vid visuell besiktning av provkroppen att avskalningen är lite (troligen $<0,10 \text{ kg/m}^2$).



Prov 2. Avskalning har ej mätts upp på grund av misstag i samband med provning. Dock framgår vid visuell besiktning av provkroppen att avskalningen är lite (troligen $<0,10 \text{ kg/m}^2$).

11 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 6)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,9 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,029 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,029 kg/m².



Prov 3. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,029 kg/m².



Prov 4. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,039 kg/m².

11 % flygaska, vct=0,50 (Blandning 7)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är %.



Prov 1. Avskalning har ej mätts upp på grund av misstag i samband med provning. Dock framgår vid visuell besiktning av provkroppen att avskalningen är lite (troligen $<0,10 \text{ kg/m}^2$).



Prov 2. Avskalning har ej mätts upp på grund av misstag i samband med provning. Dock framgår vid visuell besiktning av provkroppen att avskalningen är lite (troligen $<0,10 \text{ kg/m}^2$).

18 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 8)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,0 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,022 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,018 kg/m².

25 % flygaska, vct=0,40 (Blandning 9)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,9 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,244 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,281 kg/m².



Prov 3. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,307 \text{ kg/m}^2$.



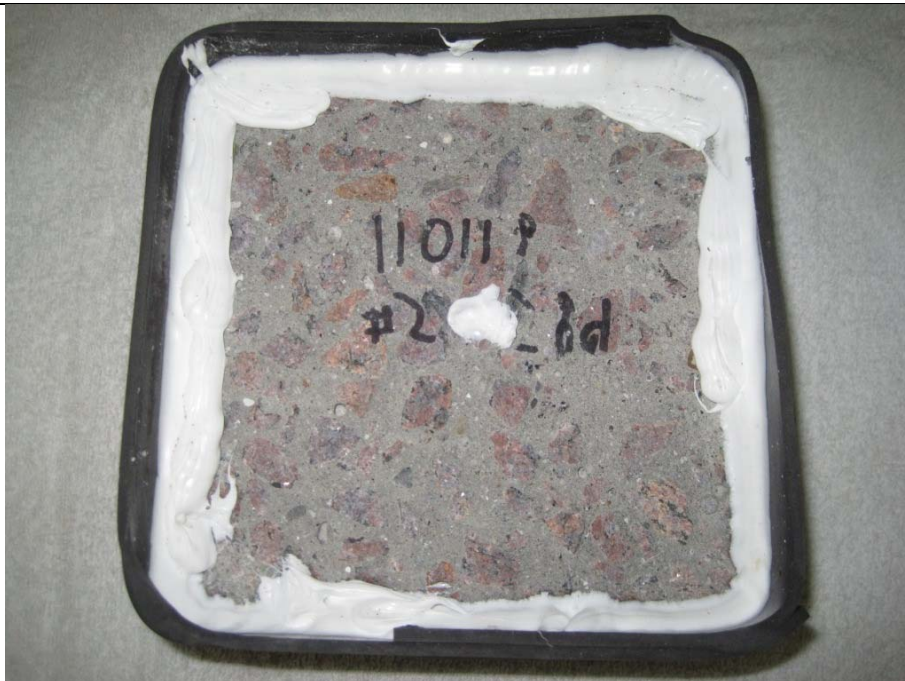
Prov 4. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,202 \text{ kg/m}^2$.

25 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 10)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,0 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscykler= 0,097 kg/m².



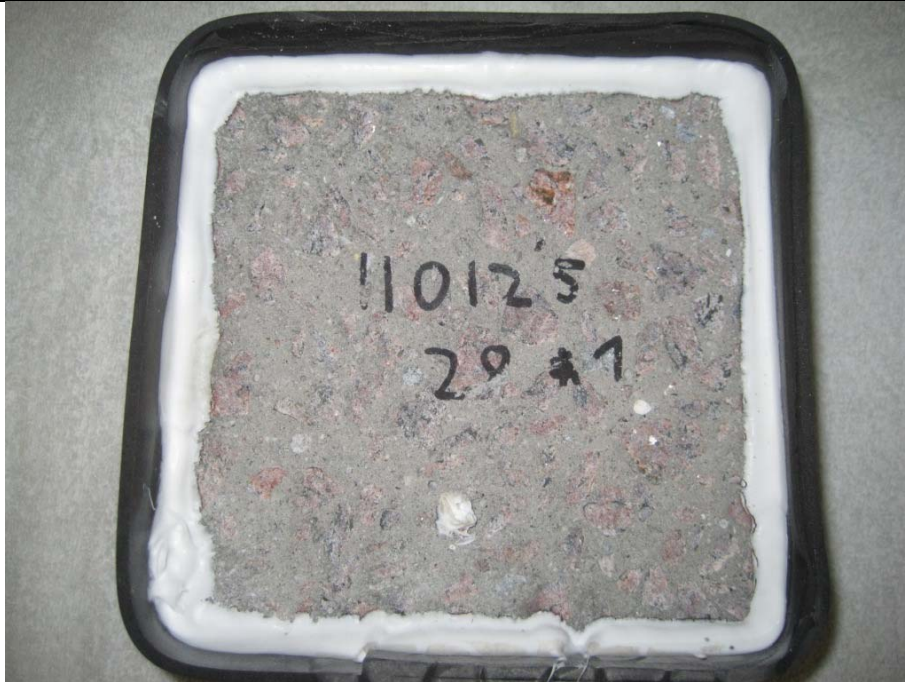
Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscykler= 0,022 kg/m².



Prov 3. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,031 \text{ kg/m}^2$.

25 % flygaska, vct=0,50 (Blandning 11)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,007kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,042 kg/m².



Prov 3. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,010 \text{ kg/m}^2$.



Prov 4. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,009 \text{ kg/m}^2$.

33 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 12)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,014 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,020 kg/m².

0 % flygaska, vct=0,45, CEM II (Blandning 13)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,289 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,288 kg/m².

11 % flygaska, vct=0,45, CEM II (Blandning 14)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,212 kg/m².



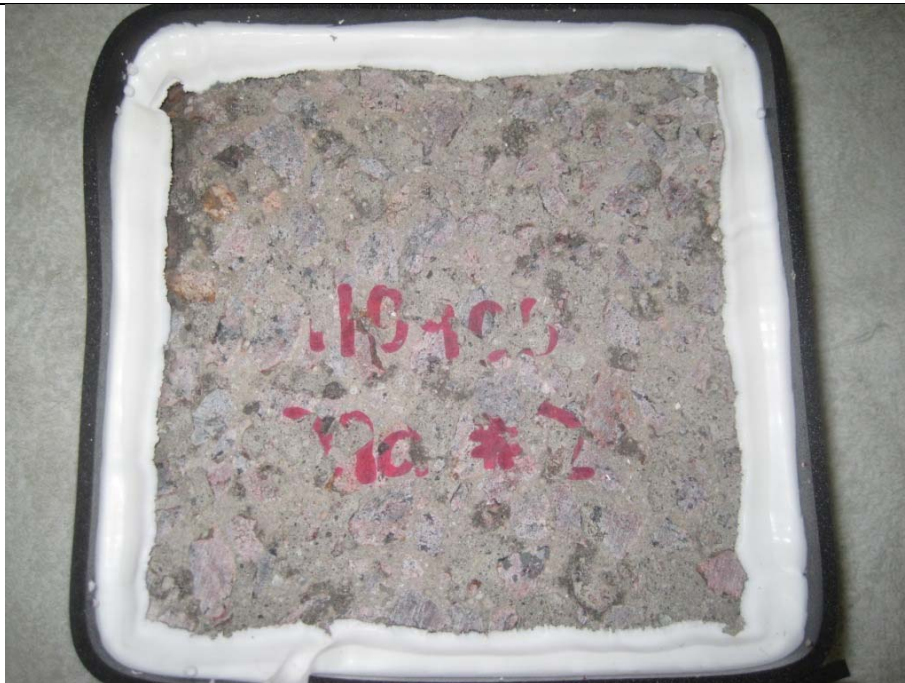
Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,394 kg/m².

25 % flygaska, vct=0,45, CEM II (Blandning 15)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,709 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,520 kg/m².

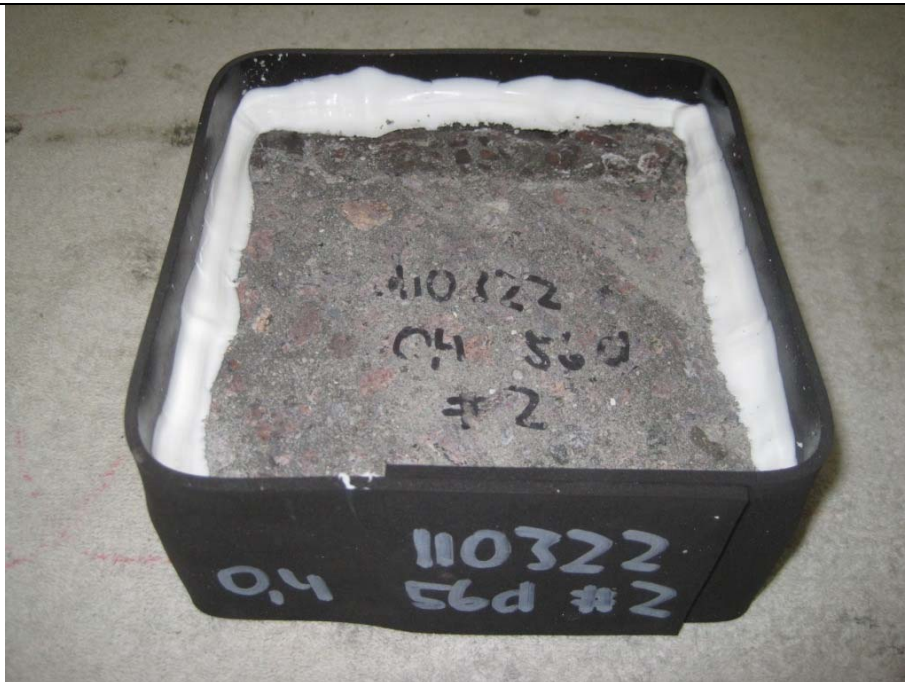
Foton på avslutade frysprover – 56 dygn

0 % flygaska, vct=0,40 (Blandning 1)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,4 %.



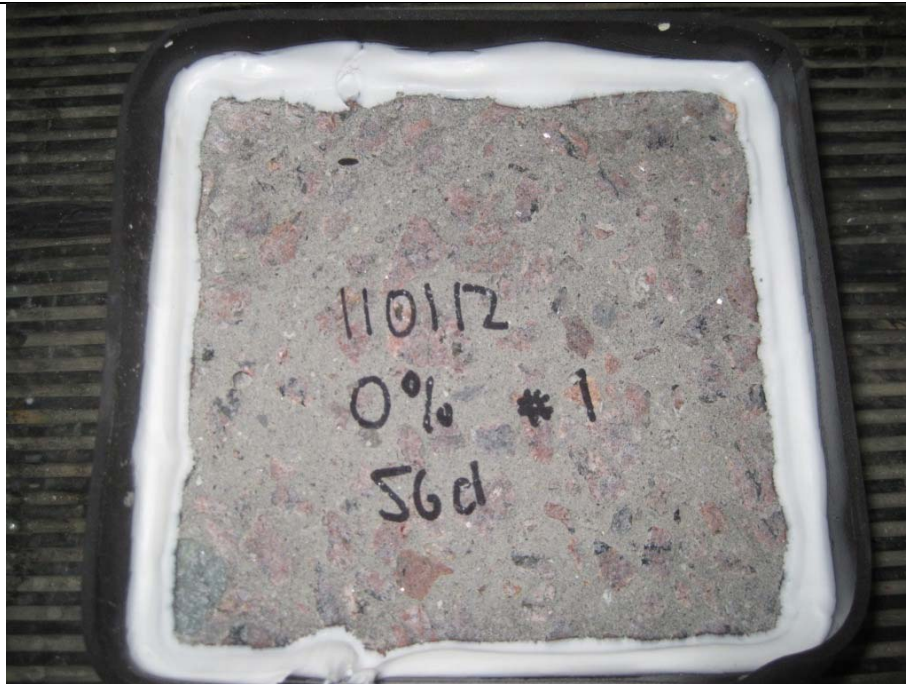
Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= kg/m^2 .



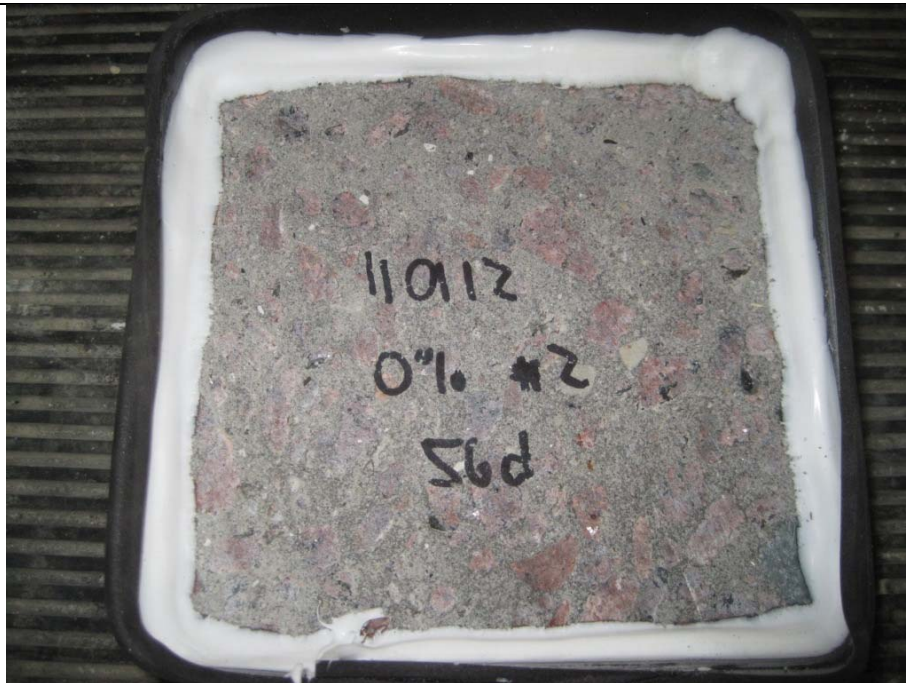
Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= kg/m^2 .

0 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 2)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,2 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,011 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,016 kg/m².

0 % flygaska, vct=0,50 (Blandning 3)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,5 %.

Provning avslutad efter 42 fryscyklar eftersom provet hade omfattande avskalning och läckte.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 42 fryscyklar= kg/m^2 . Avslutad efter 42 fryscyklar.



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 42 fryscyklar= kg/m^2 . Avslutad efter 42 fryscyklar.

6 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 4)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,0 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= kg/m^2 .



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= kg/m^2 .

11 % flygaska, vct=0,40 (Blandning 5)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,4 %.



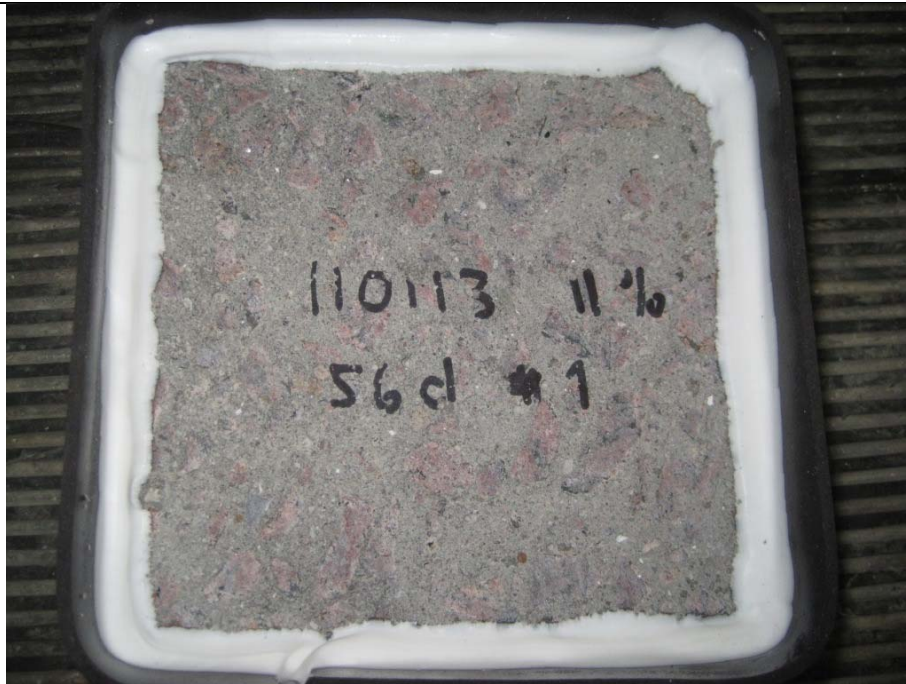
Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= kg/m^2 .



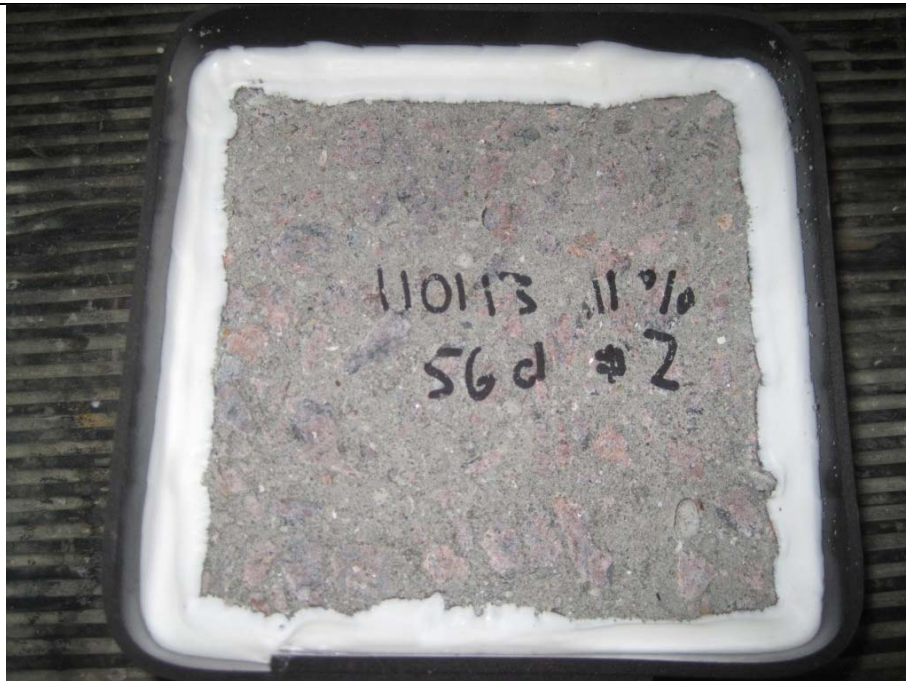
Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= kg/m^2 .

11 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 6)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,9 %.



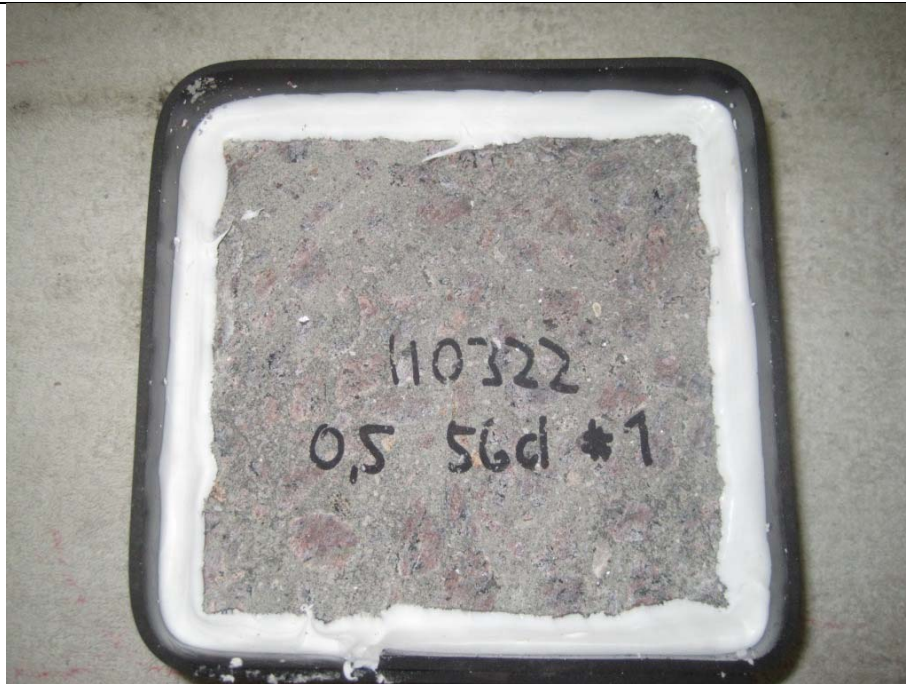
Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,022 kg/m².



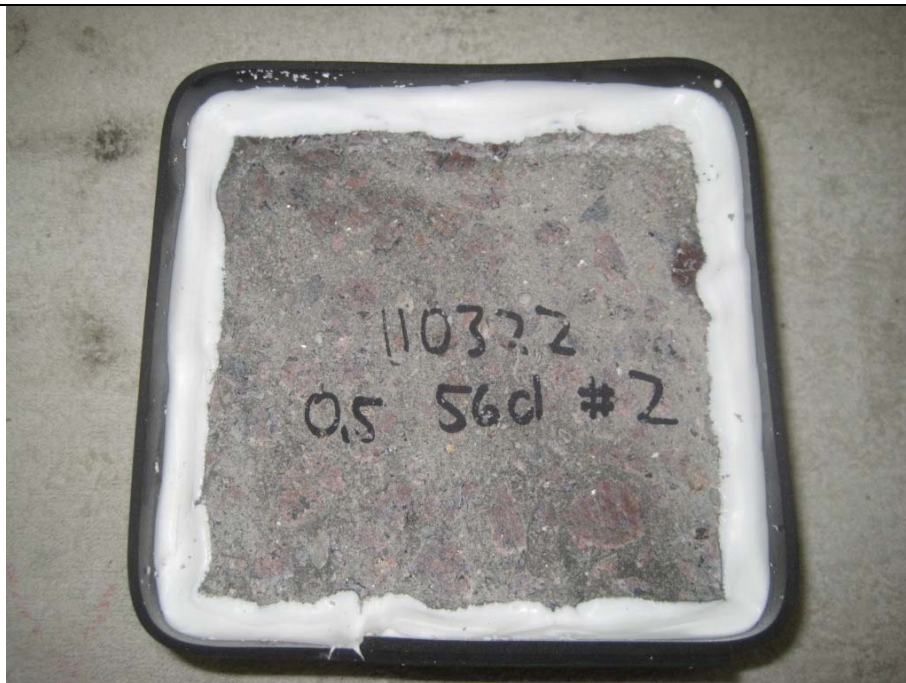
Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,020 kg/m².

11 % flygaska, vct=0,50 (Blandning 7)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,0 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= kg/m^2 .



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= kg/m^2 .

18 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 8)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,0 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,025 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,015 kg/m².

25 % flygaska, vct=0,40 (Blandning 9)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,9 %.



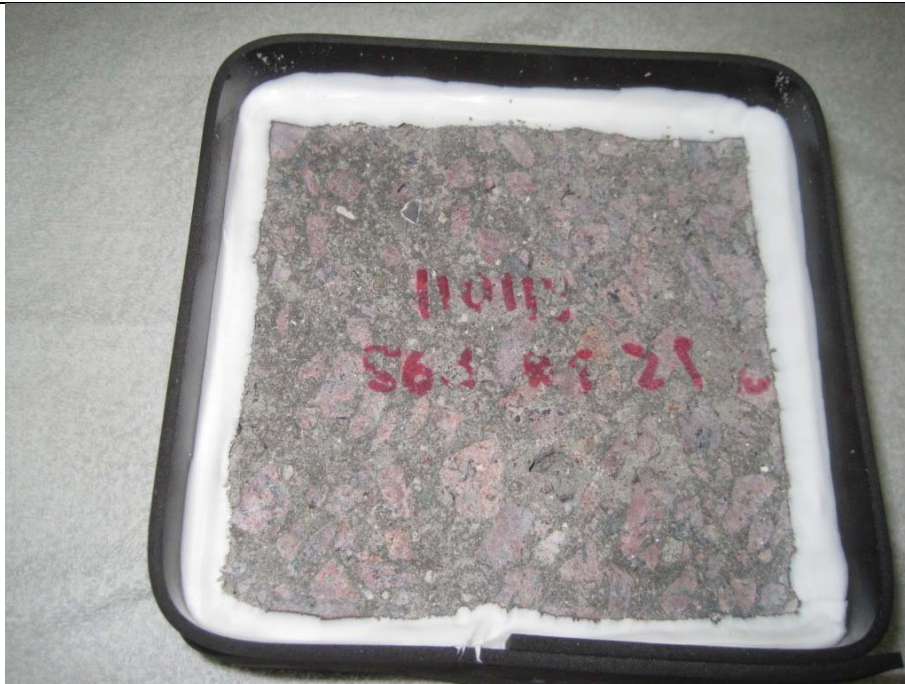
Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,034 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,069 kg/m².

25 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 10)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 5,0 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,225 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,196 kg/m².



Prov 3. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,093 \text{ kg/m}^2$.

25 % flygaska, vct=0,50 (Blandning 11)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,036 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,069 kg/m².



Prov 3. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,024 \text{ kg/m}^2$.

33 % flygaska, vct=0,45 (Blandning 12)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,158 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= 0,189 kg/m².



Prov 3. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,117 \text{ kg/m}^2$.



Prov 4. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar= $0,082 \text{ kg/m}^2$.

0 % flygaska, vct=0,45, CEM II (Blandning 13)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar=0,139 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar=0,274 kg/m².

11 % flygaska, vct=0,45, CEM II (Blandning 14)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar=0,361 kg/m².



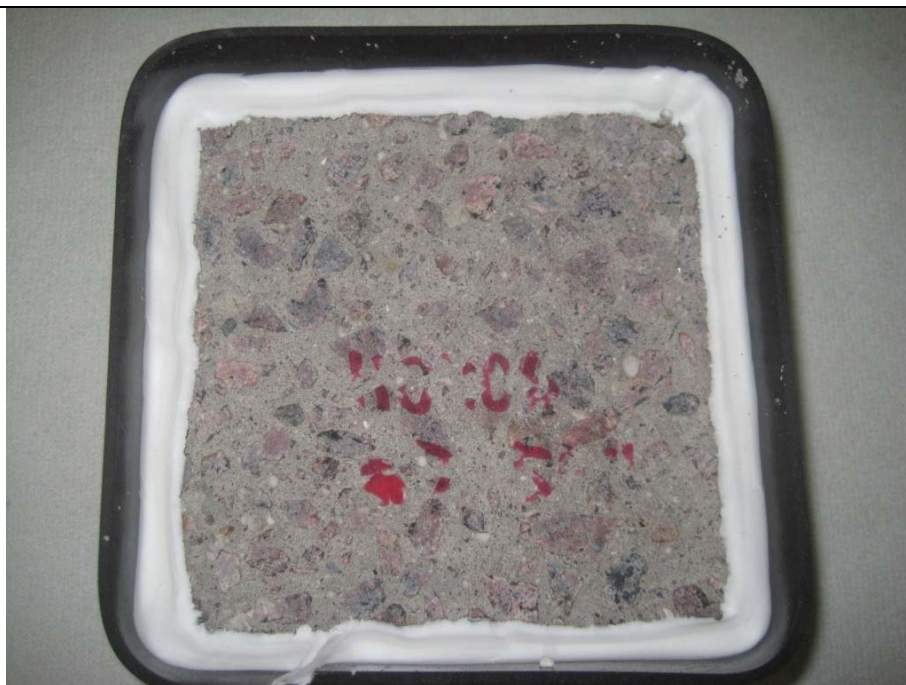
Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar=0,331 kg/m².

25 % flygaska, vct=0,45, CEM II (Blandning 15)

Lufthalt bestämd enligt SS-EN 12350-2 är 4,8 %.



Prov 1. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar=0,530 kg/m².



Prov 2. Total ackumulerad avskalning efter 112 fryscyklar=0,754 kg/m².

Bilaga D. Resultat från bestämning av motstånd mot kloridintränging enligt NT Build 492

Bilaga D. Resultat från provning av motstånd mot kloridinträngning enligt NT Build 492

I Tabell 1-Tabell 2 redovisas resultat från provning av motstånd mot kloridinträngning enligt NT Build 492, bestämd som D_{RCM} (medelvärden samt standardavvikelse från 3 provkroppar). Resultaten från enskilda provkroppar redovisas på följande sidor. Medelvärdena på D_{RCM} är omräknade så att de gäller för provning som är utförd vid 28 dygns ålder enligt ekvation (5.3.1:1) i Nilsson et al (1997).

$$\begin{cases} \frac{D_{RCM}(t)}{D_{RCM}(t_0)} = \left(\frac{t_0}{t_{ex} + t'} \right)^\beta & t_{ex} < t_0 - t' \\ \frac{D_{RCM}(t)}{D_{RCM}(t_0)} = 1 & t_{ex} \geq t_0 - t' \end{cases}$$

där: t är betongens ålder, t_0 är betongens ålder när D_{RCM} är konstant (normalt ca 180 dygn), t' är exponeringstiden, t_{ex} är betongens ålder vid exponering och β är en parameter som beror av betongens vct. I Nilsson et al (1997) föreslås följande värden på β för några olika vct.

vct	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,75
β	0,37	0,33	0,30	0,282	0,27	0,25	0,237	0,23

Parametrarna i ekvation (5.3.1:1) är framtagna för Portlandcementbetong, vilket betyder att ekvationen inte direkt går att tillämpa för flygaskebetonger. Eftersom data för flygaskebetonger saknas har dock ekvationen med föreslagna parametrar använts, vilket i sin tur troligen medför att beräknade värden är något för höga för flygaskebetonger.

Provning utförd vid 28 dygns ålder

I Tabell 1 presenteras resultaten från provning av motstånd mot kloridinträngning enligt NT Build 492. Resultaten är omräknade så att de gäller för provning som är utförd vid 28 dygns ålder enligt ekvation (5.3.1:1) i Nilsson et al (1997).

Tabell 1. Resultat från provning av motstånd mot kloridinträngning. Resultat omräknade så att de gäller för provning vid 28 dygns ålder.

Blandning	vct [-]	FA [%]	Tid [dygn]	$D_{RCM} [x10^{-12} m^2/s]$		
				Medel	SD	28 dygn
1	0,4	0	42	13,5	0,3	15,2
2	0,45	0	29	19,8	1,0	20,0
3	0,5	0	42	19,9	0,2	22,4
4	0,45	6	48	15,9	1	18,6
5	0,5	11	48	16,5	1,1	19,3
6	0,45	11	34	16,8	0,1	17,8
7	0,4	11	29	16,7	0,5	16,9
8	0,45	18	33	15,1	0,5	15,8
9	0,4	25	33	10,9	2,1	11,4
10	0,45	25	31	16,4	1,2	16,9
11	0,5	25	29	22,6	0,8	22,8
12	0,45	33	32	15,8	1,1	16,4
13	0,45	0	48	12,3	0,9	14,4
14	0,45	11	49	10,7	0,2	12,6
15	0,45	25	44	8,6	1	9,8

Provning utförd vid 56 dygns ålder

I Tabell 2 presenteras resultaten från provning av motstånd mot kloridinträngning enligt NT Build 492. Resultaten är omräknade så att de gäller för provning som är utförd vid 56 dygns ålder enligt ekvation (5.3.1:1) i Nilsson et al (1997).

Tabell 2. Resultat från provning av motstånd mot kloridinträngning. Resultat omräknade så att de gäller för provning vid 56 dygns ålder.

Blandning	vct [-]	FA [%]	Tid [dygn]	$D_{RCM} [x10^{-12} m^2/s]$		
				Medel	SD	56 dygn
1	0,4	0	59	11,3	0,5	11,5
2	0,45	0	57	17,2	0,9	17,3
3	0,5	0	58	14,3	0,9	14,4
4	0,45	6	62	19,7	1,2	20,3
5	0,5	11	63	13	0,6	13,5
6	0,45	11	61	12	1,2	12,3
7	0,4	11	64	11,3	1,1	11,8
8	0,45	18	59	11	1,0	11,2
9	0,4	25	62	8,3	0,8	8,5
10	0,45	25	63	8,6	0,6	8,9
11	0,5	25	58	13,9	0,5	14,0
12	0,45	33	62	9	0,6	9,3
13	0,45	0	67	10,9	0,3	11,5
14	0,45	11	69	9,6	0,6	10,2
15	0,45	25	64	6,3	0,5	6,6

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	0 % FA 110329, vct=0,40			
Age at the start of test, day:	42 days			
Date of test:	2011 05 11			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	13,5	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	2,6	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	44,1	46,5	49,4	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	68,00	72,00	68,00	mA
Temperature at start T_i	298,16	298,16	298,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	77,0	71,0	71,0	mA
Temperature at end T_t	297,16	297,16	297,16	K
Average penetration depth x_d	26,6	26,0	23,5	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	13,5	13,8	13,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	26,5	26,1	23,4	mm
Penetration depth x_{d2}	26,5	25,9	23,3	mm
Penetration depth x_{d3}	27,0	26,0	23,3	mm
Penetration depth x_{d4}	26,5	26,1	24,0	mm
Penetration depth x_{d5}	26,6	25,9	23,0	mm
Penetration depth x_{d6}	26,5	27,0	23,8	mm
Penetration depth x_{d7}	26,6	25,0	24,0	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	0 % FA 110112, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	29 days			
Date of test:	2011 02 10			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	19,8	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	4,9	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,2	46,8	46,4	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	20,0	20,0	20,0	V
Current at start I_i	76,00	77,00	70,00	mA
Temperature at start T_i	292,16	292,16	292,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	81,0	82,0	81,0	mA
Temperature at end T_t	295,76	295,76	295,76	K
Average penetration depth x_d	30,3	28,0	30,4	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	20,5	18,7	20,2	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	27,5	28,7	34,9	mm
Penetration depth x_{d2}	33,5	26,6	35,2	mm
Penetration depth x_{d3}	32,0	30,7	32,2	mm
Penetration depth x_{d4}	29,3	27,6	28,6	mm
Penetration depth x_{d5}	29,7	28,9	28,4	mm
Penetration depth x_{d6}	30,0	24,3	25,3	mm
Penetration depth x_{d7}	30,0	28,9	28,4	mm
Remarks				

Test for Chloride Migration Coefficient according to NT BUILD 492

Specimen ID:	0 % FA 110330, vct=0,50			
Age at the start of test, day:	42 days			
Date of test:	2011 05 12			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	19,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,2	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	1,2	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	46,8	46,7	46,7	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	15,0	15,0	15,0	V
Current at start I_i	61,00	56,00	61,00	mA
Temperature at start T_i	297,16	297,16	297,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	65,0	61,0	67,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	22,7	22,3	22,3	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	20,2	19,8	19,8	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	23,9	23,0	23,0	mm
Penetration depth x_{d2}	23,5	22,2	22,2	mm
Penetration depth x_{d3}	22,0	22,2	22,2	mm
Penetration depth x_{d4}	21,5	22,0	22,0	mm
Penetration depth x_{d5}	21,7	22,6	22,6	mm
Penetration depth x_{d6}	22,5	21,0	21,0	mm
Penetration depth x_{d7}	23,7	23,0	23,0	mm
Remarks	Ingen inträngning i provkropp II Värden från provkropp III kopierade.			

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	6 % FA 110330, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	50 days			
Date of test:	2011 05 17			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	15,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	6,4	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	45,4	48,7	45,9	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	74,00	66,00	72,00	mA
Temperature at start T_i	292,16	292,16	292,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	89,0	76,0	84,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	28,7	30,4	30,7	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	14,8	16,8	16,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	30,7	31,7	34,8	mm
Penetration depth x_{d2}	29,6	31,2	34,0	mm
Penetration depth x_{d3}	29,4	31,0	27,9	mm
Penetration depth x_{d4}	28,6	28,8	27,0	mm
Penetration depth x_{d5}	27,3	28,9	30,0	mm
Penetration depth x_{d6}	27,5	30,0	30,0	mm
Penetration depth x_{d7}	28,0	31,0	31,0	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	11 % FA 110322, vct=0,40			
Age at the start of test, day:	29 days			
Date of test:	2011 04 20			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	16,7	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,5	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	3,0	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,5	47,7	47,1	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	20,0	20,0	20,0	V
Current at start I_i	60,00	60,00	60,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	71,0	72,0	80,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	25,5	24,8	24,3	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	17,2	16,8	16,2	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	23,3	25,4	27,7	mm
Penetration depth x_{d2}	23,3	25,2	24,0	mm
Penetration depth x_{d3}	23,0	25,0	23,0	mm
Penetration depth x_{d4}	27,2	24,3	23,6	mm
Penetration depth x_{d5}	27,2	24,2	23,7	mm
Penetration depth x_{d6}	27,0	25,0	23,3	mm
Penetration depth x_{d7}	27,3	24,5	25,0	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	11 % FA 110113, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	34 days			
Date of test:	2011 02 16			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	16,8	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	0,8	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	46,4	46,8	47,2	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	74,00	77,00	73,00	mA
Temperature at start T_i	290,16	294,16	294,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	81,0	83,0	79,0	mA
Temperature at end T_t	294,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	31,8	31,6	30,9	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	16,8	16,9	16,7	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	31,8	31,2	31,0	mm
Penetration depth x_{d2}	31,9	31,8	30,8	mm
Penetration depth x_{d3}	31,8	31,8	30,9	mm
Penetration depth x_{d4}	32,8	31,7	30,8	mm
Penetration depth x_{d5}	31,4	31,7	31,0	mm
Penetration depth x_{d6}	31,4	31,9	30,9	mm
Penetration depth x_{d7}	31,2	31,2	31,1	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	11 % FA 110322, vct=0,50			
Age at the start of test, day:	48 days			
Date of test:	2011 05 10			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	16,5	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	6,4	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,4	47,3	46,1	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	61,00	66,00	63,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	100,0	110,0	106,0	mA
Temperature at end T_t	298,16	298,16	298,16	K
Average penetration depth x_d	32,1	28,5	31,1	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	17,5	15,4	16,5	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	34,0	13,1	31,9	mm
Penetration depth x_{d2}	34,2	31,0	31,2	mm
Penetration depth x_{d3}	33,9	30,9	30,7	mm
Penetration depth x_{d4}	29,5	31,0	30,7	mm
Penetration depth x_{d5}	31,0	31,0	30,8	mm
Penetration depth x_{d6}	31,0	31,1	30,9	mm
Penetration depth x_{d7}	30,9	31,2	31,2	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	18 % FA 110127, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	33 days			
Date of test:	2011 03 01			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	15,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,5	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	3,0	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	46,8	47,5	50,5	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	70,00	71,00	76,00	mA
Temperature at start T_i	291,16	291,16	291,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	71,0	72,0	80,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	29,3	28,0	25,9	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	15,6	15,1	14,7	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	29,4	27,1	25,7	mm
Penetration depth x_{d2}	29,3	27,0	25,8	mm
Penetration depth x_{d3}	29,4	27,2	25,6	mm
Penetration depth x_{d4}	29,3	27,3	25,7	mm
Penetration depth x_{d5}	29,4	28,4	25,7	mm
Penetration depth x_{d6}	28,6	29,4	26,3	mm
Penetration depth x_{d7}	29,7	29,6	26,4	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	25 % FA 110113, vct=0,40			
Age at the start of test, day:	33 days			
Date of test:	2011 02 15			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	10,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	2,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	19,7	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,2	46,8	45,2	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	58,00	61,00	60,00	mA
Temperature at start T_i	290,16	294,16	294,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	61,0	65,0	64,0	mA
Temperature at end T_t	294,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	16,8	24,4	22,0	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	8,6	12,9	11,2	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	18,9	24,6	24,1	mm
Penetration depth x_{d2}	17,4	24,6	22,1	mm
Penetration depth x_{d3}	14,1	24,6	21,9	mm
Penetration depth x_{d4}	17,2	24,6	22,4	mm
Penetration depth x_{d5}	17,4	23,2	19,6	mm
Penetration depth x_{d6}	16,9	23,6	21,4	mm
Penetration depth x_{d7}	15,9	25,4	22,4	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	25 % FA 110118, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	31 days			
Date of test:	2011 02 17			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	16,4	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,2	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	7,5	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,9	46,3	46,2	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	20,0	20,0	20,0	V
Current at start I_i	69,00	67,00	64,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	71,0	68,0	63,0	mA
Temperature at end T_t	294,16	294,16	294,16	K
Average penetration depth x_d	24,0	23,4	26,9	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	16,2	15,3	17,7	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	25,2	23,3	28,8	mm
Penetration depth x_{d2}	22,6	23,3	25,2	mm
Penetration depth x_{d3}	22,6	22,2	27,0	mm
Penetration depth x_{d4}	22,6	23,2	26,4	mm
Penetration depth x_{d5}	24,6	21,2	26,2	mm
Penetration depth x_{d6}	25,2	24,3	26,4	mm
Penetration depth x_{d7}	25,2	26,2	28,0	mm
Remarks	läckt stora porer			

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	25 % FA 110125, vct=0,50			
Age at the start of test, day:	29 days			
Date of test:	2011 02 23			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	22,6	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,8	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	3,5	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	46,8	48,0	47,7	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	20,0	20,0	20,0	V
Current at start I_i	79,00	71,00	75,00	mA
Temperature at start T_i	292,16	292,16	292,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	83,0	76,0	84,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	33,7	31,6	33,9	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	22,8	21,8	23,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	32,4	35,2	34,0	mm
Penetration depth x_{d2}	32,5	33,4	33,8	mm
Penetration depth x_{d3}	32,4	30,9	33,9	mm
Penetration depth x_{d4}	32,4	32,5	33,7	mm
Penetration depth x_{d5}	32,5	30,9	33,8	mm
Penetration depth x_{d6}	41,4	28,7	34,0	mm
Penetration depth x_{d7}	32,4	29,9	34,2	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	33 % FA 110120, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	32 days			
Date of test:	2011 02 21			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	15,8	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	6,9	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,3	45,4	47,2	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	62,00	66,00	62,00	mA
Temperature at start T_i	291,16	291,16	291,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	79,0	87,0	80,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	31,0	28,3	30,0	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	16,7	14,6	16,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	33,8	29,8	29,9	mm
Penetration depth x_{d2}	30,0	28,9	30,0	mm
Penetration depth x_{d3}	29,9	27,9	30,0	mm
Penetration depth x_{d4}	29,8	27,8	29,9	mm
Penetration depth x_{d5}	29,8	27,6	30,0	mm
Penetration depth x_{d6}	29,7	28,0	29,9	mm
Penetration depth x_{d7}	34,0	28,0	30,1	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	0 % FA 110331, vct=0,45, CEM II			
Age at the start of test, day:	48 days			
Date of test:	2011 05 18			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	12,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	7,6	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	45,5	47,5	44,7	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	68,00	57,00	64,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	77,0	61,0	71,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	25,9	21,7	24,0	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	13,4	11,5	12,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	26,2	22,7	24,3	mm
Penetration depth x_{d2}	26,0	21,2	24,0	mm
Penetration depth x_{d3}	25,8	21,5	24,2	mm
Penetration depth x_{d4}	26,0	21,3	23,8	mm
Penetration depth x_{d5}	25,7	21,2	24,0	mm
Penetration depth x_{d6}	26,0	22,0	23,5	mm
Penetration depth x_{d7}	25,8	21,7	24,0	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	11 % FA 110331, vct=0,45, CEM II			
Age at the start of test, day:	49, days			
Date of test:	2011 05 19			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	10,7	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,2	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	2,1	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	48,5	44,8	47,9	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	50,00	57,00	64,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	59,0	61,0	71,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	19,8	20,8	20,4	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	10,7	10,4	10,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	19,0	22,0	20,2	mm
Penetration depth x_{d2}	18,5	21,6	21,0	mm
Penetration depth x_{d3}	18,6	21,0	20,0	mm
Penetration depth x_{d4}	19,1	21,0	21,0	mm
Penetration depth x_{d5}	22,5	20,8	19,0	mm
Penetration depth x_{d6}	20,0	19,0	20,5	mm
Penetration depth x_{d7}	21,1	20,0	21,0	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	25 % FA 110406 vct=0,45, CEM II			
Age at the start of test, day:	44 days			
Date of test:	2011 05 20			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	8,6	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	11,1	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	45,4	46,4	49,2	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	30,0	30,0	30,0	V
Current at start I_i	52,00	54,00	51,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	57,0	59,0	55,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	18,1	21,9	19,3	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	7,6	9,5	8,8	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	18,3	20,6	19,8	mm
Penetration depth x_{d2}	18,2	20,3	19,6	mm
Penetration depth x_{d3}	18,4	19,8	19,7	mm
Penetration depth x_{d4}	17,6	20,3	18,8	mm
Penetration depth x_{d5}	17,4	19,8	18,7	mm
Penetration depth x_{d6}	18,2	25,1	18,7	mm
Penetration depth x_{d7}	18,4	27,1	20,0	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	0 % FA 110329, vct=0,40			
Age at the start of test, day:	59 days			
Date of test:	2011 05 26			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	11,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,5	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	4,1	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	46,3	45,5	46,4	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	68,00	70,00	68,00	mA
Temperature at start T_i	296,16	296,16	296,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	58,0	62,0	61,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	22,6	22,1	20,9	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	11,8	11,3	10,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	22,7	28,1	21,0	mm
Penetration depth x_{d2}	22,1	21,0	20,9	mm
Penetration depth x_{d3}	22,0	20,9	21,2	mm
Penetration depth x_{d4}	21,9	21,1	20,8	mm
Penetration depth x_{d5}	22,1	21,0	21,0	mm
Penetration depth x_{d6}	23,5	21,1	20,0	mm
Penetration depth x_{d7}	23,6	21,3	21,3	mm
Remarks				

Test for Chloride Migration Coefficient according to NT BUILD 492

Specimen ID:	0 % FA 110112, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	57 days			
Date of test:	2011 03 10			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	17,2	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	5,5	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,1	47,1	46,9	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	20,0	20,0	20,0	V
Current at start I_i	79,00	77,00	74,00	mA
Temperature at start T_i	292,16	292,16	292,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	84,0	84,0	75,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	26,5	26,5	24,3	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	17,7	17,7	16,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	26,4	26,4	27,0	mm
Penetration depth x_{d2}	26,3	26,3	23,4	mm
Penetration depth x_{d3}	25,5	25,5	24,2	mm
Penetration depth x_{d4}	25,5	25,5	23,3	mm
Penetration depth x_{d5}	23,7	23,7	23,1	mm
Penetration depth x_{d6}	30,8	30,8	24,0	mm
Penetration depth x_{d7}	27,0	27,0	25,0	mm
Remarks	Prov II hade ingen inträngning. Värden från prov I används			

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	0 % FA 110330, vct=0,50			
Age at the start of test, day:	58 days			
Date of test:	2011 05 27			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	14,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	6,2	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	43,2	47,3	45,7	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	20,0	20,0	20,0	V
Current at start I_i	75,00	75,00	74,00	mA
Temperature at start T_i	297,16	297,16	297,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	67,0	67,0	65,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	22,9	20,4	23,5	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	14,1	13,5	15,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	22,9	20,3	24,0	mm
Penetration depth x_{d2}	23,0	20,0	23,5	mm
Penetration depth x_{d3}	22,8	21,0	23,0	mm
Penetration depth x_{d4}	22,5	20,5	23,4	mm
Penetration depth x_{d5}	22,7	20,2	24,2	mm
Penetration depth x_{d6}	23,0	20,0	22,5	mm
Penetration depth x_{d7}	23,5	20,7	24,0	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	6 % FA 110330, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	62 days			
Date of test:	2011 05 31			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	19,7	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,2	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	5,9	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,0	45,9	44,0	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	15,0	15,0	15,0	V
Current at start I_i	66,00	60,00	55,00	mA
Temperature at start T_i	292,16	292,16	292,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	63,0	58,0	53,0	mA
Temperature at end T_t	294,16	294,16	294,16	K
Average penetration depth x_d	21,6	22,0	25,0	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	19,0	19,0	21,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	20,6	21,0	25,0	mm
Penetration depth x_{d2}	22,1	21,5	25,5	mm
Penetration depth x_{d3}	22,3	22,5	24,7	mm
Penetration depth x_{d4}	21,9	22,7	24,0	mm
Penetration depth x_{d5}	22,0	23,0	25,5	mm
Penetration depth x_{d6}	21,5	22,0	25,6	mm
Penetration depth x_{d7}	21,0	21,5	24,8	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	11 % FA 110322 vct=0,40			
Age at the start of test, day:	64 days			
Date of test:	2011 05 25			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	11,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	9,3	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	46,2	47,0	46,6	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	53,00	56,00	55,00	mA
Temperature at start T_i	296,16	296,16	296,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	59,0	62,0	56,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	20,0	23,4	21,3	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	10,3	12,4	11,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	27,0	20,3	21,9	mm
Penetration depth x_{d2}	19,2	20,4	21,0	mm
Penetration depth x_{d3}	19,0	19,7	21,2	mm
Penetration depth x_{d4}	19,4	19,4	21,4	mm
Penetration depth x_{d5}	19,0	30,0	21,6	mm
Penetration depth x_{d6}	19,2	30,0	21,0	mm
Penetration depth x_{d7}	17,3	24,0	21,3	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	11 % FA 110113, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	61 days			
Date of test:	2011 03 15			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	12,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,2	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	9,8	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	44,3	49,3	46,8	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	63,00	54,00	60,00	mA
Temperature at start T_i	292,16	292,16	292,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	68,0	63,0	68,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	22,0	24,0	22,5	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	10,9	13,3	11,8	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	22,2	23,0	22,8	mm
Penetration depth x_{d2}	20,4	23,1	22,7	mm
Penetration depth x_{d3}	18,0	23,2	22,5	mm
Penetration depth x_{d4}	21,4	24,2	22,6	mm
Penetration depth x_{d5}	22,8	24,8	21,1	mm
Penetration depth x_{d6}	26,9	25,0	22,0	mm
Penetration depth x_{d7}	22,6	24,9	23,6	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	11 % FA 110322 vct=0,50			
Age at the start of test, day:	63 days			
Date of test:	2011 05 24			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	13,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,6	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	4,8	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	48,5	46,5	45,6	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	30,0	30,0	30,0	V
Current at start I_i	105,00	115,00	11,00	mA
Temperature at start T_i	293,16	293,16	293,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	82,0	93,0	93,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	27,0	30,5	30,8	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	12,3	13,5	13,4	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	26,9	30,6	31,0	mm
Penetration depth x_{d2}	28,0	30,0	30,8	mm
Penetration depth x_{d3}	26,0	30,2	30,0	mm
Penetration depth x_{d4}	26,5	30,0	30,2	mm
Penetration depth x_{d5}	26,6	29,8	31,0	mm
Penetration depth x_{d6}	26,9	31,2	31,2	mm
Penetration depth x_{d7}	28,0	32,0	31,5	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	18 % FA 110127, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	59 days			
Date of test:	2011 03 29			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	11,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	1,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	9,3	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	49,0	46,7	47,9	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	57,00	57,00	58,00	mA
Temperature at start T_i	292,16	292,16	292,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	58,0	61,0	61,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	22,1	20,9	19,0	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	12,0	10,9	10,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	22,4	21,0	19,4	mm
Penetration depth x_{d2}	22,3	20,9	17,8	mm
Penetration depth x_{d3}	22,0	18,9	19,0	mm
Penetration depth x_{d4}	21,9	20,8	19,1	mm
Penetration depth x_{d5}	21,3	23,0	18,9	mm
Penetration depth x_{d6}	21,4	21,0	18,3	mm
Penetration depth x_{d7}	23,6	20,7	20,6	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	25 % FA 110113, vct=0,40			
Age at the start of test, day:	62 days			
Date of test:	2011 03 16			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	8,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,8	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	9,9	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	48,6	46,4	47,4	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	30,0	30,0	30,0	V
Current at start I_i	52,00	53,00	48,00	mA
Temperature at start T_i	296,16	296,16	296,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	59,0	59,0	56,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	20,5	17,9	18,4	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	9,3	7,7	8,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	28,5	21,1	22,0	mm
Penetration depth x_{d2}	23,8	15,7	20,9	mm
Penetration depth x_{d3}	20,0	16,0	17,2	mm
Penetration depth x_{d4}	19,3	21,1	17,1	mm
Penetration depth x_{d5}	17,5	17,6	17,3	mm
Penetration depth x_{d6}	17,4	16,9	17,1	mm
Penetration depth x_{d7}	17,3	16,8	17,3	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	25 % FA 110118, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	63 days			
Date of test:	2011 03 22			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	8,6	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,6	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	6,7	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	46,6	44,6	48,9	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	50,00	51,00	52,00	mA
Temperature at start T_i	292,16	292,16	292,16	K
Test duration t	25,0	25,0	25,0	hr
Current at end I_t	52,0	64,0	58,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	17,6	17,0	17,8	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	8,6	8,0	9,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	16,5	19,5	19,1	mm
Penetration depth x_{d2}	23,4	17,3	15,0	mm
Penetration depth x_{d3}	18,9	16,7	17,2	mm
Penetration depth x_{d4}	17,6	15,0	17,2	mm
Penetration depth x_{d5}	16,5	14,5	23,5	mm
Penetration depth x_{d6}	15,1	19,2	15,9	mm
Penetration depth x_{d7}	15,0	17,1	16,9	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	25 % FA 110125, vct=0,50			
Age at the start of test, day:	58 days			
Date of test:	2011 03 24			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	13,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,5	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	3,9	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,3	48,3	46,2	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	66,00	63,00	66,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	76,0	70,0	74,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	26,5	25,9	25,3	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	14,2	14,2	13,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	30,4	24,1	27,8	mm
Penetration depth x_{d2}	26,8	24,2	23,6	mm
Penetration depth x_{d3}	26,9	24,1	24,0	mm
Penetration depth x_{d4}	27,1	24,2	24,5	mm
Penetration depth x_{d5}	24,2	28,6	24,7	mm
Penetration depth x_{d6}	25,0	28,5	26,2	mm
Penetration depth x_{d7}	25,3	27,8	26,5	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	33 % FA 110120, vct=0,45			
Age at the start of test, day:	62 days			
Date of test:	2011 03 23			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	9,0	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,6	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	6,3	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	45,0	48,1	47,9	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	30,0	30,0	30,0	V
Current at start I_i	59,00	54,00	57,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	68,0	66,0	69,0	mA
Temperature at end T_t	296,16	296,16	296,16	K
Average penetration depth x_d	19,9	21,1	20,5	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	8,3	9,4	9,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	26,3	21,5	21,6	mm
Penetration depth x_{d2}	18,4	20,0	20,8	mm
Penetration depth x_{d3}	18,5	21,3	19,6	mm
Penetration depth x_{d4}	18,3	21,7	19,7	mm
Penetration depth x_{d5}	18,5	20,0	19,5	mm
Penetration depth x_{d6}	20,0	21,7	20,0	mm
Penetration depth x_{d7}	19,6	21,5	22,2	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	0 % FA 110331, vct=0,45, CEM II			
Age at the start of test, day:	67 days			
Date of test:	2011 06 06			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	10,9	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	2,5	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,2	45,5	46,4	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	25,0	25,0	25,0	V
Current at start I_i	63,00	58,00	58,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	62,0	55,0	54,0	mA
Temperature at end T_t	295,16	295,16	295,16	K
Average penetration depth x_d	20,8	20,8	21,4	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	11,0	10,6	11,1	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	20,6	21,0	23,0	mm
Penetration depth x_{d2}	20,7	20,7	22,1	mm
Penetration depth x_{d3}	20,5	21,2	21,9	mm
Penetration depth x_{d4}	21,0	20,8	20,2	mm
Penetration depth x_{d5}	20,8	19,5	20,7	mm
Penetration depth x_{d6}	21,2	21,5	20,8	mm
Penetration depth x_{d7}	20,9	20,8	21,1	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	11 % FA 110331, vct=0,45, CEM II			
Age at the start of test, day:	69 days			
Date of test:	2011 06 08			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	9,6	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,6	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	6,2	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	46,6	45,6	46,0	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	30,0	30,0	30,0	V
Current at start I_i	57,00	58,00	58,00	mA
Temperature at start T_i	295,16	295,16	295,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	59,0	61,0	71,0	mA
Temperature at end T_t	300,16	300,16	300,16	K
Average penetration depth x_d	21,0	23,9	21,8	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	9,2	10,3	9,4	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	19,5	24,0	21,7	mm
Penetration depth x_{d2}	20,1	23,7	21,6	mm
Penetration depth x_{d3}	20,5	23,5	22,0	mm
Penetration depth x_{d4}	20,1	22,5	21,8	mm
Penetration depth x_{d5}	23,5	24,5	21,7	mm
Penetration depth x_{d6}	22,5	25,0	22,0	mm
Penetration depth x_{d7}	20,9	24,0	21,5	mm
Remarks				

**Test for Chloride Migration Coefficient
according to NT BUILD 492**

Specimen ID:	25 % FA 110406 vct=0,45, CEM II			
Age at the start of test, day:	64 days			
Date of test:	2011 06 09			
Tested by:	Anders Lindvall			
Mean value of D_{NTB492}:	6,3	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Standard deviation:	0,5	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficient of Variation:	8,7	%		
Specimen No.:	I	II	III	
Diameter d	100	100	100	mm
Thickness L	47,0	47,4	47,0	mm
Chloride concentration c_0	10	10	10	NaCl%
Applied potential U	35,0	35,0	35,0	V
Current at start I_i	44,00	41,00	45,00	mA
Temperature at start T_i	299,16	299,16	299,16	K
Test duration t	24,0	24,0	24,0	hr
Current at end I_t	57,0	59,0	55,0	mA
Temperature at end T_t	298,16	298,16	298,16	K
Average penetration depth x_d	16,8	18,1	15,5	mm
Migration coefficient D_{NTB492}	6,3	6,8	5,8	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Individual chloride penetration depths				
Penetration depth x_{d1}	14,3	18,0	16,7	mm
Penetration depth x_{d2}	15,0	18,6	16,5	mm
Penetration depth x_{d3}	15,3	19,0	16,0	mm
Penetration depth x_{d4}	15,5	17,8	13,5	mm
Penetration depth x_{d5}	18,0	18,0	18,2	mm
Penetration depth x_{d6}	18,3	17,5	12,5	mm
Penetration depth x_{d7}	21,0	17,7	14,9	mm
Remarks				